HAL
open science

Dynamique d'occupation anthropique et dynamique alluviale du Rhin au cours de l'Holocène: géoarchéologie du site d'Oedenburg (Haut-Rhin, France)

Vincent Ollive

To cite this version:

Vincent Ollive. Dynamique d'occupation anthropique et dynamique alluviale du Rhin au cours de l'Holocène: géoarchéologie du site d'Oedenburg (Haut-Rhin, France). Géomorphologie. Université de Bourgogne, 2007. Français. NNT : . tel-00684794v2

HAL Id: tel-00684794

https://theses.hal.science/tel-00684794v2

Submitted on 4 Apr 2012

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

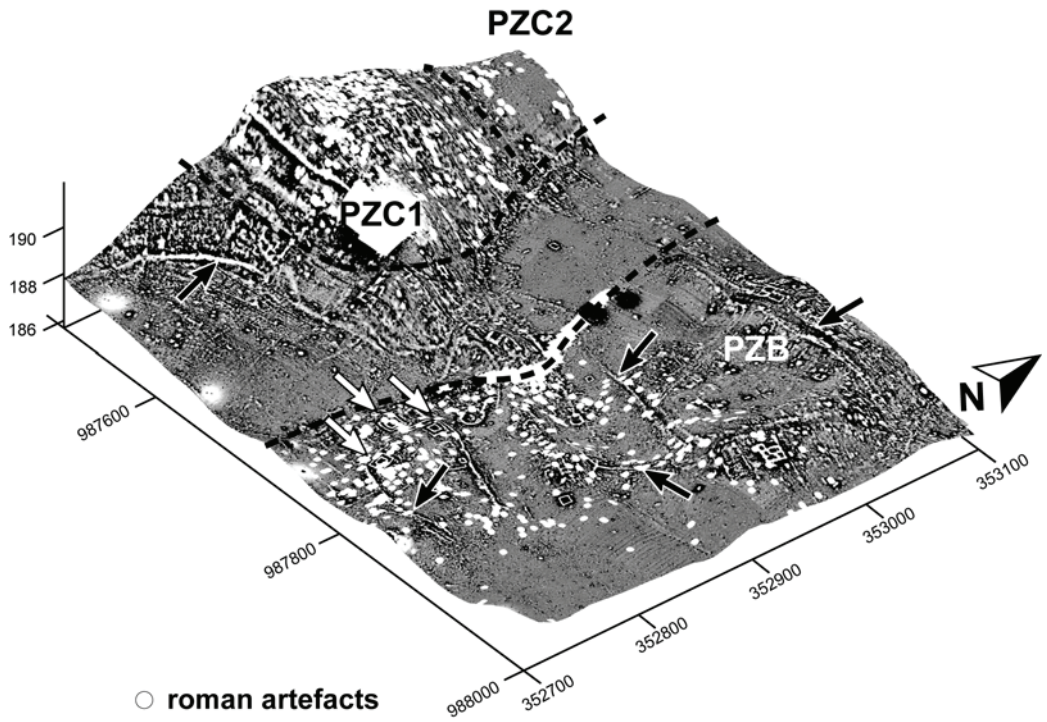
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Bourgogne, UFR des Sciences de la Terre, UMR CNRS 5561 « Biogéosciences »
Ecole doctorale Buffon

Thèse
pour obtenir le diplôme de
Doctorat en Sciences de la Terre

Dynamique d'occupation anthropique et dynamique alluviale du Rhin au cours de l'Holocène

Géoarchéologie du site d'Oedenburg (Haut-Rhin, France)



présentée par
Vincent OLLIVE

Soutenance le 17 décembre 2007 devant le jury composé de

Pascal Allemand, examinateur, Professeur, UMR 5570 Lyon.
Stéphane Bonnet, rapporteur, Maître de conférences, HDR, UMR 6118 Rennes.
Jean-Pierre Garcia, directeur de thèse, Professeur, UMR 5594, Dijon.
Christophe Morhange, rapporteur, Professeur, CEREGE, Aix-en Provence.
Christophe Petit, directeur de thèse, Maître de conférences, HDR, UMR 5594, Dijon.
Michel Reddé, examinateur, Professeur, Directeur de recherche, EPHE, Paris.

RESUME

Les relations existant entre la dynamique alluviale et les facteurs déterminants majeurs comme le climat demeurent assez bien maîtrisés et connues aux échelles de temps plurimillénaires et pluriannuelles. En revanche, il n'en est pas de même pour ces mêmes relations aux échelles pluricentennale et pluridécennale correspondant à l'échelle de l'occupation des plaines alluviales par les sociétés humaines. Pourtant, la compréhension de la dynamique alluviale est un enjeu majeur pour l'établissement de modèles, dans un contexte actuel ou l'occupation des plaines alluviales est susceptible d'être affecté par les fortes variations climatiques. Afin d'aborder cette question d'échelle, un segment du Rhin supérieur qui présente à la fois un style en tresses et un style en anastomoses a été sélectionné. Il offre la possibilité d'étudier à la fois les dynamiques d'occupation à haute résolution pour deux fenêtres temporelles clefs pour l'Holocène. L'époque romaine, marquée par l'anthropisation du milieu et des variations climatiques encore peu connues est mise en parallèle avec la fin du Petit Age Glaciaire, où l'occupation et le climat sont documentés avec une grande fiabilité.

Un large spectre méthodologique a été engagé intégrant à la fois la géomorphologie, la stratigraphie, la géophysique, le S.I.G., la palynologie, la dendrochronologie et l'archéologie. Cela a permis la mise en évidence :

1/ des variations de la fréquence des inondations du Rhin, parfois asynchrones avec d'autres bassins-versants français, ce qui atteste d'un contrôle prépondérant des caractéristiques intrinsèques des bassins-versants et du type de régime sur la dynamique hydrologique à long terme.

2/ des changements de la dynamique alluviale rhénane au cours du Petit Age Glaciaire. La géométrie de la plaine alluviale, le couvert végétal riverain, l'utilisation du sol, l'occupation anthropique sont décrits qualitativement et de façon quantitative pendant cette période précédant les aménagements anthropiques majeurs du 19ème siècle. Ces résultats permettent de proposer les rôles respectifs des facteurs de contrôle majeurs à différentes échelles de temps et d'espace.

3/ des caractéristiques propres au paysage alluvial dans lequel le site d'Oedenburg s'est installé.

4/ des dynamiques d'occupation complexes au cours de l'antiquité pouvant être contrôlées par des contraintes historiques mais aussi par des contraintes environnementales. Quatre phases d'occupation majeures ont été mises en évidence grâce à l'analyse spatiale des monnaies romaines.

5/ des variations de la dynamique alluviale du Rhin au cours de l'antiquité se traduisant par des variations de la hauteur de la nappe phréatique mais aussi par l'occurrence de crues.

Mots-clefs :

Archéologie, Cartes anciennes, Forêts alluviales, Inondations, Géomorphologie, Géoradar, Monnaies romaines, Prospections géomagnétiques, Prospections pédestres, Rhin supérieur, Sédimentologie, Stratigraphie, Système d'information géographique, Tomographie électrique.

ABSTRACT

The relationship between alluvial dynamics and control parameters such as climate are well known and understood at plurimillennial and pluriannual time-scales. But it is not really the case at multicentennial and multidecennal time-scales compatible with human society settlement time-scales.

In a present and near future context, when human settlement may be affected by strong climatic variation, alluvial dynamics understanding is however a major centre of attention to the development of efficient models.

To approach this scale-related question, a segment of the Upper Rhine River presenting both anastomosed and braided was investigated. This area also gives us the opportunity to study settlement dynamics during two key periods of the Holocene. The Roman Period characterised by a first major anthropogenic impact on the environment and poorly documented climatic changes. The Little Ice Age, when human settlement and climate may be well documented with high reliability.

A wide methodological approach has been completed to combine results from geomorphology, stratigraphy, geophysics, G.I.S., palynology, dendrochronology and archaeology. This dataset shows:

1/ documentary flood frequency variations of the Rhine River during the last 800 years. These chronological variations show some dissimilarity with other French rivers reconstructed documentary flood series. That attests a primary control of catchment's characteristics and regime type on long term hydrological dynamics.

2/ changes in the Rhine River and floodplain dynamics during Little Ice Age before major anthropogenic river management of 19th century. Planform changes, riverine forest, land use evolution, and anthropological settlement processes are described and quantified. These results allow the identification of major stratigraphic agent factors role responsible of these changes.

3/ the alluvial landscape character where the Oedenburg site settled, together with the evolution of the riverine forest influenced by the Rhine River hydrodynamics.

4/ of settlement dynamics during Antiquity. Four major settlement phases have been evidenced by spatial distribution analysis of roman coins found by pedestrian prospecting during the last twenty years. Settlement dynamics may have been influenced by either historical or environmental impacts.

5/ variations in alluvial dynamics of the Rhine River during Antiquity such as high water table or flooding events.

Key words:

Alluvial forests, Archaeology, Ancient maps, Electrical Tomography, Floods, Geographic Information System, Geomorphology, Ground Penetrating Radar, Magnetic prospecting, Pedestrian prospecting, Sedimentology, Stratigraphy, Upper Rhine,

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à ceux qui m'ont apporté leur aide et leur soutien au cours de la réalisation de ce travail.

Je remercie vivement l'ensemble des membres du Jury, Messieurs Pascal Allemand, Stéphane Bonnet, Christophe Morhange et Michel Reddé de me faire l'honneur de juger ce travail.

Je remercie également mes directeurs de thèse, Jean-Pierre Garcia et Christophe Petit.

Je remercie Bruno David et Pascal Neige directeurs successifs de l'UMR UB-CNRS 5561 « Biogéosciences », pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

J'exprime mes remerciements à l'ensemble du personnel du Centre des Sciences de la Terre de l'Université de Bourgogne.

Ma gratitude va aussi aux personnes que j'ai eu la chance de rencontrer et lors de mes missions ou qui, en diverses situations, m'ont apportés leur aide, par leurs connaissances et leurs conseils : Farouk Azzaz, Vincent Bichet, Patrick Biellmann, Rodolphe Bouillot, Julien Bourdet, Samuel Brassaud, Jean-François Buoncristiani, Carmela Château-Smith, Bruno Chaume, T. Choné, Hélène Criaud, Benoit Forel, Julien Curie, Gunter J. Eble, Maréva Gabillot, le G.I.G.R., Francesca Ginella, Olivier Girarclos, Bastien Gissinger, Dominique Goguey, Stefanie Jacomet, Thierry Kilka, Jean-Claude Lefebvre, Rémy Martineau, Fabrice Monna, Claude Mordant,Julien Pellissier, Suzanne Plouin, Laurent Popovitch, Franck Rémond, Hervé Richard, Laure Saligny, Jörg Schibler, Cathy Schucany, Peter-Andrew Schwartz, J.-P. Thevenot, Patricia Vandorpe, Françoise Vannier-Petit, Thomas Vigreux.

J'adresse un salut complice à mes camarades doctorant (ancien et actuels) de Dijon : J. Brenot, A. Buta-Neto, A. Combaud, P.-Y. Collin, S. Couette, F. Cruz, M. Denis, E. Dewerdt, S. Doublet, C. Fesneau, E. François, S. Gerber, N. Kelome, L. Lambert, D. Landry, S. Laratte, B. Marie, O. Mathieu, S. Moyne, E. Nardin, N. Navarro, A. Pierre, E. Renvoisé, I. Rouget, S. Sarih, T. Saucède, T. Tavares, M. Thevenot.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du Laboratoire des Sciences de la Terre à Lyon qui m'ont accompagnés dans cette dernière année et plus particulièrement :
P. Allemand, M. Chollet, N. Coltice, I. Daniel, F. Dubuffet, N. Flament, E. Gardin, M.-P. Guinet, J. Kaperski, H. Lelloup, G. Mahéo, Y. Ricard, A. Rozel.
Je remercie également pour leur soutien mes amis méridionaux Thierry et Perrine, ma famille, ma sœur, Nicole et Jean Cheylan, D. Dutel, Clément et Delphine. Enfin, *Last but not least*, je remercie Emmanuelle garante de mon équilibre!

« Le Rhin réunit tout. Le Rhin est rapide comme le Rhône, large comme la Loire, encaissé comme la Meuse, tortueux comme la Seine, limpide et vert comme la Somme, historique comme le Tibre, royal comme le Danube, mystérieux comme le Nil, pailleté d'or comme un fleuve d'Amérique, couvert de fables et de fantômes comme un fleuve d'Asie. »

Victor Hugo, 1841. Le Rhin, Lettres à un ami.

SOMMAIRE

RESUME 3
ABSTRACT 4
SOMMAIRE 9
INTRODUCTION 13

CHAPITRE 1 : Contexte géologique et géomorphologique du graben du Rhin, et hydrologie du Rhin 19
1. Géologie du graben du Rhin 21
2. Géomorphologie de l'Alsace 27
2.1. La région de la Hardt 27
2.2. Les Rieds 27
2.3. Les forêts alluviales 29
2.3.1. Le stade forestier pionnier 29
2.3.2. Le stade forestier intermédiaire 31
2.3.3. Le stade forestier terminal 32
2.3.4. La succession forestière du Rhin 32
3. Le Rhin 35
3.1. Le bassin-versant du Rhin 35
3.2. L'hydrologie du Rhin 37
3.3. Les crues 37

CHAPITRE 2 : Dynamique alluviale du Rhin au cours des périodes historiques recentes 39
1. Dynamique historique du paysage 43
1.1. Objectifs de l'étude des cartes anciennes 43
1.1.1. Les aménagements de la plaine du Rhin 45
1.1.2. L'impact des aménagements du Rhin sur la végétation riveraine 45
1.1.3. Le cadre de l'étude 47
1.2. Le choix de la zone d'étude 49
1.2.1. Les aménagements anthropiques 49
1.2.2. Le style en tresses et en anastomoses du Rhin 51
1.2.3. Les forêts naturelles rhénanes 53
1.2.4. Le choix des cartes 53
1.3. Résultats 55
1.3.1. L'état au 17ème siècle : approche qualitative 55
1.3.2. L'état au 18ème siècle : approche quantitative 57
1.3.3. La dynamique des chenaux 75
1.4. Discussion 79
1.4.1. Cinétique des changements 79
1.4.2. Les caractéristiques à long terme 79
1.4.3. Le rôle de la végétation 80
1.4.4. Le rôle du Climat 81
1.4.5. Le rôle de l'Homme 83
1.4.6. Bilan du jeu des facteurs 84
1.5. Conclusion 85

2. L'évolution de la fréquence des inondations du Rhin d'après les sources documentaires 87
2.1 Introduction 87
2.1.1. Les objectifs de l'étude 87
2.1.2. Les sources documentaires 89
2.1.3. Historique de la méthode 90
2.1.4. La documentation disponible 91
2.2. Résultats 92
2.2.1. Le codage des données d'inondations 92
2.2.2. Mode de description des résultats 93
2.2.3. Les variations de fréquence des inondations 94
2.3. Discussion 105
2.4. Conclusion 110
3. Les acquis de ce chapitre 111

CHAPITRE 3 : Le site d'Oedenburg 113
1. L'occupation connue du site 115
1.1. De la découverte à aujourd'hui 115
1.2. Les prospections pédestres 119
1.3 Le site en Alsace romaine 120
2. L'approche Géomorphologique 123
2.1. Objectifs de l'approche géomorphologique 123
2.2. Le paysage alluvial actuel 124
2.2.1 Les photos aériennes redressées 124
2.2.2. La topographie du site d'Oedenburg 135
2.3. La ville antique et son occupation dans le paysage alluvial 145
2.3.1. Les apports de la prospection magnétique à l'établissement du plan diachronique de la ville antique 145
2.3.2. Distribution spatiale du mobilier : le cas des monnaies romaines 153
3. L'approche environnementale 162
3.1. Objectifs de l'approche environnementale 169
3.2. Impact du climat, de la forêt riveraine et de l'occupation humaine sur la dynamique alluviale du Rhin au cours de l'Holocène et notamment durant la periode antique 171
3.2.1. Introduction 171
3.2.2. Le paléochenal occidental 171
3.2.3. Le paléochenal oriental et la zone des temples 207
3.3. Enregistrement stratigraphique anthropisé 239
3.3.1. Avant propos et résumé 239
3.3.2. Rhine floods deposits recorded on the Gallo-Roman site of Oedenburg (Haut-Rhin, France) 241
3.3.3. Milieux humides et aménagements anthropiques dans la plaine du rhin : le site romain d'Oedenburg (Haut-Rhin) 255
4 Les acquis de ce chapitre 272

CONCLUSION 273
BIBLIOGRAPHIE 281
TABLE DES MATIERES 299

INTRODUCTION

Les cours d'eau font l'objet d'une importante somme d'études scientifiques touchant aussi bien à l'écologie, à l'hydrologie ou encore à la géologie. Ils sont considérés à juste titre comme des éléments majeurs dans la structuration de l'occupation humaine et de son activité à travers le monde. Les dépôts sédimentaires des plaines alluviales anciennes correspondent souvent à des réservoirs d'hydrocarbures ou aquifères ainsi qu'à d'autres ressources exploitables. Ces enjeux les placent au centre des attentions économiques et géopolitiques dans le contexte en cours de modifications environnementales majeures liées à la fois aux aménagements anthropiques mais aussi au climat.

Les dernières années ont vu d'ailleurs se développer des modèles prédictifs ainsi que des plans d'aménagement basés sur des données hydrologiques instrumentales afin de mieux appréhender les risques futurs dans les plaines alluviales (Arnell, 1999). Cependant les réponses des rivières aux contraintes comme le climat ou l'anthropisation sont complexes et les données utilisées pour les modèles sont insuffisamment longues (période instrumentale) et demeurent faiblement distribuées spatialement (e.g. Baker, 2003 ; Gregory, 2003 ; Gregory et al., 2006a et 2006b). En effet, les relations existant entre la dynamique alluviale et les facteurs déterminants majeurs comme le climat ou la tectonique demeurent bien connues sur des échelles de temps plurimillénaires et pluriannuelles (Starkel et al., 1991 ; Starkel, 2002 ; Vandenberghe, 2002 ; Bridge, 2004). En revanche, il n'en est pas de même pour ces mêmes relations aux échelles pluricentennales et pluridécennales correspondant à l'échelle de l'occupation des plaines alluviales par les sociétés humaines. Dans l'objectif de combler une partie de ces lacunes, des travaux ont été consacrées au développement de la paléohydrologie permettant d'intégrer les résultats de disciplines distinctes (e.g. Bradzil et al, 1999, Benito et al., 2004 ; Bradzil et al., 2005 ; Starkel et al., 2006).

C'est sans nul doute ce type d'approche à l'échelle intermédiaire qu'il faut privilégier, non seulement pour la compréhension des rôles joués respectivement par les facteurs de contrôle mais aussi de l'impact important par rapport à l'occupation humaine. Le lien entre ces facteurs et les modalités d'occupation sont encore à explorer.

Les systèmes alluviaux à chenaux multiples sont présents dans nombres de régions du monde. Ils sont caractérisés par plusieurs chenaux présentant une géométrie en plan en tresses ou en anastomoses. Ces types de cours d'eau sont le siège d'un fort transport sédimentaire, de dépôt et d'érosion et sont donc soumis à de nombreuses transformations au cours du temps. Ils ont cependant été nettement moins étudiés que leurs homologues présentant un style en méandres (Bristow et Best, 1993). Cette différence est probablement due à la difficulté d'observer sur le terrain les modifications de formes rapides et complexes existant surtout dans le style en tresse mais elle tient également aux problèmes de classification et de nomenclature des rivières à chenaux multiples en général (e.g. Lane, 1957 ; Leopold et Wolman, 1957 ; Schumm, 1977 ; Smith et Smith, 1980 ; Bristow, 1987 ; Bridge, 1993 ;

Knighton et Nanson, 1993). De ce fait, ce n'est que depuis peu de temps que ces objets sont étudiés de façon quantitative (e.g. Ashmore, 1982 et 1991 ; Murray et Paola, 1994 ; Lunt et al., 2004).
Dans ce contexte, il reste donc important de préciser certains aspects de la dynamique sédimentaire dans les systèmes en tresses et en anastomoses comme les mécanismes et la durée de formation et d'évolution des barres, les transitions d'un style à un autre, les co-évolutions et interactions entre les dynamiques alluviale, végétale, climatique à des échelles de temps intermédiaires…

L'Holocène constitue une période clef pour l'étude des relations entre le climat et la dynamique sédimentaire des plaines alluviales. Cela est essentiellement dû aux variations climatiques rapides qui se sont produites au cours de ces 11000 dernières années (e.g. Stuiver et Braziunas, 1993 ; Starkel, 2002 ; Mayewski et al., 2004). Cette période est également caractérisée par l'accentuation de l'influence de l'homme sur son environnement. Ainsi, au cours de cette courte période géologique, plusieurs événements climatiques majeurs sont documentés et leurs impacts peuvent être mis en relation avec l'évolution des sociétés humaines.
L'époque romaine et l'époque moderne figurent parmi les périodes de l'Holocène les plus intéressantes de ce point de vue. En effet, la première permet d'étudier l'anthropisation du milieu en relation avec un environnement alluvial et climatique encore peu documenté tandis que la seconde constitue un modèle au cours duquel les variations climatiques du Petit Age Glaciaire et la dynamique d'occupation sont documentées avec une grande fiabilité.

Pour mener à bien cet ensemble de problématiques, un segment de la plaine du Rhin supérieur situé au Sud du Kaiserstuhl a été sélectionné. Ce secteur d'étude bénéficie de plusieurs caractéristiques qui permettent d'appréhender les interactions entre la dynamique alluviale et la dynamique d'occupation anthropique au cours des deux fenêtres temporelles clefs précitées. En effet, ce segment se place dans un secteur du Rhin caractérisé par la coexistence des deux styles alluviaux en tresses et en anastomoses. Cette partie du Rhin est également connue pour présenter une succession de la végétation riveraine organisée à la fois longitudinalement et transversalement en fonction de la dynamique du fleuve. De plus, un site archéologique datant de l'époque romaine, Oedenburg, est actuellement en cours de fouille. Ces opérations menées depuis plusieurs années comblent un vide dans la connaissance de la romanisation de l'Alsace qui était jusque là seulement documentée par les sites de Strasbourg au Nord et de Bâle au Sud. Les mécanismes de l'occupation de la plaine alluviale peuvent donc être étudiés en relation avec la dynamique du Rhin sur les quatre premiers siècles de notre ère. Ce secteur de l'Alsace présente également une importante couverture documentaire au cours de l'époque moderne et en particulier au cours du Petit Age Glaciaire permettant une reconstitution à la fois de la dynamique du paysage mais aussi des inondations.

Ce mémoire présente les résultats de l'étude géoarchéologique du site d'Oedenburg dans la plaine du Rhin supérieur. **Le travail présenté tente d'analyser les interactions entre la dynamique du Rhin et les dynamiques d'occupation anthropique au cours de deux périodes clefs de l'Holocène, permettant une approche à des échelles spatiales et temporelles compatibles.**

Pour rendre compte de la démarche engagée, le mémoire a été divisé en trois chapitres. L'étude part du contexte géologique, géomorphologique et hydrologique actuel de la plaine du Rhin supérieur, puis se déplace vers une description de l'évolution du paysage alluvial et de la fréquence d'inondation du Rhin au cours de la période du Petit Age Glaciaire. Enfin, l'enregistrement sédimentaire de la dynamique du Rhin au cours de l'époque romaine est abordé.

Le premier chapitre correspond à un aperçu du contexte géologique et géomorphologique du secteur du Rhin supérieur. Il rappelle au lecteur les principales caractéristiques hydrologiques du Rhin avec un accent donné sur l'évolution du type de régime du Rhin d'amont en aval et les caractéristiques du paysage alluvial rhénan. Ce chapitre consiste donc en une présentation de l'objet étudié et des relations étroites entre le paysage alluvial - notamment composé de stades forestier riverains différenciés - et l'hydrologie du Rhin. Il s'articule donc en premier lieu autour de la géologie et du contexte tectonique du graben du Rhin puis en second lieu autour du paysage alluvial alsacien si spécifique dans son organisation spatiale, et enfin autour du Rhin lui-même et de son hydrologie.

Le deuxième chapitre du mémoire est consacré à l'étude de la dynamique historique du paysage et du Rhin, à partir de données documentaires ou de travaux historiques. Ce chapitre s'articule en deux parties en fonction de la donnée étudiée. La première partie examine donc l'évolution du paysage alluvial au cours des 16ème, 17ème et 18ème siècles dans le secteur de Vieux-Brisach/ Kunheim, lorsque le Rhin était encore fonctionnel. Les plans et cartes datant de ces époques ont été utilisés et ont permis de reconnaître les différentes unités du paysage ainsi que leur évolution au cours du temps. La seconde partie traite de l'évolution de la fréquence des inondations du Rhin au cours des cinq derniers siècles correspondant ainsi à une partie du Petit Age Glaciaire. Cela permet d'établir une mise en parallèle avec les séries reconstruites pour d'autres cours d'eau français au cours de la même période.

Le troisième chapitre du mémoire rassemble les résultats de l'étude géoarchéologique menée sur le site gallo-romain d'Oedenburg. Il est composé de deux parties distinctes, la première traitant de la géomorphologie du site et de sa dynamique d'occupation, la seconde, de l'enregistrement de la dynamique sédimentaire des différents paléochenaux du site ainsi que des inondations du Rhin à l'époque antique. Au cours de la première partie, plusieurs types d'approche sont adoptés comme l'analyse des photographies aériennes, le relevé topographique de la zone d'étude, la cartographie magnétique de la ville antique, l'analyse de la répartition spatiale des monnaies romaines. La seconde partie présente les résultats acquis par la réalisation de fouilles, de tranchées géoarchéologiques, de prospections géophysiques et de forages dans les paléochenaux du Rhin. Cet ensemble de données permet de présenter l'histoire à la fois alluviale et anthropique du site d'Oedenburg.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DU GRABEN DU RHIN, ET HYDROLOGIE DU RHIN

1. GEOLOGIE DU GRABEN DU RHIN

Le graben du Rhin supérieur est une partie remarquable d'une unité géographique majeure à l'échelle de l'Europe se développant de Bâle (Suisse) au Sud jusqu'à Mayence (Allemagne) au Nord. Cette unité correspond à un grand bassin d'effondrement qui se développe en avant et au Nord de la chaîne alpine. Ce rift continental présente une orientation NNE-SSO et s'étend sur plus de 300 kilomètres de long. La largeur moyenne de ce fossé est d'une quarantaine de kilomètres, ce qui atteste d'un faible déplacement crustal. Dans sa partie Sud, le graben du Rhin est bordé respectivement à l'Ouest et à l'Est par les montagnes des Vosges et de la Forêt Noire (*Schwarzwald*) dont les sommets culminent à plus de 1000 m et sont dominés par le grand ballon d'Alsace (1423 m). Au Sud, le graben du Rhin est bordé par les collines du Sundgau correspondant à un horst qui s'adosse au Jura et où l'altitude est supérieure à 300 m. Entre les secteurs de plaine et de montagne, les collines sous vosgiennes se développent entre 300 et 500 m (Duprat et al., 1979). Les variations de pentes sont très marquées entre ces différents domaines.

Le graben du Rhin est considéré comme présentant la morphologie type de ce qu'est un graben dans la nomenclature géologique (Illies, 1974a). C'est en 1841 que le géologue français Elie de Beaumont (Illies, 1974a) reconnaît, le premier, que les Vosges et la Forêt Noire forment une grande voûte dont la crête est tronquée par la bande formée par la plaine alluviale du Rhin située plus bas. Ce n'est que bien plus tard, avec l'évolution des concepts, que les mécanismes de rifting continentaux comme celui du graben du Rhin supérieur ont été universellement admis.

Les principales unités géologiques de cette partie du graben du Rhin couvrent plusieurs périodes géologiques allant des roches hercyniennes jusqu'aux dépôts alluviaux holocènes en passant par les séries carbonatées et gréseuses datant du mésozoïque (Figure 1.1).

Dans la partie Sud-Ouest de l'Alsace se dressent les Vosges dites hercyniennes tandis qu'à l'Est se développe le massif de la Forêt-Noire présentant des formations identiques mais d'extension géographique un peu différente. Les terrains pré-hercyniens correspondent à des formations essentiellement gneissiques et schisteuses, tandis que les formations hercyniennes sont dominées par les granites. Les formations permiennes et mésozoïques se présentent sous la forme d'une série continue allant du Permien au Jurassique, mais contenant des lacunes pour le Crétacé.

La série triaso-jurassique est observable dans la plus grande partie de l'Alsace. L'histoire géologique du graben du Rhin supérieur a été détaillée par de nombreux auteurs depuis le 19ème siècle (Sittler, 1969 ; Illies, 1974b et 1977 ; Pflug, 1982).

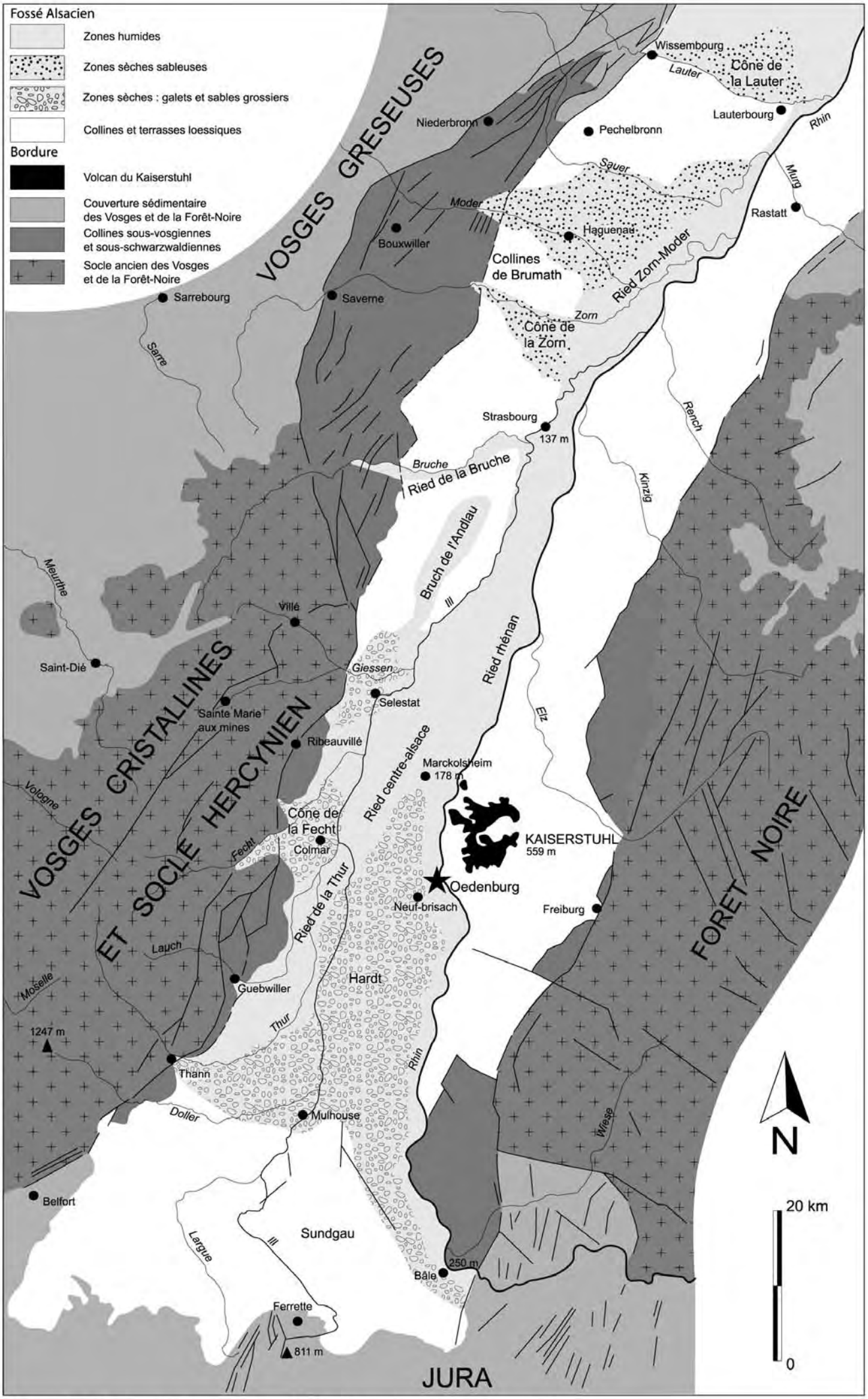


Figure 1.1: Carte géologique simplifiée du graben du Rhin supérieur.

Au cours du Cénozoïque, de la fin de l'Eocène jusqu'à l'époque actuelle, l'ouverture du graben se produit de façon contemporaine avec le dépôt de séries sédimentaires. L'activité tectonique n'a pas été continue tout au long de cette période. La phase majeure d'ouverture et de subsidence s'est produite au cours de l'Oligocène et du Miocène, périodes au cours desquelles se sont déposés près de 1300 m de sédiments. Au centre du graben du Rhin supérieur, se place le massif volcanique du Kaiserstuhl dont l'activité présente un paroxysme au cours du Miocène (Mäckel et Seidel, 2003). La figure 1.2 présente les grandes phases du rifting jusqu'à nos jours.

Au cours du Plio-Quaternaire (2 Ma), plus de 200 m de galets et de graviers rhénans d'origine alpine se sont accumulés constituant un très large réservoir hydrologique (nappe phréatique du Rhin) exploité pour l'alimentation en eau des principales agglomérations alsaciennes. L'épaisseur de ces sédiments est très variable et on distingue deux dépôt centres majeurs au Nord et au Sud du graben du Rhin (Théobald, 1948 ; Bartz, 1974 ; Hagedorn, 2004).

Bien que l'épaisseur de cette formation soit importante à l'échelle du graben du Rhin, le taux de sédimentation moyen ne représente cependant guère plus de 0,1 mm par an au cours des deux derniers millions d'années. La figure 1.3 met en évidence le rôle de la subsidence au cours des périodes récentes. La zone d'étude correspondant au site d'Oedenburg se place dans l'une de ces zones subsidentes du graben du Rhin supérieur, au Sud-Ouest du Kaiserstuhl.

Le paysage actuel de la plaine d'Alsace intègre donc tous ces éléments de l'histoire géologique de l'Europe. Au centre de cet ensemble, la plaine rhénane actuelle s'abaisse de 250 m à Bâle à 130 m à Lauterbourg sur une distance de 160 km. Le profil longitudinal montre la position de la terrasse weichsélienne par rapport à la plaine d'inondation holocène et met en évidence le caractère discontinu du taux de sédimentation dans la plaine du Rhin supérieur au cours du Quaternaire. Le secteur d'étude se place dans une position intermédiaire entre une zone amont, vers Bâle, où la terrasse est élevée de plusieurs mètres et une zone aval, vers Strasbourg, où les dépôts holocènes scellent les formations pléniglaciaires.

A l'heure actuelle, les contreforts vosgiens sont fortement entaillés par des rivières qui débouchent au niveau des principales villes alsaciennes (Colmar, Ribeauvillé, Strasbourg). Ces rivières ont déposé de puissants cônes alluviaux particulièrement actifs pendant les phases glaciaires : par exemple, la Fecht et la Weiss ont déposé un large cône graveleux sur lequel sont implantées la ville de Colmar et ses vignes. En revanche, le massif de la Forêt-Noire qui montre un réseau hydrographique orienté principalement vers le Neckar plus à l'Est, constitue une véritable barrière. Sur 5 à 6 km de large, les bordures du fossé alsacien sont constituées par des plateaux calcaires fortement fracturés, des conglomérats oligocènes et les cônes alluviaux quaternaires. Des placages de loess (dépôt éolien) mis en place lors de la dernière glaciation, parfois épais de 4 à 5 m de puissance, confèrent à ces régions de très bonnes qualités agronomiques.

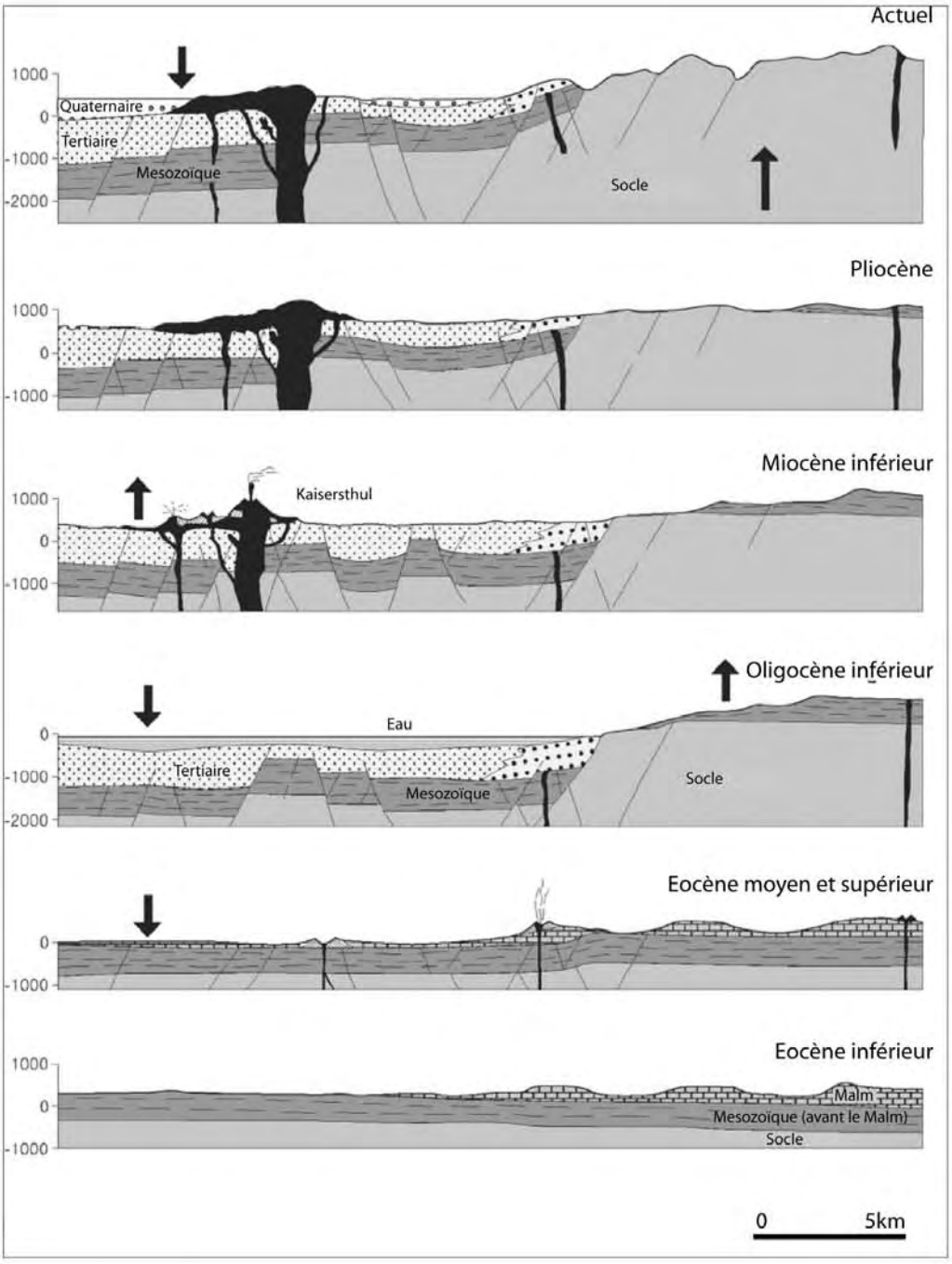


Figure 1.2 : Evolution tectonique et morphologique du graben du Rhin supérieur (modifié d'après Mäckel et Seidel, 2003)

Enfin, l'activité tectonique n'est pas achevée puisqu'au cours des périodes récentes de nombreux séismes se sont produits et ont causé de multiples dégâts dans cette région densément peuplée et industrialisée (Fäh et al., 2003, 2006 ; Edel et al., 2006), parmi lesquels le fameux tremblement de terre de Bâle en 1356 (Meghraoui et al., 2001 ; Lambert et al., 2005).

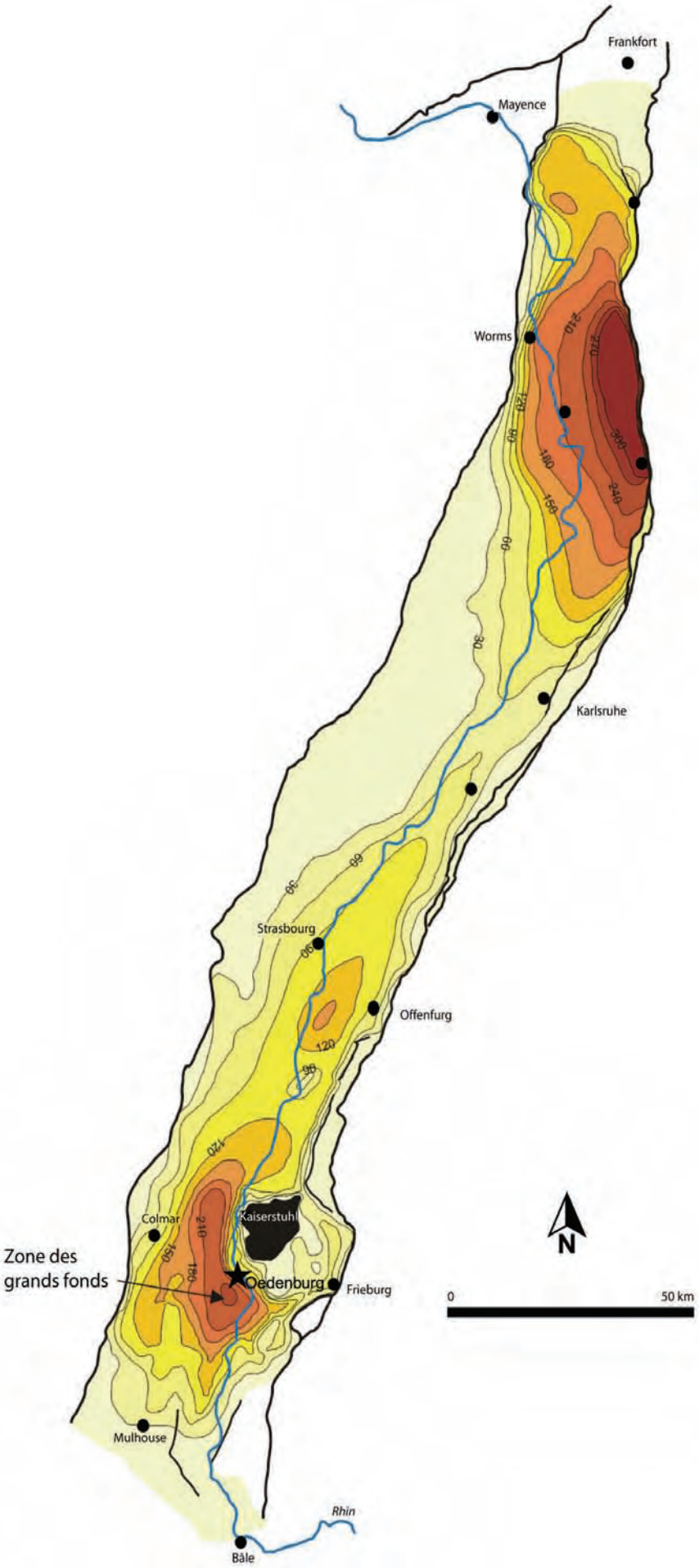


Figure 1.3 : Carte de l'épaisseur des sédiments quaternaires dans le graben du Rhin supérieur. Les deux zones de dépôts principaux, où s'accumulent plus de 200 mètres de sédiments, se situent respectivement au sud du Kaiserstuhl et à la latitude de Worms. Le secteur d'étude est localisé dans la partie sud du graben du Rhin supérieur à proximité de la "Zone des grands fonds" (Théobald, 1948). Modifié d'après Hagerdorn (2000).

2. GEOMORPHOLOGIE DE L'ALSACE

Dans la plaine alsacienne, large d'une vingtaine de kilomètres, s'étendent les plaines alluviales du Rhin à l'Est et de l'Ill à l'Ouest. Elles sont séparées par un cône alluvial formé au cours du Weichsélien (Blanalt et al., 1974 ; Théobald et al., 1978). L'évolution de ces formations alluviales au cours de l'Holocène permet l'individualisation d'unités géomorphologiques grâce aux caractéristiques géologiques et pédologiques.
Ainsi, deux régions naturelles peuvent être distinguées : La Hardt et les Rieds (Figure 1.4).

2.1. LA REGION DE LA HARDT

Elle s'étend entre les plaines alluviales de l'Ill et du Rhin et les domine d'une dizaine de mètres. Le sommet de cette formation alluviale weichsèlienne a subi, depuis le Postglaciaire, une pédogenèse donnant un sol argileux brun rouille avec indurations carbonatées (calcrètes) en profondeur (Hardt rouge). Ce sol est, par endroit, raviné par les crues du Rhin laissant apparaître, à l'affleurement, le niveau carbonaté (Hardt grise). Le site d'Oedenburg se situe à l'Est de cette formation. Dans le détail, l'organisation spatiale des sols de la Hardt est complexe. On distingue les sols rouges (Hardt rouge), les sols sur poudingues, et les sols loessiques. De plus, ces sols sont par endroits ravinés par les crues du Rhin laissant apparaître à l'affleurement le niveau carbonaté (Hardt grise).
La nappe phréatique circule en profondeur dans cet épais cône graveleux et par conséquence, sa surface est souvent sèche : la Hardt est donc occupée par une forêt xérothermique où se développe une chênaie charmaie ou une chênaie à chêne pubescent (Sell et al., 1998). Le site d'Oedenburg se situe sur la marge orientale de cette unité morphologique.

2.2. LES RIEDS

Le Ried, terme alsacien, correspond à une zone humide. Le biotope qui lui est associé est particulièrement influencé par la microtopographie et le niveau piézométrique. Dans la plaine d'Alsace, et particulièrement dans le secteur de Colmar, se développe un nombre important de zones humides et d'anciens chenaux holocènes du Rhin et de l'Ill fréquemment inondés, composés d'alluvions fines, riches en matière organique et formant le Ried Centre Alsace.
D'Est en Ouest, il est possible de distinguer cinq types de Ried différents caractérisés essentiellement par la variation pédologique (Carbiener, 1969, 1997 ; Sell et al., 1998).
Le Ried blond est une région dont les sols sont jeunes et peu évolués, constitués de sables et limons carbonatés de teinte claire, d'origine rhénane.

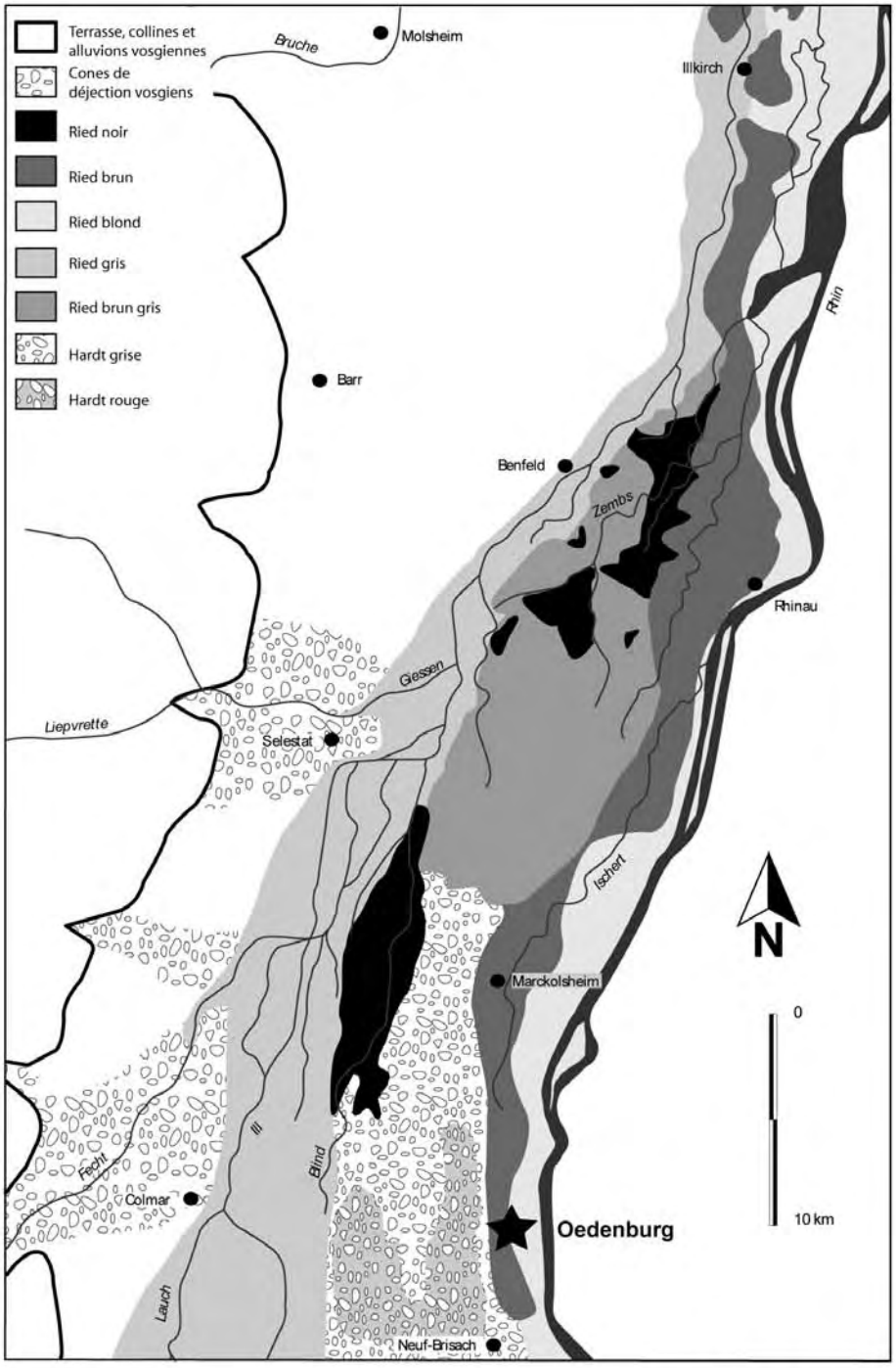


Figure 1.4 : Carte géomorphologique simplifiée de la plaine d'Alsace.

Le Ried brun présente des sols à horizon humifère actif, peu épais, pauvre en matière organique et de couleur brune en raison de l'état d'oxydation du fer issu de la couche de gley sous-jacente. Il correspond aux levées terrasses séparant l'Ill et le Rhin, en position non inondable.
Le Ried noir présente des sols de couleur sombre très riches en matière organique. L'horizon humifère est tourbeux ou de type « Anmoor ». Il repose sur une couche de gley dont la couleur varie en fonction du niveau de la nappe phréatique et constitue une grande partie du Ried de la Zembs et de la Blind.
Le Ried brun gris, se place géographiquement entre le Ried gris et le Ried brun du Nord de Marckolsheim jusqu'au Nord de Benfeld, et correspond à un sol de transition de teinte brune. Enfin, le Ried gris est un sol très évolué, riche en éléments minéraux apportés par les inondations de l'Ill et reposant sur une couche de gley. La forte humidité résulte de la proximité de la nappe aquifère.

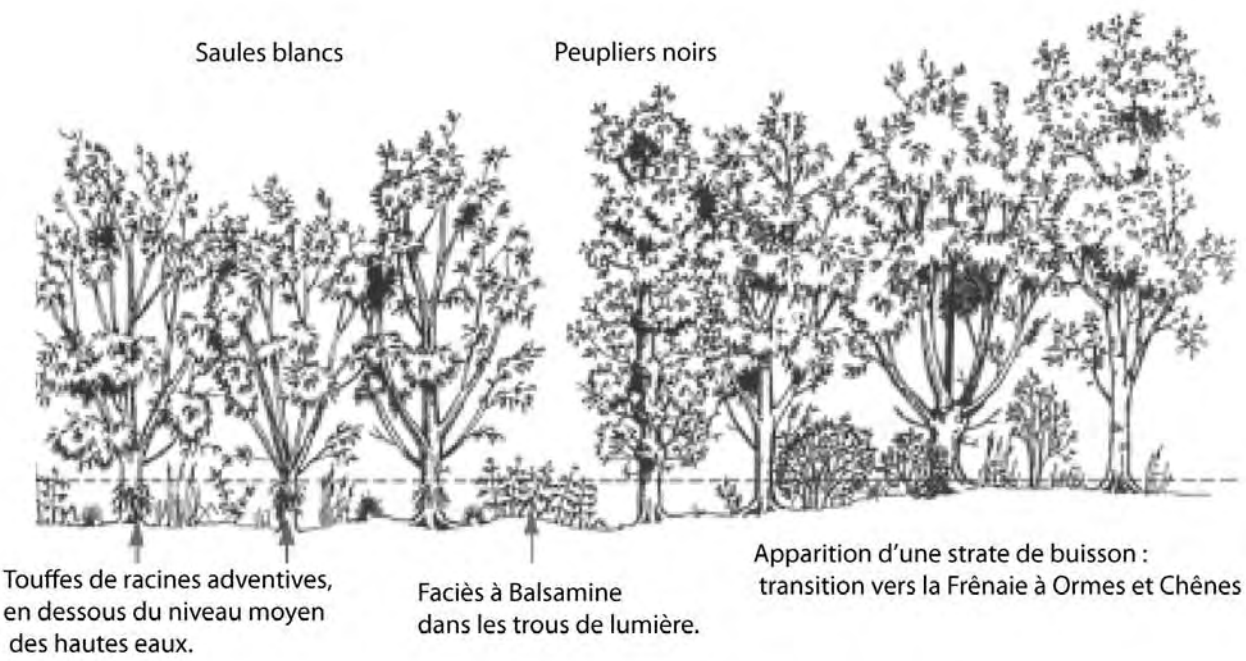
2.3. LES FORETS ALLUVIALES

Dans la plaine du Rhin, l'existence de différents stades d'évolution forestière correspond à une succession végétale liée à la dynamique des crues, propre aux milieux alluviaux fonctionnels (Schnitzler, 1995). Ces principaux stades ont été décrits initialement sur le Danube autrichien et peuvent être retrouvés sur la bande active rhénane (Carbiener et Trémolière, 2003). Sans entrer dans les détails pédologiques ou botaniques développés par Carbiener (1969), on peut citer les trois stades de succession forestière riveraine en Alsace, tels que : la forêt alluviale pionnière, le stade de transition et le stade terminal (Figure 1.5).

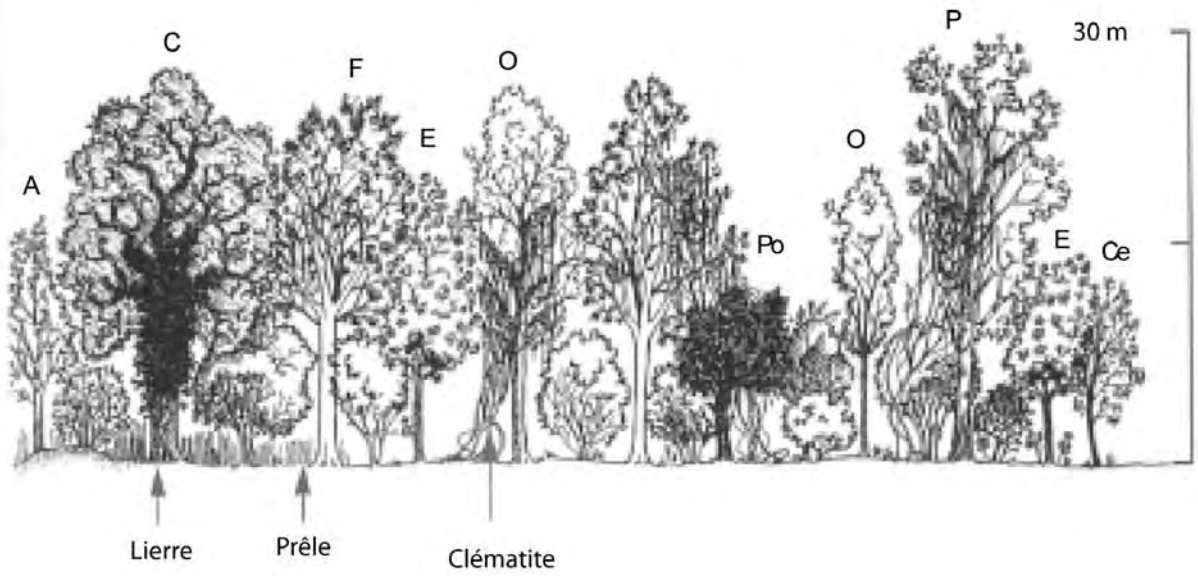
2.3.1. Le stade forestier pionnier

La forêt alluviale pionnière dite à bois tendre ou *Weichholzauenwald* est une forêt à saules arborescents (argentés) et à peupliers noirs. En fonction de la nature du sol, on peut trouver la saulaie blanche (*Salix alba*) sur les sols sablo-limoneux à la fois humides et carbonatés, sur les sols grossiers composés de galets et de graviers, ou dans les zones plus élevées et sèches on peut trouver une peupleraie à *Populus nigra*. La régénération de ce type de forêt peut être acquise par une remise à nu du substrat par les crues du Rhin, c'est donc un stade qui se développe dans les zones les plus exposées aux crues, sur les bancs de galets et graviers, sur les rives du fleuve et de ses bras latéraux. En effet, les taxons tels que les saules et les peupliers composant ce stade forestier sont héliophiles et sont incapables de pousser dans des conditions de forte compétition avec les herbacées (Carbiener et Trémolière, 2003).
Les forêts pionnières, dans le cas de stabilisation géomorphologique, c'est-à-dire en l'absence de crues morphogènes, ne se régénèrent pas et cèdent la place au stade suivant, la forêt intermédiaire.

A



B



A : Aulne blanc ; C : Chêne pédonculé ; Ce : Merisier à grappes ; E ; Erable champêtre ;
F : Frêne ; O : Orme ; P : Peuplier blanc ; Po : Pommier sauvage

Figure 1.5 : Les différents états de la forêt alluviale rhénane.

A) Stade pionnier.

Cette forêt à bois tendre est essentiellement composée de Saules et de Peupliers. Elle est localisée dans des zones fréquement inondées et largement soumises à la nappe phréatique haute.

B) Stade terminal.

Cette forêt à bois dur est très riche en espèces dont des Chênes, Aulnes, Frênes et fruitiers qui se repartissent dans les différentes strates bien développées. Elle est localisée dans le zones stables géomorphologiquement et peu soumises aux inondations et aux variations de nappe.

Modifiée d'après Sell et al., 1998.

Il a été démontré que dans cette partie du Rhin, c'est la fréquence statistique des crues morphogènes qui est la cause majeure de la présence de cette forêt de bois tendre préférentiellement dans la bande de tressage actif du Rhin, elle n'est liée ni à la topographie des substrats, ni au régime d'oscillation des niveaux d'eau. Cependant, si le niveau d'eau reste haut, le stade initial peut persister longtemps comme la saulaie perhumide en forêt de Munchhausen au Nord de l'Alsace (Douard et Carbiener, 1992).

La strate arborescente de la saulaie peupleraie est pauvre en espèces. On y trouve essentiellement le saule argenté (*Salix alba*) accompagné ou non du peuplier noir (*Populus nigra*). Ces deux taxons composent la strate arborescente et sont tous deux héliophiles. La strate arbustive, pauvre en espèces, elle aussi, peut se composer de la viorne obier (*Viburnum opulus*) ainsi que du cornouiller sanguin (*Cornus sanguinea*). La strate herbacée est constituée d'espèces non forestières hygrophiles, et parfois hélophytiques comme le roseau (*Phragmites australis*), le faux roseau (*Phalaris arundinacea*), la balsamine de l'Himalaya (*Impatiens glandulifera*), et les laiches (*Carex acutiformis, Carex elata, Carex acuta*). A ce stade on retrouve aussi trois espèces de lianes arborescentes comme le lierre (*Hedera helix*), la clématite (*Clematis vitalba*), la vigne sauvage (*Vitis vinifera sylvestris*) et deux espèces de lianes herbacées comme le tamier (*Tamus communis*) et le houblon (*Humulus lupulus*).

A l'heure actuelle, ce stade est sous-représenté en Alsace suite aux aménagements du 19ème siècle. Pourtant, en raison de son rôle bénéfique sur l'écosystème, il est aujourd'hui de plus en plus envisagé d'augmenter la surface de ces forêts riveraines par la formation de zones inondables (Trémolière et al., 1998).

2.3.2. Le stade forestier intermédiaire

La forêt intermédiaire dite forêt mixte à bois tendre- bois dur succède à la saulaie pionnière et précède le stade terminal à bois dur. Ce stade peut aussi s'établir d'emblée sur des sables limoneux suffisamment épais, récemment déposés par le fleuve. Les espèces ligneuses composant la strate arborescente sont essentiellement des ormes comme l'orme champêtre, l'orme diffus et leurs hybrides, et plus rarement l'orme de montagne, des peupliers comme le peuplier blanc, le peuplier grisard et le peuplier noir. A ce stade, on voit également apparaître le frêne, l'aulne blanc, le cerisier à grappes et des fruitiers abondants dans la forêt post-pionnière du secteur des tresses et anastomoses. D'autres taxons comme le bouleau pubescent ainsi que le bouleau verruqueux et le peuplier tremble sont présents dans les zones dont le substrat est peu ou pas carbonaté. La strate herbacée est constituée d'espèces typiquement forestières comme *Allium ursinum, Carex sylvatica, Circea lutetiana, Stachys sylvatica*, des lianes ligneuses *Hedera helix, Clematis vitalba*, et herbacées, *Humulus lupulus* et *Tamus communis* qui sont aussi des éléments importants dans ce stade mais uniquement dans les secteurs en tresses et anastomoses comme le secteur d'étude.

2.3.3. Le stade forestier terminal

L'évolution des séquences forestières vers le stade terminal à bois dur, se fait par l'intégration d'arbres sociaux et très longévifs. Ce stade de la forêt alluviale est dominé par le chêne pédonculé, les ormes, le peuplier blanc et le frêne (Figure 1.5). La richesse spécifique atteint 40 à 50 espèces de ligneux. L'indice de diversité spécifique passe de 1,8 dans le stade pionnier à 3,4 dans le stade terminal (Schnitzler, 1995). Par rapport aux autres stades, le nombre de strates augmente nettement (Carbiener, 1974). Ce paramètre en fait la forêt la plus diversifiée et le plus complexe d'Europe du point de vue structural. La canopée, très irrégulière, est formée par le chêne, les 3 espèces de peupliers, les 3 espèces d'ormes, le frêne élevé et par les fruitiers (pommier sauvage et poirier sauvage) ainsi que le bouleau. Bien entendu, certains individus appartenant aux espèces pionnières et post-pionnières peuvent subsister dans ce stade forestier et participent avec les lianes à la complexité structurale. Ce stade est le seul capable de perdurer pendant près de plusieurs siècles (Pautou et al., 2003). La mosaïque structurale est donc globalement stable.

La strate arborescente présente une hauteur élevée d'environ 25 à 35 m, voire plus. On trouve plusieurs strates emboîtées, organisation permettant une exploitation optimale de l'espace et de la lumière. Le chêne pédonculé (*Quercur robur*), le frêne (*Fraxinus excelsior*), le peuplier noir (*Populus nigra*) blanc (*Populus alba*) composent l'essentiel de la strate arborée supérieure. Ensuite, viennent l'orme champêtre (*Ulmus minor*), l'orme diffus (*Ulmus laevis*) et l'orme des montagnes (*Ulmus glabra*) ainsi que des hybrides. De plus, on trouve l'érable champètre (*Acer campestris*), le peuplier tremble (*Populus tremula*), et le grisard (*Populus canescens*). Un deuxième niveau de la strate arborescente est composé par le tilleul à petite feuille (*Tilia cordata*), le sycomore (*Acer pseudo-platanus*) le bouleau verruqueux (*Betula pendula*), le noyer sauvage (*Juglans regia*), le pommier sauvage (*Malus sylvestris*) et le poirier sauvage (*Pyrus pyraster*), le merisier (*Prunus avium*), le cerisier à grappes (*Prunus padus*). Le long des cours d'eau poussent l'aulne blanc (*Alnus incana*), qui forme aussi des sous-étages et plus sporadiquement l'érable plane (*Acer platanoides*). La strate arbustive et buissonnante est également riche en espèces forestières.

2.3.4. La succession forestière du Rhin

La succession forestière est dynamique. Les trois différents stades se succèdent dans le temps, et ils se partagent l'espace alluvial disponible. Dans les secteurs actifs des tresses et anastomoses, le stade pionnier est dominant dans la bande active tandis que le stade terminal est confiné sur les zones marginales et bordières. C'est sur la base du modèle hydrogéologique du fossé rhénan qu'une échelle très précise des relations entre la qualité des eaux courantes et la végétation aquatique a pu être établie (Carbiener et Trémolière, 2003).

Dans le secteur des méandres, l'évolution géomorphologique de la plaine alluviale est très lente. De ce fait, les stades pionniers et intermédiaires sont limités à des stations linéaires, dans les chenaux (saulaies) et le long des rives (peupleraie blanche/ ormaie). Le stade terminal à bois dur est prépondérant dans ce système mais est significativement appauvri sur le plan de la structure et de la diversité.

« Le fossé rhénan constitue un modèle hydrogéomorphologique grandeur nature, d'une régularité exceptionnelle, unique en Europe. Les déterminismes spatio-temporels d'évolution géomorphologique, pédologiques, hydrologiques y sont si rigoureusement ordonnés tant au long du profil longitudinal que sur les profils transversaux, qu'ils permettent des interpolations et extrapolations pertinentes » (Carbiener et Trémolière, 1990, 2003).

Figure 1.6 : Carte du bassin hydrographique du Rhin.

3. LE RHIN

3.1. LE BASSIN-VERSANT DU RHIN

Le Rhin a une longueur totale de 1325 km et draine un bassin-versant total de 185 000 km^2, ce qui en fait le fleuve d'Europe occidentale le plus important (Figure 1.6). Le Rhin supérieur longe les massifs de la Forêt-Noire et du Kaiserstuhl depuis Bâle, après que le Rhin alpin et le Haut Rhin aient drainé le massif alpin et la plaine molassique suisse. Le Rhin moyen et inférieur se développe jusqu'au delta Rhin Meuse avant de se jeter dans la Mer du Nord. Au droit de Bâle la surface de son bassin-versant est de 35 929 km^2, tandis qu'à Vieux-Brisach elle est de 37.575 km^2 et à Strasbourg de 39 650 km^2 (Eschweiler, 1959).

Dans la plaine d'Alsace, la pente du fleuve diminue progressivement, passant de 0,1% de Bâle à Marckolsheim puis à 0,08% jusqu'à Strasbourg et enfin à 0,06% plus en aval (Figure 1.7) ; corrélativement, les sédiments alluviaux deviennent de plus en plus fins et leur épaisseur décroît. Entre Bâle et Marckolsheim, la vallée du Rhin est étroite, entaillée d'une quinzaine de mètres à Mulhouse et de seulement 5 mètres aux environs de Neuf-Brisach. En aval de Marckolsheim, la vallée inondable est plus large : les prairies humides occupent les Rieds ; en aval de Strasbourg, la plaine de confluence du Rhin avec de nombreux affluents est fréquemment soumise à de larges inondations.

Sur la bordure occidentale du fossé rhénan, l'Ill qui draine le Jura septentrional et les collines du Sundgau sur 4625 km^2 présente un cours inhabituel. En effet, il suit de manière parallèle le fleuve sur plusieurs dizaines de kilomètres. Cette anomalie de drainage est due à la présence du large cône graveleux weichsélien barrant le milieu de la plaine Sud alsacienne, interdisant à l'Ill de rejoindre le Rhin avant Strasbourg.

La nappe phréatique alluviale du Rhin s'écoule parallèlement aux deux rivières avec une pente voisine de 0,1%. Avant les prélèvements pour l'irrigation, le battement de la nappe était de l'ordre d'un mètre. Les différents canaux n'ont qu'une très faible incidence sur les fluctuations de la nappe alluviale (Duprat et al., 1979).

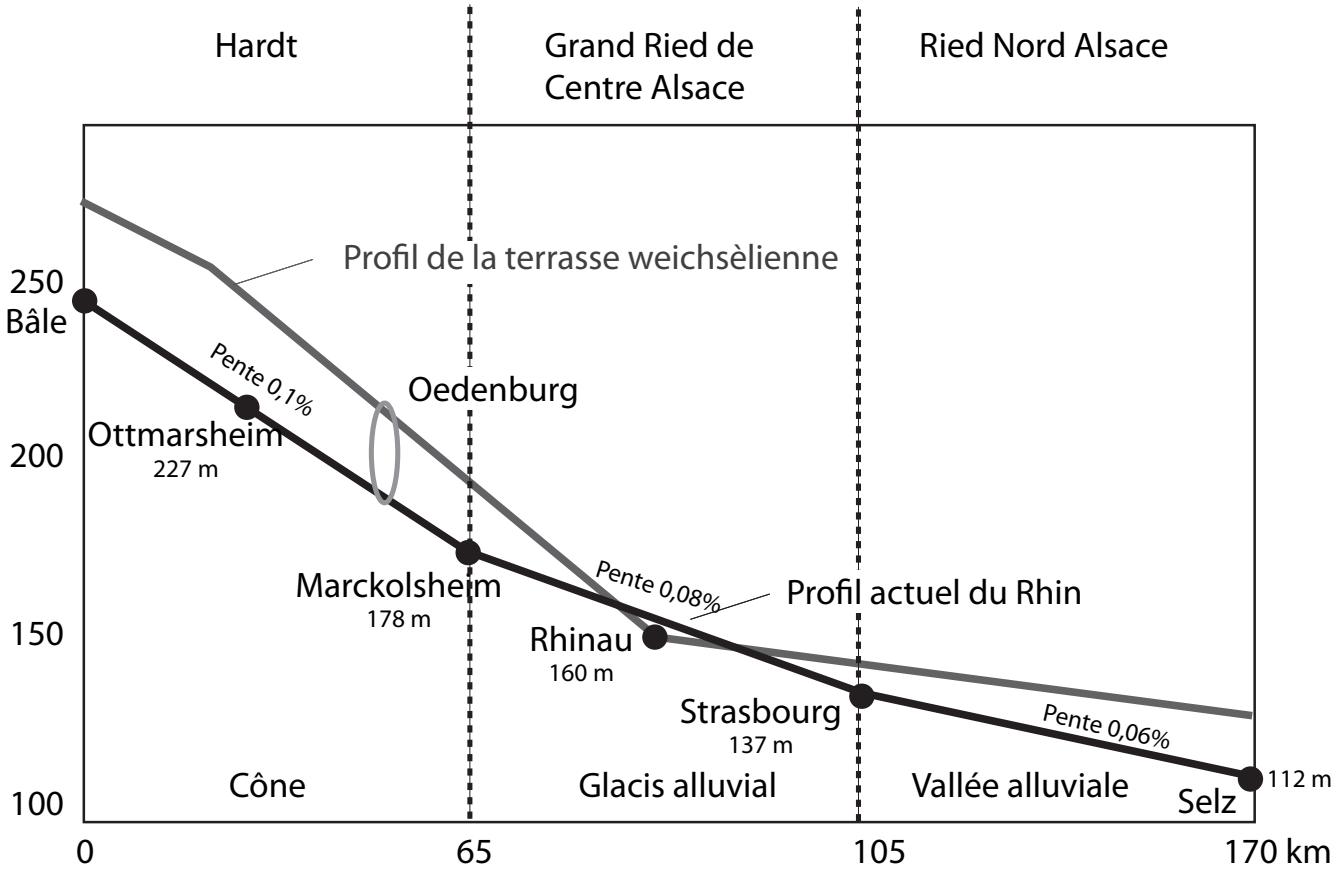


Figure 1.7 : Profil en long du Rhin entre Bâle et Selz.
En amont de Rhinau, la terrasse domine de plusieurs mètres la plaine alluviale holocène, plusieurs dizaines au niveau de Bâle.
En revanche, à aval de l'île de Rhinau, lorsque la pente devient proche de 0,06%, la plaine holocène recouvre les dépôts plus anciens. Le site d'Oedenburg se place dans une zone ou la terrasse surplomble la plaine de quelques mètres.

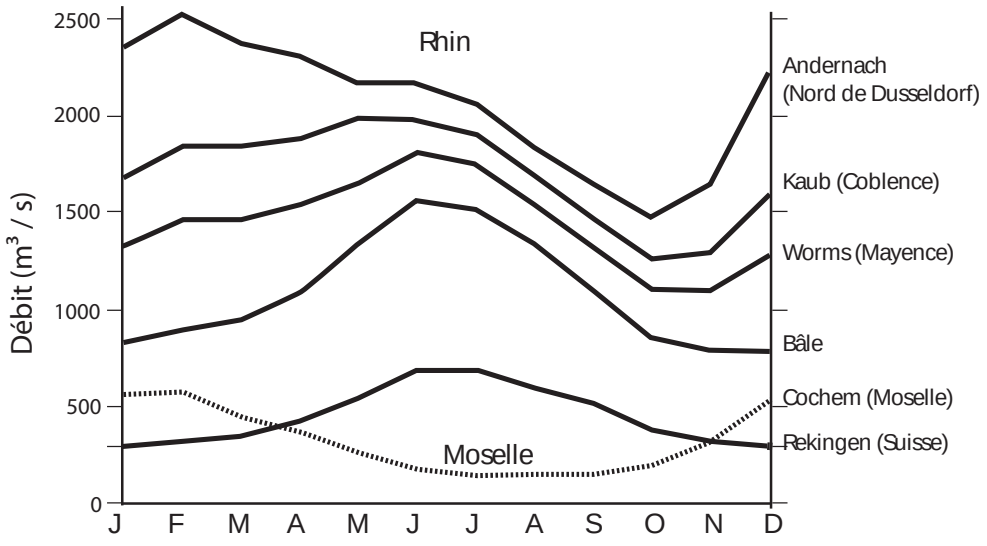


Figure 1.8 : Hydrogramme annuel du Rhin d'amont (Rekingen) en aval (Andernach) comparé à celui de la Moselle au niveau de Cochem.

3.2. L'HYDROLOGIE DU RHIN

Le Rhin, fleuve alpin est caractérisé par des hautes eaux à la fin du printemps, et des basses eaux en hiver (Figure 1.8). La crue débute vers la mi-juin et se poursuit pendant tout l'été, avec une décrue en septembre : la végétation dispose donc d'une bonne alimentation pendant toute la belle saison. En effet, les crues annuelles du Rhin et de ses affluents alpins se placent principalement à cette saison car elles sont alimentées par la fonte tardive des neiges et des glaciers : c'est le régime nival.

Les crues de l'Ill et des autres affluents de moyenne montagne se produisent en automne et en hiver (Vogt, 1988). Dans les Vosges et la Forêt-Noire, le temps de rétention est plus court en raison de précipitations sous forme de pluie, ou de la fonte rapide de la neige en hiver : c'est le régime pluvio-nival. Il existe un contrôle de la topographie sur les précipitations, mais aussi sur la vitesse de redistribution du stock d'eau. Les nombreux paramètres caractéristiques de chaque sous bassin-versant entrent en compte dans la composition des crues actuelles du Rhin et les causes météorologiques sont souvent multiples (Chbab, 1995 ; Ulbrich et Fink, 1995).

Différents types de crues sont connus pour affecter une partie importante du bassin du Rhin tout en étant liées à un seul événement climatique. On peut distinguer quatre grands types de crue (Pardé, 1959 ; Vogt, 1988) : les grandes crues océaniques classiques, les crues méditerranéennes, les crues estivales Nord helvétiques et les crues de débâcle.

3.3. LES CRUES

Le régime fluvial du Rhin montre de grands contrastes hydrologiques : les crues violentes ont souvent été destructrices comme ce fut le cas en 1852 (Conrad 1999). Les étiages du Rhin sont également parfois très marqués comme durant l'année 1304 où l'on pouvait passer le Rhin à pied sec (Martin, 1989). Très récemment une crue centennale s'est produite au cours du mois de mai 1999 lorsque le Rhin et l'Ill étaient simultanément en crue à la suite d'importantes précipitations. Le record du siècle de 5000 m^3/s a été atteint. En février précèdent de la même année le débit du fleuve était de 3920 m^3/s à Bâle. Le précédent record de débit connu date de 1955 avec 4500 m^3/s et celui du niveau d'eau date de 1990 avec 8,44 m. Afin de lutter contre les inondations dévastatrices du Rhin et de l'Ill, un réseau de canaux et de digues a été construit comme le Rhin canalisé, le canal à grand gabarit et le vieux canal désaffecté du Rhône au Rhin, creusé à l'Ouest de la vallée du Rhin et reliant entre eux des canaux de décharge de crue.

L'impact environnemental de la régularisation du Rhin peut être considéré comme majeur à l'échelle de l'Europe. La connaissance des cours d'eau et de leur écosystème est d'une importance considérable pour la réalisation de nouveaux plans visant à la restauration des cours d'eau régularisés, mais aussi pour la prévention et la limitation des risques liés aux inondations.

CHAPITRE 2 : DYNAMIQUE ALLUVIALE DU RHIN AU COURS DES PERIODES HISTORIQUES RECENTES

Au cours de ce chapitre, l'évolution récente du Rhin et de sa plaine alluviale dans le secteur de Neuf-Brisach/Vieux-Brisach/Kunheim en Alsace est abordée. Deux angles de vue ont été choisis pour dépeindre les modifications environnementales qui se sont produites au cours de plusieurs siècles précédant les aménagements majeurs du fleuve aux 19ème et 20ème siècles.

Le premier ensemble thématique est centré sur l'étude de l'évolution de la plaine alluviale et de sa végétation du 16ème au 18ème siècle à partir de documents cartographiques anciens. La dynamique alluviale du paysage peut ainsi être quantifiée et interprétée en fonction des différents facteurs de contrôle de la plaine alluviale.

Le second ensemble thématique aborde l'évolution de la fréquence des inondations historiques du Rhin dans la partie française de son bassin-versant à partir de sources documentaires et de travaux historiques. Ces variations observées sur plusieurs centaines d'années font l'objet d'une analyse comparative avec d'autres rivières françaises présentant des types de régimes différents comme le Rhône, la Loire ou la Seine. Cela permet de mieux appréhender les réponses spécifiques du bassin-versant du Rhin et de chacun des autres cours d'eau renseignés vis-à-vis des variations climatiques du Petit Age Glaciaire.

A la lumière de ces deux types d'information, il est alors possible d'établir un modèle intégrant géomorphologie alluviale, évolution forestière, événements hydrologiques et climat.

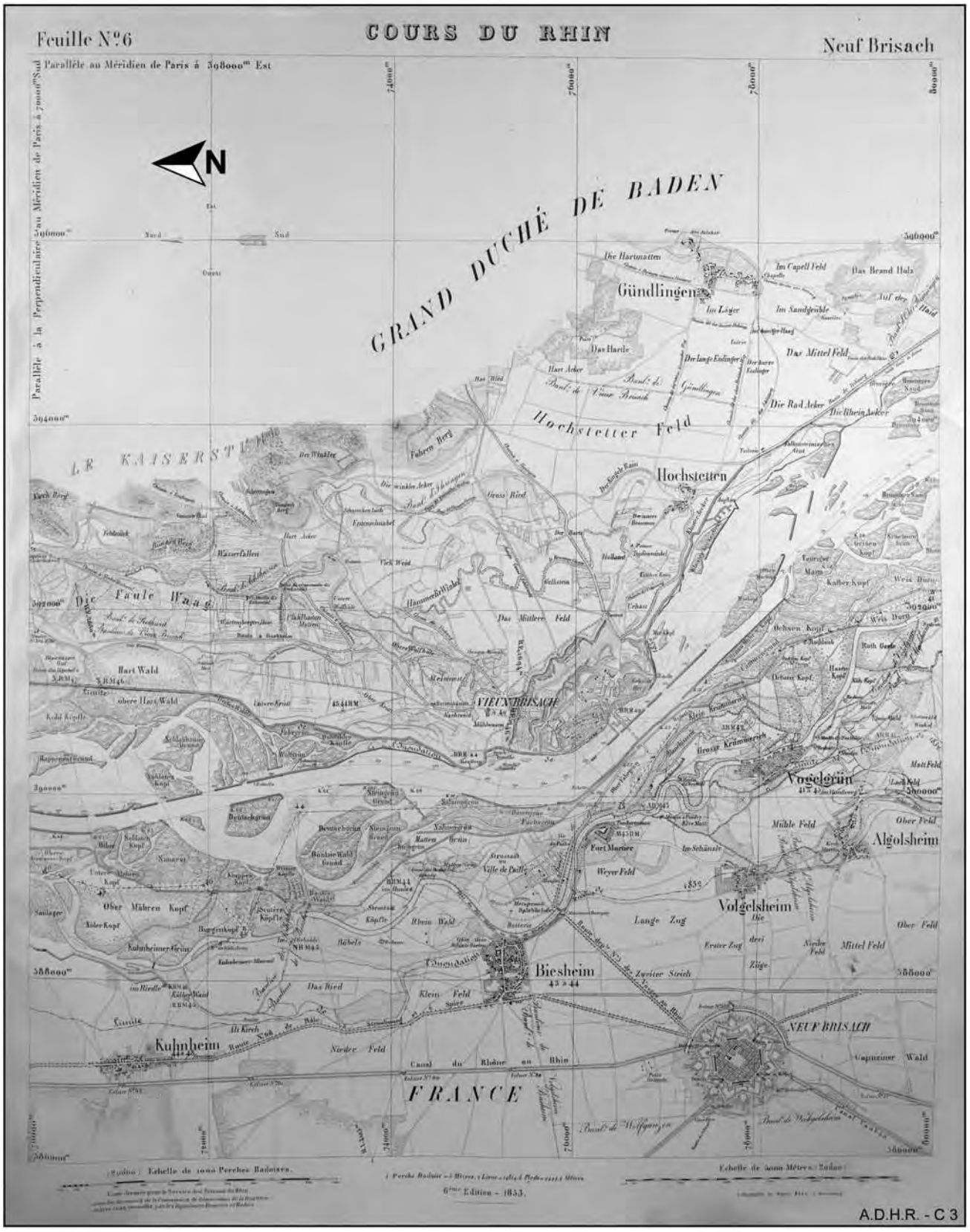


Figure 2.1 : Carte du secteur de Vieux-Brisach/ Kunheim datant de 1853.
Les figurés indiquant les limites du projet de canalisation du Rhin et permetttent l'observation du paysage alluvial avant ceux-ci ainsi que la limite d'inondabilité de la crue de 1852. L'échelle d'origine est le 1/20000.
Archives Départementales du Haut-Rhin.

1. DYNAMIQUE HISTORIQUE DU PAYSAGE

1.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE DES CARTES ANCIENNES

L'étude de la dynamique alluviale se focalise sur l'évolution de la géométrie en plan des chenaux du Rhin et de la végétation riveraine dans le secteur de Neuf-Brisach, situé dans la partie Sud du graben du Rhin. Son objectif est de rendre compte de la variabilité haute fréquence de la plaine alluviale au cours des périodes récentes (quelques centaines d'années).

L'étude présente se propose de documenter à la fois de façon qualitative et quantitative l'évolution géomorphologique, sédimentaire et végétale de la plaine du Rhin supérieur au cours des siècles précédant les aménagements anthropiques majeurs du 19ème siècle, à l'aide de cartes anciennes.

Plusieurs paramètres sont analysés comme la proportion de barres mobiles, d'îles végétalisées, de prairies humides ou de zones cultivées au sein de la plaine d'inondation centennale basée sur la crue de 1852 (Figures 2.1 et 2.2). Il s'agit de définir le paysage alluvial actuel et historique d'Oedenburg et de comprendre comment évoluent les formes ainsi que la végétation riveraine. Leurs relations avec les variations du climat, la fréquence des inondations du Rhin, la tectonique ainsi que l'anthropisation du bassin-versant du Rhin seront discutées afin de mettre en évidence quels paramètres contrôlent ces variations de la plaine alluviale.

Le secteur du Rhin qui fait l'objet de cette étude présente un style à la fois en tresses et en anastomoses, singularité géomorphologique qui permet d'appréhender sur une échelle spatiale restreinte les différents problèmes liés à la fois à la dynamique sédimentaire et à la dynamique hydrologique. Du point de vue du peuplement végétal, cette zone est considérée comme un résumé de ce qui peut être observé en plaine du Rhin. Les différents stades forestiers se développent de façon considérable de sorte que le modèle de succession végétale peut prendre ici un sens particulièrement cohérent.

Il s'agit donc de mettre en évidence des changements dans les dynamiques morphologiques, sédimentaires et végétales de la zone du Rhin à la fois en tresses et en anastomoses, à l'aide de cartes anciennes. Les modifications déduites de l'étude des cartes anciennes sont placées dans un cadre climatique, hydrologique et anthropique bien contraint. Cette observation dynamique du paysage alluvial peut servir de modèle pour l'interprétation de l'évolution de la plaine alluviale du Rhin pour les époques antérieures en particulier pour la période antique. En effet, cette approche peut faciliter l'interprétation des changements des dynamiques à l'époque romaine aussi bien environnementales (à travers l'enregistrement sédimentaire alluvial et anthropique), que végétales (à travers la palynologie) ou encore anthropiques (à travers la dynamique d'occupation du site d'Oedenburg). Le Rhin étant canalisé, seule l'utilisation des cartes anciennes peut donc servir de référence à la démarche géoarchéologique globale du site.

Figure 2.2 : Plan de A. Cestre du secteur Vieux-Brisach/ Kunheim dressé en 1877.
Ce document original est conservé au Musée d'Altkirch. Il indique les limites d'inondation en 1853 et en 1876 ainsi que la position des paléochenaux du Rhin et des vestiges archéologiques connus à cette époque. On distingue l'état de la plaine alluviale avant la réalisation du canal d'alimentation (canal du Rhône au Rhin) qui passe dans le site d'Oedenburg en reprenant le tracé de chenaux anciens.
Les dates de création et d'abandon de certains villages sont notées comme c'est le cas pour Biesheim (Buez-ens-heim) fondé en 708 et Kunheim (Cun enheim, 987-1766).

1.1.1. Les aménagements de la plaine du Rhin

Comme d'autres grands cours d'eau en Europe et à travers le monde, le cours du Rhin supérieur en Alsace a fait l'objet de plusieurs travaux hydrauliques depuis le 19ème siècle. Tous les événements hydrologiques ont conditionné la vie dans la plaine rhénane jusqu'à ces grands travaux d'aménagements (Figures 2.1 et 2.2) par l'ingénieur badois G. von Tulla entre 1815 et 1868 (Tulla, 1825, 1827; Tricart et Bravard, 1991 ; Kern, 1992 ; Maire et Sanchez-Perez, 1992). Leur vocation était d'accroître la surface cultivable, de protéger les habitants de cette zone du risque lié aux inondations ainsi que d'assainir de nombreuses zones humides, foyers de nombreuses maladies endémiques comme le paludisme (Biellmann, 1992), mais encore de faciliter la navigabilité jusqu'à Bâle en Suisse. Les premiers travaux consistaient surtout en une rectification du tracé du Rhin, le rendant moins sinueux et en une régulation tendant à augmenter le débit d'étiage. On estime à environ 9 10^6 m^3 le volume de terre transporté pour la réalisation de ces premiers travaux de rectification (Kern, 1992).
Au 20ème siècle de nouveaux travaux furent exécutés pour favoriser la navigabilité en amont qui était rendue difficile suite aux rectifications précédentes (Lefoulon, 1959; Marchal et Delmas, 1959; Walser, 1959; Dollfus, 1960 ; Decoville-Faller, 1961 ; Gölz, 1990 ; Tricart et Bravard, 1991 ; Kern, 1992). Enfin, plus récemment, les ouvrages hydroélectriques et industriels ont aussi nécessité des aménagements du cours d'eau, notamment la canalisation du fleuve (Figure 2.3). Toutes ces mesures apportées au Rhin ont considérablement modifié la dynamique de la plaine alluviale qui était jusqu'alors dominée par les variations naturelles du fleuve (Pardé, 1959).

1.1.2. L'impact des aménagements du Rhin sur la végétation riveraine

La dynamique de peuplement de la végétation riveraine a aussi été, par suite de ces dispositions, considérablement transformée. Les travaux ont eu pour effet immédiat de déconnecter les nombreux chenaux latéraux du Rhin et une grande partie de la végétation alluviale qui leur était associée, du reste de la rivière. Ainsi, certaines zones fréquemment inondées jusqu'au 19ème siècle furent préservées de la dynamique alluviale du Rhin. Cette surface libérée a pu par la suite être mise en culture ou encore urbanisée. « On estime que la surface forestière actuelle pouvant être inondée est inférieure à 1000 hectares tandis qu'elle est estimée à 200 000 hectares au cours du 19ème siècle » (Schnitzler, 1995 ; Deiller et al., 2001). Diverses études ont montré l'impact des aménagements sur les changements de la composition floristique des forêts alluviales de la plaine du Rhin supérieur (Trémolières et al., 1998, Deiller et al., 2001).

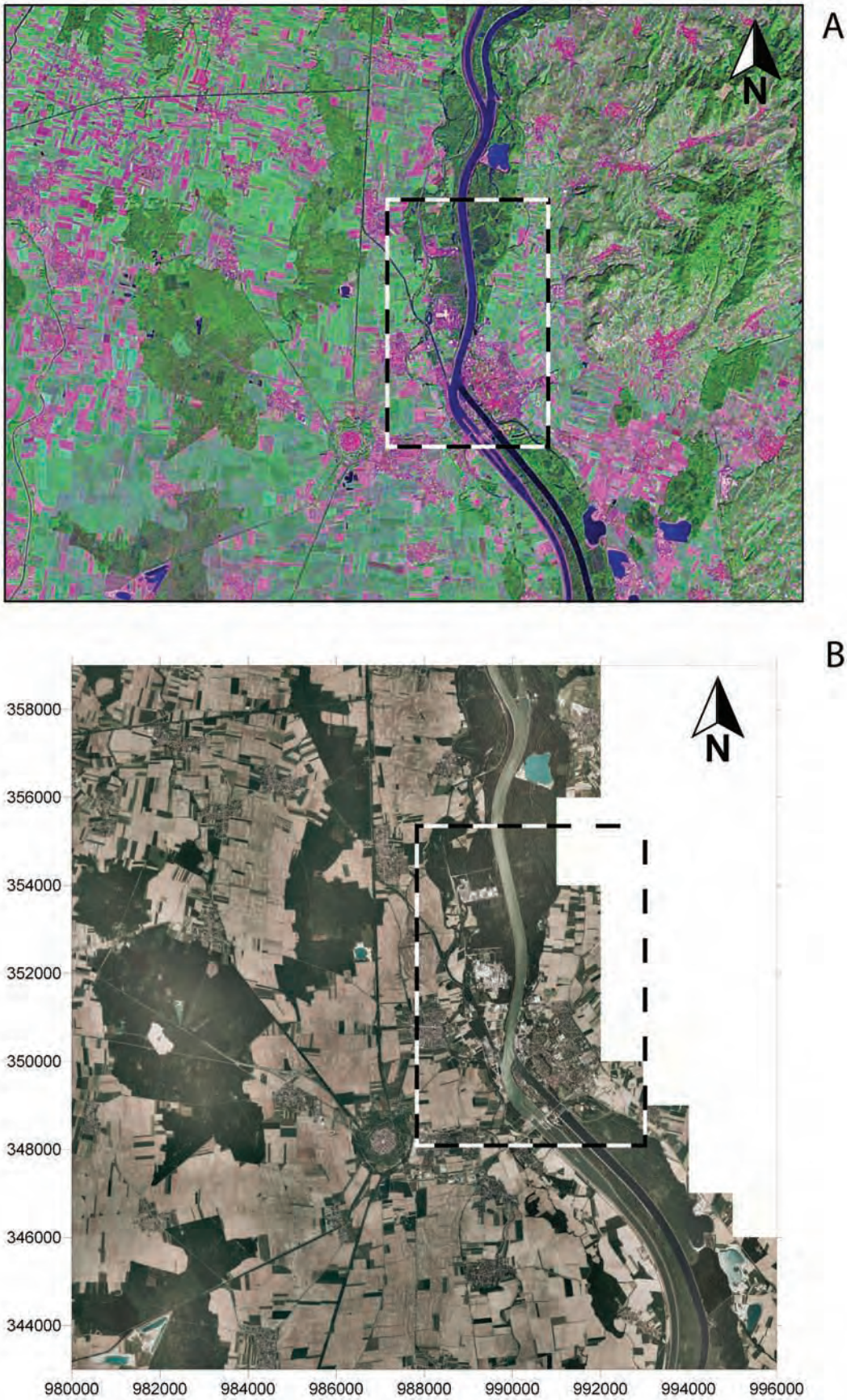


Figure 2.3 : Localisation du secteur d'étude à partir de (A) l'image satellite de la région du Rhin supérieur (Source Google Earth) et de (B) la mosaïque de photographies aériennes orthorectifiées de l'Institut Géographique National.

La mosaïque a été géoréférencée dans le système de projection Lambert II étendu. La résolution initiale de ces photographies est de deux mètres par pixel.

1.1.3. Le cadre de l'étude

Ainsi, avant le 19ème siècle, le Rhin était fonctionnel. Les modifications naturelles du cours d'eau étaient composées par la migration des formes alluviales (barres, chenaux) ainsi que par des changements de la végétation. Il a été choisi d'étudier ces changements de façon qualitative et quantitative à partir de documents cartographiques anciens.

L'objectif de ce chapitre est de décrire la dynamique de la plaine alluviale du Rhin dans la zone d'étude en tenant compte de l'état de la végétation riveraine. Cette transformation au cours du temps du paysage alluvial est abordée à partir de plans anciens et d'illustrations artistiques pouvant remonter jusqu'au 16ème siècle.

L'intérêt d'une étude conjointe du couvert végétal, des chenaux, des barres et des îles a été démontré à de multiples reprises (Bravard et al., 1986 ; Pautou et al., 1985). L'étude de l'évolution de la morphogenèse des cours d'eau est une approche qui s'appuie sur une étude complémentaire composée, d'une part de la géométrie en plan des chenaux (style alluvial), du déplacement et des modifications des formes alluviales (chenaux, barres) et d'autre part de l'état de la végétation riveraine présente (succession écologique et zonation). L'évolution quantifiable de ces deux paramètres permet une compréhension de l'impact de l'hydrodynamisme d'une rivière à la fois sur le bilan sédimentaire et sur la dynamique de peuplement végétal.

Des approches dynamiques comparables ont déjà été menées sur d'autres cours d'eau avec dans un premier temps l'usage de photographies aériennes ou satellites comme support à l'observation à court terme de modifications événementielles des formes alluviales. Ces travaux, ont tout d'abord été à vocation sédimentologique et géomorphologique. Pour l'exemple, nous citerons les études menées sur le Brahmapoutre par Thorne at al., (1993), la Drôme et l'Isère (Landon et Piegay, 1994).

L'impact alluvial (pouvant être lui-même causé par l'anthropisation du bassin-versant, notamment par la régularisation du cours d'eau) sur les successions écologiques et les zonations a déjà fait l'objet d'études pluridisciplinaires. Une étude sur la végétation alluviale réalisée sur le bassin-versant de l'Ain par Marston et al. (1995) décrit la métamorphose des chenaux de l'Ain dans la plaine d'inondation centennale et permet la mise en évidence des effets de celle-ci sur le développement de la végétation riveraine. Cette approche S.I.G. couple à la fois des unités de paysage connues par photographies aériennes et désignées en fonction des types de végétation et de lithologie observés avec l'activité des chenaux influencés par l'activité humaine.

De la même manière, une étude de l'impact de la canalisation du Rhin sur le fonctionnement de la forêt alluviale a été menée en Alsace (Douard et Carbiener, 1992). Dans ce cas, l'aspect qualitatif a été privilégié et étudié sur la période postérieure à la carte d'état major datant du premier quart du 19ème siècle.

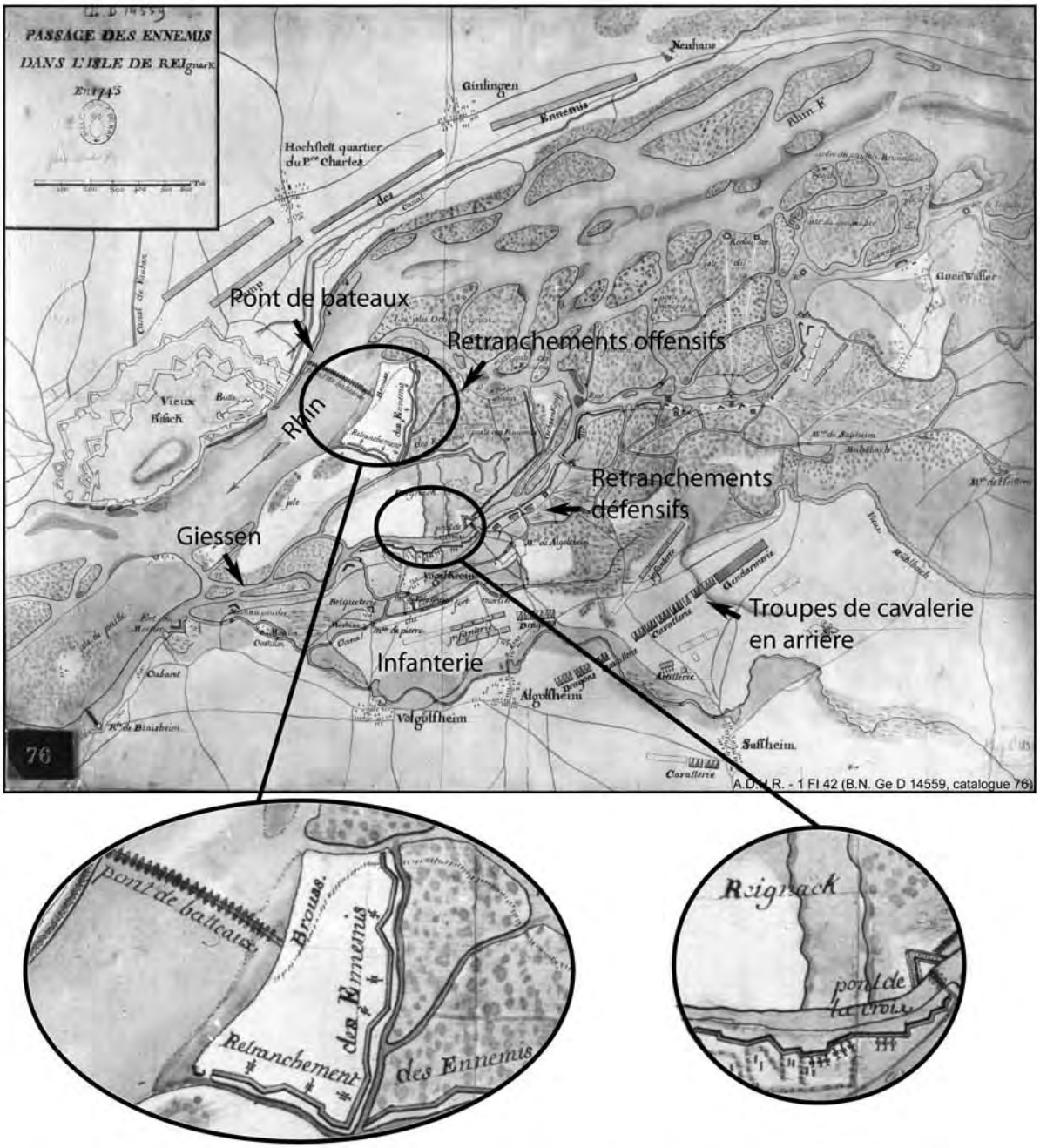


Figure 2.4 : "Passage des ennemis dans l'isle de Reignack en 1743" (Archives Départementales du Haut-Rhin).

Cette carte représente une partie de la plaine du Rhin supérieur située juste en amont du secteur de Vieux-Brisach/ Kunheim. Elle datée postérieurement à 1743, et on y distingue les diffèrentes unités militaires offensives et défensives prenant largement en compte les variations géomorphologiques dans leurs modes de déplacement ainsi que pour leurs positions.

Les zones sèches et élevées (terrasse) sont privilégiées par rapport aux zones plus humides pour le positionnement des troupes de l'infanterie et de cavalerie défensives situé en arrière tandis que les premières lignes de défense constituées de pièces artillerie sont placées en rive gauche du Giessen.

Pour les troupes offensives, il faut noter le choix de passage d'abord par un pont de bateau sur le Rhin à un endroit parmis les plus étroits, puis préférentiellement dans les zones non arborées (à découvert). L'intérêt stratégique exceptionnel que représente une bonne connaissance du positionnement des zones humides et sèches, avec ou sans végétation arborées est donc déjà évident au 18ème siècle.

On comprend donc pourquoi il y a depuis si longtemps des plans d'une aussi grande précision dans le secteur d'étude de Vieux-Brisach/ Kunheim. Toutes ces précisions à vocation militaire ou territoriale, nous permettent aujourd'hui de réaliser une étude quantitative de l'évolution de la plaine du Rhin.

D'autre part, et du point de vue qualitatif également, à une échelle temporelle plus longue, on peut citer les travaux de Miramont et al. (1998) concernant l'évolution historique en moyenne Durance. Cette approche met en évidence la relation entre la fréquence d'inondation et le changement de style de la Durance. Sur le Danube, grâce à l'étude des cartes anciennes, l'évolution des formes alluviales et de la géométrie en plan des chenaux au voisinage de Bratislava a été quantifiée en relation avec les modifications climatiques de la fin du Petit Age Glaciaire (Pišut, 2002).
Des modélisations de successions végétales dans un contexte d'asymétrie de barres et d'îles ont été réalisées par Chiarello et al. (1996, 1998). Dans ces études, les successions écologiques évoluent en fonction de la topographie des formes alluviales et considèrent chaque unité écologique comme un élément du paysage alluvial.

1.2. LE CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE

Le choix de la zone d'étude (Figures 2.1, 2.2 et 2.3) n'a pas seulement été dicté par la présence du site gallo-romain d'Oedenburg. En effet, la zone présente des caractéristiques supplémentaires qui en font un lieu particulièrement intéressant pour notre étude. La présence de longue date d'aménagements anthropiques stables (Figure 2.4), le changement de style du Rhin à la fois en tresses et en anastomoses, les différents stades forestiers successifs et enfin la qualité de la documentation disponible sont autant de paramètres qui nous ont conduits à réaliser cette étude.

1.2.1. Les aménagements anthropiques

De nombreuses cartes ont été levées dans la zone d'étude au cours des derniers siècles. Cela est principalement dû à la présence des villes fortifiées de Vieux-Brisach en rive droite et de Neuf-Brisach en rive gauche. Des villages comme Biesheim, Kunheim sont également figurés et permettent - dans le cas de cartes non datées précisément - de donner une chronologie relative au sein du corpus. La présence au voisinage du site d'Oedenburg de nombreux aménagements anthropiques permet une datation des cartes anciennes ainsi que l'observation détaillée des modifications anthropiques ou alluviales du paysage (Figure 2.4). De grands événements historiques ont marqué le paysage alsacien et rhénan. Ainsi le conflit avec la Suède a entraîné la destruction du village de Biesheim au 17ème siècle. A la suite de ce conflit, le traité de Rieswick a amené le démantèlement des fortifications de la Ville de Paille après seulement 21 années d'existence. Cette contrainte a fait naître la ville de Neuf-Brisach fortifiée par Vauban au cours des années 1699-1715. Nous voyons donc qu'il s'agit essentiellement de faits historiques qui ont contraint l'évolution de l'occupation dans cette partie de la plaine du Rhin.

A

B

Figure 2.5 : Pierre dressée en souvenir de l'ancien village de Kunheim déplacé plus à l'ouest sur la terrasse.

A) Vue vers le Nord-Ouest du paysage à proximité de l'ancien village de Kunheim.

B) L'inscription contient le message suivant:

"Le Village de Kunheim fut déplacé en 1766 à la suite de fréquentes inondations après 10 siècles d'existence. En ce lieu s'élevait l'église".

Dans le secteur d'étude, la relation liant l'occupation à l'activité du Rhin est étroite. Parmi les villages présents, certains ont subi des inondations, pouvant mener jusqu'à l'abandon total et à la réinstallation des habitants sur la terrasse. L'exemple suivant marque l'impact du Rhin dans la dynamique d'occupation de ce secteur. La destruction presque complète du village de Kunheim et de son déplacement organisé en 1766-1767 après plusieurs inondations du Rhin (Figure 2.5) en est un bon exemple. Cela constitue un des rares exemples cartographié de déplacement de l'ensemble d'un village (y compris l'église) à la suite d'inondations successives (Urban et al., 1984). D'autres destructions de villages par le Rhin sont connues en rive droite, quelques kilomètres en amont de notre secteur d'étude, rapportés et localisés par Mäckel et al. (2002, 2003) mais elles ne sont pas documentées par des plans à grande échelle. Les auteurs ont montré que les conditions climatiques deviennent plus froides et plus humides entre la fin du Moyen Age et le début des Temps modernes (du 14ème au 16ème siècle). Ces conditions s'accompagnent d'une augmentation de la fréquence des inondations qui conduisent à l'abandon de ces villages. Il semble que cette période soit caractérisée par la réactivation de chenaux situés du Rhin à l'Est, à l'exception de ceux situés à l'Est du Kaiserstuhl (Mäckel et Zollinger, 1995). Les mêmes auteurs remarquent que les inondations importantes connues dans le Rhin supérieur au cours des trois derniers siècles ont également causé des réactivations de chenaux situés au Sud du Kaiserstuhl ainsi que de l'Elz situé au Nord du Kaiserstuhl. La destruction de Kunheim se produit à ce moment (Urban et al., 1984).

1.2.2. Le style en tresses et en anastomoses du Rhin

Dans le secteur d'étude, le Rhin présente des caractéristiques géomorphologiques spécifiques. Au voisinage de Vieux-Brisach, le Rhin montre une transition majeure entre un style en tresses caractéristique de son cours depuis Bâle et un style en anastomoses caractéristique de son cours de Marckolsheim jusqu'à Strasbourg (Carbiener et Trémolière, 2003). Ce caractère de transition est considéré comme étant dû à la forte variation de pente. A l'amont de Vieux-Brisach le Rhin, la bande active de tressage du Rhin a, dans cette zone, une largeur réduite, elle présente de nombreux chenaux entre des îles dont la végétation pionnière constitue l'essentiel du couvert végétal. A l'aval de Vieux-Brisach, la pente du lit majeur du Rhin diminue et est inférieure à 0,07 %. Cette zone présente une très grande complexité dans sa typologie forestière et aquatique (Figure 2.6). En effet, la zone de tressage active du Rhin est essentiellement occupée par des populations forestières pionnières à bois tendre tandis que de nombreux chenaux déconnectés du fleuve en amont par des terrasses ou des obstacles (naturels ou anthropiques) occupent une place importante dans la plaine alluviale. C'est aussi dans cette zone que les forêts à stade terminal à bois dur sont développées à leur maximum pour la plaine d'Alsace (Carbiener et Trémolière, 2003) faisant de la forêt riveraine sauvage du Rhin le milieu forestier le plus riche et le plus complexe d'Europe.

Figure 2.6 : Bras du Rhin à Kunheim aujourd'hui.

Le chenal peu large est bordé d'une végétation dense correspondant à un stade évolué de forêt alluviale. Ceci est une des conséquences des aménagements anthropiques de la plaine alluviale entraînant une nette diminution des flux sédimentaires et la réduction de la fréquence des inondations.

1.2.3. Les forêts naturelles rhénanes

Le secteur d'étude présente également des spécificités en terme de végétation riveraine. Comme nous venons de l'apercevoir, la végétation riveraine originelle du Rhin présente une grande variabilité que l'on peut retrouver dans la zone d'étude. Dans cette région naturelle, une mosaïque végétale complexe se développe, et on peut distinguer plusieurs stades de développement de la végétation en fonction de la fréquence, de la durée moyenne et de l'intensité des inondations, de la nature du substrat et de sa granulométrie.

1.2.4. Le choix des cartes

La plaine d'Alsace a fait l'objet de nombreuses représentations cartographiques et artistiques. La présence de longue date de villes importantes tant du point de vue militaire que commercial explique que le secteur présente une très ancienne couverture cartographique.

Les différents documents sont de qualités diverses et présentent des échelles variables en fonction de l'objet observé (aménagements, territoire…).

Ils peuvent se présenter à très petite échelle comme la carte de Cassini au 18ème siècle (Figure 2.7) ou encore la carte de H. Schickhardt de 1616 (S.E.M., 1997) et mettent en évidence surtout la répartition des villages ainsi que celle des forêts et bois communaux. Dans ce cas, les descriptions font peu état des plaines alluviales voire sont complètement schématiques. Des détails sont cependant fiables comme les emplacements de village, Kunheim (*Kunèn*), Biesheim, Vieux-Brisach (*Breysach*) ainsi que le passage du pont sur le Rhin au niveau de l'Ile Jacob.

L'exploitation de panoramas accroît la qualité de la description du paysage alluvial. Les vues de M. Mérian en 1643 et en 1650, ci-après, ajoutent de l'intérêt aux cartes à petites échelles comme la « Carte d'Alsace » de D. Specklin (1576) et la « Carte d'Alsace » de M. Mérian publiée dans « *Topographia Alsatiae* » en 1644 (Figure 2.8). Les informations disponibles dans ces documents du 17ème siècle sont développées ci-après.

A moyenne échelle (environ 1/20000), les représentations cartographiques sont souvent centrées sur un bourg, Neuf-Brisach ou Vieux-Brisach. Elles indiquent les différents types de végétations des îles du Rhin en raison de leur fonction militaire ou territoriale (localisations et mesures précises pour déterminer l'emplacement de la frontière).

Enfin, certains documents peuvent représenter de petites zones à très grande échelle d'observation (plans au 1/5000 jusqu'à 1/500) notamment pour des projets d'aménagements de digues pour la lutte contre les inondations ou d'épis contre l'érosion des berges. Ces représentations à très haute résolution seront commentées plus loin.

Figure 2.7 : Extrait de la carte de Cassini dans le secteur de Neuf-Brisach.

Le paysage alluvial composé d'îles arborées présente peu de détails utilisables pour une description fiable du paysage.

Dans tous les cas, on peut distinguer clairement les villages ainsi que les bois situés sur la terrasse. La faible représentation des forêts situées dans la plaine alluviale pose la question de leur stabilité, de leur rôle économique local ainsi que de leur gestion.

1.3. RESULTATS

1.3.1. L'état au 17ème siècle : approche qualitative

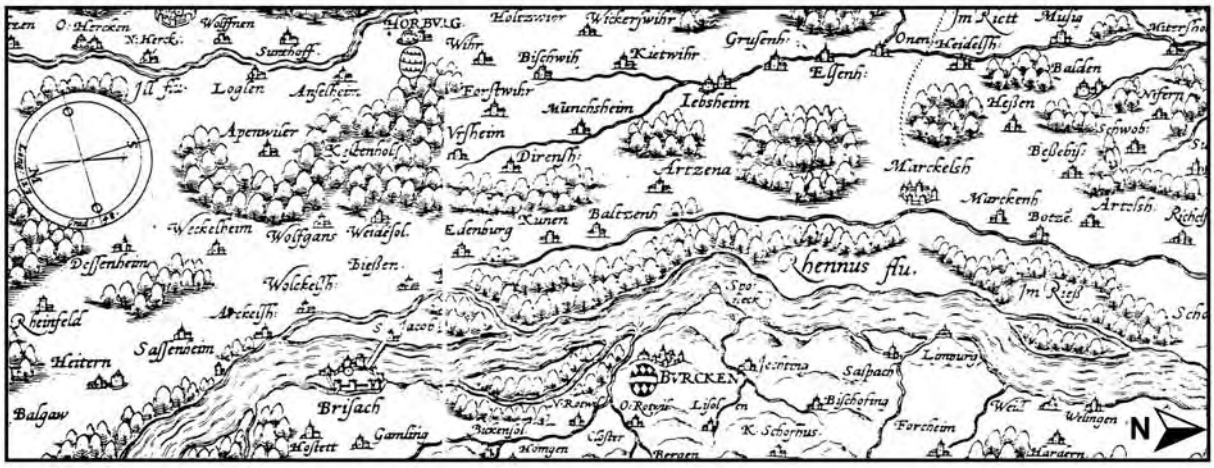
Le 17ème siècle est essentiellement documenté par des plans à petite échelle. Les vues d'artistes sous la forme de panoramas constituent des éléments essentiels pour décrire plus précisément le paysage. La quantification des éléments du paysage est cependant impossible, mais ces documents permettent de prolonger de plus d'un siècle la période d'étude pour le secteur au voisinage d'Oedenburg.

Sur la carte de 1576, une grande île, notée « Jacob » - appelée plus tard Ville de Paille –, fait face à la ville fortifiée de Vieux-Brisach et présente une absence de végétation au Sud et une végétation arborée au Nord (Figure 2.8). Elle sépare le Rhin en deux bras actifs dont le plus large se trouve à l'Est, le moins large et le plus sinueux se plaçant à l'Ouest. Cette île présente une très grande extension puisque sa partie amont est située au droit de *Wolkelsheim*. En aval elle fait face à une autre grande île entièrement arborée et de dimension plus réduite située à proximité de la rive orientale du Rhin. Cette seconde île sépare à nouveau le Rhin en deux bras actifs de largeur différente, l'un est large à l'Ouest et l'autre moins large et sinueux à l'Est. Les deux îles alternent entre Vieux-Brisach et Burcken.

Les villages d'Oedenburg (*Edenburg*) et de Kunheim (*Kunen*) se placent en rive gauche d'un cours d'eau à chenal unique qui suit de façon parallèle le Rhin sur une grande distance vers le Nord. Ce bras est déconnecté et correspond à un cours d'eau phréatique qui prend sa source au pied de la terrasse weichsèlienne, au niveau d'Oedenburg. Il est séparé du Rhin par une large bande forestière continue. Cette position parallèle au Rhin sur plusieurs kilomètres est également représentée sur la carte de 1644 ainsi que sur la carte de 1616 par H. Schickardt.

Tous les cours d'eau situés en rive droite du Rhin sont orientés Est-Ouest tandis que ceux situés en rive gauche sont orientés Sud-Nord. Cela marque la différence de pente entre les deux rebords de la terrasse moins abrupte à l'Ouest qu'à l'Est comme l'ont déjà montré différents auteurs (Théobald, 1948 ; Striedter, 1988).

Sur la terrasse, les documents présentent des zones arborées (stade forestier terminal) ainsi que des correspondant à des terrains cultivés. D'après les indications des cartes de 1576 et de 1644 ainsi que des vues panoramiques de 1643 et 1650, il semble qu'une stase paysagère se soit établie tout au long du 17ème siècle sur la terrasse, ce qui indique une stabilité de l'anthropisation de la terrasse, notamment d'origine agricole.



B 1643

C 1644

Figure 2.8 : Cartes et vues d'artistes datant de la fin du 16ème jusqu'au milieu du 17ème siècle.

A) Extrait d'une carte datant de 1576, levée et dessinée par D. Specklin.

B) Vue d'artiste datant de 1643, réalisée par M. Mérian.

La vue orientée vers le Sud-Est, permet l'observation du réseau d'occupations, de champs et de forêts. Le Rhin est clairement indiqué et souligne la prohéminence sur laquelle s'installe la ville fortifiée de Brisach. Au centre de l'image, le village de Biesheim est noté comme fortifié, tandis qu'Oedenburg est noté comme une importante paroisse.

C) Plan de la plaine de la plaine d'Alsace datant de 1644 et extrait de « Topographica Alsatiae » de M. Mérian.

D) Vue d'artiste datant de 1650 réalisé par M. Mérian.

Les îles arborées du Rhin alternent avec les barres graveleuses localisées au milieu du Rhin et seulement occupées par quelques arbustes.

Sur la vue panoramique de 1643, sont représentés les secteurs anthropisés de Vieux-Brisach, Oedenburg mais aussi de Biesheim (*Biessen*) fortifié de manière équivalente au Fort Mortier. De nouveaux détails concernant l'île Jacob (Ville de Paille) apparaissent : elle est constituée de plusieurs îles non végétalisées au Sud et arborées au Nord. Ce gradient Sud Nord dans l'augmentation de la végétation était déjà observable sur la carte de 1576.

Le second bras occidental du Rhin passant près de Biesheim apparaît connecté au Rhin au niveau du Fort Mortier, mais plus en aval que précédemment. Une zone arborée en haut à droite de la vue marque la position antérieure de cet ancien bras jusqu'en aval de Vieux-Brisach vers Sassenheim.

La carte réalisée l'année suivante (1644) montre également le raccourcissement de l'île Jacob (Ville de Paille). Sur l'autre rive, l'île précédemment observée n'est plus figurée tandis que le chenal prenant sa source au niveau d'Oedenburg est, lui, encore noté comme étant parallèle au Rhin.

La vue de 1650 met en évidence le type de végétation arbustive ou arborée, la topographie ainsi que l'arrangement des barres et des îles au sein des chenaux du Rhin. Cette vue réalisée depuis le lit mineur du Rhin permet l'observation d'Est en Ouest de la plaine. A l'Est, la ville fortifiée de Vieux-Brisach est représentée assez précisément et montre de quelle manière la rive droite du Rhin est anthropisée. Le Rhin présente ici deux bras principaux séparés par une île longue et arborée correspondant à l'île Jacob (Ville de Paille). Le premier bras, à l'Est, est large et présente des barres assez planes, peu élevées presque entièrement nues et parsemées de quelques arbustes de dimension réduite. Ce bras est donc composé de plusieurs chenaux en tresses et est figuré avec des traits le parcourant pouvant évoquer l'hydrodynamisme fort présent à cet endroit. Le second bras, moins large, passe devant le Fort Mortier. En rive gauche de ce chenal unique et sinueux, le village de Biesheim détruit après des hostilités ayant laissé seulement le clocher de l'église ruinée. A l'arrière plan, on distingue d'autres îles densément végétalisées ainsi que la ligne des Vosges.

1.3.2. L'état au 18ème siècle : approche quantitative

Les grands fleuves naturels comme le Rhin au 18ème siècle, rarement stables, sont des cours d'eau fonctionnels. L'évolution de la géométrie des chenaux, bien que se produisant de façon progressive, se fait rarement de façon régulière. Les mesures régulières, bien qu'intéressantes du point de vue indicatif pour des grandes tendances continues, ne sont donc pas indispensables à la compréhension de la modification alluviale.

L'étude de quantification de l'évolution des différents éléments du paysage permet la mise en évidence de plusieurs événements à différentes échelles de temps. En effet, des changements à court et moyen terme de l'évolution morphologique du système, à la fois en tresses et en anastomoses, du Rhin au voisinage du site d'Oedenburg peuvent être observés. On verra que la réponse aux contraintes est

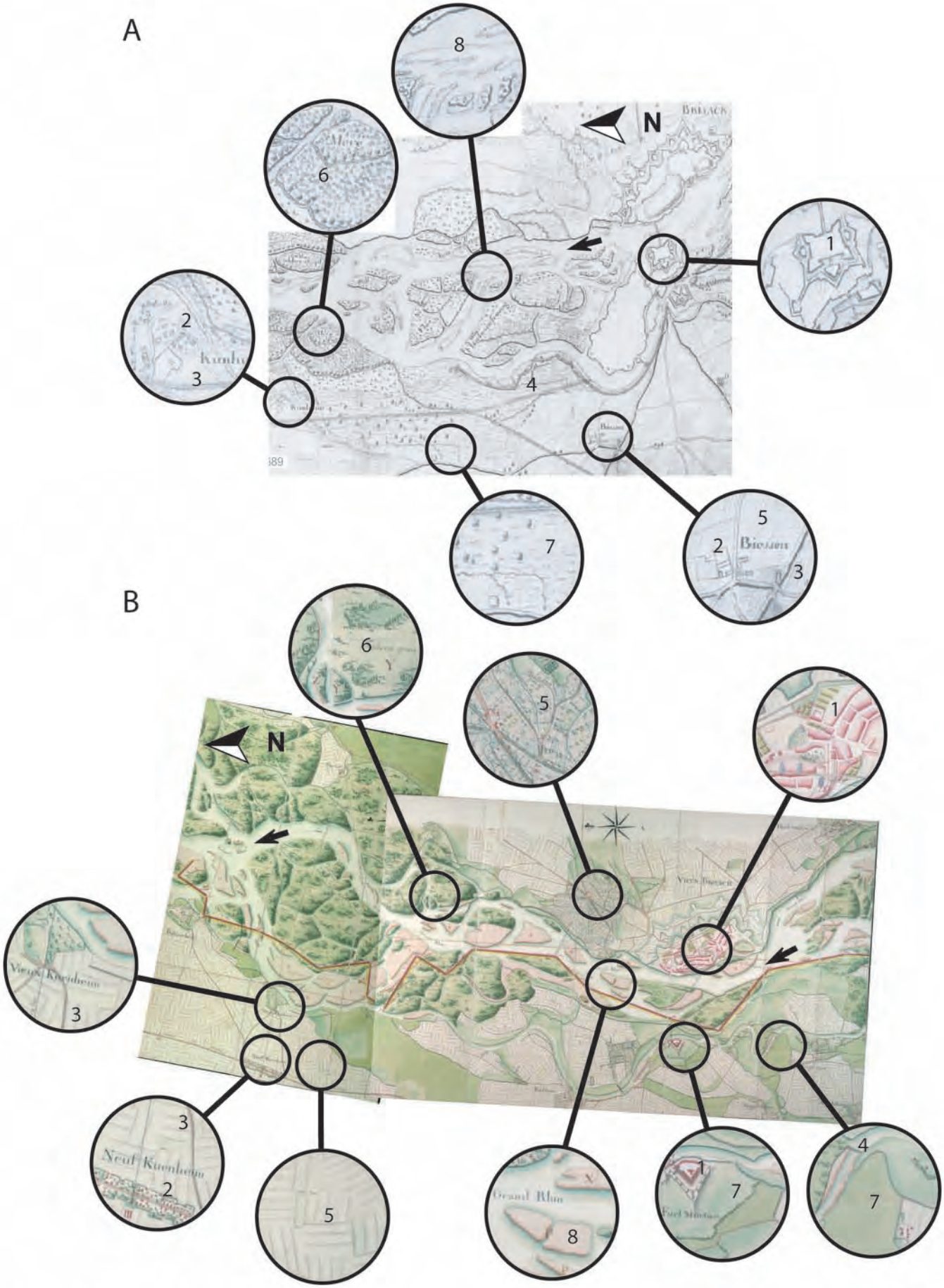


Figure 2.9 : Cartes datant pour la première de 1689 (A) et pour la seconde postérieurement à 1767 (B).
Elles ont été utilisées dans l'analyse quantifiée du paysage. Sur ces deux cartes, de nombreux figurés désignent : (1) les fortifications, (2) les villages et maisons isolées, (3) les chemins et les routes, (4) les digues et épis, (5) les zones cultivées (champs et vergers), (6) les zones forestières évoluées, (7) les prairies humides à végétation faiblement arborée, et (8) les zones non végétalisées correspondant à des barres.

géographiquement variable, ce qui permet de distinguer que les modalités d'évolution géomorphologique sont différentes entre les zones en tresses et les zones en anastomoses. La comparaison des réponses des deux types de systèmes de la géométrie des chenaux (tresses et anastomoses) peut donc ainsi être discutée en relation avec les paramètres forçants possibles. Cela permettra de comprendre comment l'évolution de la géométrie en plan évolue à long terme et à moyenne échelle dans le secteur d'étude et comment la plaine alluviale et ses contraintes d'écoulement ont évolué pour mener à la destruction du village de Kunheim dans les années 1766.
Ces changement observés seront mis en parallèle avec les données disponibles concernant les inondations historiques (Champion, 1858-1864), permettant une interprétation en relation avec les d'événements et de groupes d'événements hydrologiques de la période d'étude.

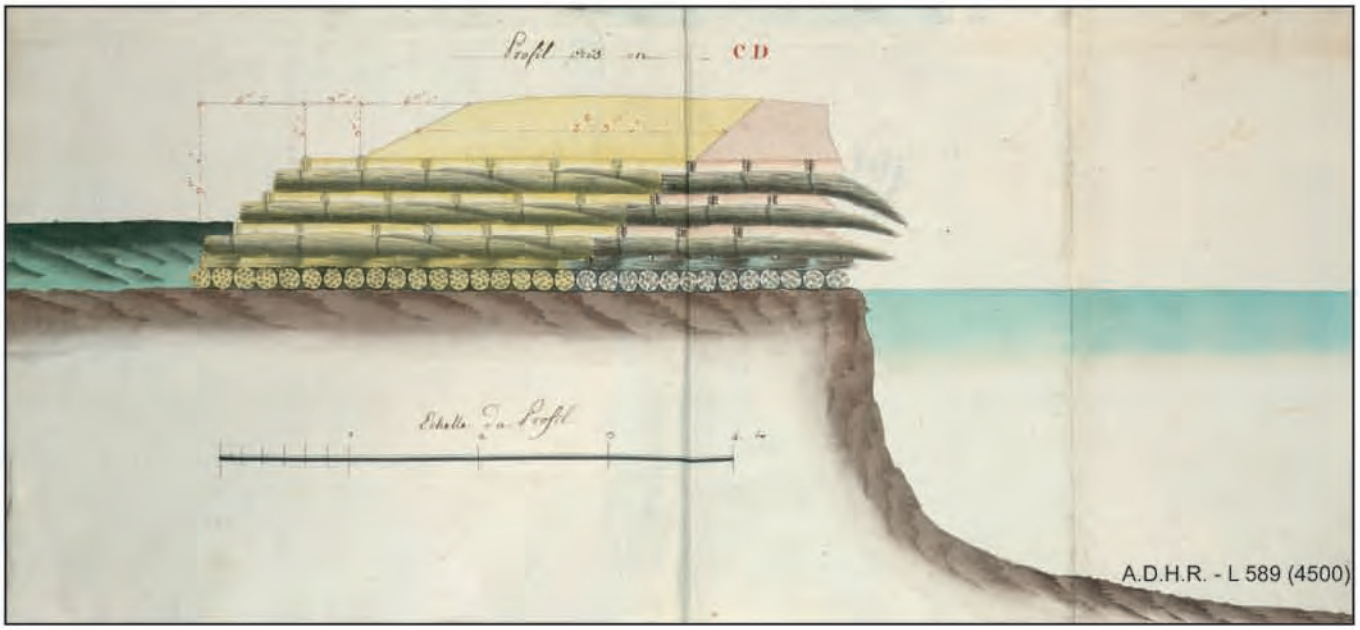
1.3.2.1 Le matériel de l'étude quantitative

La plus ancienne carte utilisée (Figure 2.9) pour la quantification de l'évolution du paysage est datée au plus tard de 1689 (Plouin et al., 2001) et offre déjà une visualisation satisfaisante des différents éléments du paysage. Elle fait immédiatement suite aux documents décrits précédemment.
La deuxième carte correspond à la période postérieure à l'abandon de la Ville de Paille et antérieure à la fin de la construction de Neuf-Brisach, c'est-à-dire aux environs de 1705.
La troisième carte est postérieure à la réalisation de Neuf-Brisach et antérieure à la destruction de Vieux Kunheim. Elle date approximativement de 1715.
La quatrième carte (Figure 2.9) est postérieure à la destruction de Vieux Kunheim et à la reconstruction de Neuf Kunheim en 1766-1767 sur la terrasse weichsélienne du Rhin. Elle est antérieure aux aménagements du 19ème siècle.
Sur l'ensemble des quatre cartes sélectionnées pour l'étude quantitative sont figurées de nombreux indicateurs d'anthropisation du milieu comme les routes, les fortifications et villages, les digues mais aussi les zones cultivées, de plus, un grand nombre de détails concernant la végétation sont figurés : les zones non végétalisées, les zones forestières, des zones de prairies humides plus ou moins arborées.

- ***Les fortifications***

L'importante zone fortifiée de Vieux-Brisach a été construite au cours de la seconde moitié du 17ème siècle sur la rive droite du lit mineur du Rhin. Cette forteresse peut être observée sur l'ensemble des cartes à notre disposition et, jusqu'à l'époque actuelle, sur les photographies aériennes de l'Institut Géographique National (I.G.N.). Elle fait face encore actuellement au Fort Mortier situé en rive gauche. Ce bâtiment est lui aussi daté du 17ème siècle et persiste en partie jusqu'à aujourd'hui.

A



B

Figure 2.10: Plans anciens d'aménagements du Rhin dans le secteur d'étude.

A) Coupe transversale d'une digue du Rhin en projet datant de 1796 dans le secteur situé entre le Grand Rhin et le bras de Fort Mortier en rive gauche du Rhin. Archives Départementales du Haut-Rhin.

B) Projet de construction d'une nouvelle digue du Rhin après la destruction d'un tronçon de digue en 1756. La légende indique: "Bout de plan levé à vue d'une partie du bord du Rhin, dans le ban de la Seigneurie de Biesheim; relatif à la nouvelle digue demandée par la communauté d'Heideren, 1756".

Le Nord est vers la gauche de l'image. Archives Départementales du Haut-Rhin.

La Ville de Paille est une zone fortifiée ordonnée par Louis XIV et réalisée par Vauban en 1675 (Plouin et al., 2001). Elle se situait entre le Fort Mortier et Vieux-Brisach et a été démantelée après la paix de Rieswick. Son emplacement est indiqué sur les cartes de 1689 et de 1705, mais est absente des autres. Ces fortifications constituent les éléments plus stables de la zone d'étude et ont été utilisées pour la calibration des cartes.

- ***Les villages et bâtiments isolés***

Certains des villages observables sur les cartes ont été fondés très tôt. C'est de cas de Biesheim fondé au 8ème siècle, Kunheim en 987, ou encore Algolsheim fondé au début du 12ème siècle comme l'indique la carte établie au 1/20000 par Cestre (1877) actuellement conservée au musée d'Altkirch (Figure 2.2).

La répartition spatiale de ces différents villages a peu varié au cours du temps et seul le village de Kunheim fut abandonné et réinstallé plus loin dans la seconde moitié du 18ème siècle. Les nombreux bâtiments isolés notés sur les cartes anciennes comme les moulins, les briqueteries, les redoutes constituent également de bons repères spatiaux.

- ***Les chemins et routes***

Les chemins et routes sont souvent notés en fonction de leur importance, cette hiérarchisation a changé au cours du temps. Cependant nous savons que certaines des routes les plus anciennes pouvant être attribuées à l'époque romaine ont été préservées et ont été pérennisées jusqu'à aujourd'hui. C'est le cas de la route départementale qui relie les village de Kunheim et Biesheim et qui longe le rebord de la terrasse weichsélienne du Rhin.

- ***Les digues, les épis et les canaux***

Le nombre et l'emplacement des digues construites pour lutter contre le risque d'inondation ont changé au cours du 18ème siècle. Leur positionnement est souvent bien indiqué sur les cartes disponibles (Figure 2.9). Des plans à grande échelle illustrent la planification, la construction ou la maintenance de ces différents types d'aménagements des berges du Rhin (Figure 2.10). D'autres éléments construits plus tardivement comme les canaux sont indiqués et font partie des grands aménagements précoces dans la plaine du Rhin supérieur.

- ***Les zones cultivées***

La surface cultivée a considérablement changé au cours de cette période en fonction de plusieurs paramètres : la démographie ou l'inondabilité des secteurs utilisés. Cette surface a pu être mesurée dans notre étude grâce à l'indication de champs cultivés et de vergers sur les cartes observées. En revanche, il n'est pas possible de connaître le type de culture sur la base de ces documents.

Néanmoins, d'après les figurés utilisés, il est possible de proposer qu'il s'agit de céréales. D'autant plus que les champs sont dans la plupart des cas positionnés hors des zones inondables.

- ***Les forêts***

La position des zones arborées sur la terrasse non inondable, permet l'identification du stade forestier terminal. Ces forêts de bois dur sont caractéristiques des zones plus élevées de la plaine alluviale. Les forêts de bois tendre sont aussi très présentes dans cette zone à la faveur des microreliefs.

- ***Les prairies humides barres non végétalisés***

Deux types de prairies humides peuvent être observés sur les cartes anciennes à notre disposition. Les prairies humides arbustives et les prairies humides arborées se développent dans la plaine d'inondation et présentent un grande continuité l'une avec l'autre. Cette continuité rend la distinction entre ces deux types délicate. Toutefois, même si le manque de détails figurés sur les cartes suggère que la culture et la présence humaine y sont quasi-absentes, il est important de rappeler le rôle de ces surfaces comme lieu de pâturages.
Ainsi l'anthropisation de ces zones peut être importante selon la saison mais n'apparaît pas forcement de manière évidente sur les documents anciens. Enfin, dans ces zones se distinguent parfois des cordons arborés qui correspondent à des populations forestières résiduelles de bois tendre le long des bras anastomosés du Rhin.

- ***Les barres non végétalisées***

Les cartes que nous avons sélectionnées permettent toutes l'identification de zones non végétalisées au milieu de la plaine alluviale. Ces zones de faibles altitudes sont fréquemment inondées ce qui permet l'implantation des végétations riveraines pionnières. Les zones sans végétation signalent les zones actives il y a plus de deux cents ans. La mobilité importante des barres ainsi figurées et leur position permettent de quantifier la dynamique du Rhin au cours de la période étudiée.

- ***Les chenaux actifs***

Les chenaux figurés sont de deux types. On peut ainsi distinguer les chenaux actifs de premier ordre dont la largeur réelle semble renseigné de façon fiable et les chenaux de second ordre, plus ou moins déconnectés, souvent positionnés par un simple trait.

1.3.2.2. Méthode de réalisation du S.I.G.

Les différents documents présentent une résolution comparable, avec un nombre identique de sous paysages représentés, ce qui permet une classification homogène de l'information cartographique. La première phase de travail a consisté en une mise à l'échelle et une correction des déformations de toutes les cartes. Cette phase a été réalisée avec le logiciel ENVI. Les cartes sont d'abord géoréférencées dans le système de projection Lambert II étendu. Les différents points d'amer ont permis une rectification satisfaisante des images avec une précision de l'ordre de quelques pixels (mètres). La seconde phase de ce travail, a consistée en une classification des différentes unités de paysage observables et en une quantification grâce à la création d'un Système d'Information Géographique sous ArcView. La surface, la mobilité et la stabilité des formes du paysage alluvial sont ainsi connues à différentes dates.

Les sept unités de paysage identifiées sont :

- Les surfaces anthropisées comme les zones fortifiées et les villages.
- Les surfaces cultivées sur substrat non hydromorphe.
- Les zones graveleuses arborées élevées.
- Les zones de prairies humides dominées par une végétation arbustive et herbacée.
- Les zones sableuses à graveleuses, avec une végétation arbustive et herbacée absente ou réduite.
- L'eau des bras actifs du Rhin ainsi que des bras abandonnés.
- Les surfaces non renseignées

1.3.2.3. La qualité de l'information

L'intervalle de temps entre les cartes levées est irrégulier et parfois important. Il est court entre les trois premières cartes et important entre les deux dernières. Or les modifications dans les plaines alluviales étant discontinues, l'écart entre ces dates est de peu d'importance. La qualité de l'information ne dépend donc pas de la distribution temporelle de l'information cartographique. En effet, comme il a été constaté la plus grande quantité de sédiments transportés est atteint lorsque le débit atteint un seuil critique et pas nécessairement seulement pendant les pics extrêmes de débits. Ce « flux dominant » réalise les plus grandes modifications alluviales (Wolman et Miller, 1960 ; Thorne et Lewin, 1979 ; Thorne, 1982 ; Thorne et al., 1993). Dans le cas du Brahmapoutre, il est réalisé pendant environ 18 % du temps (Thorne et al., 1993).

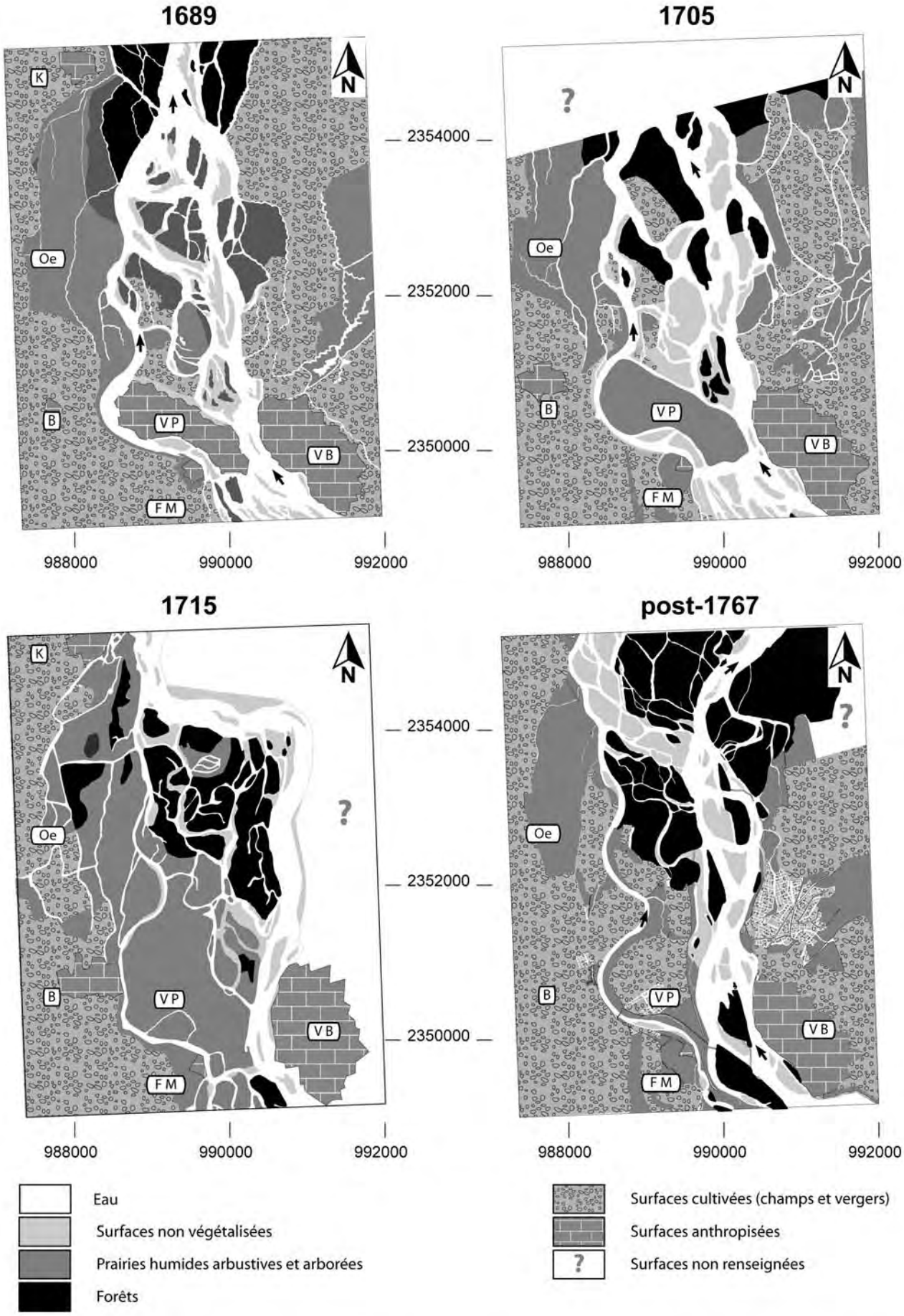


Figure 2.11 : Etats successifs de la plaine du Rhin supérieur dans le secteur d'étude de Vieux-Brisach/ Kunheim de la fin du 17ème siècle jusqu'au milieu du 18ème siècle.

Sept unités de paysage sont reconnues et permettent l'observation de l'évolution du milieu à proximité de l'occupation humaine. Du Sud au Nord, se distinguent les zones d'occupation de Fort-Mortier (FM), Vieux-Brisach (VB), Biesheim (B), la Ville de Paille (VP), Oedenburg (Oe) et Kunheim (K). Les coordonnées spatiales sont en Lambert II étendu.

1.3.2.4. Résultats

Trois grandes zones s'individualisent en fonction de la limite connue de l'inondation de 1863 (Figures 2.1 et 2.2). A l'Est et à l'Ouest, les terrasses weichséliennes peu inondables se placent de part et d'autres d'une plaine holocène située au centre de la zone d'étude. Au sein de cette plaine d'inondation l'évolution paysagère de plusieurs secteurs se dégage. L'image de la zone d'étude après 1767 présente assez peu de similitudes avec celle de 1689. Cette séquence d'images (Figure 2.11) permet donc de révéler l'existence d'une progression dans le développement des unités de paysage alluvial et de la géométrie en plan des chenaux.

- ***Etat de la plaine du Rhin en 1689***

Aux alentours de la dernière décennie du 17ème siècle (Figure 2.11), l'état de la plaine alluviale du Rhin présente sur chacune de ses rives un caractère à la fois anthropisé et naturel. L'occupation humaine dans le secteur d'étude est bien représentée sur cette carte. Le caractère anthropisé est marqué par la présence de plusieurs aménagements, au premier rang desquels on trouve les surfaces importantes occupées par la ville de Vieux-Brisach et la Ville de Paille.

Le village de Biesheim est représenté avec une extension limitée et se place à une centaine de mètres du bras secondaire du Rhin appelé Giessen ou bras de Fort Mortier. Le village de Kunheim en bordure du Rhin est plus développé.

Les surfaces cultivées sont peu importantes, se limitant nettement au rebord de la terrasse weichsélienne et donc à la limite des inondations de 1852 et 1876 (Cestre, 1877). Au sein de la plaine alluviale, des secteurs de dimensions plus réduites sont cultivés sur certaines îles situées à l'aval de la Ville de Paille. Les prairies humides sont bien représentées à cette date, les détails montrant même des haies résiduelles et des secteurs plus ou moins propices au développement d'arbres isolés ou d'arbustes.

L'absence d'habitat, hormis les redoutes militaires, ainsi que la présence de nombreux bras phréatiques du Rhin prenant leur source au pied de la terrasse attestent encore du caractère humide de ces zones. Les zones arborées sont essentiellement développées dans la plaine alluviale, notamment dans la partie Nord à la latitude de Kunheim. Un gradient vers le Sud est observé, aboutissant à une totale absence d'arbres au niveau de Fort Mortier. Au centre du secteur d'étude, les arbres localisés sur la carte sont dispersés dans une prairie humide plutôt que dans un paysage forestier. Les surfaces non végétalisées sont majoritairement observées au milieu de chenaux et se présentent sous des formes diverses pouvant être allongées à compactes. Enfin, la surface occupée par l'eau est très importante, dominante à l'échelle du secteur d'étude.

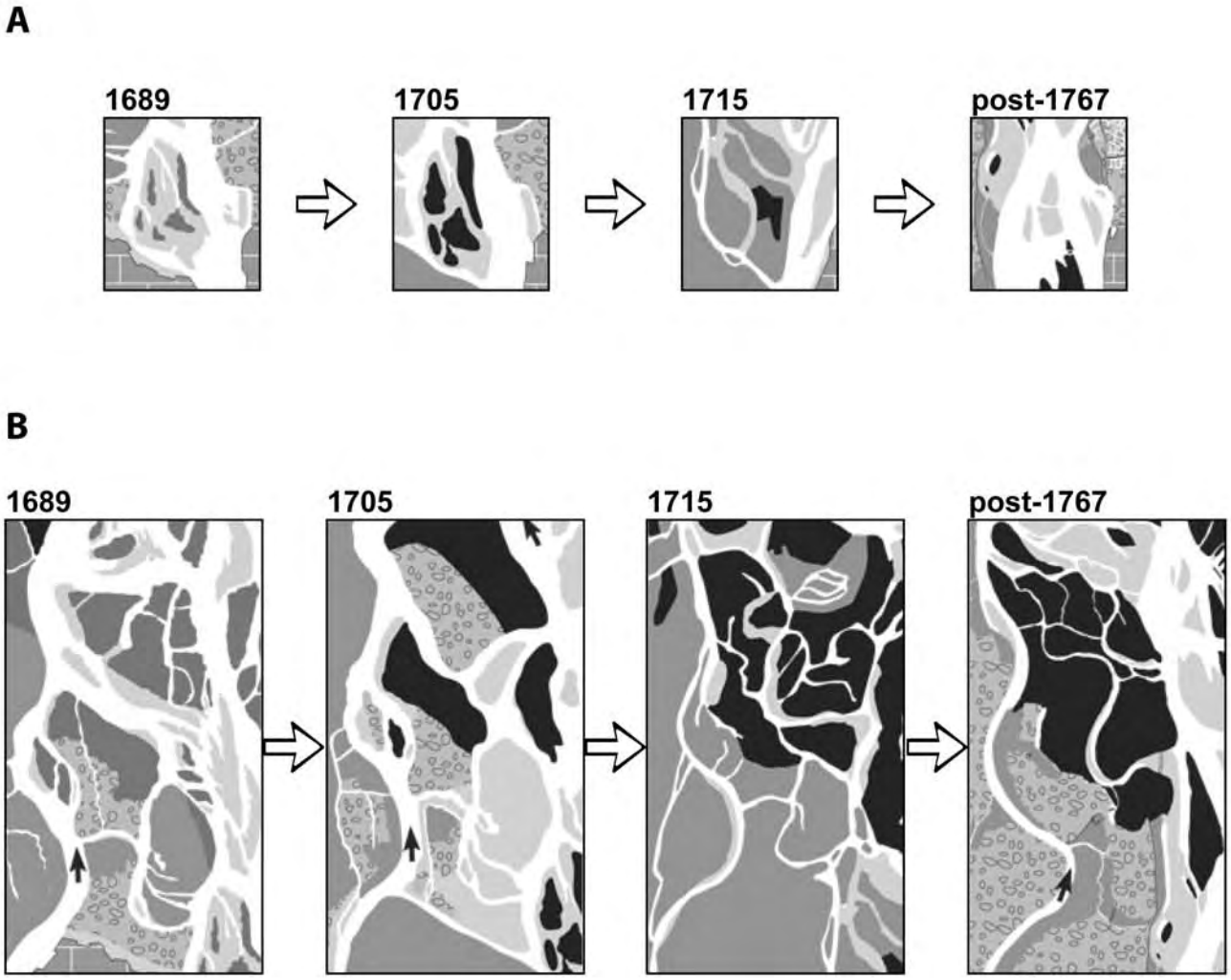


Figure 2.12 : Détails de l'évolution historique de la plaine du Rhin dans le secteur d'étude.
A) La stabilisation d'une barre peu végétalisée se fait d'abord par le développement, en quelques années, d'une végétation pionnière arborée et arbustive. Celà est réversible, notamment lors de crues importantes.
B) Le passage d'un système en tresses vers un système en anastomoses se fait par la végétalisation et par l'amalgamation des barres ainsi que par la réduction de la largeur des chenaux. A l'inverse, le passage d'un système en anastomoses vers un système en tresses se produit lors d'événements hydrologiques importants au cours desquels se produisent des avulsions ou des bifurcation de la bande de tressage vers une nouvelle partie de la plaine.

Plusieurs secteurs peuvent être distingués en fonction de la géométrie des chenaux, de leur forme ainsi que des îles et barres observées. Au centre de la plaine alluviale, au niveau de Vieux-Brisach, une bande de chenaux actifs se développe, ils sont séparés par des surfaces non végétalisées de taille réduite et présentant un allongement vers le Nord. Ces barres mobiles empêchent l'installation durable des arbres de la forêt riveraine. Ce secteur présente donc un style typiquement en tresses.
Au niveau de la Ville de Paille, le cours de Rhin se divise en deux bras distincts, à l'est une bande de tresses larges et à l'Ouest, un chenal unique moins large et isolant la Ville de Paille du Fort Mortier. Ce chenal méandrisant rejoint plus au Nord, à la latitude d'Oedenburg, une seconde bande de tressage actif qui rejoint la première quelques kilomètres après leur séparation à la latitude de Kunheim. Les nombreuses îles de la plaine sont parcourues par des chenaux de faible largeur et semblent s'amalgamer à la faveur des importants volumes de sédiments non végétalisés récemment déposées.

- ***Etat de la plaine du Rhin en 1705***

Aux alentours de 1705, les surfaces cultivées sont présentes sur les terrasses tandis que dans la plaine alluviale leur surface diminue par endroits. Les prairies humides se localisent de façon importante au pied de la terrasse weichsélienne et se développent à proximité de Fort Mortier. Au sein de la plaine alluviale, la Ville de Paille démantelée est totalement occupée par ce type de paysage tandis que les autres îles situées en aval au contraire ont un caractère favorisant les cultures et les surfaces arborées. Les zones arborées non observables dans la partie Nord de la carte se développent vers le Sud de la latitude de Kunheim jusqu'à la latitude du site d'Oedenburg. Les surfaces non végétalisées se développent de façon importante dans la partie orientale de la plaine alluviale en aval de la Ville de Paille. Les formes sont majoritairement allongées dans l'axe du fleuve. Enfin, la surface occupée par l'eau est peu importante ce qui se caractérise par des chenaux de largeur réduite dans l'ensemble de la zone. Une bande de tressage simple est limitée à la partie orientale de la plaine.

- ***De 1689 à 1705***

Entre 1689 et 1705 se produisent l'abandon de la Ville de Paille ainsi que de la destruction du pont reliant les deux rives. La surface anthropisée diminue donc localement de façon assez importante. Au même moment le village de Biesheim jusqu'alors un peu plus éloigné du Rhin et peu développé à la suite de sa destruction au 17ème siècle, se rapproche du bras de Fort Mortier (Giessen) et s'agrandit. Ces deux événements concomitants induisent de ce fait une diminution modeste de la surface anthropisée de notre zone d'étude.
La composante végétale du paysage évolue aussi, et un gradient peut être observé, de la terrasse vers le Rhin, en fonction de l'intensité des changements morphologiques.

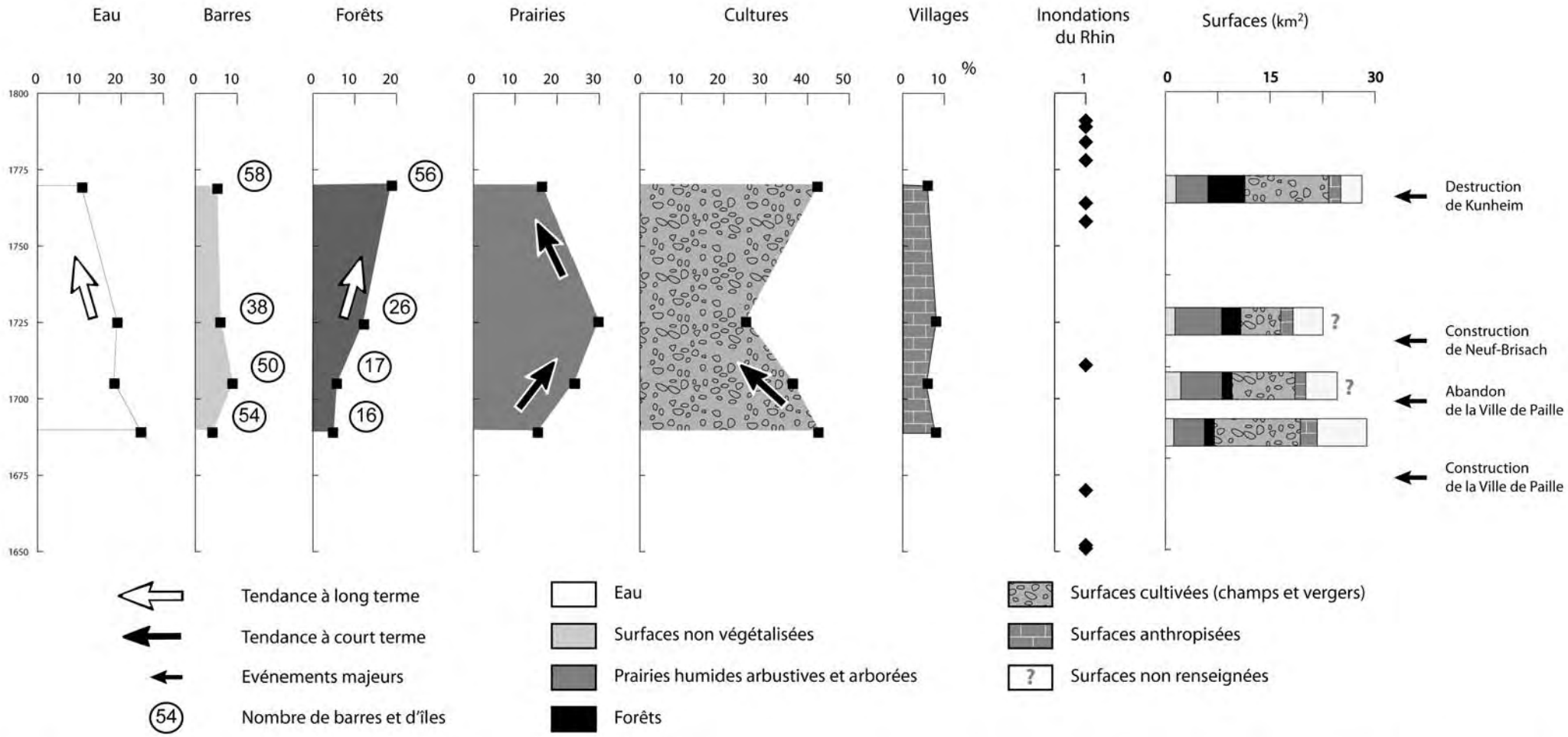


Figure 2.13 : Evolution des surfaces occupées par chacunes des unités élémentaires de paysage dans le secteur de Vieux-Brisach/ Kunheim entre 1689 et 1767 en relation avec les inondations historiques du Rhin et des événements majeurs.

Les tendances à long terme comme les augmentations de surfaces occupées par l'eau ou les forêts sont indiquées par des grandes flèches blanches. Les tendances à court terme comme des fluctuations des surfaces cultivées et des prairies humides sont indiquées par des grandes flèches noires. Les événements majeurs de l'histoire locale comme les abandons de la Ville de Paille après le traité de Rieswick ou de Kunheim après sa destruction par les crues du Rhin sont repérés avec des petites flèches noires. Au cours du temps, la surface non végétalisée reste relativement faible mais le nombre de barres évolue fortement. Pour les surfaces arborées, en revanche, la surface augmente simultanement avec le nombre d'îles.

En 1689, les deux terrasses sont préférentiellement occupées par des surfaces cultivées bien que, par endroits, quelques prairies humides soient présentes, notamment en rive droite. Cette situation persiste jusqu'après 1705 avec par endroits de faibles variations de la surface occupée par ces prairies humides.

Entre 1689 et 1705, la plaine d'inondation à proximité d'Oedenburg est occupée de manière identique, par des prairies humides. Cet état hydromorphe est confirmé par la présence de nombreux cours d'eau phréatiques suffisamment importants et stables pour être figurés sur les deux cartes. Il existe donc une certaine continuité géomorphologique dans le secteur d'Oedenburg entre les deux dates. Cependant, dans le reste du secteur, un gradient dans l'intensité de changement de paysage est mis en évidence d'Est en Ouest.

Ainsi, si la terrasse reste cultivée de façon quasi-équivalente entre 1689 jusqu'en 1705 et si le secteur d'Oedenburg reste occupé par des prairies humides, il n'en est pas de même dans l'ensemble de la plaine alluviale. Les zones de prairies humides, en effet, évoluent différemment selon leur position par rapport à la zone de tressage actif. Vers le centre de la plaine alluviale, on observe soit une évolution vers une dénudation, soit une évolution vers une augmentation de la surface arborée. Ainsi, juste à l'aval de l'Ile de Paille, les îles correspondant jusqu'alors à des prairies humides ou même de zones cultivées évoluent vers des zones non végétalisées. A l'inverse, un peu plus vers l'aval, les îles deviennent plus amalgamées et présentent une augmentation des surfaces forestières ce qui correspond à une aggradation de ces zones.

La présence sur certaines îles de deux types de paysage, cultures en amont et forêts en aval, s'explique par l'asymétrie topographique de ces îles. La zone amont étant en général toujours plus élevée et ancienne, donc plus sèche et propre à l'établissement de cultures, que la zone avale plus récente. L'aggradation en amont est plus importante que dans la partie de l'île située en aval.

Dans d'autres cas, les zones les plus évoluées (élevées et arborées) se placent au centre de l'île tandis qu'en périphérie dominent les zones non végétalisées, cela correspond à l'amalgamation de plusieurs barres de taille réduite formant une île d'étendue plus importante (Figures 2.11 et 2.12).

Un des événements géomorphologiques majeurs se produisant entre les deux dates est l'abandon d'une des bandes de tressage, orientée SE - NO à la latitude d'Oedenburg. En effet, en 1689, la plaine du Rhin est dominée par deux bandes de tressage étroites tandis qu'en 1705, une seule bande large persiste à l'Est. La surface occupée par l'eau diminue alors en passant d'environ 30% à 20%, tandis que la surface occupée par les zones non végétalisées augmente pour atteindre presque 10% (Figure 2.13). En réalité le nombre de barres non végétalisées diminue mais leurs dimensions augmentent.

La tendance à l'amalgamation est donc confirmée au cours de cette phase. Elle s'accompagne d'une augmentation des surfaces arborées et des prairies humides surtout dans la zone médiane de notre secteur d'étude. En parallèle, la surface cultivée diminue d'environ 10%, ce qui est essentiellement attribuable à la compétition avec les prairies humides.

➢ *Etat de la plaine du Rhin en 1715*

En 1715 (Figures 2.11 et 2.12), l'état de la plaine alluviale du Rhin présente de nombreuses différences avec les deux précédents états observés aussi bien sur la terrasse que dans la plaine d'inondation ou encore au niveau de la géométrie en plan des chenaux du Rhin. Malgré une importante surface non documentée située dans la partie Est de la zone d'étude, l'information est accessible pour l'essentiel de la plaine alluviale. Les deux villages de Biesheim et Kunheim connaissent un important développement vers l'Est jusqu'au bord des chenaux les plus occidentaux du Rhin. Le village de Biesheim est donc limité à l'Est par le Giessen, bras latéral du Rhin, tandis que Kunheim (non documenté sur la carte de 1705) est limité par un bras mineur déconnecté du Rhin prenant sa source dans la plaine vers Oedenburg. Les cultures se développent bien sur la terrasse graveleuse mais semblent absentes de la plaine. Dans la plaine d'inondation, l'augmentation des surfaces de prairies humides se fait principalement aux dépends de la surface cultivée. Au Sud d'Oedenburg, presque toutes les îles amalgamées présentent une importante proportion de prairies humides parcourues par de multiples chenaux en cours de comblement. C'est notamment le cas de l'ancienne Ville de Paille. L'importance de ces surfaces résulte sans doute d'un choix agricole privilégiant le pastoralisme et l'élevage et/ou d'un niveau de nappe élevé. Dans la zone centrale, les zones arborées présentent une répartition spatiale resserrée et sont aussi parcourues par de nombreux chenaux secondaires étroits à sinuosité importante. Enfin, la surface occupée par l'eau présente une valeur relativement faible clairement liée à la faible largeur des chenaux et à leur abandon. Le secteur d'étude présente donc aux alentours de 1715 un style typiquement en anastomoses, à l'exception de l'étroite bande de tressage située à l'Est où l'essentiel des zones non végétalisées est observé.

➢ *De 1705 à 1715*

Entre 1705 et 1715, la surface anthropisée augmente sensiblement, notamment au niveau des villages de Biesheim et de Kunheim (Figures 2.11 et 2.13). Au cours de cette période, l'amalgamation initiée précédemment se poursuit, et conduit à la dominance dans le paysage des prairies humides et des zones arborées. Du rebord de terrasse jusqu'au milieu de la plaine alluviale, les chenaux deviennent de plus en plus étroits et sinueux mais semblent marquer une forme de persistance par rapport à la phase précédente (Figure 2.12). Ceci est vraiment caractéristique d'un système anastomosé (Makaske, 2001 ; Bridge, 2004) avec des chenaux peu ou pas mobiles et une plaine d'inondation très hydromorphe de prairies humides.

A l'Est, la bande de tressage se réduit en largeur, ce qui est cohérent avec la diminution forte du nombre et de la surface des zones sans végétation (barres mobiles). Cette bande de tressage présente en outre une augmentation de sa sinuosité vers le Nord où un changement important de direction vers

le Nord-Ouest est observé. Dans la zone médiane, la surface arborée augmente de façon significative en même temps que le nombre d'îles double quasiment.

Deux raisons peuvent expliquer la diminution de la largeur des chenaux observée selon que l'on se place dans la moitié Sud ou dans la moitié Nord de notre secteur d'étude. Au Sud, la première raison est en partie due à la déconnection progressive des chenaux latéraux anastomosés du Rhin par rapport à la bande de tressage située à l'Est. De ce fait la contribution des dépôts d'inondation fins s'accroît tandis que le débit diminue. Au Nord, la seconde raison est le rôle complexe joué par la présence de forêt alluviale en cours de maturation. Cet impact de la végétation arborée sur la largeur des chenaux est bien connu (Thorne, 1990) et sera rediscuté plus loin. Cette phase correspond donc à une augmentation du gradient déjà initié entre 1689 et 1705. Vers le Nord la végétation arborée se développe et colonise toutes les îles hautes.

Sur la terrasse weichsèlienne, la pression anthropique s'accroît encore un peu plus avec le développement du village de Biesheim et de Kunheim. Au pied de cette terrasse, les prairies humides déjà présentes se développent encore jusqu'à être dominantes autour du Fort Mortier ainsi que sur les îles amalgamées comme l'Ile de Paille jusqu'à Kunheim. La surface cultivée diminue donc à la fois en faveur des zones dédiées à l'habitat sur la terrasse et des prairies humides dans la plaine d'inondation.

Ainsi, entre 1705 et 1715, l'évolution géomorphologique se traduit surtout par l'augmentation du caractère anastomosé de la plaine du Rhin, marquée par la diminution de la largeur des chenaux, et leur mobilité réduite.

➢ *Etat de la plaine du Rhin en 1767*

Vers 1767, avec l'abandon du village de Kunheim, la surface occupée par les aménagements anthropiques est donc relativement faible (Figures 2.11 et 2.13). Les prairies humides se localisent uniquement sous la forme de bandes étroites le long des chenaux comme le Giessen ou encore au pied de la terrasse vers Oedenburg. La surface cultivée, en revanche est présente non seulement sur la terrasse mais aussi sur une partie très importante de la plaine d'inondation et notamment au droit de la Ville de Paille. L'ensemble de la partie Nord est occupé par de nombreuses îles arborées parcourues par de multiples chenaux étroits et sinueux. On note cependant une très importante anomalie, nouvelle, correspondant à deux bandes de tressage qui se différencient par l'importance des barres non végétalisées présentes. A l'Ouest, la bande de tressage est effectivement plus occupée par des barres que la bande située à l'Est. Cette dernière recoupe la première ce qui indique un régime du Rhin moins contrasté dans les chenaux situés à l'Est que dans ceux situés à l'Ouest où l'étiage est beaucoup plus marqué. Ce dernier état marque donc le retour d'un Rhin à deux bandes de tressage comme en 1689.

- ***Des années 1715 aux années 1767***

Entre 1715 et 1767, se produisent la destruction du village de Kunheim, puis sa reconstruction sur la terrasse. Cette modification drastique du paysage alluvial est due à l'augmentation de la fréquence des inondations à cette époque. La figure 2.13, met en évidence l'augmentation des les événements hydrologiques majeurs du Rhin, relevés par Champion (1858-1864). Cela permet de constater que c'est surtout à la fin de cette période que la fréquence des inondations du Rhin augmente. Ces événements ont aussi probablement permis la formation d'une nouvelle bande de tressage. Les surfaces de prairies humides, qui étaient très importantes en 1715, diminuent considérablement. A l'inverse, dans l'ensemble du secteur on remarque une augmentation de la surface cultivée qui remplace en 1767 les zones humides de 1715, comme c'est le cas de la Ville de Paille où champs et vergers peuvent être identifiés. Les surfaces arborées sont aussi en forte augmentation dans le même temps que le nombre d'île augmente, surtout dans la partie septentrionale du secteur d'étude. Ces nombreuses îles forestières forment un ensemble homogène et compact parcouru par de nombreux chenaux de très faible largeur et très sinueux dont la position est restée stable.

1.3.2.5. Les surfaces mesurées

La surface occupée par les barres non végétalisées présente donc une faible augmentation et une relative stabilité au cours de tout le 18ème siècle puisqu'elle varie peu entre 5 et 10% de la surface totale de la zone d'étude (Figure 2.13). En revanche la surface des chenaux diminue tout au long de la période renseignée, alors qu'augmentent les surfaces arborées. L'établissement des forêts alluviales du Rhin se fait très tôt et ces résultats mettent en évidence le rôle probable de ces surfaces arborées dans l'amalgamation des barres, l'aggradation des chenaux et l'augmentation de la fréquence des avulsions. En effet, l'évolution de la plaine conduit à des stades terminaux forestiers élevés par rapport à la nappe qui permettent une grande stabilité des îles vis-à-vis de l'érosion. Cette co-évolution de la largeur des chenaux et de la surface forestière est cohérente avec l'aggradation de la plaine alluviale. Cependant, même si la surface arborée augmente, la stabilité des îles n'est pas équivalente pour chacune des zones de la plaine alluviale. Cela rend compte de la relation complexe à moyen terme entre la dynamique végétale et de l'évolution de la géométrie en plan du Rhin.

1.3.2.6. L'évolution de l'indice de tressage

L'évolution longitudinale du nombre de chenaux et de l'indice de tressage (Figure 2.14) est mise en évidence selon un gradient Sud-Nord, de Vieux-Brisach à Kunheim. L'indice de tressage utilisé ici a été défini par Howard et al. (1970) et Hong et Davis (1979). Il correspond au nombre de chenaux ou de barres par section de la plaine alluviale et se rapproche de l'indice proposé par Rust (1978). Il s'applique bien à la plaine alluviale à la fois en tresses et en anastomoses de ce tronçon du Rhin supérieur. Cet indice permet de limiter les erreurs dues aux mesures (Bridge, 2004) et il est plus simple a appliquer dans le cas des cartes anciennes que ceux utilisés par Mosley (1981), Richards (1982) ou encore Friend et Sinha (1993) qui s'appuient tous sur les longueurs des chenaux (valeurs faibles par rapport à l'incertitude), ce qui augmente le risque d'erreurs de mesure.

A l'échelle de cette étude sur cartes anciennes portant sur plusieurs décennies, différentes tendances dans la dynamique de sédimentation peuvent être mises en évidence. A la latitude de Vieux-Brisach, une nette diminution du nombre de chenaux passant de 10 à 3 est observée au cours du 18ème siècle. Un kilomètre plus en aval, le nombre de chenaux reste stable pendant toute la période considérée. L'importante cohésion de l'ancienne Ville de Paille empêche, même après son abandon, de nouveaux chenaux de la parcourir et donc d'entraîner sa mobilité. A la latitude d'Oedenburg, à l'aval de la Ville de Paille, le nombre de chenaux diminue fortement ou reste stable. Cela est causé par l'amalgamation des différentes barres et donc à l'aggradation de cette partie de la plaine alluviale. Entre Oedenburg et Kunheim, l'indice (stable de 1689 jusqu'en 1715), augmente considérablement en 1767. Cela est dû à la formation d'une nouvelle bande de tressage observée en 1767. Enfin, vers Kunheim, le nombre des chenaux augmente faiblement.

Les variations Sud Nord semblent traduire bien une tendance à long terme de la plaine alluviale, avec la mise en évidence de zones stables et de zones à forte variation de la géométrie des chenaux. La zone en aval de Vieux-Brisach où peu de chenaux sont observés est plutôt fixe, tandis que plus loin en aval, vers Oedenburg, on observe une variabilité du nombre de chenaux même s'il reste toujours élevé. De plus, on remarque un déplacement de la bande de tressage actif vers le Nord sur une période de temps courte.

D'une façon générale, et quelque soit l'époque considérée, on constate qu'au sein de la plaine alluviale, le nombre de chenaux de la plaine diminue de façon importante au niveau de Vieux-Brisach ainsi qu'en amont d'Oedenburg tandis qu'il augmente à la latitude de Kunheim ou encore en aval du site d'Oedenburg. Des zones fixes sont également mises en évidence avec peu de chenaux au droit de la Ville de Paille, et avec plus de chenaux vers Oedenburg et en amont de Kunheim

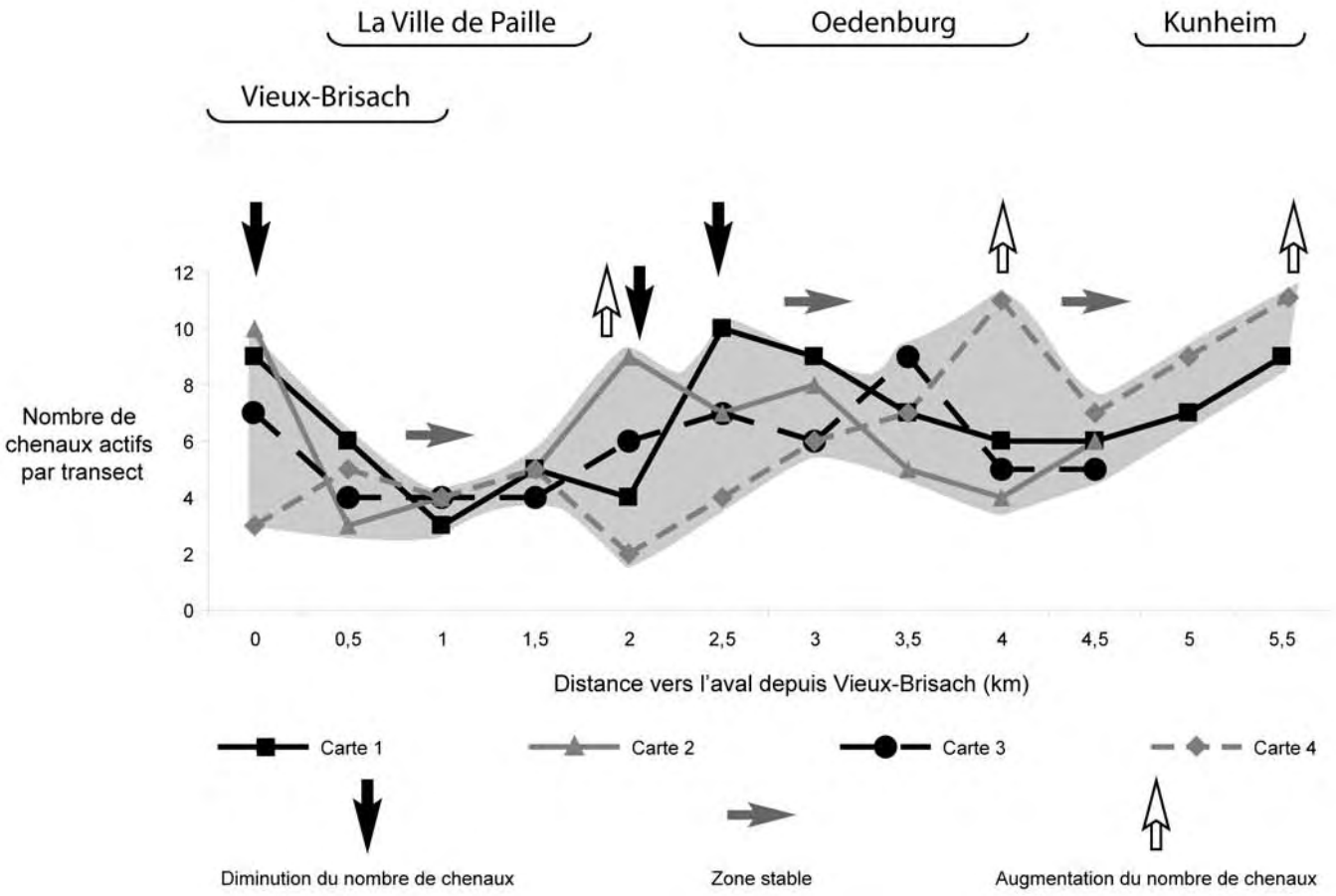


Figure 2.14: Evolution du nombre de chenaux au cours du temps le long du Rhin par section tranversale de la plaine tous les 500 mètres dans le secteur d'étude.

Les flèches grises indiquent les zones stables ou le nombre de chenaux évolue peu au cours du temps, tandis que les flèches blanches indiquent une augmentation importante du nombre de chenaux et les flèches noires, les zones ou le nombre de chenaux diminue de façon importante au cours du temps. Au kilomètre 2, en amont d'Oedenburg, le nombre de chenaux augmente puis diminue, tandis qu'à la latitude de la Ville de Paille, il reste stable pendant toute la période d'étude. A la latitude de Kunheim, les changements importants de style alluvial résultent en une faible augmentation du nombre de chenaux.

1.3.3. La dynamique des chenaux

A très haute résolution spatiale, cette fois, les plans anciens disponibles permettent d'appréhender la dynamique sédimentaire et morphologique des chenaux (Figures 2.15 et 2.16). Il est alors possible de mieux comprendre les changements se produisant sur une échelle de temps courte. Les plans à très grande échelle qui sont à notre disposition présentent un grand intérêt car ils montrent l'érosion des berges du Rhin et parfois les travaux envisagés pour y remédier sur deux secteurs du Rhin aux deux extrémités de la zone d'étude. Les différents types d'aménagements proposés sont des épis ou des digues (Figure 2.10). Le premier secteur se situe en amont du Fort Mortier (Figure 2.15). Il est documenté par un premier plan datant de 1789 et un second datant de l'an 5 de la République (1796-1797). Ils indiquent la position et la forme du chenal de Fort Mortier à l'Ouest ainsi que la zone de tressage du Rhin située plus à l'Est. Le long de ce bras se placent des redoutes et les surfaces érodées par l'action du fleuve au cours des années précédentes sont mises en évidence. Le premier plan montre notamment la destruction des digues servant à la protection contre les inondations. Le second plan offre la possibilité de quantifier l'érosion entre 1791 et l'an 5 de la République (1796-1797) c'est-à-dire sur une durée de 5 à 6 ans. Cette érosion qui affecte la rive gauche de la zone de tressage est de l'ordre d'une cinquantaine de toises soit environ 100 m (la toise est égale à 1,949 m). Cette valeur est considérable puisque cela indique un taux de déplacement latéral supérieur à 16,6 m/an soit plusieurs centaines de mètres cubes.

Sur la carte de 1789, est également indiquée la profondeur minimum d'un chenal actif assez large qui est de l'ordre de 10 m au niveau d'un « tourbillon » noté au milieu du chenal (environ 30 pieds, 1 toise est égale à 6 pieds). Ce plan montre aussi la zone de dépôt des sédiments à l'aval d'une île faiblement végétalisée. Ces dépôts ne sont pas encore végétalisés, ce qui atteste de la mise en place récente des sédiments.

Le second secteur (Figure 2.16) se place au droit du village de Kunheim. Il est documenté par des plans datant de 1756 jusqu'à 1767. C'est dans cet intervalle de temps que la rive gauche du Rhin au bord de laquelle se plaçait le village de Kunheim a été fortement érodée, conduisant à l'abandon du village. L'ordre de grandeur du taux d'érosion dans ce secteur est très comparable avec celui mesuré pour la zone décrite précédemment, c'est-à-dire supérieur à 15 m/an sur une dizaine d'années. Cela correspond donc à plusieurs centaines de mètres cubes d'alluvions remobilisées par le Rhin en quelques événements isolés.

Ainsi, les plans à très grande échelle permettent la mise en évidence de taux d'érosion et de déplacement très importants au sein de la zone de tressage. En revanche, le bilan reste stable du point de vue de la végétation puisque les barres créées par le dépôt des particules se font à une distance négligeable de la zone d'érosion.

A

B

Figure 2.15 : Plans anciens du secteur situé à proximité de Fort-Mortier datant du 18ème siècle.

A) Plan datant de l'An 5 de la République (1796) permettant l'observation de la surface de berge érodée depuis 1791. Il a pour titre : "Plan d'une partie du cours du Rhin dans le Ban de Geisswasser qui indique les dégradations que fait le grand cours du Rhin à notre rive et la réparation urgente à faire à la partie AAA de la digue de bordage pour empecher les eaux de se porter dans le bras du fort mortier B".

Archives Départementales du Haut-Rhin.

B) Plan de 1789 ayant pour titre "Bout de carte d'une partie du cours du Rhin et du bras du fort mortier relativement au projet d'un Epy de barrage pour le bras dit Szwerck giessen et d'une digue, à l'effet de garrentir des Innondations tant le dit fort mortier que le rivage et la contrée. 1789".

Archives Départementales du Haut-Rhin.

Ce plan très détaillé renseigne sur la profondeur du chenal. Celle-ci est égale à 30 pieds au moins, tandis que la largeur du chenal est d'environ 50 toises.

Cela signifie que la forte variation dans la géométrie des chenaux ne se traduit pas forcement par une forte modification de la largeur des chenaux ou de la surface des barres non végétalisées. Cette remarque rejoint tout à fait les observations réalisées à moyenne échelle, où on a pu remarquer que même si les barres varient beaucoup en nombre ainsi qu'en position, leurs surfaces cumulées reste assez stable, de l'ordre de 10% de la surface totale mesurée.

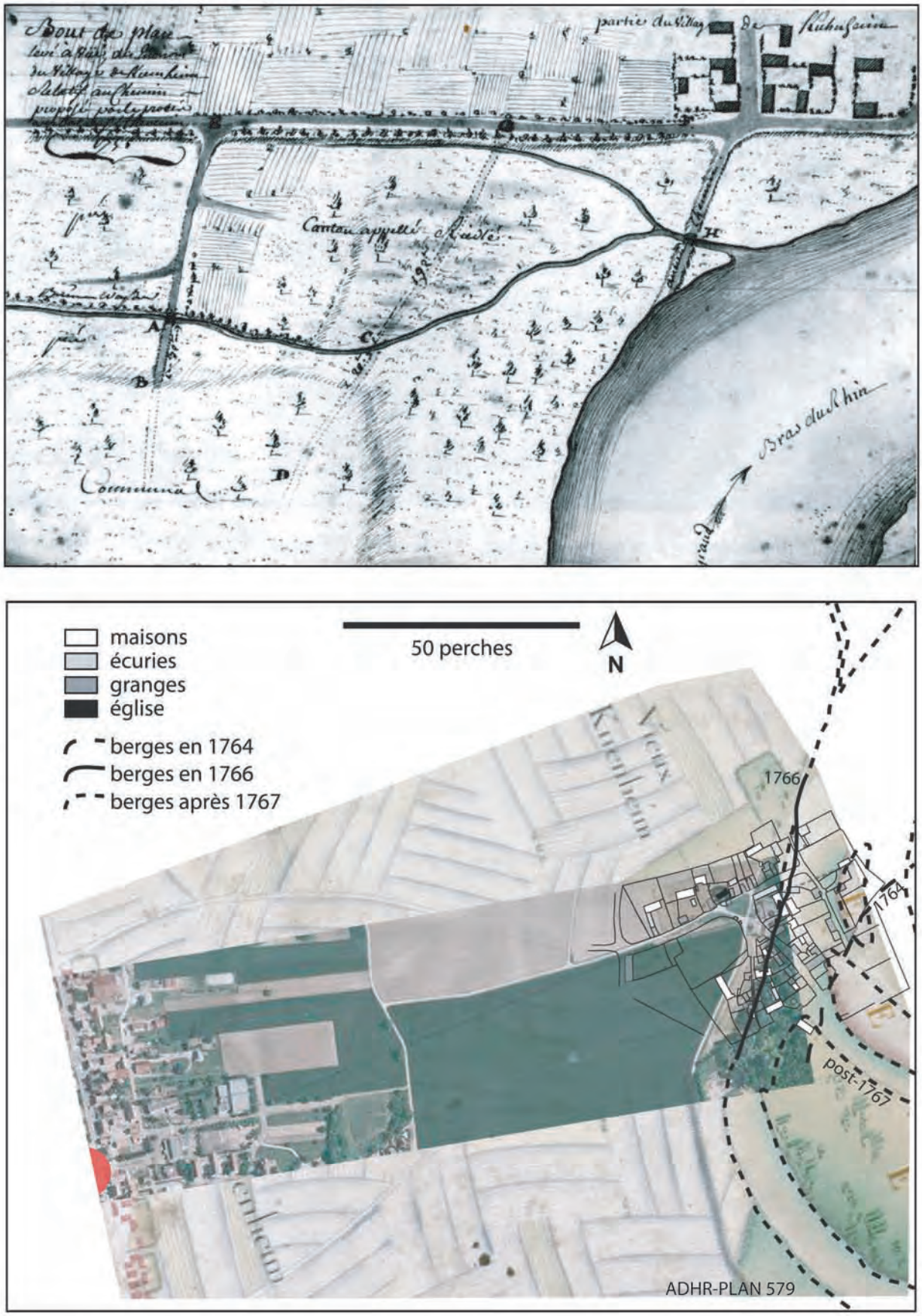


Figure 2.16 : Diffèrents états des berges du Rhin au niveau de l'ancien village de Kunheim et des batiments qui le composaient.

A) Croquis datant de 1756, permettant d'observer les situations respectives de l'ancien village de Kunheim et du Rhin (ADHR C1267).

B) Diffèrents plans anciens couvrant la période 1764-1767 ont permit de restituer l'évolution de la bordure occidentale du Rhin à proximité de l'ancien village de Kunheim. En 1766-1767, le village est déplacé plus à l'Ouest.

1.4. DISCUSSION

1.4.1. Cinétique des changements

La durée d'observation correspondant à l'analyse quantitative des cartes anciennes est supérieure à 78 années. Elle permet de rendre compte de l'évolution de la végétation dans la plaine alluviale pendant une durée compatible avec la durée moyenne nécessaire à la maturation d'une forêt alluviale naturelle. En effet, il est admis que le stade forestier terminal est atteint au bout d'une durée minimale d'une cinquantaine d'années. La période d'observation est, de plus, suffisamment longue pour rendre compte des caractéristiques générales de ce secteur, invariables sur une centaine d'années.

A moyen terme, la durée d'observation permet de décrire l'évolution de la plaine alluviale à une échelle de temps suffisante pour que les effets des variations hydrologiques d'ordres pluriannuels à pluridécennales soient observés.

En d'autres termes, cette approche permet d'intégrer les différents processus géomorphologiques à plusieurs échelles de temps et d'espace, ce qui constitue un modèle possible pour l'interprétation des événements et des tendances se produisant à l'époque antique sur le site d'Oedenburg.

1.4.2. Les caractéristiques à long terme

Outre les variations observées, des caractéristiques générales, à long terme et invariables à l'échelle d'observation, peuvent être observées. Du 16ème au 18ème siècle, la zone d'étude présente la spécificité d'une coexistence d'un système en tresses vrai et d'un système anastomosé vrai. A l'amont de Vieux-Brisach le style est majoritairement en tresse, puis, au niveau de Vieux-Brisach, quelle que soit l'époque prise en considération, il est possible d'observer un nombre assez faible de chenaux et de barres plus ou moins stables. A partir de Vieux-Brisach, la plaine alluviale adopte alors véritablement les deux styles, à la fois en tresses (avec des barres non végétalisées mobiles et une faible sinuosité) et en anastomoses (avec des chenaux plus sinueux et plus stables et une plaine alluviale humide se développant verticalement).

Cette évolution longitudinale plurikilométrique de la géométrie en plan peut résulter à la fois de l'impact de la lithologie et de la subsidence. Lorsqu'un cours d'eau traverse une anomalie lithologique, la géométrie de sa plaine alluviale en est considérablement affectée. Dans la zone d'étude, une anomalie lithologique majeure qui correspond au rocher sur lequel se développe la ville de Vieux-Brisach. Cette anomalie entraîne un rétrécissement de la plaine d'inondation et favorise la réduction du nombre de chenaux et l'incision locale de la plaine (Figure 2.1). De plus, nous savons que cette zone du Rhin supérieur est affectée par une forte subsidence d'origine tectonique. Or comme pour la lithologie, l'impact de la subsidence sur les plaines alluviales a été largement décrit (Gregory

et Schumm, 1987) et il a été démontré que ce mode de création de pente influence la variation de la géométrie en plan des chenaux selon un profil longitudinal (Ouchi, 1985). Dans les zones de dépôts privilégiés, le nombre de chenaux peut augmenter et les avulsions et bifurcations localisées peuvent conduire au développement de chenaux anastomosés.

A long terme, il existe donc probablement un contrôle conjoint de la lithologie et de la subsidence qui conduit au droit de Vieux-Brisach à l'existence d'un nombre réduit de chenaux dans une plaine étroite et en aval, à la présence d'une plaine alluviale à multiples chenaux dans une plaine élargie.

Mais le contrôle tectonique ne se limite pas à l'évolution longitudinale du style alluvial. En effet, latéralement il est possible de proposer un autre contrôle à long terme, notamment dans la zone d'étude ou la spécificité très originale est la coexistence dans un espace très réduit d'un système tressé vrai et d'un système anastomosé vrai. Cette différentiation de la plaine alluviale est probablement soit du à un gradient d'Est en Ouest, de l'apport sédimentaire et de la subsidence. La co-existence des deux styles alluviaux au cours de l'Holocène serait un équivalent à ce qui est observé pour l'ensemble du Quaternaire pour lequel l'épaisseur des dépôts varie très rapidement entre la zone dite des « bas fonds » à l'Ouest et les versants du Kaiserstuhl à l'Est. Cette anomalie d'origine tectonique induit donc non seulement un changement de direction du Rhin, mais favorise le développement des avulsions vers une direction préférentielle vers l'Ouest. Les paléochenaux anciens tardiglaciaires successifs, observés sur le site d'Oedenburg et longeant la terrasse présentent des caractéristiques comparables (dimension, forme, orientation vers l'Ouest) au bras du Rhin à l'origine de la destruction de Kunheim au 18ème siècle.

1.4.3. Le rôle de la végétation

L'impact de la végétation sur les chenaux et les plaines alluviales est important (Thorne, 1990) et de nombreux travaux récents se sont focalisés sur ces interactions complexes entre les cours d'eau et la végétation riveraine qui leur est associée. Du point de vue hydraulique, les interactions entre les écoulements et la végétation sont complexes, les processus se déroulant à de nombreuses échelles de temps et d'espace (Hardy, 2006). La connaissance des interactions entre la végétation riveraine et la rivière est importante pour la compréhension des variations des flux sédimentaires et des variations géomorphologiques aussi bien à l'échelle du chenal que de la plaine alluviale (Bendix and Hupp, 2000; Hupp, 2000; Roberts, 2000; Tabacchi et al., 2000 ; Brookes et al., 2001; Gurnell et al., 2001).

A l'échelle du chenal, l'impact que peut avoir la végétation sur l'écoulement ou sur la stabilité des bancs est majeur (Tal et al., 2003 ; Green, 2005). En effet, la végétation entraîne une modification de l'hydrologie, de l'érodabilité de berges (propriété géotechniques) ainsi que des processus de dépôts (Abernethy and Rutherfurd, 2000 et 2001; Wood et al., 2001). Il s'agit ici surtout de la rugosité induite

par la végétation se développant dans les chenaux et qui dépend de leur position dans le chenal, de la dimension des végétaux, de la proportion occupée par la végétation dans le chenal (Green, 2005). La résistance à l'érosion causée par la végétation en bordure de chenal peut aussi impliquer une diminution de la vitesse du courant Abernethy and Rutherfurd, 2000). Ce paramètre induit une plus grande préservation des sédiments dans les chenaux et une donc aggradation des dépôts. Cette aggradation causée par l'établissement et la stabilisation de la végétation riveraine résulte dans une augmentation de la fréquence du risque des inondations ainsi que des avulsions (Graf, 1978 ; Eschner et al., 1983).

A plus petite échelle, la végétation correspond à un paramètre considérable dans l'évolution du style de la plaine alluviale ainsi que dans la dynamique sédimentaire. La végétation a donc des effets directs sur le transport sédimentaire ainsi que sur la géométrie en plan des chenaux (Tooth and Nanson, 2000 ; Coulthard, 2005 ; Tal et al., 2003 ; Gran et Paola, 2001).

Dans les plaines alluviales en tresse, la végétation aurait deux effets majeurs sur la formation de formes alluviales dans les chenaux. Un premier résultant dans l'augmentation du nombre de chenaux et des barres qui leur sont associées. Un second lié à la stabilisation des barres conduisant à la formation d'îles relativement stables et donc à la réduction de la migration de ces formes alluviales, ce qui est pourtant caractéristique des zones en tresses.

Les résultats de la présente étude suggèrent aussi le rôle probable de la végétation dans la dynamique de la plaine alluviale du Rhin supérieur. La relation entre la réduction de la largeur des chenaux et la stabilisation des barres/îles avec la végétation est établie par l'analyse des cartes anciennes. En effet, lorsque la surface arborée augmente, la taille des chenaux diminue et l'amalgamation des barres se produit favorisant ainsi la préservation des dépôts. Ceci conduit à une aggradation des barres/îles et peut participer à l'augmentation de la fréquence des avulsions et des bifurcations au sein de la plaine alluviale.

1.4.4. Le rôle du Climat

Les variations climatiques sur les plaines alluviales holocènes sont connues pour figurer parmi les paramètres forçants les plus importants (Blum et Törnqvist, 2000 ; Vandenberghe, 2000). La période étudiée correspond à la fin du Petit Age Glaciaire au cours duquel plusieurs variations climatiques notables se sont produites (Lamb, 1977).

Le minimum de Maunder s'étend de 1645 à 1715 avec un minimum en 1680. Cette période de diminution de l'activité solaire est connue pour être l'une des plus froides du Petit Age Glaciaire. Elle précède une période de réchauffement global rapide jusqu'en 1795. Puis, vient le minimum de Dalton qui s'étend de 1795 à 1830 avec un minimum en 1810 qui correspond à un dernier refroidissement du Petit Age Glaciaire, moins intense que le précédent.

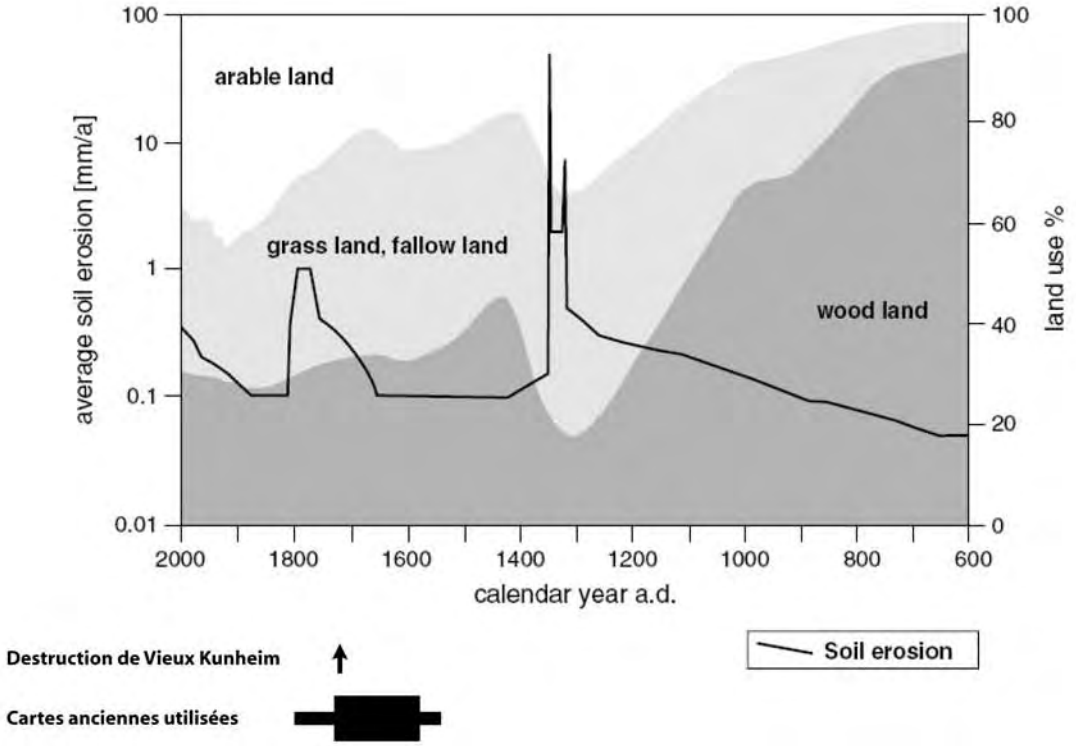


Figure 2.17 : Evolution du taux d'érosion des sols et surfaces utilisés en Allemagne depuis 1400 ans (d'après Bork et al., 1998).

Le taux moyen d'érosion (courbe noire) et les proportions de forêts, prairies et terres cultivées (land use) sont représentés sur une échelle de temps exprimée en années calendaires.

Les évenements de pluies extrêmes qui se sont produit au cours du 14ème siècle correspondent à des fortes valeurs de surfaces cultivées et en prairies et se manifestent par un taux d'érosion des sols extraordinaire.

Au cours de la grande majorité du 18ème siècle, le taux moyen d'érosion des sols augmente de façon importante puis à partir des années 1770 jusqu'à la fin du siècle de façon extrême. Ce taux d'érosion ne semble pas lié à une évolution dans l'utilisation du paysage mais plutôt aux changements climatiques au cours du Petit Age Glaciaire.

C'est au cours de cette période que la plaine alluviale du Rhin connait un changement de style au niveau du secteur d'étude et que le village de Kunheim est détruit.

En relation avec le climat, la fréquence des inondations du Rhin évolue aussi au cours du 18ème siècle (Figure 2.13). Cette fréquence reste faible pendant la première moitié du 18ème siècle, puis augmente progressivement au moins jusqu'à la première moitié du 19ème siècle. La phase de refroidissement du début du minimum de Dalton semble associée à une augmentation de la fréquence des inondations. Cette phase reconnue à l'échelle globale correspond également aux changements observés dans la plaine alluviale du Rhin. A l'inverse, au cours de la période de réchauffement de la fin du minimum de Maunder le développement de l'humidité dans la plaine en anastomoses semble favorisé.

En plus de son contrôle sur l'hydrologie, le climat influence également la quantité de sédiments délivrés dans le bassin-versant, notamment en fonction de l'intensité des précipitations, ainsi que l'état de la végétation donc la stabilité des versants.

Les études récentes de Bork et al. (1998), Lang et al. (2003) ont montré que la période historique correspond à d'importantes variations des impacts climatiques et anthropiques sur les dynamiques de bassins-versants en Allemagne (excluant les bassins alpins). Concernant, la période allant du 17ème au 18ème siècle, ils ont mis en évidence au cours de l'intervalle 1650-1780, un accroissement du taux d'érosion moyen interprété comme résultant d'un impact climatique. A la fin du 18ème siècle, ce taux d'érosion s'amplifie considérablement (Figure 2.17).

1.4.5. Le rôle de l'Homme

L'activité humaine constitue tout comme le climat un important facteur de production sédimentaire à l'échelle d'un bassin-versant. Les différents types d'activités comme l'agriculture, les mines, ou encore les constructions jouent un rôle sur la quantité de sédiments délivrés jusqu'au cours d'eau, c'est-à-dire sur le flux sédimentaire. La période d'étude est caractérisée par de nombreuses phases d'aménagements et une activité minière et agricole importante. Cependant, on constate que les variations de la surface agricole concernent surtout les parties basses de la plaine alluviale tandis qu'une remarquable stabilité est observée sur la terrasse tout au long des 16ème, 17ème et 18ème siècles. Ainsi, sur la base de ces faibles variations constatées lors de cette étude ainsi que d'après d'autres travaux (Börk et al., 1998), il apparaît que celle-ci ne soit pas majoritairement responsable des modifications dans le secteur d'étude.

1.4.6. Bilan du jeu des facteurs

Les paramètres de contrôle majeurs à l'échelle d'un bassin-versant sont la tectonique, le climat et l'activité anthropique. Ils déterminent les variations des facteurs stratigraphiques comme le flux sédimentaire et l'espace d'accommodation. Ces variations influencent la géométrie en plan des chenaux dans la plaine d'inondation et on considère classiquement :

Qu'un système en tresse est favorisé lorsque le flux sédimentaire est relativement important par rapport à l'accommodation et à l'inverse qu'un système anastomosé est favorisé lorsque l'accommodation est relativement importante par rapport au flux sédimentaire.

Toute variation dans cet équilibre peut conduire à une changement de style alluvial (Shanley et McCabe, 1991 et 1994 ; Wright et Marriot, 1993 ; Blum et Törnqvist, 2000, Bridge, 2004 ; Emery et Myers, 2004).

Dans le secteur d'étude, à l'échelle de temps examinée, il est possible de discriminer lesquels de ces paramètres sont potentiellement responsables de la dynamique observée. Ainsi, l'impact de la tectonique dont le rôle connu à long terme est d'influencer le flux sédimentaire et la subsidence, ne peut pas être considéré à l'échelle de ce travail comme un paramètre forçant l'évolution de la plaine alluviale du Rhin. Le climat, quant à lui, peut influencer rapidement le niveau de la nappe, ainsi que l'état de la végétation. Il contrôle donc en partie l'accommodation. De plus, le climat a une implication dans la production sédimentaire et du flux hydrique à l'échelle du bassin-versant et peut donc également entraîner des variations du flux sédimentaire dans les chenaux du Rhin. L'activité humaine qui n'influence pas l'accommodation à l'échelle de la plaine alluviale peut être considérée cependant comme un paramètre majeur dans la variation du flux sédimentaire.

D'après les observations réalisées sur les cartes anciennes, l'évolution de la plaine du Rhin correspond dans un premier temps à une augmentation de son caractère anastomosé (stabilisation des chenaux et des îles, réduction de la largeur des chenaux, amalgamation des barres) en association avec les augmentations de la surface arborée et des prairies humides ainsi qu'une réduction de la bande de tressage actif. Cela corresponds donc à une augmentation relative de l'accommodation vis-à-vis d'une diminution relative du flux sédimentaire.

Dans un second temps, l'évolution de la plaine alluviale voit avec la formation d'une deuxième bande de tressage, la destruction de Kunheim dans les années 1760.

L'aggradation de la plaine alluviale en association avec les augmentations d'une part de la fréquence des inondations et d'autre part du flux sédimentaire favorise la mobilité de la bande de tressage du Rhin. En effet, dans les systèmes alluviaux aussi bien en tresses qu'en anastomoses, la fréquence des avulsions et des bifurcations augmente lorsque la plaine aggrade et que le flux sédimentaire augmente (Mackey et Bridge, 1995 ; Heller et Paola, 1996 ; Ethridge et al., 1999 ; Ashworth et al., 2004).

1.5. CONCLUSION

Les différences entre les secteurs montrent en effet, que les variations climatiques sont sans doute importantes pour l'évolution récente du Rhin.

Cela suggère les rôles conjoint de la végétation et du climat dans l'évolution de la plaine alluviale du Rhin au cours du Petit Age Glaciaire, et démontre encore une fois que dans un contexte de changement climatique rapide, les modifications environnementales dans une plaine alluviale (morphologie et fréquence des inondations) sont importantes et rapides.

Néanmoins, le rôle de l'activité humaine dans la variation du flux sédimentaire n'est probablement pas négligeable à cette époque. Il est pour l'instant difficile à démontrer.

2. L'EVOLUTION DE LA FREQUENCE DES INONDATIONS DU RHIN D'APRES LES SOURCES DOCUMENTAIRES

2.1 INTRODUCTION

2.1.1. Les objectifs de l'étude

La relation à l'échelle pluricentennale entre les cours d'eau et le climat, est encore peu étudiée par rapport aux nombreux travaux portant sur les derniers 150 ans (période instrumentale). A l'échelle globale autant qu'à l'échelle régionale, cette période instrumentale, relativement courte, est actuellement utilisée pour la construction de modèles climatiques et d'inondations. La question qui apparaît est donc de savoir si les changements observés pendant cette période s'intègrent dans un développement naturel à long terme ou sont plutôt un signe de l'impact anthropique à court terme sur le climat.

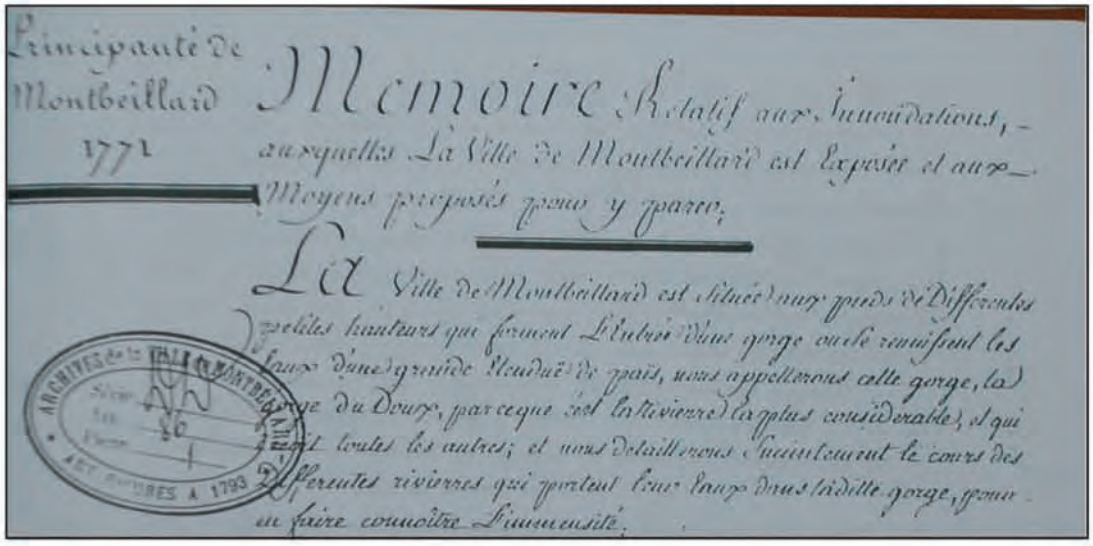
De plus, à une autre échelle, les dépôts d'inondations anciens sur les sites archéologiques ou dans les plaines alluviales restent difficiles à mettre en relation avec fiabilité avec les variations antiques du climat. Ainsi, avant de conclure sur les relations existant entre le climat et le fonctionnement hydrologique du Rhin en Alsace au cours de l'époque antique, il est donc essentiel de connaître la manière dont le Rhin est lié au climat.

Il est donc ici envisagé de présenter l'évolution à long terme de la fréquence des inondations dans le bassin-versant français du Rhin et dans d'autres bassins-versants français afin d'établir une base de comparaison et de comprendre les réponses des différentes rivières, appartenant à une zone géographique large et ayant ainsi des régimes très différents, vis-à-vis des contraintes climatiques au cours des dernières centaines d'années.

A cette fin, une recherche bibliographique et cartographique a été menée, ainsi qu'une synthèse des références historiques et archéologiques nous informant des variations de l'hydrodynamisme des cours d'eau français.

L'enregistrement historique peut, dans certaines régions d'Europe, s'étendre sur plusieurs centaines d'années et offrir des informations directes sur l'impact du climat sur les sociétés (Brádzil et al., 2005). Leur haute résolution temporelle est très intéressante pour l'étude des désastres naturels comme les inondations. Ainsi, en fonction du type d'information disponible, un inventaire des crues du Rhin et de ses principaux affluents a été réalisé en vue d'être comparé avec différentes données paléoclimatiques dans le but d'établir des corrélations existant pendant les périodes historiques et de rechercher quelles étaient les tendances climatiques contemporaines des crues observées à Oedenburg au cours de l'antiquité.

A



Principauté de Montbéillard 1771

Memoire Relatif aux Inondations, auxquelles La Ville de Montbeillard est Exposée et aux Moyens proposés pour y parer.

La Ville de Montbeillard est Située aux pieds de Différentes petites hauteurs qui forment L'Entrée d'une gorge ouvert remplissent les Eaux d'une grande Etendue de pays, nous appellerons cette gorge, la gorge du Doux, parceque c'est la riviere la plus considerable, et qui reçoit toutes les autres; et nous detaillerons Incessamment le cours des différentes rivieres qui portent leur Eaux dans ladite gorge, pour en faire connoitre L'immensité.

B

Figure 2.18 : Diffèrentes traces des inondations anciennes peuvent être retrouvées dans les archives et sur les bâtiments.

A) Extrait du "mémoire relatif aux inondations auxquelles de Montbeilliard est exposée et aux moyens proposés pour y parer. Par l'ingénieur Taverne de Lonchamps. 1771." Archives Municipales de la Ville de Montbéliard, DD86.

Cet exemple de document archivistique montre les potentialités importantes de ce type de source de données pour l'étude des inondations historiques. Cependant, bien que l'information y soit souvent précise, il est nécessaire d'y apporter un regard critique et de favoriser le croisement avec d'autres sources documentaires.

B) Marque du niveau d'eau atteint lors de l'inondation du Rhin en 1876 sur un mur de Vieux-Brisach.

Dans ce travail, nous discutons du déroulement des inondations dans les bassins-versants du Rhin, du Rhône, de la Loire et de la Seine. Les séries temporelles remontant jusqu'à 1200 seront présentées et discutées en relation avec les mécanismes climatiques pouvant les contrôler.

2.1.2. Les sources documentaires

L'enregistrement historique représente aujourd'hui l'un des outils les plus fiables, permettant des études à la fois qualitatives et quantitatives du climat passé. Il renseigne de façon directe sur les risques naturels qui ont été subis par les sociétés humaines, particulièrement les catastrophes naturelles de grande ampleur telles que les inondations qui ont retenues depuis longtemps leur attention. De nombreux témoignages anciens de tels événements catastrophiques parviennent jusqu'à nos jours et sont souvent de plus en plus précis et de mieux en mieux préservés. Ils se présentent sous la forme de chroniques, de marques de crue, de représentations iconographiques.

Les annales et chroniques historiques regroupent tous les documents écrits par des particuliers, un groupe religieux ou encore une administration relatant soit l'événement lui-même, soit les dégâts qu'il a occasionnés. La précision et la fiabilité de ces documents sont une affaire d'historiens. En effet, l'éducation, les centres d'intérêt des auteurs de ces chroniques ou encore le cadre historique et culturel dans lequel les informations s'intègrent, nécessitent une analyse critique historique avant d'être utilisables dans une étude à vocation paléoenvironnementale.

Les marques de crues anciennes se retrouvent régulièrement sur des bâtiments. L'observation de telles marques sur des portes de maisons par exemple ou encore sur des piles de pont, des bornes, etc., permet la visualisation immédiate de l'importance des événements (Figure 2.18). Cependant la durée de ceux-ci reste difficilement accessible, voire inconnue, sauf dans le cas très rare où les dates de début et de fin d'inondation sont mentionnées.

Les représentations iconographiques sous la forme de peintures ou de dessins sont fréquentes avant le 20ème siècle et constituent souvent des témoignages de grande qualité en ce qui concerne les dégâts subis. Ils sont souvent bien datés et présentent donc un important intérêt chronologique. Le témoignage photographique a particulièrement pris son essor depuis les événements de 1910 en France qui ont conduit à la production en masse de cartes postales permettant de communiquer sur tout le territoire de l'importance de l'événement.

2.1.3. Historique de la méthode

Au cours des quatre dernières décennies, quelques historiens, comme Le Roy Ladurie (1968), Lamb (1977), Alexandre (1987), Pfister (1988), ont réalisé des inventaires des événements climatiques et météorologiques et de leurs conséquences. Ces derniers ont formalisé le passage entre une information historique initiale souvent non quantifiée et parfois empirique et une donnée quantifiée permettant une représentation graphique ainsi que des traitements statistiques. Ces méthodes reposent sur plusieurs étapes partant de la critique linguistique de l'ouvrage de référence dans son contexte historique. Le traitement de ces données impose de tenir compte de la nature subjective des sources écrites (Pfister et al., 1999). La perception individuelle d'un événement doit donc être identifiée et séparée de la donnée objective par des méthodes d'évaluation et d'interprétation historiques incluant une analyse critique des sources. Cette approche d'évaluation critique et d'interprétation des documents historiques a été formalisée par Glaser (2001) et Glaser et Stangl (2003). Les quatre phases majeures de la critique de données climatiques historiques sont : le type de source (chronique, annale, journal de notes, calendrier) ; la forme de la donnée initiale quantifiée numériquement ou empiriquement ; la vérification de la donnée qui tient compte des niveaux de langage ; enfin l'instruction de l'auteur de la source (profession, durée de vie, motivation). De plus elles reposent sur un codage numérique traduisant pour les valeurs d'indice négatives, les événements plutôt froids (pour la température) ou plutôt secs (pour les précipitations) et pour les valeurs d'indice positives, les événements plutôt chaud (pour la température) ou plutôt humide (pour les précipitations) (Pfister, 1988). Enfin, la quantification des données permettant une analyse quantitative des séries temporelles climatiques. De plus, la prise en compte de la description des événements peut s'accompagner d'un croisement des informations à l'échelle du bassin-versant et de la région, ce qui rend possible une hiérarchisation des données.

Dans le cas des inondations historiques, ce codage a aussi été particulièrement développé au cours des vingt dernières années. Les catégories vont de la valeur 1 à la valeur 3 suivant l'intensité des dégâts causés par l'inondation. Les valeurs négatives pouvant alors être attribuées aux étiages et aux sécheresses exceptionnelles. Les niveaux de magnitude définis par Brádzil et al. (1999) et déjà utilisés par de nombreux auteurs (Sturm et al., 2001 ; Mudelsee et al., 2002 et 2003 ; Jacobeit et al., 2003a et 2003b) sont aussi utilisés pour la classification des inondations historiques ainsi que pour une étude comparative avec les autres indicateurs climatiques disponibles. Une autre méthode de codage concerne l'écart à une date moyenne comme c'est le cas pour les phénomènes induits par le climat mais en partie contrôlés par l'homme, comme la maturation des grains de raisin, les dates des vendanges, de floraison des cerisiers (Pfister, 1988, Le Roy Ladurie, 1968).

Très récemment les travaux sur les inondations historiques ont privilégié deux approches distinctes : la reconstitution d'événements d'inondations historiques (Brádzil et al., 2005), et la reconstruction des longues séries de fréquences d'inondations (Brádzil et al., 1999 ; Sturm et al., 2001).

Le présent travail s'inspire largement de ces travaux antérieurs, cependant, à la différence d'autres bassins-versants, le Rhin ayant été très tôt anthropisé, il a été décidé de ne pas associer dans ce travail les données historiques et les données instrumentales. De plus, il a été choisi de ne pas quantifier l'intensité des inondations documentaires.

2.1.4. La documentation disponible

L'objectif de ce travail étant la description de l'évolution de la fréquence des inondations du Rhin au cours des périodes historiques, nous avons réalisé un codage des informations disponibles sur les événements ayant eu lieu sur la partie française de son bassin-versant. Cependant avant de discuter ces données historiques, il convient de rappeler le faible nombre de données archéologiques permettant de renseigner les variations antiques du Rhin dans la plaine d'Alsace. En effet, jusqu'à présent, il n'existait pratiquement aucune donnée dans le département du Haut-Rhin. En revanche, le département du Bas-Rhin est mieux documenté par quelques événements d'inondation recensés. Ainsi, la plus ancienne crue connue du Rhin à Strasbourg est datée vers 800 avant J.-C. par des niveaux archéologiques de l'Age du Bronze final (Hatt, 1966-a). Lors des fouilles de Strasbourg en 1953, un niveau de crue du Rhin a été mis en évidence et daté entre les années 50-60 (Hatt, 1954). Il convient néanmoins d'être prudent vis-à-vis de cette datation d'apparence très précise. Au mieux, il est préférable de considérer que cet événement se place dans le premier siècle de notre ère. A Ehl, une crue est attribuée aux alentours de 80 suivie d'une alternance d'inondations et de périodes de haut niveau de la nappe phréatique entre 97 et 160 (Hatt, 1966-b ; Provost, 1984 ; Bravard et al., 1992).
Les périodes plus récentes sont beaucoup mieux renseignées. Les données proviennent essentiellement de Champion (1858-1864) et concernent principalement les événements extrêmes comme les inondations extraordinaires et catastrophiques (Werner, 1934; Dollfus, 1960 ; Descombes, 1995) parmi lesquelles celle de 1394 avec la destruction du village nommé Tierheim, celles de 1232 (Martin, 1989), 1698, 1699 (Coste, 1860), 1763 avec la destruction de Kunheim (Cestre, 1877 ; Urban et al., 1984), de 1837, 1838 (Decoville-Faller, 1961), 1852, 1876 ou encore celle de 1910 (Tricart et Bravard, 1991). Des périodes de sécheresses extrêmes ont également été relatées : en juillet 1304, le Rhin pouvait être traversé à pied (Martin, 1989) et cela fait l'objet d'une étude spécifique sur la zone de Bâle (Pfister et al., 2006). Ces travaux historiques permettent de reconnaître plus d'une centaine de crues remarquables ayant affecté non seulement le Rhin, mais aussi certains de ses affluents vosgiens comme la Moselle et la Meurthe, ou encore l'Ill venant du Nord du Jura. Ces résultats sont ensuite comparés avec d'autres séries hydrologiques pour des bassins-versants de différents types de régime. Les rivières suivantes ont un régime hydrologique pluvionival et sont géographiquement peu éloignées du Rhin. Les inondations historiques de l'Ill, de la Moselle et de La Meurthe sont exclusivement connues à partir des travaux de Champion (1858-1864). Nous avons aussi sélectionné le bassin-versant

du Rhône et quelques uns des ses affluents comme le Doubs venant du Jura, la Saône venant des Vosges, la Durance et l'Isère venant des Alpes. Tous ces cours d'eau ont des régimes différents dus à leurs origines géographiques allant du Nord du Jura pour le Doubs jusqu'à l'influence méditerranéenne pour la Durance. Une petite rivière du bassin-versant du Doubs, la Lizaine, a été étudiée en détail. Les documents concernant la dynamique de cette rivière au cours des périodes historiques ont été pour l'essentiel obtenus à partir du fonds des archives écrites et cartographiques disponibles aux Archives Municipales de la Ville de Montbéliard. Il s'agit donc de documents iconographiques et de travaux historiques réalisés depuis plusieurs siècles sur la région et le territoire de l'actuelle commune. Les travaux de Wetzel (1855, 1859), Duvernoy (1882), Contejean (1892, 1894, 1902, 1989), , Blazer (1931), Debart (1975, 1989), Mandy (1997) ont permis l'établissement d'une base de données sur les inondations de cette rivière.

2.2. RESULTATS

2.2.1. Le codage des données d'inondations

Pour la période d'étude 1200-1863, les informations de chacune des rivières sont analysées indépendamment selon un protocole commun. Les observations de l'ensemble permettent la mise en évidence de similitudes dans le mode d'organisation des événements dans le temps. Cela implique une méthodologie d'étude comparable pour chacune des rivières. Chacun des événements considérés dans cette étude correspond à une année où il s'est produit au moins une inondation suffisamment importante pour avoir été renseignée par les chroniqueurs. Il s'agit donc d'un appauvrissement de l'information historique globale en vue de pouvoir en utiliser un maximum. Le choix de ne pas traiter l'information de saisonnalité, de nombre événements, de durée, de localisation précise correspond à une triple contrainte que nous nous imposons. La première contrainte est liée au fait que certaines rivières ont des inondations qui intègrent le climat à la fois hivernal et estival. De la même manière, les crues monogénétiques sont plutôt des cas particuliers sur le bassin-versant du Rhin. En effet, les événements d'inondations du Rhin, bien qu'ils se produisent essentiellement par la fonte estivale, trouvent leur origine préférentiellement dans la quantité de précipitations hivernales. Ce fleuve intègre donc le climat annuel, et nous avons considéré que c'est une contrainte suffisante pour coder les événements à l'échelle annuelle. Quel que soit le cours d'eau considéré, l'inondation est un événement qui traduit toujours un bilan pouvant être instantané ou pluriannuel qui intègre à la fois la quantité de précipitations, l'évapotranspiration, ainsi que le temps de stockage dans l'ensemble de son bassin-versant qui dépend du temps de fonte de la neige, du temps de recharge de la nappe, du temps de stockage dans les lacs. D'autre part, comme les événements renseignés à l'échelle de la saison ou du

mois sont plutôt rares, il est nécessaire, pour utiliser le plus grand nombre de données, d'appauvrir leur information temporelle. La seconde contrainte est issue de notre objectif qui est de mieux comprendre et interpréter les inondations reconnues sur les sites archéologiques où l'information de la saison et de l'année est rarement atteinte. Enfin, le nombre et la durée des événements ainsi que leur intensité sont aussi uniformisés. Ainsi seule l'information « année ayant au moins une inondation » et « années sans inondation » est préservée. Le nombre et la durée des événements hydrologiques extrêmes sont des informations qui à l'échelle historique sont de précision trop variable au cours du temps et induisent donc des erreurs. L'intensité des événements est non renseignée car cette information n'existe pas toujours mais aussi parce que elle dépend de l'occupation humaine. Ainsi, pour cette première approche, le codage utilisé permet d'utiliser un maximum de données et limite les biais méthodologiques ainsi que les erreurs causées essentiellement par les incertitudes historiques. Cette approche vise à rendre compatible ces données historiques avec les futures informations archéologiques, sédimentologiques, dendrochronologiques sur les crues anciennes non rapportées par la documentation écrite.

2.2.2. Mode de description des résultats

Au sein de chacune des séries hydrologiques historiques construites, les événements se présentent sous la forme de groupements (*clusters*) de durées variables correspondant aux périodes d'augmentation de la fréquence des années inondées. Ces *clusters* sont séparés par des périodes de plus faible fréquence d'inondations, elles aussi de durées variables. Les *clusters* ne se répartissent donc pas de façon homogène dans le temps et peuvent être soit rapprochés soit isolés au sein de la série hydrologique reconstruite. L'utilisation de moyennes mobiles permet de visualiser la variation de la fréquence des événements sous la forme d'une courbe lissée. Chacun des *clusters* correspondant à une augmentation de la fréquence d'inondations informées est donc visualisé sous la forme d'un pic de la courbe de fréquence. Ainsi, lorsque les *clusters* sont isolés, le pic de fréquence est isolé tandis que lorsque les *clusters* sont rapprochés ou groupés, les pics le sont aussi. L'intensité des pics est variable en fonction du nombre d'événements et donc d'autant plus importante que ce nombre est élevé. Enfin, l'organisation temporelle des pics et des groupes de pics permet une vision à long terme, pluricentenale, de l'évolution des d'années inondées renseignées. Cette tendance peut correspondre, soit à l'évolution naturelle de la fréquence des inondations, soit à leur perception c'est-à-dire à la qualité de l'information qui parvient jusqu'à nos jours. Ce dernier paramètre correspond donc à la mémoire des inondations au cours de l'histoire. Les quatre ordres de grandeur qui sont analysés dans cette étude correspondent à l'année inondée, les *clusters*, les groupes de *clusters* et les tendances à long terme. Ils permettent la description de chacune des séries construites de façon indépendante. De plus, les trois ordres supérieurs peuvent être décrits grâce à l'allure de la pente de la courbe lissée.

La période sélectionnée pour la construction de la courbe lissée a été choisie pour améliorer la comparaison des séries entre elles. Elle est identique pour chacune d'elles. Cette méthode est meilleure que la mise sous forme d'histogramme (Mudelsee et al., 2002, 2003). De plus, elle est compatible avec d'autres travaux réalisés sur d'autres cours d'eau. La période sélectionnée est de 31 ans qui correspond à une réalité hydrologiques (Glaser et Stangl, 2003). Cette période permet aussi de lisser les effets pouvant être dus soit aux effets induits par les chroniqueurs qui peuvent augmenter l'information soit aux effets des périodes de troubles qui peuvent appauvrir l'information.

2.2.3. Les variations de fréquence des inondations

2.2.3.1. Le bassin-versant du Rhin

- ***La Moselle***

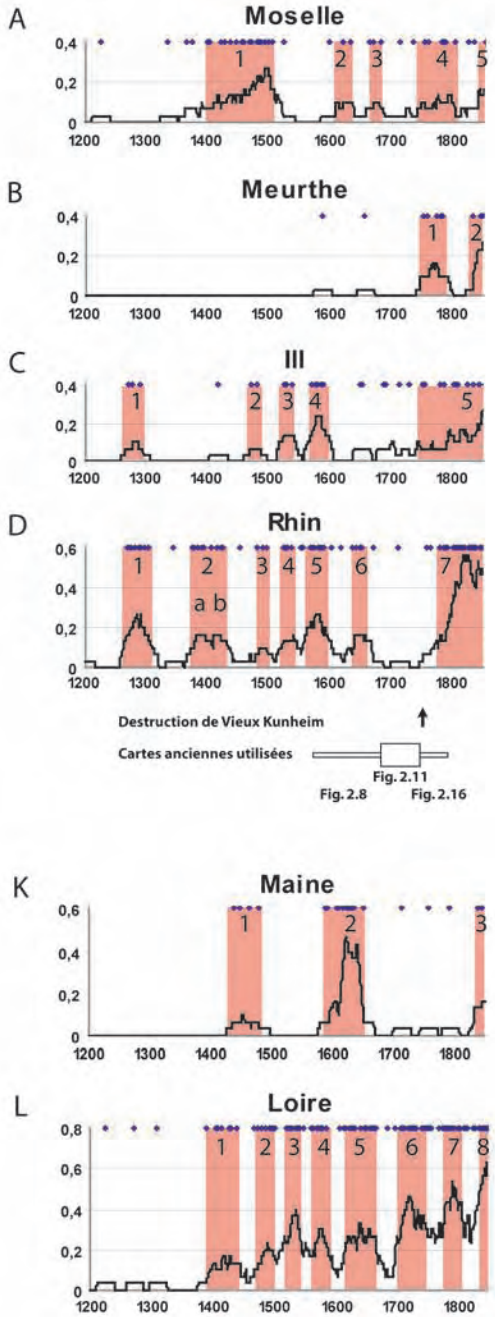
La Moselle connaît au cours de la période d'étude 44 années d'inondation. La période antérieure à 1400 est pauvre en informations. A partir de 1400 jusqu'à 1863, cinq périodes de fréquence importante d'inondation sont enregistrées (Figure 2.19). La première, **Mos-1**, présente une extension temporelle particulièrement longue, sur plus d'une centaine d'années, soit près de la totalité du 15ème siècle jusqu'au début du 16ème siècle. Cette période de forte fréquence des inondations présente une courbe fortement asymétrique, le début de celle-ci, correspondant à une longue période d'augmentation de fréquence. Le maximum de fréquence d'inondation est atteint aux environs de 1500 avec une valeur relativement élevée supérieure à 0,2 événement par an. La diminution de la fréquence se produit alors de façon rapide, en moins de vingt ans, ce que montre la pente forte de la courbe. L'observation de la courbe ne permet pas d'individualiser des *clusters* de plus faible durée. La seconde **Mos-2**, est de durée beaucoup plus courte. Elle se développe au cours de vingt premières années du 17ème siècle. Au cours de cette période, la fréquence reste cependant peu importante, c'est-à-dire 0,1 événement par an en moyenne, aux alentours de 1615. La troisième, **Mos-3**, présente comme Mos-2, une courte durée et une faible intensité. Elle est comprise entre 1655 et 1675 et n'excède pas 0,1 événement par an. Comme précédemment la courbe de fréquence est symétrique. La quatrième, **Mos-4**, débute vers 1730 et s'étend jusqu'autour des années 1800. Cette période de forte fréquence présente une courbe à forte asymétrie, avec une augmentation longue (pente faible) sur près d'une soixantaine d'années et un maximum atteignant 0,2 événements par an qui se place aux alentours des années 1800, puis une diminution rapide (pente forte) jusqu'aux premières années du 19ème siècle. Cette période coïncide avec le groupe de plusieurs cluters de courtes durées (environ 15 ans). La cinquième période **Mos-5**, coïncide avec les dernières années de la période d'étude. Enfin, aucune tendance à long terme n'est mise en évidence au sein de cette série hydrologique historique.

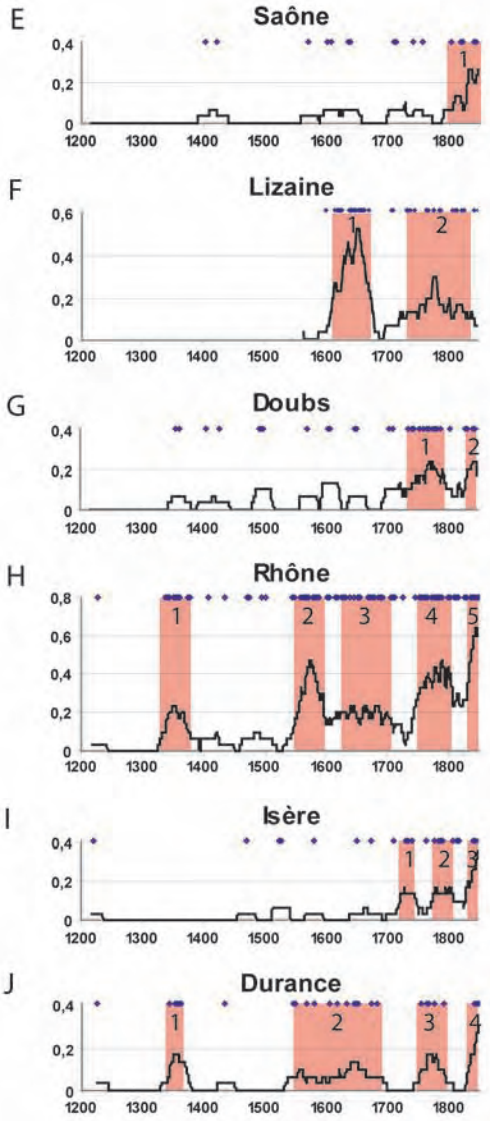
➢ *La Meurthe*

La série hydrologique construite pour **la Meurthe** présente un nombre d'événements relativement faible avec 17 années documentées (Figure 2.19). La période antérieure à 1730 reste très pauvre en événements enregistrés dans les sources documentaires. De ce fait, la période correspondant à une information intéressante dépasse de peu le siècle. Néanmoins, deux périodes de forte fréquence (*clusters*) sont individualisables entre 1730 et 1863. La première **Me-1**, entre 1730 et 1790 ne dépasse pas 0,2 événements par an. Il semble composé de deux *clusters* plus brefs vers 1750 et 1775. La seconde **Me-2**, se développe au cours des dernières années de la période d'étude.

➢ *L'Ill*

Pour **l'Ill**, l'enregistrement documentaire des inondations historiques est de 40 (Figure 2.19). La période antérieure à 1480 correspond à une longue phase caractérisée par une relative pauvreté en informations. Cependant au cours de celle-ci, une première période de haute fréquence d'inondation est enregistrée et distinctement mise en évidence par la courbe de fréquence. Cette première période, **Ill-1** est peu importante ; elle se développe au cours de la fin du 13ème siècle, et s'étend sur une vingtaine d'année. La période suivante **Ill-2**, elle aussi peu étendue et d'intensité faible, ne se produit qu'à la fin du 15ème siècle. Ce n'est réellement qu'à partir du début du 16ème siècle, vers 1520, que l'on observe une amélioration de la qualité de l'information. Une troisième période **Ill-3,** un peu plus importante, peut ainsi être mise en évidence entre 1520 et 1530. Elle est suivi, peu de temps après, par une quatrième période **Ill-4** plus importante (que la précédente) vers les années 1560-1580. Ces périodes de haute fréquence d'inondation apparaissent comme suivant un gradient d'intensité (ou de qualité d'information) au cours du temps. Au cours des années 1600-1730, la fréquence des inondations reste faible avec parfois quelques événements isolés. Une cinquième période de haute fréquence **Ill-5** est ensuite observable seulement comme une phase d'augmentation assez régulière de la fréquence. Elle se développe depuis la seconde moitié du 18ème siècle jusqu'à la fin de la période d'étude (1863) où le maximum est atteint.





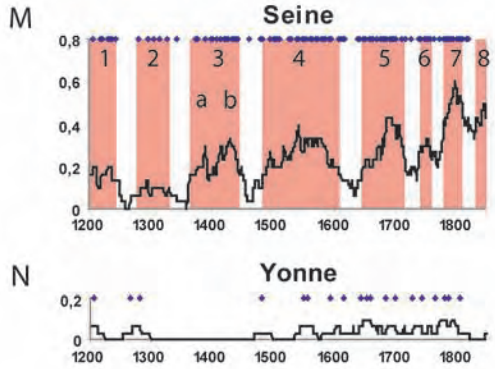


Figure 2.19: Séries hydrologiques historiques reconstruites à partir des données documentaires de 14 rivières étudiées. Les périodes de haute fréquence d'inondation sont indiquées pour chacunes des rivières du bassin versant du Rhin (A,B,C et D), du bassin versant du Rhône (E, F, G, H, I et J), du bassin versant de la Loire (K et L), et du bassin versant de la Seine (M et N).
L'information historique présente une bonne qualité à partir du 15ème siècle pour l'ensemble des séries.

➢ *Le Rhin*

Le Rhin présente un nombre d'événements relativement plus important (**91)** que les autres cours d'eau précités pendant la période d'étude. La période antérieure peut être considérée comme très pauvre en informations puisque seulement 10 années sont renseignées comme ayant connu au moins un événement. En effet, les premières crues du Rhin mentionnées se produisent respectivement en 590 et en 607, et seulement une dizaine de crues est enregistrée jusqu'en 1200. Il n'est donc pas possible d'envisager une approche statistique pour cette période. En revanche, dès le 13ème siècle jusqu'au milieu du 19ème siècle, le Rhin semble bénéficier d'une grande qualité d'information, puisqu'il est possible de distinguer clairement sept *clusters* dans la série hydrologique (Figure 2.19). Le premier *cluster*, **Rhin-1**, couvre le dernier quart du 13ème siècle et apparaît comme un pic d'intensité importante puisqu'il correspond à une moyenne supérieure à 0,2 événement par an, maximum atteint vers les années 1290. La période couverte par ce *cluster* est assez importante, ce qui permet l'identification d'une asymétrie. En effet, au sein de ce *cluster*, l'augmentation de fréquence est plus rapide que la diminution de la fréquence d'inondation. La deuxième période de haute fréquence d'inondation, **Rhin-2**, présente une durée longue d'environ une soixantaine d'années et une intensité moyenne inférieure à 0,2 événement par an. Le maximum d'intensité est atteint deux fois en 1395 et en 1405, ce qui indique le fait qu'il s'agit en réalité de deux *clusters* groupés. La troisième période de haute fréquence d'inondation du Rhin s'étend sur une très longue période de temps des années 1490 jusqu'aux années 1660, soit plus d'un siècle et demi. En fait, elle regroupe plusieurs *clusters* qu'il est, cette fois, possible de dissocier aisément Le premier *cluster* **Rhin-3**, est centré sur les années 1490. Il présente une intensité relativement faible, proche de 0,1 événement par an. Sa durée est d'environ une vingtaine d'années. Le second *cluster*, **Rhin-4**, est centré sur les années 1525. Sa durée est d'environ une vingtaine d'années et il présente une intensité plus longue que le *cluster* précédent **Rhin-3**. Le troisième *cluster*, **Rhin-5**, est centré sur les années 1575. Sa durée (environ 30 ans) est son intensité (supérieure à 0,2) sont plus importants que ceux de **Rhin-3 et Rhin-4**. Ce pic présente une certaine asymétrie avec une pente ascendante (augmentation) plus forte que la pente descendante (diminution). Le quatrième *cluster*, **Rhin-6**, est centré sur les années 1640. Il est d'intensité et de durée sensiblement équivalentes avec **Rhin-4**. Enfin, **Rhin-7**, est le dernier *cluster* observé sur la série hydrologique reconstruite pour le Rhin. Au cours des 18ème et 19ème siècle l'augmentation de la fréquence d'inondation n'est pas continue. En effet, pour environ 40 années, entre 1760 et 1800 les fréquences atteintes sont de 0,2, tandis que pour la période 1800-1825 soit environ moitié moins, une valeur maximale de 0,56 est atteinte.

2.2.3.2. Le bassin-versant du Rhône

➢ *La Saône*

Pour la Saône, le nombre événements historiques enregistrés est relativement faible puisqu'il est égal à 23 pendant la période d'étude (Figure 2.19). La période antérieure au 18ème siècle est assez mal documentée. Ce n'est vraiment qu'à partir du 18ème siècle que l'information s'améliore sans pour autant permettre l'observation d'une véritable variation entre des périodes d'augmentation et de diminution de la fréquence des inondations puisque la courbe des moyennes lissées ne dépasse jamais 0,1 événement par an. Au cours du 19ème siècle, une forte augmentation de la fréquence des inondations renseignées est observée. Cela correspond sans doute à un artefact dû à l'augmentation et à l'amélioration de l'information à partir du 19ème siècle pour ce bassin-versant.

➢ *La Lizaine*

La série historique des inondations de la Lizaine correspond à un ensemble de 50 événements (Figure 2.19). Ce nombre élevé est de plus concentré sur les 17ème, 18ème et 19ème siècles ce qui en fait l'un des cours d'eau les mieux documentés de la période d'étude. La période précédant l'an 1600 est totalement inconnue du point de vue documentaire. Deux *clusters* majeurs sont observés. Le premier **Liz-1**, entre 1600 et 1675 est centré sur 1650 où la valeur atteint une moyenne de 0,5 événement par an. Ce pic présente une certaine asymétrie avec une phase d'augmentation crénelée à pente relativement forte traduisant des *clusters* secondaires et une diminution lisse à pente encore plus forte. La seconde **Liz-2**, entre 1750 et 1850 atteint son maximum vers 1790 avec une valeur supérieure à 0,2. Ce *cluster*, est en fait constitué de plusieurs petits *clusters* de courte durée et rapprochés dans le temps.

➢ *Le Doubs*

La série hydrologique reconstruite pour le Doubs ne compte que 38 années inondées, ce qui est relativement peu. Cependant, comme la période précédant le 18ème siècle est très peu documentées, la plupart des inondations informées se placent au cours des deux derniers siècles de notre période d'étude ce qui laisse supposer une très bonne qualité de l'information pour cette dernière période. La série montre deux pics majeurs (Figure 2.19). Le premier *cluster*, **Doubs-1**, d'intensité supérieur à 0,2 vers 1770 présente une durée assez longue entre 1700 et 1800. La période d'augmentation de la fréquence d'inondation est plus longue que la période de diminution plus rapide. Le second *cluster* **Doubs-2**, se développe au cours des dernières années de notre période d'étude.

➢ *Le Rhône*

Le Rhône connaît au cours de la période d'étude un nombre d'années d'inondation égal à 106. La période antérieure à 1320 est pauvre en information concernant les inondations. A partir de 1320 jusqu'à 1863, cinq périodes de fréquence importante d'inondation sont enregistrées (Figure 2.19). La première, **Rhône-1**, présente une extension temporelle moyenne d'environ cinquante ans. Elle débute vers 1320 et s'étend jusqu'en 1385 environ avec une de fréquence maximum supérieure à 0,2 atteinte vers 1350. Le pic est relativement symétrique. La seconde, **Rhône-2**, ne se produit que dans la seconde moitié du 16ème siècle. Cela signifie que très peu événements sont enregistrés ou se produisent au cours des 150 années qui la précèdent Cette deuxième période de haute fréquence atteint son maximum vers 1580, où la valeur moyenne atteinte est supérieure à 0,4 événement par an. Elle est immédiatement suivie d'une troisième période, **Rhône-3**, particulièrement longue, sur plus d'une centaine d'année, soit près de la totalité du 17ème siècle jusqu'au début du 18ème siècle. Cette période de forte fréquence des inondations présente une courbe sous la forme d'un palier de fréquence constante, relativement symétrique. Ainsi la fréquence reste supérieure à 0,2 événements par an pendant une durée très longue. La quatrième période **Rhône-4**, se développe sur une durée plus courte, et couvre la totalité de la seconde moitié du 18ème siècle. Son intensité est supérieure à 0,4. De plus, la courbe de fréquence présente une certaine asymétrie, avec une phase d'augmentation plus longue que la phase de diminution de la fréquence des inondations. Enfin, la cinquième période, **Rhône-5**, correspond à la dernière décennie de notre période d'étude. La courbe de fréquence présente une pente très forte pour atteindre la valeur très importante de 0,6.

➢ *L'Isère*

La série hydrologique construite pour **l'Isère** présente un nombre événements relativement faible de 31. Cependant comme elles se placent presque toutes au cours des 18 et 19ème siècle, il est possible de considérer que l'information postérieure à 1700 est utilisable tandis que la période précédant 1700 est trop pauvre en information (Figure 2.19). Trois périodes de forte fréquence d'inondation sont enregistrées au cours de la période 1700-1863. La première période **Isère-1**, entre 1710 et 1740 présente une intensité inférieure à 0,2. La seconde **Isère-2**, entre 1780 et 1810 est plus importante tant du point de vue de la durée que du point de vue de l'intensité. La troisième période **Isère-3**, dépasse la fréquence de 0,2 événements par an en moyenne et se développe sur les dernières années de notre période d'étude. Une augmentation de la fréquence des inondations informées est donc clairement mise den évidence sur ces deux derniers siècles de la période d'étude pour l'Isère.

➢ *La Durance*

La Durance connaît au cours de la période d'étude un nombre d'années d'inondation égal à 34. La période antérieure à 1335 est pauvre en information concernant les inondations (Figure 2.19). A partir de 1335 jusqu'à 1863, quatre périodes de fréquence importante d'inondation sont enregistrées. La première, **Durance-1**, présente une extension temporelle moyenne d'environ vingt-cinq ans. Elle débute vers 1335 et s'étend jusqu'en 1355 environ avec une de fréquence maximum proche de 0,2 atteinte vers 1350. Le pic est relativement symétrique. La deuxième, **Durance-2**, s'étend sur une période particulièrement longue mais ne représente pas à proprement parler une vraie phase de haute fréquence d'inondation. En effet, les valeurs moyennes atteintes par la courbe lissée sont proches de 0,1 et la répartition temporelle dispersée des événements, montre qu'il s'agit en fait d'une longue période où les inondations se produisent de façon régulière sans variation de fréquence notable. Cette période de faible variation de la fréquence d'inondation est comprise entre 1540 et 1690. La troisième période **Durance-3**, se produit au cours de la seconde moitié du 18ème siècle (1760-1800) et présente une intensité plus importante que la précédente (un peu inférieure à 0,2).

2.2.3.3. Le bassin-versant de la Loire

➢ *Le Maine*

Le Maine présente un nombre d'années informées égal à 30. La distribution est très irrégulière avec seulement deux périodes de haute fréquence d'inondation très bien individualisées au sein de la période d'étude quasiment non renseignée (Figure 2.19). La première période, **Maine-1** est renseignée au milieu du 16ème siècle et présente une assez faible augmentation de la fréquence d'inondations. La seconde période, **Maine-2**, correspond à la première moitié du 17ème siècle entre 1590 et 1650. Son intensité moyenne dépasse largement 0,6 événement par an dans les années 1620-1640. Une légère asymétrie peut être observée dans le pic de fréquence.

➢ *La Loire*

La Loire présente un nombre d'événements informés relativement plus important que les autres cours d'eau précités, avec 125 années pendant la période d'étude. La période antérieure à 1200 peut être considérée comme très pauvre en information puisque seulement 17 années sont renseignées comme ayant vu au moins un événement (Figure 2.19). Il n'est donc pas possible d'envisager une approche statistique pour cette période antérieure à 1200. De même, jusqu'aux environ de 1400, le nombre d'événements enregistré reste encore très faible. En revanche, dès le début du 15ème siècle jusqu'au milieu du 19ème siècle, la Loire semble bénéficier d'une grande qualité d'information, puisqu'il est

possible de distinguer clairement **huit** *clusters* dans la série hydrologique. Le premier *cluster*, **Loire-1**, couvre la première moitié du 15ème siècle et apparaît comme un pic d'intensité moyenne à peine inférieur à 0,2 événement par an, maximum atteint vers les années 1420. La période couverte par ce *cluster* est assez importante, ce qui permet l'identification fiable d'une assez bonne symétrie. En effet, au sein de ce *cluster*, l'augmentation de fréquence semble aussi rapide que la diminution de la fréquence d'inondation. Une deuxième période de haute fréquence d'inondation, s'étend sur une très longue période de temps des années 1460 jusqu'aux années 1600, soit environ un siècle et demi. En fait, elle regroupe trois *clusters* qu'il est possible de dissocier. Le premier *cluster* **Loire-2**, est centré sur les années 1490. Il présente une intensité relativement élevée, supérieure à 0,1 événement par an. Sa durée est d'environ une vingtaine d'années. Le second *cluster*, **Loire-3**, le plus importante des trois, est centré sur les années 153. Sa durée est d'environ une trentaine d'années et il présente une intensité plus importante que le *cluster* précèdent **Loire-2**, proche de 0,4 événements par an en moyenne. Le troisième *cluster*, **Loire-4**, est centré sur les années 1575. Sa durée (environ 30 ans) et son intensité (supérieure à 0,2) sont plus importantes que ceux de Loire-2 mais moindres que ceux de **Loire-3**.

La cinquième période de haute fréquence d'inondation de la Loire, **Loire-5** présente une durée longue d'environ une soixantaine d'années et une intensité moyenne supérieure à 0,2 événement par an. Le maximum d'intensité est atteint autour de 1650 et la courbe présente une assez bonne symétrie.

Loire-6, s'étend sur une période d'une cinquantaine d'années entre 1700 et 1750. Elle atteint son maximum vers 1720 et présente donc une forte asymétrie parquée par une augmentation de la fréquence d'inondation très rapide suivie par une diminution en palier. La transition avec la période suivante Loire-7 est très rapide, de sorte que les courbes sont peu dissociées.

Loire-7 présente donc une nouvelle augmentation de la fréquence d'inondation. Son maximum est atteint vers 1800 après une augmentation brutale et avant une diminution tout aussi rapide.

Enfin, très rapprochée de Loire-7, **Loire-8** se développe au cours des dernières décennies de la période d'étude et est marquée par une très forte fréquence d'inondation pouvant excéder 0,6 événement par an en moyenne.

Au cours de toute la période d'étude une tendance à très long terme peut-être observée avec une pente peu importante et relativement stable.

2.2.3.4. Le bassin-versant de la Seine

➢ *La Seine*

La Seine correspond avec 148 années documentées au cours de la période d'étude, au cours d'eau le mieux connu de notre corpus étudié dans ce travail. On connaît 19 événements se produisant avant 1200. Il n'est donc pas possible d'envisager une approche statistique pour cette période antérieure à 1200. En revanche, dès le début du 13ème siècle jusqu'au milieu du 19ème siècle (fin de la période d'étude), la Seine bénéficie d'une très grande qualité d'information. Il est possible de distinguer clairement **huit** *clusters* dans la série hydrologique (Figure 2.19).

Le premier *cluster*, **Seine-1**, couvre les deux premiers tiers du 14ème siècle et apparaît comme un pic d'intensité moyenne proche de 0,2 événement par an, maximum atteint vers les années 1200 et 1240. La période couverte par ce *cluster* est assez importante (une soixantaine d'années).

La deuxième période de haute fréquence d'inondation de la Seine, **Seine-2** présente aussi une durée longue d'environ une soixantaine d'années et une intensité moyenne inférieure à 0,2 événement par an. Le maximum d'intensité est atteint autour de 1300 et la courbe présente une assez bonne symétrie.

Une troisième période de haute fréquence d'inondation, **Seine-3**, s'étend sur une très longue période de temps des années 1360 jusqu'aux années 1450, soit environ presque un siècle. Son intensité est largement supérieure à 0,2 événement par an. Les maxima sont atteints vers les années 1390 et vers les années 1420.

Seine-4, s'étend sur une période d'une durée encore supérieure de près d'une centaine d'années entre 1490 et 1590. Elle atteint son maximum vers 1550 et présente donc une relativement bonne symétrie marquée par une augmentation de la fréquence d'inondation et une diminution de la fréquence d'inondation assez lente. Le maximum est égal à 0,4 événement par an en moyenne.

La cinquième période de haute fréquence d'inondation de la Seine, **Seine-5** présente une durée longue d'environ une soixantaine d'années et une intensité moyenne proche de 0,4 événement par an. Le maximum d'intensité est atteint autour de 1680 et la courbe présente une forte asymétrie avec une forte période d'augmentation à partir de 1650 suivie par une rapide diminution jusqu'en 1710.

Seine-6, s'étend sur une courte période d'une vingtaine d'années entre 1740 et 1760. Elle atteint son maximum vers 1750 et présente une bonne symétrie.

La transition avec la période suivante Seine-7 est très rapide, de sorte que les courbes sont assez peu dissociées.

Seine-7 présente donc une nouvelle augmentation de la fréquence d'inondation. Son maximum est atteint vers 1790-1800 après une augmentation brutale et avant une diminution tout aussi rapide. La fréquence atteint même 0,6 événement par an en moyenne.

Enfin, très rapprochée de **Seine-7**, **Seine-8** se développe au cours de la dernière décennie de la période d'étude et est marquée par une très forte fréquence d'inondation pouvant excéder 0,5 événement par an en moyenne.

Au cours de toute la période d'étude une tendance à très long terme peut-être observée avec une pente peu importante et relativement stable traduisant clairement l'augmentation de la qualité de l'information avec le temps.

- ***L'Yonne***

Pour finir, l'Yonne n'est documentée que par une vingtaine d'années inondées. A cette faible valeur, s'ajoute la distribution assez homogène des événements et de ce fait l'absence de variation de fréquence observable (Figure 2.19).

2.2.3.5. Les tendances générales

Pendant la période 1300-1850, la courbe cumulée de l'ensemble des inondations enregistrées présente une évolution non linéaire (Figure 2.20). Trois phases sont observables. La première s'étend jusque dans les années 1500, et est caractérisée par une augmentation faible mais constante de l'information. Au cours de la période 1500-1650, l'information se stabilise, ce qui traduit le fait que cette période est sans doute peu influencée par l'effet mémoire des documents historiques dû à leur préservation. A partir de 1650 jusqu'au milieu du 19ème siècle, l'information augmente de façon importante. Cela signifie qu'un biais existe à l'échelle de cette courbe cumulée. C'est sur le principe de cette évolution en trois étapes que nous avons sélectionné la période 1500-1650 pour une analyse spatiale.

Sur la base de l'histoire hydrologique du Rhin, la période de stabilité de l'information 1500-1650 permet la distinction en trois sous périodes, 1500-1549, 1550-1599 et 1600-1649.

Pour chacune des rivières étudiées, la moyenne du nombre d'inondation par année a été calculée pour la période 1500-1649. Pour chacune de ces sous périodes les écarts à la moyenne de chacune des séries hydrologiques ont pu ainsi être calculés et projetés sur une carte grâce à l'utilisation d'ArcView (Figure 2.21).

Il est alors possible de voir sur une carte les variations de fréquence d'inondation de chacune des rivières étudiées. Ainsi, il apparaît que les cours d'eau fonctionnent très différemment.

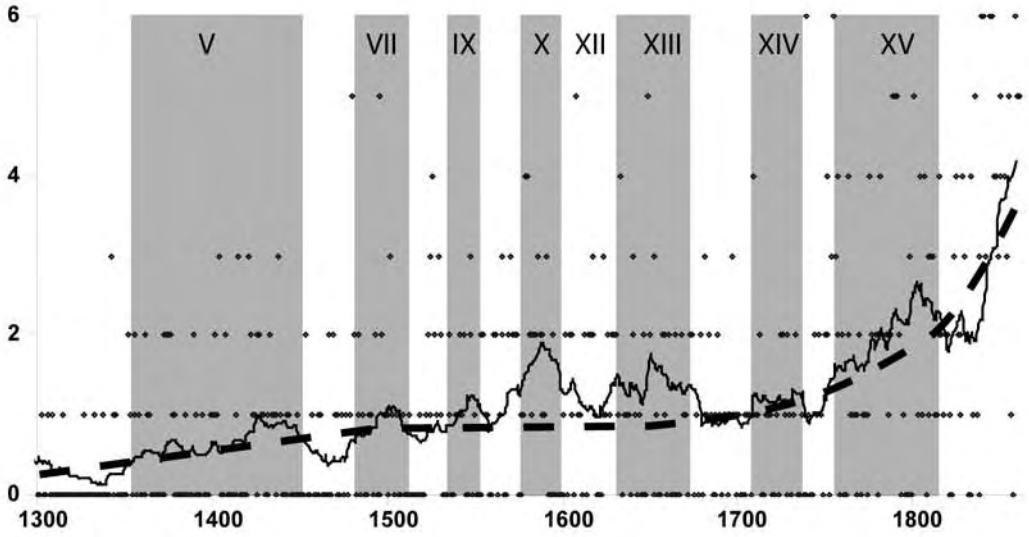


Figure 2.20 : Evolution du nombre d'informations par décennies au cours du temps pour l'ensemble des rivières étudiées.

Plusieurs périodes se distinguent en fonction de la fréquence des inondations et de la tendance générale liée à la qualité de l'information historique.

De 1300 à 1500, le nombre d'information augmente graduellement.

De 1500 à 1650, le nombre d'information reste linéaire ce qui traduit une qualité stable de la documentation au cours du temps.

Enfin, la période 1650-1863 est marquée par une augmentation exponentielle de la quantité d'années inondées renseignées, ce qui traduit d'un enrichessement de l'effet mémoire de la documentation à cette époque.

2.3. DISCUSSION

Ainsi, cette étude porte sur la construction et l'analyse de quatorze cours d'eau (Figures 2.19, 2.20 et 2.21). Ces cours d'eau ont des bassins-versants et des régimes très différents. Les grands cours d'eau alpins comme le Rhin, le Rhône, l'Isère et la Durance (avec une importante influence méditerranéenne) peuvent être comparés avec des rivières vosgiennes (Lizaine, Meurthe, Saône et Moselle), jurassiennes (Doubs), ou encore des rivières largement influencées par l'Océan Atlantique (Loire, Seine, Maine).

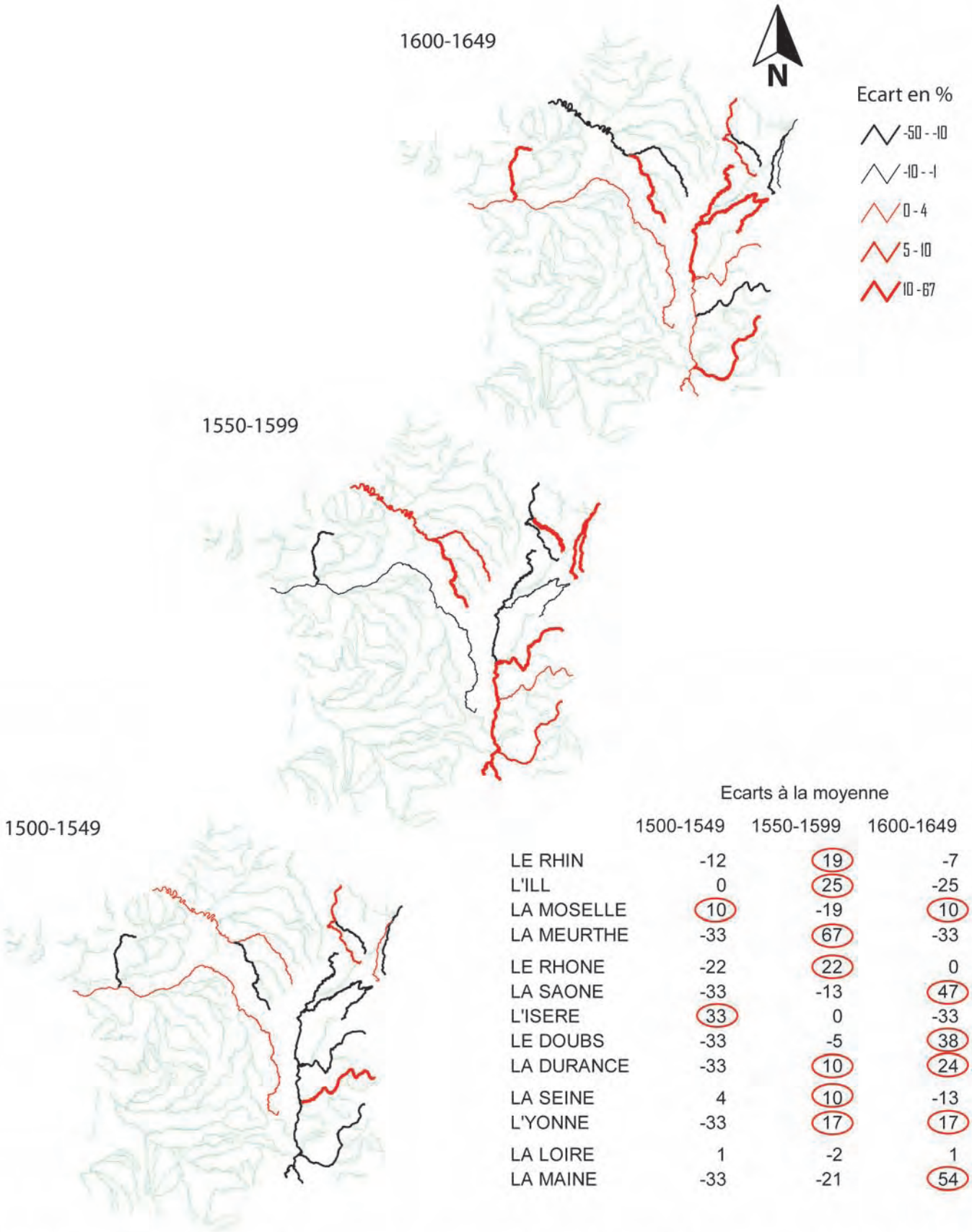
Plusieurs remarques peuvent être formulées en fonction de la qualité de cette analyse. Tout d'abord, il apparaît que les sources documentaires sont inégales en fonction des bassins-versants. La référence que constitue l'inventaire de Champion (1858-1864) est assez pauvre pour certains bassins-versants comme ceux de l'Yonne, de la Saône et de la Meurthe tandis qu'elle apparaît plutôt bonne pour le Rhin, la Loire et la Seine. Pour certains bassins-versants, la qualité de l'information pourra à l'avenir être largement améliorée par l'utilisation d'autres séries historiques réalisés comme pour l'Isère et le Drac (Barriendos et al., 2003), l'Ardèche (Naulet et al., 2005) ou la Durance (Miramont et al., 1998).

L'inventaire réalisé sur le bassin-versant de la Lizaine se révèle particulièrement riche à partir du 17ème siècle. Cela est dû à la bonne qualité de la documentation disponible. De plus, la relation simple entre les événements climatiques et les inondations permettent une interprétation fiable de la série hydrologique reconstruite.

La qualité de l'information des séries reconstruites dans cette étude est aussi variable au cours du temps comme le montrent les grandes tendances observées pour certains cours d'eau. Ces tendances à long terme rappellent les périodes définies par Pfister (2001). Celui-ci a remarqué que les derniers 1300 ans peuvent être divisés en plusieurs phases en fonction de la continuité et de la quantité des documents disponibles à ce sujet.

Il a établi cinq phases au cours desquelles on observe une augmentation graduelle de la quantité et de la qualité de la documentation. Ainsi, la documentation disponible entre AD 700 et AD 1250 est souvent sporadique et de résolution temporelle annuelle. La deuxième phase comprise entre 1250 et 1500 est documentée à l'échelle de la saison de façon quasi ininterrompue. La troisième phase correspond à la période 1500-1680 où les sources documentaires sont quasiment ininterrompues et ont une résolution temporelle mensuelle avec des informations de dates précises. La quatrième phase de 1680 à 1860 marque l'apparition des données instrumentales sporadiques mais journalières réalisées le plus souvent par des particuliers. Enfin la phase initiée à partir de 1860 est la mieux informée, souvent continue, avec des indications à l'échelle journalière, et les mesures instrumentales sont souvent notées sur des documents officiels.

L'ensemble des séries hydrologiques historiques reconstruites montre l'existence de périodes de concordances et de discordances entre les différents bassins-versants.



	Ecarts à la moyenne		
	1500-1549	1550-1599	1600-1649
LE RHIN	-12	19	-7
L'ILL	0	25	-25
LA MOSELLE	10	-19	10
LA MEURTHE	-33	67	-33
LE RHONE	-22	22	0
LA SAONE	-33	-13	47
L'ISERE	33	0	-33
LE DOUBS	-33	-5	38
LA DURANCE	-33	10	24
LA SEINE	4	10	-13
L'YONNE	-33	17	17
LA LOIRE	1	-2	1
LA MAINE	-33	-21	54

Figure 2.21 : Cartographie S.I.G. des variations de fréquence d'inondation pour 12 rivières étudiées au cours de la période 1500-1649.

Pour chaque cours d'eau étudié, il existe une variation de la fréquence d'inondation au cours de la période d'étude. Les écarts au nombre moyen d'inondations ont été calculés pour chacune des trois sous-périodes 1500-1549, 1550-1599, 1600-1649 définies à partir des séries hydrologiques historiques reconstruites précédement. L'intégration de ces écarts à la moyenne à ce Système d'information Géographique met en évidence que la variabilité spatiale des phases hydrologiques est liée aux caractéristiques géographiques et aux types de régime de chaque bassin-versant.

➔ Ainsi, chronologiquement la série globale débute par une période de haute fréquence d'inondation pour la Seine (Seine-1) au tout début du 13ème siècle (Figure 2.20). Malheureusement, à ce stade de notre étude, la documentation pour cette période reste faible ou nulle pour les autres bassins-versants français et aucune corrélation n'est possible entre la Seine et ceux-ci.

➔ Dans le dernier tiers du 13ème siècle, le Rhin (Rhin-1) et l'Ill (Ill-1) montrent tous deux une augmentation de la fréquence d'inondations et donc une bonne concordance. A cette époque, de nombreux événements extrêmes sont en effet enregistrés à Strasbourg. En revanche, aucun autre cours d'eau étudié ne montre cette augmentation, mais cela peut être dû seulement à des lacunes d'informations. Quelques années après la fin de cette période, Rhin-1, le Rhin connaît en 1304 un étiage extrême caractérisant bien la période de basse fréquence d'inondation suivante.

➔ La courbe de fréquence d'inondations de la Seine marque à ce moment une faible augmentation (Seine-2). En effet, initiée à partir du dernier quart du 13ème siècle, son maximum n'est atteint qu'au tournant du 14ème siècle pour s'atténuer jusqu'à la fin du premier quart du 14ème siècle. Ce léger déphasage ainsi que la différence de durée de cette période d'augmentation de la fréquence d'inondation de la Seine par rapport à celles du Rhin et de l'Ill qui la précédent, sont sans doute caractéristiques des différences géographiques entre les rivières de l'Est de la France -d'influence continentale- et les cours d'eau influencés par l'Océan Atlantique. Cependant, comme seule la Seine présente cette information, et que les autres bassins-versants sont faiblement renseignés, il est difficile d'en tirer des conclusions générales.

➔ Le milieu du 14ème siècle est marqué par une augmentation observée à travers deux séries hydrologiques historiques de cours d'eau appartenant au domaine alpin. Le Rhône et la Durance connaissent donc une période d'inondations (Rhône-1 et Durance-1), tandis que le Doubs venant du Jura ne connaît que deux années inondées. Cette période est donc limitée aux bassins-versants et aux cours d'eau Sud alpins, centralpin et jurassiens tandis que le Rhin connaît apparemment à cette époque une période d'accalmie hydrologique.

➔ Entre la fin du 14ème siècle et le début du 15ème siècle, le Rhin et la Seine présentent une importante augmentation de la fréquence d'inondation (Rhin-2 et Seine-3). Ces deux périodes montrent de façon identique deux maxima autour de 1380-1390 et 1420-1430 séparés par une même diminution autour de 1400, ce qui permet de distinguer deux sous phases notées Rhin-2a, Rhin-2b et Seine-3a, Seine-3b. La seconde sous phases coïncide avec la période d'augmentation de fréquence Loire-1. Il est remarquable de constater que pour Rhin-2, l'augmentation est plus rapide que pour Loire-1 et Seine-3 tandis que la diminution est plus lente pour Rhin-2 que pour Loire-1 et Seine-3. Ce début du 15ème siècle marque, de plus, la lente initiation de la période Mos-1 connue pour la Moselle.

Ces différences peuvent indiquer les modalités de réponse en temps et en intensité des cours d'eau. Ainsi, les cours d'eau influencés par l'Océan Atlantique répondent plus lentement que le Rhin situé plus à l'Est mais présente une courbe de fréquence dont l'intensité est plus marquée.

➔ Le milieu du 15ème siècle est représenté dans la courbe de fréquence des inondations de la Maine par une augmentation (Maine-1). Cependant, la faible quantité d'information disponible pour ce cours d'eau suggère qu'il puisse n'y avoir en fait aucune signification à cette variation de signal. Il faudrait pour se prononcer une amélioration de l'information.

En revanche, pour la Moselle, la période Mos-1 se poursuit.

➔ La fin du 15ème siècle est marquée par la concordance de plusieurs période de haute fréquence d'inondation pour les cours d'eau étudiés ; elle marque aussi le début d'une longue phase caractérisée jusqu'à la fin du 17ème siècle par de nombreuses concordances et similitudes aussi bien dans les augmentations que dans les diminutions des fréquences d'inondation.

Ainsi, dans le bassin-versant du Rhin, la période d'augmentation Rhin-3 coïncide avec l'optimum de la Moselle, Mos-1 ainsi que le petit pic Ill-2.

Lorsqu'on étend l'observation au domaine alpin, les séries hydrologiques reconstruites du Rhône et du Doubs présentent aussi quelques événements connus regroupés à cette époque, mais leurs fréquences présentent des intensités relativement faibles.

Dans le domaine océanique, représenté dans notre étude par les bassins-versants de la Loire et de la Seine, il est possible d'observer que cette période est ressentie de façon particulière en fonction des bassins-versants considérés.

En effet, la courbe de fréquence d'inondation de la Seine présente une augmentation comme celle de la Loire (Loire-2), du Rhône, du Rhin (Rhin-3) et de l'Ill (Ill-2). Cependant, Seine-4 est suivie seulement par une faible diminution de fréquence vers les années 1420, tandis que pour les autres la diminution est très marquée.

Une meilleure concordance semble donc exister entre les bassins-versants de la moitié Nord de la France, influencés par l'Océan Atlantique ou situés à une altitude moyenne, plutôt qu'avec les bassins-versants plus influencés par la Méditerranée.

➔ Le début du 16ème siècle est marqué par une nette diminution de la fréquence d'inondation commune pour tous les cours d'eau considérés sauf la Seine qui l'enregistre mais où cela n'est apparemment pas significatif.

➔Avant la moitié du 16ème siècle, certaines courbes de fréquence précédemment citées augmentent, mais cela n'est pas généralisable. En effet, les périodes Rhin-4, Ill-3, Loire-3 sont identifiées pendant que la période Seine-4 se poursuit et atteint son maximum.

➔ A partir du deuxième tiers du 16ème siècle, il se produit une nouvelle augmentation des fréquences d'inondation reconnues dans plusieurs cours d'eau. A la différence de ce qui a été observé précédemment pour la fin du 15ème siècle et le début du 16ème siècle, un plus grand nombre de bassins-versants est concerné. Le Rhin (Rhin-5), l'Ill (Ill-4), le Rhône (Rhône-2), la Loire (Loire-4), la Seine (Seine-4) et la Durance (Durance-2) présentent une augmentation significative synchrone, mais avec

des différences dans les vitesses d'augmentation et de diminution comme cela a déjà été observé précédemment

Il est remarquable de constater que si les périodes sont identiques, de très importantes différences sont observées en ce qui concerne les intensités de la fréquence d'inondation. En effet, pour le Rhin et l'Ill, les épisodes semblent augmenter en intensité avec le temps de façon graduelle, c'est-à-dire que Rhin-5 est plus importante que Rhin-4 elle-même plus importante que Rhin-3, et que Ill-4 est plus importante que Ill-3, plus importante que Ill-2.

Cette observation n'est pas applicable à la Loire et à la Seine qui présentent plutôt un optimum de fréquence au cours du milieu du 16ème siècle, si bien que Loire-3 est plus importante que Loire-2 et Loire-4.

Pour le Rhône, l'absence d'une période de haute fréquence d'inondation au milieu du 16ème siècle souligne l'importante différence observée entre la fin du 15ème siècle et la fin du 16ème siècle.

Ces observations accentuent l'hypothèse que la nature géographique ainsi que le type de régime des cours d'eau étudiés sont les paramètres contrôlant de la variation du signal « fréquence d'inondations » et donc que les contraintes climatiques sont perçues différemment d'un bassin-versant à l'autre.

➔ A partir du 17ème siècle, les concordances précédemment observées entre les bassins-versants se font plus rares et les séries présentent plus de décalage de phases.

En effet, si au début du 17ème siècle la grande majorité des courbes de fréquences sont basses, la durée de cette période d'inactivité alluviale varie de façon importante d'une rivière à l'autre.

➔Au début du 17ème siècle, seuls les bassins-versants de la Loire (Loire-5) et de la Maine (Maine-2) présentent une augmentation significative de la fréquence d'inondation. L'extrême augmentation de fréquence des inondations du Maine et de la Loire suggère un véritable événement extrême, dont le forçage doit être d'origine océanique et exclusivement ressenti par les rivières au régime pluvial.

➔ Dès le deuxième tiers du 17ème siècle, en revanche, les bassins du Rhône, du Rhin, de la Durance, de la Seine et de la Lizaine connaissent une très forte augmentation ou atteignent leur maximum de fréquence jusqu'à atteindre aux alentour du seuil du 18ème siècle une valeur minimum. Cela suggère une évolution, vers le Nord-Est (Vosges, Seuil de Bourgogne) du phénomène climatique observé précédemment pour le Maine et la Loire qui n'affecte pas encore le domaine alpin. Les rivières au régime pluvionival semblent mieux enregistrées cette période d'activité alluviale.

➔Le début du 18ème siècle est donc marqué par des minima dans un grand nombre de bassins-versants, mais aussi par des périodes d'augmentations rapides de la fréquence d'inondation de certains cours d'eau. C'est le cas de la Loire (Loire-6), avant qu'une trentaine d'années plus tard un nombre important de bassins-versants subisse une forte augmentation des inondations.

➔Vers le milieu jusqu'à la fin du 18ème siècle, l'augmentation de la fréquence d'inondation touche les bassins-versants de la Moselle (Mos-4), de la Meurthe (Me-1), du Rhône (Rhone-4), du Doubs

(Doubs-1), de l'Isère (Is-1 et Is-2), de la Durance (Durance-3), de la Seine (Seine-6 et Seine-7) et de la Lizaine (Liz-2). De nombreuses séries atteignent donc de façon simultanée une grande fréquence d'inondation. Le Rhin et l'Ill à cette époque connaissent aussi une forte augmentation du nombre et de l'intensité des inondations mais le maximum ne sera atteint qu'à la fin de la première moitié du 19ème siècle. Cette date correspond pour nombre de bassin-versant comme par exemple, le Doubs, la Lizaine et l'Isère, à une nette diminution de la fréquence d'inondation. Le Rhin connaît donc pendant cette fin du 18ème siècle et ce début du 19ème siècle une évolution complètement différente des autres cours d'eau français.

2.4. CONCLUSION

Dans l'ensemble, ce travail met en évidence les différences entre chacune des séries hydrologiques reconstruites notamment dans la durée et la fréquence des phases d'inondation. Ces spécificités sont dues à de nombreux paramètres.

Les caractéristiques des bassins-versants, et donc le type de régime de chaque rivière, semblent influencer de façon notable la répartition des inondations au cours du temps. Cela est particulièrement illustré par le déphasage des périodes de hautes fréquences d'inondation de la Moselle par rapport à celles du Rhin, ainsi que par les variations plus rapides observées pour la Seine par rapport à celles observées pour les bassins-versants du Rhône ou de la Loire. Ces déphasages rappellent également les observations réalisées par Probst (1992) et Tardy (1986) sur les régimes actuels des rivières, mettant en évidence des déphasages d'Est en Ouest à l'échelle de l'Europe dans les variations hydrologiques pluriannuelles des cours d'eau.

La susceptibilité des cours d'eau aux variations climatiques est donc très variable, et les rivières françaises semblent avoir un fonctionnement assez diffèrent des cours d'eau de la péninsule ibérique (Barriendos et al., 2003). Pour le Tages, notamment des variations de la fréquences des inondations ont pu être corrélés avec les variation de l'activité solaire et de l'Oscillation Nord Atlantique (Benito et al., 2003 ; Vaquero, 2004).

En conséquence, cela indique que l'interprétation des inondations anciennes, et plus particulièrement des inondations archéologiques, doit tenir compte des spécificités des bassins-versants considérés. Les corrélations entre des événements hydrologiques synchrones reconnus sur des bassins-versants distincts sont donc difficiles à établir sans tenir compte de ces paramètres.

3. LES ACQUIS DE CE CHAPITRE

L'analyse de données documentaires anciennes à haute qualité informative permet l'identification de l'évolution de l'occupation anthropique de la plaine et de la terrasse du Rhin supérieur ainsi que de l'évolution de la dynamique alluviale et forestière du 16ème au 18ème siècle.

L'évolution du paysage jusqu'à la destruction du village de Kunheim par les crues du Rhin a pu être ainsi reconstituée en détail sur la période 1689-1767.

Sur la terrasse, la surface cultivée est stable tout au long de la période d'étude tandis que dans la plaine, une variabilité importante est observée.

La plaine alluviale présente à la fois un style en tresses et un style en anastomoses. Les mécanismes de passage de l'un à l'autre ont été mis en évidence, notamment par la stabilisation et amalgamation des barres ou au contraire par avulsion et bifurcation de la bande de tressage.

L'évolution quantifiée du paysage alluvial constitue un modèle pour l'étude de la plaine au cours de l'époque romaine.

Les séries hydrologiques du Rhin en Alsace et de treize autres cours d'eau, ont été reconstruites à partir de données documentaires sur plus de 800 ans. Les relations complexes à long terme entre les rivières et le climat suggèrent l'influence du type de régime et donc un contrôle à long terme des caractéristiques des bassins-versants sur l'évolution de la fréquence des inondations.

CHAPITRE 3 : LE SITE D’OEDENBURG

1. L'OCCUPATION CONNUE DU SITE

Dans le secteur d'étude décrit précédemment localisé entre les villages de Neuf-Brisach, Vieux-Brisach et Kunheim (Figures 3.1 et 3.2), se développe un site d'occupation datant de l'époque romaine et faisant actuellement l'objet d'importantes études archéologiques. Les résultats de ces travaux axés sur l'occupation en association avec une démarche géoarchéologique pluridisciplinaire permettent d'envisager une meilleure connaissance de la dynamique du Rhin au cours de l'Holocène, et en particulier au cours de l'époque romaine. Cela permet donc d'entrevoir une meilleure compréhension des paramètres pouvant contrôler à la fois la dynamique sédimentaire dans la plaine alluviale et la dynamique d'occupation humaine. En effet, l'approche pluridisciplinaire menée sur ce site permet d'améliorer considérablement la résolution temporelle et spatiale de la démarche engagée pour la connaissance de la dynamique du Rhin. Cette approche permet d'établir une perception plus juste des relations complexes existant entre la dynamique hydrologique du Rhin, notamment les variations de fréquence des inondations, les changements climatiques, l'évolution de l'occupation humaine, les transformations des différents stades de peuplements forestiers riverains, et enfin, la dynamique sédimentaire du bassin-versant du Rhin.

1.1. DE LA DECOUVERTE A AUJOURD'HUI

Le site archéologique d'Oedenburg est situé dans le département du Haut-Rhin, à la fois sur la commune de Biesheim et celle de Kunheim, à quelques kilomètres au Nord de Neuf-Brisach en bordure du Rhin (Figure 3.2). Le paysage moderne est marqué par la présence de la route départementale 468 qui relie Neuf-Brisach à Marckolsheim, selon un axe Nord-Sud, par le canal du Rhône au Rhin et par un canal de dérivation - dit canal de Neuf-Brisach - construit entre 1867 et 1878, qui relie le fleuve, à hauteur de Biesheim, avec le canal du Rhône au Rhin
à hauteur de Kunheim et qui coupe le site archéologique en deux. Il fait depuis 1996 l'objet d'un programme de fouilles trinational franco-germano-suisse dirigé par M. Reddé et des études conjointes des différents indicateurs archéologiques et environnementaux sont menées. Les indicateurs archéologiques étudiés sont à la fois de nature immobilière, comme les structures, ou mobilières comme les indicateurs céramiques, numismatiques, métalliques (notamment les militarias), carpologiques et zoologiques. Les indicateurs environnementaux sont abordés au travers des études palynologiques et géoarchéologiques. Les multiples interactions entre toutes ces approches constituent le véritable champ disciplinaire qu'est l'étude archéologique du site d'Oedenburg.

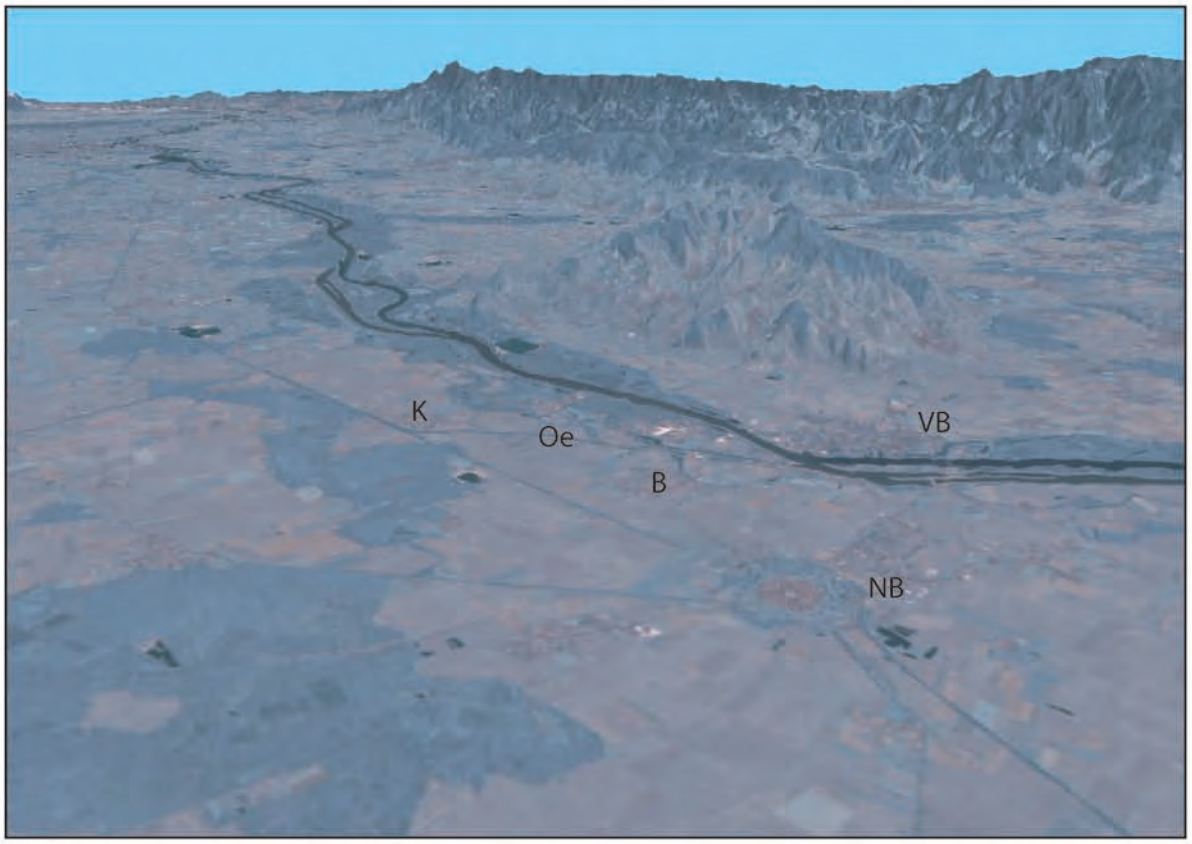


Figure 3.1 : Vue perspective de la plaine du Rhin supérieur orientée vers le nord-est.
Au premier plan, les villes fortifiées de Neuf-Brisach et de Vieux-Brisach se font face à quelques kilomètres au Sud du site antique d'Oedenburg. Au second plan, le Rhin canalisé contourne le massif volcanique du Kaiserstuhl qui domine la plaine. Enfin, au dernier plan, on distingue la ligne formée par le massif de la Forêt Noire.
Source: Google Earth.

Le terme « champ disciplinaire » signifie à mon sens une étude large de l'objet « site d'Oedenburg » avec tous les outils méthodologiques disponibles. L'approche géoarchéologique que je présente ici est d'ailleurs orientée vers une compréhension globale de l'environnement du site par l'intégration d'un maximum de données provenant de la géomorphologie et de la sédimentologie alluviale : la géophysique, la carpologie, la palynologie et l'archéologie, disciplines mises en perspective par l'approche historique du paysage et la variation de la fréquence des inondations définies plus haut.

Cette nouvelle investigation fait suite à une histoire déjà longue de la connaissance du site romain d'Oedenburg. En effet, les premières découvertes de vestiges antiques remontent à la fin du 17ème siècle (Schöpflin et Ravenez, 1849), et les premières fouilles furent entreprises en 1824 par P. de Golbéry. Mais c'est surtout à partir de la construction du canal de dérivation, en 1868, que l'on entend parler du site (Biellmann, 1996). Lors de ces toutes premières études, une série d'amphores ainsi que diverses monnaies du Haut-Empire, de la céramique et une dizaine de pieux de bois avaient été mises au jour. A cette époque, ces observations avaient conduit à interpréter le site comme une *villa*.

Quelques années plus tard, en 1877, lors des travaux de creusement d'un canal d'alimentation secondaire, Cestre relate la découverte de vestiges (Cestre, 1877 ; Biellmann, 1996). Il publie un plan topographique, aujourd'hui conservé au musée d'Altkirch.

Les premières connaissances archéologiques, à la fois spatiales et chronologiques, de ce site ont surtout été apportées à la fin du 19ème siècle, par Cestre (1877). Les découvertes d'éléments de mobilier ont ainsi permis d'établir très tôt que ce site était essentiellement attribuable à l'époque romaine, bien qu'une partie de celui-ci ait été occupé à l'époque médiévale pour l'installation d'une église ainsi que d'une nécropole attestée dès l'époque carolingienne.

Au cours du 20ème siècle, les recherches successives ont confirmé l'existence de multiples particularités propres à ce site. En effet, Oedenburg est connu depuis longtemps pour avoir fourni un important matériel militaire et civil correspondant à la période d'occupation romaine dans cette région (Hatt, 1954 et 1966b ; Maurer 1993 ; Biellmann, 1987, 1988, 1997, 2000 et 2001 ; Nuber et al., 2002 ; Reddé, 2002 ; Reddé et al., 2005). Parmi les travaux antérieurs aux opérations actuellement menées, il faut citer les travaux de terrain conduits dans les années 1960 par C. Bonnet et M. Jehl, puis par P. Carl et E. Kern (Figure 3.3). Ces sondages ont fait l'objet de quelques publications, et d'un bilan, dressé par E. Kern (Kern, 1994). Enfin, de nombreux résultats issus de ces sondages sont inventoriés (Zehner, 1998) dans la carte archéologique du Haut-Rhin.

Les points suivants constituent les bases des recherches actuellement menées.

-la découverte, dans la berge orientale du chenal le plus occidental du Rhin (Riedgraben), qui longe la terrasse, d'un aménagement en bois de type portuaire.

-la mise au jour d'un *Mithraeum* près du canal d'alimentation. Ce bâtiment est le seul à avoir fait l'objet d'une fouille étendue (Petry et Kern, 1978).

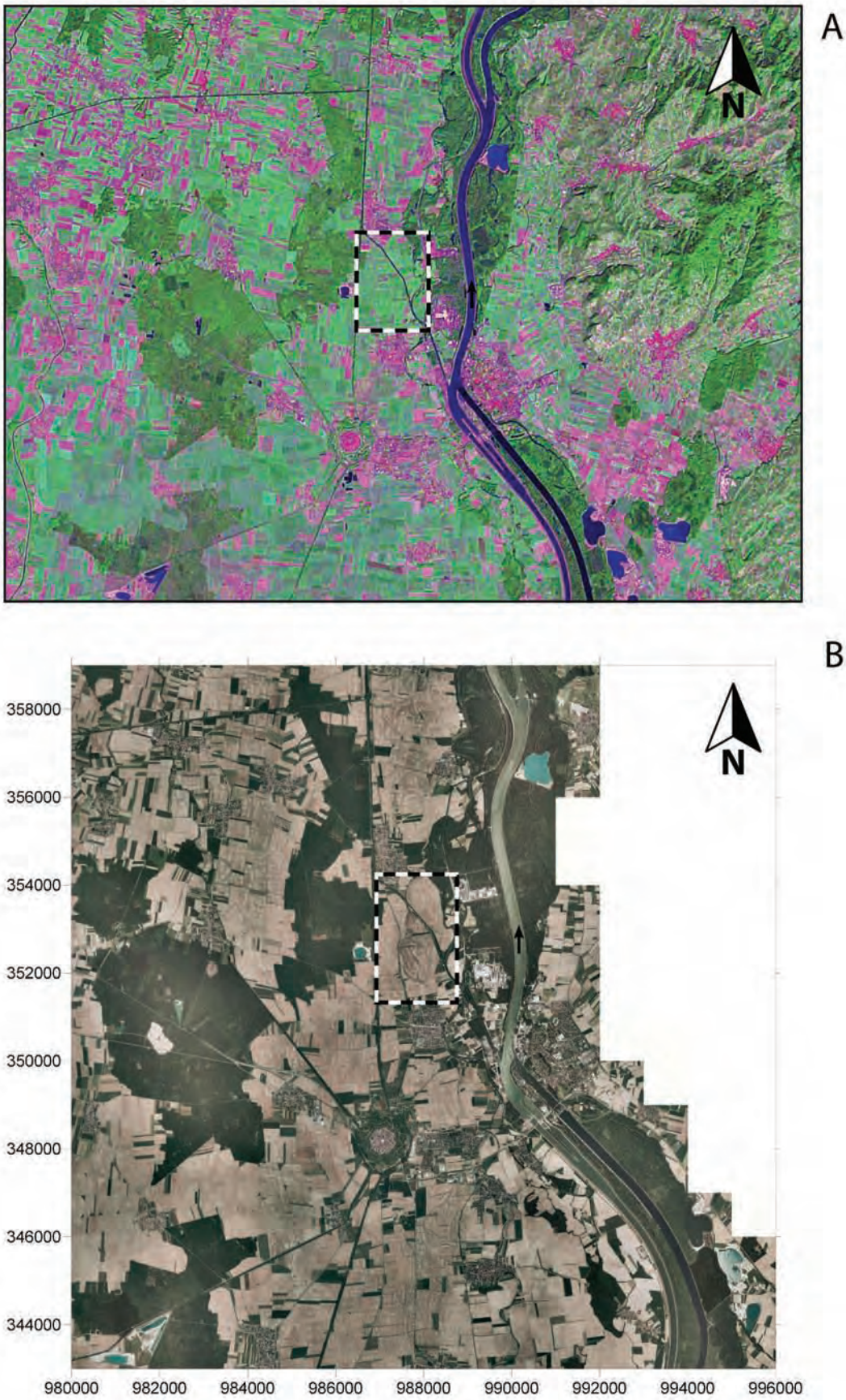


Figure 3.2 : Localisation du site d'Oedenburg entre les villages de Biesheim au sud et de Kunheim au nord, à partir de (A) l'image satellite de la région du Rhin supérieur (Source Google Earth) et de (B) la mosaïque de photographies aériennes orthorectifiées de l'Institut Géographique National.
La mosaïque a été géoréférencée dans le système de projection Lambert II étendu. La résolution initiale de ces photographies est de deux mètres par pixel.

-la mise en évidence d'un réseau de voirie non orthonormé dans une partie du *vicus* (Figure 3.3), ce que confirment les photographies aériennes obliques (Figure 3.4). La stratigraphie, très épaisse, descend en moyenne jusqu'à 3 m sous le niveau moderne au lieu-dit Altkirch et témoigne des recharges successives des voies (Figure 3.3). Les couches les plus profondes auraient révélé du matériel laténien (fond de cabane) à une profondeur de 4,10/ 4,20 m, puis du matériel augusto-tibérien.

-Des tranchées de sondage ont confirmé la présence d'une voie Nord-Sud, bien visible sur certaines couvertures aériennes (Figure 3.3). Différents puits, un bâtiment carré, une fontaine, ont complété ces découvertes dont les interprétations sont restées nécessairement aléatoires, en raison de la faiblesse des surfaces fouillées et de la méthode utilisée.

-Une fouille de sauvetage menée sur la nécropole, à l'Ouest du site, a été menée par P. Biellmann en 1984. Différents sarcophages, plusieurs tombes des 4ème et-5ème siècles ont été mis au jour (Zehner, 1998).

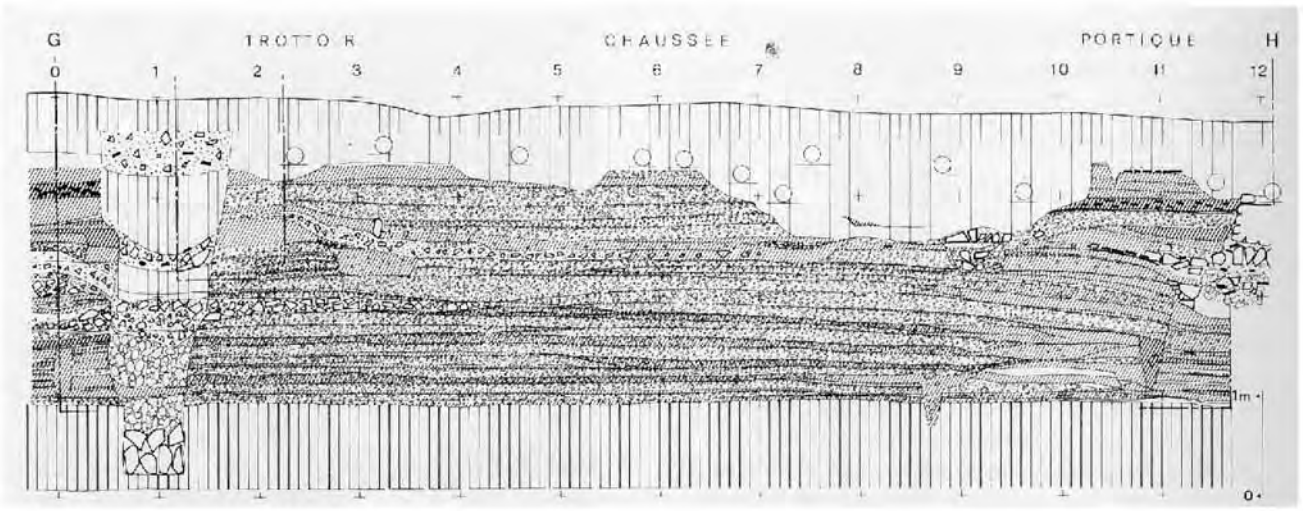
1.2. LES PROSPECTIONS PEDESTRES

Depuis le milieu des années 1970, le site a fait l'objet de nombreuses campagnes de prospections pédestres menées par la Société d'Histoire de la Hardt et du Ried. Ces prospections ont permis la mise au jour de plusieurs milliers d'éléments de mobilier. Le site a ainsi livré plusieurs centaines de tuiles estampillées au timbre de différents corps de troupe romains, témoignant du caractère essentiellement militaire du site. Les corps de troupe dont les estampilles ont été trouvées sont la *Legio* XXI *Rapax*, la *Legio* I *Martia*, la *Legio* VIII *Augusta*, la *Legio* XI *Claudia* et dans une moindre importance la *Legio* IV *Macedonica*, la *Legio* XIV *Gemina* et la *Cohors* XXVI vol. C.R. Ces corps de troupe étaient pour certains plutôt localisés autour de Strasbourg tandis que d'autres étaient plutôt situés autour de la *Colonia Augusta Raurica*.

L'absence quasi-totale de sites fouillés entre ces deux agglomérations antiques entraîne à l'heure actuelle nombre de questions quant à la dynamique des processus de romanisation de la plaine du Rhin supérieur. Dans cette optique, il est important de préciser quelle était la place d'Oedenburg dans l'organisation du *Limes* rhénan à la fois au cours du 1er siècle mais aussi après la fin du 3ème siècle.

Les prospections pédestres ont également permis la découverte de plusieurs milliers de monnaies récoltées et cartographiées très précisément. **Ces résultats permettent la mise en relation entre la dynamique de l'occupation et l'évolution du paysage alluvial d'Oedenburg au cours des quatre premiers siècles de notre ère.**

A



B

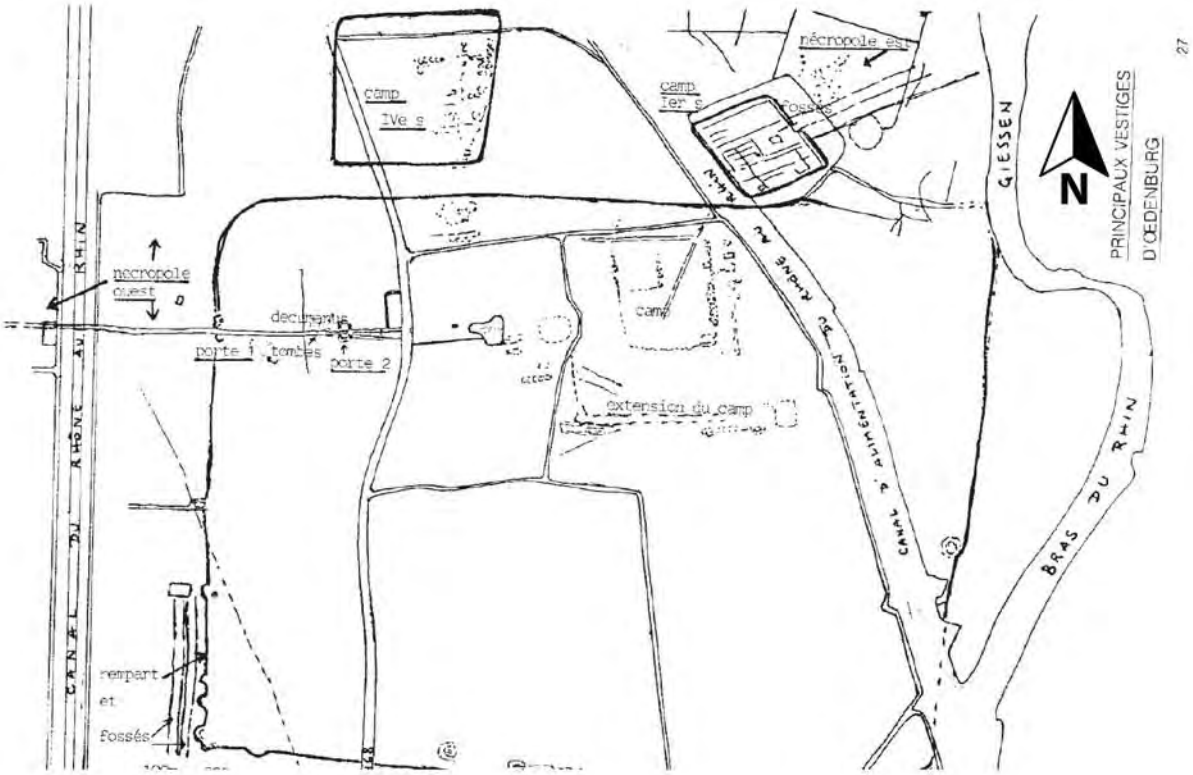


Figure 3.3 : Extraits des résultats des fouilles anciennes ainsi que des interprétations des photographies aériennes obliques du site d'Oedenburg avant le commencement des opérations menées depuis 1998.

A/ Coupe stratigraphique de la fouille menée au lieu dit Altkirch (Zone C) par Kern (1994).

B/ Plan interprétatif du site d'après les photographies aériennes (Biellmann, 1988). Cette organisation spatiale du site a été largement revue depuis 1998.

1.3 LE SITE EN ALSACE ROMAINE

Au cours de l'Antiquité, le Sud de l'Alsace, le Sud du pays de Bade ainsi que la région Bâloise constituaient le territoire du peuple encore peu connu des Rauraques (Asskamp, 1989). Ce peuple celte installé sur les deux rives du Rhin est connu notamment par l'intermédiaire de deux sites fortifiés situés respectivement à Bâle et Vieux-Brisach. A cette époque, le Rhin ne constituait donc pas une frontière pour les Rauraques.

La romanisation de cette région semble, d'après des inscriptions, avoir commencé dès 44 avant J.-C. avec l'implantation d'une colonie située à l'emplacement de l'actuelle ville d'Augst (*Augusta Raurica*) à l'Est de Bâle. Le site Oedenburg a très fréquemment été identifié avec *Argentovaria*, possible capitale de la cité pérégrine, à côté de la *Colonia Augusta Raurica* (Fellmann, 1995). Ainsi, au cours du 1er siècle après J.-C., le Rhin constituait une frontière de l'Empire romain. Un dispositif de fortifications assurait la surveillance de cette frontière naturelle contre d'éventuelles agressions venant de Germanie. La présence militaire romaine en Alsace, par la mise en garnison de légions et de troupes auxiliaires, a rapidement attiré des populations civiles indigènes formant des agglomérations secondaires (*vicus*) aux abords des camps.

Ces événements historiques sont reconnus sur le site d'Oedenburg par les vestiges archéologiques témoignant à la fois d'une présence militaire stable Julio-Claudienne (première moitié du 1er siècle) et d'un *vicus* se développant vers l'Ouest (Reddé et al., 2005 ; Ollive et al., 2007). Il est à noter que, pour le moment aucune preuve d'une occupation antérieure indigène n'a été découverte sur le site d'Oedenburg ce qui suggère une formation *ex-nihilo*. Entre la fin du 1er siècle et le 3ème siècle, la conquête romaine de la Germanie a entraîné une démilitarisation relative de la zone qui a été essentiellement occupée par des civils jusqu'à ce que le fleuve tienne à nouveau un rôle frontalier au 4ème siècle, après la perte des Champs Décumates à la fin du 3ème siècle. L'occupation du *vicus* semble donc avoir persisté jusqu'au retour, au 4ème siècle (Bas-Empire), de la présence militaire (forteresse valentinienne, *mansio*) en position haute sur la terrasse, à proximité de l'actuelle route départementale reliant Biesheim, au Sud, à Kunheim, au Nord. L'occupation est continue au cours des quatre premiers siècles, et il semble exister, au cours du temps, une remontée des installations anthropiques sur la terrasse weichsèlienne, moins inondable (Figure 3.4). Ce déplacement de l'occupation vers l'Ouest pose la question d'une relation possible entre ce déplacement et des contraintes environnementales liées à l'activité du Rhin (périodes de crues, variation du niveau de la nappe) dont les nombreux paléochenaux sont observables.

« Every archaeological problem starts as a problem in geoarchaeology » (Renfrew, 1976).

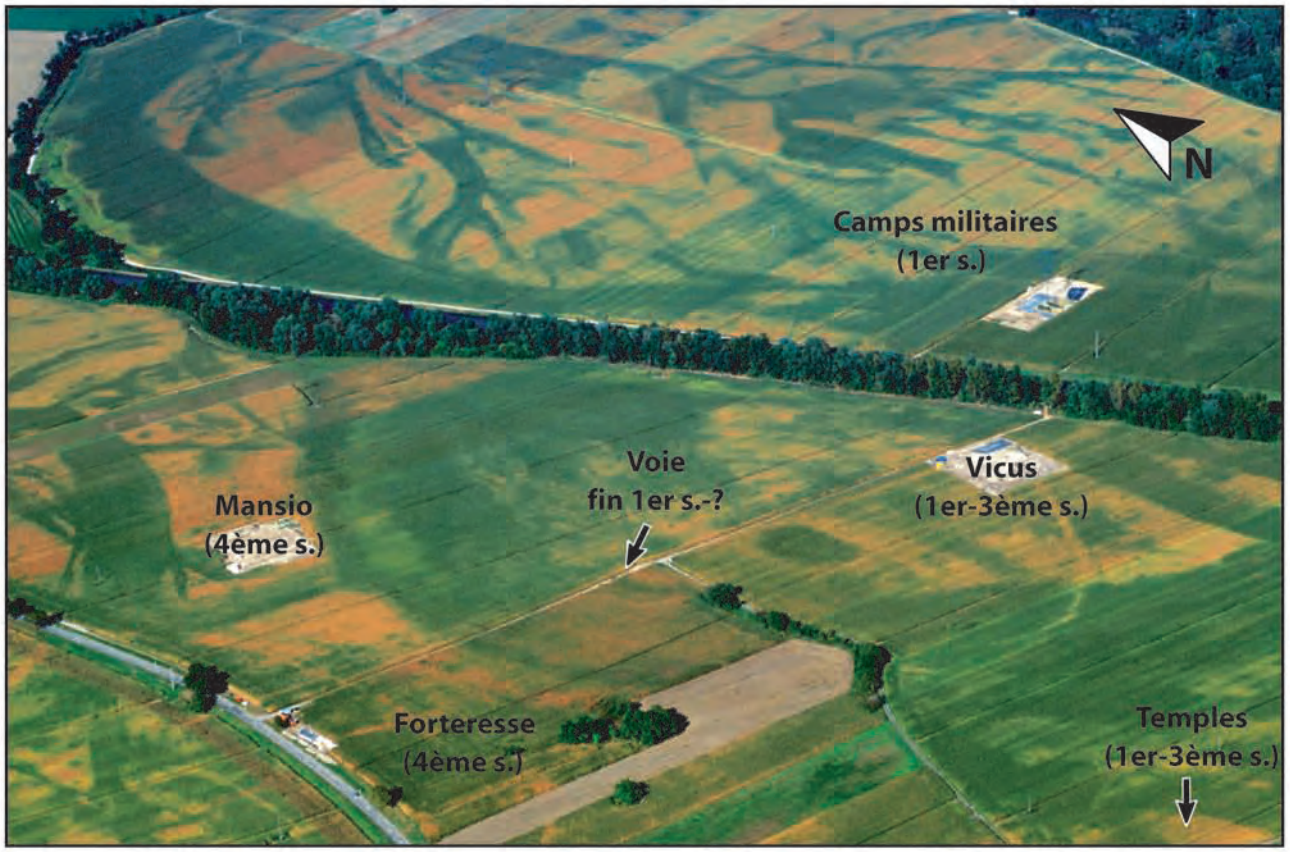


Figure 3.4 : Vue aérienne oblique du site d'Oedenburg et localisation des principales zones archéologiques étudiées.

Photographie : O. Braasch (1999). Les paléochenaux et paléobarres identifiés sur ce cliché rendent compte de la compléxité du paysage alluvial dans lequel s'inscrit le site archéologique. Il est donc crucial de connaître quelles sont les relations ayant existées entre le Rhin et l'occupation humaine dans cet environnement. Une approche pluridisciplinaire a été engagée pour répondre à cette problématique. Celle-ci est fondée à la fois sur une analyse de la géomorphologie alluviale, une étude de la dynamique d'occupation, ainsi que sur l'étude et la quantification de l'enregistrement sédimentaire alluvial aussi bien qu'anthropique.

2. L'APPROCHE GEOMORPHOLOGIQUE

2.1. OBJECTIFS DE L'APPROCHE GEOMORPHOLOGIQUE

Tout site archéologique peut être défini par son environnement naturel, son emprise, sa fonction principale, voire encore son statut en référence à d'autres sites. L'étude géomorphologique du site gallo-romain d'Oedenburg a été développée autour de deux grands ensembles thématiques. Leur objectif est d'apporter des éléments de réponse tant du point de vue de l'occupation humaine dans la plaine alluviale, que du point de vue de la dynamique alluviale du Rhin au cours de l'Holocène en s'appuyant notamment sur les résultats décrits dans le chapitre précédent concernant la quantification des cartes anciennes.

Le premier ensemble thématique est une étude large ayant pour but de dépasser le cadre strict du site d'Oedenburg autant du point de vue spatial que du point de vue temporel. En effet, la plaine alluviale du Rhin, comme toutes les autres plaines alluviales, a connu au cours des derniers milliers d'années de profonds changements liés à la dynamique climatique holocène. Par le présent travail, il est possible d'envisager une meilleure compréhension de cette dynamique de la plaine alluviale du Rhin. Pour cela il est indispensable de dresser un inventaire actuel de la plaine alluviale dans le secteur du site.

Le premier ensemble envisagé correspond donc à une étude géomorphologique fondée sur l'analyse de photographies aériennes récentes. Cela permet la description détaillée de la zone d'étude par l'observation des principaux éléments du paysage alluvial tels que des paléochenaux, paléobarres/îles ou encore le rebord de la terrasse. Le positionnement et l'interprétation de toutes les formes reconnues dans le paysage peuvent être encore améliorés par un second type de résultats consistant en un relevé topographique à haute résolution, réalisé aussi afin de distinguer les zones potentiellement inondables et de préciser les éléments du paléo-paysage.

L'approche géomorphologique alluviale du site d'Oedenburg correspond donc à une analyse des photographies aériennes disponibles et de la microtopographie relevée. Cela permettra de mieux comprendre le secteur où s'installent les Romains ainsi que les contraintes éventuelles auxquelles ils ont dû faire face tout au long de la période d'occupation. Une grande partie de ces résultats sert de base à toutes les investigations géoarchéologiques menées sur le site et a été en partie publiée dans *Gallia* (Reddé et al., 2005), *Quaternary International* (Ollive et al., 2006) et *Journal of Archaeological Science* (Ollive et al., 2007).

Le deuxième ensemble thématique proposé a pour objet de centrer les observations sur le développement du site au cours du temps, en tenant compte des contraintes liées au paysage alluvial.

L'analyse diachronique de l'agencement spatial des structures observées d'après les prospections géomagnétiques a été menée sur une cinquantaine d'hectares (0,5 km^2). La structuration des différents

bâtiments et des voies est interprétée en relation avec les nombreux éléments du paysage alluvial définis plus haut.

Une analyse de la répartition spatiale de plusieurs milliers d'éléments mobiliers archéologiques découverts depuis une vingtaine d'années par prospection pédestre a pu être réalisée sur près de 1 km^2. Il s'agit donc d'une argumentation chronologique qui permet de retracer l'évolution de l'occupation dans les quartiers reconnus par prospection magnétique tout en tenant compte des éléments du paysage alluvial. Cette approche a fait l'objet d'un article dans *Journal of Archaeological Science* (Ollive et al., 2007). Ainsi, pour cette étude géomorphologique, nous utilisons un éventail assez large de méthodes et d'outils spécifiques déjà expérimentés sur d'autres sites archéologiques alluviaux comme par exemple le site antique de Molesme en vallée de la Laigne (Cote d'Or) qui a fait l'objet récemment d'une publication (Petit et al., 2006).

2.2. LE PAYSAGE ALLUVIAL ACTUEL

2.2.1 Les photos aériennes redressées

2.2.1.1 Objectifs de l'étude

Que ce soit pour la détection des vestiges archéologiques ou bien pour les études touchant aux Sciences de la Terre telles que la géomorphologie et la sédimentologie alluviale, l'apport de la photographie aérienne n'est plus à démontrer (e.g. Skelly et al., 2003 ; Lunt et al., 2004). En effet, en archéologie, depuis le développement de cette méthode au cours des trente dernières années, de nombreux sites ont été découverts et étudiés. Cette approche est d'autant plus importante qu'elle permet de replacer ces sites dans leur environnement naturel plus ou moins large. La prise en compte de l'environnement d'un site archéologique est de plus en plus considérée comme une nécessité et traduit le fait qu'il peut être considéré comme un élément à part entière du site qui ne se limite alors plus seulement aux structures d'occupation. Par extension, l'environnement d'un site peut donc être considéré comme le site lui-même puisqu'il est souvent influencé par l'occupation du site qu'il influence lui-même. L'environnement est une résultante de toute une histoire de l'anthropisation d'un espace naturel. En géomorphologie alluviale, l'utilisation des photographies aériennes est aussi très répandue. La vue en plan d'une plaine alluviale constitue une méthode pour en définir les caractéristiques comme la forme des chenaux, des barres et des îles ou encore la présence de végétations, etc. La présente approche consistera donc dans un premier temps à définir le paysage actuel dans lequel se développe le site d'Oedenburg à l'aide de l'étude de photographies aériennes.

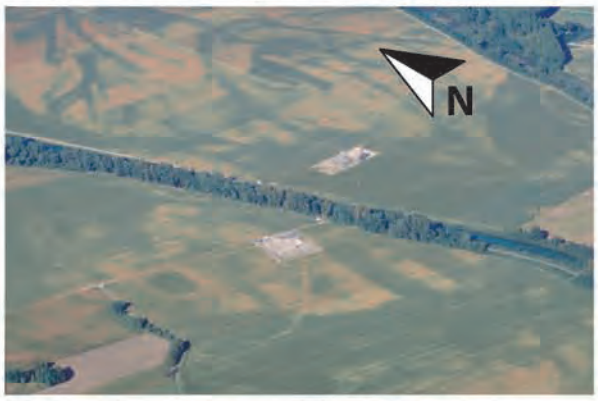
Le secteur d'Oedenburg situé entre les communes de Biesheim et Kunheim a fait l'objet au cours de la dernière décennie d'une couverture photographique aérienne oblique très importante. En effet, les archéologues J.-J. Wolf, R. Goguey et O. Braasch ont réalisé, de façon indépendante, plusieurs centaines de clichés obliques du secteur d'étude. Ces campagnes photographiques ont permis une première interprétation (Figures 3.3 et 3.4) et une connaissance de l'emprise du site dans son ensemble (Biellmann, 1988 ; Reddé et al., 2005). Il est notamment possible de localiser à partir de ces photographies de nombreuses structures archéologiques ainsi que les éléments constituant le paysage alluvial (chenaux, barres). A cette importante documentation oblique peuvent s'ajouter quelques clichés verticaux réalisés essentiellement par l'I.G.N. en 1995 ainsi que ceux réalisés par l'entreprise SOREA en 2002.

L'étude des clichés photographiques, tant verticaux qu'obliques permet l'observation d'anomalies colorimétriques dans le paysage actuel. Ces anomalies sont de deux sortes en fonction de la période à laquelle la photographie a été réalisée.

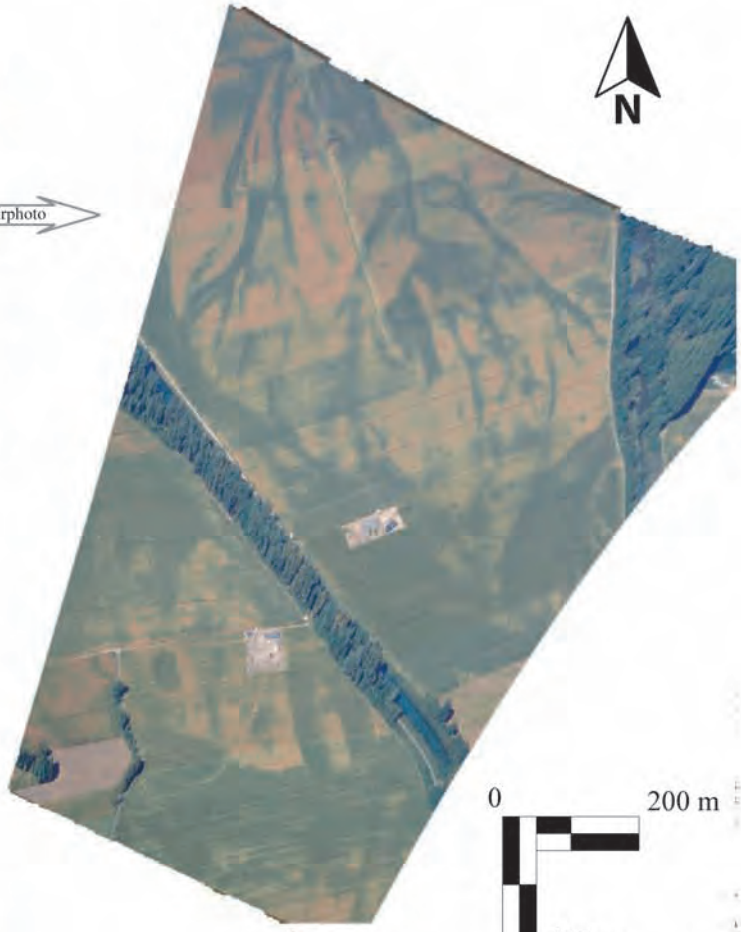
Ainsi, le premier type d'anomalie observé correspond aux photographies qui ont été prises pendant la période estivale, c'est-à-dire pendant la période de pousse des cultures de maïs à Oedenburg. Le principe est simple, et il réside dans le fait bien connu que la croissance et la maturité des végétaux sont directement influencées par la texture et la structure ainsi que par l'humidité du sol (Riley, 1946 ; Scollar et al., 1990). Ainsi des variations colorimétriques peuvent être observées entre les plants et représentent alors les anomalies de croissance des végétaux observés. Un pied de maïs en milieu humide sera plutôt vert tandis qu'un pied en milieu sec, lui, présentera une couleur jaune. A cela s'ajoutent les effets dus au vent, qui a pour effet de coucher les plants de façon plus ou moins importante en fonction de la présence ou non de structures dans le sous-sol, c'est-à-dire de leur état de croissance.

Le second type d'anomalie est observé lorsque les photographies ont été prises en hiver c'est à dire lorsque les champs ne sont pas végétalisés. En effet, la couleur du sol peut être influencée à la fois par le degré d'humidité et par les sédiments le composant. Un sol à matrice fine et organique sera plus humide qu'un sol composé essentiellement de galets et donc à forte macroporosité. Le sol humide sera plus foncé que le sol sec. Ainsi, par cette méthode, des zones plutôt sèches ou plutôt humides peuvent être individualisées et interprétés en fonction de leur forme, de leur dimension et de leur arrangement géométrique avec le voisinage. Les zones humides peuvent correspondre à des paléochenaux du Rhin, ou à des structures anthropiques en creux (fosses, fossés…) dont le remplissage est constitué de particules fines, tandis que les zones plus sèches correspondent le plus souvent à des structures graveleuses, soit des barres alluviales, soit des structures anthropiques du type fosse ou fossé à remplissage grossier, des voies de circulation empierrées ou des bâtiments.

Zones A et B vues depuis le sud-ouest.



Airphoto

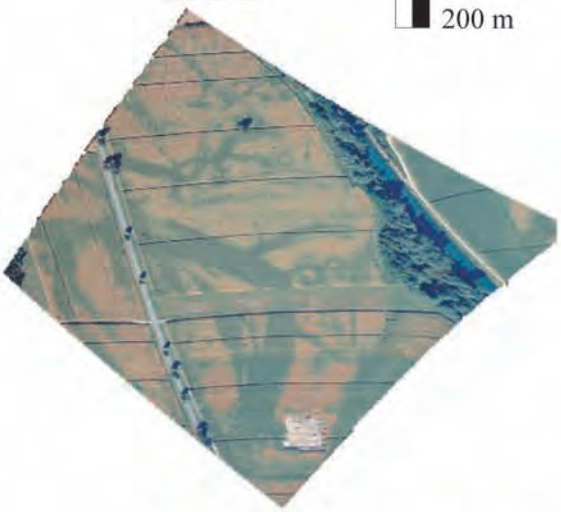


0 200 m

200 m

Partie nord-est de la Zone C vue depuis le nord.

Airphoto



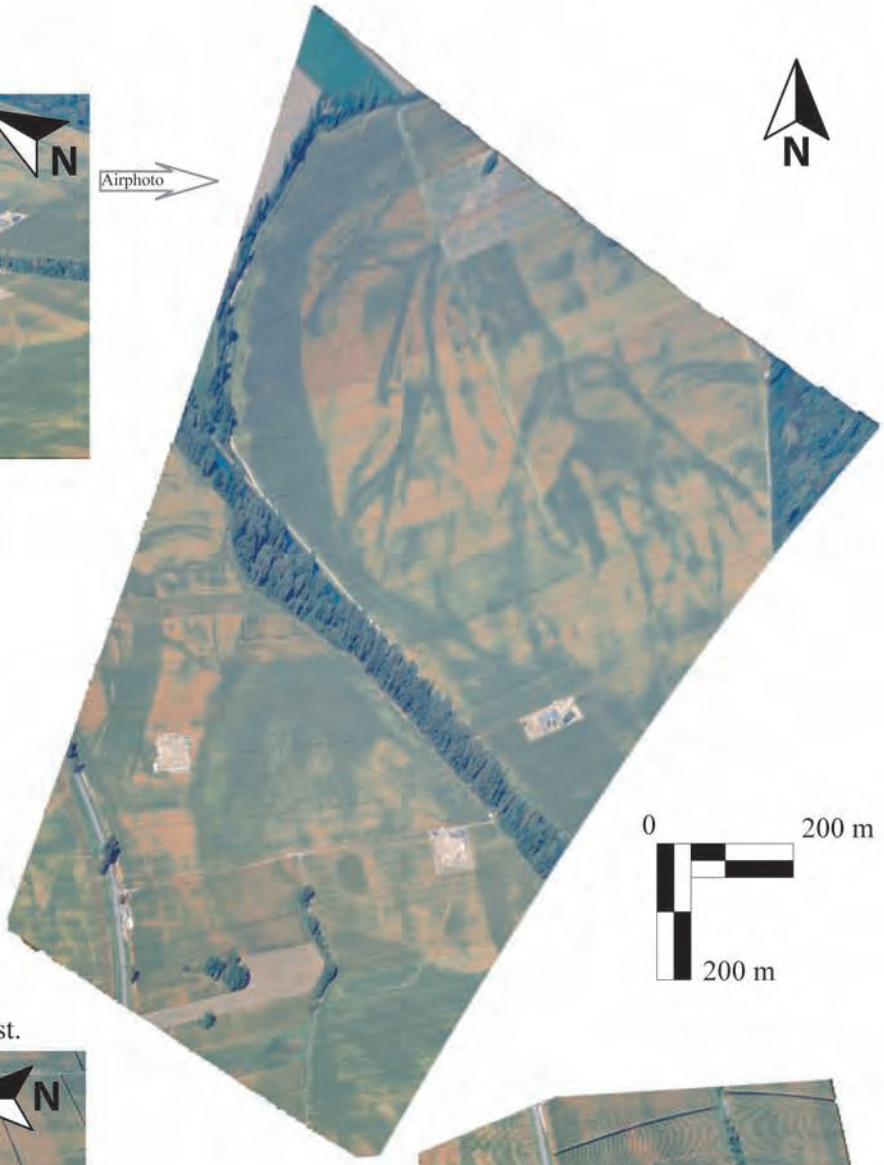
Partie nord de la Zone C vue depuis le nord-ouest.

Airphoto

Figure 3.5A : Redressement des photographies aériennes obliques présentant un intérêt géoarchéologique, c'est à dire permettant la visualisation des structures archéologiques et des diffèrents élements du paysage naturel alluvial.

Zones A et B vues depuis le sud-ouest.

Airphoto



Partie est de la Zone C vue depuis l'ouest.

Airphoto

Partie est de la Zone A vue depuis le sud.

Airphoto

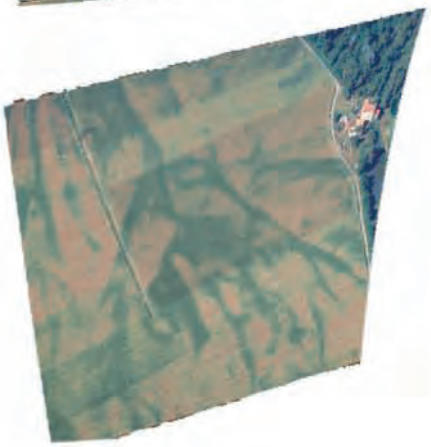


Figure 3.5B : Redressement des photographies aériennes obliques présentant un intérêt géoarchéologique

Ces observations peuvent être réalisées de façon relativement simple et l'interprétation peut être poussée puisque la méthode informe à la fois sur la forme des structures et sur le type de sédiments en place.

Cependant, il reste parfois difficile de conclure lorsque la photographie présente des déformations importantes pouvant être dues à la fois à la perspective et aux déformations dues à la lentille de l'appareil. Pour réaliser notre étude dans de meilleures conditions et ainsi pouvoir attribuer aux éléments observés une meilleure interprétation ainsi que des mesures précises, nous avons donc choisi de nous affranchir le plus possible de ces déformations présentes sur les clichés d'origine.

2.2.1.2 Redressement et géoréférencement des photographies aériennes obliques

Les clichés photographiques aériens disponibles sont de deux sortes : les clichés verticaux de l'I.G.N. et les clichés obliques. Les clichés verticaux ont une résolution élevée mais il est rare que les structures archéologiques y soient bien observables. Cela est dû essentiellement au fait que les structures archéologiques sont plus visibles en lumière rasante, et que ces campagnes de photographies aériennes ne cherchent pas à remplir ces conditions.

De ce fait, les clichés obliques sont souvent bien meilleurs pour les études archéologiques, notamment parce que les archéologues aériens volent à une altitude et une vitesse beaucoup plus basses, ce qui permet d'augmenter la résolution des prises de vue. Cependant, ces photographies présentent des déformations liées à la perspective et à l'optique utilisée. La plus importante est celle due à la perspective. Afin de corriger cette partie de la déformation, des logiciels spécifiques ont été développés, notamment Air Photo. Le principe est de choisir un nombre suffisant de points de repère (ou points d'amer) répartis dans l'espace de façon assez homogène afin de recaler le cliché photographique sur un plan cadastral ou une photographie déjà orthorectifiée. Pour notre étude, plusieurs centaines de photographies obliques étaient disponibles, cependant quelques unes seulement présentaient suffisamment de points de repères pour pouvoir les redresser convenablement. Lors de la sélection des photographies pour la réalisation de la mosaïque, il a donc fallu tenir compte de ce paramètre technique. En effet, notre objectif entraîne une sélection des clichés. Le but premier étant la réalisation d'un inventaire complet et exhaustif des formes alluviales pouvant contraindre et expliquer la dynamique de l'occupation, permettant quant à elle une approche chronologique fine de la dynamique alluviale. L'assemblage de ces photographies redressées associées à des clichés verticaux permet une localisation géographique précise des zones humides et sèches présentes dans le secteur. Il est alors possible d'envisager leur interprétation comme des éléments de paysage d'origine alluviale (paléochenaux, paléobarres, terrasses) ou de structures archéologiques.

A partir de là nous avons ensuite pu, à l'aide des logiciels tels que Didger et Surfer, géoréférencer puis visualiser cette mosaïque.

Cela permet de calculer très précisément les coordonnées des objets observés sur les photographies. Les planches ci-dessous (Figures 3.5A et 3.5B) permettent de rendre compte de l'amélioration apportée par ce type de transformation à l'image d'origine. Du point de vue de l'étude géomorphologique, l'apport considérable de cette méthode est la visualisation en plan des paléochenaux à l'échelle permettant ainsi de mieux comprendre la hiérarchie et la géométrie existant entre eux. Du point de vue de l'étude archéologique, il est possible de connaître par exemple la véritable direction des voies ainsi que la dimension de certaines structures.

2.2.1.3. Observation des anomalies de croissance

Le montage photographique présenté ci-dessous (Figures 3.6 et 3.7) permet l'identification de nombreux éléments du paysage actuel entre les communes de Biesheim et de Kunheim. Certains éléments marquant le paysage actuel sont très récents tels que par exemple la route départementale, le canal d'alimentation, ainsi qu'une partie du grand canal du Rhône au Rhin. Ils se surimposent à des éléments plus anciens pouvant être soit d'origine alluviale, comme par exemple des paléochenaux, des paléobarres/îles, le rebord de la basse terrasse, soit d'origine anthropique, comme par exemple certaines voies antiques bien visibles, traces d'anciens parcellaires, fossés de camps militaires, fosses, etc. Depuis le début des investigations archéologiques, il est apparu important de connaître l'emplacement ainsi que les dimensions exactes de toutes ces formes marquant le paysage, notamment afin de mieux orienter la stratégie des fouilles. Pour cela, il a été nécessaire de réaliser un géoréférencement et un redressement des photographies aériennes obliques d'origine.

La connaissance des dimensions et de l'emplacement des formes est essentielle au développement de la problématique de fouille ainsi qu'à la description précise de l'état actuel de la plaine alluviale et donc à la connaissance de sa dynamique passée. Cela permet également d'intégrer les éléments alluviaux dans l'interprétation de l'occupation du site.

L'observation géoarchéologique de la mosaïque de photographies aériennes (Figures 3.6 et 3.7) **permet de définir pour le site d'Oedenburg et son voisinage trois grandes zones géomorphologiques distinctes** (Reddé et al., 2005 ; Ollive et al., 2006 ; Petit et al., 2007).

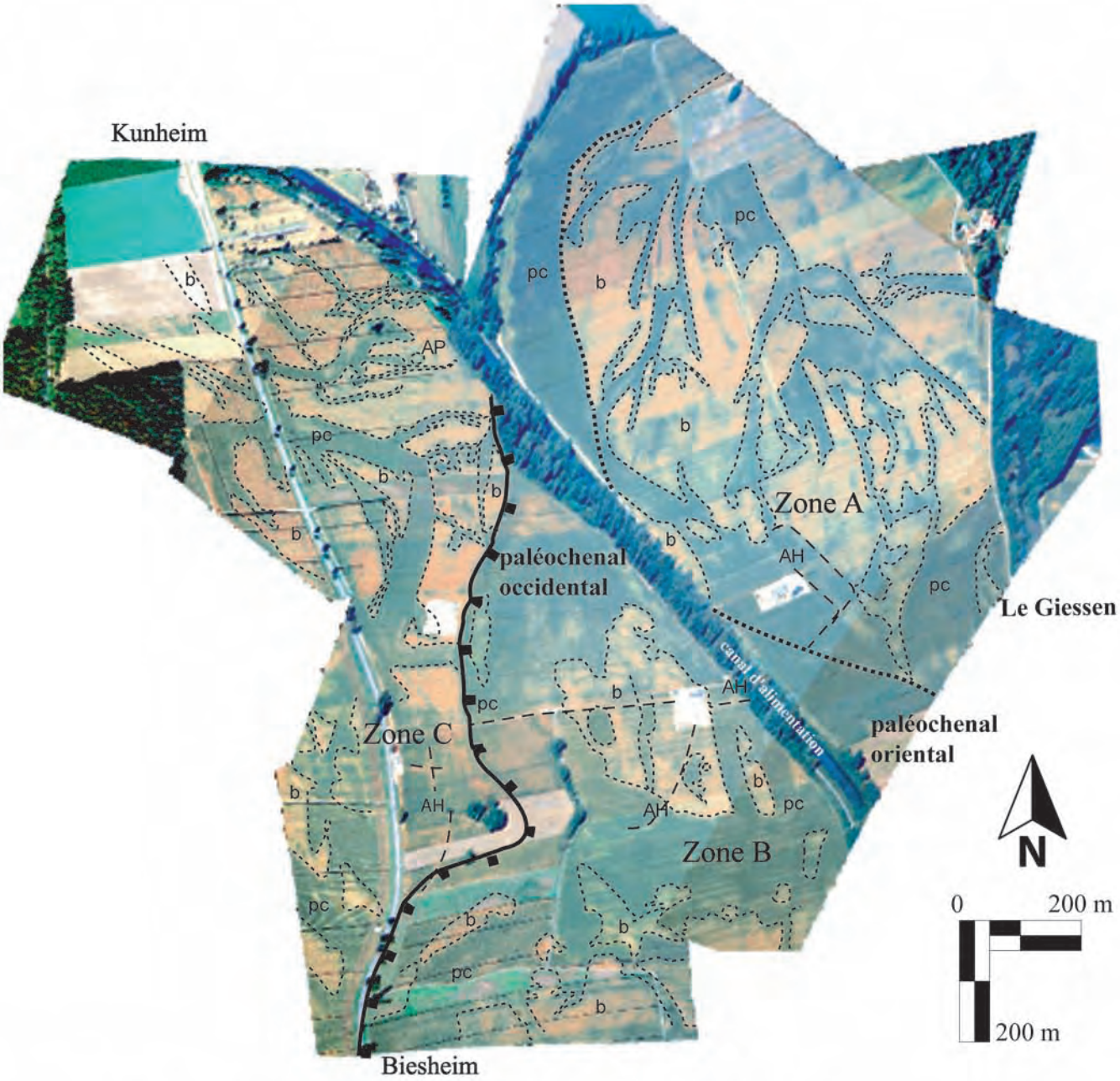


Figure 3.6 : Mosaïque de photographies aériennes obliques orthorectifiées du site d'étude.

centre de la zone on distingue le rebord de terrasse. Celui-ci sépare les paléochenaux (pc) et les barres (b) anciens situés à l'Ouest, des paléochenaux et barres holocènes situés à l'Est. Les structures anthropiques sont repérées pouvant être attribuées essentiellement à l'époque romaine (AH). On note cependant la présence dans la partie Nord de la terrasse d'une structure fossoyée circulaire pouvant être interprétée comme un enclos protohistorique attribuable au premier âge du fer (AP).

En Zone A, une importante zone sèche composite est observée, composée de multiples barres secondaires et de chenaux intra-barres. Cette zone est limitée à l'Est par le Giessen, aujourd'hui canalisé, et au Sud, à l'Ouest et au Nord, par les importants paléochenaux nommés paléochenal oriental et paléochenal occidental. C'est sur cette zone que s'installe le camp militaire Julio-Claudien (AH).

La Zone B est limitée à l'est par le paléochenal oriental et à l'ouest par le rebord de la terrasse. Au sud, les multiples paléochenaux de faible largeur présente une géométrie en tresse. Vers le Nord, on observe la confluence entre le paléochenal oriental et la paléochenal occidental. Le secteur médian est constitué par une large barre de forme losangique sur laquelle se dévelloppe l'essentiel des constructions romaines du haut empire comme des voies. orientées Est/Ouest et Sud-Ouest/ Nord-Est.

Enfin, la Zone C, la terrasse, est parcourue par de multiples paléochenaux ainsi que des barres dont la géométrie est anastomosée. C'est sur cette zone que l'essentiel de l'occupation romaine du bas empire est reconnue, notamment la forterresse valentienne située à proximité d'un bunker français du début du vingtième siècle.

➢ *La zone A*

✓ *Observations*

Une zone orientale, Zone A, correspond à une zone très large (600 m E-O par 1000 m N-S) et relativement sèche d'après les teintes claires observées sur tous les clichés disponibles. Elle est limitée à l'Est par un chenal canalisé encore actif et d'extension Sud Nord, connu sous le nom de *Giessen* ou Rhin de Biesheim. A l'Ouest, au Nord et au Sud, elle est ceinturée de bandes sombres sinueuses pouvant atteindre plus de cent mètres de largeur. Au centre, se développe un chevelu sombre de bandes étroites de 10-20 m jusqu'à 50 m, interconnectées qui s'étendent du Sud vers le Nord. Dans la partie située au Sud-Ouest, ce chevelu est recoupé par le double tracé quadrangulaire connu et actuellement fouillé (AH).

✓ *Interprétation*

La zone A, peut ainsi être interprétée comme une paléo-île du Rhin bordée de paléochenaux secondaires du Rhin. Ces paléochenaux présentent une largeur d'environ 100 m et ont, en plan, une allure en méandre à large rayon de courbure. Le chevelu observé sur le sommet de la paléo-île est interprété comme de nombreux paléochenaux mineurs la recoupant mis en place lors des phases de décrue à l'époque d'édification de la paléo-île et fonctionnant jusqu'à des périodes récentes lors des inondations du Rhin. Cette époque d'édification de la paléoîle reste encore à définir.
Enfin, le double tracé quadrangulaire observé dans l'angle Sud-Ouest de la paléo-île est connu comme correspondant aux deux générations de fossés des deux camps militaires romains successifs actuellement fouillés. Puisque cette mosaïque photographique nous a livré des éléments très lisibles et puisque les fossés des camps sont encore clairement identifiables, nous pouvons affirmer qu'il n'y a pas eu de phase majeure de sédimentation depuis l'époque romaine sur au moins la partie Sud-Ouest de la paléo-île limitant la zone orientale du secteur d'étude.

Figure 3.7 : Mosaïque photographique orthorectifiée haute résolution sur la mosaïque photographique IGN orthorectifiée.

Les paléochenaux et les paléobarres repérés permettent de définir différentes géométries alluviales successives dans cette partie de la plaine du Rhin supérieur.

➢ *La zone B*

✓ *Observations*

Une zone centrale, dite B, est large d'environ 500 m à 1000 m. On peut y distinguer de nombreuses zones claires séparées par des rubans continus interconnectés plus sombres. Il apparaît que cette zone est largement plus humide que la zone orientale (Zone A) et que la zone occidentale décrite ci-après (Zone C). De plus, un gradient est observé du Sud vers le Nord. En effet, dans le secteur Sud, les zones sèches sont nettement allongées selon un axe Nord-Sud et de petite taille (quelques dizaines de mètres), et séparées par de petites bandes humides dont la largeur avoisine 10m (Figures 3.6 et 3.7). En revanche, on observe à la latitude du camp, plus au Nord, un rétrécissement qui s'accompagne de l'élargissement des bandes humides qui délimitent une large zone plus sèche de forme sub-losangique et aux dimensions de 200 par 300 m. Sur cette surface sèche se surimpose un tracé continu et sec se dirigeant vers le Sud-Ouest. Enfin, encore plus au Nord, les larges bandes humides sinueuses se rejoignent et individualisent un nouveau segment prenant d'abord une orientation Nord-Sud puis s'orientant vers le Nord-Est. On peut noter que quelques zones plus claires et montrant un allongement Nord-Sud sont présentes au milieu de la large bande sombre située la plus à l'Est dans cette zone. Enfin, la présence d'un élément linéaire récent marque le paysage de façon notable, il s'agit du canal d'alimentation construit au cours du 19ème siècle reprenant partiellement le tracé des zones sombres déjà observées.

✓ *Interprétation*

La zone centrale, Zone B, est plus complexe en raison d'une évolution du Sud vers le Nord. Au Sud, les zones sèches allongées et peu étendues sont séparées par des bandes sombres peu large et d'extension N-S. Elles peuvent être interprétées comme des paléobarres longitudinales composées de particules grossières (galets et graviers) dans un système de petits paléochenaux dont la vue en plan correspond à un système en tresses classique (e.g. Bristow et Best, 1993). Les grandes bandes sombres qui traversent du Sud vers le Nord cette zone sont aussi des paléochenaux qui présentent en revanche une sinuosité faisant plus penser à des chenaux en méandre. A leur confluence, ces derniers individualisent dans la partie centrale de notre zone une large paléo-île de forme plus ou moins losangique et aux dimensions 200 par 300 m. Sur cette paléo-île, le tracé continu allant vers le Sud-Ouest peut être interprété comme un empierrement de voie. Les petits espaces plus clairs présents au sein des grands paléochenaux peuvent pour le moment être interprétés comme des paléobarres longitudinales de milieu de chenal. Au sein du large paléochenal occidental (Riedgraben), une barre longitudinale est repérée. Cette barre a pu être observée en coupe (voir infra).

➢ *La zone C*

✓ *Observation*

Une zone occidentale, Zone C, est globalement plutôt sèche. C'est sur cette zone que se développe la route départementale joignant Biesheim au Sud à Kunheim au Nord. Cette zone est néanmoins traversée par de nombreuses traces humides et sinueuses dont la largeur avoisine de 10 à 50 m et qui ne sont pas préférentiellement orientées. Le profil de la limite avec la zone centrale présente une particularité remarquable qui consiste en deux avancées localisées à la latitude Y= 352900 et au Nord de la latitude Y= 2353400. Dans ce secteur, des structures archéologiques correspondant à une forteresse Valentinienne et à une *mansio* du 4ème siècle sont actuellement fouillées (AH). Partant vers le Sud-Ouest, une longue trace rectiligne et sèche d'environ 6 à 10 m de large paraît se surimposer à tous les éléments du paysage. Il apparaît, de plus que le parcellaire en tient d'ailleurs compte, comme l'attestent les limites de bois et de champs. Enfin, aux coordonnées X= 987480, Y= 2353650, un cercle humide d'environ une trentaine de mètres de diamètre peut être distingué au milieu d'une zone plutôt sèche.

✓ *Interprétation*

La zone occidentale, se distingue clairement de la zone voisine par un rebord net pouvant être interprété comme le rebord de la basse terrasse weichsélienne composée de barres de graviers et galets rhénans. Ce rebord pourrait délimiter ainsi la zone occidentale non inondable des deux autres zones plus basses et inondables. L'argument photographique étant cependant insuffisant pour affirmer l'inondabilité ou la non inondabilité d'une zone, nous complétons cette interprétation partielle plus bas dans la partie consacrée aux relevés topographiques. Les bandes sombres observées dans la zone présentent des connexions qui nous permettent de les interpréter comme des paléochenaux de système alluvial en tresses, lesquels sont séparés par des paléobarres longitudinales et transversales composées de galets et de graviers. Enfin, le tracé rectiligne long et continu, orienté Sud-Ouest/ Nord-Est, se surimposant à tous les autres éléments du paysage et contraignant le parcellaire actuel, peut être interprété comme une voie construite avec du matériau grossier. La petite forme circulaire humide d'une dizaine de mètre de diamètre peut être interprétée comme un fossé circulaire protohistorique (AP), de type enclos.

Quelques-uns des chenaux observables sur la terrasse weichsélienne par la photographie aérienne et la topographie présentent un agencement en plan de style anastomosé. Cette empreinte, qui se surimpose sur les chenaux weichséliens en tresses, témoigne de la dernière phase alluviale qu'a pu connaître la plaine du Rhin avant ou pendant l'incision. Les larges chenaux méandriformes qui limitent la terrasse

ont connu une histoire complexe, polyphasée, liée à des bifurcations et avulsions axées préférentiellement sur la rive gauche du Rhin.

2.2.2. La topographie du site d'Oedenburg

2.2.2.1 Objectif du relevé topographique en contexte archéologique alluvial

Le relevé topographique en contexte alluvial actuel ou fossile est un outil très utilisé (e.g. Lunt et al., 2004). Il permet la mise en évidence des formes allant de l'échelle du chenal à celle de la plaine d'inondation. Comme nous l'avons montré plus haut, le secteur d'étude correspondant à l'agglomération antique d'Oedenburg se place à la fois sur la zone sèche de la terrasse et dans la plaine alluviale inondable du Rhin. Cela constitue un intérêt majeur puisqu'il est possible de comprendre quelles ont pu être les relations ayant existé entre l'occupation humaine et ce paysage complexe où les faibles variations topographiques s'accompagnent de grands changements de milieux. Cependant même si l'étude des photographies aériennes nous apporte des informations sur la position et la géométrie des chenaux par rapport aux structures d'occupation antiques, il reste difficile de hiérarchiser les paléochenaux très anciens situés sur la terrasse et ceux plus récents situés sur la plaine alluviale pouvant avoir eux même une chronologie complexe. Encore, il n'est pas évident qu'une zone plus au moins humide soit véritablement un paléochenal. De plus, nous le savons d'après de nombreux documents bibliographiques et cartographiques, le secteur d'étude a connu beaucoup d'événements d'inondations au cours des périodes historiques et une des questions majeures réside dans le fait de savoir distinguer les zones pouvant être inondées de celles l'étant beaucoup plus difficilement. En d'autres termes, l'organisation du site antique est-elle liée à l'inondabilité de la zone et au risque potentiel qui en découle ? Cette question nécessitait la réalisation d'un relevé microtopographique. Notre objectif est donc la mise en évidence des éléments constituant le paysage alluvial d'Oedenburg afin de compléter les informations et l'argumentaire donnés par les photographies aériennes redressées (Figure 3.8).

A

B

Figure 3.8 : Vues photographiques de la topographie des paléochenaux observable sur le terrain lorsque les maïs sont bien développés.

Les anomalies colorimétriques observées sur les photographies aériennes prises en été correspondent aux anomalies de croissances des épis liées à la nature du substrat et à son humidité.

A/ Vue vers l'est d'un rang. dans la partie sud de la Zone B. Au dernier plan, on distingue le corridor forestier situé le long du canal d'alimentation.

B/ Vue vers l'est d'un rang situé dans la partie nord de la la Zone B, on distingue au dernier plan le massif volcanique du Kaiserstuhl.

2.2.2.2 Méthode du relevé topographique

La grande étendue du site (environ 2 km2) et la topographie peu marquée du secteur (moins de 5 m de dénivelé) constituent deux contraintes pour le choix de l'appareillage. L'instrument de mesure sélectionné (Figure 3.9), la station totale Pentax ATS105 (théodolite laser avec carnet électronique d'acquisition) a permis une rapidité d'acquisition, une durée d'autonomie et une distance de visée compatibles avec les contraintes spatiales et une précision en rapport avec la contrainte topographique. L'appareil, utilisable quasiment par toute condition climatique, est adapté avec le travail de terrain en hiver. Les points mesurés sont géoréférencés dans un espace tridimensionnel, orienté dans le système de coordonnées Lambert II étendu et le Niveau Général de la France (NGF), par calcul de la distance, de l'angle vertical et horizontal entre la base fixe et un prisme mobile. Pour cela, la station a été implantée au-dessus d'un point aux coordonnées cartographiques connues (borne de référence) et son orientation par rapport au Nord géographique a été réalisée par visée d'un point connu comme le clocher de l'église de Biesheim ou de Kunheim géoréférencés ou d'un autre point sur le terrain. Cette partie du travail consistant en l'acquisition des données a nécessité un travail hivernal, lorsque les pieds de maïs sont absents afin de pouvoir viser le plus loin possible. De plus le cheminement a été facilité par les lignes de labour, ce qui nous a permis de maintenir des transects de mesures quasiment rectilignes et parallèles avec un espacement régulier entre eux. La présence de haies d'arbres le long du canal d'alimentation a rendu nécessaire la réalisation de nombreux changements de stations afin de pouvoir effectuer un relevé de chaque côté de celui-ci. Afin d'optimiser l'interpolation par le logiciel Surfer des points mesurés, une maille régulière d'environ 15 m en Y (Nord-Sud) par 10 m en X (Est-Ouest) a été réalisée sur le terrain. Ce choix est contraint par l'allongement préférentiellement Sud-Nord des paléochenaux présents dans le secteur d'étude.

Les données de terrains enregistrées ont ensuite été transférées vers un PC à l'aide du logiciel ATSPCDOS. Elles sont alors exploitables avec un logiciel de modélisation numérique de terrain Surfer 8.0. La création d'un modèle numérique de terrain a pu être réalisé soit par triangulation avec une interpolation linéaire TIN (*Triangular Irregular Network*) ou bien par une interpolation des données selon une mode de krigeage où la distribution d'origine des points de mesure permet de définir par calcul une nouvelle maille de points calculée à partir de ceux-ci.

Figure 3.9 : Théodolite en cours d'utilisation dans la partie Nord du site d'Oedenburg.
Le corridor végétalisé le long du canal d'alimentation est observable au dernier plan. Il reste relativement dense même en hiver.

2.2.2.3 Le modèle numérique de terrain

Les zones humides et sèches précédemment identifiées en photo-interprétation correspondent à des variations de la topographie (Figures 3.10 et 3.11). Il est maintenant possible dans un premier temps de connaître l'emplacement des thalwegs ainsi que d'estimer l'inondabilité du secteur d'Oedenburg (Figure 3.12) et, dans un second temps de proposer des relations d'antériorité et de postériorité entre les différents chenaux. Dans le secteur d'étude, les altitudes sont comprises entre 185 m et 192 m NGF, la distinction entre zones hautes et zones basses correspond donc à une réalité géomorphologique.

- ***La zone géomorphologique A***

La zone géomorphologique A, correspondant à une grande paléo-île sur laquelle sont installés les camps militaires julio-claudiens, est une zone relativement élevée. Son altitude varie entre 188 et 187 m NGF et présente un pendage du Sud vers le Nord. Les petits chenaux secondaires situés à son sommet sont peu marqués (environ 1 m). De chaque côté des grands paléochenaux limitent la zone au Sud, à l'Est et à l'Ouest. On peut observer une pente assez marquée et forte.

- ***La zone géomorphologique B***

La zone géomorphologique B correspond à une zone relativement humide. Du point de vue topographique, plusieurs secteurs sont distingués. A l'Est, longeant la Zone A, un large méandre est reconnu. Il est orienté du Sud vers le Nord, sur plusieurs centaines de mètres, jusqu'à l'extrémité Nord de la grande paléo-île. A la latitude du camp militaire en zone A, on trouve en Zone B une paléobarre de forme losangique dont l'altitude atteint 188 m. Au Nord de celle-ci, la confluence observée entre deux larges paléochenaux du secteur d'étude correspond à des altitudes peu élevées permettant d'attester notre première interprétation. Plus au Sud, les altitudes assez contrastées permettent de préciser l'emplacement des petits paléochenaux repérés en photographies aériennes et séparés par des petites barres longitudinales. Ces quatre paléochenaux sont bien individualisés. Le premier, peu marqué, se positionne juste en contrebas de la terrasse weichsélienne. Les trois autres sont plus marqués et leurs profondeurs avoisinent 40 à 80 cm.

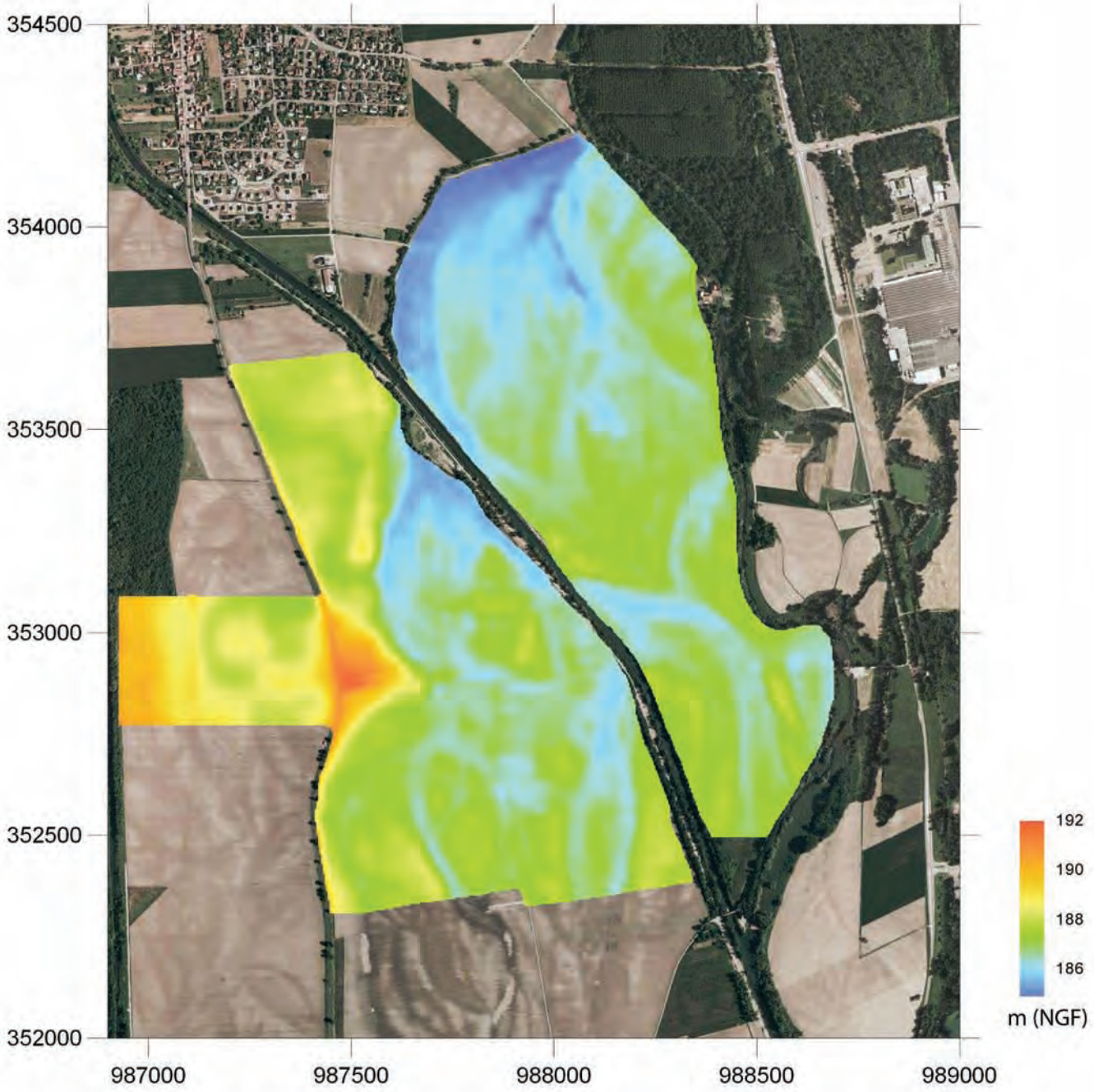


Figure 3.10 : Modèle numérique de terrain du site d'Oedenburg projeté sur la photographie aérienne orthorectifiée de l'Institut Géographique National.

La bonne correspondance des paléochenaux observés sur les photographies et en topographie permet une visualisation complète des caractéristiques du paysage alluvial. A l'Ouest, la terrasse weichsélienne est composée de multiples chenaux anastomosés anciens dont la largeur est de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Elle domine de plusieurs mètres la plaine holocène située à l'Est. La plaine holocène est à la fois composée de chenaux tressés (au Sud) et de chenaux anastomosés (dans le reste de la zone) de largeur variable allant de la dizaine de mètres à plus d'une centaine de mètres. La limite de la terrasse montre deux grandes traces méandriforme correspondant à deux épisodes d'incision alluviale anciens successifs. La plus ancienne trace se place au Sud tandis que la plus récente se place au Nord de la protubérance que forme la terrasse à la latitude 352900.

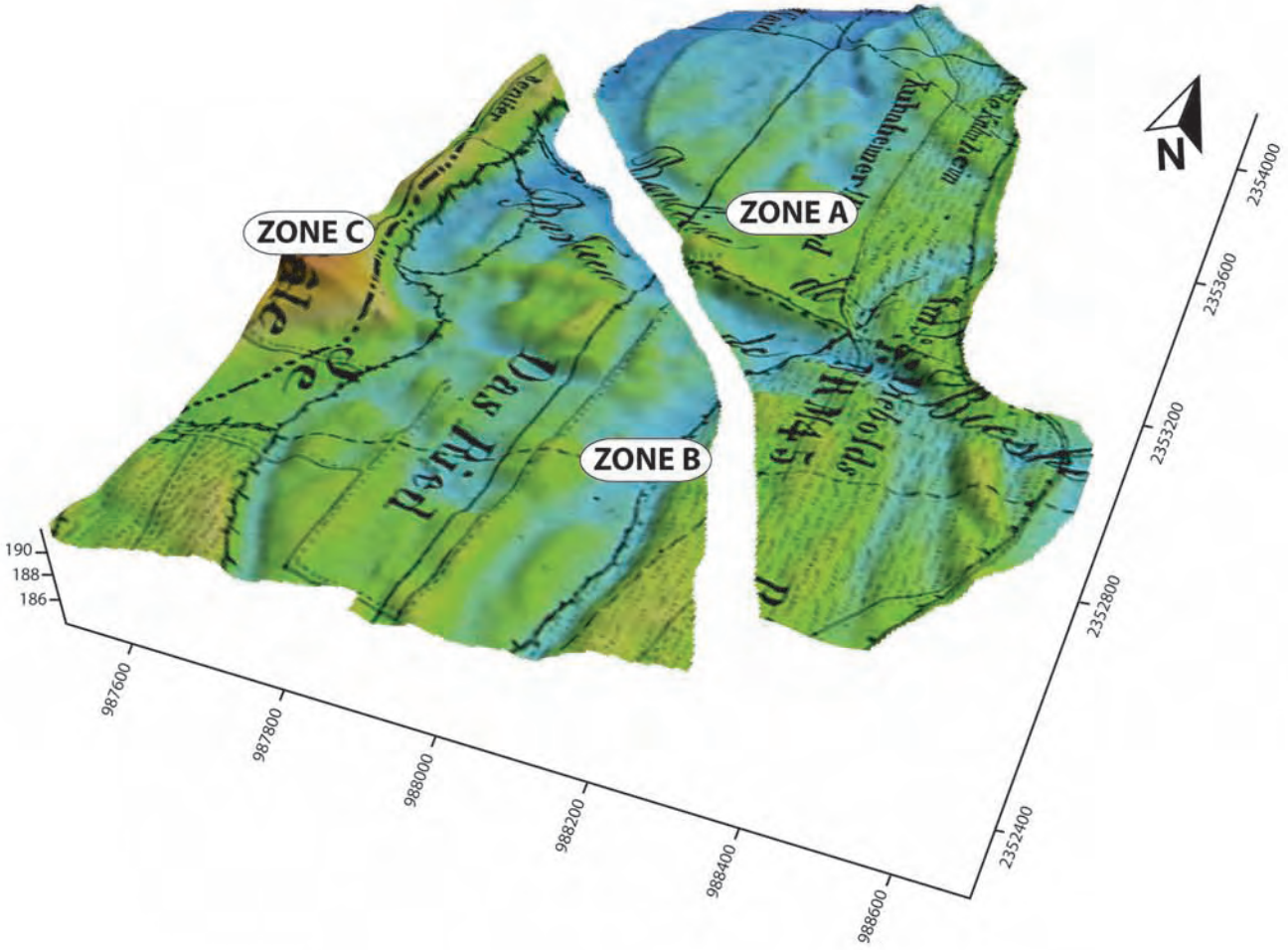


Figure 3.11: Carte datant de 1853 drapée sur le modèle numérique de terrain.
La limite d'inondation de 1852, considérée comme l'une des plus importantes de l'histoire correspond à la limite de la terrasse weichsélienne. Les cours d'eau sont figurés et correspondent aux zones les plus basses de la plaine alluviale.

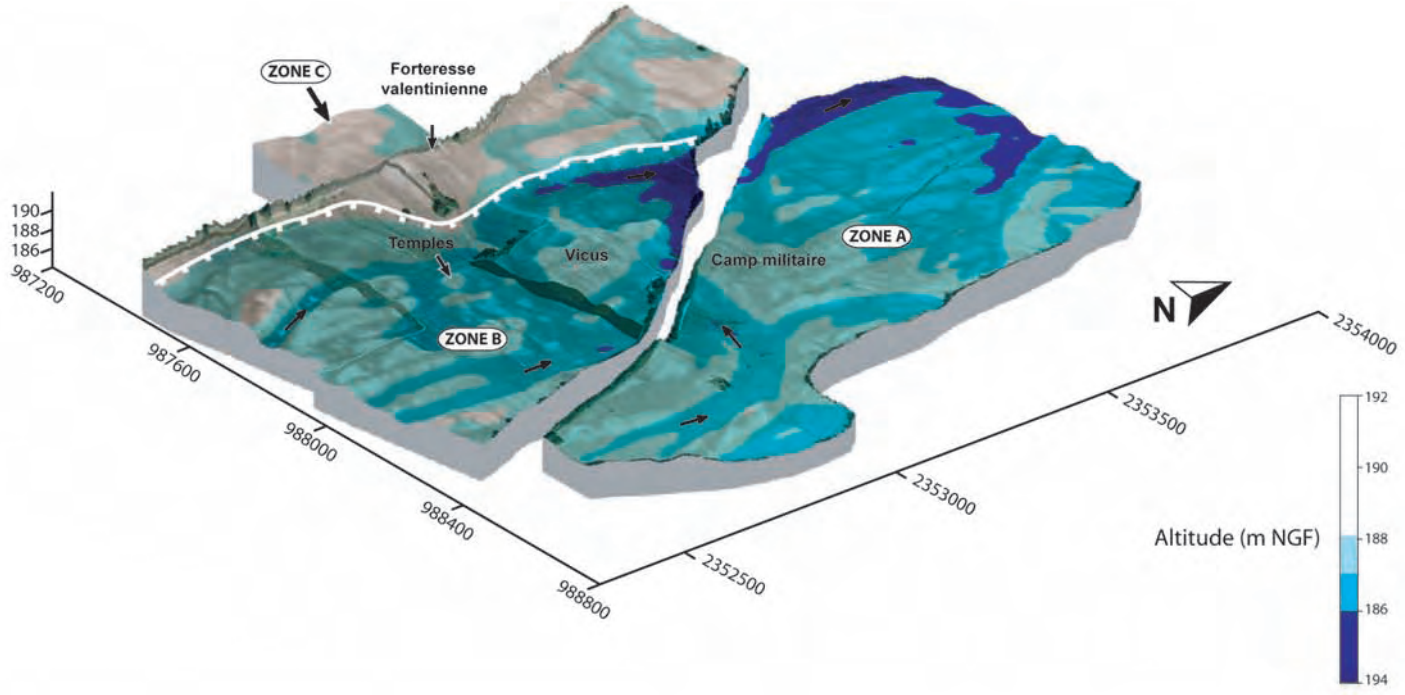


Figure 3.12 : Modèle numérique de terrain du site d'Oedenburg montrant les diffèrents niveaux d'inondation remarquables possibles.

Lorsque le niveau atteint de 186 à moins de 187 m, une importante partie de la plaine alluviale actuelle est submergée, cependant l'eau reste essentiellement dans les paléochenaux. Les îles et barres sur lesquelles s'installent le camp militaire du 1er siècle, la zone des temples ou encore la majeure partie du vicus ne sont pas inondés.

Lorsque le niveau atteint de 187 à moins de 188 m, l'ensemble de la plaine est submergée sauf quelques îlots préservés.

La terrasse reste dans son ensemble peu soumise aux inondations dont la côte n'excède pas 188 m.

➢ *La zone géomorphologique C*

Dans la zone géomorphologique C, on trouve des altitudes parmi les plus élevées de notre secteur d'étude. Certains secteurs atteignent des cotes supérieures à 190 m, mais dans d'autres zones il est possible de retrouver la trace des paléochenaux attribuables au weichsélien déjà observés en photographies aériennes. On constate aussi que le rebord de la terrasse est très abrupt, comme cela avait été estimé d'après les photographies aériennes.

Figure 3..13 : Cartographie magnétique en cours d'acquisition par l'équipe Posselt et Zickgraff dans la Zone B au cours de l'année 2004.

2.3. LA VILLE ANTIQUE ET SON OCCUPATION DANS LE PAYSAGE ALLUVIAL

2.3.1. Les apports de la prospection magnétique à l'établissement du plan diachronique de la ville antique

2.3.1.1. Introduction

Dès le début de l'étude menée sur Oedenburg, il a été nécessaire d'orienter le mieux possible les recherches, de définir des priorités et des secteurs de fouille pouvant potentiellement répondre aux questions posées. Les nombreuses structures déjà observées en photographie aérienne ont permis de nous centrer sur des zones clefs telles que les camps militaires à l'Est ou le palais forteresse positionné sur la terrasse, mais la mise en évidence d'un paysage alluvial complexe laisse supposer qu'il a fortement influencé l'occupation antique à Oedenburg. Une cartographie géomagnétique a donc été réalisée par l'entreprise allemande Posselt und Zickgraf GmbH, sur une étendue assez large pour que le site puisse être considéré comme bien contraint spatialement (Figure 3.13).

La méthode géomagnétique est depuis plus d'une vingtaine d'années très utilisée en archéologie en raison notamment de la rapidité d'acquisition des résultats et de la bonne sensibilité des appareils de mesure (Aitken, 1961 ; Scollar et al., 1990 ; Seren et al., 2004). C'est de loin l'approche géophysique la plus développée en archéologie en raison de son coût nettement inférieur à celui d'une prospection électrique de type pôle-pôle.

Le principe de la prospection géomagnétique est fondé sur la mesure des variations locales du champ magnétique. Le matériel utilisé pour la cartographie est composé de deux types de capteurs. Les premiers en position haute mesurent le champ magnétique terrestre et les seconds en position basse mesurent le champ total composé du champ magnétique terrestre auquel s'ajoute le champ rémanent dû aux anomalies de terrains dont l'origine est à la fois archéologique et environnementale (Aitken, 1961 ; Scollar et al., 1990).

Pour le site d'Oedenburg, le choix de la méthode magnétique a été conditionné par plusieurs paramètres qu'il convient de préciser. L'objectif majeur est la détection de l'habitat et du réseau viaire. Nous savons - par les nombreux blocs de basaltes du Kaiserstuhl retrouvés en prospection ainsi que par les fouilles - qu'une partie importante de l'habitat était construit dans ce matériau qui présente des propriétés magnétiques dans un environnement de la plaine alluviale essentiellement composé de galets et graviers rhénans non ferromagnétiques. Le contraste pouvant être observé est donc important. De plus, la méthode n'est pas affectée par le taux d'humidité ou la hauteur de la nappe. La prospection géomagnétique du site d'Oedenburg a été effectuée sur une cinquantaine d'hectares (Figure 3.14).

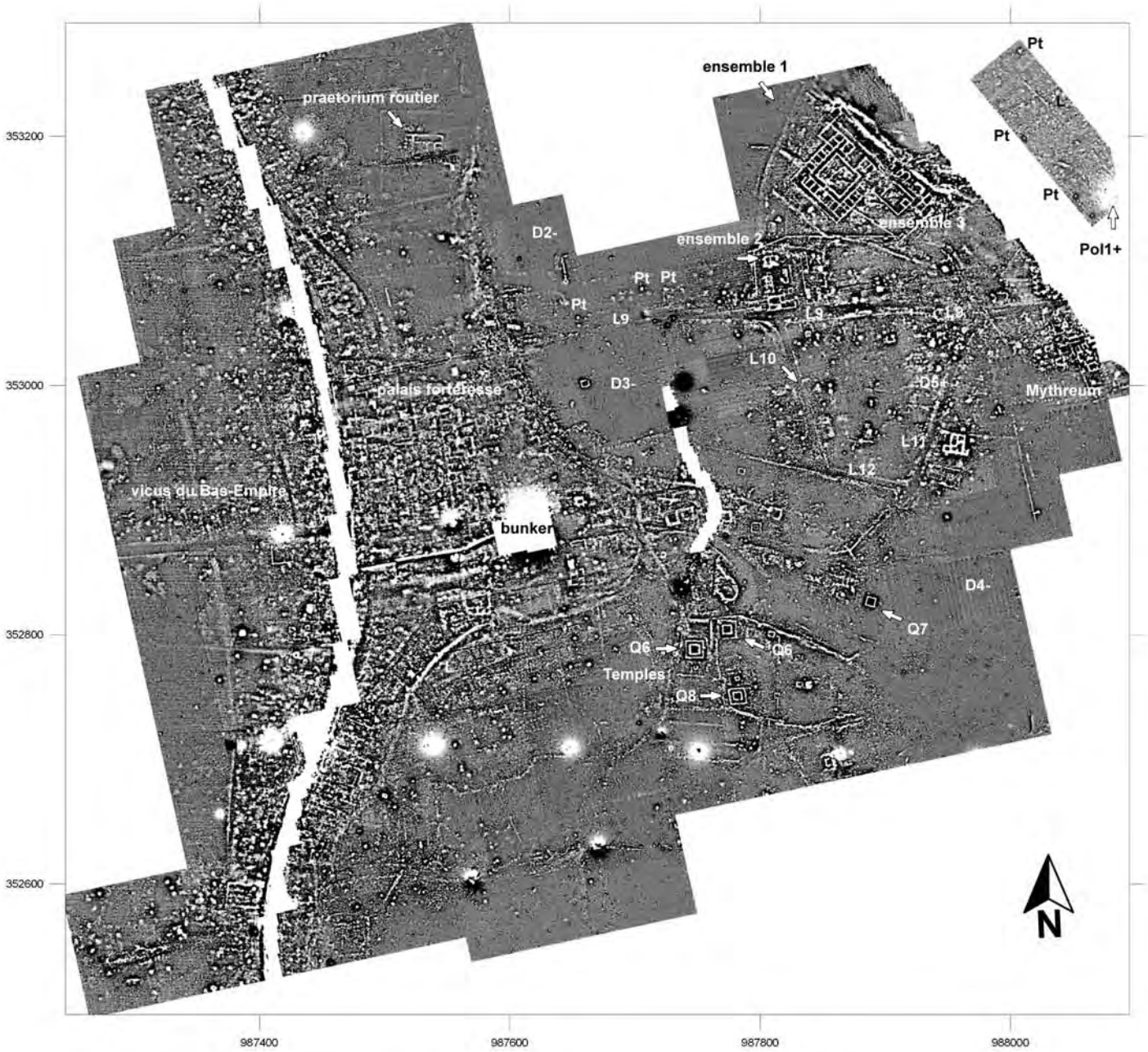


Figure 3.14 : Carte géomagnétique du site d'Oedenburg réalisé par Posselt et Zickgraff.
Le réseau viaire non orthonormé (L) structure l'agglomération composée de différents quartiers insulaires.
A l'Est, la zone sur lesquels s'installent les camps militaires présente de nombreuses anomalies positives ponctuelles (Pt) qui s'organisent autour de structures linéaires (L) plus ou moins magnétiques.
Vers le Sud-Ouest, au bord du canal actuel, plusieurs ensembles s'individualisent comprenant du Nord au Sud, les ensembles 1, 2, 3 ainsi que le Mythraeum.
Vers le Sud dans la plaine alluviale, d'autres aggrégats sont observés comme la zone des temples.
Enfin, vers l'Ouest, le nombre d'anomalies observées augmente et il est possible de distinguer d'importantes voies (anomalies linéaires) longeant le rebord de la terrasse et se connectent entre elles au milieu de la zone située à proximité du bunker, là ou se dressait le palais forteresse au 4ème siècle. L'organisation du vicus est, sur la terrasse, essentiellement composé de petits batiments quadrangulaires disposés de façon assez linéaire comme un village-rue.

2.3.1.2. Observations et interprétations

A partir du paysage et des zones d'occupations connues par les fouilles, les prospections pédestres, les photographies aériennes et la cartographie géomagnétique, nous pouvons connaître l'organisation spatiale du site. Ainsi, au sein des zones géomorphologiques précédemment décrites, il est possible de mieux définir différents ensembles d'occupations reconnues par la prospection géophysique. Cependant, il est important de noter que le plan généré par cette méthode reste une représentation diachronique de l'occupation (Figures 3.14 et 3.15).
Pour faciliter la compréhension, des anomalies sont notées en fonction de leur magnétisme positif (+) ou négatif (-), de leur forme linéaire (L), quadrangulaire (Q), circulaire (C), ponctuelle (Pt) diffuse (D), et de leur nature, pollution par exemple (Pol).

- ***La zone géomorphologique A***

Dans la zone A, grande paléobarre composite/île graveleuse, il apparaît que la surface prospectée est peu contrastée, cette zone correspond à une anomalie positive diffuse de faible intensité (notée D1+). Par endroits, des anomalies linéaires plus magnétiques sont repérées. Les anomalies linéaires positives L1+ et L2+ sont orientées respectivement NNO-SSE et NO-SE. Elles sont bordées par des anomalies négatives. L'anomalie L1+ se connecte avec une autre anomalie linéaire, L3+ orientée ENE-OSO et qui s'interrompt à mi distance de L1+ et L2+. Ces anomalies correspondent à un réseau viaire avec fossé ou caniveau traversant l'ensemble militaire julio-claudien.
A l'extrême Sud de cette zone, l'anomalie très positive Pol1+ est un pylône actuel entraînant une pollution dans l'acquisition des données. De la même façon l'alignement d'anomalies ponctuelles (Pol2+, Pol3+, Pol4+) très contrastées observé à l'Ouest, est causé par des bornes d'arrosage métalliques. Au sein de cette surface, d'autres anomalies ponctuelles et peu contrastées se répartissent sur l'ensemble de la surface et peuvent correspondre à des fosses (Pt1, Pt2, Pt3, Pt4...).
Dans la partie Nord de la zone, des lignes claires, faiblement magnétiques, sub-parallèles et peu contrastées d'orientation ENE-OSO sont repérées. Elles correspondent à des structures dont la largeur moyenne est d'environ 3 m (L4+ et L5+). La structure L4+ s'étend de part et d'autre de l'anomalie L1+ jusqu'au canal d'alimentation moderne, tandis que la structure L5+ n'est présente qu'au Nord de celle-ci. Ces structures sont donc probablement liées génétiquement. En effet, elles correspondent aux fossés comblés des camps connus par les photographies aériennes et récemment fouillés.

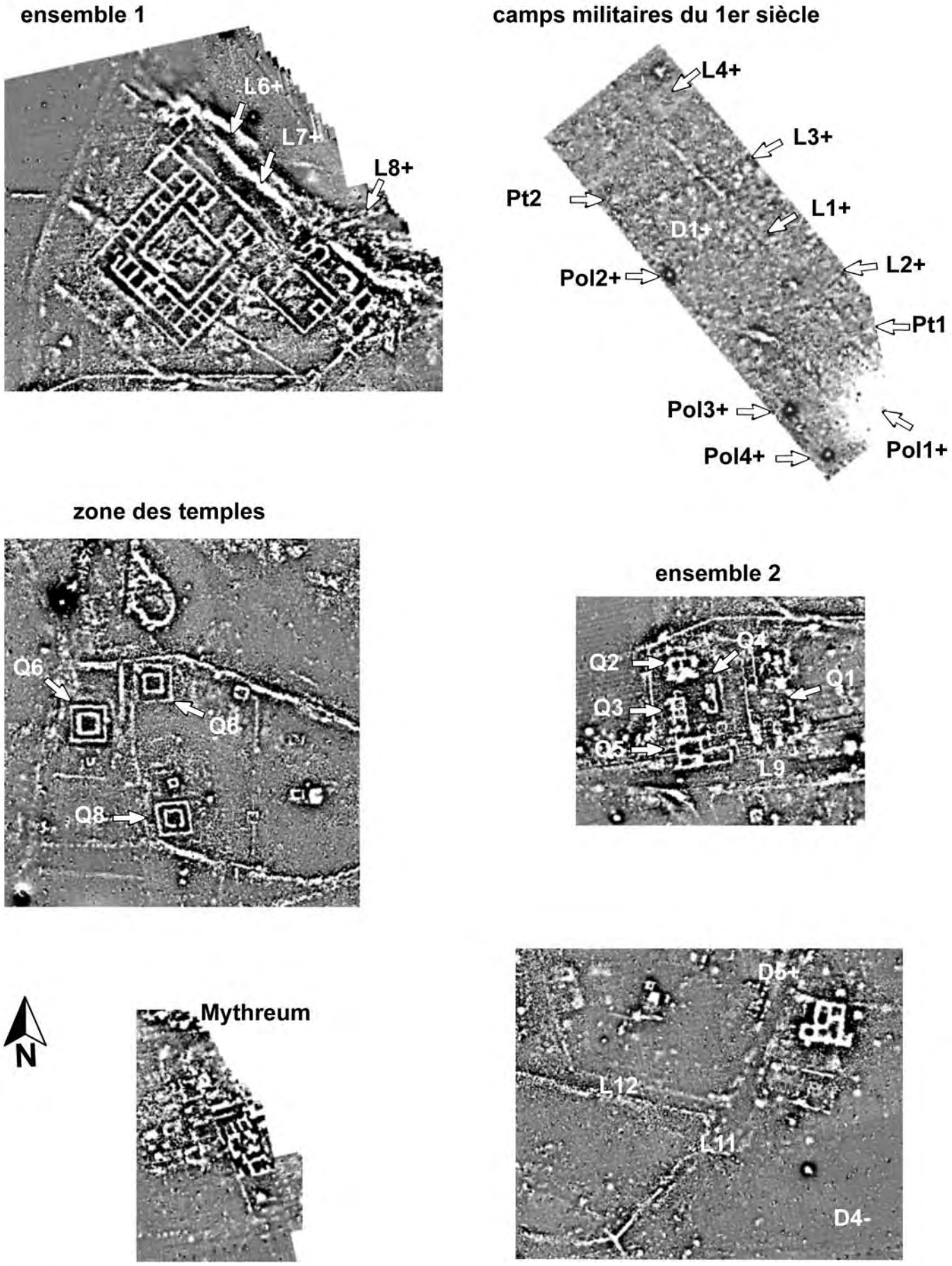


Figure 3.15 : Détails de la carte géomagnétique réalisée sur le site d'Oedenburg.

➢ *La zone géomorphologique B*

Dans la zone B, large mosaïque composée de paléochenaux et de paléobarres/îles, on peut distinguer plusieurs ensembles. Dans ce secteur, les anomalies magnétiques sont très contrastées. Cette zone est composée de paléobarres/îles graveleuses plutôt sèches ainsi que de paléochenaux plutôt humides dont le remplissage est composé de particules fines. La signature magnétique des paléochenaux (D2-, D3-, D4-) est plus faible que celle des zones graveleuses (D5+).

D'autres anomalies plus élevées du champ magnétique se surimposent à ce signal de fond. Dans la partie septentrionale de la grande paléobarre/île repérée précédemment, un ensemble complexe de structures est repéré. Plusieurs types d'anomalies sont individualisables en fonction de leur forme et de leur intensité.

A l'Est, courant parallèlement au canal d'alimentation moderne, deux grandes anomalies linéaires L6+ et L7+, très magnétiques, sont observées ; elles sont continues sur plus d'une cinquantaine de mètres et interrompues au niveau d'une autre anomalie linéaire d'orientation ESE-ONO notée L8+. Ces linéaments L6+ et L7+ séparent la zone graveleuse d'un segment reconnu précédemment comme la rive droite du large paléochenal oriental. On peut proposer pour L8+ qu'il s'agit d'une voie joignant cette paléobarre /île à la zone A où s'installent les camps militaires romains. Les anomalies L6+ et L7+ sont interprétables comme des structures à relier au paléochenal observé, soit des aménagements de berge ou bien encore des chemins de halage.

Parallèlement à L6+ et L7+, un premier grand ensemble est mis en évidence sur le plan géomagnétique.

L'ensemble 1 fait face aux camps et est composé de plusieurs structures de forme carrée associées entre elles. Ces structures sont fortement magnétiques et de tailles comprises entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres de côté. Cette forte anomalie est probablement due à la présence de blocs de basalte du Kaiserstuhl ou des briques pour sa construction. Cet ensemble immobilier se définit principalement comme un carré d'environ 50 m de coté orienté de 45°. Au centre, on trouve un carré plus petit de dimension 20 par 20 m autour duquel il y a une ceinture de petits carrés jointifs de dimension assez constante 7 par 7 m. Cet ensemble peut être interprété (Reddé et al., 2005) comme un bâtiment centré sur une vaste cour intérieure bordée d'un quadriportique qui donne accès à diverses pièces. L'entrée principale, au Nord-Est, semble précédée par une grande halle. Les propositions actuelles concernant son interprétation tendent à l'attribuer à une *mansio*.

Ce type de bâtiment reste relativement mal connu et rare. Plusieurs comparables ont été décrits à Chelmsford, Silchester et Lydney Park, chaque fois interprétés comme des *mansiones*. Sa position par rapport à la porte occidentale du camp et son architecture sont proches du type rencontré à Nida-Heddernheim interprété comme un *praetorium* servant d'auberge relais.

A la proximité méridionale de ce bâtiment, plusieurs anomalies linéaires orientées NO-SE, E-O pouvant être interprétées comme des chemins rejoignent l'ensemble 2. De dimension plus réduite, il est composé de cinq anomalies très magnétiques liées aussi à la présence de basalte ou de briques ainsi que de tuiles comme matériau de construction. La présence de structures de chauffe est également très marquée dans cet espace. La plus grande structure observée Q1 (30 par 20 m) est située le plus à l'Est et est orientée Nord-Sud. Les autres constructions sont de taille plus réduite, et présentent une variabilité de forme importante. Le plus au Nord, Q2, semble composé de deux salles carrées de taille plurimétriques. Plus au Sud, on trouve deux bâtiments plus petits se faisant face, Q3 et Q4, de dimension 15 par 5 m et composés de trois loges carrées pour le plus à l'Ouest et de deux loges rectangulaires égales pour le second.

Au Sud, le bâtiment Q5, d'une vingtaine de mètres de longueur sur une quinzaine de mètres de large et orienté E-O est composé de quatre salles rectangulaires de dimension presque identique. Cet espace composé de plusieurs bâtiments semble entouré d'une enceinte. Il est interprété comme un ensemble thermal avec ses hypocaustes et ses bassins (Reddé et al., 2005). Cette même interprétation peut être appliquée à l'ensemble 3, situé à proximité de l'ensemble 1 et qui paraît aussi être composé d'une cour au Sud-Ouest avec absides au Nord-Est. La présence des ensembles thermaux 2 et 3 à proximité de l'ensemble 1, permet de conforter l'interprétation de celui-ci comme une *mansio*.

Au Sud de l'ensemble 2, et le longeant sur toute sa longueur, une large anomalie linéaire (environ 10 m) (L9) est observée. Elle est orientée Est-Ouest et forme un « T » avec une autre anomalie linéaire un peu plus étroite (L10) orientée Nord-Sud, au niveau du bâtiment. Cette anomalie est interprétable comme une partie du réseau viaire majeur du site. On peut voir que la voie L9 relie la terrasse à la plaine alluviale au moins jusqu'au canal moderne. Les sondages effectués sur cette chaussée montrent que l'installation n'est pas antérieure à l'extrême fin du 1er siècle de notre ère. On peut noter le grand nombre d'anomalies ponctuelles (Pt) le long de cet axe sur au moins une dizaine de mètre correspondant à des fosses comblées par des matériaux du type tuiles, métal, résidus de forges ou encore des structures de chauffe (foyers), puisards maçonnés ou encore peut-être pour certains des objets métalliques isolés enfouis.

Vers l'Est, à proximité du canal, un vaste ensemble apparaît comme étant fortement magnétique. Il a fait l'objet de fouilles au cours des dernières années. Plusieurs bâtiments sont observés et se situent dans le quartier environnant le *Mithraeum*, temple du 4ème siècle, qui été fouillé en partie dans les années 1970 par E. Kern et plus récemment en 2002 (Pétry et Kern, 1978 ; Reddé et al., 2005). Ce secteur est composé de nombreuses structures ponctuelles (Pt).

Cette zone est donc composée de grands ensembles pouvant correspondre à des bâtiments publics. Une partie de ceux-ci a été fouillée au cours des dernières années et permettent une interprétation fiable du plan géomagnétique.

A l'Ouest de l'ensemble 4, on note la présence de nombreuses anomalies linéaires. La première, L11 présente une orientation NNE-SSO, reliée à la structure L9, rejoint la structure L12 puis se poursuit encore vers la partie Sud de la zone B. Cette voie L11 a fait l'objet de fouilles qui permettent d'affirmer qu'elle date du deuxième quart du 1er siècle après J.-C.
La structure L12, quant à elle, est de direction sensiblement E-O et est connectée à L10 une cinquantaine de mètres après son début.
Dans la partie Sud de la zone B, et au bout de la voie L11, on peut distinguer sur le plan géomagnétique la présence de plusieurs structures quadrangulaires (Q6…) situées au sein d'une zone d'anomalie magnétique positive diffuse. Cette zone est située au sein d'une mosaïque de paléochenaux et de paléobarres/îles reconnue par l'analyse à la fois des photographies aériennes et de la microtopographie. En Europe, ces structures quadrangulaires doubles imbriqués sont caractéristiques de temples datant de l'époque romaine composés d'une chambre centrale *cella* autour de laquelle tourne un couloir pouvant être couvert nommé déambulatoire. La zone située au Sud, un peu à l'écart du reste du site constitue donc un quartier à vocation religieuse. Les fouilles menées par l'équipe de l'Université de Bâle ont confirmé cette hypothèse.

➢ *La zone géomorphologique C*

En Zone C, plusieurs anomalies sont observées. Au Nord, une éminence (lieu-dit Westergass) est occupée par un bâtiment quadrangulaire comprenant plusieurs pièces visibles, où les fouilles de l'Université de Fribourg-en-Brisgau ont mis au jour un *praetorium* routier, datable de l'époque constantinienne tardive. Ce bâtiment de 30 par 20 m environ est entouré par une anomalie quadrangulaire peu magnétique interprétable comme un enclos.
Plus au Sud, sur une avancée de la terrasse (lieu-dit Altkirch), il est possible de distinguer l'emplacement d'un bunker ainsi que de nombreuses anomalies ponctuelles très positives. Les fouilles menée par de l'Université de Fribourg-en-Brisgau ont montré que s'y était installé un palais forteresse datant de l'époque de Valentinien auquel ont succédé plusieurs églises. Les sondages profonds ont montré une occupation qui remonte au tout début de l'époque julio-claudienne. Sur la partie la plus haute de la terrasse, l'agglomération s'étire en longueur, avec des parcelles en lanière perpendiculaires aux axes de circulation repérés. Aucune fouille n'a été effectuée dans cette zone, mais les prospections de surface, ont montré une occupation continue depuis le 1er siècle après J.-C. jusqu'au début du 5ème siècle. Vers l'Ouest, la densité des bâtiments, avec une forte anomalie magnétique, disparaît rapidement. On observe toutefois la présence de plusieurs voies dont une orientée Est-Ouest conduisant vers le site romain de Horbourg à proximité de Colmar. Plus à l'Ouest a été reconnue une nécropole du Bas-Empire (Biellmann, 2001).

Une grande voie Nord-Sud marque une des limites de l'agglomération, à une centaine de mètres à l'Ouest de la route moderne.

2.3.1.3. Conclusion

Le site antique était donc parcouru par d'assez nombreux chenaux et comprenait des zones basses inoccupées. Cette topographie complexe explique l'existence de quartiers d'occupation insulaires séparés les uns des autres ainsi qu'une organisation de la voirie non orthonormée. Les fouilles montrent que le système viaire n'est pas chronologiquement homogène et qu'il s'est constitué de manière progressive. Les principales limites spatiales de cette agglomération secondaire sont définies, même si des prospections géophysiques sont encore nécessaires.

2.3.2. Distribution spatiale du mobilier : le cas des monnaies romaines

2.3.2.1. Avant propos et résumé

Dans l'objectif de préciser la dynamique d'occupation sur le site d'Oedenburg ainsi que le probable impact alluvial sur celle-ci, une approche pluridisciplinaire a été engagée. Cette approche intègre tous les résultats obtenus par l'approche géomorphologique développée plus avant ainsi qu'une partie importante des résultats des prospections pédestres menées depuis plus d'une vingtaine d'années sur le site. Cela a fait l'objet d'un article dans la revue *Journal of Archaeological Science*.

Cet article présente des résultats inédits et originaux du programme pluridisciplinaire franco germano suisse Oedenburg. Un ensemble de données de plusieurs milliers d'éléments mobiliers romains trouvés lors des prospections depuis plus d'une vingtaine d'années, dont plus de la moitié est constituée de monnaies, a été utilisé en complément des résultats d'analyses géomorphologiques, prospections géomagnétiques et de fouilles archéologiques afin de reconstruire l'évolution de l'occupation, à la fois sur la terrasse et dans la plaine alluviale.

La bonne concordance entre les structures repérées grâce à la cartographie magnétique et la répartition du mobilier archéologique permet de considérer cette dernière comme un bon indicateur de l'occupation du site (Figure 3.16) et donc de son évolution au cours du temps.

Ainsi sur la base de l'enregistrement archéologique et alluvial, cet article présente la première analyse spatiale du mobilier du site d'Oedenburg en relation avec l'évolution du Rhin au cours des quatre premiers siècles de notre ère.

Cette analyse de la distribution des monnaies sur le site romain d'Oedenburg a permis d'établir une charte monétaire globale à l'échelle du site mettant en évidence quatre phases majeures d'occupation.

Notre étude discute du lien possible entre les facteurs historiques et les événements alluviaux et l'évolution interne du site. Ainsi, tandis que les changements observés au cours des Phases I (jusqu'à 68 après J.-C.), II (de 69 à 180 après J.-C.) et III (de 180 à 295 après J.-C.) apparaissent plutôt comme ayant une relation avec des événements historiques et sociaux, la Phase IV (de 295 à 402 après J.-C), quant à elle, montre des tendances d'abandon de la partie la plus basse de l'agglomération pouvant être liées à une période d'humidité particulièrement importante au cours du 4ème siècle de notre ère (Figure 3.17).

Ces résultats sont placés dans un contexte plus large allant du bassin-versant du Rhin jusqu'aux Alpes et sont en accord avec les conditions d'humidité documentées ailleurs, notamment par des enregistrements alluviaux, lacustres, géomorphologiques et palynologiques en Allemagne (Rivière Lahn, Lac de Constance, Lac de Nussbaumen, les alentours du massif volcanique du Kaiserstuhl et le massif de la Forêt Noire).

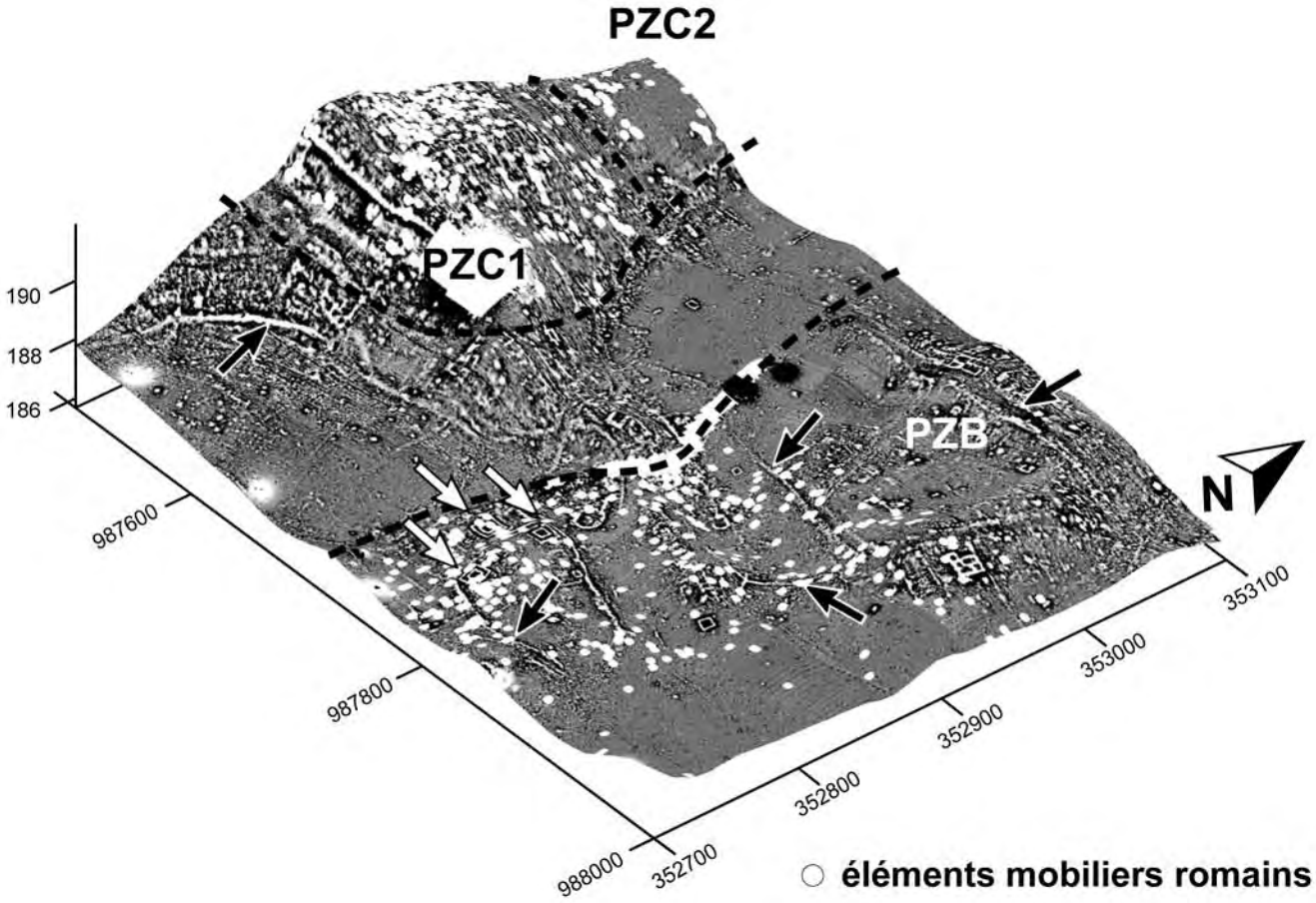


Figure 3.16 : Modèle numérique de terrain en trois dimensions sur lequel sont projetés la carte géomagnétique ainsi que les éléments mobiliers trouvés lors des prospections pédestres.

La répartition spatiale des objets, de toute nature, datant de l'époque romaine, est cohérente avec l'organisation des batiments et des voies détectés par la prospection magnétique. Celà demontre la fiabilité des prospections pédestres pour l'étude de l'évolution de l'occupation sur le site d'Oedenburg. De plus, l'organisation spatiale des structures semble contrainte par la topographie, ce qui atteste de la possibilité d'utiliser le modèle numérique de terrain actuel comme un équivalent du paysage alluvial de l'époque antique. Les flèches noires indiquent les voies principales répèrées tandis que les flèches blanches indiques les temples principaux.

Cela reflète le grand potentiel des études qui intègrent la topographie avec la distribution spatiale de mobiliers à haute contrainte temporelle, comme les monnaies romaines, notamment sur un site comme Oedenburg dont la durée de vie est relativement importante. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour la détection des événements rapides et discrets, comme la période de remontée de nappe phréatique affectant seulement les parties les plus basses d’un site archéologique.

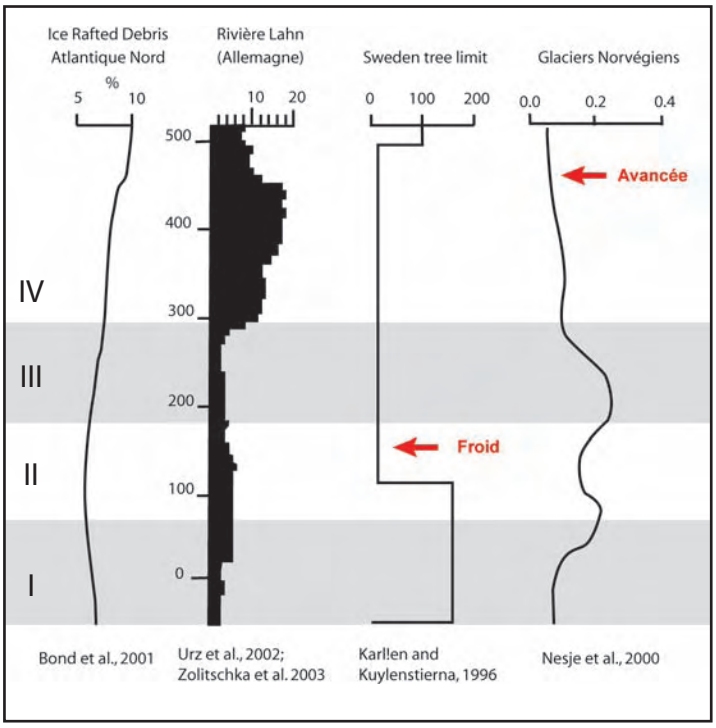


Figure 3.17 : Evolution de quelques indicateurs climatiques au cours de la période d'étude.

La période correspondant à la Phase monétaire IV coïncide avec des dégradations climatiques globales à l'échelle de l'hémisphère nord.

2.3.2.2 Roman Rhine settlement dynamics evidenced by coin distribution in a fluvial environment (Oedenburg, Upper Rhine, France)

ELSEVIER

Journal of Archaeological Science xx (2007) 1–12

Journal of Archaeological SCIENCE

http://www.elsevier.com/locate/jas

Roman Rhine settlement dynamics evidenced by coin distribution in a fluvial environment (Oedenburg, Upper Rhine, France)

Vincent Ollive [a,b,*], Christophe Petit [a,c], Jean-Pierre Garcia [a,b,c], Michel Reddé [d], Patrick Biellmann [e], Laurent Popovitch [c,f], Carmela Chateau-Smith [a]

[a] *Université de Bourgogne, UFR Sciences de la Terre, 6 Bd Gabriel, F-21000 Dijon, France*
[b] *UMR UB-CNRS 5561 'Biogéosciences', France*
[c] *UMR UB-CNRS-Culture 5594 'ARTeHIS Archéologie, Terre, Histoire, Sociétés', France*
[d] *Ecole Pratique des Hautes Etudes (IVe section), 45 rue des Ecoles, F-75005 Paris, France*
[e] *32 rue de la Krutenau, F-68180 Horbourg-Wihr, France*
[f] *Université de Bourgogne, UFR Sciences Humaines, 2 Bd Gabriel, F-21000 Dijon, France*

Received 19 January 2007; received in revised form 13 April 2007; accepted 11 May 2007

Abstract

On the basis of archaeological and alluvial records, this paper presents the first spatial analysis of artefacts in relation to the evolution of the Rhine River, at the Gallo-Roman site of Oedenburg, during the first four centuries AD. The dataset consisted of several thousand Roman artefacts found by pedestrian prospecting over the last twenty years, over half of which were coins. This dataset was used together with high-resolution topography and geomagnetic mapping, to reconstruct settlement evolution, both on the terrace and in the floodplain. A comprehensive monetary chart has been compiled for the Oedenburg site, which highlights four major phases of settlement. These results provide a possible causal link connecting historical factors and alluvial events with intra-site evolution. Therefore, while changes observed during Phases I (until AD 68), II (AD 69 to AD 180) and III (AD 180 to AD 295) seem largely related to historical and societal events, Phase IV (AD 295 to AD 402) shows patterns of abandonment of the lower part of the floodplain that may well be related to an unusually humid period in the fourth century. These results are set in a broader context, from the Rhine catchment area to the Alps, and are in agreement with the wet conditions also documented in alluvial, lacustrine, geomorphological and palynological records in Germany (Lahn River, Lake Constance, Lake Nussbaumen, Kaisersthul area and the Black Forest). Studying the intra-site spatial distribution of artefacts with high temporal constraints, at a long-lived site with contrasted topography, opens new avenues for the detection of discreet events such as a higher water table, affecting only the lower zone.
© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Climate change; Coin distribution; Fluvial impact; Geoarchaeology; Rhine River; Roman Period

1. Introduction

1.1. Objectives

The present geoarchaeological study focuses on the evolution of a settlement in relation to alluvial landscape constraints at the Oedenburg Gallo-Roman site, in the Southern Upper Rhine floodplain (Biesheim-Kunheim, France). Coin distribution in space and time was chosen as an indicator of site occupation density and chronospatial occupation relative to river palaeo-channels and Roman structures. By such means, it is possible (1) to highlight the main phases of settlement evolution comprehensively for Oedenburg during the first four centuries AD, (2) to examine whether a relationship exists between settlement processes and alluvial dynamics and (3) to understand the impact on the site of both historical and societal events (e.g. migration, changes in site function, and modification of urban district networks).

* Corresponding author at: Université de Bourgogne, UFR Sciences de la Terre, 6 Bd Gabriel, F-21000 Dijon, France.
E-mail address: vincent.ollive@u-bourgogne.fr (V. Ollive).

0305-4403/$ - see front matter © 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.
doi:10.1016/j.jas.2007.05.015

1.2. Interest of pedestrian prospecting

In archaeological research, the first evidence generally comes from artefacts found at the surface, or structures detected by technical means (e.g. aerial photography; Riley, 1946). Even if a site is partially excavated, the archaeologist's interpretation still relies on that first dataset, which provides not only spatial information and function but also chronology. Many authors have demonstrated the interest of studying spatially distributed artefacts, collected by pedestrian prospecting and from excavation, for improved understanding of archaeological sites (e.g. Ferdière et al., 2006; Gowlett, 1997; Leroy-gourhan and Brézillon, 1966; Stapert and Street, 1997). With the help of the exceptional dataset prospected by the same team over the last twenty years and detailed analysis of the environmental setting, this purpose may be achieved, thus providing an overview of the chronology of Oedenburg. When precisely located and accurately dated, this prospected artefact dataset allows us to describe the spatial evolution of the settlement. This enhanced dataset completes the excavation results obtained since 1998 and provides chronological information for structures known only by magnetic mapping and aerial photography (Nuber et al., 2002; Reddé et al., 2005).

2. The Oedenburg Gallo-Roman site

The geographical location corresponds to the position of the Rhine Roman Frontier in the first century AD, and again during the fourth century AD (Fig. 1). The Oedenburg site presents all the characteristics of a military settlement, a civilian settlement and a religious complex (Nuber et al., 2002; Reddé et al., 2005) and covers a spatial extension of about 2 km^2 in a complex alluvial landscape. A general view of the Oedenburg site is revealed by excavation, microtopographical survey and geophysical prospecting (Fig. 2). Three distinct zones are observed in this landscape where the elevation is between 185 and 192 m above sea level (ASL).

To the east, Zone A corresponds to the top of a large, gravelly palaeo-island around 188 m ASL (Fig. 3). Many anomalies are identified and understood as northward-oriented, narrow intra-bar palaeo-channels. They are related and

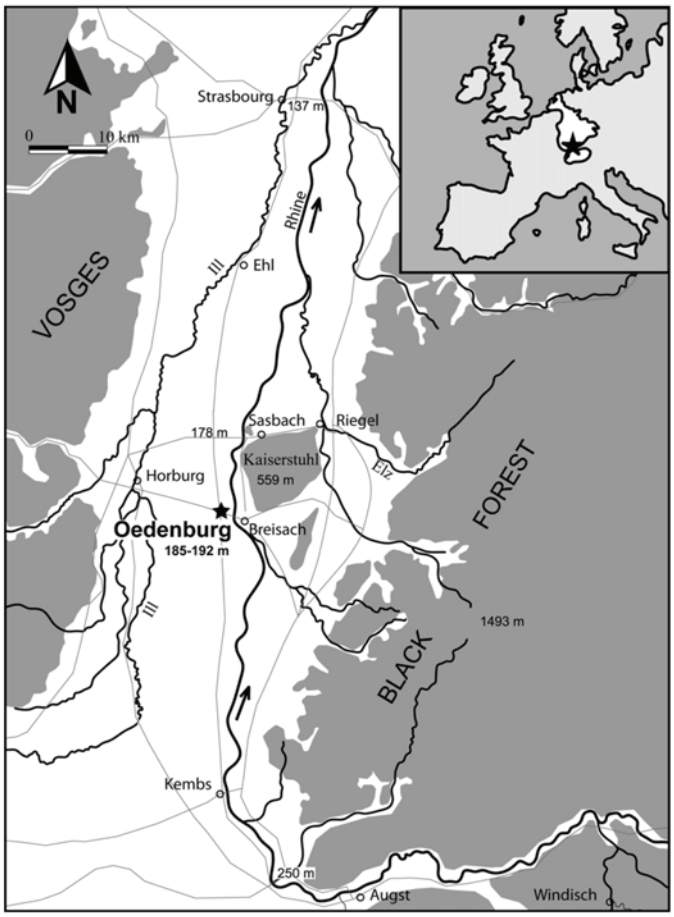


Fig. 1. Location map of the Oedenburg Gallo-Roman site within the Rhine River catchment.

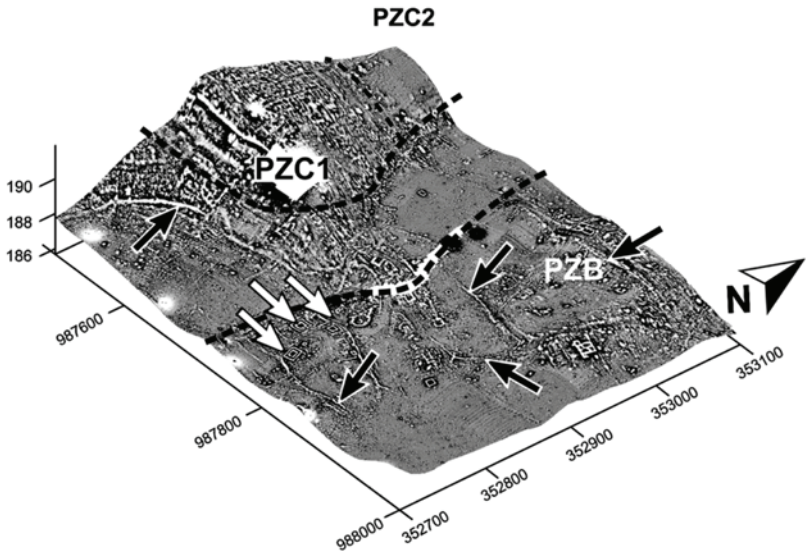


Fig. 2. Three dimensional view of the digital elevation model of the Oedenburg site overlain by artefact finds and geomagnetic map. In that complex alluvial landscape Roman artefacts are mainly located near Roman roads (black arrows), religious complex (temples, white arrows) and terrace, but absent in palaeo-channels where no urban network is observed by magnetic survey. Spatial coordinates are Lambert II extended (Geographic French System). Vertical exaggeration: ×20.

synchronous to the island formation attributed either to the Late Glacial Period or the Holocene. On the south-western border of this palaeo-island, a Julio-Claudian military camp was established during the first half of the first century AD (Prospected Zone A). Excavation results indicate that it was set up on this gravelly island in the reign of Tiberius (AD 14–37). Its spatial extension is about 35,000 m^2. This military settlement is attested up to AD 69–70, when the frontier moved beyond the Black Forest. Excavations show that archaeological deposit thickness is about 0.3 m, partially affected by ploughing, and well preserved in excavated structures (e.g. ditches).

Zone B is composed of a mosaic of palaeo-channels and palaeo-islands of various sizes. The mean elevation is about 186 m ASL. To the east, a broad palaeo-channel shows a sinuous meandering pattern bounding Zone A. From excavation, electrical resistivity tomography (ERT) and coring, it is known to have been active and uninhabited during the Roman Period. Superimposed on this palaeo-channel is a modern canal built during the 19th century. Another broad palaeo-channel is observed to the west running along the Weichselian terrace border (Zone C). A geoarchaeological cross-section attests that this palaeo-channel was active and uninhabited during Antiquity. In the northern part of the area, these two broad palaeo-channels present a confluence. Immediately south of this junction, lies a broad, uneven, relatively high, diamond-shaped palaeo-island, about 100 m wide, where the major part of the 1st to 3rd century AD civilian settlement is documented (Prospected Zone B). Excavation results have shown the contribution of both anthropogenic and flood deposits to the palaeo-channel infill, reaching 1 m thick in places. In the southern part of the area, many northward-oriented, narrow, braided palaeo-channels are observed. They are separated by small, longitudinal palaeo-bars. Settlement processes in this part of the floodplain began in the very first years of the first century AD, and continued until the third century AD. The first evidence of human occupation is provided by wood structures dated dendrochronologically to AD 3–4, located in the vicinity of a religious complex which developed from the first century AD onwards. Excavation attests that some structures in the temple area developed at the edge of minor, generally unoccupied palaeo-channels. As the preceding layer is dated 1745 ± 30 years BP (Poz-15955) by archaeological excavations and geoarchaeological study, this entire low zone is shown to be affected by a 10-cm-thick, homogeneous, organic-rich silt layer denoting conditions of permanent high water table in the floodplain after this date.

To the west, Zone C rises to more than 190 m ASL. It corresponds to the Weichselian terrace and dominates the alluvial floodplain. In this part of the study area, the Gallo-Roman civilian settlement and necropolis are known from the first to the fourth century AD (Prospected Zones C1, C2 and C3). In Prospected Zone C1 (PZC1), a fortified palace was raised from the fourth century AD, under the reign of Valentinian (AD 364–375). The 3-m-thick anthropogenic deposits contrast with other parts of this Zone (PZC2 and PZC3) where anthropogenic deposition does not exceed 0.5 m. The road joining Biesheim to Kunheim (D468) is situated along this elevated topographical anomaly. Topographical analysis of the Oedenburg Gallo-Roman site allows the identification of easily flooded areas situated in Zones A and B, while Zone C, the terrace, may be considered as an area with limited risk of exposure to Rhine floods.

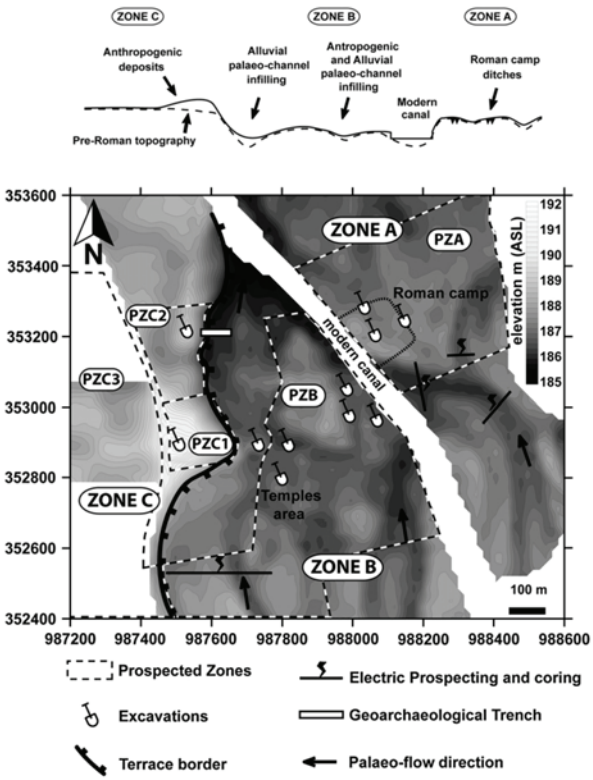


Fig. 3. Locations of prospected zones, excavated areas, geoarchaeological trench and ERT transects in relation to the alluvial landscape. The micro-topographical map allows the exact positioning of three major geomorphological zones in the alluvial landscape. The thickness of alluvial and anthropogenic deposits during Antiquity is indicated on the synthetic cross-section of the study area. Spatial coordinates are Lambert II extended (Geographic French System). Contour interval: 20 cm. Elevation from 185 to 192 m ASL.

3. The prospected dataset

Numerous pedestrian field surveys of the five prospected zones described below have been performed by the Hardt and Ried Historical Society, over the last twenty years, using metal detectors. Thousands of artefacts have been discovered and described: pottery, worked stones, coins, stamped tiles, gems, figures, silver ingots, etc. (Biellmann, 1987, 1988, 1996, 1997, 2000, 2001; Maurer, 1993; Nuber et al., 2002; Reddé et al., 2005). About 30% of the time spent on field surveys is still dedicated to the precise plotting of finds on the cadastral plan. It should be noted that few archaeological sites have been prospected as intensively and methodically as the Oedenburg site. As the entire site is on agricultural land used for the cultivation of maize, conditions for prospecting are particularly advantageous in the spring, when the fields are free of vegetation and the soil is levelled ready for planting. Such accessibility ensures the value of the dataset in representing site occupation. Observational bias is reduced by the stability of the team since its inception, and by the absence of any selection in the collection of prospected artefacts. All finds have been inventoried in the same careful way. The five prospected zones (PZ) extend over the whole alluvial plain and there is at least one PZ in each of the three geomorphological zones described above. To summarise, PZA (0.20 km^2) is situated on the island in the eastern part of the site, PZB (0.32 km^2) in the central part of the site, composed of a mosaic of several palaeo-islands and palaeo-channels, PZC1 (0.03 km^2) is the highest topographical zone in the area and constitutes an extension of the terrace into the floodplain, PZC2 (0.04 km^2) is the northern limit of the Roman site on the terrace and PZC3 (0.32 km^2) represents the inner terrace located in the western part of the site. Absolute coordinate attribution (French system, Lambert II extended) was obtained using Didger 2.0 digitising software on the cadastral maps. This information was combined with a detailed description of the characteristics and chronological parameters of each artefact in the dataset. Of the 6205 geo-referenced artefacts in our database, the 3546 Roman coins were dated by reign for our spatial analysis. Roman coins were used as chronological descriptors as they are abundant (57% of the dataset) and provide an efficient '*terminus post-quem*' at high temporal resolution. Coins were used in both civilian and military areas, and suffer less from post-depositional fragmentation and transport than ceramics. Prospecting for coins with metal detectors rather than by sight alone is less likely to be affected by climatic factors or by prospection bias, and is more successful, especially when mud covers artefacts after rainfall events. Dating of coins is precise as regards first date of issue, but it is difficult to estimate the length of the coin circulation period. Consequently, settlement phases can only be given an exact first possible date. Despite these limits, we are able to propose a first coin chronology for each prospected zone controlled by excavation results. The period of our study, from 199 BC to AD 402, corresponds to the twenty-one numismatic periods shown in Table 1, established by Reece (1972). This time-scale was defined on the basis of Roman history and global monetary fluctuation events linked to politics, markets and metal availability. It takes into account variations in coin emissions and attenuates any length-of-reign disparities. To give a higher detailed analysis we have divided period 1 into four sub-periods 1a (199–100 BC), 1b (100–27 BC), 1c (27 BC–AD 14) and 1d (AD 14–41). This time-scale was used to sort all the coins found on the site, i.e. the 3239 geo-referenced coins and also 307 coins located by prospected zone only. A comprehensive monetary chart for the Oedenburg site has been established, allowing the characterisation of the different phases of settlement. First, normalisation was performed to level out differences in the number of finds between each prospected zone. It consists in a classic conversion to percentage for each prospected zone. The simple total of these values refers to 'All prospected zones' in Fig. 5. Each coin population is weighted versus PZC1 to be equally representative and equivalent within the Oedenburg site. Thus, the contribution of each prospected zone during each period may be quantified. The simple total of these weighted values refers to 'Normalised monetary evolution' in Figs. 4 and 5. This

Table 1
Roman coins found in each prospected zone and sorted by period (after Reece, 1972)

Periods		All prospected zones	PZA	PZB	PZC1	PZC2	PZC3
199–100 BC	1a	9	5	1	0	0	3
100–27 BC	1b	243	213	8	1	4	17
27 BC–AD 14	1c	539	428	37	1	8	65
14–41	1d	140	88	13	1	1	37
41–54	2	75	55	3	0	1	16
54–68	3	34	18	7	2	1	6
69–96	4	89	19	31	2	0	37
96–117	5	60	6	16	0	1	37
117–138	6	59	6	16	3	0	34
138–161	7	82	7	18	12	6	39
161–180	8	79	4	22	5	6	42
130–193	9	15	1	2	2	1	9
193–222	10	29	1	4	4	1	19
222–238	11	19	1	3	2	1	12
238–260	12	38	2	12	2	1	21
260–275	13	23	0	10	2	0	11
275–296	14	9	0	4	1	0	4
296–317	15	27	8	5	1	2	11
317–330	16	99	8	18	7	13	53
330–348	17	245	11	13	16	46	159
348–364	18	32	4	3	4	5	16
364–378	I9	1332	21	12	28	142	1179
378–388	20	218	16	2	7	25	168
388–402	21	1	0	0	0	0	1
Total		3546	922	260	103	265	1996

In our study, period 1 has been divided into four sub-periods 1a, 1b, 1c and 1d.

allows the establishment of a comprehensive Oedenburg monetary time chart and the characterisation of the four different phases (Fig. 4). To complete this second step, the spatial distribution of Roman coins was studied to allow patterns to be detailed in relation to the landscape (Fig. 6). After sorting, the geo-referenced Roman coin dataset was used to produce several thematic distribution maps of the study area, with Surfer 8 Digital Elevation Modelling software, which were projected on to the digital elevation model (DEM). By associating geomagnetic mapping with the pedestrian prospecting dataset projected on to the DEM, the relationships between the Rhine River and Roman occupation may be better understood (Figs. 2 and 6). As shown in Figs. 2 and 6, Roman artefacts are not randomly distributed in the floodplain and the terrace but have been preferentially found in the vicinity of structures observed by geomagnetic mapping such as Roman roads and temples. This convergence in reliability between artefacts and urban district networks at the Oedenburg site makes possible the use of coin distribution to assess evolution of occupation through time in this complex alluvial landscape.

4. Results

4.1. The four main monetary phases

In order to limit bias, the total number of coins was normalised for the whole site, to show coin relative abundance. Four main monetary phases are thus distinguished (Fig. 4). Phase I extends from 27 BC to AD 68 and concerns coins issued during the reigns of Augustus (period 1c), Tiberius and Caligula (period 1d), Claudius (period 2), and up to the end of the reign of Nero (period 3). Republican coins (periods 1a and 1b) predate initial settlement of the site and are therefore considered to have been deposited during Phases I and II. Phase II extends from AD 69 to 180, from the reigns of Galba, Otho, Vitellius and the Flavians (period 4), to the Antonians up to the end of the reign of Marcus Aurelius (periods 5–8). Phase III extends from AD 180 to 295, from the reign of Commodus to the beginning of the Tetrarchy, in the reign of Diocletian (periods 9–14). Phase IV extends from AD 295 to 402, and concerns coins issued from the Tetrarchy to the reign of Arcadius (periods 15–21). The average duration of the four major phases is around 107 years, with a duration of 95 years for Phase I and durations of 111, 114 and 108 years for Phases II, III and IV respectively. The detection threshold of metal remains is constrained by mass. However, an analysis of coin distribution by mass reveals no prospecting bias (Fig. 4). Within Phase I, there is a bimodal distribution with 'half *asses*' and '*dupondii*' weighing 3–5 g, and '*asses*' and '*dupondii*' weighing 8–10 g. There are very few heavy coins; the poorly represented '*sestertii*' and 'uncial *asses*' weighing around 25 g. Phase II coins weigh between 2 g and 27 g, with three major modes situated around 8–9 g ('*asses*'), 11–12 g ('*asses*' and '*dupondii*'), and 17–23 g ('*sestertii*'). This dataset reflects the relative abundance of large coins such as '*sestertii*' and '*dupondii*'. Phases III and IV both show only small coins weighing around 1–3 g of very similar shape, which should therefore be equally well detected by field operators. Coin distribution by mass confirms that even if Phase II and Phase III coins are less well represented, they are detected as readily as those of Phases I and IV. The evolution of temporal and spatial coin distribution is shown on several diagrams and maps (Figs. 5 and 6). The dynamics of the Oedenburg settlement can thus be detailed phase by phase in relation to the distribution of coins on the site.

4.2. Phase I

Phase I coins have been found in all prospected zones. However, they show noticeable spatial heterogeneity: over 70% of a total of 678 were found in PZA. Numerous Republican and Augusto-Tiberian coins (periods 1a to 1d) are found, particularly around the military camp. Coins from periods 2 and 3 decrease in number but still represent over 60% of the total population. The contribution of PZA decreases gradually while contributions from PZB and PZC3 increase. Coin distribution in PZB forms lines crossing palaeo-channels, indicating roads shown on the geomagnetic map (Fig. 2). Many coins were also found on palaeo-islands. Coin distribution in PZC3 forms three bands corresponding to Roman roads, one oriented North-South and two oriented westward. Few coins are found in PZC2 and PZC1, but for the latter zone, anthropogenic deposits from later phases reach a thickness of 3 m (Fig. 3), too deep for satisfactory prospecting.

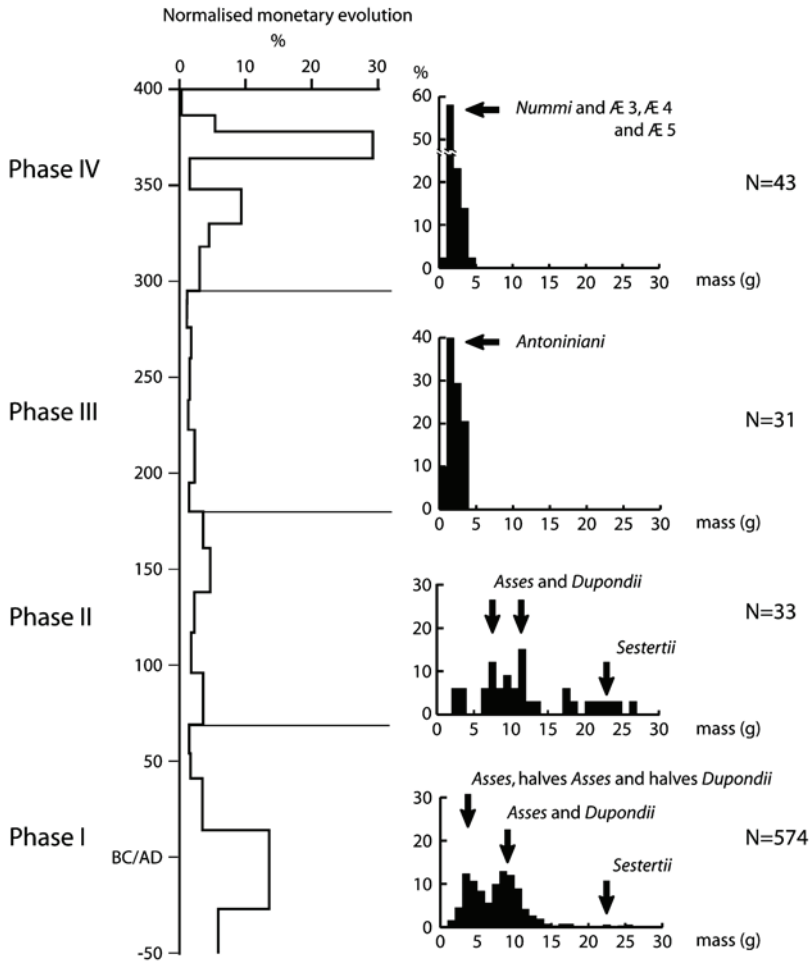


Fig. 4. Global Oedenburg monetary time chart and mass distribution of coins for each Phase in the Oedenburg site. Roman periods have been defined after Reece (1972). Phase I: from period 1 to 3, Phase II: from period 4 to 8, Phase III: from period 9 to 14 and Phase IV from period 15 to 21. Note the low proportion of '*sestertii*' compared with smaller denominations such as '*asses*', '*dupondii*' and halves during Phase I. Moreover, the low abundance of coins attributed to Phase III is not linked to biases in prospecting methods: they are of similar weight to those of Phase IV which are well represented in Oedenburg.

4.3. Phase II (AD 69–180)

A radical change in coin distribution occurs during this phase, with less than 10% still found in PZA, while contributions from PZB and PZC1 are proportionately higher, reaching 60% of a total of 365 for PZB, thus confirming the trend established in Phase I for this zone. Coins are still found across palaeo-channels and on palaeo-islands, while the area dedicated to temples appears to be better represented, in accordance with excavation results that provide evidence of increasing activity in this sector. The increase in PZC1 begins later, in period 6, indicating a considerable acceleration in the dynamics of settlement on this higher part of the floodplain. In PZC2 and PZC3, the situation remains stable, with a new line oriented westward in the southern part of PZC3, interpreted as a road, bringing the total contribution for this zone to 15%. Phase II thus demonstrates a rapid mutation in settlement on the floodplain, characterised by the desertion of the military camp and the growth of new civilian districts such as the temple area and PZC1.

4.4. Phase III (AD 180–295)

During this phase, the decrease in contribution from PZA is confirmed, even though overall numbers are lower, with a total of only 136. The situation in PZB is more complex and deserves attention. Spatial distribution is modified in PZB, with no coins found in the southern part, a more streamlined alignment around the temples, and clustering on one of the palaeo-islands. Two sub-phases are observed in temporal distribution for both PZB and PZC1: the first spanning periods 9–11, and the second periods 12 and 14. Coin distribution is greater in these zones than elsewhere throughout Phase III, with alternating peaks of dominance. In PZC2 and

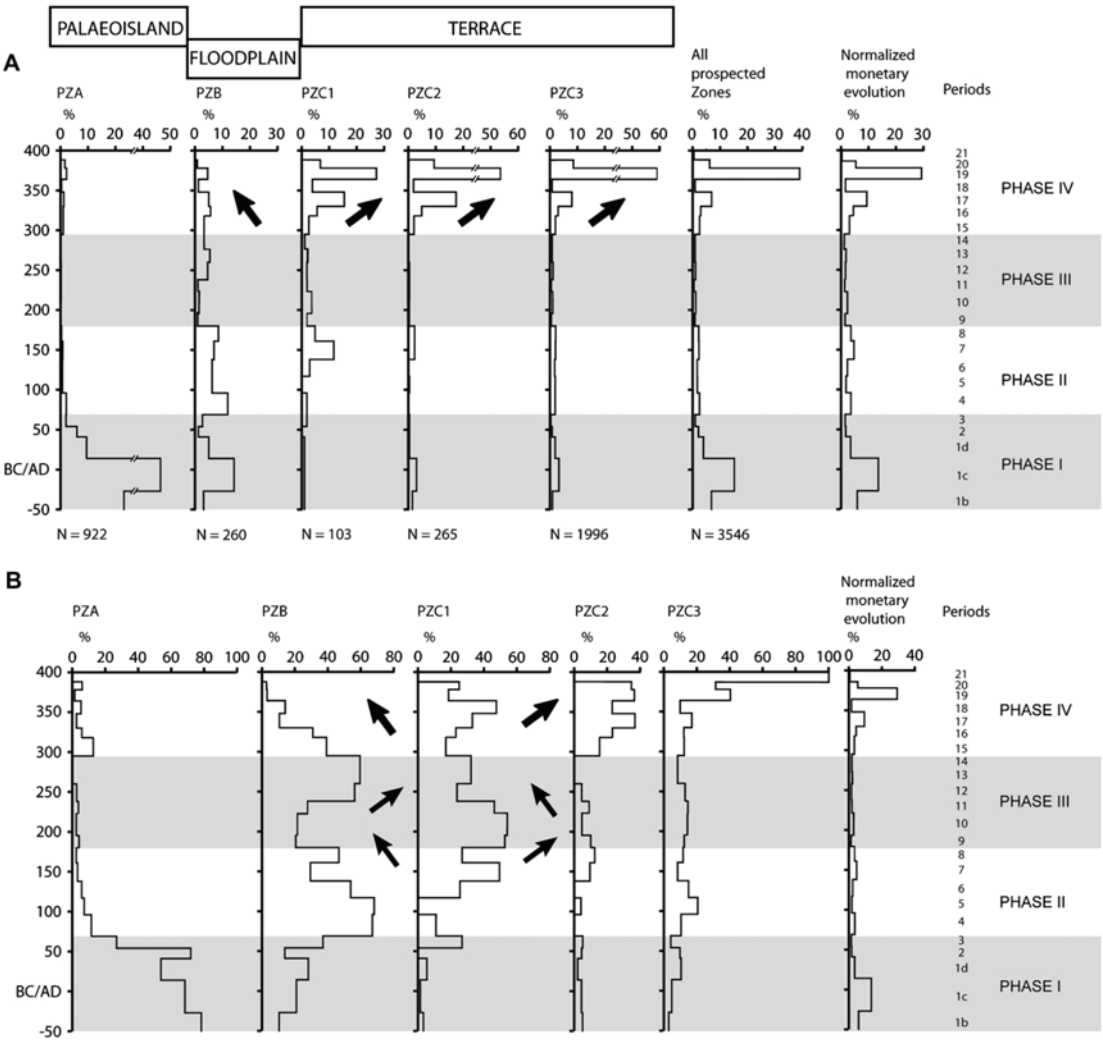


Fig. 5. Chronological coin distribution in each prospected zone. (A) Chronological distribution normalized for each prospected zone: analysis of the contribution of emission periods to the total number of coins per prospected zone. For one prospected zone, the sum of each period equals 100%. (B) Chronological distribution normalised for each period: analysis of the contribution of each prospected zone to the total number of coins per period. For one period, the sum of each prospected zone equals 100% and each zone is equally weighted versus PZC1. Black arrows indicate significant events.

PZC3, no evidence for significant distribution change is observed.

4.5. Phase IV (AD 295–402)

As the total number of coins for this phase (2060) is greater than the combined total of the three previous phases, the few coins found in PZA are not of great significance, indicating at best episodic human presence. Although the number of coins found in PZC1, PZC2 and PZC3 shows a consistent increase, in PZB, the contribution decreases proportionately compared to Phase III. Spatial distribution shows little change in this zone until after period 15, when only small clusters of coins are present on palaeo-islands.

5. Discussion

On the basis of our study, together with the excavation results, we have drawn up the chrono-spatial evolution of the Oedenburg settlement. The phase characterisation and the construction of the comprehensive monetary chart can be discussed in relation to internal and external processes. First, internal processes of settlement may be considered as the main parameter, inherent to site character (frontier settlement) and difficult to estimate because of site-specific behaviour and development. Second, external processes that may affect settlement dynamics are of two orders: (1) the historical variation of the monetary mass distributed, and available in this marginal part of the Roman Empire (frontier settlement),

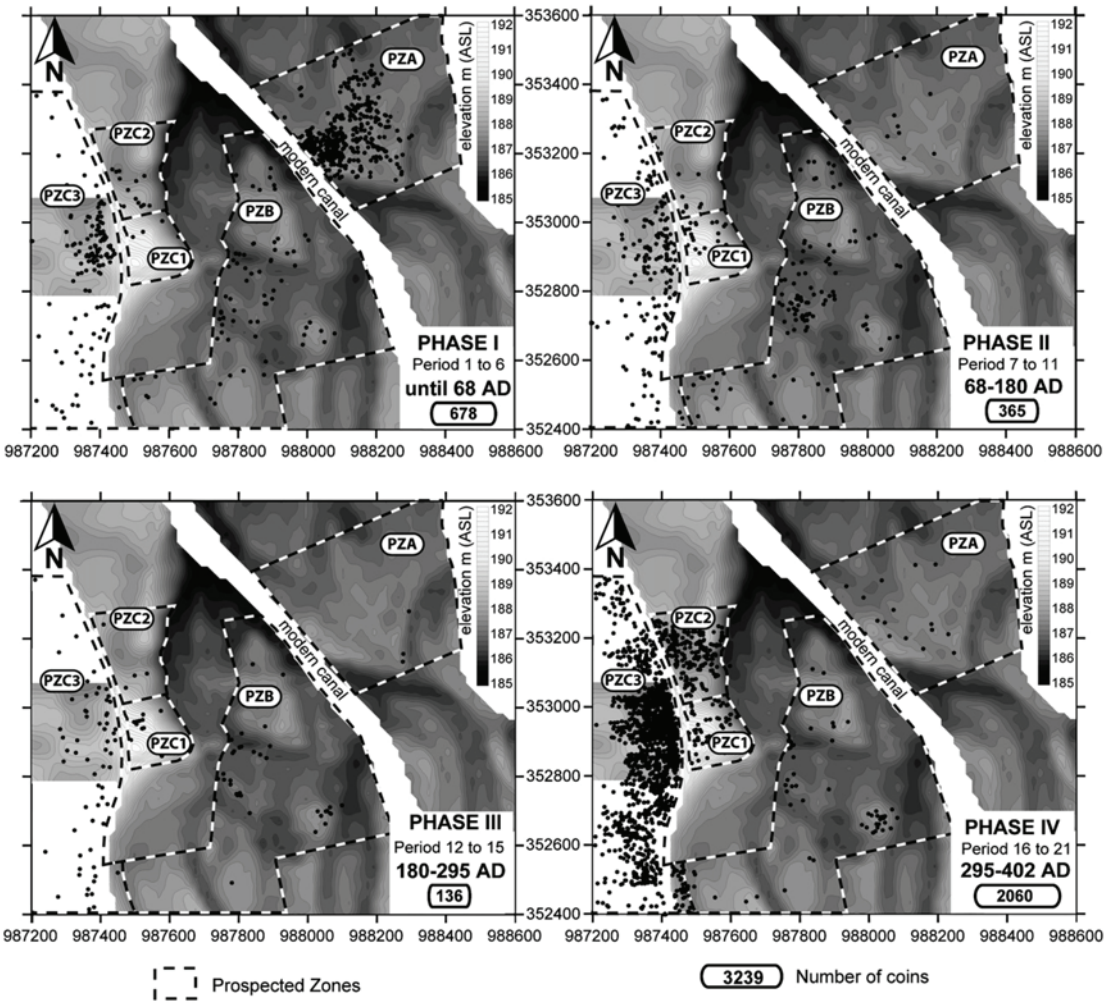


Fig. 6. Distribution maps of Roman coins found in the Oedenburg site on the digital elevation model. During Phase I, PZA presents a very high concentration of Roman coins. The other prospected zones are also occupied, but to a lesser extent. During Phase II, PZA is deserted, supporting development in PZB, PZC1 and PZC3. Phase III shows a clustering of coins in PZB and persistence in PZC1 and PZC3. During Phase IV, PZC1, PZC2 and PZC3 become dominant and PZB presents fewer coins. Some coins are still found in PZA but not enough to indicate occupation. Spatial coordinates are Lambert II extended (Geographic French System). Contour interval: 20 cm. Elevation from 185 to 192 m ASL.

during Antiquity; (2) variations in climate, and especially in hydrology and geomorphodynamics, in this flood-exposed area.

5.1. Roman history and Oedenburg

During Roman history, several events considerably affected the rate of emission and circulation of coins. During Phase I, while the military camp in PZA was developing, many coins in short supply were given a higher local value in this marginal part of the Empire. Artefacts, such as halves, countermarked coins and copies, bear witness to that reality. But during the second and third monetary phases (Phases II and III) after the departure of the military, coin values were only modified by Rome and other provincial coin workshops. The first part of Phase III presents a general low number of coins. It is due to the special character of the reign of the Severians. The second part of Phase III shows a higher number of coins, but still relatively low. During Phase IV, two parameters must be taken into account. The first is the Diocletian monetary reform in 294, and the second is the stabilisation of the Roman frontier along the 'Rhein-Iller-Donau *limes*' after the loss of '*Agri Decumates*' (Germany) and the military retreat in AD 260. It is remarkable that each event described here is observed at the scale of the Oedenburg site.

5.2. Rapid settlement in the floodplain during Phase I

Phase I is mainly defined by the arrival of the first Roman settlers. It is well indicated in the alluvial plain (PZB) and

particularly near the Julio-Claudian military camp (PZA) but is also present on the highest part of the terrace (PZC2 and PZC3). The large contribution of coins issued during Phase I in the prospected dataset may attest that anthropogenic and alluvial sediments have very little impact on discovery. This, however, is not the case for PZC1, where anthropogenic sediment thickness reaches more than 2 m (Fig. 3). Rapid settlement processes are highlighted on site, probably influenced by the arrival of Roman soldiers, and possibly also linked to the appearance of a religious complex, attested from the first half of the first century. The Roman settlement seems also to have been created '*ex-nihilo*' in that part of the Rhine floodplain, spreading over the whole area. During this phase, coin distribution indicates that the modulation of the site is strongly controlled and weighted by the military zone (PZA) where the assemblage is larger, with such distinctive features as the great proportion of '*asses*', the large number of halves ('*asses*' and '*dupondii*') and countermarks. This may be compared to other sites such as *Vindonissa* (Kraay, 1962).

5.3. Flooding events and duration of military camp: Phase I

As excavations have already established, the Oedenburg site was affected by four floods between AD 20 and AD 145/146, which were recorded on the eastern part of PZB in the immediate neighbourhood of the military camp in PZA (Ollive et al., 2006). However, field study does not yet indicate that such events affected the internal structure of the military settlement and forced its desertion.

5.4. The deserted camp (PZA): Phases II, III, IV

Phase II corresponds to the persistence of site occupation with the exception of the eastern margin (PZA). That desertion seems to be durable and even permanent during the following phases II, III and IV. No wide-ranging activity occurs in PZA, only transit. The reason for this non-resettlement is still difficult to understand; consequently three main propositions have been developed to explain it. The first is related to the distance of PZA from the terrace where the main roads are located. This hypothesis concerns internal processes and is linked to the attraction for civilian people of settling districts near the traffic axis and, consequently, trade. With the decline of the primary defensive motivation, PZA presents no other advantage than an easy access to cross the Rhine River. This function of access to the eastern side of the Rhine River is consistent with the development, from the end of the 1st century AD, of large public buildings (temples, '*mansio*', thermae complex) dedicated to traveller halts and a major East–West way which connects PZB to the alluvial terrace (Reddé et al., 2005). The second may be explained by an environmental impact on that part of the floodplain. Environmental evolution may have reduced the attractiveness of that palaeo-island. This hypothesis seems to be difficult to argue because of two points raised in previous work: (1) during the period of occupation of the camp, floods affected the zone but no effects on settlement were evidenced (Ollive et al., 2006); (2) the topography of this zone is only as sensitive and vulnerable to fluvial impact as other parts of the Roman settlement that are still occupied up to phase III. For this reason, we reject this hypothesis: the non-resettlement of PZA cannot be influenced by hydrological constraints. The third is a more external explanation, which remains hypothetical. It suggests that PZA, the military camp during Phase I, was perhaps not available for civilian settlement even after the departure of the military. Therefore, a ban on civilian occupation of PZA which has a military character may be illustrated on the Oedenburg site. If not universal, several examples attest this phenomenon is not unique within the Empire. The Mirebeau site (France) indicates the same non-reoccupation after the departure of the Roman legion while at the Walheim site (Germany) a civilian settlement developed on the former military structures (Reddé et al., 2006). Thus, we consider that the non-resettlement of that part of the floodplain was not induced by hydrological constraints but rather by historical conditions.

5.5. Contracting clusters in the floodplain

In PZB, coin distribution shows a scattered shape during Phases I and II, when the temples were in use, up to around AD 160–170. During Phases III and IV, a significant reduction of the dispersion of Roman coins in the floodplain occurred. Several clusters bear witness to this phenomenon, in particular in the central part of PZB where a sacred area is attested until the middle of Phase III, when a linear form is observed similar to those found near roads (Fig. 2). Abandonment of PZB was almost complete at the end of the 4th century, during Phase IV. The first hypothesis to explain this concerns internal processes supported by functional changes, principally due to the construction of a palace on the terrace. The major roads are positioned on the terrace in PZC1, PZC2 and PZC3, which probably made these zones more attractive for the inhabitants, as trade is generally easier near roads. The second hypothesis concerns external processes. The number of coins issued during Phase IV, and found in quantity everywhere except in PZA and PZB, allows us to imagine that environmental change affecting only low zones occurred during this phase.

5.6. Influence of climate on the settlement during the 4th century?

The abandonment of the alluvial floodplain (PZB) during Phase IV is demonstrated by the spatial distribution of Roman coins. This may have started during Phase III, when the first evidence of contraction is observed. After AD 320 (period 16), PZB declines while other zones show a considerable increase in occupation. Hydrological factors, aggravated by the position of PZB low in the alluvial landscape, may have contributed to its abandonment. Several contemporaneous events indicate that this climate variability also affected the Rhine catchment area. Many archaeological sites were abandoned at the transition between the Roman Period and the Migration Period in the eastern part of the Roman Empire, after the

retreat from the '*Agri Decumates*' (Lang et al., 2003; Mäckel et al., 2002, 2003; Zolitschka et al., 2003). In the Black Forest and in the Kaisersthul area, the population density decreased, respectively associated with a reduction in mining activity and with geomorphodynamic stability (soil formation and reforestation) initiated by climatic deterioration (Friedmann, 2000). There is no evidence of settlements near Lake Constance from about AD 250 to AD 380, and near Lake Nussbaumen from around AD 260 to AD 650 (Zolitschka et al., 2003). Tree-trunk accumulation in River Lahn sediments between 1650 and 1350 BP is associated with a lack of archaeological settlement (Abegg-Wigg et al., 2000; Urz et al., 2002; Zolitschka et al., 2003). During the same period, moisture and wet conditions increased in Lake Dudinghausen affecting human occupation (northern Germany; Dreßler et al., 2006). All these studies have demonstrated that the transition period occurring during the fourth century AD may be considered as a wet and/or cold period coinciding with the Göschenen II glacial advance in the Alps (1850–1200 BP) and lower timberline (Patzelt, 1977). Wessels (1998) demonstrated that Lake Constance recorded an increase of detrital supply from the third century AD onward; we interpret this as an increase in water supply at the scale of the Northern Alps and particularly the River Rhine. This wet and/or cold period can also be observed at Lake Le Bourget (Alps) as an increase in sedimentation rates after 1680 BP and in detrital material between 1600 and 1150 BP (Arnaud et al., 2005), after the end of the transgressive episode 4 'Petit Maclu 1' (1800–1700 BP) recorded in Jura lakes (Magny, 1992; Magny et al., 2003). According to Berglund (2003), widespread reforestation is documented in Scandinavia due to the retreat of agriculture; this occurred simultaneously with cooling anomalies around 1500 BP, such as fluctuations in surface temperature in the Norwegian Sea and variations in lake level. At the same time, in British lowland rivers, a major episode of ^{14}C dated flooding occurred around 1650 BP associated with a decrease in forest clearance rates (Johnstone et al., 2006). Conversely, it also corresponds to a transient period between 1700 and 1500 BP of moderate frequency or hiatus in ^{14}C-dated fluvial activity in Poland, Spain and upland rivers in Britain frequently associated with an increase in forest clearance rates (Gregory et al., 2006; Johnstone et al., 2006; Macklin and Lewin, 2003; Macklin et al., 2005, 2006; Starkel et al., 2006; Thorndycraft and Benito, 2006a,b). At a global scale, climate evolution during the 4th century is integrated within a cooling trend documented by an increase in Ice Rafted Debris in the North Atlantic Ocean (Bond et al., 1997), a Northern Hemisphere temperature decrease (Möberg et al., 2005), and a moderate but abrupt change (rise and fall) in atmospheric $\delta^{14}C$ value (Stuiver et al., 1998) that attests rapid variations of solar activity (Van Geel et al., 1999) and may be linked to climatic change (e.g. Bond et al., 2001; Kerr, 2001; Magny, 1993a,b; Stuiver and Braziunas, 1993).

At the Oedenburg site, localised organic-rich sediment deposition occurred in some palaeo-channels during the first three centuries AD, becoming generalised over the whole floodplain by the fourth century, denoting a permanent high water table from that time onward. We assume hydrological control on floodplain occupation during the 4th century AD. This agrees better with climatic events identified in the Rhine catchment area and elsewhere in northern Europe, than with those identified in Jura lakes and southern Europe.

6. Conclusion

Settlement dynamics shows four main phases at the Oedenburg Gallo-Roman site, located in the Upper Rhine floodplain. The integrated study of the topography, the geomagnetic survey map, and the field prospecting dataset allowed (1) a better visualisation of the inhabited districts over time, (2) a better appreciation of the chronology of the Roman roads without excavation, (3) a better understanding of the different constraints that controlled the evolution of the Roman settlement. This last point demonstrates the adaptation of Roman urbanism to topographical and hydrological problems through time. Our study suggests that several parameters may have constrained the modification of the urban network at the site. Although the topography of this alluvial landscape imposes certain constraints, at the origin of the site during the first century AD, the settlement seems to be homogenous and chiefly influenced by the military presence in the camp. In the middle of the first century, the abandonment of the military camp is linked to external causes, such as the Roman invasion of '*Agri Decumates*'. The non-resettlement of the military zone after this period does not appear to be linked to hydrological conditions, as settlement continues in a neighbouring zone which is just as vulnerable to hydrological risk. The two most plausible hypotheses for non-resettlement therefore rely on the fact that the only benefit is to offer an easy access to the Rhine and/or on the particular character of a military zone which is retained even after the military camp has been abandoned. During the fourth century, however, the permanently higher water table must have contributed to the abandonment of the floodplain, along with internal factors, such as the increased attractiveness of the terrace, where a new fortification and major roads were built. To conclude, the study of Roman coin distribution at this site has allowed us to detect the effect of hydrological conditions and climate variation in the southern Upper Rhine floodplain during the fourth century. Finally, the sensitivity of hydrological and archaeological records at the long-lived site of Oedenburg has allowed us to detect the possible effects of hydrological constraints on the Gallo-Roman population, through the significant changes in settlement dynamics in the floodplain area. This reflects the great potential of integrated topography-related studies of the spatial distribution of artefacts presenting high temporal constraints, such as Roman coins, particularly at the exceptional alluvial site of Oedenburg.

Acknowledgements

This research was supported by the French-Germano-Swiss 'Oedenburg Programme' and the UMR-CNRS 5561 'Biogeosciences', Centre des Sciences de la Terre, Université de

Bourgogne (France). The 'Hardt and Ried Historical Society' mentioned here refers to 'Société d'Histoire de la Hardt et du Ried' including acknowledged crew members Raymond Bach, Paul Debes, Denis Herzog, Thierry Kilka, Robert Lorens, Jean-Jacques Maurer, André Maurer and Jean-Philippe Strauel. The complete collection of prospected artefacts is conserved at the Biesheim Archaeological Municipal Museum (France). Geomagnetic mapping was done by Posselt & Zickgraff GmbH (Germany), radiocarbon dating was carried out by the Poznan Radiocarbon Laboratory (Poland), dendrochronological analyses were performed by Olivier Girarclos (CEDRE, Besançon, France). The authors also thank for their helpful contribution to topographical survey, Julien Bourdet, Louis Morel, David Sarro and Françoise Vannier-Petit. ERT transects were performed using a Syscal Switch Junior with the help of Franck Rémond and Pascal Allemand.

References

Abegg-Wigg, A., Walter, D., Biegert, S., 2000. Forschungenin germanischen Siedlungen des mittleren Lahntals. Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte 5, 55–65.

Arnaud, F., Revel-Rolland, M., Chapron, E., Desmet, M., Tribovillard, N., 2005. 7200 years of Rhône river flooding activity recorded in Lake Le Bourget: a high resolution sediment record of NW Alps hydrology. The Holocene 15, 420–428.

Berglund, B.E., 2003. Human impact and climate changes—synchronous events and a causal link? Quaternary International 105, 7–12.

Biellmann, P., 1987. Les tuiles de la 1re légion Martia trouvées à Biesheim-Oedenburg. Annuaire de la Société d'histoire de la Hardt et du Ried 2, 8–15.

Biellmann, P., 1988. Biesheim-Oedenburg: un bimillénaire. Annuaire de la Société d'histoire de la Hardt et du Ried 3, 21–30.

Biellmann, P., 1996. Le premier camp d'Oedenburg (Biesheim-Kunheim). Annuaire de la Société d'histoire de la Hardt et du Ried 9, 17–32.

Biellmann, P., 1997. Observations sur l'occupation romaine tardive du site d'Oedenburg (Biesheim-Kunheim). Annuaire de la Société d'histoire de la Hardt et du Ried 10, 17–38.

Biellmann, P., 2000. La prospection pédestre à Oedenburg (Biesheim-Kunheim) en 1999. Annuaire de la Société d'histoire de la Hardt et du Ried 13, 18–22.

Biellmann, P., 2001. Une nécropole du Bas-Empire à Oedenburg (Biesheim-Kunheim). Annuaire de la Société d'histoire de la Hardt et du Ried 14, 9–20.

Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Alamasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I., Bonani, G., 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. Science 278, 1257–1266.

Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., Bonani, G., 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. Science 294, 2130–2136.

Dreßler, M., Selig, U., Dörfler, W., Adler, S., Schubert, H., Hübener, T., 2006. Environmental changes and the Migration Period in northern Germany as reflected in the sediments of Lake Dudinghausen. Quaternary Research 66, 25–37.

Ferdière, A., Dabas, M., Delétang, H., Jung, C., Zimmermann, W.H., 2006. La prospection. Collection Archéologique. Errance, Lamotte-Beuvron, France, 248 pp.

Friedmann, A., 2000. Die Spät- und Postglaziale Landschafts- und Vegetationsgeschichte des südlichen Oberrheintieflands und Schwarzwalds. Freiburger Geographische Hefte, Band 62.

Gowlett, J.A.J., 1997. High definition archaeology: ideas and evaluation. World Archaeology 29 (2), 152–171.

Gregory, K.J., Benito, G., Dikau, R., Golosov, V., Johnstone, E.C., Jones, J.A.A., Macklin, M.G., Parsons, A.J., Passmore, D.G., Poesen, J., Soja, R., Starkel, L., Thorndycraft, V.R., Walling, D.E., 2006. Past hydrological events and global change. Hydrological Processes 20, 199–204.

Johnstone, E., Macklin, M.G., Lewin, J., 2006. The development and application of a database of radiocarbon-dated Holocene fluvial deposits in Great Britain. Catena 66, 14–23.

Kerr, R.A., 2001. A variable sun paces millennial climate. Science 294, 1431–1433.

Kraay, C.M., 1962. Die Münzfunde von Vindonissa (bis Trajan). Veröffentlichungen der Gesellschaft pro Vindonissa. Band V, Basel. 26–29.

Lang, A., Bork, H.-R., Mäckel, R., Preston, N., Wunderlich, J., Dikau, R., 2003. Changes in sediment flux and storage within a fluvial system: some examples from the Rhine catchment. Hydrological Processes 17, 3321–3334.

Leroy-gourhan, A., Brézillon, M., 1966. L'habitation Magdalénienne n°1 de Pincevent près Montereau (Seine et Marne). Gallia Préhistoire 9, 263–385.

Mäckel, R., Schneider, R., Friedmann, A., Seidel, J., 2002. Environmental changes and human impact on the relief development in the upper Rhine valley and Black Forest (South-West-Germany) during the Holocene. Zeitschrift für Geomorphologie 128 (Suppl. Bd.), 31–45.

Mäckel, R., Schneider, R., Seidel, J., 2003. Anthropogenic impact on the landscape of southern Badenia (Germany) during the Holocene – documented by Colluvial and Alluvial sediments. Archaeometry 45 (3), 487–501.

Macklin, M.G., Lewin, J., 2003. River sediments, great floods and centennial-scale Holocene climate change. Journal of Quaternary Science 18, 101–105.

Macklin, M.G., Johnstone, E., Lewin, J., 2005. Pervasive and long term forcing of Holocene river instability and flooding in Great Britain by centennial-scale climate change. The Holocene 15, 937–943.

Macklin, M.G., Benito, G., Gregory, K.J., Johnstone, E., Lewin, J., Soja, R., Starkel, L., Thorndycraft, V.R., 2006. Past hydrological events reflected in the Holocene fluvial history of Europe. Catena 66, 145–154.

Magny, M., 1992. Holocene lake-level fluctuations in Jura and the northern subalpine ranges, France: regional pattern and climatic implications. Boreas 21, 319–334.

Magny, M., 1993a. Solar influences on Holocene climatic changes illustrated by correlations between past lake-level fluctuations and the atmospheric ^{14}C record. Quaternary Research 40, 1–9.

Magny, M., 1993b. Holocene fluctuations of lake levels in the French Jura and sub-Alpine ranges and their implications for past general circulation pattern. The Holocene 3, 306–313.

Magny, M., Bégeot, C., Guiot, J., Peyron, O., 2003. Contrasting patterns of hydrological changes in Europe in response to Holocene climate cooling phases. Quaternary Science Reviews 22, 1589–1596.

Maurer, A., 1993. Nouvelles découvertes sur le vicus d'Oedenburg-Biesheim. Annuaire de la Société d'histoire de la Hardt et du Ried 6, 8–10.

Möberg, A., Sonechkin, D.M., Holmgren, K., Datsenko, N.M., Karlén, W., 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. Nature 433, 613–617.

Nuber, H.U., Reddé, M., Jacomet, S., Joly, M., Popovitch, L., Schibler, J., Seitz, G., Fort, B., Matter, G., Pellissier, J., Petit, C., Viroulet, B., Wolf, J.-J., 2002. Le site militaire romain d'Oedenburg (Biesheim-Kunheim, Haut-Rhin, France). Premiers résultats. Germania 80, 169–242.

Ollive, V., Petit, C., Garcia, J.-P., Reddé, M., 2006. Rhine flood deposits recorded in the Gallo-Roman site of Oedenburg (Haut-Rhin, France). Quaternary International 150, 28–40.

Patzelt, G., 1977. Der zeitliche Ablauf und as Ausmass postglazialer Klimaschwankungen in den Alpen. In: Frenzel, B. (Ed.), Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in Tirol 6. Steiner Verlag, Wiesbaden, pp. 93–123.

Reddé, M., Nuber, H.U., Jacomet, S., Schibler, J., Schucany, C., Schwartz, P.-A., Seitz, G., Ginella, F., Joly, M., Plouin, S., Hüster Plogmann, H., Petit, C., Popovitch, L., Schlumbaum, A., Vandorpe, P., Viroulet, B., Wick, L., Wolf, J.-J., Gissinger, B., Ollive, V., Pellissier, J., 2005. Oedenburg. Une agglomération d'époque romaine sur le Rhin supérieur. Gallia 62, 215–277.

Reddé, M., Brulet, R., Fellmann, R., 2006. L'architecture de la Gaule romaine. Les fortifications militaires. Documents d'Archéologie Française 100. MSH-Ausonius, Bordeaux, 476 pp.

Reece, R., 1972. Roman coins in northern France and the Rhine Valley. Numismatic Chronicle 12, 159–165.

Riley, D.N., 1946. The technique of air-archaeology. Archaeological Journal 101, 1–16.

Starkel, L., Soja, R., Michczyn'ska, D.J., 2006. Past hydrological events reflected in Holocene history of Polish rivers. Catena 66, 24–33.

Stapert, D., Street, M., 1997. High resolution or optimum resolution? Spatial analysis of the Federmesser site at Andernach, Germany. World Archaeology 29 (2), 172–194.

Stuiver, M., Braziunas, T.F., 1993. Sun, ocean, climatic and atmospheric CO2-an evaluation of causal and spectral relationship. The Holocene 3, 289–304.

Stuiver, M., Reimer, P.J., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, F.G., Van Der Plicht, J., Spurk, M., 1998. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000–0 cal BP. Radiocarbon 40, 1041–1083.

Thorndycraft, V.R., Benito, G., 2006a. Late Holocene fluvial chronology in Spain: the role of climatic variability and human impact. Catena 66, 34–41.

Thorndycraft, V.R., Benito, G., 2006b. The Holocene fluvial chronology of Spain: evidence from a newly compiled radiocarbon database. Quaternary Science Reviews 25, 223–234.

Urz, R., Röttger, K., Thiemeyer, H., 2002. Von der Natur- zur Kulturlandschaft—Das mittlere Lahntal (Hessen) in vor- und frühgeschichtlicher Zeit. Germania 80, 269–293.

Van Geel, B., Raspopov, O.M., Renssen, H., van der Plicht, J., Dergachev, V.A., Meijer, H.A.J., 1999. The role of solar forcing upon climate change. Quaternary Science Reviews 18, 331–338.

Wessels, M., 1998. Natural environmental changes indicated by Late Glacial and Holocene sediments from Lake Constance, Germany. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 140, 421–432.

Zolitschka, B., Behreb, K.-E., Schneiderc, J., 2003. Human and climatic impact on the environment as derived from colluvial, fluvial and lacustrine archives examples from the Bronze Age to the Migration period. Germany. Quaternary Science Reviews 22, 81–100.

3. L'APPROCHE ENVIRONNEMENTALE

3.1. OBJECTIFS DE L'APPROCHE ENVIRONNEMENTALE

L'étude paléoenvironnementale menée sur le site d'Oedenburg s'appuie sur un large éventail méthodologique (Figure 3.18) comprenant :

- des fouilles,
- des tranchées réalisées à la pelle mécanique,
- des campagnes de sondages géophysiques,
- des sondages à la tarière mécanique ou encore à la tarière manuelle.

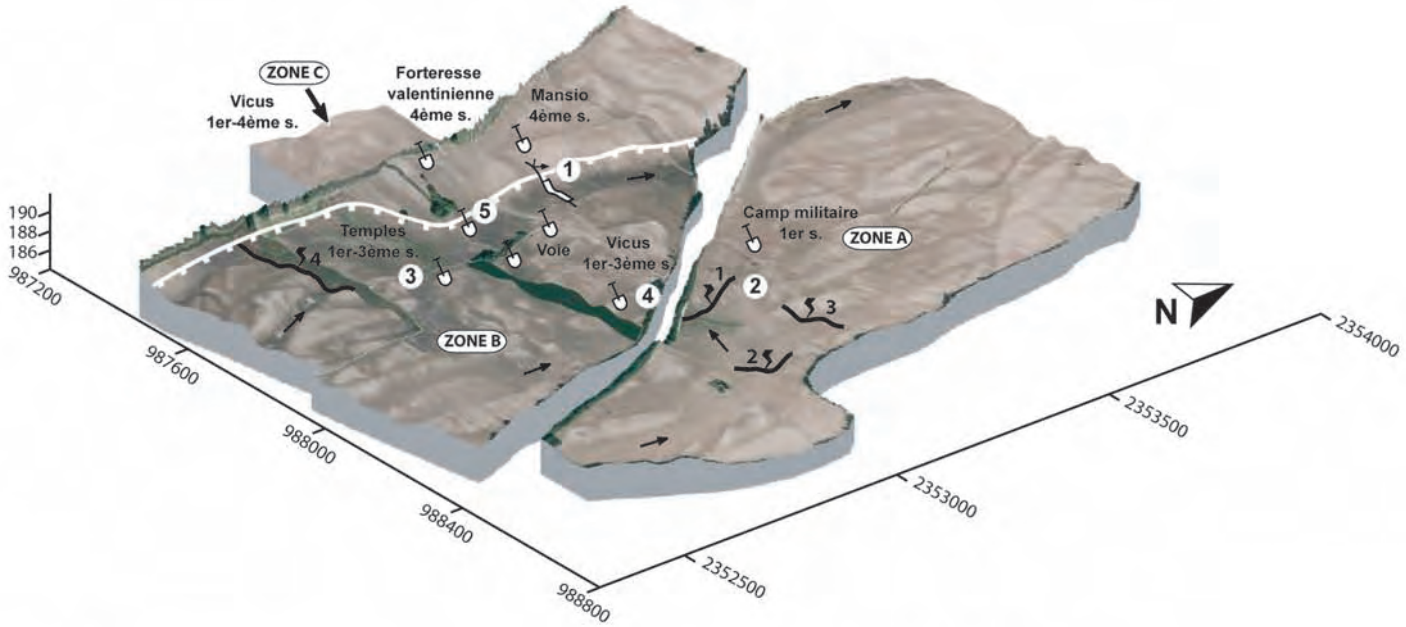
Cette étude multiple s'intéresse au cadre environnemental du site au sens large et aborde chacun des secteurs. Cette approche permet de définir deux grandes thématiques :

- L'impact du climat, de la forêt riveraine et de l'occupation humaine sur la dynamique alluviale du Rhin au cours de l'Holocène et notamment durant la période antique.

Cette première thématique traite de l'évolution de l'environnement alluvial dans la zone du site. Cela permet la connaissance de l'évolution de la dynamique sédimentaire des chenaux majeurs présents ainsi que de la dynamique du couvert végétal au voisinage du site. Un premier exemple aborde le large paléochenal occidental qui s'appuie contre la terrasse. Un second, le large paléochenal oriental situé au voisinage des camps militaires du 1er siècle de notre ère. Un troisième exemple correspond à l'étude d'un paléochenal perché sur la Zone géomorphologique A et antérieur au paléochenal oriental. Enfin, un quatrième exemple concerne les paléochenaux en tresses dans lesquels se développe la zone des temples.

- L'enregistrement des événements hydrologiques extrêmes dans les zones d'occupation humaine

La façon dont des événements d'inondation du Rhin ont été enregistrés sur le site d'Oedenburg constitue le deuxième ensemble thématique. Les deux exemples choisis s'appuient sur des observations de fouilles dans la zone d'occupation civile ainsi que sur l'étude des bois retrouvés sur le site d'Oedenburg dont certains présentent des stress de croissance pouvant être interprétés comme résultant d'événements hydrologiques extrêmes.



Rebord de terrasse

Direction du paleo-courant

Secteurs fouillés

Tranchée géoarchéologique

Prospection électrique et forages

Prospection Radar

1	Le paléochenal occidental :	Dynamique sédimentaire et forestière riveraine dans la plaine du Rhin supérieur.
2	Le paléochenal oriental :	Dynamique sédimentaire à proximité du camp militaire du 1er siècle. Estimation du tirant d'eau minimum pour la navigation antique.
3	La zone des temples :	Quantification des aménagements anthropiques dans un paléochenal.
4	Le vicus :	Aménagements d'un paléochenal secondaire. Enregistrement de dépôts d'inondations du Rhin pendant l'occupation antique.
5	Le vicus :	Aménagements des chenaux et gestion de la fôret riveraine rhénane. Enregistrement dendrochronologique des événements hydrologiques extrèmes.

Figure 3.18 : Localisation des diffèrents secteurs d'études géoarchéologiques.

3.2. IMPACT DU CLIMAT, DE LA FORET RIVERAINE ET DE L'OCCUPATION HUMAINE SUR LA DYNAMIQUE ALLUVIALE DU RHIN AU COURS DE L'HOLOCENE ET NOTAMMENT DURANT LA PERIODE ANTIQUE

3.2.1. Introduction

Le paysage alluvial d'Oedenburg est donc fortement contraint par la présence de plusieurs paléochenaux. Dans le but de comprendre l'évolution de la dynamique sédimentaire ainsi que la dynamique du couvert végétal au voisinage du site, leur enregistrement sédimentaire a été documenté. Deux méthodologies très différentes ont été menées dans cet objectif.

Le paléochenal occidental est considéré a priori comme le meilleur enregistreur de l'interaction de l'homme avec son milieu en raison de sa position en bordure de terrasse mais aussi en aval et à proximité du site. La première méthodologie a consisté dans la réalisation d'une longue tranchée de plus de 65 m de long à l'aide d'une pelle mécanique ainsi que d'un profil radar.

Le paléochenal oriental est considéré a priori comme le moins affecté par les influences périanthropiques en raison de son éloignement et en amont du site. La seconde méthodologie a justifié la mise en place de plusieurs profils géophysiques de type panneau électrique ainsi que de séries de sondages à la tarière mécanique. Elle a de plus été appliquée dans l'étude du paléochenal ancien situé en Zone A, ainsi que des paléochenaux observés à proximité de la zone des temples.

La mise en comparaison de ces paléochenaux nous permettra ensuite de mieux distinguer l'impact anthropique de l'impact climatique sur la dynamique alluviale de cette zone du bassin de Rhin supérieur.

3.2.2. Le paléochenal occidental

3.2.2.1. Présentation du paléochenal occidental

Le paléochenal occidental, nommé aussi Riedgraben ou Ischert, est un paléochenal du Rhin dont l'observation en photographie aérienne ainsi que sur le terrain nous amène à penser qu'il a fortement contraint l'installation du site archéologique et son occupation. Cette première impression a d'ailleurs été vérifiée, d'une part, au terme de l'analyse de la distribution du mobilier et d'autre part, grâce aux résultats de prospections magnétiques développés plus haut.

Dans le secteur d'étude, le paléochenal suit une orientation Nord-Sud le long de la terrasse weichsélienne, et est encore en eau quelques centaines de mètres en aval. Il présente une allure méandriforme et peut être reconnu d'après plusieurs représentations cartographiques anciennes soit

comme chenal actif soit comme zone humide au cours des siècles précédents ; il semble ainsi avoir fortement marqué le paysage jusqu'à l'époque moderne, comme nous l'avons décrit précédemment.
A proximité de ce paléochenal, sur la terrasse, se développe le lieu-dit *Westergass* (PZC2), zone occupée depuis au moins le 1er siècle jusqu'au terme du 4ème siècle, comme l'attestent la distribution du mobilier ou les fouilles réalisées par l'équipe de l'Université de Freiburg sur la *mansio*.

3.2.2.2. Les méthodes employées

Dans un premier temps, nous avons réalisé un profil géoradar ou radar sol dans le double objectif de décrire la géométrie des corps sédimentaires enregistrés dans ce paléochenal et de vérifier si cette méthode est à la fois applicable et performante pour notre zone d'étude. Dans un second temps, ce profil a été doublé par une longue tranchée géoarchéologique de plus de 65 m débutant au niveau des structures archéologiques fouillées de la *mansio* du 4ème siècle et permettant de déterminer la pertinence des résultats obtenus par la prospection géophysique.

- ***Principe et méthode du géoradar***

La technique du géoradar (*Ground Penetrating Radar*) est comparable à la méthode sismique réflexion, la différence étant qu'elle est fondée sur l'analyse de la propagation et de la réflexion des ondes électromagnétiques (de fréquences comprises entre 25 MHz et 1 GHz). Cette méthode permet une visualisation des dépôts à granulométrie grossière (sédiments dont la conductivité électrique est faible) à haute résolution (de l'échelle du centimètre au mètre) sur une faible profondeur (de 0 à 60 m) le long d'un profil quasi-continu. Tout d'abord, le dispositif se compose d'une antenne émettrice qui est un système d'émission de courtes impulsions d'ondes électromagnétiques (quelques nanosecondes = 10^{-9}s) et de large spectre de fréquences (25 MHz à 1 GHz), d'une antenne réceptrice qui récupère les réflexions des ondes dans le sous-sol ; et d'un dispositif de numérisation et de stockage. Le front d'ondes émis se propage vers le sol et une partie de l'énergie est réfléchie vers la surface en raison des changements de propriétés électriques des différentes lithologies et minéralogies des couches, ainsi que de la nature des interfaces sédimentaires (Davis et Annan, 1989 ; Lunt et al., 2004). En effet, l'intensité du signal réfléchi est approximativement proportionnelle à la différence existant entre les constantes diélectriques de deux couches sédimentaires au niveau de leur interface de contact (Davis et Annan, 1989). Ces paramètres permettent ainsi une visualisation de la stratigraphie grâce à la nature des réflecteurs électromagnétiques. De plus, la vitesse des ondes et les réflexions sont contrôlées par les contrastes de la permittivité (e) ou de la constante diélectrique (K=e/e0). La profondeur de pénétration est fonction de la conductivité électrique, de la puissance de l'émetteur (voltage de la

pulsation 400-1000 V) et de la fréquence de l'onde (Annan, 1992 ; Smith et Jol, 1995). La résolution est contrôlée par la fréquence de l'onde ; en effet, plus la fréquence est élevée et plus la résolution est bonne (Jol, 1995). Ces principes expliquent pourquoi les sédiments fins tels que les limons ou les argiles qui ont des conductivités élevées sont à l'origine d'une atténuation importante du signal et réduisent considérablement la profondeur de pénétration jusqu'à quelques mètres ou moins. De ce fait la méthode du géoradar est limitée aux environnements de faible conductivité.

Au début de l'étude géoarchéologique, le choix de la méthode est apparu évident en raison du fait que la plaine alluviale du Rhin présente des chenaux dont la géométrie en plan est essentiellement en tresses, ce qui supposait plutôt la présence de dépôts grossiers. Ce travail a été réalisé avec la collaboration de J.-F. Buoncristiani de UMR 5561 « Biogéosciences ». L'appareil utilisé est un radar de surface de marque ABEM (RAMAC) avec une fréquence de 100 MHz et un espacement entre les antennes de 1 m. Cela nous a permis d'apprécier la rapidité de mise en oeuvre de cette méthode qui rend possible l'imagerie géophysique d'objets géologiques.

La technique d'acquisition utilisée dans ce travail est le mode réflexion en *offset* constant. La distance émetteur/récepteur (*offset*) est fixée et déplacée dans le but de d'obtenir un profil radar. La fréquence d'échantillonnages pour chaque trace est de 1000 Hz avec 512 *stacks* par trace. Les données ont ensuite été traitées de façon classique et modératrice (Dewow, avec un Gain AGC (*automatic gain control*), filtre trapézoïdal BP) en utilisant le logiciel Gradix sur PC.

Les différentes méthodologies ainsi que la théorie ont été largement expliquées par Davis et Annan (1989) ou encore Jol et Smith (1991). Ce type de méthode a déjà été largement utilisé en sédimentologie alluviale (Skelly et al., 2003 ; Huggenberger, 1993 ; Smith et Jol, 1995 ; Bridge et al., 1995 ; Lunt et al., 2004) ainsi qu'en archéologie (Dabas et al., 1999 ; Neal et Roberts, 2000 ; Gaffney et al., 2004 ; Lorenzo et Arias, 2005).

➢ *Méthode de relevé stratigraphique*

La réalisation d'une grande tranchée à la pelle mécanique a aussi nécessité l'utilisation de plusieurs pompes. En effet, bien que le paléochenal soit inactif, la nappe phréatique reste assez haute toute l'année et cet équipement a été utile pour abaisser temporairement et de quelques centimètre le niveau de l'eau, spécialement pendant la phase de description et de relevé ainsi que pendant l'échantillonnage. Le relevé stratigraphique a été réalisé à l'aide d'un pantographe à l'échelle 1/50 et a été complété par un relevé photographique.

➢ *La micro granulométrie*

Les analyses de micro granulométrie ont toutes été réalisées à l'Université de Bourgogne au laboratoire de Réactivité du Solide. L'appareil utilisé est un granulomètre submillimétrique par diffraction de la lumière laser aux petits angles de type COULTER LS 130 permettant ainsi de quantifier la part respective des argiles (<2 µm), des limons (< 63 µm) et des sables (<2 mm). L'analyse micro granulométrique de plusieurs échantillons a donc été réalisée avec une gamme de détection théorique comprise entre 0,3 µm et 1 mm.

➢ *Le dosage de la matière organique*

La méthode de la perte au feu a été utilisée pour quantifier la composition en matière organique des sédiments prélevés. Cette méthode simple consiste en une pesée double de l'échantillon avant et après chauffage pendant cinq heures dans un four à 500°C. La quantité de matière organique correspond alors à la masse perdue lors de la chauffe. Cette méthode est couramment utilisée notamment dans les séries lacustres ou palustres où la sédimentation organique ne permet pas de distinguer aisément la variation du flux sédimentaire détritique essentiellement minéral par rapport au flux organique essentiellement d'origine autochtone.

➢ *La susceptibilité magnétique*

La susceptibilité magnétique est une propriété physique des minéraux et peut être mesurée sur le terrain ou en laboratoire à l'aide d'un susceptibilimètre de marque Bartington. La mesure est réalisée directement au contact de l'échantillon. C'est la capacité d'un corps à acquérir une aimantation dans un champ. Cette propriété varie donc en fonction de la quantité de minéraux ferromagnétiques ainsi que des oxydes, faisant tendre la susceptibilité magnétique vers des valeurs fortes (E. Marmet, comm. pers.). Pour les minéraux diamagnétiques tels que le quartz ou la calcite, les valeurs seront largement plus faibles et inférieures à 0. Pour les minéraux paramagnétiques tels que les silicates paramagnétiques comme les argiles, les valeurs de susceptibilité seront de la même manière faibles et inférieures à 0. Les valeurs sont alors influencées par le degrés d'oxydation ou de réduction des sédiments. Cela peut aussi mettre en évidence des augmentations de la contribution plus détritiques (allochtones) dans les séquences sédimentaires lacustres, par exemple, vis-à-vis des apports autochtones. Cela marque donc dans ces cas des différences dans le rapport autochtone/ allochtone (Arnaud, 2003). L'intérêt d'une telle mesure pour la compréhension de séquences sédimentaires alluviales anthropisées est donc évident et nous permet potentiellement de mettre en évidence des structures de chauffe des sédiments ayant été affectés par la pédogenèse ou encore de mesurer des troncatures érosionnelles ou de sédimentation, ou au contraire, des pics de détritisme du à une crue.

- ***Les prélèvements archéobotaniques***

En complément des échantillons sédimentologiques, plusieurs types d'échantillonnages ont été réalisés pour une analyse archéobotanique. Parmi eux, de grands volumes de sédiments destinés à l'étude des macro-restes végétaux ont été prélevés. Ces analyses ont été réalisées par S. Jacomet et P. Vandorpe au sein du laboratoire d'archéobotanique de l'Université de Bâle. Trois colonnes de sédiments ont également été prélevées aux repères 35, 45 et 65 m le long de la coupe, en vue d'une analyse palynologique réalisée par H. Richard de l'UMR 5565 « Chrono-écologie ».

- ***Les prélèvements radiocarbones***

Trois échantillons, en vue de datation au radiocarbone, ont été réalisés le long de la séquence sédimentologique et palynologique au repère 35 m de la coupe du paléochenal occidental. Ces échantillons ont été confiés au laboratoire de datation au radiocarbone de Poznàn (Pologne). Ils permettent de mieux connaître l'âge des sédiments ainsi que d'estimer le taux de sédimentation moyen au cours de la mise en place de la séquence.

3.2.2.3. La géométrie des dépôts sédimentaires

- ***Le profil géophysique géoradar***

Dans un souci de clarté, l'échelle horizontale est donnée en mètres tandis que l'échelle verticale est donnée en temps double (ns). Les deux réflecteurs supérieurs continus représentent l'interface antenne/air et l'interface air/surface du sol et ne doivent pas être considérés comme des informations stratigraphiques. Dans les 50 premiers nanosecondes environ, les réflecteurs de faible intensité, discontinus, et parfois chaotiques correspondent au volume labouré, c'est à dire la terre végétale. La résolution verticale est équivalente à $\lambda/2$, ce qui dans le cas de notre étude (Fmoy 70 MHz et V=90m/s) représente une résolution théorique comprise entre 30 cm et 50 cm. Sur le profil radar du paléochenal occidental (Figure 3.19), deux secteurs présentent des réponses différentes à la fois en terme d'intensité et en terme de géométrie des réflecteurs électromagnétiques. Le premier secteur se développe dans la partie Ouest du transect entre les repères topographiques 0 et 60 m. Les réflecteurs y sont de faible intensité, ce qui indique un faible contraste diélectrique, donc lithologique, entre les différents corps sédimentaires détectés, composés essentiellement de particules grossières résistantes (ensemble 1).

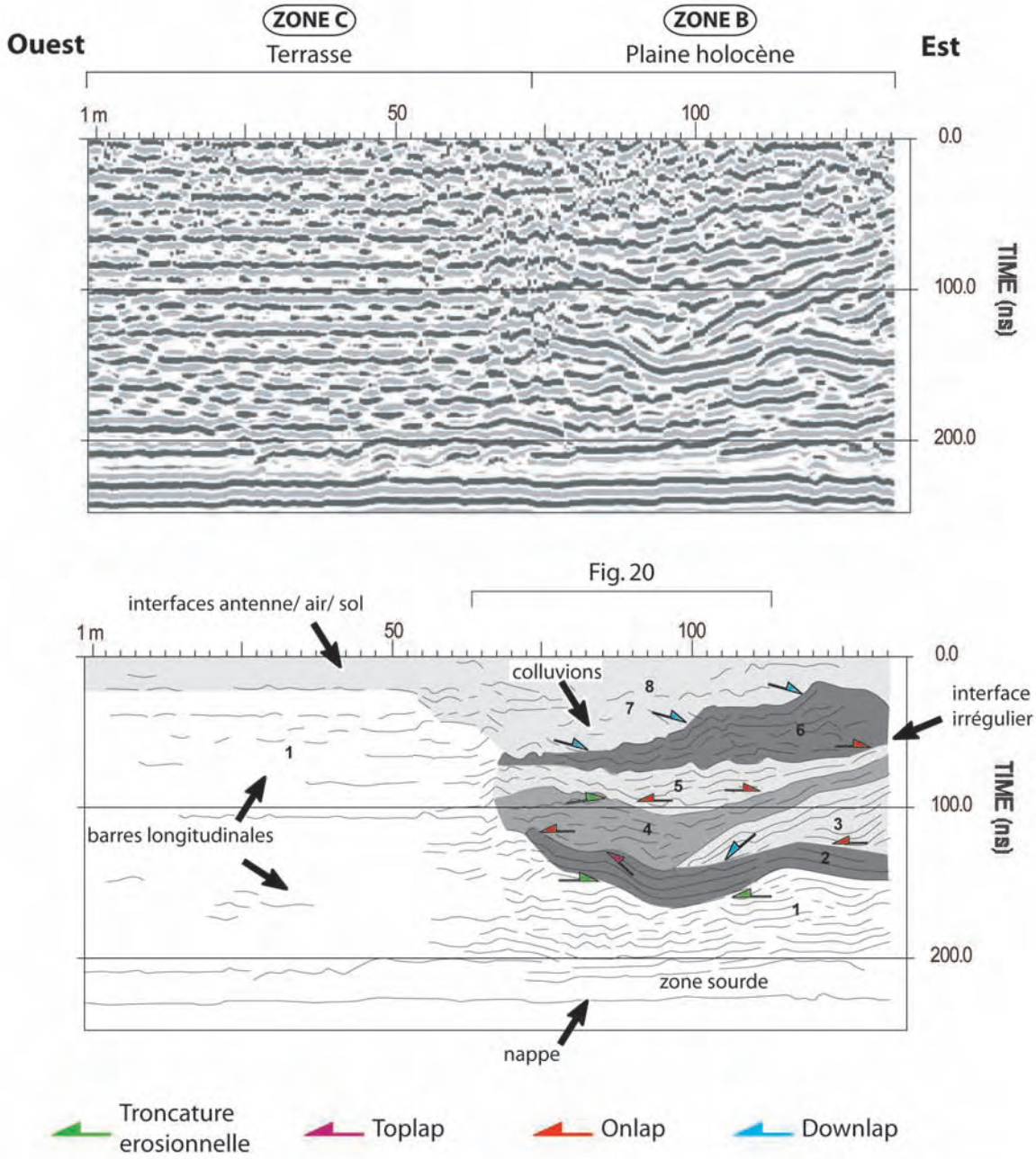


Figure 3.19 : Profil radar du paléochenal occidental et son interprétation

La fréquence utilisée lors de l'acquisition est de 100 Mhz permettant une investigation théorique de plusieurs mètres. Huit grands ensembles composant le remplissage sédimentaire du paléochenal sont identifiées en fonction de leur géométrie et de l'intensité des ondes réfléchies.

La terrasse (1) est composée de barres longitudinales amalgamées caractèristiques d'un système en tresse. Au repère 60 m, une première incision de la plaine alluviale est matèrialisée par un reflecteur quasi-continu.

Un premier comblement du paléochenal correspond aux ensembles 2, 3 et 4.

Une seconde incision affecte ce remplissage assez homogène à partir du repère 80 m.

Le second remplissage correspond aux ensembles 5 et 6 constitués de particules fines absorbent beaucoup d'énergie.

L'ensemble 7, composé de réflecteurs chaotiques correspond à des colluvions venant de l'Ouest.

L'ensemble 8, correspond aux interfaces antenne/ air/ sol.

De plus, ces réflecteurs ne sont continus qu'à l'échelle de quelques dizaines de mètres, parfois moins, et présentent une forme légèrement bombée. Ces nombreuses discontinuités peuvent être interprétées comme résultant de l'amalgamation de ces formes d'origine alluviale. Ce faciès électromagnétique peut donc être interprété comme de nombreuses barres longitudinales amalgamées et composées de particules grossières plutôt bien triées vues en coupe transversale. Ce type de formation est caractéristique d'un système en tresses. La géométrie des barres graveleuses weichséliennes qui sont sub-affleurantes au niveau de la terrasse (Zone C) peut être imagée. Ces barres sont parfaitement déterminées sur une profondeur atteignant plusieurs mètres.

Dans la partie orientale du profil, du repère 60 m au repère 132,5 m, se développe le second secteur correspondant à la zone géomorphologique B. Plusieurs corps sédimentaires présentant des faciès et des géométries différentes sont identifiables.

A la base du transect, vers 200 ns, la nature des réflecteurs indique la présence en profondeur d'un obstacle à la détection, zone sourde, pouvant être soit des couches très conductrices (argiles) soit plus probablement la présence de la nappe phréatique.

Plus haut, entre 150 et 200 ns, c'est-à-dire à plusieurs mètres de profondeur, d'autres réflecteurs de faible énergie, relativement discontinus sont repérés. Ces réflecteurs présentent un faciès assez similaire à ceux détectés dans la partie Ouest du profil, bien que légèrement déformés autour des repères 60-80 mètres, en raison de la variation topographique du rebord de la terrasse graveleuse weichsélienne (**ensemble 1**). On observe ici une géométrie correspondant encore à des barres longitudinales de système en tresses. La faible énergie est ici probablement due à la présence d'eau dans les sédiments.

A la verticale de ces réflecteurs, vers 150 ns, une importante et première discontinuité est matérialisée par l'interface entre une série de réflecteurs, ondulés, sinueux, très énergétiques et continus à l'échelle de plusieurs dizaines de mètres et les réflecteurs sous-jacents. Du point de vue géométrique, cette première discontinuité décrit avec les réflecteurs précédents, un contact discordant correspondant à une troncature érosionnelle affectant la formation graveleuse.

Cette première incision, bien visible, entame donc la terrasse weichsélienne et correspond certainement à la base d'un très large paléochenal attribuable à l'Holocène ancien ou au début du Tardiglaciaire. Le fond de ce chenal est semble-t-il assez irrégulier à l'échelle d'une cinquantaine de mètres. Cette irrégularité permet la mise en évidence de deux dépressions chenalisantes. Les réflecteurs continus sus-jacents de l'**ensemble 2** forment un contact en *Onlap* avec cet interface et présentent un espacement assez régulier, ce qui atteste de la nature isopaque des couches constituant ce premier remplissage du paléochenal. La topographie initiale reste après le dépôt de l'ensemble 2, assez ondulé avec deux dépressions majeures chenalisantes.

Au dessus de cet **ensemble 2**, entre 100 et 150 ns, l'**ensemble 3** correspond à une série de réflecteurs relativement continus à l'échelle de plusieurs dizaines de mètres et assez fortement énergétiques. Ils

sont surtout observés dans l'extrémité Est du profil. Ces réflecteurs présentent un contact avec les réflecteurs sous-jacents d'abord en *Onlap*, à l'Est, puis en *Downlap* vers l'Ouest. Ils traduisent la présence d'un remplissage sédimentaire alluvial dont les couches sont d'épaisseur constante (couche isopaque) mais de lithologie variable passant de classes granulométriques relativement grossières (sables) à des classes plus fines (limons) d'après le fort contraste diélectrique. Ces réflecteurs peuvent être interprétés comme des dépôts alluviaux probablement mal triés (typique des fonds de chenaux ou des barres de chenaux en tresses) comblant en premier lieu le chenal le plus à l'Est puis seulement une partie du chenal le plus à l'Ouest.

Une seconde discontinuité est ensuite suggérée par un contact en *Toplap*, au sommet de l'ensemble 2 entre les repères topographiques 70 et 100m et entre 90 et 130 ns.

Un nouveau remplissage, **ensemble 4**, est observé postérieurement à cette discontinuité, et présente des réflecteurs venant en *Onlap* sur l'**ensemble 3** ainsi que sur l'interface le séparant de l'**ensemble 2.**

Ces réflecteurs continus à l'échelle de plusieurs mètres et d'intensité relativement élevée suggèrent que ce remplissage est composé de dépôts alluviaux mal triés et plutôt grossiers (sables de fond de chenal).

Le changement de géométrie entre l'ensemble 3 et l'ensemble 4 suggère un passage graduel entre des dépôts correspondant surtout à des barres alluviales vers des dépôts de fond de chenal. C'est-à-dire que l'ensemble 3 correspondrait ou traduirait un système plutôt en tresses avec amalgamation des barres pouvant prograder dans le chenal. L'ensemble 4 traduit plutôt un système méandriforme avec un chenal largement asymétrique pour lequel l'aggradation du fond du chenal est plus rapide que l'aggradation de la plaine d'inondation.

Le sommet de l'**ensemble 4** est par la suite affecté, surtout dans sa partie située la plus à l'Ouest, par une discontinuité de nature érosive comme l'indique la géométrie des réflecteurs.

La topographie du chenal devient alors plutôt symétrique en contrebas de la terrasse. Les réflecteurs de l'**ensemble 5** forment un contact en *Onlap* sur les réflecteurs sous-jacents. Cela indique une aggradation du fond du chenal. La nature des réflecteurs, relativement discontinus et d'énergie assez faible, laisse penser que la lithologie de cet ensemble varie peu et est relativement fine. Le pendage de ces réflecteurs est orienté vers l'Ouest. On verra plus loin que l'observation de terrain confirme la richesse de ces dépôts en matière organique.

Au sommet de cet **ensemble 5** on observe l'interface irrégulier et ondulé par endroit le séparant de l'**ensemble 6**. Bien que cette discontinuité ne soit pas marquée par des réflecteurs tronqués, il est clair que cela correspond à un changement de sédimentation dans le chenal. Cela est en effet attesté d'une part, par la nature énergétique des réflecteurs de l'**ensemble 6** venant en *Onlap* sur l'**ensemble 5** et d'autre part, par la migration des dépôts centre déportés vers l'Est au sein de l'ensemble 6. Les réflecteurs au sein de l'ensemble 6 sont par ailleurs relativement ondulés et discontinus, surtout dans la

partie située au delà du repère topographique 100 m. Nous verrons plus loin que ces irrégularités correspondent à une réalité lithologique (voir infra).

Enfin, l'**ensemble 6** est scellé par des réflecteurs plutôt chaotiques, correspondant aux **ensembles 7** et **8**. L'**ensemble 7** est compris entre les repères topographiques 50 m et 100 m. Ces réflecteurs, présentant une géométrie en *Toplap* par rapport aux réflecteurs sous-jacents, correspondent à des dépôts hétérométriques sans litage venant probablement du rebord de la terrasse par colluvionnement de façon sub-contemporaine avec les derniers dépôts alluviaux.

L'**ensemble 8**, formé par de nombreux réflecteurs discontinus correspond au sol agricole remanié.

Le géoradar constitue donc un outil qui permet de rendre compte de la géométrie du remplissage holocène du paléochenal occidental, même si ces observations géophysiques doivent être confirmées et précisées par les observations sédimentologiques.

➢ *La coupe du paléochenal occidental : faciès et géométries*

La coupe du paléochenal occidental a permis la reconnaissance de la géométrie des corps sédimentaires alluviaux qui se sont déposés au cours des derniers 10.000 ans. L'intérêt de la connaissance de ce paléochenal est qu'il ne présente, a priori, que peu ou pas du tout de dépôts anthropiques et que seuls les dépôts alluviaux naturels y sont enregistrés. Il est possible d'envisager que ce paléochenal enregistre une dynamique alluviale du Rhin au cours de l'époque antique. Différents faciès peuvent être décrits le long de la coupe, ce sont les faciès g, c, a, b, h (Figure 3.20).

A partir de la description de ces faciès et de la géométrie des couches observées, il est alors possible de formuler une interprétation paléoenvironnementale ainsi qu'un phasage des différents événements qui se sont produits.

✓ *Phase 1/ La mise en place des galets et graviers*

Le sommet de la terrasse weichsélienne a été recoupé par la tranchée réalisée à la pelle mécanique. Il constitue le substratum de notre étude sur l'ensemble du secteur et peut être observé quasiment à l'affleurement à l'extrémité Ouest de la tranchée. Cette formation composée essentiellement de graviers et de galets imbriqués parfois avec une matrice sableuse grossière correspond au faciès g. Ce faciès correspond à des dépôts alluviaux généralement grossiers (le plus gros galet moyen est compris entre 6 et 10 cm. A son sommet se développe un calcrète, encroûtement carbonaté sur la surface des grains, spécifique de la zone vadose. Ce faciès grossier rencontré sur la terrasse weichsélienne correspond à des paléobarres. L'agencement en barres longitudinales, également observable sur le transect radar est caractéristique d'un système en tresses. Au niveau de la coupe du paléochenal occidental, le faciès g correspond à la couche notée US 7.

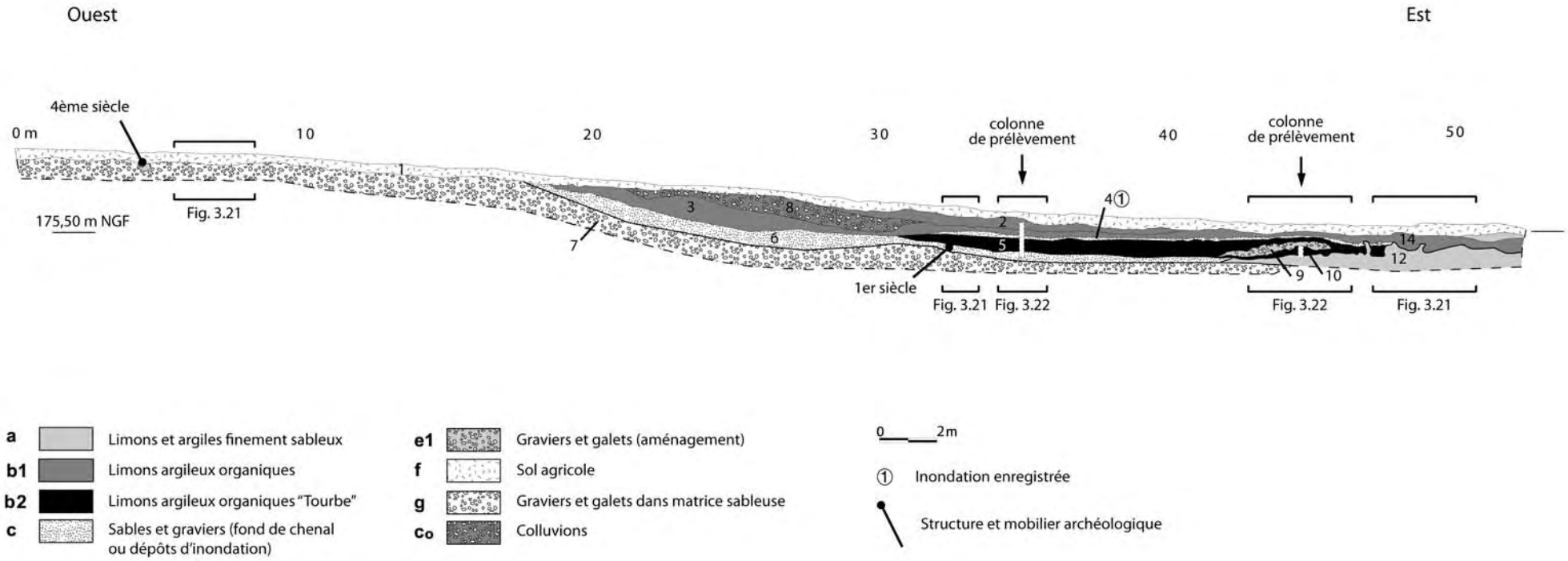


Figure 3.20 : Coupe stratigraphique du paléochenal occidental, levée au 1/50.

✓ *Phase 2/ L'incision de la terrasse weichsélienne*

Comme sur le profil radar précédemment décrit, le relevé de la coupe stratigraphique permet de suivre une large incision affectant la formation weichsélienne composée de galets et graviers (faciès g). Cette incision date probablement de la fin du Weichsélien ou du Tardiglaciaire comme dans de nombreuses plaines alluviales françaises (Seine, Oise, Somme…). En effet, cette première incision pourrait correspondre à la mise en place de larges chenaux, entraînant de ce fait, la formation dans la plaine du Rhin supérieur de larges chenaux sinueux caractéristiques du système alluvial en anastomoses. Le large chenal qui en résulte présente un fond dont l'altitude avoisine la cote 184,5 m NGF. Il est reconnu ici sur une largeur d'environ une trentaine de mètres, mais nous savons grâce à la réalisation du profil radar ainsi que par le relevé topographique qu'il atteint en réalité une largeur de plus de 70 m.

Pour résumer, au cours du Weichsélien (notamment au Pléniglaciaire supérieur), la plaine du Rhin présente un style en tresses sur l'ensemble de sa largeur, comme en témoignent les photographies aériennes. La plaine se différencie avec, à l'Est, une bande de tressage large et, à l'Ouest, des chenaux adoptant un style en méandre et anastomosé. L'incision de la terrasse se produit lors de la transition Weichsélien/Tardiglaciaire, lorsque le flux hydrique augmente. Au cours du Tardiglaciaire, une fois la terrasse incisée, les différences entre l'Est et Ouest se poursuivent, ce qui entraîne le développement à l'Ouest de larges chenaux sinueux à grand rayon de courbure formés par des bifurcations successives dans le secteur où l'accommodation est la plus importante. Cette différence d'accommodation pourrait être d'origine tectonique.

✓ *Phase 3/ Le premier comblement : les dépôts sablo argileux (faciès a)*

Le paléochenal observé est ensuite comblé par des dépôts assez fins. Il est composé de dépôts correspondant à la couche limono sableuse US 12. Cette formation, qui présente une granodécroissance, est stérile à la fois en mobilier archéologique et en restes organiques macroscopiques. Elle présente une variabilité granulométrique assez grande à la fois verticalement et latéralement, passant de limons sableux (faciès a1), à la base et vers l'Est à des limons argileux (faciès a2) au sommet et vers l'Ouest. Aucune structure sédimentaire élémentaire n'est observée, probablement en raison de la bioturbation intense en contexte humide.

Le faciès a est représenté tout d'abord par une couche de limons sableux relativement bien triés et de couleur jaune qui comble la partie la plus à l'Est de ce grand paléochenal. Cette couche se développe jusqu'à la cote 185,5 m et évolue graduellement vers un faciès de plus en plus fin, mais encore noté a en raison du mode de dépôts comparable.

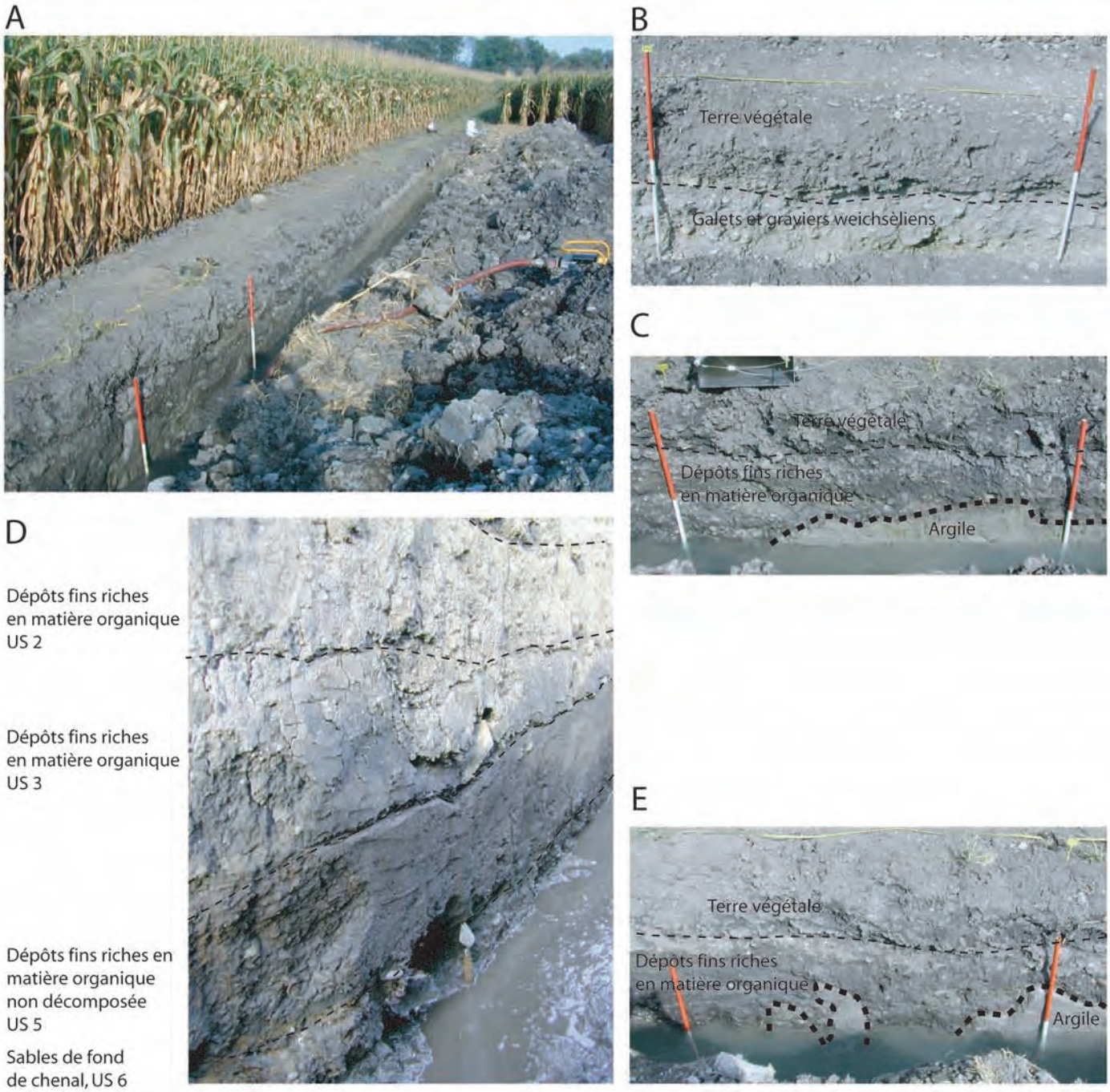


Figure 3.21 : Observation des diffèrents faciès présents dans le comblement du paléochenal occidental.
A/ Vue vers l'est de la tranchée réalisée dans le paléochenal occidental.
B/ Vue des graviers et galets à matrice sableuse composant la terrasse weichsèlienne (faciès g).
C/ Contact discordant entre les argiles (faciès a) correspondant au premier remplissage du paléochenal et les dépôts organo-détritiques (faciès b) correspondant au second remplissage du paléochenal.
Le contact est marqué par le tracé pointillé.
D/ Sables de fond de chenal (US 6). Sur cette vue, on distingue les restes d'un élément métallique correspondant à une tôle en bronze, probablement un élément de casque romain. Au dessus de la couche de sables se développe une séquence essentiellement composée de fines riches en matière organique.
E/ Circonvolutions observées à l'interface entre la couche argileuse (US 12) sous-jacente et la couche organo-détritique (US 3) sus-jacente. Cette déformation des sédiments s'est produit après la mise en place des dépôts organo-détritique dans le chenal.

Le faciès a correspond donc à une couche passant latéralement et graduellement de limons sableux à des limons argileux pouvant avoir, en fonction des conditions d'oxydation/ réduction, une couleur jaune claire à gris-bleu. Ces sédiments témoignent d'un hydrodynamisme qui diminue graduellement dans le chenal.

Dans sa partie orientale, le sommet de cette première formation (US 12) se compose de limons finement sableux et argileux plastiques homogènes gris. Cela traduit de conditions hydrodynamiques assez faibles à la fin de cet épisode détritique. Enfin, le toit de cette formation présente (Figure 3.21), par endroit, des irrégularités (circonvolutions) difficiles à interpréter (figures de charges, chablis, seismites).

Ce comblement est attribuable au Tardiglaciaire, d'une part par analogie avec d'autres bassins-versants connus en France et d'autre part par l'analyse palynologique.

✓ *Phase 4/ La seconde incision du chenal Tardiglaciaire*

Après le dépôt de la couche de fines (US 12), une seconde phase d'incision se produit. Elle reprend en partie le tracé du thalweg de l'ancien chenal mais sa largeur est bien moindre (25 m environ).. Cette seconde incision est profonde et atteint de nouveau les graves weichséliennes sous-jacentes à une cote de 184,5 m, mesurée au point topographique 40 m, mais son remplissage très différent est essentiellement organique.

✓ *Phase 5/ Première phase de comblement du second chenal*

Une couche de sables grossiers à moyens (US 6) de couleur grise se dépose dans le paléochenal et est enregistrée essentiellement dans la partie Ouest du profil. Ce faciès de fond de chenal, mal trié, est noté c. Sa variabilité latérale est assez importante, notamment dans la proportion de graviers plus ou moins épars. Ce faciès est caractéristique de chenaux actifs et pérennes présentant un débit assez élevé dans la plaine alluviale du Rhin. Cela indique une reprise importante de l'hydrodynamisme de ce chenal du Rhin avant l'occupation humaine dans le secteur d'Oedenburg. Au cours du dépôt de cette formation sableuse pendant l'activité du chenal, les premières traces de l'occupation humaine sont attestées. En effet, dans l'US 6 ont été retrouvés plusieurs éléments de mobilier archéologiques typiques de l'époque romaine et notamment du premier siècle après J.-C. Les éléments qui ont été découverts sont une plaque de bronze (probable fragment de casque), ainsi que plusieurs tessons de céramiques attestant de l'activité humaine antique à proximité du chenal (Figure 3.21). Cette couche US 6, sableuse, de couleur grise et contemporaine de l'occupation antique présente un taux de carbonate voisin de 10%, ce qui témoigne de l'origine rhénane des sédiments, et de l'origine détritique

de ce niveau. De plus, elle présente un faible taux de matière organique (1,3%) dont une assez forte proportion doit être infiltrée depuis la couche sus-jacente. En effet, les conditions hydrodynamiques déduites de la taille des particules laissent penser que l'établissement dans le chenal d'une végétation importante, ou bien du dépôt dans le chenal de particules organiques en suspension, est peu probable. Le chenal était donc sans doute actif et peu encombré par la végétation.

L'étude granulométrique montre une texture limono sablo argileuse (Argiles : 13%, Limons : 61%, Sables : 26%) avec une courbe d'abondance relative plurimodale. Cela peut indiquer que les particules les plus fines se sont déposées après les sables dans les espaces libres entre les grains (macroporosité) alors que le chenal était encore en eau. Il est donc très probable que les différentes populations de grains soient diachroniques.

La composition granulométrique mesurée est donc probablement due à un remaniement des sédiments par bioturbation lors de la phase de tourbification suivante. Cela permet d'expliquer la présence à la fois de particules grossières et de particules beaucoup plus fines probablement déposées par décantation lors de l'étape suivante où la végétation envahit le chenal.

Parmi les différentes populations de grains mesurées, les plus abondantes sont :

_ la première sableuse, dont le mode est proche de 230 µm, et qui correspond au sédiment mis en place dans le fond de chenal lorsqu'il était actif.

_ la seconde finement sableuse dont le mode est proche de 84 µm,

_ la troisième est limoneuse dont le mode se situe à 38,9 µm,

_ les autres populations de grains plus fins sont moins bien triées, ce qui traduit les conditions de dépôts sous forme de colloïdes de toutes tailles dans le chenal en cours d'atterrissement.

✓ *Phase 5/ La deuxième phase du remplissage*

Surmontant les dépôts sableux de fond de chenal actif, se met en place la séquence de dépôts correspondant à la deuxième phase de remplissage. Ces dépôts sont caractéristiques de la séquence type d'atterrissement et de comblement de chenal, cependant quelques spécificités remarquables sont présentes... En effet, après la période d'activité du chenal et le dépôt de la couche de sable gris, un changement majeur dans le mode de sédimentation est observé. Cette deuxième phase se fait en plusieurs étapes distinctes, comprenant plusieurs types de dépôts principalement riches en matière organique. Plusieurs faciès sont donc reconnus au sein de cette séquence datant de l'époque romaine. De nombreuses analyses ont été réalisées sur cette séquence afin de caractériser l'évolution du paysage alluvial au cours de l'époque antique.

▪ *Phase 5.1/ La mise en place de la sédimentation organique*

Au milieu du paléochenal l'arrêt de la sédimentation alluviale type fond de chenal permet la mise en place de dépôts riches en matière organique, caractéristique des chenaux abandonnés et déconnectés dans les plaines alluviales. Ces dépôts scellent complètement, dans la partie Ouest du paléochenal, les dépôts correspondant aux couches sous-jacentes US 6 et US 12.

La première étape de cet épisode organique correspond à la couche organo-minérale de type « tourbe de bas marais » de couleur brun foncé, US 10, d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur composée de matière organique végétale non décomposée (Figures 3.21 et 3.22). Cette couche peu épaisse est circonscrite dans la partie médiane du paléochenal. Elle témoigne d'une période d'importante diminution de l'hydrodynamisme dans le chenal où se développe une importante végétation associée au dépôt d'une importante quantité de débris végétaux. Le mode de sédimentation majeur se fait par décantation ce qui permet le dépôt des particules autochtones d'origine organique, définissant le faciès b2.

Ce changement majeur à l'échelle du paléochenal occidental est encore difficile à expliquer cependant, des clefs d'interprétation sont disponibles grâce aux différentes études menées quelques centaines de mètres en amont et concernant des structures archéologiques présentes dans les chenaux. Ces différents travaux mettent en évidence une occupation romaine précoce dès le début du premier siècle des chenaux du Rhin sur le site d'Oedenburg. Les différents chenaux occupés ou au moins aménagés sont probablement à l'origine du changement de mode de sédimentation. En tout cas, cet événement majeur pour le chenal est contemporain de l'édification d'une voie Est-Ouest franchissant ce chenal quelques mètres plus en amont, ainsi que d'aménagements lourds apportés à plusieurs chenaux dans le secteur des temples. Ces aménagements constituent des obstacles à l'écoulement majeur dans les chenaux du site. Une origine anthropique dans ce changement de sédimentation n'est donc pas à négliger et pourrait permettre d'expliquer que l'on passe directement d'une sédimentation de fond de chenal à une sédimentation de chenal abandonné sans passer par une étape de transition de mises en place de dépôts détritiques fins.

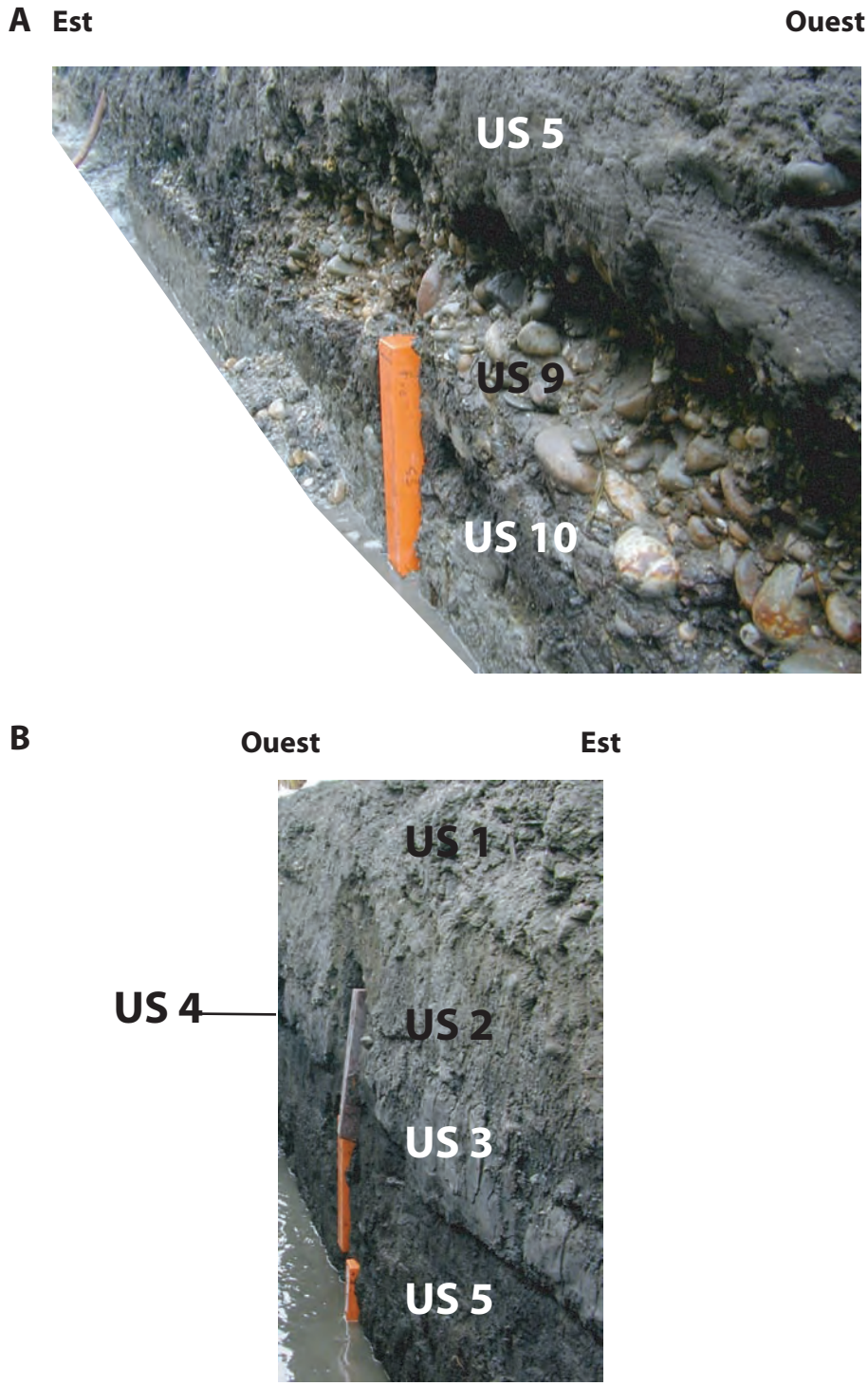


Figure 3.22 : Prélèvements réalisés dans la coupe.

A/ Prélèvement réalisé au repère 45m, dans la couche organique (US 10) située sous la barre de galet (US 9). La colonne de prélèvement mesure 40cm. La photographie représente la face sud de la tranchée et est orientée vers l'est.

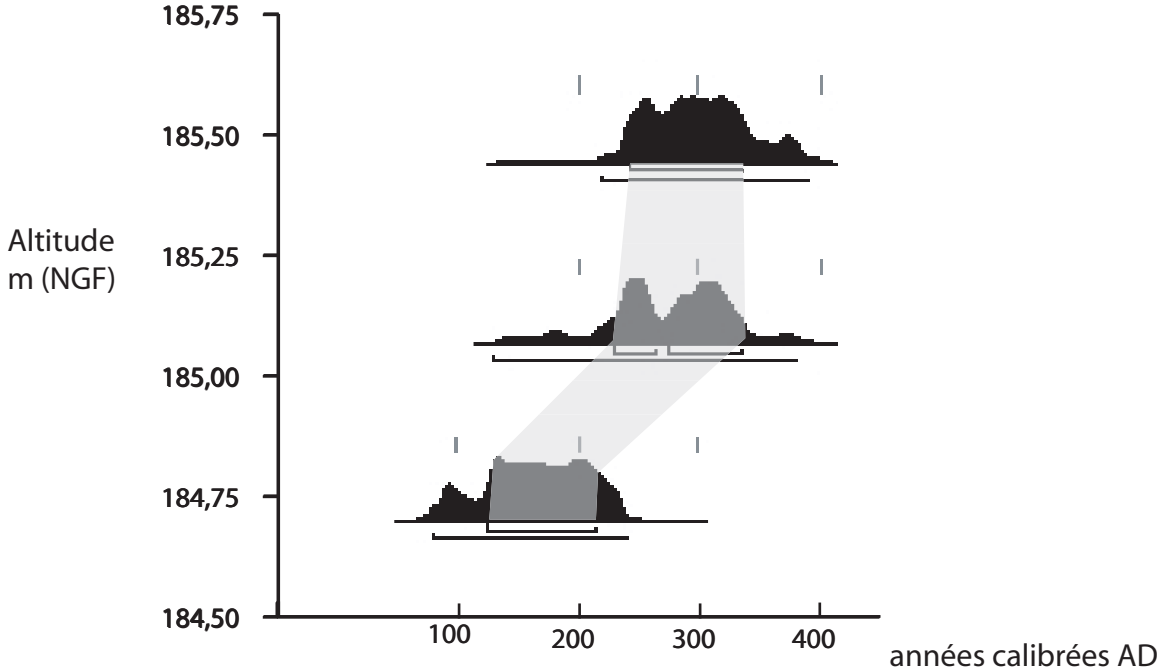
B/ Prélèvement réalisé au repère 35m, à partir de la couche sableuse (US 6) jusqu'à la couche organo-minérale (US 2). Les colonnes de prélèvement sont positionnées de telle sorte que la séquence se recoupe sur quelques centimètres. Chaque colonne mesure 40cm. La photographie représente la face nord de la tranchée et est orientée vers l'ouest.

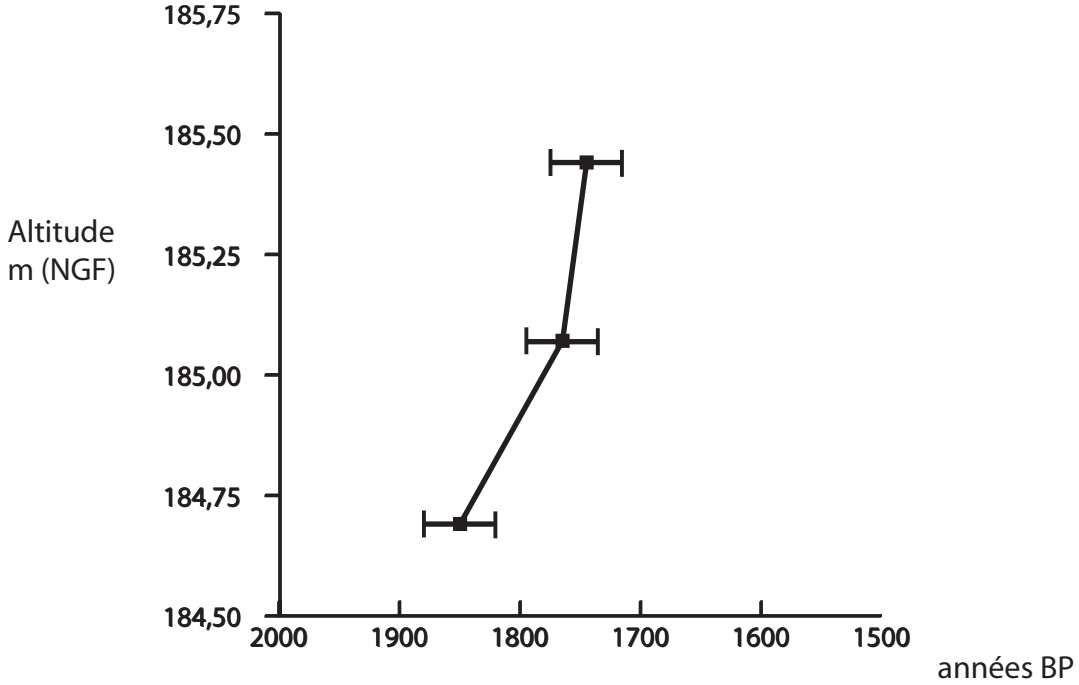
- ***Phase 5.2/ La mise en place d'une barre de galets et graviers au sein de la séquence organique***

Au sein de cette unité une barre de galets et graviers se met en place dans le chenal. Cette couche (US 9), observable sur la figure 3.22, présente un pendage vers l'Ouest, et son extension dépasse plusieurs mètres. Son épaisseur atteint par endroit 80 cm. L'interprétation de cet épisode grossier n'est pas simple. En effet, aucun élément mobilier archéologique pouvant permettre d'interpréter ce dépôt comme étant d'origine anthropique n'est observé. Cependant, la granulométrie de cette formation, très proche de celle de la terrasse, nécessiterait pour une mise en place naturelle, dans cette partie marginale de la plaine alluviale du Rhin, un débit très important de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres cubes par seconde. Le matériau (galets et graviers imbriqués avec peu de matrice sableuse) étant très comparable avec le ballast utilisé pour la voie romaine Est-Ouest fouillée à quelques centaines de mètres en amont et attestée du premier siècle, laisserai penser qu'il s'agit soit, d'un aménagement anthropique au sens strict, soit d'un dépôt d'origine alluvial permettant la remobilisation et le remaniement des galets et graviers venant de plus haut c'est à dire la voie ou la terrasse. L'hypothèse la plus probable en l'absence de surfaces érosives marquées est que cette barre constitue sans doute un segment de voie romaine construite dans le chenal. Elle correspond au faciès e1, d'origine anthropique, grossier et sans matrice fine.

- ***Phase 5.3/ La reprise de la sédimentation organique***

Un nouvel épisode organique est marqué par la présence de dépôts de la couche US 5, identiques à ceux de la couche US 10 (Figure 3.22). Elle correspond donc au faciès b2 et traduit des conditions environnementales humides dans ce chenal de la plaine d'inondation du Rhin. Celui-ci est déconnecté et obstrué en dehors des périodes d'inondations du Rhin. Le mode de sédimentation par décantation permet le dépôt des particules autochtones d'origine organique, avec de moins en moins d'apport détritique minéral. Au sein de cette couche des variations peuvent être détectées en fonction de la teneur en matière organique, de la taille des particules, de la variation de la teneur en carbonates.
La couche organo-minérale US 5 présente, d'après les résultats d'analyses, des variations de la base vers le sommet. Ainsi, de la cote 184,68 m à la cote 185,01 m, il existe une diminution de la teneur en carbonates liée à l'environnement de dépôt de plus en plus dominé par la décantation autochtone et avec de moins en moins d'apport détritique venant du Rhin. Ponctuellement, à la cote 184,79 m, la teneur importante en carbonate (11%) est due au dépôt des particules limoneuses par la reprise de l'activité du chenal.





	68.2% probability	95.4% probability
BK00 02/ TR1/ 35m/ 185.44 1745 ± 30 BP	245AD (68.2%) 335AD	220AD (95.4%) 390AD
BK00 02/ TR1/ 35m/ 185.07 1765 ± 30 BP	230AD (25.6%) 265AD 275AD (42.6%) 335AD	130AD (95.4%) 380AD
BK00 02/ TR1/ 35m/ 184.69 1850 ± 30 BP	125AD (68.2%) 215AD	80AD (95.4%) 240AD

Figure 3.23 : Modèle d'age de la séquence radiocarbone effectuée au repère 35 m de la coupe du paléochenal occidental.

En effet, les deux échantillons analysés pour la granulométrie montrent un bon tri unimodal vers 40 µm et une médiane vers 25 µm, ce qui traduit des conditions de dépôt assez calmes dans un chenal actif. Le taux de matière organique reste assez faible (environ 5%) dans cette phase encore assez détritique.

De la cote 185,01 m au sommet de la couche, à environ 185,42 m, le sédiment ne réagit plus à l'acide chlorhydrique alors que les particules expriment de plus en plus les caractéristiques granulométriques traduisant un environnement de dépôt par décantation (suspension uniforme). Les modes sont proches de 35 à 50 µm et les médianes comprises entre 18,6 et 40,9 µm. Cela indique une diminution de l'apport détritique sableux au profit de la fraction limoneuse. Cette observation est associée à l'augmentation graduelle du taux de matière organique passant de 5,6 % à environ 20 %. Le chenal est donc de plus en plus occupé par de la végétation au cours d'une période s'étendant de 1850 ± 30 années BP jusqu'à 1745 ± 30 années BP soit de 80 à 390 cal. AD à deux sigmas (Figure 3.23).

- ***Phase 5.4/ L'enregistrement d'un événement hydrologique extrême***

A la cote 185,42 m, et observable tout le long de la coupe (Figure 3.20), une couche continue composée de sables et de graviers de couleur orangée, scelle tous les dépôts antérieurs organo-minéraux et constitue ainsi une couche repère marquant un changement instantané du mode de sédimentation dans le chenal. Cette couche de couleur orangée, US 4, présente une faible épaisseur (quelques centimètres) relativement constante. Elle peut être interprétée comme la reprise d'un fort hydrodynamisme pendant un temps assez court correspondant à une crue. Le faciès correspondant est noté c2 en raison de la nature rappelant les sédiments caractéristiques du fond de chenal. Cette couche correspond à un petit épisode de reprise d'un fort hydrodynamisme, c'est-à-dire à une inondation du Rhin.

On verra que d'autres arguments, notamment la palynologie, attestent de l'existence de cet événement et de son impact majeur sur la forêt riveraine du Rhin. De plus, les datations au radiocarbone réalisées permettent d'attribuer un terminus post-quem à cet événement aux alentours de 1745 ± 30 années BP soit environ 220-390 cal. AD, à 2 sigmas (Figure 3.23).

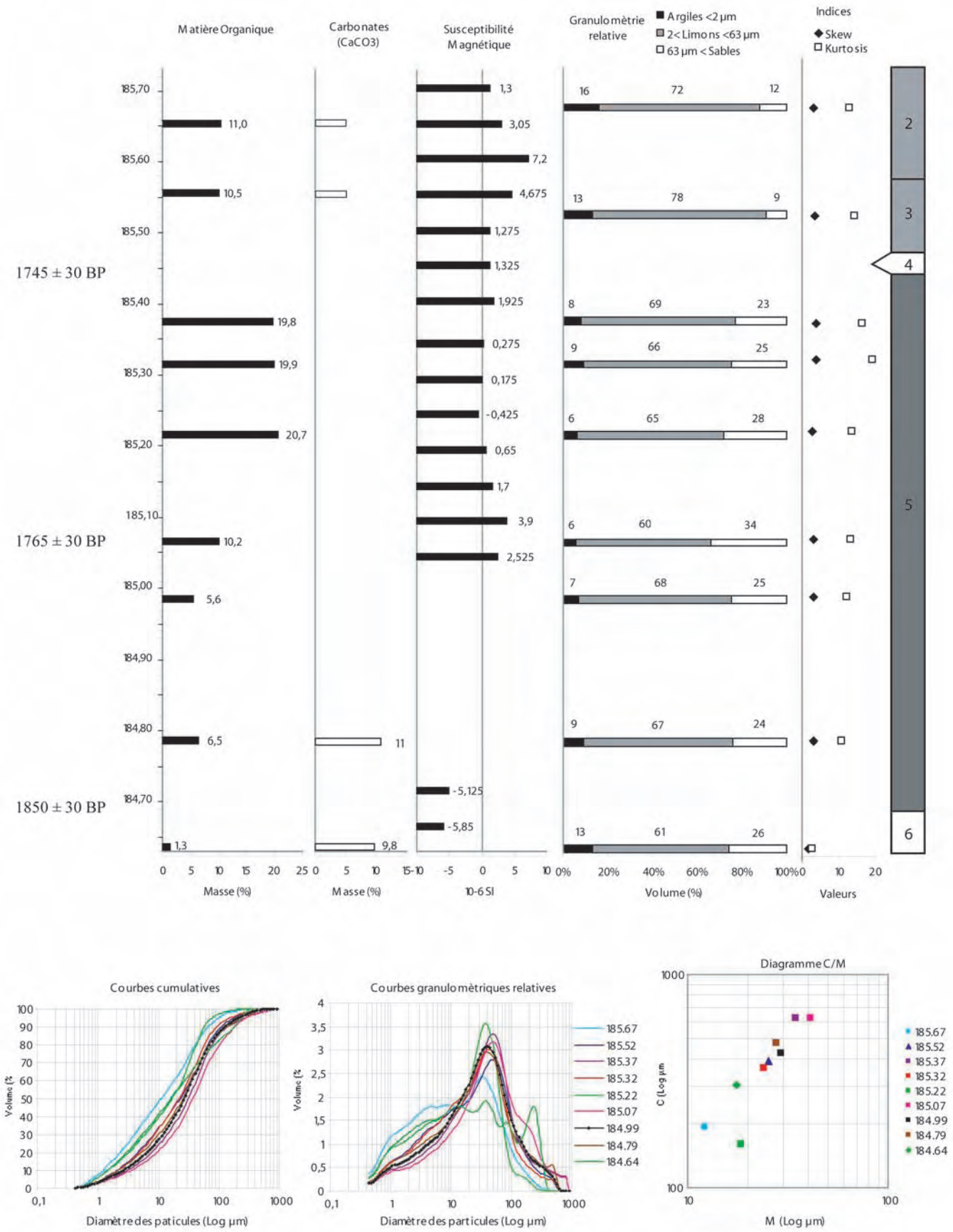


Figure 3.24 : Résultats d'analyses sédimentologiques de la colonne prélevée au repère 35 m.

▪ *Phase 5.5/ La reprise d'une sédimentation organique fine*

Après le dépôt continu, à l'échelle de la coupe, de sables et graviers d'inondation US 4, une nouvelle phase de comblement organique commence, mais présente des caractéristiques granulométriques bien différentes de celles observées pour les couches US 5 et US 10, appartenant au faciès b2 (Figure 3.21). En effet, la couche US 3 présente une granulométrie plus fine, mal triée, limono argileuse moins sableuse et une composition en matière organique plus dégradée sous forme d'agrégats (i.e. les particules organiques sont de même dimension que les particules minérales et semblent donc bien décomposées).

La couche 3 est donc composée de limons argileux organiques (Argiles : 13%, Limons : 78%, Sables : 9%). Cette tendance à la diminution de la fraction sableuse était déjà initiée au cours du dépôt de la couche US 5 (Figure 3.24). Cette continuité avec le niveau tourbeux US 5 est aussi marquée par la stabilité du mode qui reste proche de 50 µm et de la médiane proche de 25 µm. Cela traduit donc bien le retour des modes de dépôt par suspension uniforme et suspension gradée dans le chenal après l'épisode d'inondation marqué par la couche 4.

Cela indique aussi que l'apport sédimentaire diminue dans le chenal qui s'intègre probablement dans une dynamique de la plaine alluviale favorisant les débordements mais où l'apport sédimentaire est faible. Cela est tout à fait cohérent avec une augmentation du nombre de chenaux en anastomoses et/ou occupés par de la végétation. Ces dépôts correspondent au faciès b caractéristique des comblements de chenaux en cours d'abandon.

D'Ouest en Est, cependant, on peut remarquer une variation importante de faciès évoluant vers un faciès plus sableux (US 14). Cette différence est due à l'apport détritique événementiel venant du Rhin qui enrichit les sédiments en particules plus grossières tandis qu'en marge distale, seuls parviennent, les dépôts les plus fins.

Enfin, cette couche scelle complètement les dépôts antérieurs du paléochenal qui sont notamment affectés vers le repère topographique 50 m par des déformations importantes (circonvolutions). En effet, ces dépôts sont affectés par une déformation importante et interpénètrent les dépôts supérieurs de la couche 12 correspondant au faciès a2.

✓ *Phase 6/ La troisième phase du remplissage du paléochenal : les apports colluviaux*

Dans la partie occidentale du chenal se dépose près d'un mètre de dépôts sédimentaires, (US 8) intégrant de la matière organique, une importante proportion de particules fines (matrice sableuse) mais surtout des particules grossières de dimensions centimétriques à pluri centimétriques (graviers et galets). Cette formation de versant (avec des contributions alluviales), ne présente aucun litage ni aucune structure visible. Elle repose intégralement sur la couche US 3 et est limitée vers l'Est au repère topographique 33 m. Cette phase de colluvionnement correspond à un moment clef dans l'occupation de la plaine alluviale par les Romains. En effet, c'est au cours du quatrième siècle que la plaine est délaissée au profit de la terrasse pour l'installation d'une partie du *vicus*. Cet événement sédimentaire est donc probablement lié aux aménagements de la terrasse ayant pour impact de remobiliser une importante quantité de sédiments.

✓ *Phase 7/ La fin du remplissage du paléochenal*

Les derniers dépôts alluviaux se mettant en place dans le paléochenal correspondent à des dépôts fins organiques reconnus dans l'ensemble du site. Ces dépôts fins (US 2) et noirs traduisent de conditions très humides dans la plaine d'inondation du Rhin, à la fin de l'époque antique. Ces dépôts se placent en milieu de chenal et présentent une faible épaisseur (Figure 3.21). La composition granulométrique du paléochenal (Argiles : 16%, Limons : 72%, Sables : 12%) marque une condition de dépôt essentiellement par décantation avec une médiane vers 12 µm (Figure 3.24).

✓ *Phase 8/ L'exploitation agricole de la plaine du Rhin*

La couche superficielle correspond aux couches sédimentaires sous-jacentes affectées par le remaniement et la déstructuration agricole. Il en résulte une granulométrie et une texture hétérogène que nous appelons terre végétale (Faciès h).

3.2.2.4. Les résultats d'analyses archéobotaniques

➢ *L'analyse des macro-restes végétaux*

Pour les niveaux riches en matière organique observés sur la coupe du paléochenal occidental (US 5 et 10) de grands prélèvements ont été réalisés pour une étude portant sur les macro-restes végétaux. Cette étude met en évidence la présence de plantes aquatiques et de berges humides telles que Carex, Juncus ou Nasturtium. De même, on note la présence de taxons caractéristiques de milieu eutrophisé telles que les rudérales (*Polygonum var. bidens*, *Ranunculus sceleratus*) ou Zannichellia, plante aquatique de milieu pollué. Cette association caractérise l'influence de l'homme sur le milieu naturel proche humide. Ces couches contiennent également des restes de noix, de raisin, de prune et de céleri introduits en Alsace par les Romains, ainsi que des céréales (Reddé et al., 2005).
De plus, un gradient d'eutrophisation qui augmente vers l'Ouest est mis en évidence au sein de la couche 5 par deux prélèvements effectués aux repères 31 et 39 m, c'est à dire vers le rebord de la terrasse où sont documentées les structures archéologiques fouillées de la *mansio*, bâtiment public du 4ème siècle de notre ère. Les résultats de l'étude archéobotanique des macro-restes nous renseignent sur l'utilisation de certaines plantes et permettent d'éclairer l'analyse palynologique. Elle atteste de l'usage de certains taxons détectés dans les diagrammes polliniques à l'échelle de la famille.

➢ *Les résultats de palynologie*

Trois colonnes palynologiques ont été réalisées pour la coupe du chenal occidental. Par ordre chronologique la plus ancienne séquence d'une longueur de 40 cm à été prélevée au repère 65 m (Figure 3.25), puis une deuxième d'une longueur de 40 cm a été prélevée au repère 45 m (Figures 3.20, 3.22 et 3.26) et enfin une troisième et dernière colonne d'une longueur de 110 cm a été prélevée au repère 35 m (Figures 3.20, 3.22 et 3.27).

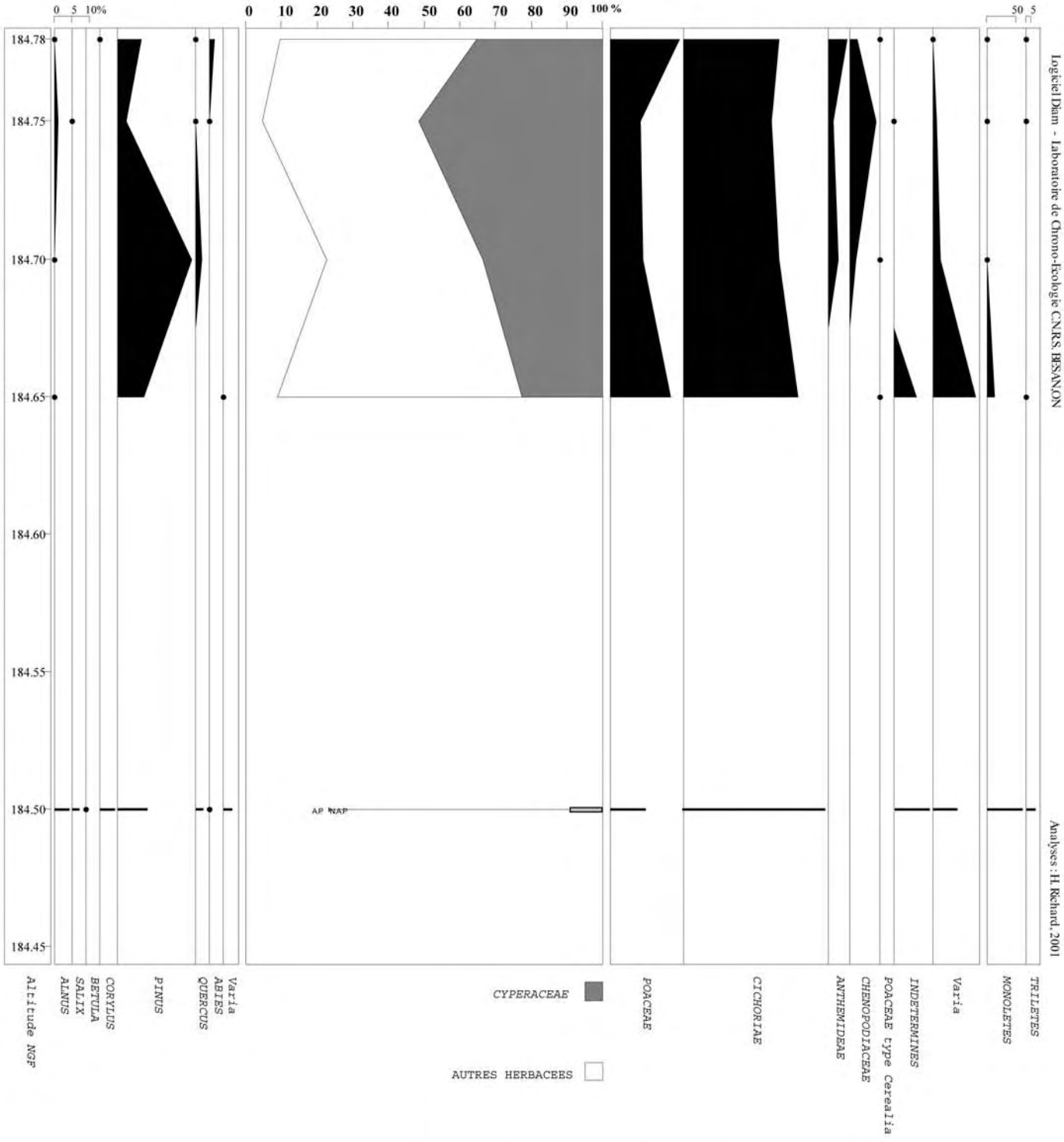


Figure 3.25 : Colonne palynologique du chenal occidental réalisée au repère topographique 65m.
L'analyse réalisée par H. Richard permet d'attribuer cette première séquence au Tardiglaciaire en raison des forts taux de pollens d'herbacées, les pollens arboréens étant dominés par Pinus.

✓ *La colonne palynologique au repère 65 m*

La première colonne palynologique réalisée au repère 65 m de la coupe du paléochenal occidental correspond à une séquence continue de la première phase de remplissage du chenal. Cela coïncide du point de vue lithologique à des dépôts limono argileux puis sablo limoneux anciens antérieurs à sa deuxième incision. Jusqu'alors, en l'absence d'élément de datation et donc sur la seule base des observations géomorphologiques et des corrélations possibles avec d'autres événements en Europe septentrionale, il avait été proposé pour ces dépôts une datation proche du début de l'Holocène ou du Tardiglaciaire, c'est-à-dire il y a environ 10.000 à 15.000 ans. En réalité, le diagramme pollinique (Figure 3.25) présente des taux de grains de pollen de Pinus élevés et met en évidence l'absence des taxons plus récemment introduits dans la région Nord de l'Europe comme les Ormes, le Noisetier, le Frênes, l'Erable. Cela suggère que cette séquence est attribuable au Tardiglaciaire (H. Richard, comm. pers.).

Les autres taxons arboréens présents comme Quercus, Abies et Alnus sont bien plus faiblement représentés. Leur présence indique au mieux un couvert végétal assez arboré dans le paysage à l'échelle régionale, c'est-à-dire la zone s'étendant des Alpes du Nord jusqu'à l'ensemble de moyenne montagne formé par les Vosges et la Forêt-Noire.

Ce paysage arboré traduit des conditions plutôt humides et froides pouvant correspondre à une période s'étendant du Dryas ancien au Dryas récent.

De plus, du côté des taxons non arboréens le nombre élevé de grains de pollen de Cichoriae semble indiquer une conservation différentielle probable ce qui est cohérent avec la proportion de sables constituant les sédiments de la couche dans laquelle ces prélèvements ont été réalisés.

Ce spectre est donc plus largement caractérisé par les taxons non arboréens. Parmi eux, il apparaît que les Cyperaceae dominent le spectre jusqu'à 50%, tandis que les Poaceae représentent toujours moins de 20%. Le paysage était donc largement ouvert, steppique dans la plaine et forestier sur les massifs environnants, inféodé à un climat froid et humide plutôt qu'à un climat tempéré comme on le connaît à l'heure actuelle.

La présence de grains de pollen de Cerealia, bien qu'en très faible nombre, ainsi que la forte présence relative de Poaceae, pourrait permettre d'attribuer cette couche au Dryas récent.

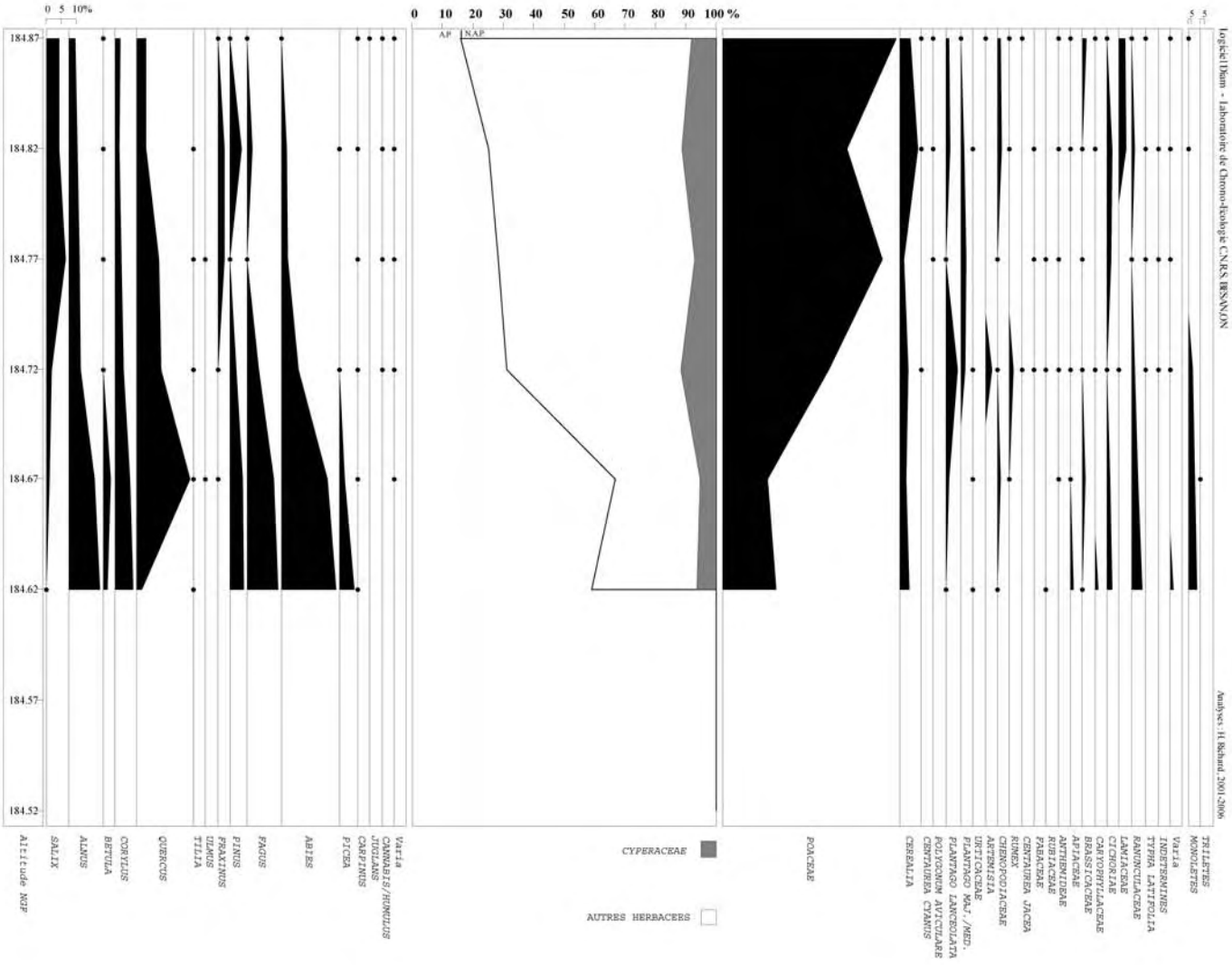


Figure 3.26 : Colonne palynologique du paléochenal occidental réalisée au repère topographique 45m.

Cette séquence est attribuable au 1er siècle après J.-C., d'après la datation des couches sus-jascente et sous-jascente. Au cours de cette période précoce dans l'histoire de l'occupation d'Oedenburg, une importante diminution des pollens arboréens se produit au profit des pollens de Poaceae. Cette ouverture du milieu est interprétable comme une phase d'abattage majeure.

✓ *La colonne palynologique au repère 45 m*

La deuxième colonne palynologique réalisée au repère 45 m correspond à une séquence continue de la base du remplissage organique du chenal antérieurement au dépôt de la couche de galets. Huit échantillons ont été prélevés tous les cinq centimètres au sein du remplissage sableux (US 6) de la cote 184,52 à 184,57 m puis organique (US 10) de la cote 184,62 à 184,87 m.

Le diagramme palynologique (Figure 3.26) présente dans son allure générale une tripartition telle que : de la cote 184,52 à 184,57 m inclue, aucun grain de pollen n'est observé. Cela coïncide à la couche 6, correspondant à des sables de fond de chenal actif pendant le début de l'occupation romaine, c'est-à-dire que les conditions hydrodynamiques n'ont pas permis le dépôt des grains de pollen. Puis, de la cote 184,62 à 184,67 m, une nette dominance des grains de pollen arboréen (*Arboreal Pollen*- AP) par rapport aux grains de pollen non arboréen (*Non Arboreal Pollen*- NAP) est observable. En revanche, de la cote 184, 72 à la cote 184,87 m ; les taux de grains de pollen arboréen diminuent de façon continue au profit de l'augmentation des grains de pollen non arboréen. Ces observations conduisent à l'établissement de deux zones polliniques locales ZPL1 entre 184,62 et 184,67 m et ZPL2 entre 184,72 et 184,87 m NGF en fonction de cette variation de la proportion entre AP et NAP.

▪ *La zone pollinique locale ZPL1*

Au cours de la première zone pollinique locale ZPL1, les grains de pollen non arboréens sont surtout représentés par les Poaceae et les Cyperaceae dont les valeurs sont comprises entre 20 et 10% de l'ensemble du cortège. Les céréales (Cerealia) ainsi que leurs adventices, comme par exemple les plantains (*Plantago sp.*), sont présentes et leur taux montre une tendance à l'augmentation tandis que les taux de Ranunculaceae et des spores monolètes, qui sont relativement élevés au début de la séquence, présentent une tendance à la diminution. Ces évolutions attestent de l'existence au voisinage du site d'un environnement humide en cours d'anthropisation.

Les grains de pollen arboréen, quant à eux, sont largement dominés par les taxons de bois dur, tels que *Abies sp.*, *Fagus sp.*, *Quercus sp.*, *Corylus sp.*, *Betula sp.*, *Alnus sp.*, bien que la présence de *Salix sp.* soit identifiée. Cela indique l'existence au cours de la première période d'un type de paysage très arboré, peu anthropisé et dominé par les forêts de bois dur.

Ce paysage devient, peu à peu, moins dominé par le couvert arboréen, et on observe une évolution de la forêt de bois dur initiale vers une forêt de bois tendre. Cela correspond à l'augmentation des indicateurs culturaux (Céréales et adventices) ainsi qu'au recul des Ranunculaceae et des fougères, faits possiblement liés à des pâturages et à des brûlis dominant lors de l'installation dans les environs d'Oedenburg avec l'arrivée des Romains.

- ***La zone pollinique locale ZPL2***

Au cours de la seconde zone pollinique locale ZPL2, les grains de pollen non arboréen sont encore largement représentés par les familles des Poaceae et des Cyperaceae. Cependant, alors que les Cyperaceae ne connaissent pas d'évolution remarquable, le taux de Poaceae quant à lui, augmente considérablement tout au long de la séquence.

Les grains de pollen arboréen qui étaient essentiellement composés précédemment par les taxons caractéristiques des stades forestiers intermédiaire et terminal voient au cours de cette zone pollinique d'importants changements. Une contribution plus importante des taxons caractéristiques du stade pionner tel *Salix sp.* est mise en évidence et s'accompagne d'une importante diminution d'*Abies sp.*, *Picea sp.*, *Fagus sp.*, *Pinus sp.* et *Betula sp.*. En revanche, *Quercus sp.*, présente aussi une diminution du taux de grains de pollen mais se maintient cependant à des valeurs proches de 5 à 10% du spectre.

Cela indique l'apparition, au cours de la seconde période, d'un nouveau type de paysage ouvert dominé par les herbacées et où le peuplement forestier de bois dur entre en compétition avec les populations de bois tendre. Cette tendance était déjà initiée lors de la ZPL1 mais est affirmée au cours de la ZPL2.

La séquence palynologique documentée au repère 45 m indique donc que le paysage initial (ou très peu de temps après l'arrivée des premiers Romains) présente des caractères forestiers marqués. Cette forêt correspond plutôt à un stade terminal alluvial mais subit très vite une métamorphose importante vers un stade où les taxons pionniers dominent. Cette métamorphose forestière accompagne l'abandon relatif des pratiques pastorales et le développement notable de la culture céréalière dans cette zone de la plaine alluviale du Rhin.

Il est probable que cette expansion des pionniers soit due à une exploitation intensive de la forêt alluviale originelle par les Romains lors de la fondation du site d'Oedenburg. Le début de cette séquence peut être attribué à la première moitié du 1er siècle d'après le mobilier trouvé dans la couche sableuse (US 6), tandis que la fin de cette séquence est antérieure au 2ème siècle d'après la date radiocarbone 1850 ± 30 BP réalisée grâce à un prélèvement dans la couche postérieure (US 5).

Ainsi la séquence réalisée au repère 45 m, correspond globalement au premier siècle après J.-C., au cours duquel, les camps militaires et le *vicus* se développent nécessitant beaucoup de bois, tant pour le chauffage que pour la construction. De plus, des dépôts d'inondations ont été reconnus sur le site attestant de la récurrence des événements affectant le bassin-versant du Rhin à cette époque. Tous ces événements auraient de façon équivalente pu permettre un rajeunissement de la forêt alluviale.

En raison de l'augmentation des nombreux indicateurs de l'activité anthropique, il semble que la première hypothèse soit la plus réaliste, et qu'il s'agit donc là d'un impact humain sur le couvert forestier alluvial. Les arbres et arbustes pionniers étant, d'une part, favorisés par l'espace libéré par les abattages en masse et, d'autre part, hors de portée de l'action de l'homme. De plus, le rôle d'écran

joué par le stade forestier terminal ne se faisant plus en raison de leur exploitation, les grains de pollen de *Salix sp.* peuvent alors atteindre plus aisément le paléochenal occidental et y être enregistrés.

✓ *La colonne palynologique au repère 35m*

La colonne palynologique réalisée au repère 35 m (Figure 3.20) correspond à une séquence continue et complète du remplissage sédimentaire postérieurement au dépôt de galets observé (US 9). Les 24 échantillons ont été prélevés environ tous les cinq centimètres, selon les limites de couches (Figure 3.22). Ils se répartissent entre l'unité sableuse grise (US 6) qui constitue la base du remplissage de 184,62 m à 184,67 m, un niveau riche en matière organique faiblement détritique (US 5), une unité limono argileuse finement sableuse riche en matière organique (US 3) et enfin une couche (US 2) argilo limoneuse organique (Figure 3.24). Cette dernière correspond à un épisode sédimentaire majeur reconnu dans l'ensemble du secteur d'étude. Il est représenté par des dépôts fins organiques qui scellent toute la plaine alluviale postérieurement à son abandon par les romains.
Les datations radiocarbones (Figure 3.23) ainsi que les artefacts (Figure 3.21) permettent d'attribuer l'ensemble de cette séquence palynologique à l'époque romaine, de la seconde moitié du 1er siècle jusqu'à la fin de l'occupation romaine.

▪ *Aspects généraux de la séquence pollinique à 35m*

Le diagramme (Figure 3.27) présente dans son allure générale une nette dominance des grains de pollen non arboréen avec 70 à 80% du cortège. Cela indique l'existence sur toute la période enregistrée d'un paysage largement ouvert.
Parmi cet important cortège des herbacées, la famille des Poaceae domine largement et participe à hauteur de 20% et le plus souvent jusqu'à 50% de l'ensemble du spectre pollinique.
Les Cyperaceae sont globalement moins bien représentés dans le spectre, mais peuvent atteindre près de 25% en fin de séquence. Leur présence peut attester d'une augmentation de l'humidité du milieu ou de débordement des chenaux du Rhin.
Le cortège est également marqué par la présence importante de plantes typique des zones anthropisées comme les plantes cultivées (Cerealia), leurs adventices ainsi que des rudérales. En effet, le taux de Cerealia dépasse souvent 5%, tandis que *Plantago major/media*, *Plantago lanceolata*, *Rumex sp.*, les Ranunculaceae, *Centaurea cyanus*, et *Centaurea jacea* sont bien représentés. Ces caractéristiques générales attestent de l'existence entre 1850 ± 30 BP jusqu'après 1745 ± 30 BP, d'un paysage largement ouvert à tendances humides, essentiellement herbacé mais avec une population arborée correspondant aux stades alluviaux successifs naturels (Salix, Quercus, …).

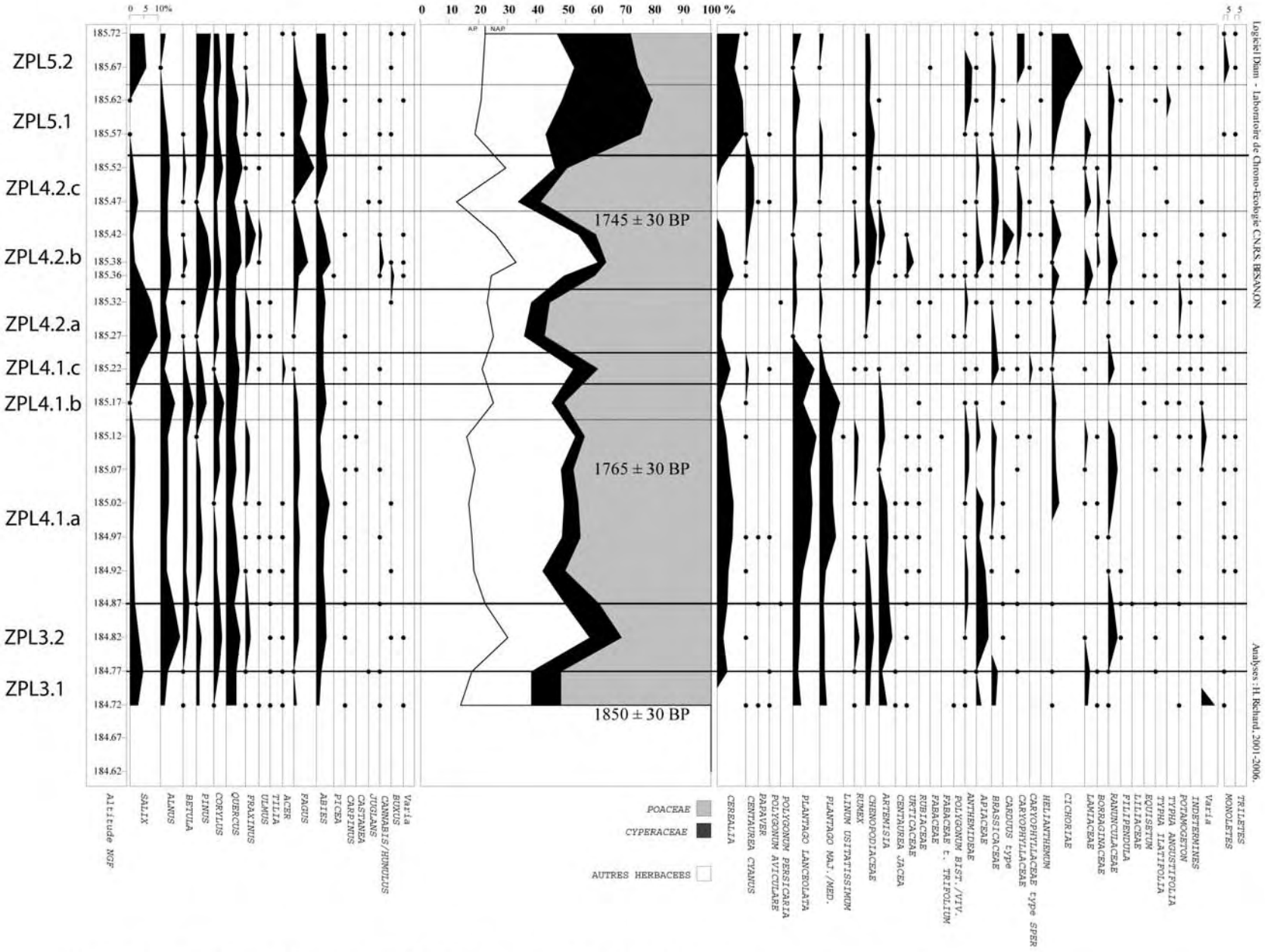


Figure 3.27 : Colonne palynologique du paléochenal occidental réalisée au repère topographique 35m.
Les augmentations et diminutions des taux de pollen de Salix et de Poaceae semblent alterner avec celles des taux de pollens d'arbres du stade forestier terminal et de céréales. Ces changements sont, pour la plupart, attribuables à des crues du Rhin.

Ce paysage est également largement anthropisé par des mises en cultures ainsi que par la mise en pâture des prairies humides.
Ce diagramme décrit l'évolution à la fois naturelle et anthropisé d'un paysage formé par une mosaïque complexe probablement assez proche dans son aspect général de ce qui nous est présenté par les cartes anciennes des 17ème et 18ème siècle.

- ***La zonation pollinique locale proposée***

Une zonation pollinique locale peut être proposée et fait suite à celle établie pour la séquence à 45 m. Entre les cotes 184,62 et 184,67 m (US 6), aucun grain de pollen n'est préservé. L'absence totale, même des plus résistants suggère qu'il s'agit ici d'une lacune de non dépôt.
A partir de la cote 184,72 m, l'enregistrement devient continu et sans lacune apparente avec un taux de sédimentation moyen de 5,17 mm/année calendaire. Trois grandes palynozones locales, ZPL3, ZPL4 et ZPL5, peuvent être distinguées en fonction de l'abondance des grains de pollen de Cyperaceae et de Poaceae. La ZPL3, s'étend entre 184,72 et 184,87 m. Elle est caractérisée par un taux de Cyperaceae supérieur à 10% tandis que le taux de Poaceae oscille entre 30 et 50%. Dans son ensemble, la ZPL3 est assez comparable avec la ZPL2 décrite plus haut. La ZPL4, s'étend entre 184,87 et avant 185,52 m, ce qui en fait la plus longue des zones polliniques locales décrites. Elle est caractérisée par une abondance de Cyperaceae inférieure à 10% tandis que le taux de Poaceae reste toujours proche de 50%. Enfin, dans le terme supérieur de la séquence, la ZPL5, s'étend entre 185,52 et 185,72 m. Elle montre une abondance en Cyperaceae supérieure à 25% tandis que le taux de Poaceae reste toujours inférieur à 25%.
Ces grandes tendances de changement de couvert végétal correspondent tout à fait aux changements sédimentaires observés. La transition observée entre ZPL4 et ZPL5, à la cote 185,46 m correspond au dépôt sableux événementiel d'inondation de l'US 4.

- ***La Zone Pollinique Locale ZPL3***

Sur la base des variations rapides des taux de grains de pollen non arboréen en général et de Poaceae en particulier, un découpage de la zone ZPL3 est proposé avec à la base ZPL3.1 jusqu'à la cote 184,77 m et au sommet ZPL3.1.
Au cours de ZPL3.1, le taux de plantes herbacées dépasse 85% du cortège. Le spectre pollinique est alors largement dominé par les Poaceae dont le taux est supérieur à 50%. Le taux de pollen arboréen est très faible mais présente une augmentation de 10% à la base jusqu'à environ 15%. De plus le

nombre de taxons représenté est également très faible, et seulement 6 taxons ont un taux supérieur à 1%. Les taxons les mieux représentés correspondent au groupe phytosociologique du stade forestier riverain pionnier représenté essentiellement par *Salix sp.* et *Alnus sp.*.

Au début de la sous-zone ZPL3.2, le nombre de grains de pollen de Poaceae diminue fortement pour ne plus représenter que 30% du spectre pollinique. Les autres taxons herbacés diminuent également puis présentent comme les Poaceae une augmentation. Le taux de *Plantago sp.* est alors relativement stable et représente un peu moins de 5% du cortège.

Le nombre de taxons ainsi que les taux de pollen arboréen augmente ce qui indique une diversification de la forêt riveraine correspondant au développement du stade intermédiaire. Cette sous-zone est caractérisée par des augmentations des taux de *Alnus sp.*, *Betula sp.*, *Corylus sp.*, *Quercus sp.*, *Fraxinus sp.*, *Fagus sp.* et *Abies sp.* tandis que *Salix sp.* caractéristique du stade pionnier diminue.

- ***La Zone Pollinique Locale ZPL4***

Pour la zone pollinique locale ZPL4, un découpage peut être proposé en fonction des variations importantes des taux de *Plantago lanceolata* et de *Plantago major/ media*.

A la base, entre 184,87 et 185,22 m, ZPL4.1 correspond à une période ou *Plantago sp.* peut représenter jusqu'à plus de 10% du cortège tandis que les Poaceae, les Cyperaceae et les arbres restent relativement stables. Inversement, au sommet, de 185,27 m jusqu'à 185,52 m, ZPL4.2, est caractérisée par la faible abondance de *Plantago sp.*.

Les indices d'anthropisation permettent de distinguer des phases d'emprises agricoles ainsi que des phases de pastoralisme. Les phases d'emprises agricoles sont en concordance avec les diminutions des taux de Poaceae et parfois avec des augmentations des pollens d'arbres.

La définition de phases d'augmentation de l'emprise agricole/ fermeture du milieu (ou flux pollinique des arbres qui augmente) permet de distinguer les sous-zones ZPL4.1a, et ZPL4.1.c, ZPL4.2.b. Ces périodes alternent avec les périodes de nette diminution des activités agricoles/ ouverture du milieu nommées ZPL4.1.b, ZPL4.2.a et ZPL4.2.c.

Au cours des périodes d'emprise agricole, les taxons arboréens attestent d'une évolution de la forêt riveraine du stade intermédiaire vers un stade terminal évolué peut-être entretenu/exploité (présence de *Fagus sp.*) par l'homme et qui voit la disparition ou la diminution des taxons propres aux stades pionniers et intermédiaires (*Salix sp.*, *Alnus sp.*, *Ulmus sp.*). Cette diminution de *Salix sp.* est due à l'absence de crues morphogénétiques.

Au contraire, les périodes d'ouverture du milieu et de déprise agricole sont associés à des changements rapides de la végétation correspondant au retour du stade pionnier qui domine la plaine alluviale. Ces modifications sont probablement dues à des événements hydrologiques extrêmes du Rhin comme

l'atteste le dépôts sableux de l'US 4 autour de 1745 ± 30 BP. Ils entraînent alors le rajeunissement de la forêt riveraine, mais également à un véritable changement de l'exploitation de la plaine.

- ***La zone pollinique locale ZPL5***

Au cours de la palynozone locale ZPL5, le taux de Poaceae diminue de façon importante puis connaît une nouvelle augmentation à partir de la cote 185,67 m. Ces variations permettent de distinguer les deux sous-zones ZPL5.1 et ZPL5.2.

Au cours de ZPL5.1, le taux de Poaceae passe de 50% à seulement 20% du cortège tandis qu'à l'inverse le taux de Cyperaceae présente une augmentation de moins de 5% jusqu'à près de 30% indiquant une augmentation de l'humidité. Les autres taxons herbacés sont aussi considérablement favorisés par le changement environnemental qui coïncide avec un changement majeur du mode de sédimentation dans le chenal (passage de l'US 3 à l'US 2).

Au cours de la ZPL5.2, les Poaceae sont encore faiblement représentés et évoluent peu. Les Cyperaceae présentent un taux encore largement supérieure à 20%. Les autres taxons herbacés sont stables, encore à des taux supérieurs à 20% du cortège.

Ainsi, au cours de ZPL5 qui correspond à l'abandon de la plaine par les Romains, le taux de Cerealia, augmente très rapidement en association avec la présence de quelques adventices *Plantago lanceolata*, Chenopodiaceae, Cichoriae Anthemideae, Brassicaceae, Ranunculaceae.

Les variations de taux de pollen arboréen attestent dans un premier temps de l'établissement d'un stade terminal forestier puis probablement de son exploitation. L'accroissement de pression anthropique sur le stade le plus évolué de la forêt alluviale peut être ici reconnu en raison du fait qu'il n'y a pas remplacement immédiat par les taxons pionniers et que le taux de céréales poursuit son augmentation. Cela signifie que la plaine alluviale est désertée en raison de conditions d'humidité importante (taux de Cyperaceae et de Ranunculaceae importants), obligeant les Romains à réaliser des abattages dans les forêts de stade terminal présentes sur la terrasse.

3.2.2.5. Conclusion

Cette tranchée réalisée à la pelle mécanique permet de rendre compte du relief existant entre la terrasse weichsélienne et la plaine alluviale holocène, approchant 3 m d'amplitude. Le paléochenal occidental constitue ici le lieu d'enregistrement sédimentaire privilégié des événements ayant lieu à la fois dans la plaine alluviale et sur la terrasse.

Les graves weichséliennes à l'affleurement en sommet de terrasse sont constituées de galets et graviers sableux agencés en barres longitudinales caractéristiques d'un système fluviatile en tresses à forte charge sédimentaire. Cette formation graveleuse a été largement incisée par un paléochenal au cours du Tardiglaciaire. Ce chenal avoisine 70 m de large. Une couche de sables jaunes bien triés comble ensuite ce chenal puis la sédimentation se ralentit permettant la mise en place de faciès plus fins.

Une deuxième phase d'incision se produit ensuite. Le nouveau chenal reprend en partie le tracé du précèdent mais sa largeur bien moindre atteint environ 20 m. Son fond atteint les graviers et galets sous-jacents. Le remplissage de ce chenal est complexe et permet la préservation de dépôts à la fois alluviaux et colluviaux. Dans un premier temps le fond de chenal présente des faciès sableux dans lesquels les premiers éléments de mobiliers archéologiques ont été repérés. La présence d'une tôle de bronze ainsi que quelques gros tessons de céramiques gallo-romaines indiquent que ce chenal était actif au début de la période de l'occupation antique.

Au cours du premier siècle, la sédimentation dans le chenal évolue vers des faciès riches en matière organique non décomposée. Cette phase de sédimentation autochtone dans le chenal atteste de sa déconnection par rapport aux apports sédimentaires du Rhin et semble induit par l'établissement d'une voie romaine quelques centaines de mètres plus en amont.

Au cours de cet épisode, l'évolution du couvert végétal met en évidence l'important impact anthropique sur les populations d'arbres de la plaine. L'occupation humaine apparaît comme le facteur dominant dans l'ouverture du milieu au cours du 1er siècle après J.-C.

Ce chenal en cours de comblement fait ensuite l'objet d'une tentative d'aménagement par la mise en place d'un important épandage de galets et graviers de plusieurs mètres de large.

Puis la sédimentation organo-minérale se remet en place aux alentours de 1850 BP jusqu'aux environ de 1745 BP, date à laquelle se produit un épisode hydrologique d'inondation dans le chenal, enregistré par un couche mince de sables et de graviers. Suite à cet événement extrême de nouveaux dépôts riches en matière organique se mettent en place mais sont, cette fois, composés de particules plus fines. Ces dépôts correspondent à la fin de l'occupation humaine dans la plaine alluviale abandonnée au profit de la terrasse.

Enfin, une épaisse couche de colluvions mal triées d'une puissance atteignant plus de 1,5 m se met en place sur le talus de la terrasse ; elles comblent latéralement la dépression du paléochenal. Plus à l'Est, ces colluvions moins épaisses passent latéralement à des argiles limono graveleuses remaniées par les

labours actuels. Ces graviers et galets mêlés à une matrice argilo limoneuse témoignent d'une déstabilisation des sols voisins et d'un épandage probablement liés aux travaux agricoles.

Au cours de cette phase de comblement du paléochenal l'évolution du couvert végétal, aussi bien naturel que cultural, semble inféodée à la dynamique du Rhin. La première relation établie concerne l'alternance entre phases culturales et phases d'humidité. La fin de l'occupation au 4ème siècle correspond même au paroxysme de cet impact alluvial sur les cultures. En effet, l'augmentation de l'humidité puis de la fréquence d'inondation dans la plaine alluviale va jusqu'à contraindre, d'une part l'abattage d'une partie des forêts de la terrasse pour l'établissement des cultures et, d'autre part, la migration des zones d'occupation sur celle-ci.

La deuxième relation établie concerne l'impact de l'établissement du stade forestier terminal sur l'occurrence d'événements hydrologiques dans le secteur.

La troisième relation établie concerne le rôle majeur de ces inondations dans le rajeunissement de la forêt riveraine et donc l'arrivée des taxons du stade pionnier dans le paysage. A la faveur de la diminution de la fréquence et de l'intensité des inondations, ce dernier peut alors évoluer vers les stades intermédiaires puis vers le stade terminal. De plus, on observe que l'abondance de *Salix sp.* dans le cortège est corrélée à l'abondance de certains taxons non arboréens parmi lesquels les Poaceae sont les mieux représentées. La récurrence de ces événements et de ces phases, tout au long de la séquence tend à confirmer les hypothèses présentes.

Figure 3.28 : Montage du Syscal Switch Junior.
L'appareillage est composé du résistivimètre (à droite), d'une batterie (à gauche) permettant l'alimentation électrique ainsi que d'une flute (en haut) reliée aux 24 électrodes plantées dans le sol formant le disposif d'acquisition de données.

3.2.3. Le paléochenal oriental et la zone des temples

3.2.3.1. Présentation

L'objectif est de décrire les autres paléochenaux du site d'Oedenburg, notamment le paléochenal oriental et les paléochenaux en tresses situés à proximité de la zone des temples. Le paléochenal oriental présente des caractéristiques qui le rendent important à étudier. D'une part, c'est le chenal le plus proche de la zone active du Rhin. D'autre part, les fouilles du camp militaire et de l'agglomération civile ont mis en évidence qu'il était actif pendant l'époque antique par la présence d'aménagements de berge en rive droite et de dépôts d'inondations enregistrés en rive gauche (Ollive et al., 2006). La connaissance précise de l'évolution de la dynamique sédimentaire au sein de ce chenal est donc un enjeu important.

3.2.3.2. Les méthodes employées

Une stratégie différente de celle menée pour l'étude du paléochenal occidental a été établie pour l'étude de ces paléochenaux. En effet, pour le paléochenal oriental, la géophysique radar s'est révélée complexe à mettre en oeuvre en raison de la présence de lignes à haute tension induisant un fort champ magnétique ayant pour conséquence de brouiller considérablement le signal. La présence de la ligne à haute tension, a causé la présence de grosses hyperboles de diffraction. Le profil était difficile à interpréter en raison de la mauvaise qualité du signal. Il a donc été décidé de (1) réaliser des profils électriques afin de localiser les chenaux et de documenter l'épaisseur de leur remplissage puis (2) de réaliser des sondages à la tarière mécanique afin de caractériser l'évolution sédimentaire. Cette méthode a ensuite été appliquée pour les autres paléochenaux.

- ***Principe et méthode de la tomographie électrique***

Ces dernières années ont vu le développement de nouvelles méthodes géophysiques grâce au développement à la fois de nouveaux appareillages adaptés au travail sur le terrain mais aussi aux progrès considérables dans les traitements informatiques. Parmi toutes les méthodes géophysiques, une des plus récentes, la tomographie électrique ou *Electrical Resistivity Tomography* permet d'atteindre des résultats significatifs pour la résolution d'un grand nombre de problèmes géologiques de sub-surface. Les progrès considérables de cette méthode, notamment par le développement d'algorithmes d'inversion permettent de passer d'une valeur de résistivité apparente mesurée à une résistivité réelle (Loke et Barker, 1996).

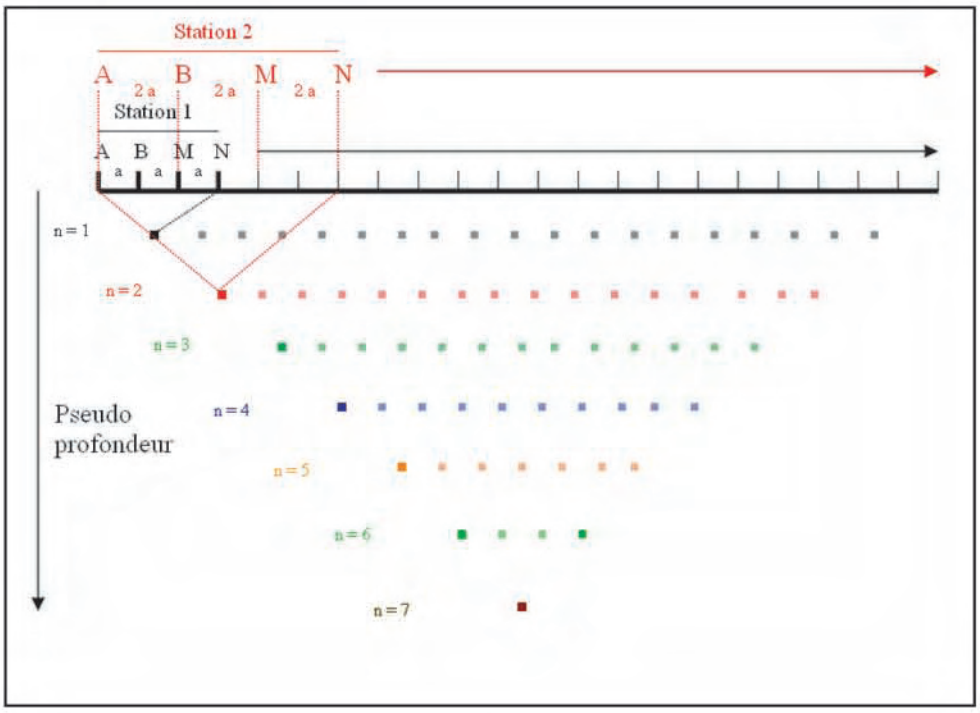


Figure 3.29 : Représentation du mode d'acquisition des données pour une pseudo-section (d'après Rémond, 2004).

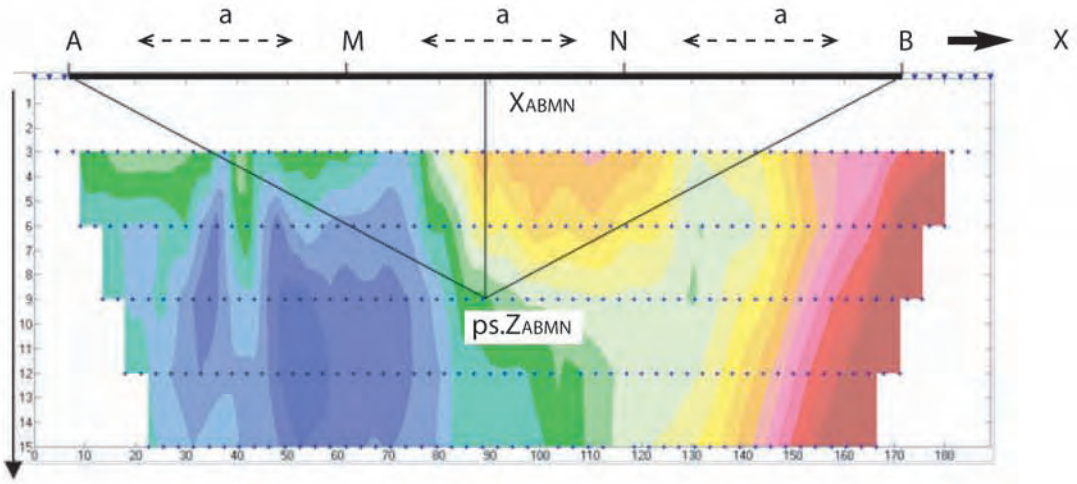
Cette méthode d'imagerie, bien que nouvelle est déjà largement utilisée afin d'obtenir des visualisations 2D ou 3D du sous-sol. Son champ d'application s'étend aujourd'hui à l'étude des failles actives ou non (Suzuki et al., 2000 ; Demanet et al., 2001 ; Rémond, 2004), dans des problématiques hydrogéologiques, environnementales, paléoenvironnementales (Baines et al., 2002 ; De la Vega et al., 2003 ; Maillet et al., 2005) en génie civil (Beresnev et al., 2002), et devient même d'un usage courant voire est sur le point de devenir incontournable en géoarchéologie (Appel et al., 1997 ; Shaaban et Shaaban, 2001 ; Rizzo et al., 2005).

La tomographie électrique comme toute méthode électrique est fondée sur la mesure de la résistivité apparente du sous-sol. Pour un sol, la résistivité va dépendre de nombreux paramètres tels que la teneur en eau, la porosité, la nature des différents constituants du sol, notamment de la teneur en argile, etc. L'appareillage utilisé est un résistivimètre de type SYSCAL Switch Junior d'Iris Instruments mis à disposition par l'UMR 5570 « Laboratoire des Sciences de la Terre » (Figure 3.28). Ce résistivimètre totalement automatique peut être connecté à des câbles reliés à de séries d'électrodes plantées dans le sol. Le mode d'utilisation choisi a été le mode d'acquisition automatique « Multi-Electrodes ».

Le dispositif utilisé ici est le dispositif Wenner. La configuration d'électrode utilisée par ce dispositif permet une bonne résolution d'investigation à faible profondeur, et est notamment conseillée pour l'étude des structures sub-horizontales, à la différence du dispositif pôle dipôle qui lui est recommandé pour une profondeur d'investigation plus importante. Ce choix a été orienté par la connaissance que nous avons du secteur d'étude et notamment des chenaux déjà observés d'une part grâce à la fouille archéologique et d'autre part grâce à la tranchée géoarchéologique réalisée dans le paléochenal occidental. En plus, de ce choix lié au dispositif, préalablement à l'acquisition de terrain proprement dite, la géométrie du quadripôle électrique a été choisie afin d'avoir une résolution verticale et horizontale adaptée à l'objet étudié, i.e. le comblement holocène des paléochenaux du site d'Oedenburg. Cette géométrie dépend de l'espacement entre les différentes électrodes composant le quadripôle dans chacun des dispositifs utilisés. En effet, c'est la profondeur d'investigation qui dépend de l'espacement inter électrodes (a). Dans l'étude présente, un espacement de 2 m, a été adopté, étant donné que la profondeur d'investigation attendue était de l'ordre de 5 à 7 m, donc suffisante pour des remplissages de paléochenaux dont l'épaisseur attendue est de l'ordre de 4 m environ.

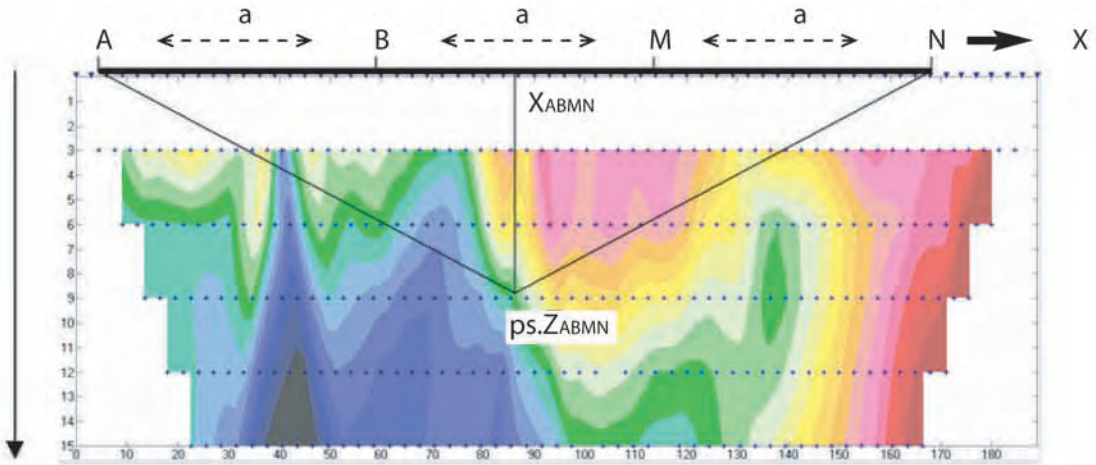
Deux séquences, c'est-à-dire les deux programmes d'acquisition des données ont été chargées dans le résistivimètre afin de permettre l'automatisation sur le terrain de la prise de mesure correspondant à chacun des deux dispositifs utilisés, à savoir les dispositifs Wenner Alpha et Wenner Beta. D'un dispositif à l'autre, le nombre, la position et l'espacement des électrodes sont constants et seul le quadripôle est modifié (Figure 3.29). La pseudo section définie pour chaque séquence est composée pour 24 électrodes espacées de 2 m soit une longueur couverte de 46 m.

Dispositif Wenner alpha



Pseudo-profondeur

Dispositif Wenner béta



Pseudo-profondeur

Figure 3.30 : Représentation des dispositifs Wenner alpha et Wenner béta pour l'aquisition d'une pseudo-section (modifié d'après Rémond, 2004).

A chacun des dispositifs d'électrodes, pour un quadripôle donné, correspond un facteur géométrique (K), une pseudo-profondeur (ps.Z) et une abscisse de mesure (X). La distance (a) entre deux électrodes consécutives est constante.

Le dispositif Wenner alpha fixe mieux les interfaces en profondeur et lisse les hétérogénéités de surface.

$K = 2\Pi.a$ XABMN = (M + N) / 2 ps.ZABMN = AB / 3

Le dispositif Wenner béta est plus sensible aux variations latérales de surface du fait d'une sensibilité accrue dans l'environnement proche des électrodes (Seaton, 2002).

$K \approx 6\Pi.a$ XABMN = (B + M) / 2 ps.ZABMN = BM

Chacune pseudo section ainsi obtenue est recouverte au deux tiers pour éviter au maximum la perte d'information et les erreurs dues à l'interpolation de données non existantes. Le nombre de pseudo sections varie avec la longueur de transect voulue.

A chacun des dispositifs d'électrodes, pour un quadripôle donné, correspondent un facteur géométrique (K), une pseudo profondeur (ps.Z) et une abscisse de mesure (X) (Figure 3.30).

L'utilisation de deux types de dispositifs, Wenner Alpha et Wenner Beta, est préconisée afin de permettre une amélioration de la qualité des résultats. En effet, le premier fixe mieux les interfaces en profondeur et lisse plus les hétérogénéités de surface, tandis que le second est plus sensible aux variations latérales de surface du fait d'une sensibilité accrue dans l'environnement proche des électrodes. Les deux séries de mesures sont combinées pour le calcul du modèle inverse, bénéficiant ainsi de la sensibilité verticale du Wenner Alpha et de la sensibilité latérale du Wenner Beta (Al-Fares et al., 2001). On remarque cependant que la combinaison des deux est plus influencée par le dispositif Wenner Beta que par le Wenner Alpha, ceci étant du à l'inversion elle-même (C. Camerlinck, comm. pers.). Une description des trois modèles générés, est nécessaire pour une interprétation géologique cohérente.

Les données sont transférées vers un PC, puis stockées sous le logiciel ELECTRE avec pour chaque pseudo section un fichier de données correspondant à la séquence utilisée.

Les fichiers correspondant aux différentes pseudo sections sont ensuite traités sous X2IPI, logiciel permettant la concaténation des données. Le but de ce premier traitement est de représenter les résistivités apparentes mesurées sous forme de transect, qui reflètent qualitativement la variation spatiale de la résistivité apparente. Lors de cette étape, les points ayant une mauvaise qualité de mesure sont supprimés dans un premier temps.

Une fois le transect construit et filtré, il est possible d'obtenir un profil de la variation de la résistivité calculée, grâce au logiciel d'inversion Res2Dinv. Chaque point de mesure est alors considéré comme une surface augmentant avec la profondeur et à laquelle sont liés un pourcentage d'incertitude et une sensibilité relative. En règle générale la sensibilité est forte pour les points situés près de la surface, ils vont jouer un rôle important dans l'inversion. En revanche, plus les points sont profonds et en bordure de profil, plus la sensibilité diminue et plus leur rôle dans l'inversion est négligeable. Le dispositif Wenner est moins contraint en bordure de profil que le dispositif pôle dipôle (Rémond, 2004).La méthode d'inversion se compose en plusieurs étapes :

1/ Un modèle est élaboré à partir des données de résistivité apparentes mesurées.

2/ L'algorithme calcule ensuite la réponse de ce modèle par l'intermédiaire d'une acquisition fictive où il calcule les résistivité apparentes à partir des résistivité vraies. On obtient alors le profil calculé.

3/ L'algorithme détermine alors le degré de différence entre les données mesurées et les données calculées. Le modèle est ensuite modifié dans le but de diminuer le degré de différence (erreur).

Figure 3.31 : Appareil de forage mécanique en cours d'utilisation au niveau du paléochenal oriental. Cet appareil tout terrain permet à la fois le prélèvement de cuttings à la tarrière ou de colonnes.

L'opération est alors répétée de manière itérative jusqu'à ce que le processus converge (c'est-à-dire que l'erreur ne diminue plus de manière significative). En général, quelques itérations suffisent, après l'erreur diminue peu et l'algorithme a tendance à introduire des aberrations (Loke et Barker, 1996 ; Loke et Dahlin, 2001).

Une fois l'inversion réalisée et la topographie intégrée au modèle ; les profils sont traités sous le logiciel Surfer. Un transect définitif est obtenu ce qui permet une interprétation géologique des variations de résistivité calculées.

➢ *Les forages*

Une fois la géométrie du remplissage des différents paléochenaux déduite grâce à l'approche de tomographie électrique, il a été possible de positionner les forages à réaliser (Figure 3.31). En fonction de l'intérêt des paléochenaux observés, plusieurs séries de sondages à la tarière mécanique et à la sonde Russe mécanisée ont pu être réalisées. Cela a été possible grâce au concours sur le terrain d'H. Richard de l'UMR 6565 « Chrono-écologie ».

Plusieurs faciès sédimentaires ont été observés. Ils appartiennent à la fois au faciès de chenaux tels que les faciès de fond de chenal ou de barres, mais peuvent aussi appartenir aux faciès de plaine d'inondation et de chenaux abandonnés. Ils permettent de proposer une reconstitution de l'évolution des paléochenaux situés dans la partie orientale du secteur d'Oedenburg, à proximité de la zone ou se sont installés les militaires romains dans le courant du 1er siècle après J.-C. Cela permettra notamment de savoir si le large paléochenal oriental actif durant l'antiquité possédait un tirant d'eau suffisant pour permettre la navigation jusqu'au camp militaire.

➢ *La micro granulométrie*

Comme précédemment, ces analyses ont été réalisées à l'Université de Bourgogne au laboratoire de Réactivité du Solide. L'appareil utilisé est un granulomètre submillimétrique par diffraction de la lumière laser aux petits angles de type COULTER LS 130 permettant ainsi de quantifier la part respective des argiles (< 2 µm), des limons (< 63 µm) et des sables (< 2 mm). L'analyse micro granulométrique de plusieurs échantillons a donc été réalisée avec une gamme de détection théorique comprise entre 0,3 µm et 1 mm.

➢ *Les prélèvements palynologiques*

Le long des carottes prélevées, plusieurs échantillons ont été réalisés en vue de tester les potentialités de préservation des grains de pollen dans les séquences sédimentaires de comblement de chenaux du site. L'analyse palynologique réalisée par H. Richard, permet l'identification de problèmes liés d'une part à des conditions hydrodynamiques peu favorables au dépôts des grains de pollens et d'autre part à des conditions de variations de la nappe phréatique constituant alors le principal facteur de taphonomie par la destruction des grains de pollen dans les sédiments.

➢ *La fouille de la zone des temples*

Les fouilles de la zone des temples, dirigées par C. Schucany et P.-A. Schwarz de l'Université de Bâle ont permis la mise en évidence d'importants aménagements anthropiques dans l'un des paléochenaux en tresses. Plusieurs phases majeures permettent de décrire l'évolution et la chronologie de cet ensemble cultuel ainsi que l'histoire du remplissage d'un des paléochenaux en tresses (Reddé et al., 2005).

3.2.3.3 La géométrie des dépôts sédimentaires

Plusieurs profils de tomographie électrique ont été réalisés sur le site avec la collaboration de F. Rémond. Ces profils ont été réalisés sur plusieurs paléochenaux repérés en fonction de leurs potentialités géoarchéologiques. Ainsi, quatre profils ont été réalisés dans la plaine alluviale du Rhin. Deux d'entres eux ont été réalisés pour le large paléochenal méandriforme situé dans la partie orientale du site. Un troisième, dans la même zone, a été disposé afin de connaître le remplissage d'un paléochenal antérieur au paléochenal oriental et perché sur la Zone A. Enfin, un quatrième et dernier transect a été réalisé dans la partie Sud de la zone B afin de décrire la géométrie des chenaux en tresses se plaçant à proximité de la zone des temples.

- ***Le paléochenal oriental***

  - ***Le profil électrique 1 du paléochenal oriental***

Observations

Le premier profil, orienté Sud- Nord, est localisé dans la zone géomorphologique B entre les points de coordonnées X=988124, Y=2353169 et le point X=988160,6, Y=2353015,6.

Sa longueur est égale à 158 m c'est-à-dire que huit panneaux ont été réalisés pour sa création.

La figure 3.32 présente les résultats des trois modèles Wenner Alpha, Wenner Beta et Wenner Alpha + Beta. Pour le premier modèle, après 5 itérations, l'erreur RMS est de l'ordre de 1,3%, tandis que pour les deux suivants après 4 itérations, l'erreur est respectivement égale à 2.0% et 1,8%. Cela signifie, dans un premier temps, qualitativement, que globalement les valeurs de résistivité vraies du modèle sont particulièrement bonnes c'est-à-dire, proches des valeurs de résistivité apparentes mesurées. Cette notion qualitative ne signifie cependant pas forcément que le modèle est « bon » au sens géologique, et constitue une indication purement théorique. Le choix de la qualité du profil inversé est donc surtout contraint par les connaissances géologiques.

Quelque soit le modèle considéré l'amplitude des valeurs de résistivité vraie issues des modèles d'inversion est comprise entre 0 Ohm.m et environ 1000 Ohm.m. Les pseudo profondeurs atteintes sont quasi équivalentes et comprises entre 182 m NGF au Nord et proches de 181 m NGF au Sud. Quatre ensembles distincts se dégagent en fonction des valeurs de résistivité (Figure 3.32).

Le **premier ensemble** correspond à une importante anomalie de résistivité faible où les valeurs de résistivité n'atteignent pas plus de 60 Ohm.m. Il est situé vers le centre du profil, du repère 40 au repère 100m, donc dans la zone la plus basse du paléochenal.

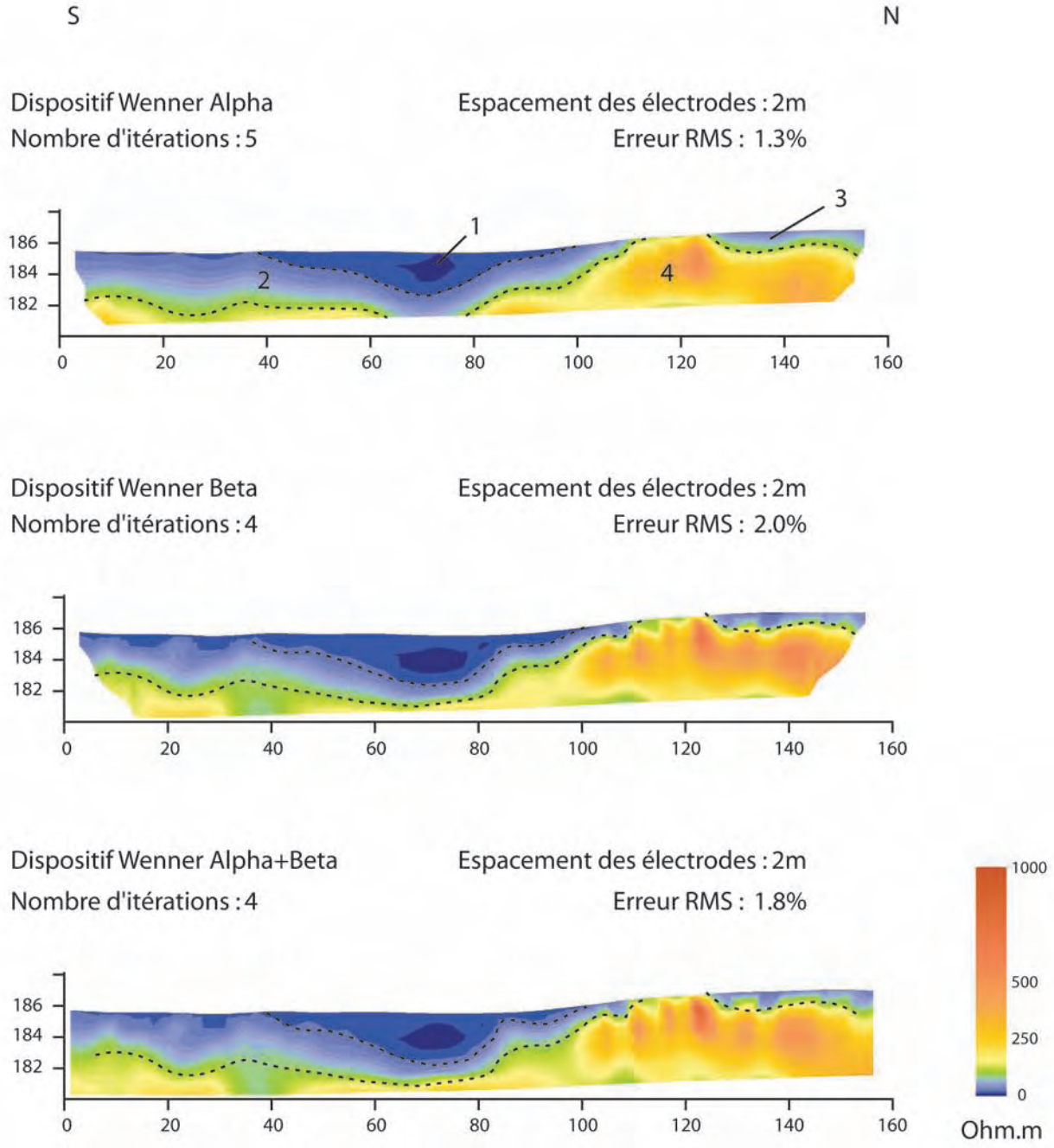


Figure 3.32 : Profil électrique 1 réalisé dans le paléochenal oriental.

Les trois modèles réalisés Wenner Alpha, Wenner Béta et Wenner Alpha + Béta tiennent compte de la topographie. Quatre ensembles s'individualisent en fonction des valeurs observées. L'ensemble 1 correspond à une anomalie de faible résistivité présente en sommet de séquence. Les ensembles 2 et 3 correspondent à des anomalies moyennes. Enfin, à la base, l'ensemble 4, correspond à une anomalie de forte résisitivité.

Cette anomalie est superficielle, et se place au dessus d'une autre anomalie correspondant au deuxième ensemble. La base de cet ensemble atteint la cote d'environ 183 m NGF.

Le **second ensemble**, correspond à une anomalie de résistivité peu élevée mais supérieure à l'ensemble 1. Cet ensemble se place d'ailleurs en continuité en ce qui concerne les valeurs avec l'ensemble 1 qui le surmonte. Son extension est plus large que l'ensemble 1, puisqu'il s'étend de la cote 0 à environ 110m. Sa géométrie, simple et bien contrainte, permet d'observer qu'il est sub-affleurant de chaque côté de l'ensemble 1, et plus épais dans sa partie Sud que dans sa partie Nord. La profondeur de la base de cet ensemble atteint environ la cote 181,5 m NGF. Cet ensemble surplombe l'ensemble 4 (Cf. Infra).La surface supérieure de cet ensemble vers le Sud semble irrégulière et affectée par des ondulations. Tandis que tous les modèles mettent en évidence une surface basale irrégulière, les modèles Wenner Beta et Wenner Alpha + Beta, mettent en évidence une anomalie au repère 35 m, de la base de cet ensemble. Cette anomalie mesure environ 6 m de large et ne constitue en réalité qu'un artefact.

Le **troisième ensemble**, est observé dans la partie Nord du profil du repère 125 m au repère 160 m. Les valeurs de résistivité sont très comparables aux valeurs mesurées pour l'ensemble 2, décrit précédemment, c'est-à-dire entre 60 et 100 Ohm.m. La profondeur de la base de cet ensemble atteint la cote 184 m NGF. Cet ensemble est donc largement plus superficiel que les deux ensembles précités.

Enfin le **quatrième ensemble**, constitue le substratum des unités précédentes puisqu'il est localisé systématiquement sous chacune d'entre elles. Son extension est observée sur l'ensemble du profil dans sa partie basale et il est présent à l'affleurement dans la partie médiane du profil, entre les repères 110 et 125 m.

Les valeurs de résistivité de ce dernier ensemble sont très supérieures aux précédent, puisqu'elles sont comprises entre 100 et plus de 1000 Ohm.m.

Interprétation

D'après les valeurs de résistivité électrique ainsi que la géométrie des différents ensembles observés, une première interprétation géologique est réalisable.

De la base au sommet du profil, les différents ensembles reconnus permettent une estimation de l'histoire du remplissage de cette partie du paléochenal oriental.

Les ensembles 1 et 2 correspondent à différentes étapes de remplissage d'un large paléochenal initial faisant le tour de la zone géomorphologique A.

A la base du profil l'ensemble 4 correspond à un ensemble composé d'un chenal large de plus d'une centaine de mètres dans la partie Sud du Profil et d'une île dans la partie Nord. Cette île très large d'après les photographies aériennes et la topographie est traversée par de nombreux paléochenaux peu profonds anciens L'un d'eux est observée et son remplissage correspond à l'ensemble 3. Un autre paléochenal de ce type est étudié plus loin grâce au troisième profil.

Transect 1, Forage 1,
X=988129,7 ; Y=2353141,9 ; Z=187,33 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	40	Limon brun organiques	b1
	70	Rares graviers dans matrice sableuse	g
	75	Sables et graviers	c
	140	Graviers	g

Transect 1, Forage 2,
X=988134,5 ; Y=2353122,5 ; Z=186,85 m NGF

Log		Description	Faciès
	20	Terre végétale	f
		Graviers et sables mélangés	c
	120	Graviers compacts	g
	140		

Transect 1, Forage 3,
X=988139,3 ; Y=2353102,8 ; Z=185,97 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	35	Argile homogène de couleur grise	a
	87	Tourbe brune	b2
	113	Sables et graviers	g

Transect 1, Forage 4,
X=988144,5 ; Y=2353083,5 ; Z=185,97 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale à nombreux galets	f
	45	Argile grise homogène	a
1715 ± 30 BP	90	Tourbe	b2
	112	Argile organique et débris végétaux	b1
	148	Argile grise et sables	a
	150 156	Mélange	b1
	184	Tourbe brune	b2
		Limons argileux	a
1950 ± 30 BP	221		
		Limons argileux	a
1990 ± 30 BP		Fragment de bois	
	300		
2060 ± 30 BP		Sables argileux	c
	333	Graviers	g

Transect 1, Forage 5,
X=988148,7 ; Y=2353064,1 ; Z=185,96 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	35	Argile homogène	a
	87	Tourbe brune	b2
	113	Sables et graviers	g

Figure 3.33 : Descriptions des forages réalisés le long du profil électrique 1.

D'après les valeurs de résistivité et surtout du contraste entre les différents ensembles, il est possible de déduire que l'ensemble 4 est constitué de graviers et galets, à forte résistivité, tandis que les ensembles 2 et 3, comparables, sont plutôt constitués de sables, et enfin, l'ensemble 1, le moins résistant est probablement composé de particules fines (argiles et limons).

- ***Les forages réalisés le long du profil électrique 1***

Cinq forages ont été accomplis afin de mieux connaître la nature des sédiments. Une séquence sédimentaire a été constituée pour chacun d'eux permettant une interprétation en termes d'environnement de dépôt (Figure 3.33). Des datations radiocarbone ont été réalisés sur la colonne sédimentaire correspondant au forage 4. Les résultats de ces datations permettent de contraindre chronologiquement une grande partie de la séquence (Figure 3.34).

Les différentes colonnes sédimentaires traduisent une séquence sédimentaire polyphasée, correspondant au comblement holocène du paléochenal oriental. Le couplage entre les observations sédimentologiques et l'imagerie électrique du sous-sol, permet de reconstituer l'histoire du remplissage.

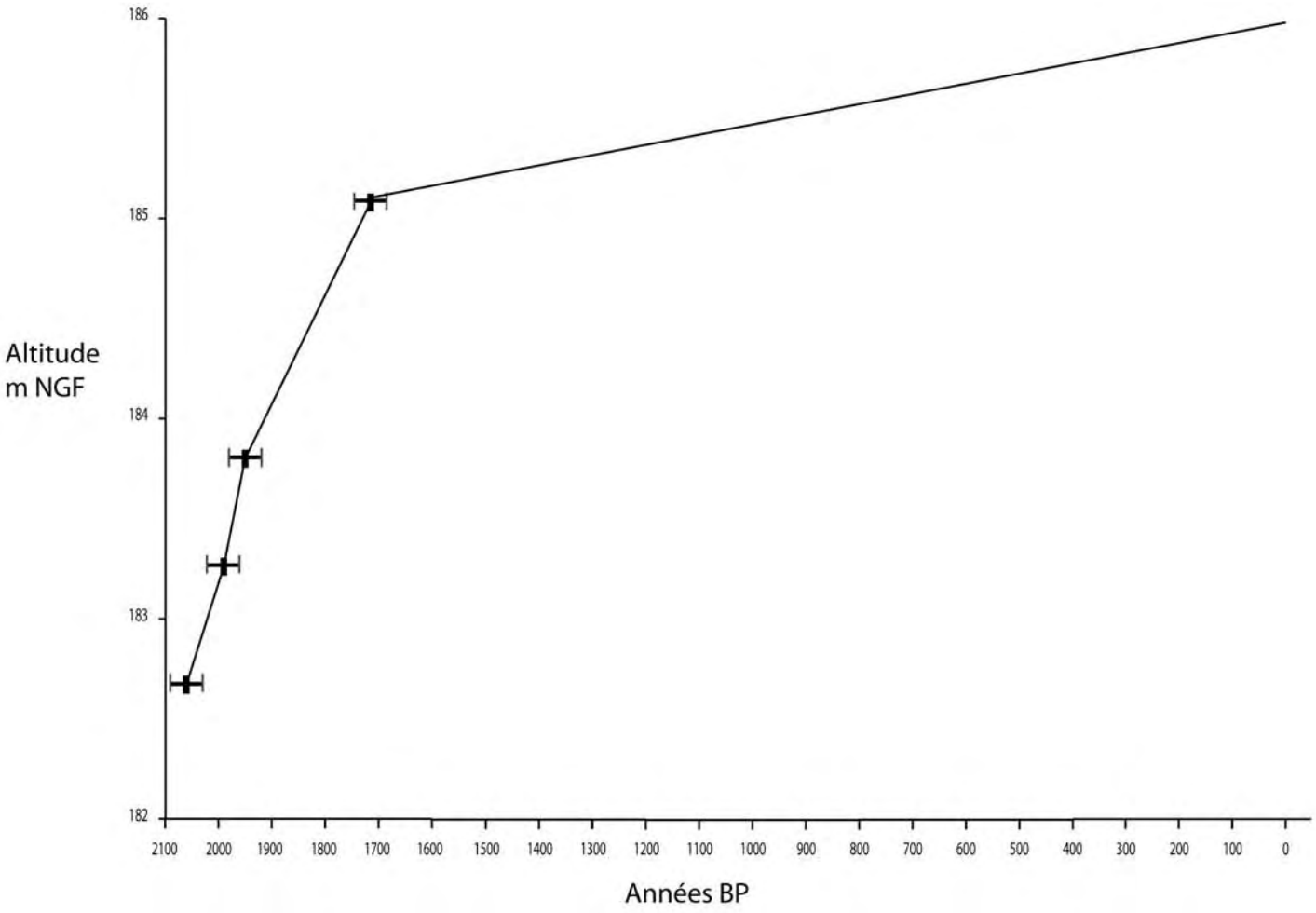
L'ensemble 4, dans lequel le premier paléochenal se développe est constitué de graviers et galets imbriqués avec une matrice sableuse peu importante (Figure 3.35).

L'ensemble 3 correspond au comblement d'un ancien paléochenal perché sur la zone géomorphologique A. Ce comblement est essentiellement sableux et correspond à des dépôts d'inondation dans un paléochenal déconnecté.

L'ensemble 2 constitue le premier comblement du paléochenal oriental. Il est composé de graviers supportés dans une matrice sableuse à limoneuse. Cela correspond à la fois à un faciès de fond de chenal, pour le fond du forage 4, mais aussi à un faciès de barre alluviale.

Ce premier comblement est antérieur à la date radiocarbone 2060 ± 30 BP réalisée sur un échantillon de bois trouvé à la cote -333 cm du forage 4 (Figure 3.34). Cette date marque également le début d'une seconde phase de remplissage du paléochenal correspondant à l'ensemble 1. Cet ensemble correspond à un remplissage fin (Faciès a, b1 et b2) et traduit des conditions de diminution du flux hydrique et des apport sédimentaires (Figure 3.35).

Entre les différents forages, des niveaux d'atterrissement du chenal constituent des repères stratigraphiques qui permettent d'établir des corrélations au sein de l'ensemble 1, le premier est daté postérieurement à 1950 ± 30 années BP tandis que le dernier étant daté de 1715 ± 30 années BP (Figure 3.34). Cela signifie que la séquence sédimentaire est contemporaine de toute la période d'occupation du site d'Oedenburg et que le chenal était actif au cours de cette époque et présenterait plusieurs phases d'atterrissement.



	68.2% probability	95.4% probability
BK04/ PE1/ 333 **2060 ± 30 BP**	160BC (8.1%) 130BC 120BC (59.3%) 30BC 10BC (0.8%) AD	170BC (95.4%) 10AD
BK04/ PE1/ 274 **1990 ± 30 BP**	40BC (54.1%) 30AD 35AD (14.1%) 55AD	50BC (95.4%) 80AD
BK04/ PE1/ 220 **1950 ± 30 BP**	15AD (68.2%) 85AD	40BC (95.4%) 130AD
BK04/ PE1/ 92 **1715 ± 30 BP**	250AD (24.9%) 300AD 320AD (43.3%) 390AD	250AD (95.4%) 410AD

Figure 3.34 : Modèle d'age de la séquence radiocarbone effectuée pour la colonne sédimentologique du transect 1 dans le paléochenal oriental.

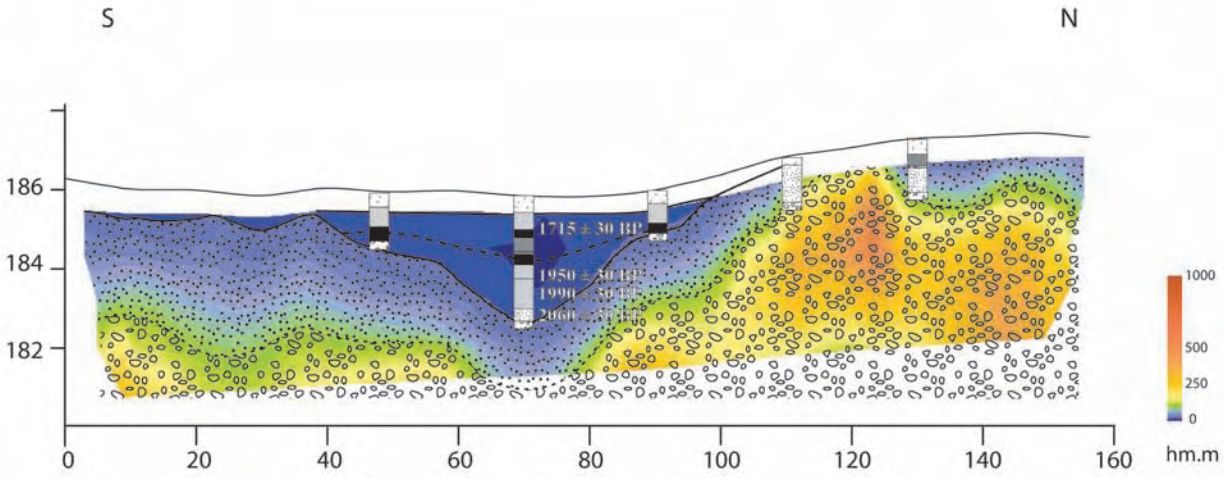


Figure 3.35 : Forages réalisés le long du transect 1 du paléochenal oriental.

▪ *Le profil électrique 2 du paléochenal oriental*

Observations

Le deuxième profil, est également localisé dans le paléochenal oriental (Zone B) entre les points de coordonnées 988417,3, Y=2353062,6 et X=988382,5, Y=2352958. Sa longueur est de 110 m ce qui correspond à la réalisation de cinq panneaux successifs. Pour le modèle Wenner Alpha et le modèle Wenner Alpha + Beta, 5 itérations ont été réalisés avec une erreur RMS étant respectivement de l'ordre de 1,5% et de 1,3%. Pour le modèle Wenner Beta, après 4 itérations, l'erreur est égale à 2.0% (Figure 3.41). Les modèles sont donc assez proches des valeurs mesurées. Les valeurs de résistivité vraie issues des modèles d'inversion sont comprises entre 10 Ohm.m et 1000 Ohm.m. Les pseudo profondeurs atteintes sont proches de 182 m NGF sur l'ensemble du profil. Trois ensembles distincts sont distingués (Figure 3.36).

Le **premier ensemble** correspond à une importante anomalie de résistivité faible dont les valeurs n'atteignent pas plus de 60 Ohm.m. Il est situé dans le centre du profil, du repère 50 au repère 90m, dans la zone la plus basse du paléochenal. Cette anomalie se place sur l'ensemble 2 avec lequel il présente une transition graduelle vers 184 m NGF.

Le **second ensemble**, correspond à une anomalie de résistivité peu élevée, supérieure à l'ensemble 1. Son extension est plus large que l'ensemble 1, entre les repères 20 et 110 m. Sa géométrie, simple et bien contrainte, permet d'observer qu'il est sub-affleurant. Il apparaît plus épais au Sud qu'au Nord. La base de cet ensemble se place environ à la cote 182 m NGF. La surface supérieure de cet ensemble est irrégulière vers le Sud et affectée par des ondulations. Il présente une surface basale assez régulière avec une rupture de pente marquée entre les repères 40 et 60 m.

Le **troisième ensemble**, constitue le substratum des ensembles précédents. Il est localisé sous l'ensemble 2, avec lequel il présente une transition nette. Son extension est observée sur l'ensemble du profil et il est présent à l'affleurement aux deux extrémités du profil. Les valeurs de résistivité de ce dernier ensemble sont très supérieures aux précédentes, puisqu'elles sont comprises entre 100 et plus de 1000 Ohm.m.

Interprétation

Une première interprétation géologique est possible. De la base au sommet du profil, les trois ensembles permettent une première estimation de l'histoire du remplissage de cette partie du paléochenal oriental la plus éloignée des aménagements militaires romains du premier siècle.

Les ensembles reconnus sur ce deuxième profil présentent des similitudes avec ceux observés sur le premier profil.

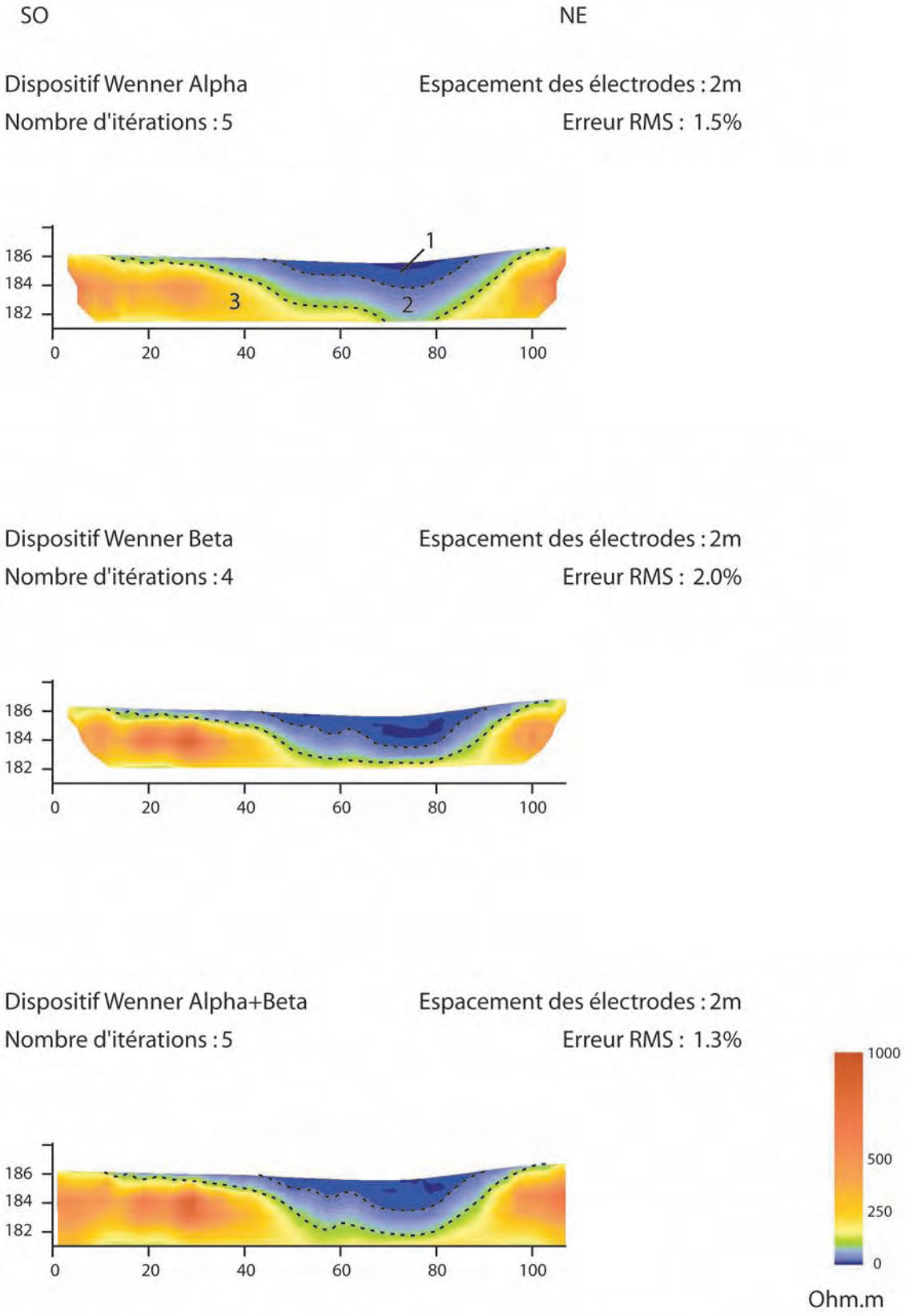


Figure 3.36 : Profil électrique 2 du paléochenal oriental.
Les trois modèles réalisés Wenner Alpha, Wenner Béta et Wenner Alpha + Béta tiennent compte de la topographie. Trois ensembles s'individualisent en fonction des valeurs observées. L'ensemble 1 correspond à une anomalie de faible résistivité présente en sommet de séquence. L'ensemble 2 correspond à une anomalie moyenne. Enfin, à la base, l'ensemble 3, correspond à une anomalie de forte résisitivité.

Transect 2, Forage 1,
X=988395,4 ; Y=2352990,2 ; Z=186,52 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	45		
		Sables jaunes	c
	90		
		Graviers dans matrice sableuse	g

Transect 2, Forage 2,
X=988395,8 ; Y=2352997,2 ; Z=186,25 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	50		
		Limons argileux bruns, plus sableux entre 80 et 93	b1
	93		
	110	Sables argileux de couleur jaune	
		Sables limoneux de couleur jaune	c
	145		
		Graviers dans matrice sableuse	g

Transect 2, Forage 3,
X=988399,5 ; Y=2353007,5 ; Z=186,12 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	25		
		Limons argileux de couleur jaune	a
	55		
	70	Limons argileux organiques peu sableux, bruns	
	82	Limons argileux et sableux de couleur brune	b1
		Limons argileux homogène plastique de couleur jaune	a
	130		
		Limons argileux et sableux organiques de couleur grise-brun	b1
	220		
		Graviers dans matrice sableuse	g

Transect 2, Forage 4,
X=988407,7 ; Y=2353029,9 ; Z=185,96 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	30		
		Limons argileux jaune un peu sableuse, un peu gravillonneuse	c
	65		
		Limons argileux homogènes gris	a
	105		
		Limons argileux organiques	b1
	115		
		Limons argileux riche en matière organique non décomposée	b2
	138		
2055 ± 30 BP		Limons argileux et finement sableux de couleur grise homogène à quelques traces charbonneuses	a
2110 ± 30 BP	178		
2015 ± 30 BP			
	230		
		Graviers dans matrice sableuse	g

Transect 2, Forage 5,
X=988411,4 ; Y=2353040,9 ; Z=186,44 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	35		
		Limons argileux compacts, jaunes	a
	80		
	90	Limons argileux organiques, bruns	b1
	100	Sables limoneux jaunes	c
	130	Graviers et petits galets dans matrice sableuse	g

Transect 2, Forage 6,
X=988412,1 ; Y=2353044,8 ; Z=186,7 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	30		
		Limons argileux et sableux, jaune	c
	50		
		Graviers et galets	g
	70		

Figure 3.37 : Descriptions des forages réalisés le long du profil 2

En effet, les ensembles 1, 2 correspondent au remplissage d'un large paléochenal incisé dans l'ensemble 3. Ce dernier correspond au fond du paléochenal oriental, large d'une soixantaine de mètres. D'après les valeurs de résistivité et le contraste entre les différents ensembles, l'ensemble 3 est constitué de graviers et de galets, particules grossières à forte résistivité, tandis que l'ensemble 2, constitue le premier remplissage du paléochenal, composé essentiellement de sables. Enfin, l'ensemble 1 qui constitue la fin du remplissage du paléochenal est probablement composé de particules fines (argiles et limons).

- ***Les forages réalisés le long du profil électrique 2***

Six forages ont été réalisés le long du deuxième profil permettant la constitution d'une séquence sédimentaire pour chacun d'eux (Figure 3.37). Des datations radiocarbones ont été réalisés sur la colonne sédimentaire correspondant au forage 4 (Figure 3.38). Dans l'ensemble, la succession sédimentaire observée est identique avec celle observée le long du premier profil réalisé dans le même paléochenal plus au Nord.

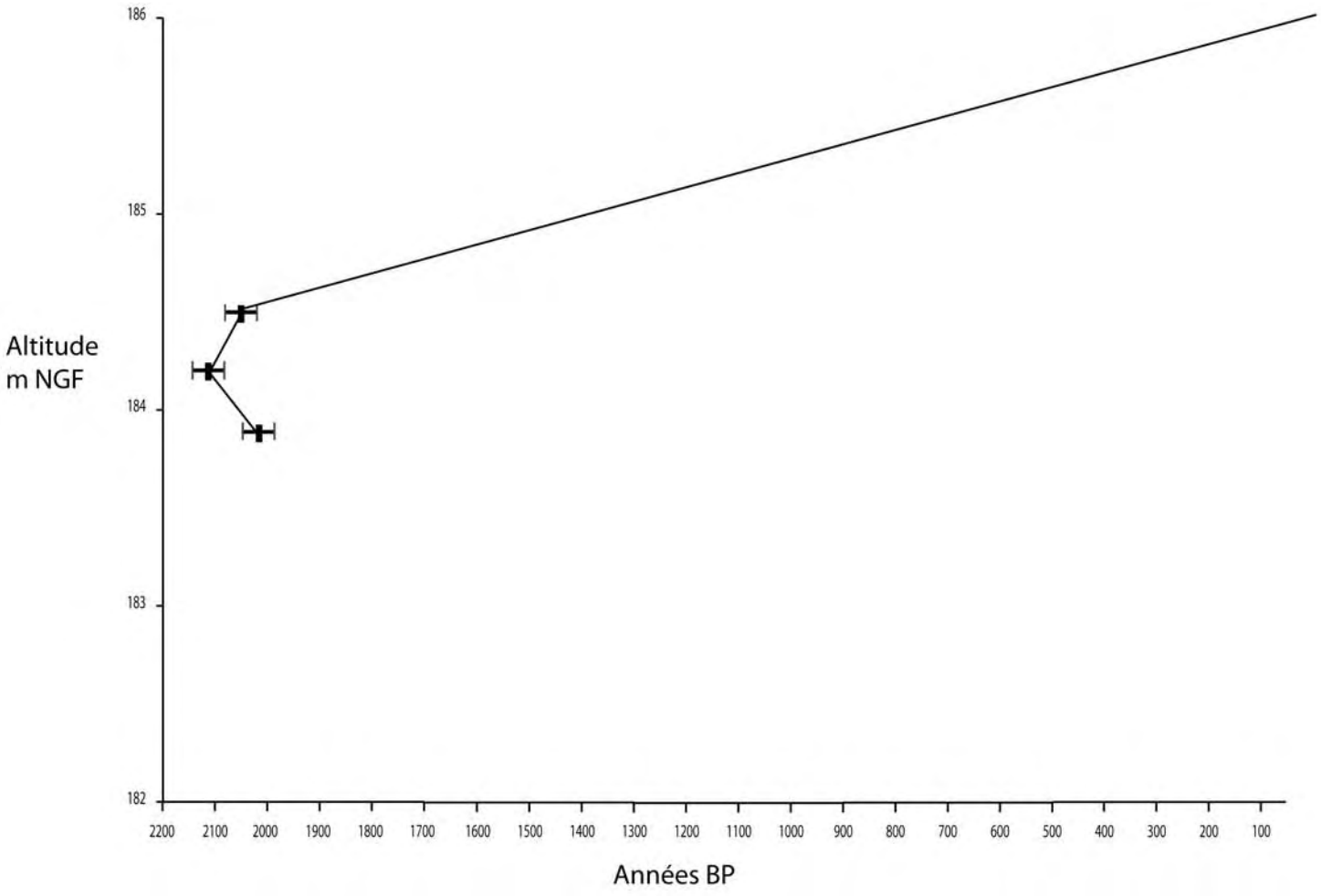
En effet, l'ensemble 3 correspond au premier paléochenal constitué de graviers et galets avec une matrice sableuse peu importante.

L'ensemble 2, correspond à un faciès sableux de fond de chenal, pouvant passer latéralement à un faciès de barre alluviale. Ce premier comblement est antérieur à la date radiocarbone 2015 ± 30 BP effectué sur un échantillon de bois trouvé à la cote -207 cm du forage 4 (Figure 3.39).

Le début d'une seconde phase de remplissage du paléochenal correspond à l'ensemble 1est amorcée avant cette date. Cette phase correspond comme pour le premier profil, à un changement des conditions hydrodynamiques dans le chenal.

En effet, cette partie du remplissage est surtout constitué de faciès fins (Faciès a, b1 et b2) qui traduisent des conditions de diminution des flux hydriques et surtout des apports sédimentaires antérieurement à l'installation des romains dans la zone d'étude.

Un niveau repère d'atterrissement du chenal est daté postérieurement à 2055 ± 30 BP. Puis postérieurement à cette phase le chenal redevient actif tel que cela est le cas plus en aval. Cela signifie que le chenal est actif au début de l'époque romaine avec un fond proche de la cote 184,5 m NGF.



	68.2% probability	95.4% probability
BK04/ PE3/ 207 **2015 ± 30 BP**	50BC (68.2%) 25AD	100BC (95.4%) 70AD
BK04/ PE3/ 177 **2110 ± 30 BP**	180BC (64.1%) 90BC 70BC (4.1%) 60BC	210BC (95.4%) 40BC
BK04/ PE3/ 147 **2055 ± 30 BP**	160BC (4.9%) 130BC 120BC (58.5%) 20BC 10BC (4.8%) AD	170BC (95.4%) 20AD

Figure 3.38 : Modèle d'age de la séquence radiocarbone effectuée pour la colonne sédimentologique du transect 2 dans le paléochenal oriental.

L'histoire du remplissage du paléochenal oriental est donc le suivant :

Phase 1 : Formation d'une île suite à l'amalgamation de plusieurs barres caractéristiques d'un système en tresses. Cette île (ensemble 1) est parcourue par de nombreux paléochenaux dont le remplissage est sableux (ensemble 3 du profil électrique 1).

Phase 2 : Une fois cette île formée, ces paléochenaux sont déconnectés en raison d'une incision majeure affectant la plaine alluviale et donnant naissance à un très large paléochenal méandriforme. Celui-ci est partiellement comblé par une sédimentation sableuse correspondant à des faciès de barres en bordure et des dépôts de fond de chenal au centre du paléochenal (ensemble 2).

Phase 3 : La sédimentation dans ce large paléochenal évolue ensuite graduellement vers des faciès plus fins (ensemble 1) menant à son comblement. Cette phase de comblement démarre antérieurement à 2060-2110 années BP. La sédimentation évolue alors jusqu'à des faciès de plus en plus fins jusqu'après les années 1950 BP.

Postérieurement à 1950 BP et jusqu'à 1715 BP, le paléochenal connaît une phase de remplissage essentiellement organo-minérale traduisant des conditions hydrodynamiques peu énergiques et d'apport détritiques plus faibles. Au sein de ces dépôts, des variations de faciès plus ou moins organiques sont identifiées. Au cours de cette phase de comblement, le camp militaire est occupé puis abandonné. Le paléochenal présente une paléotopographie marquée de plusieurs mètres, ce qui permet de ne pas exclure la possibilité qu'il ait pu être emprunté par des embarcations légères à faible tirant d'eau pendant toute l'époque antique. En effet, au premier siècle, le camp se place à une altitude minimale de 187 m NGF, tandis qu'à la même époque le fond du chenal était au alentours de la cote 184 m NGF au début de l'époque romaine et aux alentours de la cote 165 m NGF vers 1715 BP.

Enfin, à partir de 1715 BP, la sédimentation fine dans le paléochenal redevient essentiellement minérale. Cela traduit une augmentation de l'apport sédimentaire.

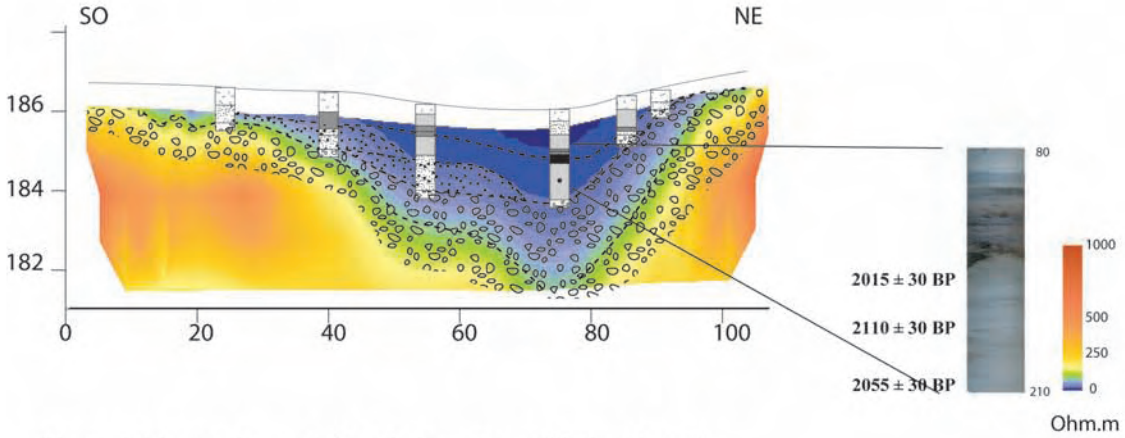


Figure 3.39 : sondages réalisés le long du profil électrique 2.

➢ *Le paléochenal ancien de la Zone A*

▪ *Le profil électrique 3 du paléochenal ancien*

Observations

Le troisième profil, est localisé dans la zone géomorphologique A entre les points de coordonnées X=988259,5, Y=2353168,5 et le point X=988372,5, Y=2353216,5. Il permet la description des chenaux parcourant la grande île. Sa longueur est égale à 110 m, c'est-à-dire que cinq panneaux ont été réalisés pour sa création. Pour les trois modèles (Figure 3.40), 5 itérations ont été nécessaires et les erreurs RMS sont respectivement de l'ordre de 1,4%, 1,6, et 1,5%. L'amplitude des valeurs de résistivité vraie issues des modèles d'inversion est quasi identique, comprise entre 50 Ohm.m et environ 1000 Ohm.m, bien que ces valeurs puissent être légèrement dépassées localement. Les pseudo profondeurs atteintes sont proches de 182 m NGF sur l'ensemble du profil. Trois ensembles distincts se dégagent en fonction des valeurs de résistivité (Figure 3.40).

Le **premier ensemble** correspond à une importante anomalie de résistivité relativement faible où les valeurs sont comprises entre 50 et 100 Ohm.m. Il est situé dans la partie médiane du profil, du repère 40 au repère 100m. Il se place donc dans la zone la plus basse du paléochenal observé en photographie aérienne et d'après le relevé topographique. Cette anomalie est superficielle, peu épaisse, au maximum de 2 mètres, et se place au dessus d'une autre anomalie correspondant à l'ensemble 3 avec lequel il présente une transition nette. La base de cet ensemble atteint la cote d'environ 184 m NGF.

Le **second ensemble**, correspond à une anomalie de résistivité similaire à l'ensemble 1. Il est situé dans la partie Est du profil et s'étend du repère 100 jusqu'au-delà du repère 120 m.

Le **troisième ensemble**, constitue le substratum des unités précédentes puisqu'il est localisé systématiquement sous chacune d'entre elles. Son extension est observée sur l'ensemble du profil dans sa partie basale et il est présent à l'affleurement dans la partie la plus occidentale du profil, entre les repères 0 et 25 m. Les valeurs de résistivité de ce dernier ensemble sont très supérieures aux précédents, puisqu'elles sont comprises entre 100 et plus de 1000 Ohm.m.

Interprétation

Les trois ensembles permettent une visualisation de la géométrie des paléochenaux anciens sur l'île composant la zone géomorphologique A, sur laquelle les premières traces d'occupation des romains sont connus. Les ensembles 1 et 2 sont les plus récents. Ils constituent les remplissages sédimentaires, probablement sableux, des paléochenaux peu profonds typiques des chenaux secondaires traversant l'île constituée de graviers et galets correspondant à l'ensemble 3.

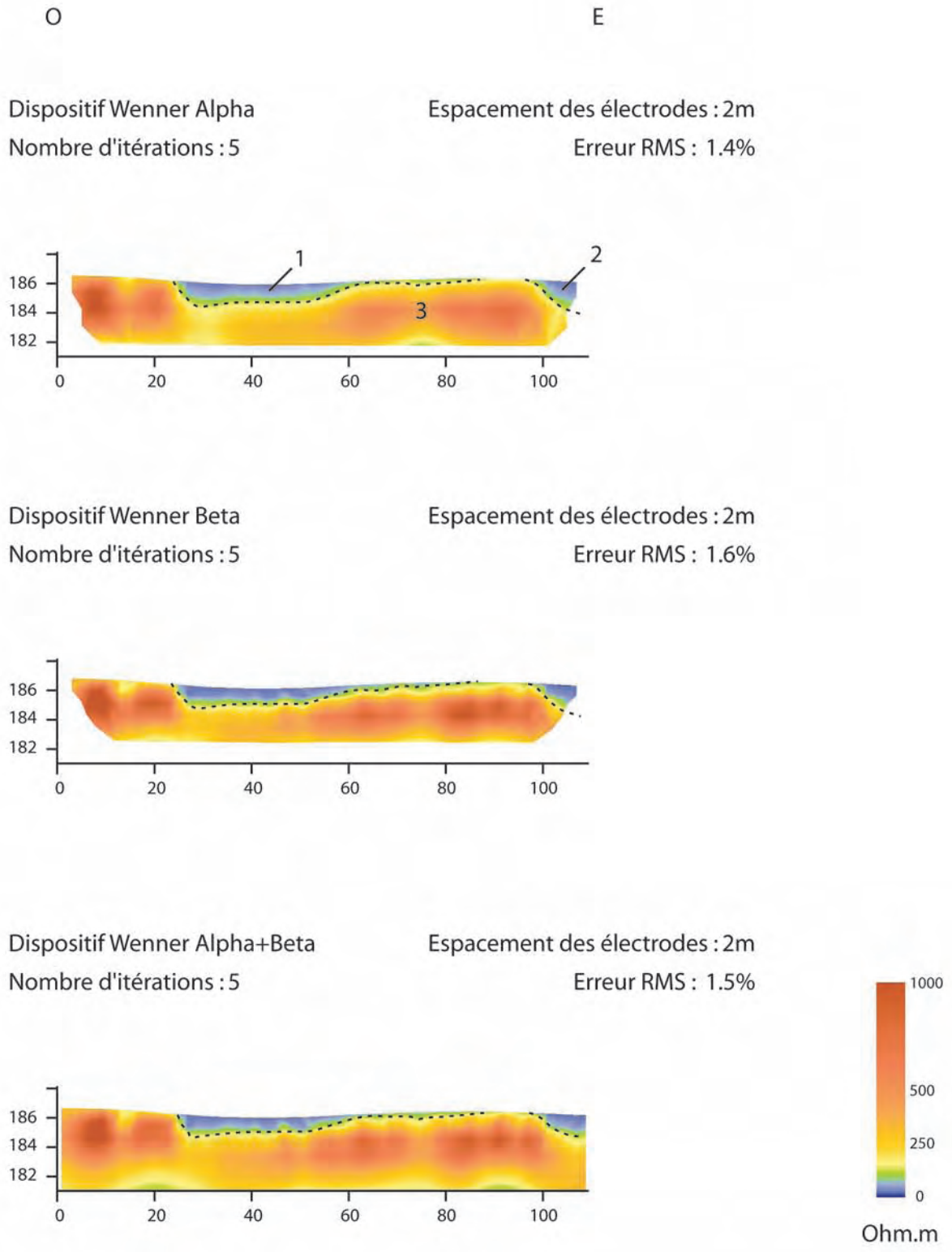


Figure 3.40 : Profil électrique 3 réalisé dans un paléochenal connecté avec le paléochenal oriental.
Les trois modèles réalisés Wenner Alpha, Wenner Béta et Wenner Alpha + Béta tiennent compte de la topographie.
Trois ensembles s'individualisent en fonction des valeurs observées.
Les ensembles 1 et 2 correspondent à des anomalies de résistivité faible à moyenne présentes en sommet de séquence.
A la base, l'ensemble 3, correspond à une anomalie de forte résisitivité.

▪ *Les forages réalisés le long du profil électrique 3*

Les cinq forages réalisés le long de ce profil confirment la nature sablo-limoneuse de ces remplissages de chenaux anciens (Figures 3.41 et 3.42).

L'histoire du remplissage, d'après ce profil, est donc le suivant :

Ces chenaux connaissent une phase unique dans l'histoire de leur remplissage. En effet, après la formation d'une grande île suite à l'amalgamation de plusieurs barres, les chenaux qui la parcourent connaissent une phase de comblement sableuse correspondant à des dépôts d'inondations dans la plaine du Rhin.

Transect 3, Forage 1,
X=988282,4 ; Y=2353177,3 ; Z=186,71 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	40		
		Limon sableux brun	c
	65		
		Graviers et sables	g
	90		

Transect 3, Forage 2,
X=988287,6 ; Y=2353179,5 ; Z=186,55 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	25		
		Limon sableux brun	c
	60		
		Sables et argiles jaunes à gris	b1
	120		
		Graviers et sables	g

Transect 3, Forage 3,
X=988297,2 ; Y=2353185,1 ; Z=186,39 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	30		
		Limons sableux de couleur brune	c
	95		
		Graviers et sables	g

Transect 3, Forage 4,
X=988360,5 ; Y=2353211,8 ; Z=186,58 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	30		
		Limon argileux brun clair à jaune	b1
	80		
		Argile brune gris foncé	b1
	110		
		Sable brun	c
	130		
		Graviers	g

Transect 3, Forage 5,
X=988372,5 ; Y=2353216,5 ; Z=186,60 m NGF

Log		Description	Faciès
		Terre végétale	f
	25		
		Limons et sables jaunes	
	40		
		Sables moyens jaunes bien triés	c
	75		
		Graviers	g
	100		

Figure 3.37 : Descriptions des forages réalisés le long du profil électrique 3.

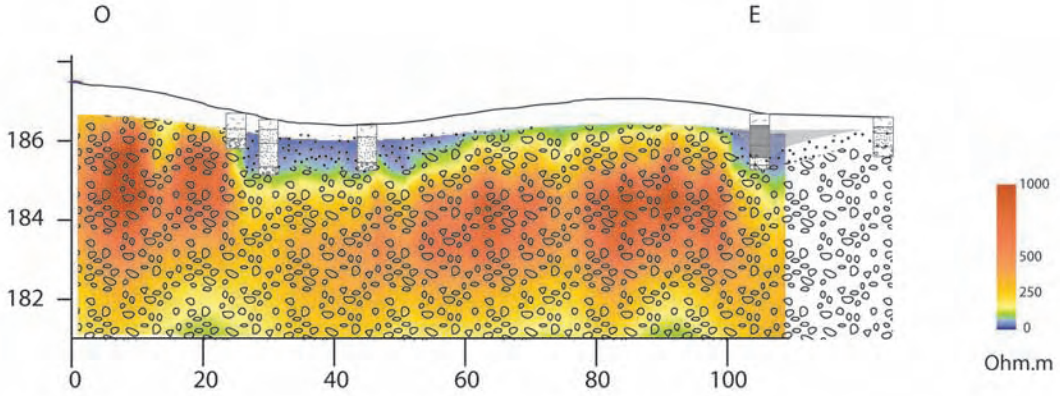


Figure 3.42 : forages réalisés le long du profil électrique 3

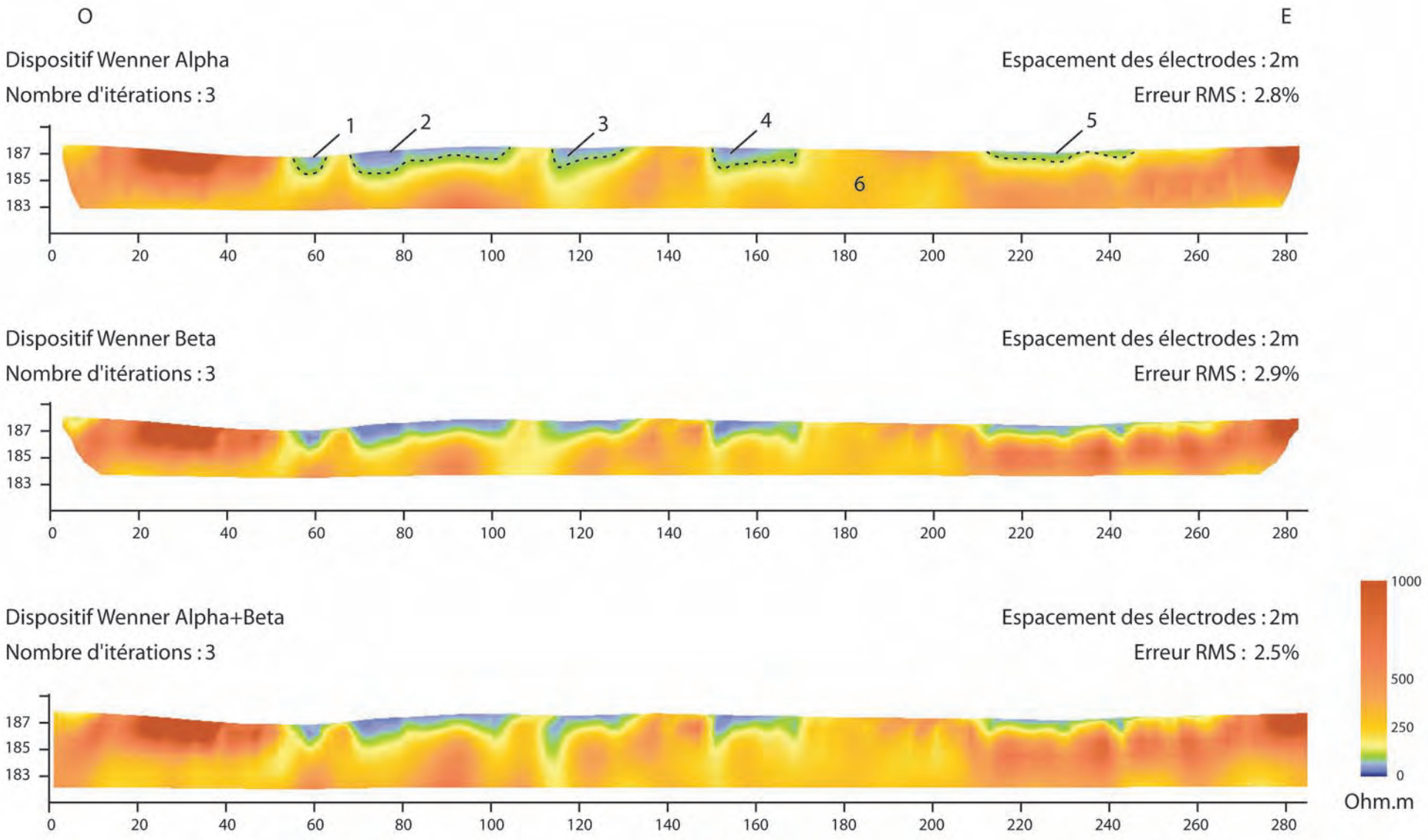


Figure 3.43 : Profil électrique 4, réalisé dans la partie Sud-Ouest de la Zone B caractèrisée par la présence de plusieurs paléochenaux en tresse, à proximité de la zone des temples.

Les trois modèles réalisés Wenner Alpha, Wenner Béta et Wenner Alpha + Béta tiennent compte de la topographie. Six ensembles s'individualisent en fonction des valeurs observées. Les ensembles 1, 2, 3, 4 et 5 correspondent à des anomalies de résistivité moyenne en sommet de profil. L'ensemble 6 correspond à une anomalie de forte résisitivité.

➢ *Les paléochenaux de la zone des temples*

▪ *Le profil électrique 4 à proximité de la zone des temples*

Observations

Le quatrième profil est long de 285 m, il est orienté Est- Ouest et se place dans la partie occidentale de la zone géomorphologique B, entre les points de coordonnées X=987439, Y=2352541,4 et le point X=987719, Y=2352601.

Six panneaux ont été nécessaires pour couvrir cette longueur. Pour les trois modèles, 5 itérations ont été réalisés et l'erreur RMS est satisfaisante, respectivement égale à 2,8%, 2,9% et 2,5% (Figure 3.43). Les valeurs de résistivité sont comprises entre 30 Ohm.m et environ 1000 Ohm.m. Les pseudo profondeurs atteintes sont comprises entre 183 m NGF pour les modèles Wenner Alpha et Wenner Beta, et 182 m NGF pour le modèle Wenner Alpha + Beta. Six ensembles distincts sont observés (Figure 3.43).

Le **premier ensemble** correspond à une petite anomalie caractérisée par des valeurs de résistivité faible n'excédant pas 100 Ohm.m. Il est situé au repère 60 m, mesure environ 5 mètres et présente une forme arrondie. Il se place dans une zone basse de la plaine alluviale. Sa base atteint la cote d'environ 185 m NGF.

Le **deuxième ensemble**, correspond à une large anomalie caractérisée par des valeurs comparables à celles de l'ensemble 1. Il est situé entre les repères 70 et 105 m, et présente une forme allongée plus profonde et épaisse à l'Ouest qu'à l'Est. Sa partie basale est de plus irrégulière. La base de cet ensemble atteint la cote d'environ 185 m NGF en son point le plus bas.

Le **troisième ensemble**, est équivalent aux ensembles précédents. Il est situé entre les repères 110 et 130 m, et présente une forme assez comparable à l'ensemble 2, plus profonde et épaisse à l'Ouest qu'à l'Est et avec une partie basale irrégulière. La base de cet ensemble atteint la cote d'environ 184,5 m NGF en son point le plus bas.

Le **quatrième ensemble**, similaire aux précédents est situé entre les repères 150 et 170 m, et présente une forme en « W » plus profonde et épaisse à l'Ouest et à l'Est qu'en son centre. Sa partie basale atteint une profondeur comprise entre environ 184 m et 183 m NGF.

Le **cinquième ensemble**, correspond à une anomalie comparable aux quatre ensembles décrits précédemment. Il est situé entre les repères 210 et 250 m. Il fait moins de 2 m d'épaisseur et sa partie basale est irrégulière.

Enfin, le **sixième ensemble** est localisé sous chacun des ensembles précédents avec lesquels il présente une transition nette. Son extension est observée sur l'ensemble du profil et il est présent à l'affleurement aux extrémités du profil ainsi qu'entre chaque ensemble observé.

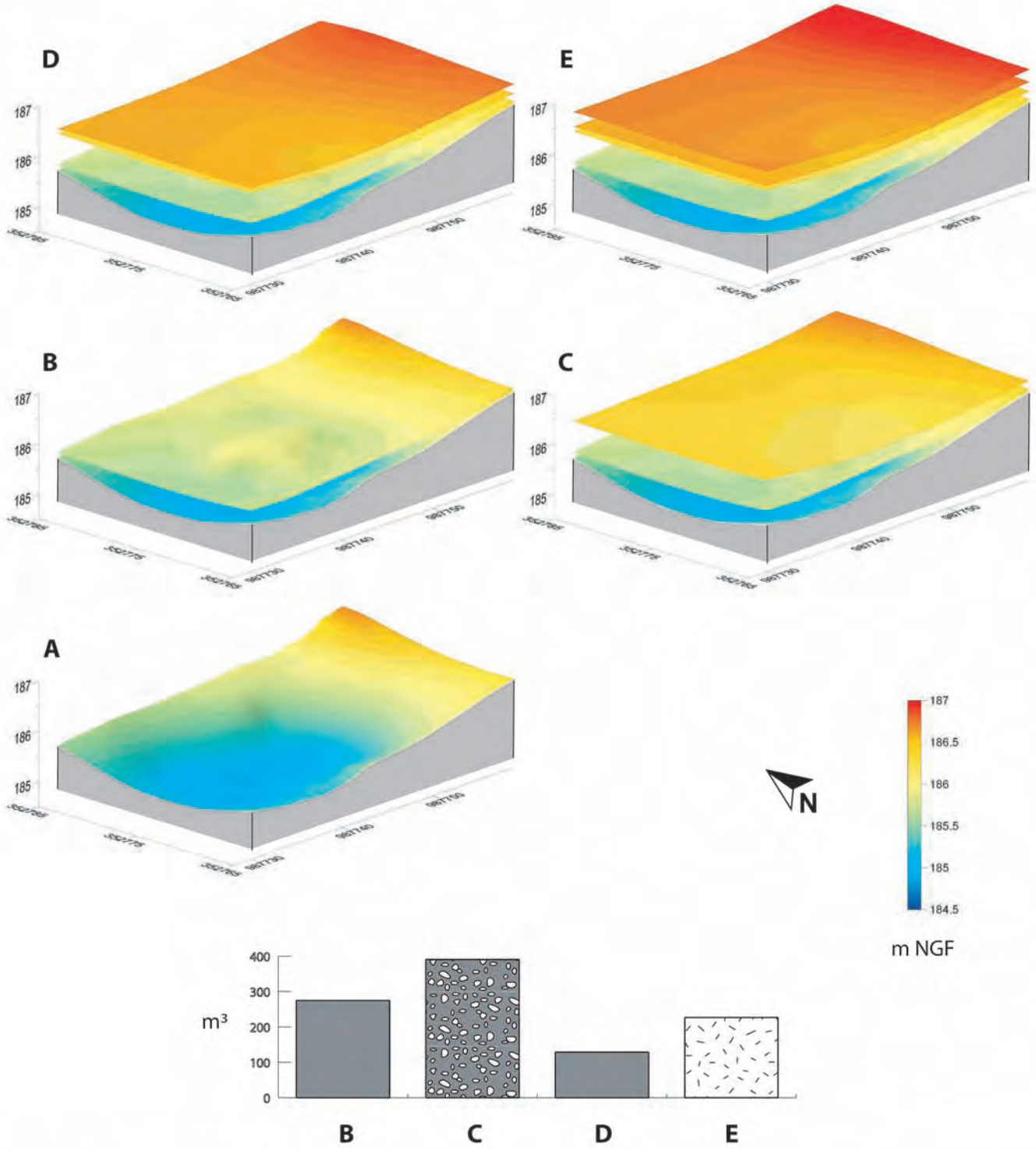


Figure 3.44 : Quantification du remplissage du paléochenal aménagé de la zone des temples.
Le calcul du volume a été réalisé pour une surface sondée d'environ 900 m².
La surface A correspond au toit des dépôts alluviaux anciens formant le paléochenal pré-antique.
La surface B correspond au toit des dépôts fins organiques pré-antiques. Leur volume est égal à 274,77 m³.
La surface C correspond au toit de la couche d'aménagement du paléochenal pour l'installation des temples. Elle est formée de galets et graviers et son volume est égal à 389,95 m³.
La surface D correspond au toit de la couche de limons organiques tardi-antiques à post-antiques. Son volume est égal à 128,51 m³.
Le surface E correspond à la surface actuelle labourée. Le volume de labour est égal à 226,59 m³.

Les valeurs de résistivité de ce dernier ensemble sont très supérieures aux précédents, comprises entre 100 et plus de 1000 Ohm.m.

Interprétation

D'après les valeurs de résistivité électrique ainsi que de la géométrie des différents ensembles observés, une première interprétation géologique est réalisable. Les différents ensembles reconnus permettent une première estimation de l'histoire de cette partie de la plaine alluviale du Rhin. Les ensembles 1 à 5 correspondent aux différents remplissages des paléochenaux en tresses séparés par des barres et dont le remplissage est sablo argileux. L'ensemble 6 correspond aux graviers et galets de la terrasse. Les ensembles 2, 3 et 4, sont des paléochenaux qui ont probablement subit une histoire plus complexe que les chenaux correspondant aux ensembles 1 et 5 comme le suggèrent leurs fonds asymétriques.

- ***La quantification de l'aménagement du paléochenal dans la zone des temples***

Ce secteur correspond à la zone ou des temples ont été implantés au cours de l'antiquité. Les opérations de fouilles ont permis l'observation de la nature du remplissage d'un des paléochenaux observés en tomographie électrique. A la base de la séquence, se développent les limons sablo argileux gris jaune (faciès a) correspondant aux premiers dépôts de comblement du chenal antérieurs à l'époque antique. Par analogie avec les autres résultats acquis sur le site, ces dépôts sont probablement attribuables au Tardiglaciaire. La surface de ces dépôts correspond donc à la topographie pré-antique.

Ils sont scellés par des dépôts limoneux riches en matière organique datant du début de l'occupation antique dans le secteur. Cette seconde phase correspond à la première phase d'aménagements du terrain et est contemporain avec une première génération de sanctuaire sur poteaux. Ces structures sont datées entre 3-4 (d'après datation dendrochronologique) et 70-80 après J.-C. et sont composées de plusieurs structures marquantes. Au cours de cette seconde phase, l'occupation est circonscrite sur l'île graveleuse située à l'Est.

Une troisième phase correspond à l'occupation et des aménagements successifs du paléochenal, afin de permettre l'agrandissement de l'île pour l'établissement de plusieurs temples. Cette phase s'étend de 70-80 jusqu'aux années 270 après J.-C. Au cours de cette phase une importante recharge de galets et graviers rhénans ont été déposés dans le paléochenal situé dans la partie ouest du secteur afin de permettre l'établissement de deux temples (*fana*).

Après cette période d'exploitation de cette aire sacrée, une quatrième phase correspond à la mise en place de dépôts fins riches en matière organique qui scellent l'ensemble de la plaine alluviale.

Pour notre étude, cinq grands ensembles sont pris en considération, le premier représente le substratum, le deuxième représente les dépôts organiques datés entre 4 et 70-80 de notre ère, le troisième représente les dépôts de galets et graviers mis en place entre 70-80 et 270 de notre ère, le quatrième représente les dépôts organiques postérieurs à l'occupation et enfin un cinquième ensemble correspond à la terre végétale.

Notre objectif étant la quantification du volume des couches, il a été nécessaire de réaliser sur le terrain des mesures de chaque surface considérée. Afin de faciliter le traitement des données, il a été décidé sur le terrain de réaliser la maille de prise de mesure de façon identique pour chaque surface considérée. Pour chacune des couches aussi bien d'origine anthropique que d'origine alluviale, la localisation des mêmes points de mesure a été réalisée à l'aide d'une station totale Pentax ATS 105. Face à cette contrainte imposée et comme la fouille ne permettait pas toujours de dégager chacune des surfaces de façon équivalente, des compléments d'observation ont été réalisés par sondage à la tarière à main. Ainsi, la quantification des dépôts dans la zone des temples (Figure 3.44) met en évidence :

- la couche de dépôts organiques antérieurs à l'édification des temples correspond à un volume d'environ 275 m^3, pour une durée supérieure à 70 ans.
- la couche de galets pour l'installation des temples correspond à un volume d'environ 390 m^3, pour une période d'environ 200 ans.
- l'ensembles des dépôts post-antiques correspondent à un volume total d'environ 355 m^3, pour une période d'environ 1700 ans.

La quantification volumétrique de ces dépôts permet pour la première fois sur le site d'Oedenburg de matérialiser l'effort qui a été nécessaire pour fonder une partie de l'agglomération. De plus, cela montre dans quelle mesure les aménagements de la plaine alluviale du Rhin dans ce secteur sont importants. On comprend mieux alors l'impact que ces derniers ont pu avoir sur l'évolution de la dynamique sédimentaire locale pendant cette période, comme cela a pu être observés dans le paléochenal occidental situé quelques centaines de mètres plus en aval.

3.3. ENREGISTREMENT STRATIGRAPHIQUE ANTHROPISE

3.3.1. Avant propos et résumé

La fouille d'un site archéologique comme celui d'Oedenburg présente le grand intérêt de mettre en relation une occupation complexe ; aussi bien civile, militaire ou religieuse ; très bien contrainte chronologiquement et surtout quasi continue avec la dynamique sédimentaire du Rhin. Au cours des fouilles, il a été possible grâce à cela d'observer plusieurs dépôts d'inondation du Rhin enregistrés dans une zone intensément aménagée au cours des trois premiers siècles. Cette zone se place dans la zone géomorphologique B, dans un paléochenal abandonné. Outre l'intérêt chronologique évident apporté par les aménagements anthropiques souvent en bois, les observations qui ont été réalisées renseignent sur les relations entre ces événements hydrologiques extrêmes et les modalités d'occupation de la plaine alluviale. Alors que les différentes approches géomorphologiques ont permis d'intégrer plusieurs types de résultats afin de démontrer l'impact alluvial sur l'occupation humaine au cours du 4ème siècle, les résultats présents, au contraire, nous indiquent que les événements d'inondation n'ont pas du tout influencé de façon notable l'occupation de cette zone. Ce résultat inattendu, a priori, s'accompagne d'une meilleure connaissance désormais accessible sur les relations entre les variations climatiques et les événements extrêmes du Rhin. Il rejoint de façon frappante les observations décrites plus avant grâce à l'étude du paléochenal occidental. Les résultats qui suivent présentent donc comment l'occupation humaine s'est développée dans un paléochenal du Rhin, comment des dépôts d'inondation du Rhin y ont été enregistrés, quand ils se sont produits ; ces données suggèrent de plus que les événements d'inondation n'ont pas d'effet sur la persistance ou non de l'occupation, à la différence des variations du taux d'humidité et/ou de la hauteur de la nappe sur une période de temps plus longue. Ces observations ont fait l'objet d'un article dans la revue *Quaternary International* au cours de l'année 2006.

Une autre contribution importante de la présence des aménagements est apportée par l'étude des bois utilisés par les romains dans leurs constructions et leurs aménagements placés souvent dans les paléochenaux. Cela a fait l'objet d'une communication au cours du colloque AGER, Sylva et Saltus en Gaule Romaine, un article est en cours de publication.

3.3.2. Rhine floods deposits recorded on the Gallo-Roman site of Oedenburg (Haut-Rhin, France)

Available online at www.sciencedirect.com
SCIENCE DIRECT®
Quaternary International 150 (2006) 28–40

Rhine flood deposits recorded in the Gallo-Roman site of Oedenburg (Haut-Rhin, France)

Vincent Ollive[a,b,*], Christophe Petit[a,c], Jean-Pierre Garcia[a,b], Michel Reddé[d]

[a]*Université de Bourgogne, UFR Sciences de la Terre, 6 Bd Gabriel, 21000 Dijon, France*
[b]*UMR CNRS 5561 'Biogéosciences'*
[c]*UMR CNRS 5594 'Archéologie, cultures et sociétés'*
[d]*Ecole Pratique des Hautes Etudes, Paris*

Available online 18 April 2006

Abstract

From the first to the fourth century AD, the Gallo-Roman town of Oedenburg developed in the alluvial landscape of the southern Upper Rhine Graben. Throughout this period, the landscape mosaic, composed of palaeochannels, stable palaeoislands and river terraces, continued to evolve. A district of this town, situated on a lateral Rhine channel system, was archaeologically excavated. Large-scale excavation and cross-section analysis provide evidence of changing fluvial conditions during the period under study. At about AD 20 or earlier, this lateral part of the floodplain, affected by very fine sedimentation, was occupied by moribund marshy palaeochannels. When the first Gallo-Roman settlers occupied the site, they filled parts of the channels with woven brushwood in order to create an efficient circulation surface. The sedimentary infill of this palaeochannel records four different flood deposits interlayered with dated anthropogenic units (pavements, road embankments, and other structures). Archaeological analysis and dendrochronological dating indicate that these four flooding events occurred during a short time period between AD 20 and AD 145/146. These geoarchaeological observations focus on floods that do not seem to have significantly affected human occupation in this part of the Rhine floodplain. These results are set in the broader context of the Rhine catchment and the Alps.
© 2006 Elsevier Ltd and INQUA. All rights reserved.

1. Introduction

The present study aims to develop the understanding of past flooding events, riverine palaeoenvironment and hydrodynamic changes, and their relationship to archaeological occupation. Knowledge of these factors is necessary to estimate human influence on the drainage area and also to detect and assess climatic changes during the Upper Holocene (historic) times. Moreover, long-recurring catastrophic flooding events may be recorded during human history and it is useful to document how societies have been affected by such environmental stresses. Riverine archaeological sites are very appropriate objects for that purpose because they often provide a record of alluvial sedimentation and a well-defined chronology (Brown, 1997).

The present geoarchaeological study focuses on the sedimentary record of the Oedenburg Gallo-Roman site, in the floodplain of the southern Upper Rhine River (Fig. 1). This area has been influenced by Rhine floods for several hundred years, as demonstrated by the village of Kunheim, situated just 1 km from the archaeological site, which was close to the river in 1705 (Fig. 2), destroyed by floods in 1763, and then rebuilt further up the terrace.

2. Geomorphological context and study area

2.1. Rhine floodplain

The Rhine is one of the largest rivers in Europe, with a total length of 1320 km and a catchment area of about 185,000 km^2. The Upper Rhine Graben is situated between the plutonic and sedimentary Vosges and the Black Forest. Since the Oligocene, more than 1300 m of sediments have been deposited in this subsiding area (Blanalt et al., 1974; Théobald et al., 1978). In this graben zone, the Oedenburg Gallo-Roman site (Haut-Rhin) is located at the latitude of the Kaiserstuhl Volcano, at about 188 m above sea level

*Corresponding author.
E-mail address: vincent.ollive@u-bourgogne.fr (V. Ollive).

1040-6182/$ - see front matter © 2006 Elsevier Ltd and INQUA. All rights reserved.
doi:10.1016/j.quaint.2006.01.006

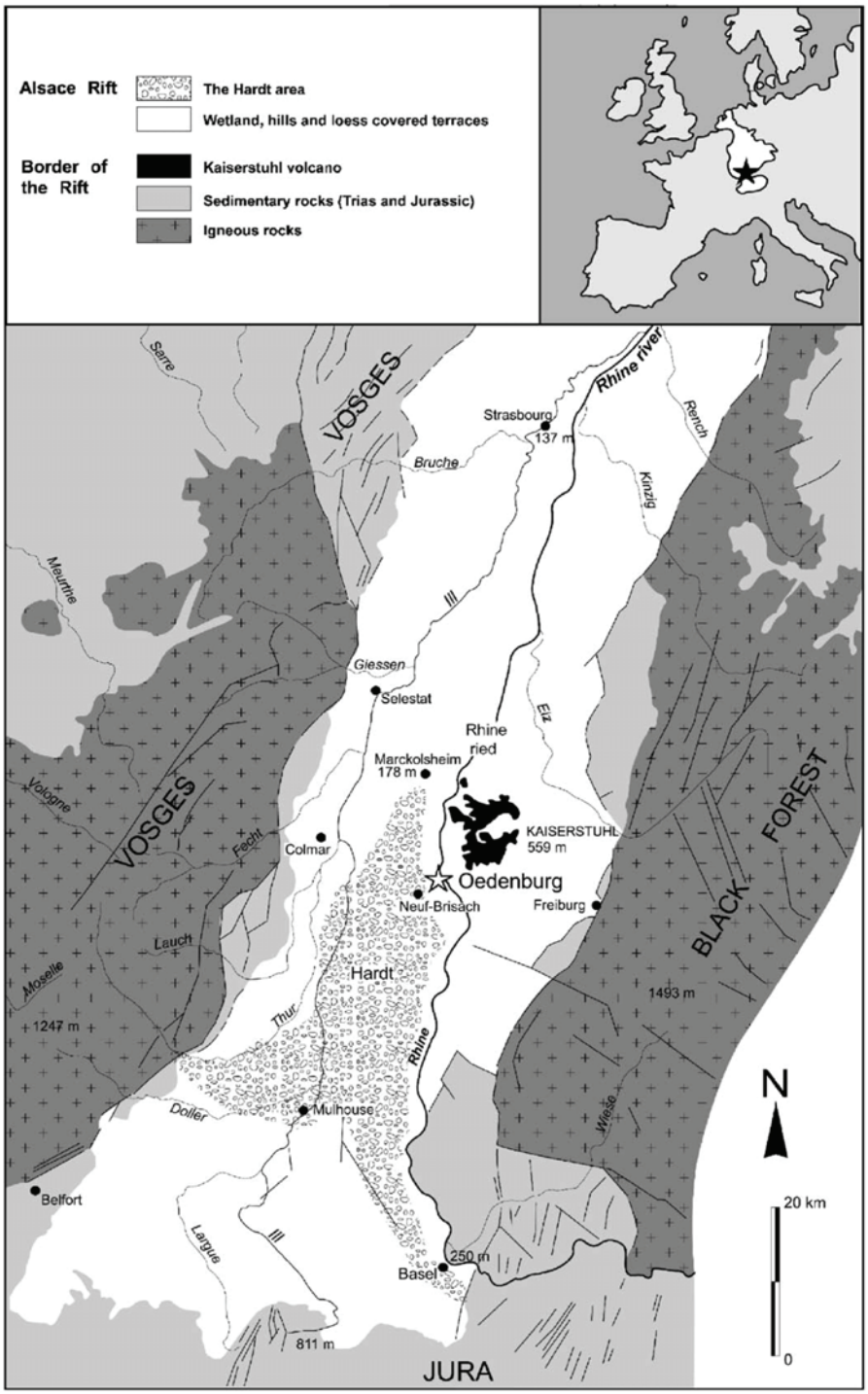


Fig. 1. Simplified geological map of the floodplain of the River Rhine, showing the location of the Oedenburg Gallo-Roman site.

(ASL) (from 185.4 to 192.0 m ASL). Two main rivers drain the Alsace floodplain: the Ill and the Rhine. These two rivers run northward and are continuously separated, in the reaches from Basel (250 m ASL) to Marckolsheim (178 m ASL), by a Weichselian alluvial fan of Alpine origin (Fig. 1). To the east, the Rhine River runs northward from

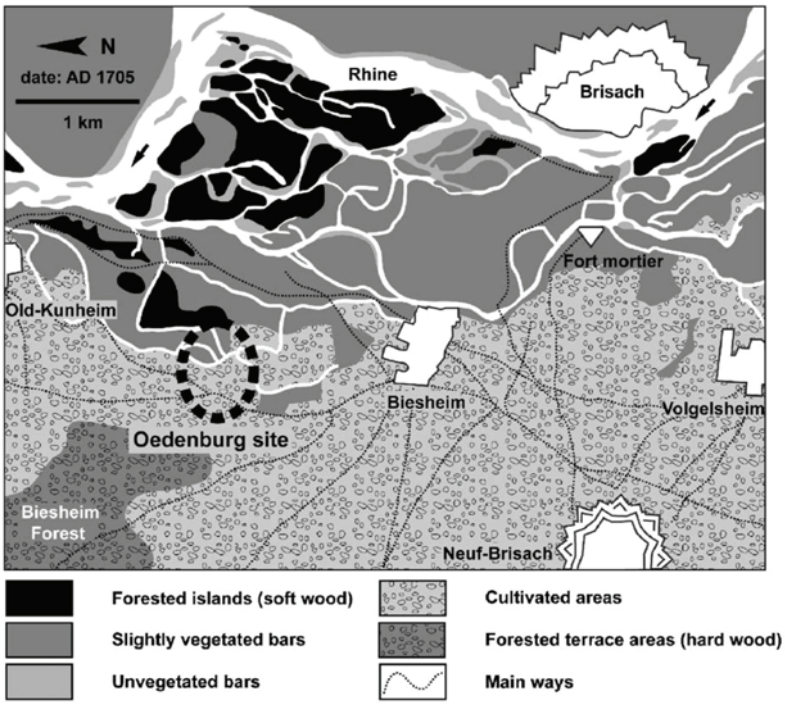


Fig. 2. Map of the Rhine floodplain in the Oedenburg site area during the 18th century, showing the succession of main alluvial landscapes resulting in different vegetation covers. After a 1705 map of the Neuf-Brisach area (Haut-Rhin). Note the site of "Old-Kunheim" located near the main active channels of the River Rhine.

the Alps and the Swiss molassic plain. To the west, the Ill River, the main Rhine tributary in Alsace, has a catchment area of 9800 km^2, extending from the northern Jura chain. In this part of its catchment area, the Rhine River exhibits a braided style, owing to bar migrations between channels (Church, 1978; Schumm, 1981; Miall, 1996). This is principally due to the high mean slope value of the valley of about 0.87% (Schäfer, 1973). Consequently, a sizeable discharge has resulted in the formation of gravel bars supplied by the Alpine massif, the Swiss plain and the Jura. This morphology and most of the sediments of the Rhine floodplain are largely inherited from Plio-Quaternary history (Mäckel et al., 2002, 2003).

The landscape of this floodplain can be subdivided into two zones: the "Hardt" and the "Ried" depending on altitude, soil type and vegetation cover (Striedter, 1988; Carbeiner, 1997; Sell et al., 1998). The "Hardt" area represents the Weichselian alluvial fan (lower terrace) of the Rhine River, which has built up between the Ill and the Rhine, and now rises several metres above both (Blanalt et al., 1974; Théobald et al., 1978). It shows a relatively intense soil formation resulting in calcretes (also known as "Rheinweiss") and clay-rich soils. The "Rieds" are wet areas which are frequently inundated Holocene palaeochannels, mainly composed of fine sand or organic-rich sediments (fluviosols) (Baize et al., 1995).

2.2. Study area

The inspection of ancient maps allowed the former river pattern, channel abandonment and evolutive alluvial vegetation to be interpreted (Thorne et al., 1993). Many authors have demonstrated the close relationship between alluvial vegetation type, vegetation growth and timing of bar surface exposure between high stages (Williams and Rust, 1969; Bridge et al., 1986; Klein et al., 1992; Bridge, 2004). Thus, flood vulnerability may be documented, before the 19th century engineering works on the Rhine that changed the fluvial environment (Tulla, 1825, 1827; Eisenmenger, 1907; Lefoulon, 1959; Marchal and Delmas, 1959; Decoville-Faller, 1961; Tricart and Bravard, 1991). The study area (2 km^2) is situated on both "Hardt" and "Ried" zones, as shown in Fig. 2. At the beginning of the 18th century (Fig. 2), the landscape in the vicinity of the Oedenburg site may be defined as a mosaic, subdivided into four areas, identified in relation to the type of vegetation. The active braided stream is recognised by unvegetated bars (transient state), while higher, softwood-forested islands form the second, stable area. A slightly vegetated wet grassland (e.g. *Carex sp.*, *Impatiens glandulifera*, and *Phalaris arundinace*) with a small population of trees and shrubs (e.g. *Salix sp.*, *Cornus sanguinea*, and *Viburnum lantana*) corresponds to the frequently inundated plain. The Oedenburg site is mainly located in this third part of

the landscape and extends to the gravel terrace ("Hardt") where the hardwood forest and cultivated areas developed. The course of the main road which nowadays connects Biesheim with Oedenburg has followed the eastern border of the terrace since Roman times.

2.3. Landscape and human analysis

This alluvial landscape was analysed using aerial photographs and microtopography in order to replace the human settlement in its palaeogeographic setting. The inherited morphological structures of the ancient alluvial environment can be identified through maize growth anomalies due to changes in soil moisture and texture properties (Fig. 3). Several orthorectifications were performed on aerial photographs in order to characterise the exact extent of both humid and dry structures. The wetter, lower zones are interpreted as palaeochannels or anthropogenic excavated structures, such as ditches, filled with fine sediment. The drier zones correspond to alluvial landforms such as palaeobars and terraces, but also to anthropogenic structures such as Roman roads and walls.

The Oedenburg site developed on three distinct zones in this part of the alluvial landscape (Petit et al., 2006; Reddé et al., 2005). Zone A is situated on the eastern side. It is a wide, relatively dry zone (187.5 m ASL) showing several northward-oriented minor palaeochannels (10–20 m wide). It is interpreted as an ancient bar or island with superimposed cross-bar channels. In this part of the alluvial plain, ditches limiting a first-century Roman military camp were observed during excavation studies (Fig. 3A). Zone B is limited on its western side by the alluvial terrace, and comprises several islands and minor braided palaeochannels (50 m wide), and two larger meander-like palaeochannels of about 100 m in width. The modern canal cuts across these palaeochannels. The Roman archaeological site under study was built on the main island of Zone B, which measures approximately 200 m × 300 m (Fig. 3B). In Fig. 3, a NE–SW-oriented Roman road can be observed, which connects the site to the alluvial terrace. To the west, Zone C represents the highest part of the study area (189–192 m ASL) and exhibits several N–S-oriented minor palaeochannels. The road between Biesheim and Kunheim runs along this terrace. Around this highest point of the

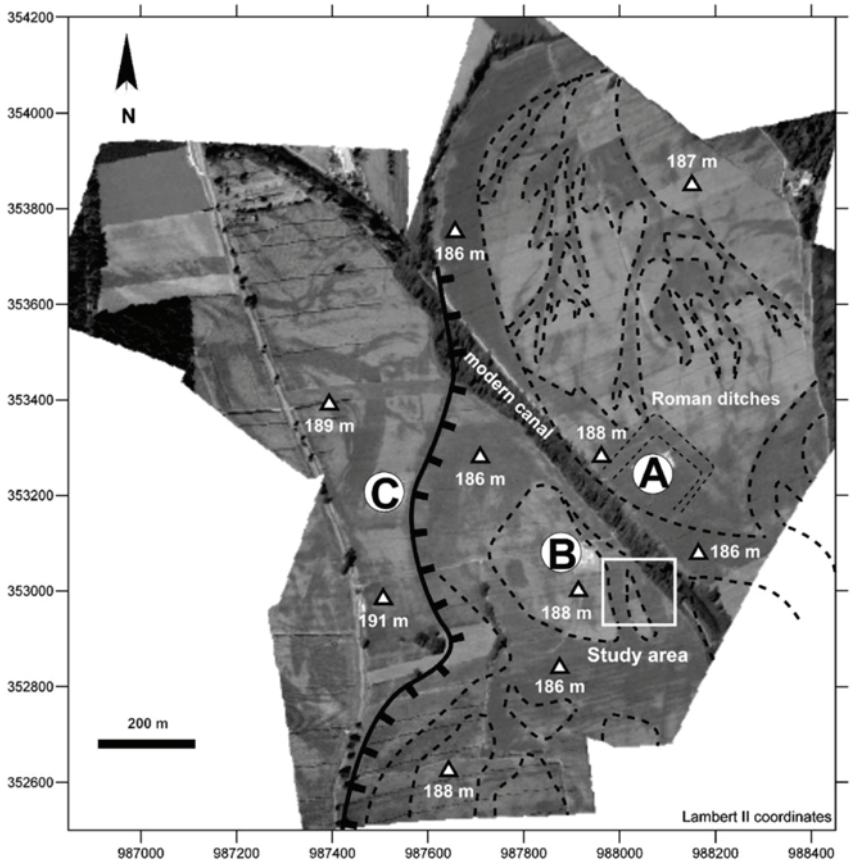


Fig. 3. Mosaic of orthorectified aerial photographs of the study area that allows the exact positioning of palaeochannels and palaeobars/islands: (A) 1st century Roman military camp; (B) main part of the 1st–3rd century Roman town; and (C) main part of the 4th century Roman town. Original photographs were taken by O. Brasch in 1999 (unpublished). Spatial coordinates are Lambert II extended.

landscape, the major part of the 4th century settlement developed, around a military fortress (Fig. 3C).

2.4. Chronology

The archaeological site of Oedenburg is located in the Rhine floodplain. It was dedicated to civilian activities (1st–4th century AD) and to two different military settlements (1st and 4th century AD) (Zehner, 1998; Nuber et al., 2002; Petit et al., 2005; Reddé et al., in press). Thus, the excavated area shows a continuous period of occupation, encompassing the first four centuries of the Roman Period in Alsace. The studied area is located in Zone B, on the concave bank of a major meandering palaeochannel, shown in Fig. 3. This palaeogeographical setting allows us to describe the evolution of the landscape from the first century onwards (a civilian settlement associated to the military camp), up to the third century (the end of urban district development).

An area of approximately 4000 m^2 (Fig. 3: Zone B and Fig. 4) was excavated in order to study this district of the Roman town. Two small, more or less linear palaeochannels were clearly identified by aerial photograph analysis and microtopographic surveys. They are separated by a longitudinal, stable gravelly island. The eastern channel is oriented to the north–west, while the western one is oriented north–eastward. Human settlement in this confluence zone may be subdivided into three major phases (Fig. 4). Phase 1 of the settlement, which is recorded as wood-rich layers and woody structures (building 1), can be found all over the surface of the excavated site and in the two marshy palaeochannels. These anthropogenic, woven brushwood deposits are widespread and formed a layer of brushwood matting, used to consolidate these Early Gallo-Roman channels. In this part of the site, Phase 1 is dated by dendrochronology to AD 20. Phase 2 corresponds to the expansion of Roman urbanisation. A road system, with two streets built across the palaeochannels, developed at about the same time. Attested by dendrochronological dating, the first, associated to building 1 (North–South Way, Fig. 4) was built in AD 62 or earlier. The second (East–West Way, Fig. 3) is dated by dendrochronology to the period from AD 97/98 to AD 145/146. Phase 3 is defined by large buildings closely associated to the East–West Way (buildings 2 and 3 but also thermae) dated to the first half of the 2nd century AD. These buildings allow us to attribute a *terminus ante quem* of winter AD 145/146 to the Roman roads, by the dendrochronological dating of several piles. The thermae complex represents the last period of occupation, which occurred in the second half of the 2nd century AD.

3. Excavation and field study measurement

Planimetric surveys at scales of 1/20 and 1/50 were performed in order to document the spatial extent of stratigraphic units. The archaeological context provides accurate chronological information and leads to better interpretation of anthropogenic deposits. During several excavation surveys, field observations were made on several cross-sections and trenches. Stratigraphic description was performed at the 1/20 scale, in order to study the rapid facies variations in archaeological levels, in this alluvial sedimentary environment. Therefore the sequence of palaeochannel fill deposits was studied in relation with the Gallo-Roman settlements. In this way, in spite of considerable lateral variation, facies were spatially tracked at the scale of the excavation, and correlations became possible. During field study, facies were described using sediment type, grain size, geometry, bioturbation features,

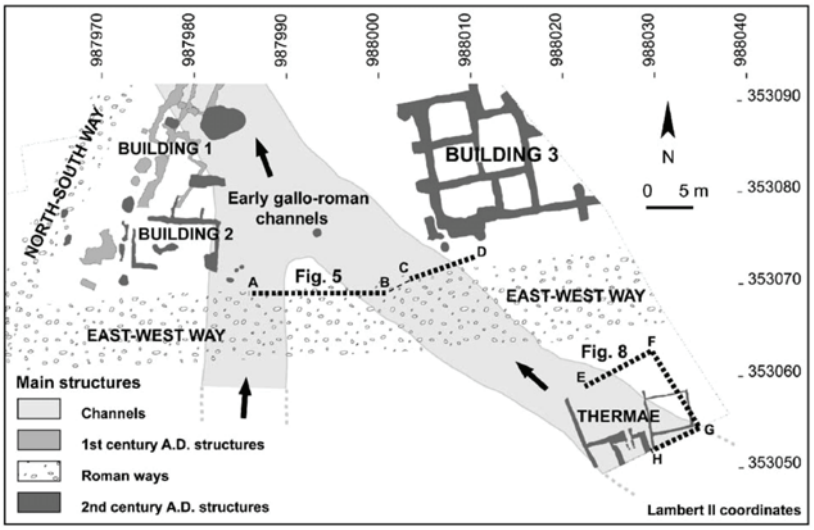


Fig. 4. Map of the main excavated structures dated from 1st to 3rd century. Spatial coordinates are Lambert II extended.

pedogenesis and basal contact, but also with reference to their relationships with archaeological structures.

The great density of samples taken as columns or cores of sediments allowed the construction of reference sequences. Microgranulometry analysis was performed using a Coulter LS 130. The detector range is from 0.4 μm to about 900 μm with the Fraunhofer optical model. We analysed 75 samples to quantify the respective proportions of clays, silts and sands within sediments (Passega, 1957; Rivière, 1977). The micromorphological study of soft sediment was performed by analysing 14 thin sections. These investigations were carried out in order to detect elementary sedimentary structures, possible bioturbation tracks (e.g. burrows and roots), fossil organic remains (e.g. gastropods and plants), trampled zones, and load structures. Over 200 wood samples were analysed using dendrochronology (Petit et al., 2005).

4. Results

4.1. Facies and geometric description

Anthropogenic as well as alluvial sediments were recognised and nine major facies types were described (Figs. 5–8). From facies interpretation, it is possible to infer different depositional processes, referred to as natural channel/floodplain and anthropogenic deposits.

4.1.1. Fluvial facies

4.1.1.1. Gravel and pebbles (facies g). Facies g corresponds to imbricated gravels and pebbles (main grain size 6–10 cm) in the substratum. It corresponds to mid-channel bars formed after the period of incision of the floodplain terrace during the Lateglacial Period (Blanalt et al., 1974; Théobald et al., 1978). After its formation, this bar stopped migrating and became an island separating two small channels. This facies has been recognised on the island situated between the two palaeochannels (Fig. 5).

4.1.1.2. Silts and clays (facies a)

Description. The lower part of the observed channel-fill sequence (facies a) is older than the excavated archaeological structures. This facies is a homogenous light yellow or blue hydromorphic mud, onlapping and filling the broad channel, as observed in aerial photographs. It is a fining-upward layer from silty-sand to sandy-silt at the bottom, to clayey-silts at the top of the fill (Fig. 5). Rare root tubules are present (Fig. 6). At the top of this layer, the clayey-silty fraction largely dominates, forming up to 95% of the sediment. Moreover, the major mode is close to 10 μm with two secondary modes; the size parameters indicate a wide range of grain size and a poor sorting (Fig. 6b). This detrital deposit, up to 2 m thick, exhibits neither sedimentary structures nor any bedding. These fine silt deposits were successively cut across by a new, shallower (less than 2 m), narrower (about 10 m), SSE–NNW-oriented palaeochannel, cutting across the Holocene channel fill (Fig. 5).

Interpretation: gradual channel infilling: The homogenous silty-clay sediment (facies a), represents a period of decantation as the main sedimentation mode in the channel, i.e. uniform suspension on a C/M diagram. This is the first step in the filling of the palaeochannels in this part of the Rhine floodplain. The incision of the top of this layer and the superimposed root tracks give evidence of one erosional phase, i.e. a short period of channel reactivation, followed by the development of vegetation within an aquatic environment.

4.1.1.3. Organic-rich silts and fine sands (facies b)

Description. The first occurrence of facies b is well observed due to colour and texture differences when compared to facies a. This facies occurs at two distinct levels. The lower occurrence is found over the basal erosive surface of the palaeochannel, interlayered with facies d and e. It constitutes a channel deposit of the Early Gallo-Roman, due to its contemporaneous relationship to

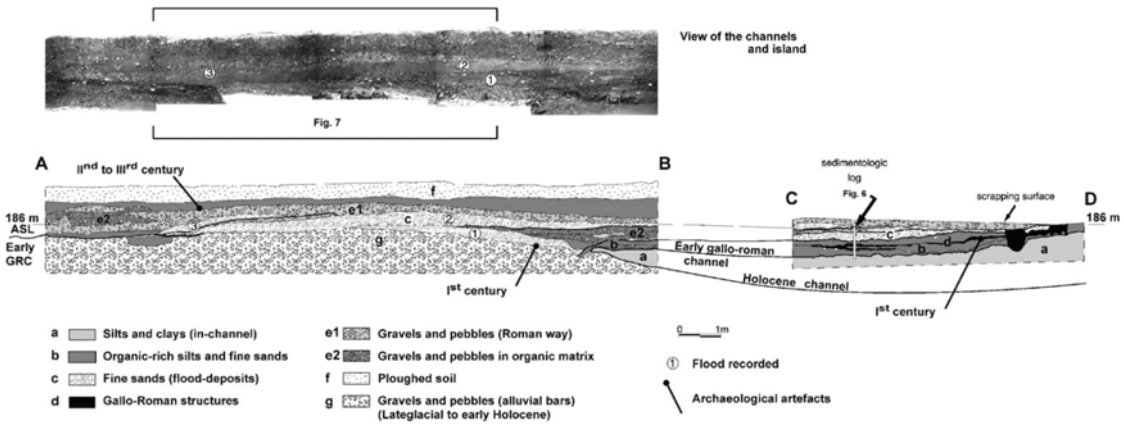


Fig. 5. Stratigraphic cross-section (A–B, C–D) and photograph of the Early Gallo-Roman Channel (early GRC) and the island of the main part of the 1st–3rd century Gallo-Roman town. Three flood deposits (facies c 1, 2, and 3) are interlayered with anthropogenic deposits (facies d and e).

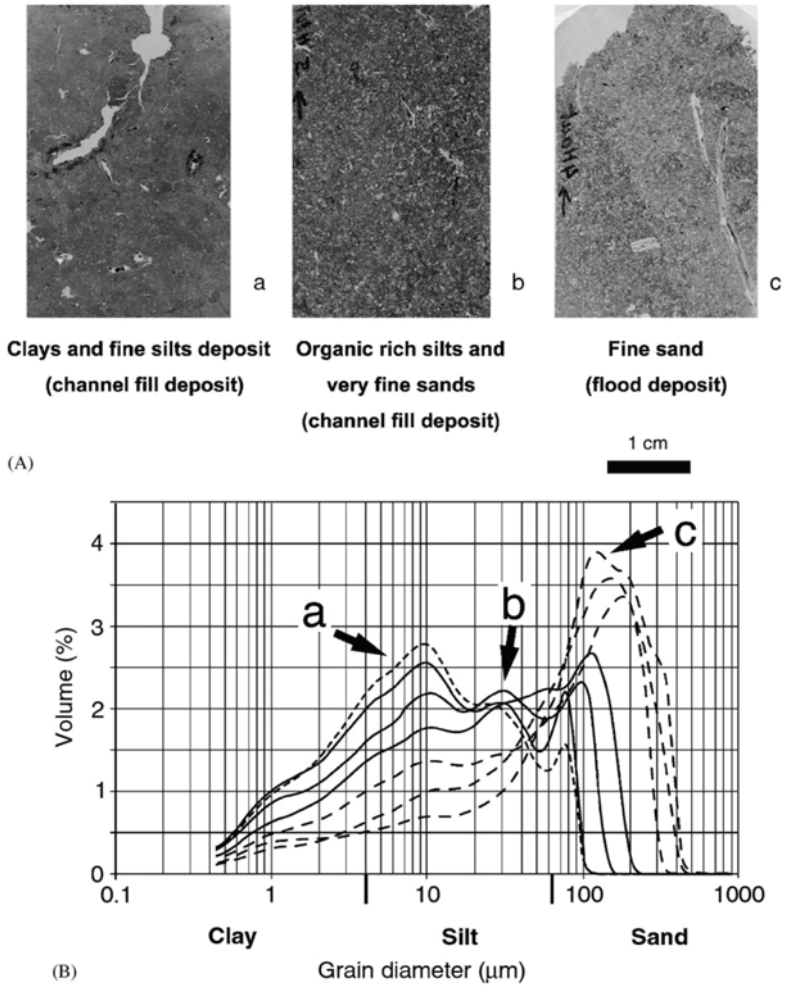


Fig. 6. (A) Micromorphological thin sections of the three alluvial facies. Facies a shows burrows and root tracks. Facies b is composed of many organic matter allochems. Facies c seals vertical vegetal remains (stems). (B) Microgranulometry results of facies a, b and c. In facies a, the clayey-silty fraction largely dominates, with a wide range of grain sizes and poor sorting. The major mode is close to 10 µm. In facies b a three-mode distribution is shown. Facies c presents a well-sorted grain-size distribution with a single mode at about 150 µm.

archaeological structures dated to the 1st century AD. The same facies extends over the whole study area: it has also been recognised in deposits from the 4th century to the Modern Period. Facies b corresponds to organic-rich fine silty-clayey sandy deposits. A three-mode distribution is shown in Fig. 6. Many allochems of organic origin are observed. No evidence of bioturbation nor of pedogenesis is observed but it is clear that the root tracks observed in facies a are caused by vegetation growing within the Early Gallo-Roman channel during the deposition of facies b.

Interpretation: abandoned channel deposits: Compared to facies a, the sandy fraction in this sediment reaches about 25% (Table 1). This evolution towards coarser facies in b is interpreted on a C/M diagram (Passega, 1957) as a higher contribution of graded suspension. The high content in organic matter and also the vegetation growing within the channel (facies b) are interpreted as inherited from a marsh environment. Therefore, this part of the floodplain was disconnected from river dynamics except during floods. This depositional episode is contemporaneous with the first observed human settlement, and is dated by dendrochronology at about AD 20 or earlier. It constitutes the Early Gallo-Roman channel.

4.1.1.4. Fine sands (facies c)

Description. The basal boundary surface of facies c is erosional in character in every excavation (Figs. 5 and 7). Facies c is a fine sandy sterile layer which is present over the whole excavation surface. Layers of facies c are about 10–20 cm thick and show a continuous sheet shape. They are referred as to 1, 2, 3 and 4 in Figs. 5 and 8. The first was deposited on facies d on the island, and on facies b in the

palaeochannels. The remaining three facies c deposits are interfingered within coarser levels (facies e1 and e2) and their geometric relationship is prograding in character. Closer observation of vertical vegetal remains (stems) in thin sections attests the single-event deposition of sediments, sealing the previous levels at one and the same time (Fig. 6). This facies presents a well-sorted grain-size distribution, with a single mode at about 150 μm. However, a fining-upward sorting is observed and measured by decreasing median values, from 82 μm at base to 46 μm at the top, as indicated in Table 1.

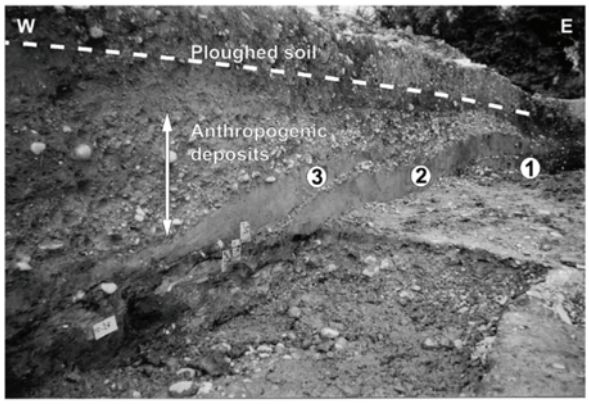


Fig. 7. Oblique field photograph of the cross-section A–B showing lateral extension of flood deposits and thickness variation of anthropogenic deposits. Small boxes are 5 cm long.

These layers are commonly affected by an upper erosional truncation observed more frequently in the two palaeochannel thalwegs than in the borders (Fig. 7). Where the third layer of facies c is preserved in the western palaeochannel, it is enriched in organic matter. In Figs. 5, 7 and 8, the geometry of facies c deposits is shown, overlapping facies b or facies e1 deposits. The truncation is also well observed at the interface between facies c and facies e1 layers, showing a basal erosion surface as well as an upper erosion surface for facies c. It is clearly identified that erosional processes were more effective in the channels than on the island, leaving only eroded scraps, even if facies c deposits originally had a sheet or a lens shape.

Interpretation: overbank deposits: The homogenous unimodal well-sorted fine sands which are characterised by fining-upward sorting (facies c) indicate a deposition under decelerating flow conditions, i.e. graded suspension on a C/M diagram (Table 1). Moreover, they show a basal erosional surface and a broad spatial distribution on islands as well as in palaeochannels. These indicate the event origin of these deposits, i.e. floods, according to the environmental context. Each flood deposit is interlayered with anthropogenic levels, allowing accurate dating of the events. The preservation of these deposits is better on the islands than in the palaeochannels, possibly due to water flow erosion at the end of the floods. These incisions have

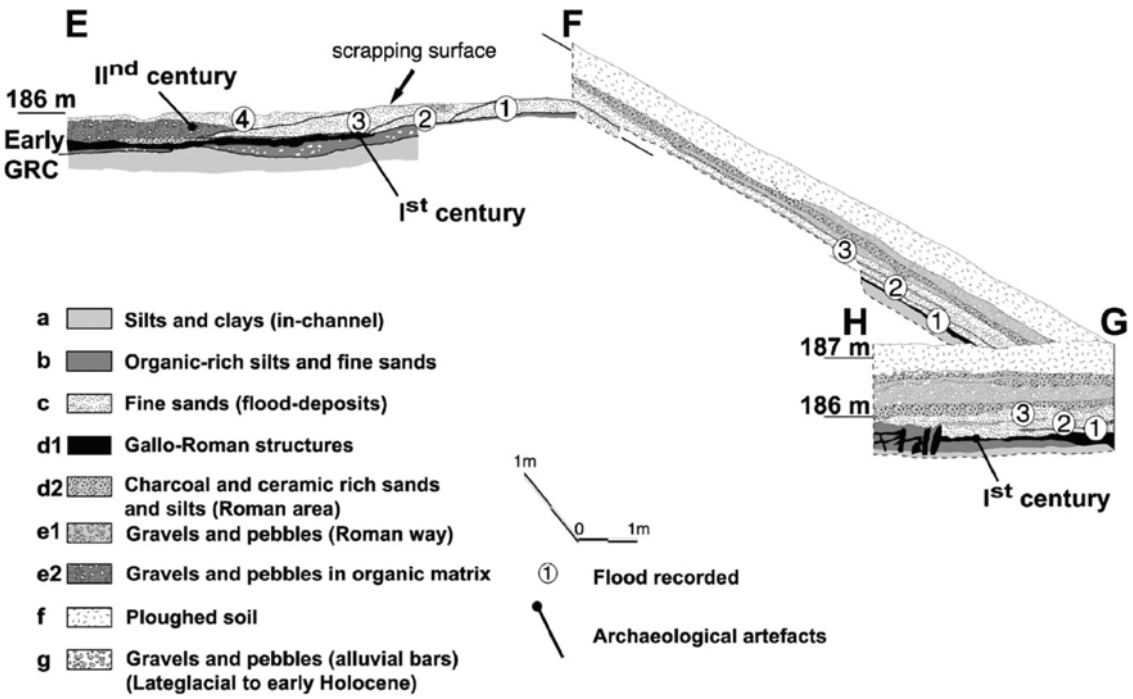


Fig. 8. Stratigraphic cross-section (E–F, F–G, G–H) of the Early Gallo-Roman Channel (early GRC) in the southern part of the study area. Four flood deposits (facies c 1, 2, 3 and 4) are interlayered with anthropogenic deposits (facies d and e).

Table 1
Grain-size parameters and descriptors of the three alluvial facies a, b and c

Facies	Clays (%)	Silts (%)	Sands (%)	Median (μm)	Mode (μm)	Skew index	Kurtosis index	Sorting	Basal incision	Fining upward sorting	Bioturbation allochems	Color
a	15.6	79.2	5.2	9	10, 30, 75	1.82	2.80	Poor	No	Yes	Post-deposition	Light yellow to blue
b	10.1	64.9	25.0	24	10, 30 and 75–120	1.25–1.39	0.5–0.99	Poor	Yes	No	Syn-deposition	Brown to dark brown
c												
Bottom	4.9	41.0	54.1	82	200	0.84–0.95	Negative	Well	Yes	Yes	Post-deposition	Light yellow
Top	8.5	52.7	38.8	46	150	1.05						

been observed at the top of each flood deposit. The position near the concave bank of a main meandering palaeochannel (Fig. 3) allows us to consider these deposits as crevasse splay deposits (Leopold et al., 1957; Reineck and Singh, 1980; Bridge, 2004). We identified four separate flood deposits, all very similar. Such deposition in this location, comparable to well-known historical floods, allows us to consider that almost all the Rhine alluvial plain in the vicinity of the Gallo-Roman site of Oedenburg was inundated (Fig. 9). An organic marsh (facies b) typical for the Rhine "Ried", developed after the Roman Period. The "Ried" marsh persisted until the 19th century. However, although such a marshy environment is likely to preserve flood deposits, no events were recorded during this period, yet historical documentation provides evidence of several floods (Fig. 7). This deficiency is probably due to ploughing and biological activity during the 20th century.

4.1.2. Anthropogenic deposits

4.1.2.1. Organic-rich anthropogenic deposits (d1 and d2)

Description. Facies d1 corresponds to wood-rich layers oriented in the same direction (woven brushwood deposits), and is considered in the archaeological context as a circulation surface associated to several structures dated from the 1st century (building 1). Facies d2 is a "throw-out deposit", i.e. a ceramic-, *tegulae*-, mortar- and charcoal-rich sediment indicating the proximity of human occupation.

Interpretation: Facies d1 and d2 may be interpreted as anthropogenic deposits because they are associated with excavated structures (Fig. 4). Facies d1 corresponds to a wooden installation, whereas facies d2 is a rubbish deposit.

4.1.2.2. Building materials (facies e1 and e2)

Description. Facies e1 corresponds to sandy gravel and pebble anthropogenic deposits. Laterally, the facies grades into an organic-rich matrix in the channel areas (facies e2). These facies stratasets are always associated with other Roman structures (buildings 1, 2 and 3). These layers are interlayered with the finer levels of facies c.

Interpretation: These archaeological structures are Roman road levels or pathways and wall foundations; they are thicker in the palaeochannel than on the island surface.

4.1.2.3. Ploughed soil (facies f). Ploughed soil from modern agricultural activities is characterised by disorganised anthropogenic remains in a brown organic-rich sandy-silt matrix (Fig. 6).

5. Discussion

5.1. Flood event chronology on the site

The four recorded flooding events occurred during a short period of time, between AD 20 and AD 145/146, as indicated by dendrochronological dating (Petit et al.,

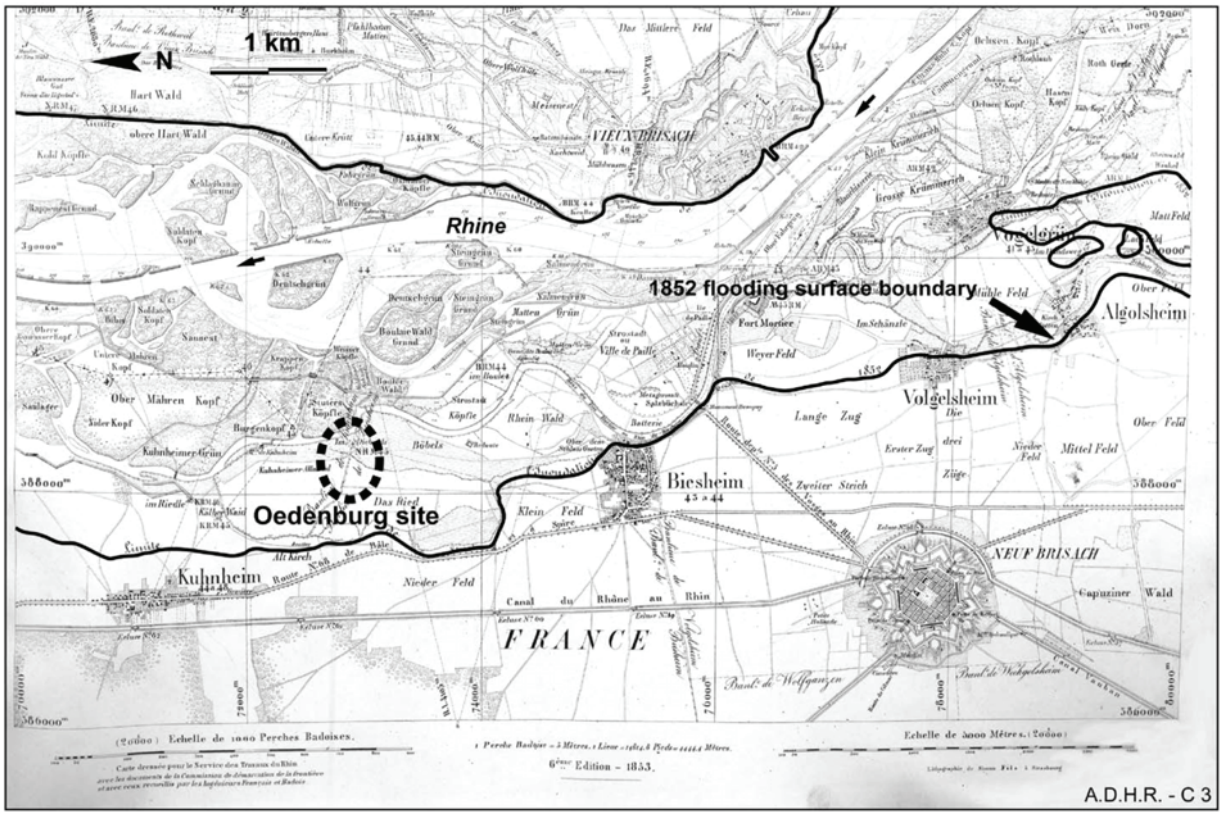


Fig. 9. Ancient map of the Oedenburg area, showing the spatial extent of the 1852 flood event. After a map dated 1853 (Archives Départementales du Haut-Rhin, France). Note the location of "New-Kunheim", situated outside the floodplain.

2005). Few historic floods of comparable extent are known in this lateral part of the Rhine floodplain. For example, by studying ancient maps, we know that the flood event of 1852, considered to have a centennial return-period, was of similar extent (Fig. 9). This very notable, well-documented historical event is known to be as severe as the exceptional floods of 1641 (6.54 m, under Basel Bridge), and of 1876 (5000 m^3/s, Basel [the greatest flood known in Basel]; 5700 m^3/s, Strasbourg) (Champion, 1863; Criqui, 1981; Maire and Sanchez-Perez, 1992; Descombes, 1995; Conrad, 1999). Even if site abandonment after floods (Brown, 1997) is rare, the town of Kunheim (Figs. 2 and 9) was abandoned after being partially destroyed by the 1763 flood event.

Therefore, for an alluvial morphology similar to that of the Modern Period, this part of the Rhine floodplain must be considered to have been inundated only during centennial-scale flood events. Even if the flood sensitivity and frequency in this area has changed since Antiquity, it is probable that the floods recorded in Oedenburg:

(1) were of considerable size, because of the lack of other flood deposits during the period before and after Roman settlement.

(2) seem to be clustered within a short time interval of about 125 years: from AD 20–AD 145/146.

5.2. Rhine River

The archaeological data highlighting ancient hydrological variations of the Rhine in the Alsace floodplain are very scarce. Nevertheless, Rhine floods are also known at Ehl (Bas-Rhin) around AD 50–60, 80 and 97–160 (Hatt, 1954, 1966a, b; Provost, 1984; Vogt, 1988). The four flood events recorded in the Oedenburg Gallo-Roman site happened during this time interval, from AD 20 to AD 145/146.

In the same catchment area, in Lake Constance, flood events have been identified in 4100, 3300 and 2600 cal.year BP. Such events were only observed during glacial advances in the Alps. For later periods, some other coarse laminae that we interpret as flood deposits were recognised as being deposited in around AD 100–200 (Wessels, 1998). According to Starkel (2002), 'the fragmentary records of events in the fluvial system can coincide with smoothed variations of the lake level'. Therefore, it is possible to consider that the four floods recorded in the Oedenburg Gallo-Roman site are also recorded in the lacustrine deposits of Lake Constance.

5.3. Alpine region

In other Alpine catchments, numerous flood events and lake-level fluctuations have been recognised during Antiquity. In the whole Rhône catchment area, several floods may be associated with a humid period during the first two centuries AD (Provansal et al., 1999). In the Rhône delta, the period between 100 BC and AD 200 corresponds to a higher sedimentation rate of alluvial origin (Arnaud-Fassetta and Landuré, 2003). However, this 1st and 2nd century AD alluvial phase in the Rhône catchment area is interpreted as being amplified by anthropogenic forcing (Bruneton et al., 2001; Arnaud-Fassetta, 2002; Salvador et al., 2002; Berger et al., 2003, 2004). Moreover, the short period when the four centennial-scale floods in Oedenburg occurred is contemporaneous with the 'Petit Maclu 1' trangressive phase recorded in Jura lakes (Petit Maclu, Léman, Le Bourget, de Pluvis and Zurich Lakes). It began in AD 18, and probably ended before the start of the third century (Magny, 1993, 2004).

Nevertheless, the flood events that occurred during a long period of favourable climatic conditions and immediately following the first Iron Age degradation period (3500–2500 BP) do not seem to be identified at a global scale (Mayewski et al., 2004).

6. Conclusion

The Gallo-Roman site of Oedenburg provides a very good record of Rhine flood deposits, and allows the study of discrete events as well as continuous alluvial changes during the whole settlement period: i.e. channel abandonment and marsh development, or, conversely, channel activity. The landscape at the time of the first Roman settlers was composed of two wide meandering channels running between gravelly islands, and several little channels and marshy zones. These palaeochannels were filled with organic-rich silty-sands, then occupied from AD 20 to the second century. During this period, between AD 20 and AD 145/146, four floods occurred in the Rhine floodplain, and were recorded on the archaeological site. Dendrochronological dating and archaeological excavation framework allow us to define the chronology and spatial distribution of the flood deposits with great accuracy. Moreover, archaeological structures and artefacts deposits testify for an immediate re-occupation of this zone after each flood event.

This suggests that the hydrological risk in the Rhine floodplain did not interfere significantly with Roman settlement planning, but also that any civil engineering, if existent, was not efficient enough to protect the zone from flood risk. These floods are similar in extent to those that occurred in 1641, 1852 and 1876. Even if only a small part of the catchment is observed through archaeological excavation, it is possible to assess the rank of four major floods in this area, situated far from the main active braided zone of the Rhine River. Flood frequency is difficult to assess but appears to have no significance in human history in this part of the Rhine floodplain.

Acknowledgements

This research was supported by (1) the French–German–Swiss 'Oedenburg Program', (2) the UMR-CNRS 5561 'Biogéosciences', Centre des Sciences de la Terre, Université de Bourgogne, and (3) the Ecole Doctorale Buffon. Their support allowed us to present our results at the 32nd International Geological Congress, Florence, Italy: *Geoarcheology for climatic changes and catastrophic events in human history*. All sedimentological analyses were carried out at the Université de Bourgogne. All dendrochronological analyses were carried out by Olivier Girarclos (CEDRE, Besançon, France). The authors would also like to thank Carmela Chateau-Smith for her helpful contribution to this work.

References

Arnaud-Fassetta, G., 2002. Geomorphological records of a 'flood-dominated regime' in the Rhône Delta (France) between the 1st century BC and the 2nd century AD. What correlations with the catchment paleohydrology? Geodinamica Acta 15 (2), 79–92.

Arnaud-Fassetta, G., Landuré, C., 2003. Hydroclimatic hazards, vulnerability of societies and fluvial risk in the Rhone Delta (Mediterranean France) from the Greek period to the early middle ages. In: Fouache, E. (Ed.), The Mediterranean World Environment and History. Proceedings of the International Conference on Environmental Dynamics and History in Mediterranean Areas, Paris, 24–26 April 2002. Elsevier, Paris, pp. 51–76.

Baize, D., Girard, M.-C., Arrouays, D., Aubert, G., Aubrun, A., Aurousseau, P., Beaudou, A., Bornand, M., Boulaine, J., Bresson, L.M., Brethes, A., Chrétien, J., Favrot, J.-C., Jabiol, B., Jamagne, M., Kaloga, B., Laplace-Dolonde, A., Loyer, J.-Y., Luspascu, G., Marius, C., Ninov, N., Podwojevski, P., Pouget, M., Quantin, P., Righi, D., Rossignol, J.-P., Ruellan, A., Van Vliet, B., Vizier, J.-F., 1995. Référentiel pédologique. INRA, Paris 332pp.

Berger, J.-F., Fiches, J.-L., Gazenbeek, M., 2003. Origin of fluvial fluctuations of the river Vidourle and their effect on the organisation and evolution of the site of Ambrussum (Herault, France) between the Iron Age and Late Antiquity. In: Fouache, E. (Ed.), The Mediterranean World Environment and History. Proceedings of the International Conference on Environmental Dynamics and History in Mediterranean Areas, Paris, 24–26 April 2002. Elsevier, Paris, pp. 77–108.

Berger, J.-F., Fiches, J.-L., Gazenbeek, M., 2004. La gestion du risque fluvial à Ambrussum durant l'Antiquité par les riverains du Vidourle. In: Burnouf, J., Leveau, P. (Eds.), Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris, pp. 419–435.

Blanalt, J.-G., Eller, J.-P., Fluck, P., Geffroy, J., Hillermann, G., Jehl, M., Monnet, C., Schreiner, J., Eckerle, A., Sittler, C., Schwoerer, P., Tricart, J., Hirth, C., Vogt, M., Weil, R., Siat, A., 1974. Notice explicative de la carte géologique de la France à 1/50 000, Feuille Colmar-Artolsheim.

Bridge, J.S., 2004. Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record. Blackwell Publishing, Oxford 491pp.

Bridge, J.S., Smith, N.D., Trent, F., Gabel, S.L., Bernstein, P., 1986. Sedimentology and morphology of the low-sinuosity Calamus River, Nebraska Sandhills. Sedimentology 36, 851–870.

Brown, A.G., 1997. Alluvial Geoarchaeology. Floodplain Archaeology and Environmental Change. Collection Cambridge Manuals in Archaeology. Cambridge University Press, Cambridge 377pp.

Bruneton, H., Arnaud-Fassetta, G., Provansal, M., Sistach, D., 2001. Geomorphological evidence for fluvial change during the Roman Period in the lower Rhone valley (southern France). Catena 45 (4), 287–312.

Carbeiner, R., 1997. Le Grand Ried d'Alsace. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 734, 15–44.

Champion, M., 1863. Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours, T. 5: Bassin du Rhin. Dunod, Paris 283pp.

Church, M., 1978. Paleohydrological reconstruction from a Holocene Valley fill. In: Miall, A.D. (Ed.), Fluvial Sedimentology, Memory of the Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary, vol. 5, pp. 743–772.

Conrad, O., 1999. Fléaux et calamités naturelles au siècle dernier dans le Haut-Rhin. Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt et du Ried 12, 93–114.

Criqui, G., 1981. Le régime hydraulique, les crues et les inondations du Rhin. In: Ayçoberry, P., Ferro, M. (Eds.), Une histoire du Rhin. Ramsay, Paris, pp. 317–336.

Decoville-Faller, M., 1961. Les transformations du réseau hydrographique réalisées depuis un siècle dans la région de Neuf-Brisach. Regio Basiliensis 2, 113–134.

Descombes, R., 1995. L'eau dans la ville. Des métiers et des hommes. Hirlé, Strasbourg 351pp.

Eisenmenger, G., 1907. Etudes sur l'évolution du Rhin et du système hydrographique rhénan. Bonvalot-Jouve, Paris 512pp.

Hatt, J.-J., 1954. Les fouilles de Strasbourg en 1953 et 1954, découverte d'un dépotoir de céramiques. Gallia 12 (2), 323–339.

Hatt, J.-J., 1966a. Ehl (Ellelum?). Gallia 24 (2), 313–319.

Hatt, J.-J., 1966b. Le Rhin dans l'Histoire. L'Antiquité. Connaissance du Rhin, Saisons d'Alsace, Strasbourg 153pp.

Klein, J.-P., Carbeiner, R., Steimer, F., Trendel, J.-M., 1992. Les réserves naturelles des forêts alluviales rhénanes d'Erstein et d'Offendorf: Un patrimoine biologique européen. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 824, 21–58.

Lefoulon, R., 1959. L'aménagement du Rhin sur le tronçon entre Bâle et Strasbourg. La Houille Blanche 2, 203–306.

Leopold, L.B., Wolmann, M.G., Miller, J.P., 1957. Fluvial Processes in Geomorphology. Freeman, San Francisco 522pp.

Mäckel, R., Schneider, R., Friedmann, A., Seidel, J., 2002. Environmental changes and human impact on the relief development in the upper Rhine valley and Black Forest (South-West-Germany) during the Holocene. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Bd. 128, 31–45.

Mäckel, R., Schneider, R., Seidel, J., 2003. Anthropogenic impact on the landscape of southern Badenia (Germany) during the Holocene—documented by Colluvial and Alluvial sediments. Archaeometry 45 (3), 487–501.

Magny, M., 1993. Solar influences on holocene climatic changes illustrated by correlations between past lake-level fluctuations and atmospheric ^{14}C record. Quaternary Research 40, 1–9.

Magny, M., 2004. Holocene climatic variability as reflected by mid-European lake-level fluctuation and its probable impact on prehistoric humain settlement. Quaternary International 113, 65–80.

Maire, G., Sanchez-Perez, J.-M., 1992. Influence des aménagements hydrauliques du Rhin sur le fonctionnement hydrologique des forêts riveraines d'Alsace: L'exemple du secteur de l'île de Rhinau. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 824, 9–19.

Marchal, M., Delmas, G., 1959. L'aménagement du Rhin à courant libre de Bâle à Lauterbourg. La Houille Blanche 2, 177–202.

Mayewski, P.A., Rohling, E.E., Stager, J.C., Karlén, W., Maasch, K.A., Meeker, L.D., Meyerson, E.A., Gasse, F., van Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R.R., Steig, E.J., 2004. Holocene climate variability. Quaternary Research 62, 243–255.

Miall, A. (Ed.), 1996. The Geology of Fluvial Deposits. Springer, Berlin 596pp.

Nuber, H.U., Reddé, M., Jacomet, S., Joly, M., Popovitch, L., Schibler, J., Seitz, G., Fort, B., Matter, G., Pellissier, J., Petit, C., Viroulet, B., Wolf, J.-J., 2002. Le site militaire romain d'Oedenburg (Biesheim-Kunheim, Haut-Rhin, France). Premiers résultats. Germania 80, 169–242.

Passega, R., 1957. Texture as a characteristic of clastic deposition. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 41, 1952–1984.

Petit, C., Girarclos, O., Ollive, V., Reddé, M., 2006. Milieux humides et aménagements anthropiques dans la plaine du Rhin: Le site romain d'Oedenburg (Haut-Rhin). VIIème Colloque AGER, Silva et Saltus en Gaule romaine. Dynamique et gestion des forêts et des zones rurales marginales, in press.

Provansal, M., Berger, J.F., Bravard, J.-P., Salvador, P.G., Arnaud-Fassetta, G., Bruneton, H., Verot-Bourrely, A., 1999. Le régime du Rhône dans l'Antiquité et au Haut Moyen-Age. Gallia 56, 13–32.

Provost, M., 1984. L'homme et les fluctuations climatiques en Gaule dans la deuxième moitié du 2ème siècle après Jésus-Christ. Revue Archéologique 1, 71–78.

Reddé, M., Nuber, H.U., Jacomet, S., Schibler, J., Schucany, C., Schwartz, P.-A., Joly, M., Petit, C., Plouin, S., Seitz, G., Viroulet, B., Wolf, J.-J., Ginella, F., Vandorpe, P., Gissinger, B., Hüster Plogmann, H., Ollive, V., Pellissier, J., Schlumbaum, A., Wick, L., 2005. Oedenburg. Une agglomération d'époque romaine sur le Rhin supérieur. Gallia 62, 215–277.

Reineck, H.E., Singh, I.B., 1980. Depositional Sedimentary Environments. Springer, Berlin 551pp.

Rivière, A., 1977. Méthodes granulométriques: Techniques et Interprétations. Masson, Paris 182pp.

Salvador, P.G., Vérot-Bourrély, A., Bravard, J.-P., Franc, O., Macé, S., 2002. Les crues du Rhône à l'époque gallo-romaine dans la région lyonnaise. In: Bravard, J.-P., Magny, M. (Eds.), Histoire des rivières et des lacs de Lascaux à nos jours. Errance, Paris, pp. 215–221.

Schäfer, W., 1973. Der Oberrhein, sterbende Landschaft? Natur und Museum 103 (1), 1–29.

Schumm, S.A., 1981. Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. SEPM, Special Publication 31, 19–29.

Sell, Y., Berchtold, J.-P., Callot, H., Hoff, M., Gall, J.-C., Walter, J.-M., 1998. L'Alsace et les Vosges. Géologie, milieux naturels, flore et faune, Delachaux et Niestlé, Paris 354pp.

Starkel, L., 2002. Change in the frequency of extreme events as the indicator of climatic change in the Holocene (in fluvial systems). Quaternary International 91, 25–32.

Striedter, K., 1988. Le Rhin en Alsace du Nord au Subboréal. Genèse d'une terrasse fluviatile holocène et son importance pour la mise en valeur de la vallée. Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire 1, 5–10.

Théobald, N., Ménillet, F., Lougnon, J., Bonnet, C., Fluck, P., 1978. Notice explicative de la carte géologique de la France à 1/50 000, Feuille Neuf-Brisach.

Thorne, C.R., Russel, A.P.G., Alam, M.K., 1993. Planform pattern and channel evolution of the Bramaputra River, Bangladesh. In: Best, J.L., Bristow, C.S. (Eds.), Braided Rivers. Geological Society of London Special Publication 75, pp. 257–276.

Tricart, J., Bravard, J.-P., 1991. Le cours périalpin du Rhin, du Rhône et du Danube: aménagement fluvial et dérives de l'environnement. Annales de Géographie 561–562, 668–713.

Tulla, J.G. von, 1825. über die Rektifikation des Rheins, von seinem Austritt aus der Schweiz bis zu seinem Eintritt in das Grossherzogtum Hessen, Karlsruhe, 60pp.

Tulla, J.G. von, 1827. Sur la rectification du cours du Rhin, depuis son débouché de la Suisse jusqu'à son entrée dans le grand duché de Hesse-Darmstadt. Journal de la société des sciences, agriculture et arts de Strasbourg 5–63.

Vogt, H., 1988. Le site de Strasbourg, Aux origines de l'Alsace. Les musées de la Ville de Strasbourg, Strasbourg, pp. 10–12.

Wessels, M., 1998. Natural environmental changes indicated by Late Glacial and Holocene sediments from Lake Constance, Germany. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 140, 421–432.

Williams, P.F., Rust, B.R., 1969. The sedimentology of a braided river. Journal of Sedimentary Petrology 39, 649–679.

Zehner, M., 1998. Carte Archéologique de la Gaule. Le Haut-Rhin, 375pp.

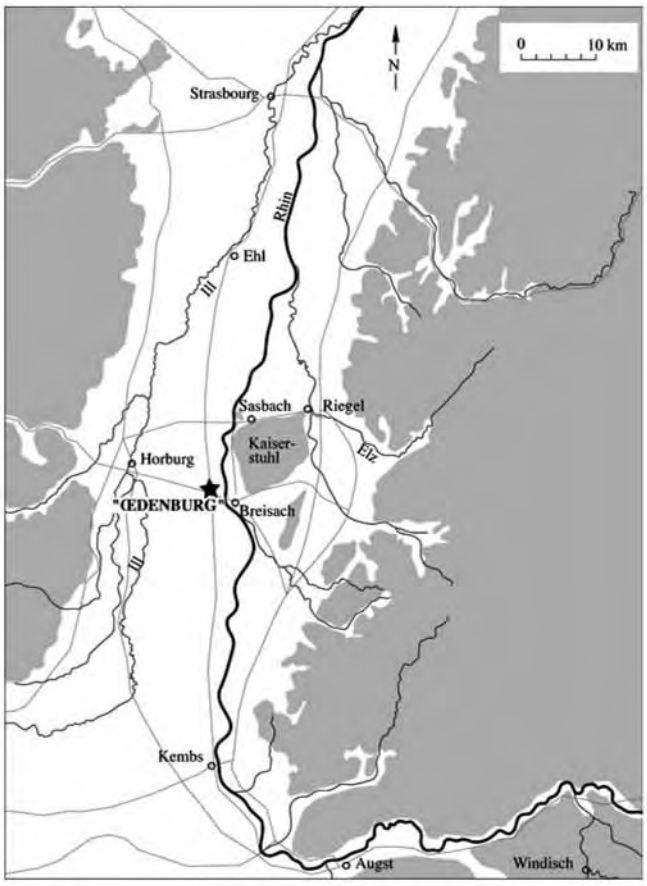


Figure 1 : Carte de situation du site d'Oedenburg

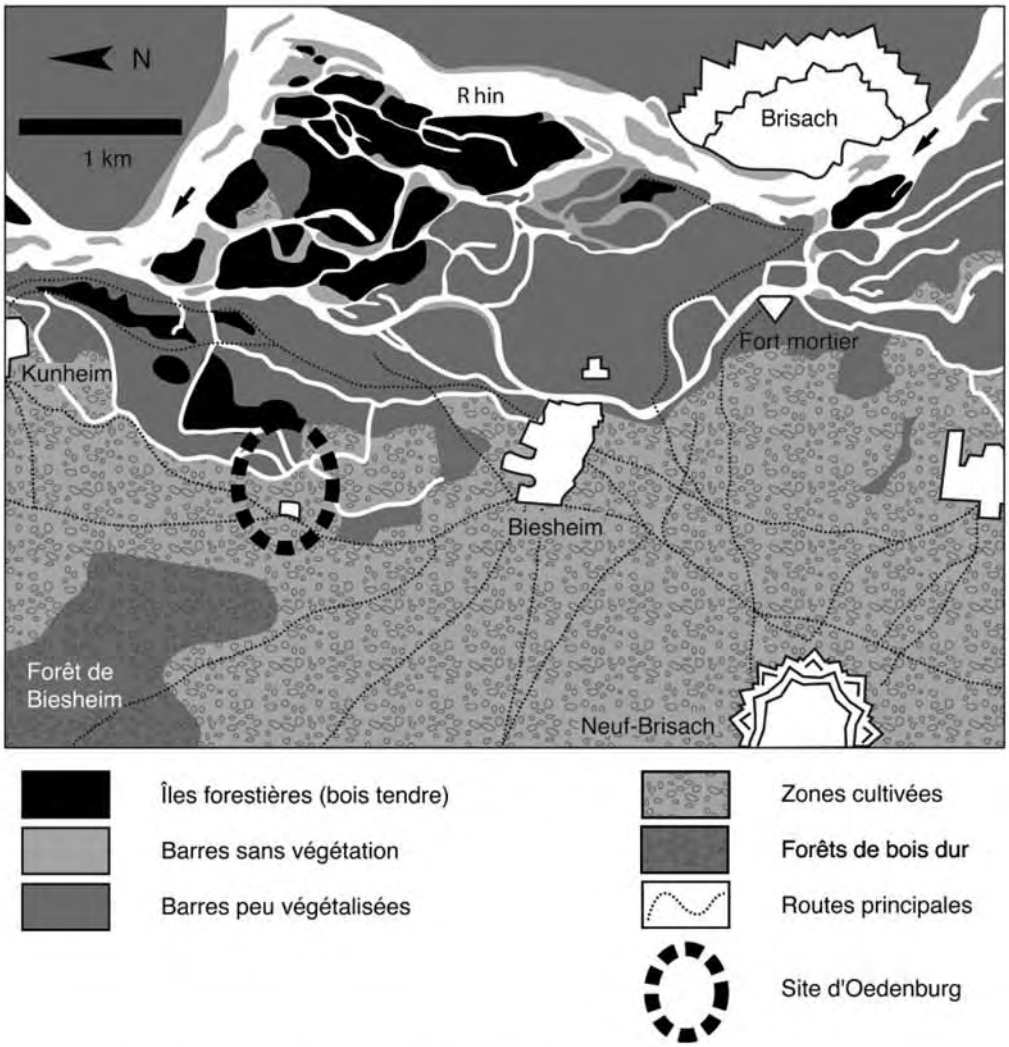


Figure 2 : La position du site en bordure du Rhin

3.3.3. Milieux humides et aménagements anthropiques dans la plaine du rhin : le site romain d'Oedenburg (Haut-Rhin)

VIIème Colloque AGER, Silva et Saltus en Gaule romaine. Dynamique et gestion des forêts et des zones rurales marginales. Sous presse. Par Christophe Petit, O. Girardclos, Vincent Ollive et Michel Reddé.

Le site d'Oedenburg sur les communes de Biesheim et de Kunheim (Haut-Rhin), est installé sur la rive gauche du Rhin, en face de l'oppidum celtique de Breisach (Figure. 1). Du point de vue de la géographie politique, nous sommes ici au Nord du territoire des Rauraques, qui occupent le coude du Rhin, autour de Bâle. Si la partie méridionale a été très tôt romanisée —la capitale, *Augusta Raurica* (Augst, en Suisse) est colonie romaine depuis 44 avant notre ère—la partie Nord (dans l'Alsace actuelle), et notamment les bords du Rhin, semble avoir subi un réel retard de romanisation puisque le mobilier céramique de cette région garde un faciès indigène jusqu'au tournant de notre ère au moins, à l'exception, peut-être, du piémont vosgien et des collines du Sundgau.

Le cours principal du Rhin, non canalisé à cette époque —il ne le sera qu'au 19e siècle—reste dans cette région un fleuve capricieux, composé de nombreux chenaux, bordé de marécages, séparé de la zone sub-vosgienne par une terrasse graveleuse sur laquelle pousse une forêt de bois dur (Hardt), quasiment vide, à cette époque, de vestiges archéologiques (Figures 2 et 3).

Les premières traces d'occupation humaine à Oedenburg même ne remontent guère, dans l'état actuel des connaissances, avant le début de notre ère : il s'agit de bois datés de 3-4 après J.-C., et dont la relation avec une structure construite n'est pas encore parfaitement claire ; ils se situent dans les parages d'un important complexe cultuel qui s'est développé progressivement dans le courant du premier siècle de notre ère, à partir de la fin de la période augustéenne.

C'est sous Tibère, au plus tard dans les années 30, mais peut-être dès les années 14-20, que s'installent des militaires qui construisent un camp d'environ 3,5 ha. Ce camp est implanté sur une barre de graviers, bordée de chenaux actifs. Son existence est bien attestée jusque vers 69-70 de notre ère, époque après laquelle le *limes* se déplace au-delà de la forêt Noire.

Dès les débuts de l'implantation militaire se développe un établissement civil qui nous est désormais mieux connu par des fouilles ponctuelles menées par des équipes françaises, allemandes et suisses ainsi que par une vaste prospection géophysique développée par la firme allemande Posselt & Zickgraf GmbH sur une cinquantaine d'hectares (Figures 4 et 5). Cette prospection montre un réseau viaire non orthonormé, organisé autour de deux pôles : à l'Ouest on reconnaît une grande route Nord-Sud qui constitue encore aujourd'hui un axe routier majeur ; cette chaussée suit la première terrasse alluviale, marquée par deux buttes (Westergass et Altkirch). À l'Est, une série de voies sortent du camp, vers le Rhin et vers l'agglomération civile.

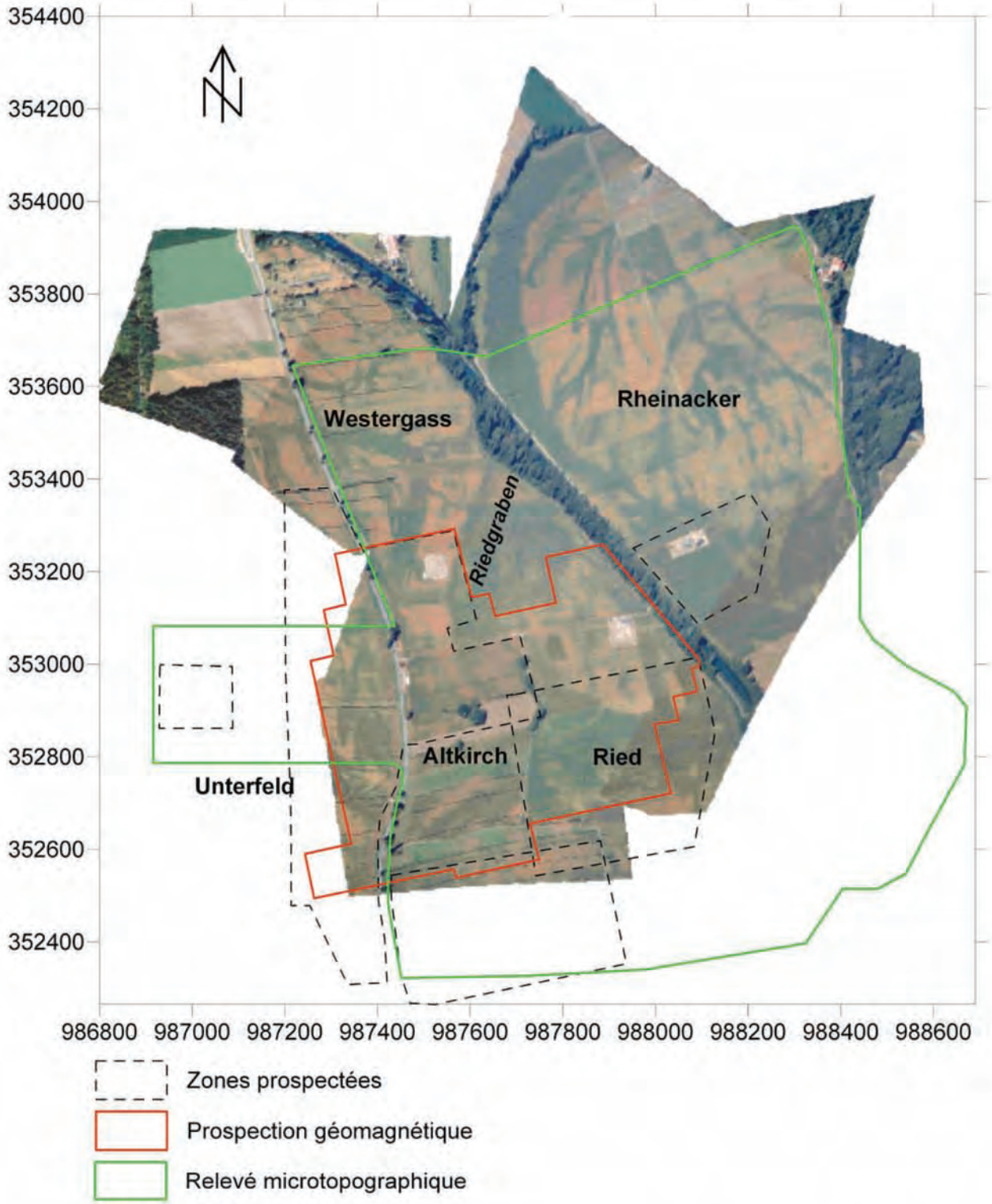


Figure 3 : Photographies aériennes redressées montrant le système des paléochenaux. Les zones correspondant au relevé topographique et aux prospections pédestres et géomagnétiques sont indiqués.

Entre les deux, la voirie s'est progressivement développée ; elle n'est pas encore parfaitement connue ni datée. L'image géophysique révèle des zones occupées par des constructions, généralement sur des dômes de graviers, hors d'eau ; les zones vides, marécageuses, apparaissent uniformément grises.
Les fouilles réalisées depuis 1998 ont mis en évidence, aux abords du camp, la présence de plusieurs chenaux qui traversent le site. Certains, peu actifs, ont, au premier siècle, été aménagés par des systèmes de branchages, de claies, de planchers (Figures 6, 7, 8 et 9), avant d'être généralement comblés par des apports artificiels de gravier dès le début du second. À partir de cette époque, la zone cesse totalement d'être marécageuse et elle peut accueillir une série de grandes constructions en pierre.

Au pied de la butte d'Altkirch, plus à l'Ouest, une section du Riedgraben, fouillée en 2003, a livré plus de deux cents échantillons de bois, en cours d'analyse par O. Girardclos (Cèdre) (Figure 10). Le plan et la chronologie de ces différents aménagements paraissent tout à fait significatifs (Figures 11 et 12).
Dans un tout premier temps, les berges naturelles du Riedgraben sont bordées par des structures légères : il s'agit de claies et de poteaux, dont la datation s'échelonne entre 8/9 après J.-C. et 14. Pour nombre de ces bois, il s'agit de dates d'abattage, à l'année près, ce qui révèle sans doute la présence d'aménagements progressifs le long d'un cours d'eau peu profond et peu large. Une deuxième étape semble attestée, dès le printemps 19, par la mise en place de bois qui se situent en bordure d'un quai, très bien documenté par les étapes de réfection postérieures. Cette installation rectiligne diverge légèrement du cours naturel du Riedgraben et témoigne sans doute d'une volonté de régulariser le tracé du ruisseau, afin d'installer une voie de circulation sur ses berges. Une troisième étape, très bien identifiée par une série d'analyses dendrochronologiques, se situe en 69-70. La date est significative puisqu'elle marque la fin de la grande révolte gauloise du Nord-est de la Gaule et le rétablissement de la situation politique. Par la suite, ces mêmes installations de bois seront encore à plusieurs reprises restaurées. Vers le milieu du premier siècle, cette partie du site a vu l'installation d'un quartier d'habitat à colombages installé sur un parcellaire régulier. C'est aussi vers cette date que commence à se développer sensiblement le complexe religieux. Comment interpréter en termes historiques cet ensemble de faits ? Plusieurs hypothèses nous paraissent possibles.
Le modèle généralement accepté pour expliquer le développement des agglomérations sur ces marches frontalières est celui d'une agglutination civile spontanée autour des camps et nous avons de nombreux exemples de ce mode de développement au second siècle de notre ère, sur le *limes* de Germanie supérieure.

L'armée est ici considérée comme le facteur essentiel du développement, entraînant une intense et brutale déforestation, puis une mise en culture des zones ainsi libérées à la fois pour les besoins militaires et ceux des civils.

Figure 4 : Carte de prospection géophysique du site (Posselt & Zickgraf GmbH)

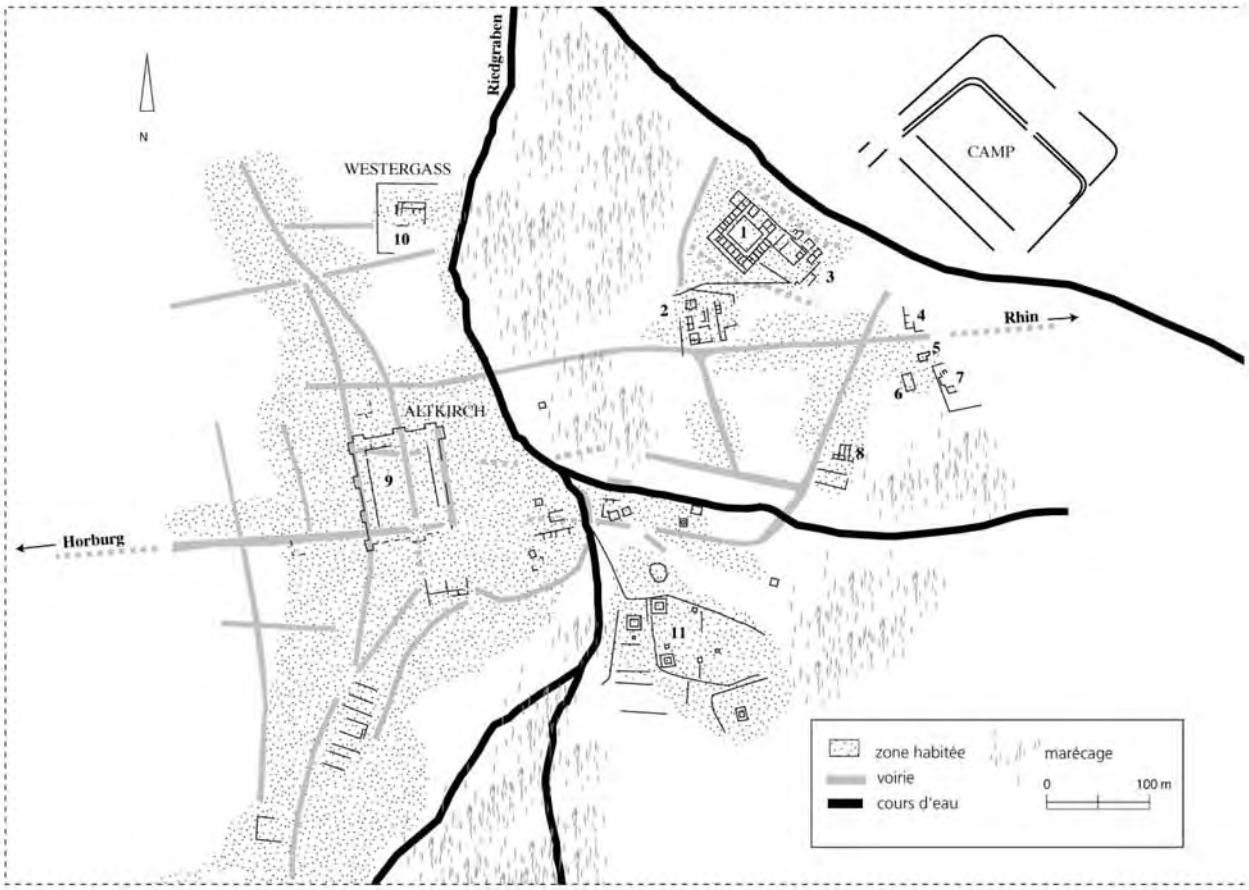


Figure 5 : Interprétation de la fig. 4.

Dans le cas d'Oedenburg, ce modèle classique n'est peut-être pas totalement pertinent. Les premiers aménagements du Riedgraben, mais aussi les fouilles du complexe religieux, semblent en effet montrer une présence humaine antérieure à l'arrivée des soldats, vers le tout début de l'ère chrétienne. Nous sommes toutefois incapables, à l'heure actuelle, de préciser l'ampleur spatiale de cette installation : simple hameau indigène, périphérique à l'oppidum de Breisach, ou embryon d'agglomération déjà romanisée, qui se développe le long d'une importante voie de communication, dont la date précise reste d'ailleurs à établir ? Sanctuaire rural ? En tout état de cause, le grand développement de l'habitat civil, au moins dans ce secteur, est postérieur à la phase initiale d'occupation humaine et contemporaine de la présence militaire. La question est toutefois de dater très précisément l'arrivée des soldats à Oedenburg, ce que le matériel céramique du camp n'autorise pas et nous n'avons pas actuellement, pour le camp lui-même, de datation dendrochronologique. On observera toutefois que la première construction du quai en bois, dans le *vicus*, semble dater de 19 de notre ère, même si cette hypothèse ne repose pour l'instant que sur un petit nombre de prélèvements. Cette chronologie est parfaitement cohérente avec le fait que c'est sans doute dès le tout début du règne de Tibère (vers 14-16 après J.-C.) que s'installe à Vindonissa (Windisch, Suisse) la XIIIIe légion, dont dépend directement la garnison d'Oedenburg, d'après le témoignage des tuiles estampillées retrouvées sur le site. On peut donc émettre, à titre d'hypothèse vraisemblable, que c'est en 19 que le cours du Riedgraben est régularisé et que ce travail pourrait bien être militaire. C'est en 69-70, peu avant le départ des soldats pour la conquête des Champs Décumates, que s'effectue la seconde régularisation du cours d'eau.

L'analyse des macrorestes végétaux par St. Jacomet et P. Vandorpe (Université de Bâle) pose elle aussi d'intéressantes questions en termes historiques. Ces restes, très abondants et particulièrement bien conservés à Oedenburg, révèlent la présence de nombreuses plantes importées, parfois de lointaines contrées exotiques (poivre d'Inde, calebasses d'Afrique), mais le plus souvent du monde méditerranéen (noix, lin, pavot, melon ou concombre, figue, mûre noire, cerise, prune, pruneau, pêche, raisin....). On associe d'ordinaire, à juste titre, ces importations à l'arrivée des légionnaires, majoritairement des Italiens à cette époque, et à des pratiques alimentaires nouvelles dans ces régions. À côté de ces produits, la base de la nourriture reste composée de céréales. On observera, à ce propos, l'importance, dans les prélèvements effectués à Oedenburg, de plantes adventices typiques des céréales d'hiver, et qui n'apparaissent que très rarement, voire jamais, dans les niveaux romains du Nord des Alpes. En premier lieu, on trouve partout la nielle des blés (*Agrostemma githago*), le myagre perfolié (*Myagrum perfoliatum*), le chénopode blanc (*Chenopodium album*) et le mouron des oiseaux (*Stellaria media*). La plupart de ces plantes semblent exogènes à la région et pourraient témoigner d'une importation massive de céréales, nécessitée par le boom de la population, à la fois militaire et civile, vers le milieu du premier siècle, avant que la production locale de céréales ne prenne le relais.

Figure 6 : Plan des installations humaines à la sortie sud-ouest du camp

Figure 7 : Planchers installés dans les zones marécageuses

Figure 9 : Brindilles et branchages posés au sol dans les zones marécageuses

Figure 8 : Claies installées au sol dans les zones marécageuses

Si cette observation est juste, elle pose en même temps la question de l'évolution de ce milieu humide et de la forêt qui l'occupe, dans les premiers temps de la présence romaine.

La morphologie alluviale du site d'Oedenburg, n'a pas radicalement changé depuis l'époque romaine. En contrebas de la terrasse caillouteuse weichsélienne, la plaine inondable est composée de barres graveleuses mises en place lors du Tardiglaciaire. Au début de l'Holocène, ce secteur n'est emprunté que par quelques larges chenaux pluridécamétriques à remplissage argilo sableux ; ces dépressions ont été par la suite ré incisées par un réseau de petits chenaux avant l'époque antique. Ces chenaux, dont les crues au cours du Haut-Empire ont été préférentiellement enregistrées au voisinage du site archéologique, deviennent dès l'époque médiévale une large plaine marécageuse, le Ried Noir (Carbiener, 1997) qui ne sera asséché qu'à la suite des grands travaux de canalisation du Rhin et par les travaux d'irrigation liés à la culture actuelle du maïs (Maire et Sanchez-Perez, 1992).
La dynamique historique du paysage alluvial peut être abordée ici en complétant le schéma d'évolution sédimentaire par les analyses palynologiques, archéobotaniques et dendrochronologiques ; les données issues de zones humides faiblement anthropisées sont associées aux résultats carpologiques et dendrochronologiques obtenus sur le site lui-même.
Les principales informations palynologiques sont issues de deux séquences, l'une a été réalisée dans le chenal du Riedgraben, l'autre concerne les sols de la zone des temples (Figure **13**). Le chenal tourbeux du Riedgraben, en cours de comblement dès l'époque antique montre déjà un paysage ouvert, avec des taux de pollens d'arbres n'excédant pas 20 à 30%. Comme à proximité des temples gallo-romains, les analyses palynologiques réalisées dans les chenaux montrent également une ouverture du milieu dès le début de l'époque romaine avec le développement d'herbacées au dépend de la forêt, mais aussi la présence de buis. Ce paysage est donc très largement anthropisé comme le marque l'abondance des céréales (taux dépassant 5%) et les plantes de milieux pâturés (*Plantago, Poacea*) identifiées dans le Riedgraben. Cette séquence antique montre également de nombreuses fluctuations de la structure de la strate arborée ; les fortes fluctuations de la population de saules (*Salix*) varient inversement à ceux des arbres de bois dur comme le Charme (*Fagus*). Ces variations de cortèges arborés bois blanc (Saule) - bois dur (Chêne, Charme) pourraient s'interpréter comme le reflet de changement de flores forestières dépendant directement de la hauteur de la nappe phréatique. L'abondance de saules traduirait des périodes pendant lesquelles la nappe phréatique resterait haute, les espèces de forêts plus évoluées marqueraient des phases d'assèchement.

Figure 11 : Vue de la fouille du Riedgraben.

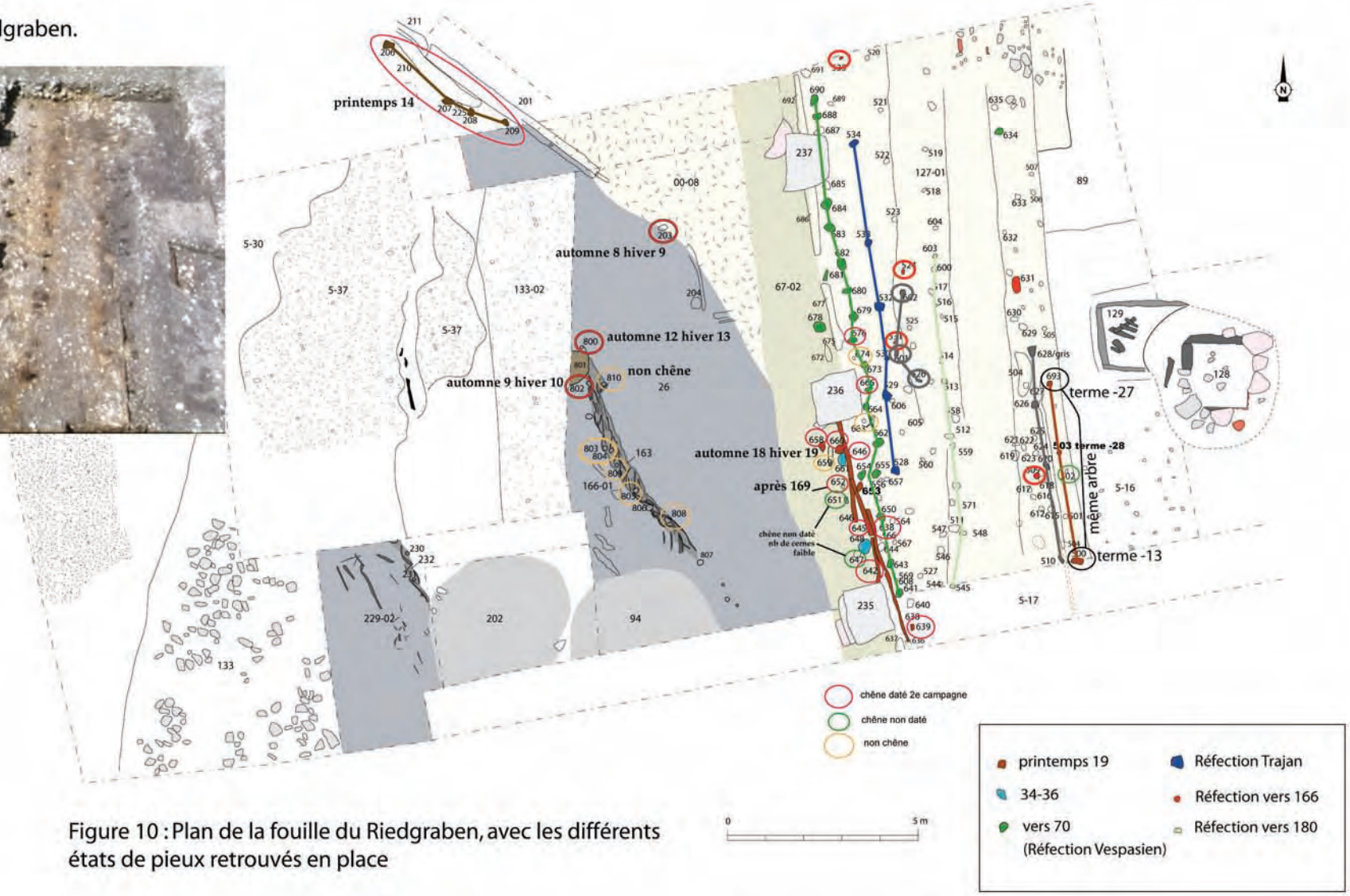


Figure 10 : Plan de la fouille du Riedgraben, avec les différents états de pieux retrouvés en place

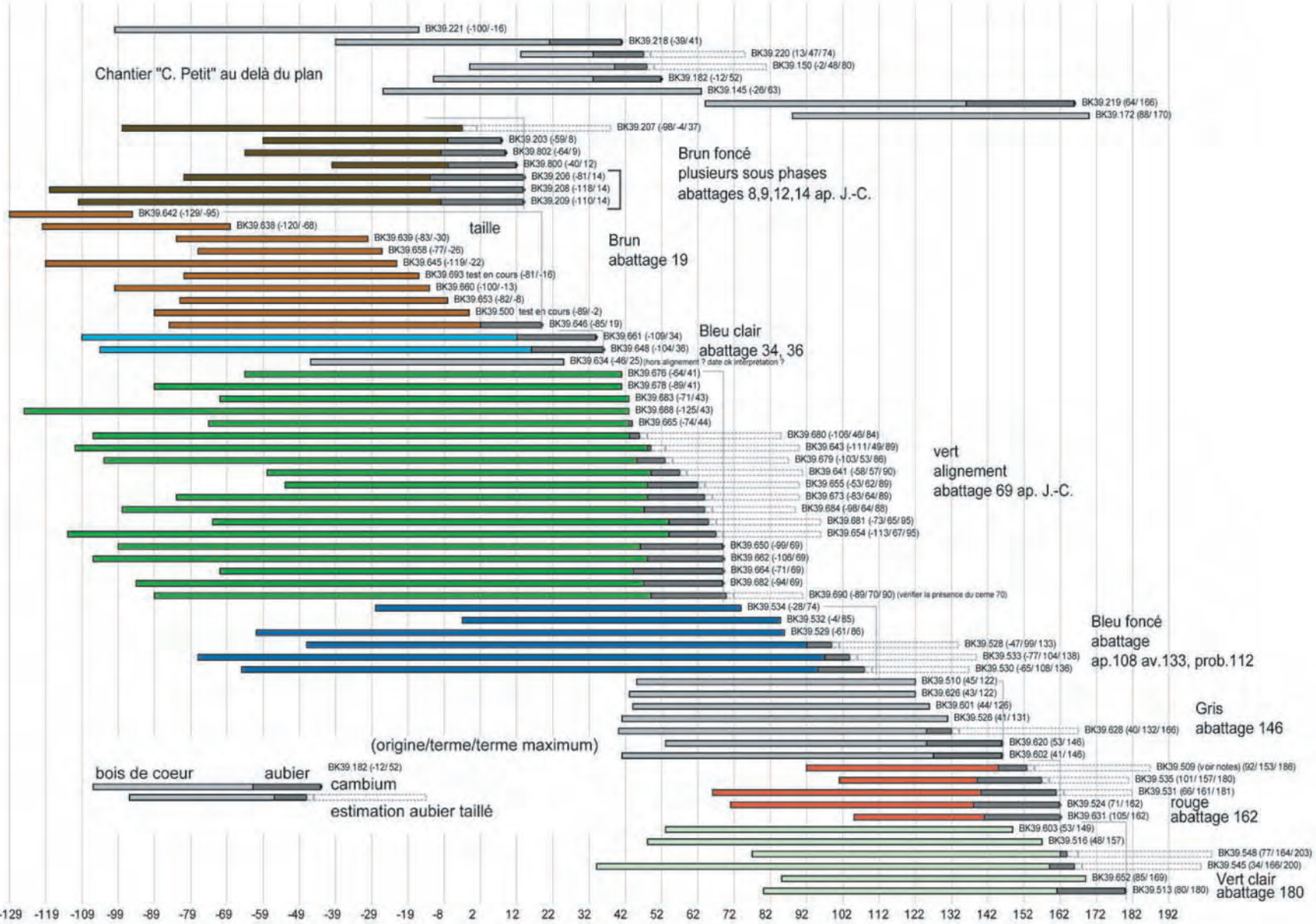


Figure 14: Séries dendrochronologique mettant en évidence des phases d'abattage distinctes au cours de l'Antiquité.

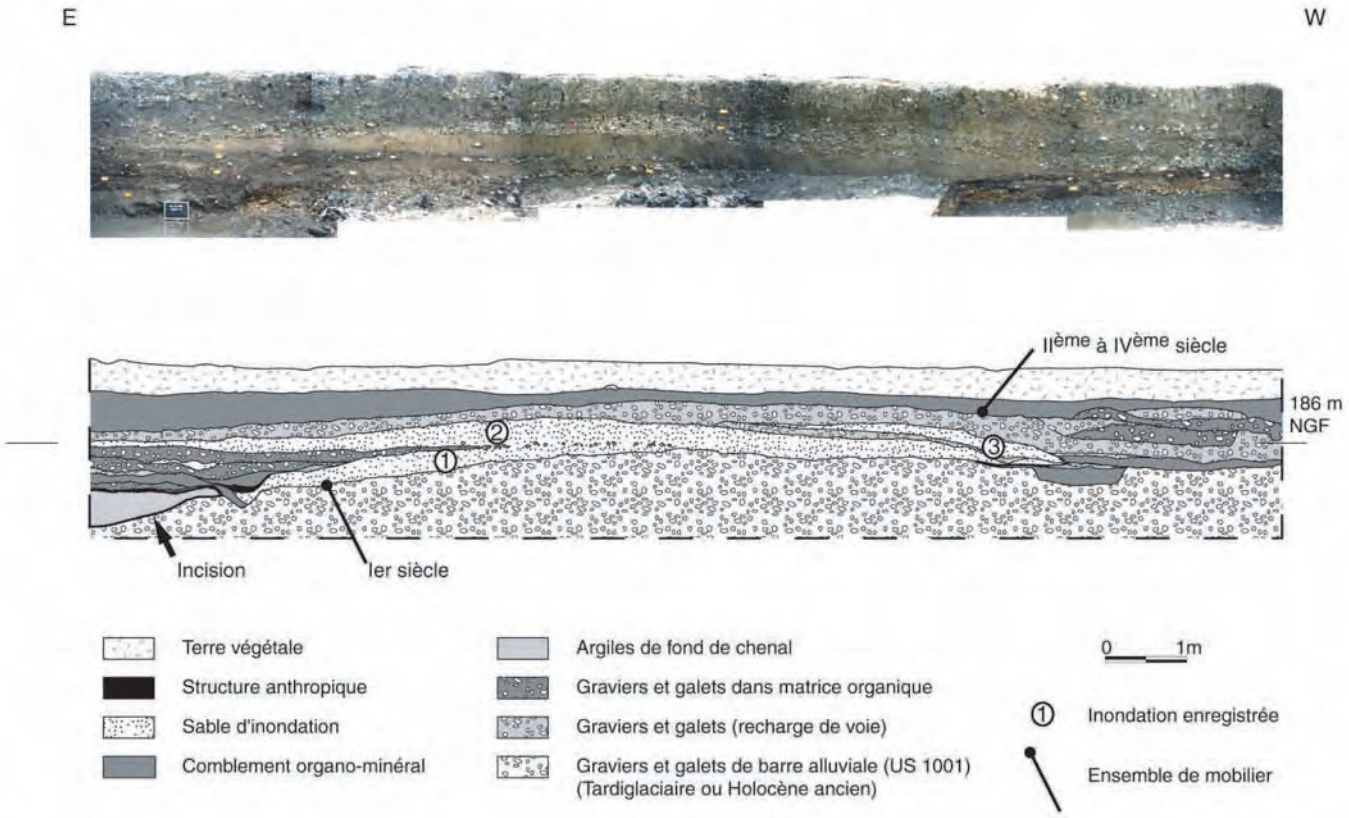


Figure 13: Coupe stratigraphique réalisée dans le vicus mettant en évidence des dépôts d'inondations contemporains de l'époque antique.

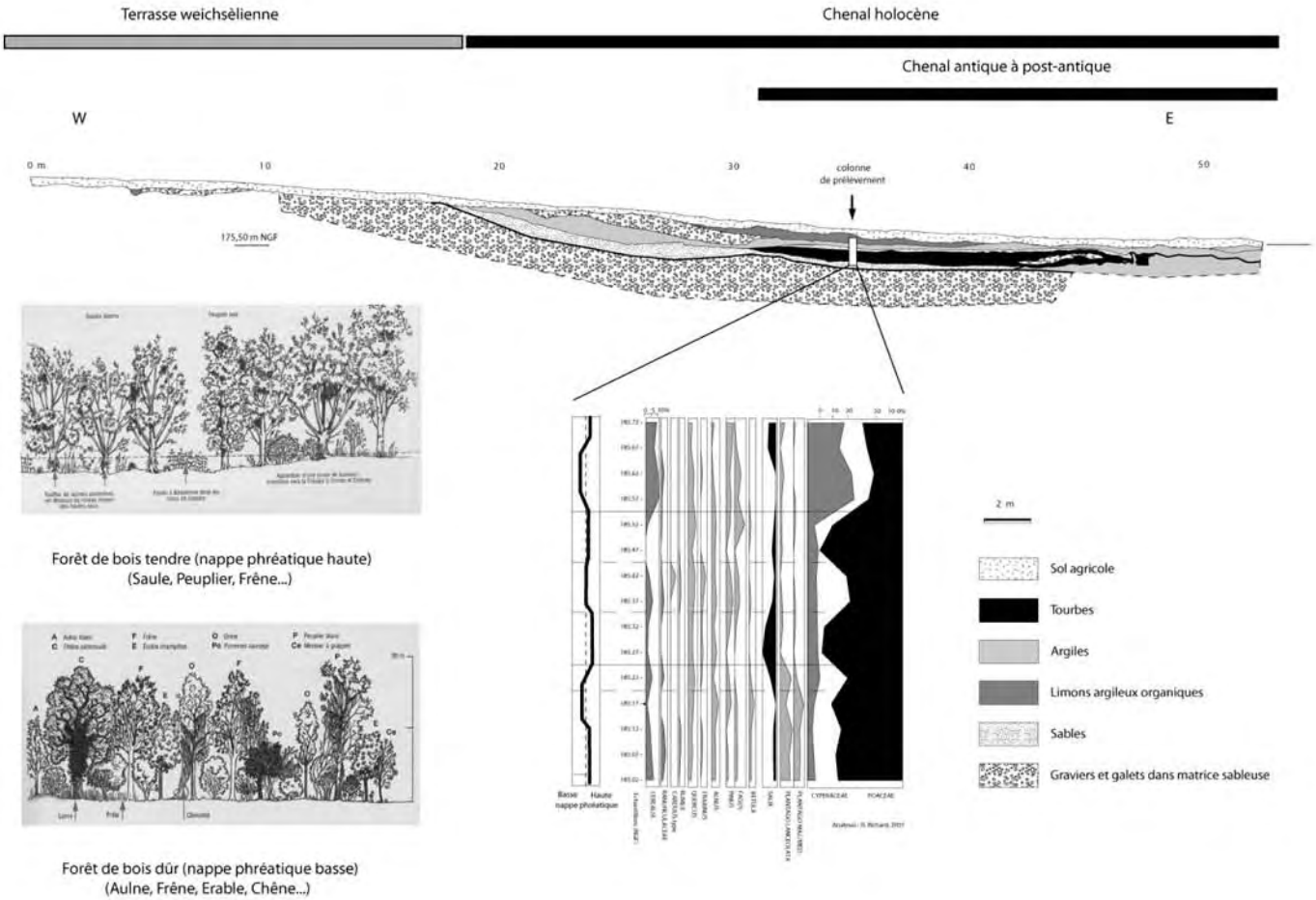


Figure 12: Coupe du Riedgraben et colonne palynologique réalisée au repère 35 m.

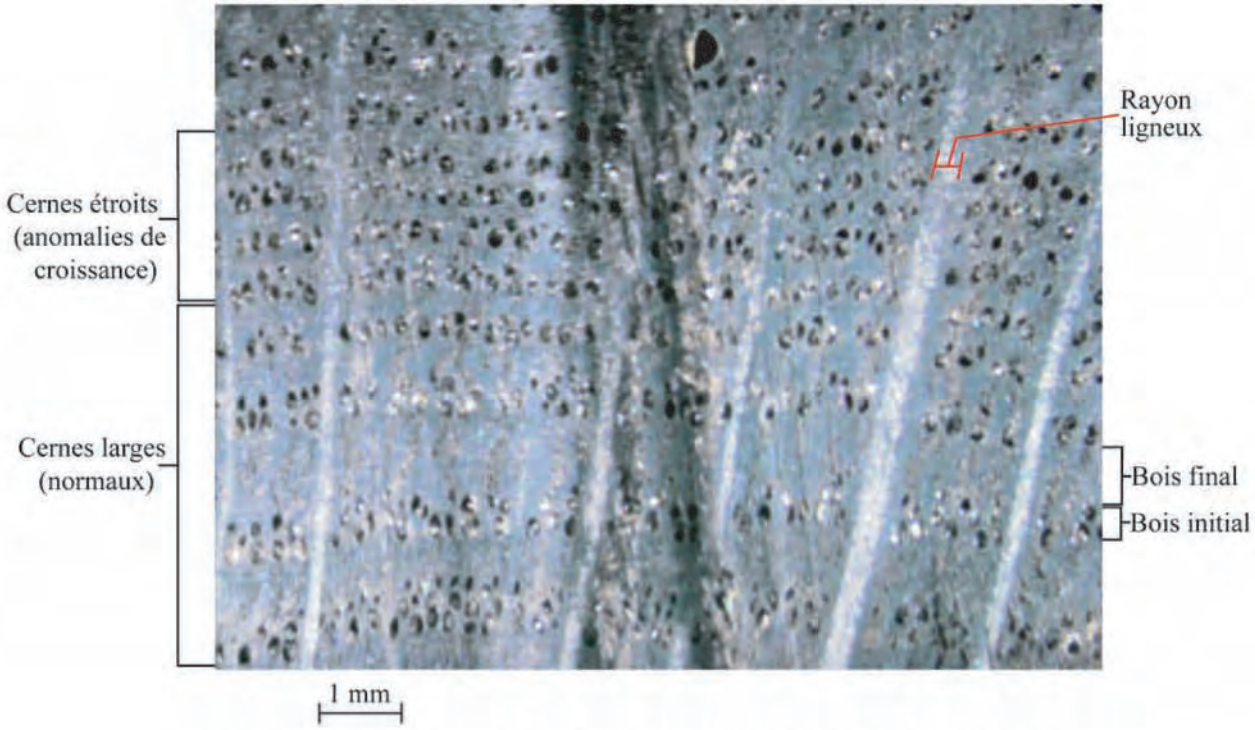


Figure 15: Photo de cernes réduits du chêne BK02.08.515.1 (non daté). Ces cernes présentent un bois final beaucoup moins large que celui des cernes normaux.

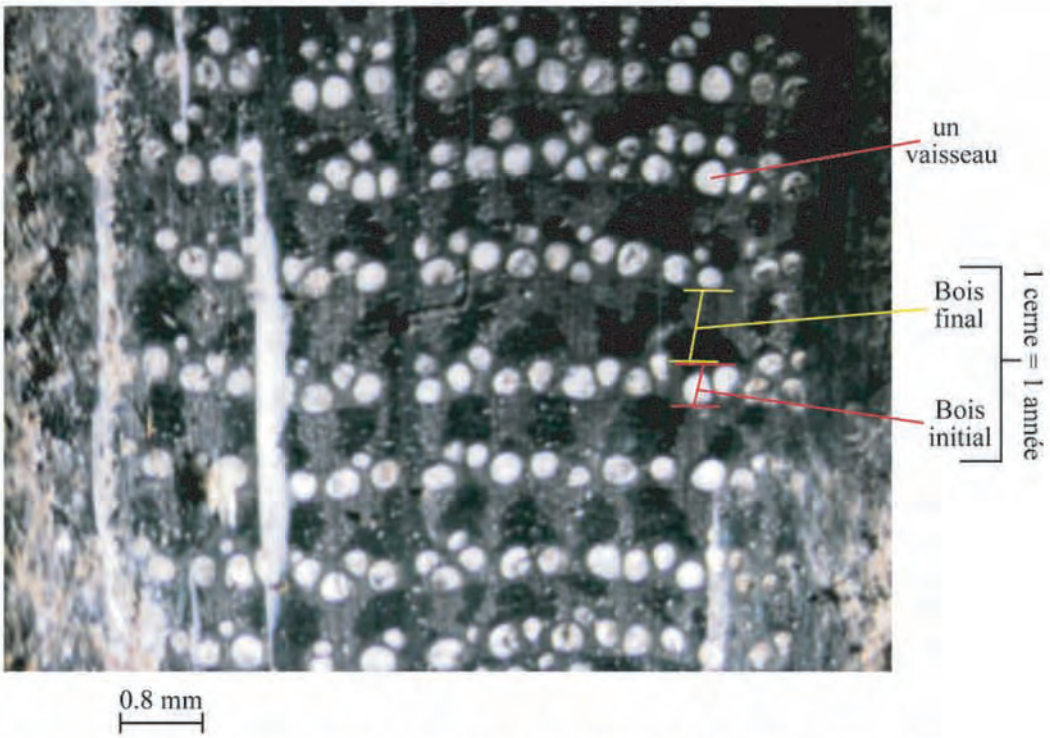


Figure 16: Photo de cernes normaux du chêne BK02.04542. Le bois final (noir) se distingue nettement du bois initial (blanc) dont les vaisseaux sont remplis de craie.

Comme le montrent les études des forêts actuelles riveraines, ces milieux dépendent directement des eaux de surface et de la nappe phréatique. Associées parfois à des forêts marécageuses à aulne glutineux (*Alnus glutinosa*) dans les dépressions périphériques ou à des chênaies sèches sur les bancs de graviers, les forêts rhénanes se répartissent en deux types principaux, écologiquement différenciés :

- les forêts à bois tendre (*Weichholzauenwald*) dominées par les saules (*Salix*), l'aulne gris (*Alnus* incana) et les peupliers (*Populus sp.)*. De structure simple, ce peuplement pauvre en espèces, à rajeunissement brutal, au voisinage immédiat de l'eau est inondé souvent plusieurs semaines par an. De ce fait, la strate arbustive est peu dense car beaucoup de ligneux souffrent de l'asphyxie racinaire ; les rares arbustes sont le cornouiller sanguin (*Cornus sanguinea)* et la mancienne (*Viburnum lantana*). Les herbacées qui supportent l'inondation estivale sont essentiellement des laîches *(Carex sp*.), la balsamine de l'Himalaya (*Impatiens glandulifera*), la consoude (*Symphytum officinale*), le chiendent faux-roseau (*Phalaris arundinacea*). Cette forêt pour se perpétuer nécessite d'être périodiquement rajeunie par des crues puissantes car les plantules de saules et de peupliers ont besoin de beaucoup de lumière pour se développer ; si ces conditions ne sont pas réunies, cette forêt évolue vers une forêt de bois dur. Ce peuplement pionnier, du fait de la canalisation du Rhin, a pratiquement disparu d'Alsace.

On trouve :

- les forêts à bois dur (*Hartholzauenwald*) à très grande richesse floristique, de très grandes envergures (plus de 45 espèces de ligneux dont plus de 25 espèces d'arbres),des espèces généralement arbustives qui sont de très grandes tailles comme le bouleau (*Betula*), l'érable champêtre (*Acer campestre*), l'aubépine (*Crataegus monogyna*), le cornouiller sanguin, ici un véritable arbre (Sell et al., 1998).

La répartition dans l'espace des associations végétales dépend donc étroitement du gradient d'humidité résultant de la proximité plus ou moins importante de la nappe phréatique :

- les tourbes de bas marais constituent le terme extrême d'une prairie très humide en passant par les stades de prés tourbeux et de marais spongieux : les poacées des prairies humides laissent la place aux joncs (*Juncus*), aux laîches (*Carex*).
- par contre, les forêts de bois dur remplacent les forêts de bois tendre quand la nappe phréatique s'abaisse.

On peut ainsi percevoir un paysage alluvial complexe, composé d'une véritable mosaïque paysagère, la forêt rhénane que les premiers soldats romains ont eu à exploiter.

La détermination archéobotanique des branches et brindilles des couches de bois coupées et disposées en fond de chenal afin faciliter sa traversée confirme la composition de ces forêts rhénanes antiques. Les principales espèces forestières ont été coupées à proximité de chenaux lors des premiers aménagements du *vicus* dès le 1er siècle.

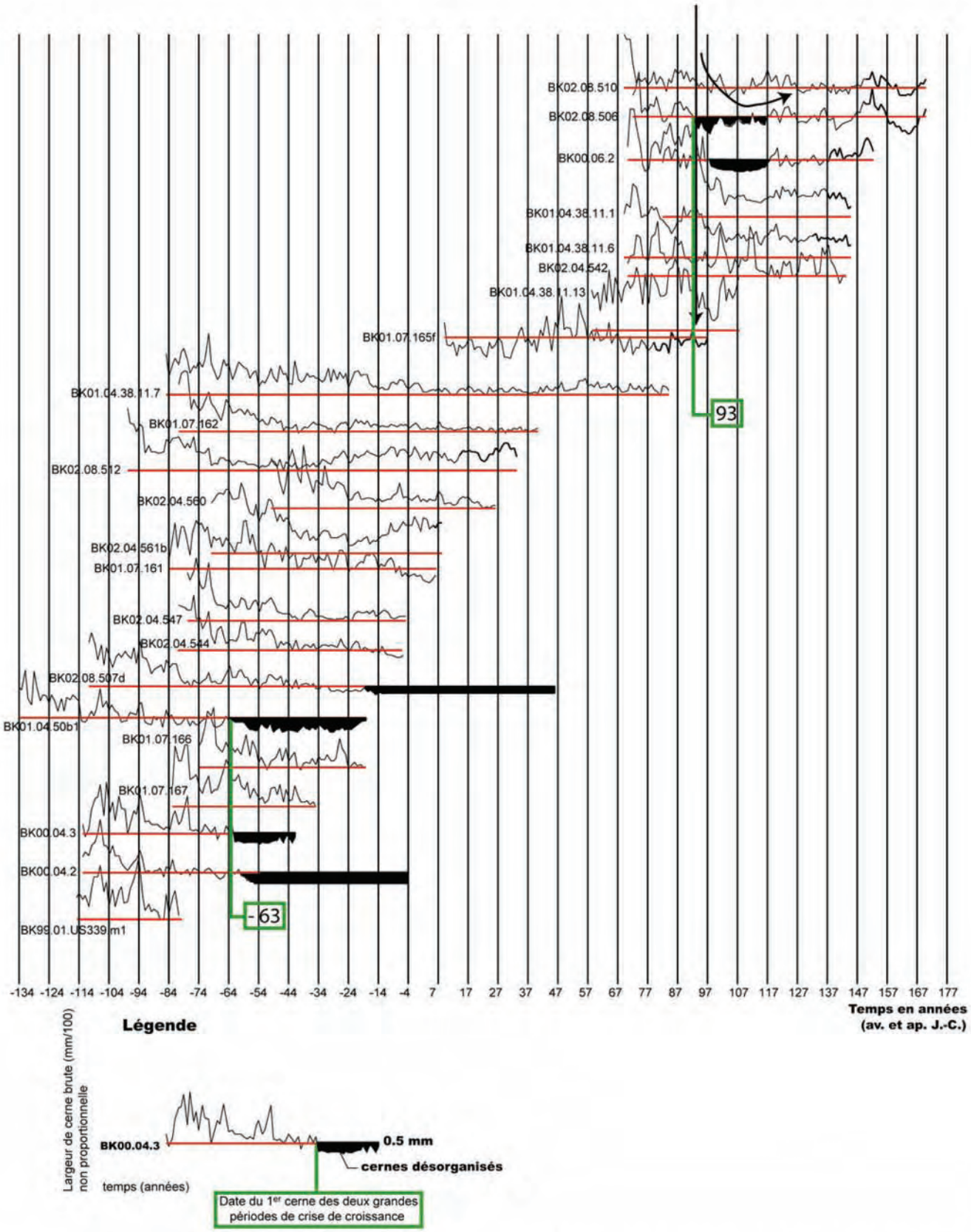


Figure 17: Identification des bois de chêne présentant des cernes désorganisés (à anomalies) sur la chronologie du site d'Oedenburg.

Il s'agit d'une part de bois non travaillés, d'essences locales, voire d'arbres poussant à proximité immédiate des rives du Rhin, comme le saule (*Salix spec.*), l'aulne (*Alnus spec.*), particulièrement indiqué pour la construction sur sol humide, et le peuplier (*Populus spec.*). On ne trouve que très rarement d'autres espèces : noisetier (*Corylus avellana*), viorne (*Viburnum spec.*), pin (*Pinus spec.*).
L'analyse d'autres couches riches en déchets du travail du bois et autres déchets de bois montre une exploitation forestière plus diversifiée. Parmi les bois utilisés, on compte l'aulne, le sapin blanc (*Abies alba*), l'épicéa (*Picea abies*), l'érable champêtre (*Acer campestre*), l'érable sycomore, l'érable plane (*Acer pseudoplatanus/Acer platanoides*), le noisetier, le bouleau (*Betula spec.*), le chêne (*Quercus spec.*) et le hêtre (*Fagus sylvaticus*).
Comme nous l'avons dit, le saule, le peuplier et l'aulne sont des représentants caractéristiques de la forêt alluviale pionnière bordant les rives du Rhin. A une distance plus importante du fleuve, on trouvait la forêt alluviale en stade terminal comprenant des espèces indigènes très appréciées, comme par exemple le chêne (surtout le chêne pédonculé ou *Quercus robur*), l'orme (*Ulmus spec.*) et le frêne (*Fraxinus spec.*). S'y trouvaient certainement aussi le noisetier, la viorne et l'érable champêtre. Sur la terrasse alluviale, la forêt devait correspondre à celle que l'on rencontre aujourd'hui dans la forêt sèche de la Hardt près de Colmar : forêts de chênes pubescents avec quelques pins, érables champêtres, quelques charmes (*Carpinus spec.*), érables planes et noisetiers. Ces forêts étaient certainement exploitées, du moins pour y ramasser du bois de chauffage. Si l'on se base sur les conditions actuelles, le sapin blanc, le hêtre, et probablement aussi l'érable sycomore, l'épicéa et le buis ne poussaient pas à proximité immédiate du site. Ces bois provenaient donc de zones éloignées, les forêts les plus proches se trouvant dans les Vosges, à plusieurs kilomètres d'Oedenburg (altitude de plus de 500 m). Globalement, l'éventail des espèces ligneuses découvertes montre d'une part que les bois poussant à proximité immédiate ont fait l'objet d'une exploitation intensive, d'autre part, que l'on avait régulièrement recours à des objets importés, en particulier des Vosges.
Si la composition de l'environnement végétal de la plaine rhénane a été reconnue à travers les études palynologiques ou xylologiques, son fonctionnement hydrologique a pu être abordé en croisant les informations sédimentologiques et les données dendrochronologiques.
Dans le secteur du *vicus*, sur le chantier BK04, à la sortie occidentale du camp julio-claudien, la fouille a permis l'observation de la géométrie des dépôts d'un petit chenal rectiligne. Les relevés géoarchéologiques, complétés par des échantillonnages sédimentologiques et micro morphologiques nous ont permis d'identifier et de suivre spatialement des niveaux de crues intercalées avec des occupations archéologiques (Figure 14). Tous ces dépôts d'inondation présentent une extension spatiale de plusieurs mètres de large et un tri granulométrique assez bon. La position du site en bordure de la plaine inondable, permet d'interpréter chaque niveau, matérialisé sur le terrain par une couche pluri centimétrique de sables bien triés, en relation avec des événements hydrologiques rares, correspondant au moins à des crues décennales inondant l'ensemble de la plaine.

Au moins quatre épisodes de crues peuvent donc être identifiés dans ce chenal latéral du Rhin ; elles sont datées postérieurement aux premiers aménagements anthropiques du début du 1er siècle, et antérieurement aux empierrements de voies datés du 2e siècle. L'homme a vécu ici dans un milieu contraignant, présentant un fort risque d'inondation, mais qu'il s'est constamment efforcé d'aménager.

En complément de cette lecture sédimentologique des crues, une lecture paléohydrologique des séquences dendrochronologiques des bois du site a été tentée. En effet, la largeur des cernes est une variable qui renseigne sur les conditions de croissance des arbres. Elle dépend de facteurs internes, comme l'âge, et externes à l'arbre, comme le climat et le type de station. L'ensemble des bois datés sur le site représente une chronologie relativement longue de plus de 300 ans (-122 à 182). Les séries brutes présentent des enregistrements de croissance à long terme relativement cohérent d'un individu à l'autre. Sur certains individus, des anomalies drastiques de croissance ont été observées (Figures 15 et 16) : réduction de la largeur des cernes, associée à une désorganisation des caractères anatomiques. Ces mêmes anomalies de croissance ont déjà été observées sur des chênes découverts en Basse-Saxe (Leuschner, 1992), en Irlande (Pilcher et al., 1996) et dans les marais de Brière en Loire-Atlantique (Girardclos, 1999). Elles sont associées à une remontée de la nappe phréatique, dans des sols très hydromorphes et tourbeux, entraînant un dépérissement des chênes dont le réseau racinaire aurait été en partie noyé.

Sur le site, les individus présentant ces périodes de crise de croissance sont peu nombreux (six individus) mais les périodes de réduction de la taille des cernes sont relativement contemporaines et se répartissent sur deux périodes (Figure 17) : la première débute en 63 av. J.-C. et la seconde en 93 ap. J.-C. À titre d'hypothèse que devraient confirmer des analyses isotopiques du carbone et de l'oxygène de la cellulose, nous pensons avoir identifié ici deux crues majeures du Rhin qui auraient inondé la plaine entière lors du démarrage de la croissance de printemps. La crue de 93 observée sur les courbes dendrochronologiques est certainement l'une de celles qui ont été identifiées par la sédimentologie sur le site même d'Oedenburg.

Bibliographie

Carbiener R. (1997). - Le grand Ried d'Alsace, *in Le Ried Centre Alsace*, Bull. Soc. Ind. Mulhouse, 734, p. 15-44.

Girardclos O. (1999).- Dendrochronologie du Chêne, influences des facteurs stationnels et climatiques sur la croissance radiale, cas des sols hydromorphes et des climats atlantiques. Applications paléoécologiques aux bois subfossiles du marais de Brière (Loire-Atlantique). Thèse de l'Université de Franche-Comté, Besançon, 377 p.

Leuschner H.H. (1992). – Subfossil trees, in Tree-rings and Environment : Proceedings of the International Dendrochronological Symposium, sept 1990, Ystad, Sweden. Lundqua Report, 34, 193-197.

Maire G. et Sanchez-Perez J.M. (1992). – Influence des aménagements hydrauliques du Rhin sur le fonctionnement hydrologique des forêts riveraines d'Alsace. Bull. Soc. Ind. Muhlouse, 824, 9-19.

Nuber H.U. et Reddé M. (dir.).- Le site militaire romain d'Oedenburg (Biesheim-Kunheim, Haut-Rhin, France). Premiers résultats, *Germania*, 2001, p. 169-242.

Pilcher J.-R., Baillie M.G.L., Brown D.M., Mc Cormac F.G. (1996). – Hydrological data from the long Irish subfossil oak record, in Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference on Tree Rings, may 1994, Tucson Arizona. Dean J.S., Meko D.M., & Swetnam T.W. (eds), Radiocarbon, 1996. 259-264

Reddé M. et alii.- Oedenburg, une agglomération romaine sur le Rhin supérieur. Fouilles françaises, allemandes et suisses à Biesheim Kunheim (Haut-Rhin), à paraître dans *Gallia*.

Sell Y., Berchtold J.P., Callot H., Hoff M., Gall J. Cl., Walter J.M., (1998). – L'Alsace et les Vosges. Géologie, milieux naturels, flore, faune. Coll. La Bibliothèque du naturaliste, Paris, Delachaux et Nieslé, 354 p.

4 LES ACQUIS DE CE CHAPITRE

Le faisceau de résultats présentés ici intègre différentes échelles d'observation et répond aux questions posées sur les relations existant entre la dynamique alluviale et la dynamique d'occupation sur le site d'Oedenburg.

Le site se développe dans un paysage à caractère alluvial complexe.

L'organisation de la ville antique est largement influencée par les contraintes topographiques du site.

L'occupation du site tient compte à la fois des contraintes historiques et alluviales du Rhin. Quatre phases d'occupation sont mises en évidence :
Phase 1, jusqu'en 68 après J.-C. ; Phase 2, de 69 jusqu'en 180 ; Phase 3, de 180 jusqu'en 295 ; Phase 4, à partir de 295 jusqu'au début du 5ème siècle.

Les chenaux connaissent des dynamiques sédimentaires diverses en fonction de leur positionnement vis-à-vis de l'occupation et des aménagements réalisés dans la plaine au cours de l'Antiquité.

Des inondations du Rhin ont pu être identifiées précisément grâce à leur enregistrement sédimentaire et leur impact sur la végétation riveraine.
Quatre inondations majeures se produisent entre 20 et 145/146 de notre ère. Une période de stress de croissance de bois archéologiques en 96 après J.-C., pourrait correspondre à l'effet de l'une d'elles sur la population d'arbres de forêts riveraines rhénanes.

L'évolution du couvert végétal de la plaine bien qu'influencée par l'occupation humaine, semble dominée par la dynamique du Rhin comme le suggèrent les évolutions des taux de *Salix sp.* et de Poaceae par rapport aux autres taxons.

CONCLUSION

Dans la partie consacrée aux données historiques, deux approches ont été initiées afin de documenter l'évolution du Rhin supérieur en Alsace au cours des siècles précédant les grands aménagements du 19ème siècle. Elles sont toutes deux fondées sur l'analyse de données documentaires anciennes à haute qualité informative.

Dans un premier temps, des documents cartographiques anciens pouvant dater de la fin du 16ème siècle (1576) ont été utilisés pour la réalisation d'une description de la plaine alluviale du Rhin présentant à la fois un style en tresses et en anastomoses dans le secteur d'étude étendu entre la ville fortifiée de Vieux-Brisach et le village de Kunheim détruit par les crues du Rhin dans les années 1763.

Une première période entre 1576 et 1650, a fait l'objet d'une étude qualitative. Cela a permis l'identification des caractéristiques du paysage alluvial ainsi que son occupation par la végétation et son exploitation par l'homme.

Une deuxième période entre 1689 et 1767, a fait l'objet d'une étude quantitative. Au cours de cette période clef du Petit Age Glaciaire, ont été mises en évidence les **dynamiques d'évolution et de co-évolution des différentes unités de paysage** ainsi que **des changements de styles alluviaux en tresses ou en anastomoses** au sein de la plaine alluviale du Rhin. Cela constitue un modèle fiable pour l'interprétation des changements observés à partir des données sédimentologiques, archéologiques et palynologiques sur le site gallo-romain d'Oedenburg.

Un troisième type d'observation a enfin été réalisé sur des plans à très grande échelle datant du 18ème siècle. L'érosion affectant les berges en amont et en aval du secteur d'étude a pu ainsi être documentée et estimée, particulièrement à proximité du village de Kunheim pendant sa destruction par le Rhin.

Cette étude portant sur un secteur du Rhin à la fois en tresses et en anastomoses permet d'aborder plusieurs axes clefs dans l'étude des cours d'eau à chenaux multiples. C'est le cas notamment pour la quantification des **mécanismes de formation et d'évolution des barres/îles** ainsi que pour le **temps nécessaire à leur stabilisation**. C'est également le cas pour la **compréhension des processus de flux hydrique et sédimentaire en relation avec le climat et l'anthropisation mais aussi des processus menant à la bifurcation des chenaux**. De plus, cette approche permet d'estimer sur une fenêtre temporelle relativement longue les influences respectives de la végétation, du flux hydrique, du flux sédimentaire et de la fréquence d'inondation sur l'évolution de la plaine alluviale.

Dans un second temps, des séries hydrologiques du Rhin en Alsace et de treize autres cours d'eau français, ont été reconstruites à partir de documents anciens et de travaux historiques. Les variations de fréquences d'inondation qui remontent dans certains cas à plus de 800 ans montrent que la répartition et la durée des périodes de haute fréquence d'inondation sont variables d'un cours d'eau à l'autre. **Ces relations complexes entre les rivières et le climat suggèrent l'importance des caractéristiques intrinsèques à chaque bassin versant et notamment du type de régime du cours d'eau dans les modalités de réponse aux contraintes climatiques à long terme.**

Ces résultats constituent un modèle pour une meilleure interprétation des événements d'inondations enregistrés ou encore des dynamiques de l'occupation sur les sites archéologiques comme celui d'Oedenburg.

Dans la partie de ce mémoire consacrée au site archéologique d'Oedenburg, une approche spatiale et une approche paléoenvironnementale ont été réalisées.

La première approche initiée s'est d'abord attachée à définir les caractéristiques géomorphologiques du paysage alluvial rhénan dans lequel le site gallo-romain se développe. Grâce à l'apport de l'analyse des photographies aériennes et de la topographie, les multiples formes alluviales présentes ont été localisées avec précision comme la terrasse, les paléochenaux, les barres... Cela a également permis de définir les secteurs les plus sensibles aux inondations ou aux variations de la nappe et a permis de proposer une première chronologie de la dynamique des chenaux présents dans la plaine alluviale holocène du Rhin.

Avec l'apport des résultats des prospections magnétiques, il a ensuite été possible de mettre en évidence l'emprise du site au cours de l'époque antique. **Le développement de plusieurs quartiers insulaires atteste de l'existence pendant l'Antiquité, d'un paysage alluvial encore observable actuellement et qui a largement influencé et contraint l'installation puis la dynamique d'occupation anthropique.** Cette contrainte dans l'organisation de la ville antique a pu être précisée grâce à l'analyse menée sur la répartition spatiale des monnaies qui met en évidence **quatre phases majeures** dans l'évolution de l'occupation. Parmi, ces phases, il a été possible de distinguer celles qui liées au fonctionnement intrinsèque du site peuvent être influencées par des événements historiques et celle qui est probablement liée à des modifications environnementales majeures comme **la période d'augmentation de l'humidité au cours du 4ème siècle**. Cette période-ci **correspond à une remontée des structures sur la terrasse et à la désertion des zones basses de la plaine d'inondation** et est synchrone avec d'autres événements se produisant dans d'autres régions d'Europe.

La définition du paysage alluvial à haute résolution a, de plus, permis d'organiser l'approche paléoenvironnementale et le positionnement des secteurs à étudier.

Les processus sédimentaires ont ensuite pu être étudiés grâce à l'approche paléoenvironnementale menée sur le site. Les modes de remplissages des multiples paléochenaux présents ont été identifiés selon plusieurs méthodes adaptées en fonction des besoins ou des contraintes de terrain. Certaines des hypothèses émises lors de l'étude géomorphologique ont pu ainsi être vérifiées, comme par exemple la mise en place au cours du Tardiglaciaire des larges chenaux longeant la terrasse.

Grâce au cadre chronologique très précis fourni par la présence et par la fouille du site archéologique, les variations sédimentaires ont pu être associées aux dynamiques d'occupation anthropique et d'évolution du couvert végétal forestier et agricole.

Une première synthèse de la dynamique de la plaine alluviale du Rhin sur le site d'Oedenburg au cours des quatre premiers siècles peut alors être établie, et deux grandes thématiques s'en dégagent.

La première thématique concerne la reconstitution du paysage à travers différentes périodes de temps et échelles d'analyse en relation avec l'occupation anthropique au cours de l'antiquité. Quatre états de la plaine alluviale peuvent être reconstitués pour l'époque antique :

Le premier état, se place antérieurement à l'occupation anthropique du site d'Oedenburg. Le paysage alluvial est caractérisé par l'existence de plusieurs chenaux actifs et de multiples îles graveleuses et sèches. L'enregistrement sédimentaire des paléochenaux du site atteste de l'existence à cette époque d'une activité alluviale naturelle. Le couvert végétal de la plaine du Rhin est alors largement dominé par le stade terminal forestier stable.

Le deuxième état, se place au tout début de l'occupation romaine, au début du 1er siècle de notre ère. A cette date, le paysage reste encore caractérisé par des chenaux actifs comme le paléochenal occidental, cependant quelques signes de l'évolution du milieu apparaissent. Ils sont notamment mis en évidence par des modifications sédimentaires dans plusieurs chenaux.

En effet, parmi les paléochenaux étudiés, certains sont en cours d'abandon et font l'objet de premiers aménagements en bois. Dans la zone des temples et dans la zone du vicus située face au camp militaire, les installations légères se développent pendant le dépôt de sédiments riches en matière organique. Cette tendance à la diminution du flux minéral est également enregistrée dans le chenal oriental qui présente une topographie marquée suggérant pour cette époque un tirant d'eau suffisant pour la navigation.

Au cours de cet état, l'occupation se développe essentiellement au niveau de la zone des temples ainsi que dans le camp militaire et ses abords immédiats. La terrasse est elle aussi occupée comme l'attestent les différents éléments mobiliers retrouvés en prospection ou dans le paléochenal occidental.

Le troisième état correspond à la période longue allant de la fin du 1er siècle jusqu'à la fin du troisième siècle. Cela est associé à une persistance de la présence humaine dans la plaine alluviale ainsi que sur la terrasse. Dès la seconde moitié du premier siècle, plusieurs phases d'abattage sont mises en évidence en 69, 112, 146, 162 et 180 après J.-C.. Elles conduisent à l'apparition d'un paysage largement ouvert constaté à travers l'analyse palynologique. Les aménagements dans les chenaux se multiplient avec notamment la construction à la fin du 1er siècle d'une voie traversant le paléochenal occidental et reliant la terrasse à la partie orientale du vicus. Cet aménagement majeur semble être à l'origine du changement sédimentaire observé au sein du paléochenal occidental qui devient alors déconnecté des apports sédimentaires du Rhin.

Quelques centaines de mètres en amont, des aménagements de berges sont réalisés pour la canalisation des chenaux en pied de terrasse tandis que pour l'installation des temples, un chenal est totalement

comblé à l'aide d'un important volume de galets et graviers rhénans. Ces aménagements lourds conduisent donc à un comblement accéléré des chenaux situés en bordure de la plaine. Le paléochenal oriental connaît à ce moment, une reprise de la sédimentation minérale et de son hydrodynamisme tandis que des dépôts d'inondation sont enregistrés sur sa rive gauche. Ces dépôts sableux bien triés et interstratifiés avec des dépôts anthropiques du *vicus* coïncident également avec des fluctuations du couvert végétal dans la plaine reconnus par l'analyse palynologique. L'un de ces événements peut correspondre à une période de stress de croissance reconnue sur certains bois archéologiques et remonte à 93 après J.-C.

Le quatrième état correspond à la fin de l'occupation de la plaine par les Romains et à leur installation essentiellement sur la terrasse dès le début du quatrième siècle. Cela s'accompagne d'une déstabilisation de la terrasse tandis que dans la plaine se développent des dépôts fins riches en matière organique traduisant une prairie marécageuse.

La seconde thématique concerne la connaissance des inondations et des variations de l'humidité survenant au cours de l'Antiquité. Dans la partie la plus orientale du vicus située en rive gauche du paléochenal oriental, **quatre dépôts d'inondation** ont été reconnus et situés **entre 20 et 145/146** de notre ère d'après des datations dendrochronologiques. L'absence de dépôts enregistrés dans le secteur des camps pendant leur période de fonctionnement permet de proposer un *terminus post-quem* pour ces dépôts après le départ des militaires dans les années **69/70**.

Dans le paléochenal occidental, un autre dépôt est également interprété comme résultant d'une crue. Celle-ci est datée postérieurement à **1745 ± 30 BP** et **coïncide avec un changement rapide du couvert végétal** correspondant à un rajeunissement de la forêt riveraine. Deux autres changements du couvert végétal de ce type sont mis en évidence **entre 1850 ± 30 BP et 1745 ± 30 BP**. Ces événements pourraient correspondre à des crues également connues par des dépôts sédimentaires dans le *vicus*.

De plus, deux périodes de stress de croissance des bois archéologiques sont aussi observées. La première datée de **63 avant J.-C.** est largement antérieure à l'occupation anthropique dans le secteur d'étude. La seconde, datée de **93 après J.-C.**, pourrait correspondre à l'un des événements enregistrés soit par les dépôts sédimentaires, soit par les variations du couvert végétal. Il semble donc probable que certains effets enregistrés de façon différente soient dus au même événement hydrologique.

Ce cortège d'effets de la dynamique du Rhin enregistrés sur le site d'Oedenburg pose la question de la répartition temporelle des inondations du Rhin au cours de l'époque antique et de leur lien avec le climat.

Les observations réalisées sur les variations de fréquences des inondations historiques suggèrent que les corrélations entre bassins-versants doivent être réalisées avec prudence. Cela est donc d'autant plus vrai pour les inondations antiques qui présentent des incertitudes de datation parfois importantes. La réalisation de calendriers des crues antiques doit donc être faite en tenant compte des fonctionnements

différents de chaque bassin-versant. Une spatialisation des données pourrait être le moyen de combiner ces données avec d'autres informations paléoclimatiques telles que les séries dendrochronologiques locales ou encore les autres données géoarchéologiques acquises sur d'autres sites.
Cette approche géoarchéologique est d'un grand intérêt pour l'étude à long terme des relations entre la dynamique d'occupation et la dynamique alluviale au sein d'un bassin versant comme celui du Rhin.

L'approche géoarchéologique menée du site d'Oedenburg montre donc l'intérêt d'une étude menée à la fois dans les secteurs fouillés mais également dans les chenaux plus distants de la zone d'occupation. La prise en compte de plusieurs séquences de comblement de chenaux permet d'acquérir une vision plus réaliste du fonctionnement de la plaine alluviale du Rhin au cours de l'Antiquité. **Ce fonctionnement antique de la plaine alluviale du Rhin n'est fondamentalement pas très diffèrent de celui connu pour les époques plus récentes au cours desquelles les chenaux connaissent des histoires sédimentaires distinctes.**
La réalisation d'une séquence palynologique synchrone avec les changements historiques observés sur les cartes anciennes permettrait d'établir une relation plus fiable entre la dynamique alluviale et le couvert végétal directement transposable à l'époque antique.
Certaines des méthodes qui ont été utilisées au cours de ce travail ont confirmé leurs potentialités. C'est notamment le cas de la tomographie électrique adapté au type de remplissage des paléochenaux holocène du Rhin. La prospection magnétique est aussi une méthode adaptée au site, en raison des matériaux de construction d'origine volcanique et donc du fort contraste avec les sédiments de la plaine.
En revanche le géoradar apparaît plus complexe à réaliser sur ce site en raison d'une part de la présence des lignes à haute tension et d'autre part en raison de la forte proportion de particules fines absorbant une importante quantité du signal électromagnétique.
Enfin, la possibilité de réaliser des études en tranchées et en fouilles a réellement permis la mise en évidence des relations stratigraphiques entre les dépôts naturels et les dépôts anthropiques. D'ailleurs, la plupart des dépôts d'inondations n'auraient sans doute pas pu être interprétés de façon aussi fiable sans ce type d'observation.

A l'issue de ce travail, il apparaît que certaines questions pourraient faire l'objet, à elles seules, de nouvelles recherches :

❖ **étude des variations de fréquence des inondations historiques** : nous pouvons nous demander s'il est préférable d'appauvrir des données afin de travailler sur un plus grand corpus - et ce au risque de ne pas intégrer toutes les données - ou de travailler uniquement avec des données précises même si cela appauvrit la résolution.

Pour se faire, on pourrait poursuivre l'approche historique menée sur l'hydrologie des événements extrême et poursuivre de façon plus ciblée l'étude de la relation entre les bassins versants et le climat en incluant une approche spatiale avec des outils comme le S.I.G.

❖ **analyse des relations entre la dynamique alluviale et la dynamique du paysage** menée sur les cartes anciennes.

➔ Ces deux approches fondées sur des données documentaires, méritent d'être systématisées afin de servir de base de réflexion sur les processus survenus aux époques antérieures comme l'époque romaine par exemple. En outre, ***ces approches permettraient d'avoir des références fiables dans le cas de renaturation des plaines alluviale dans le futur afin de mieux connaître l'impact de forets alluvial sur le devenir du paysage dans un secteur donné***.

❖ **établissement d'un calendrier des crues antiques** afin de ***mieux cerner l'occupation des plaines alluviales tout en tenant compte des spécificités propres de chaque bassin versant et de leurs réponses aux contraintes climatiques***.

❖ **la reconstitution du paysage** puisqu'il apparaît évident que l'approche géoarchéologique offrirait la possibilité de ***documenter l'évolution des relations entre les sociétés et l'environnement alluvial dans un contexte où il est nécessaire d'acquérir une meilleure connaissance à long terme des impacts et des temps de réponse dans les plaines alluviales.***

A mon sens, la Géoarchéologie, parce qu'elle intègre à la fois les Sciences de la Terre et les Sciences de l'Homme, a la vocation d'être utile à la société.

BIBLIOGRAPHIE

Abegg-Wigg, A., Walter, D., Biegert, S., 2000. Forschungenin germanischen Siedlungen des mittleren Lahntals. Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte 5, 55-65.

Abernethy, B., Rutherfurd, I.D., 2000. The effect of riparian roots on the mass-stability of riverbanks. Earth Surface Processes and Landforms 25, 921-937.

Abernethy, B., Rutherfurd, I.D., 2001. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. Hydrological Processes 15, 39-61.

Aitken, M.J., 1961. Physics and Archaeology. Interscience Publishers Inc., New York, 181 p.

Alexandre, P., 1987. Le climat en Europe au Moyen Age. Contribution à l'histoire des variations climatiques de 1000 à 1425, d'après les sources narratives de l'Europe occidentale. Paris.

Al-Fares, W., Bakalowicz, M., Albouy, Y., Vouillamoz, J.M., Dukhan, M., Toe, G., Guérin, R. 2001. Contribution de la géophysique à l'étude d'un aquifère karstique. Exemple du site karstique du Lamalou. 3ème Colloque GEOFCAN.

Annan, A.P., 1992. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Sensors and Software, Mississauga, Ontario. 192 p.

Appel, E., Wilhelm, J., Waldhör, M., 1997. Archaeological Prospection of Wall Remains using Geoelectrical methods and GPR. Archaeological Prospection 4, 219-229.

Arnaud, F., Revel-Rolland, M., Chapron, E., Desmet, M., Tribovillard, N., 2005. 7200 years of Rhône river flooding activity recorded in Lake Le Bourget: A high resolution sediment record of NW Alps hydrology. The Holocene 15, 420-428.

Arnaud-Fassetta, G., 2002. Geomorphological records of a 'flood-dominated regime' in the Rhône Delta (France) between the 1st century BC and the 2nd century AD. What correlations with the catchment paleohydrology? Geodinamica Acta 15, 79-92.

Arnaud-Fassetta, G., Landuré, C., 2003. Hydroclimatic hazards, vulnerability of societies and fluvial risk in the Rhone Delta (Mediterranean France) from the Greek period to the early Middle Ages. In: Fouache, (Ed.), The Mediterranean World Environment and History. Proceedings of the International Conference on Environmental Dynamics and History in Mediterranean Areas, Paris, 24-26 April 2002. Elsevier, Paris, 51-76.

Arnel, N.W., The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. Global environmental change 9, 5-23.

Ashmore, P.E., 1982. Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. Earth Surface Processes and Landforms 7, 201-225.

Ashmore, P.E., 1991. How do gravel bed rivers braid? Canadian Journal of Earth Sciences 28, 326-341.

Ashworth, P.J., Best, J.L., Jones, M., 2004. Relationship between sediment supply and avulsion frequency in braided rivers. Geology 32, 21-24.

Asskamp, R., 1989. Das südliche Oberrheingebiet in frührömischer Zeit, Stuttgart, Thesis, coll. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 33, 123 p.

Baker, V.R., 2003. Palaeofloods and extended discharge records. In: Gregory et Benito, (Eds.), Palaeohydrology: Understanding Global Change. J. Wiley and Sons, Chichester, 307-323.

Baize, D., Girard, M.-C., Arrouays, D., Aubert, G., Aubrun, A., Aurousseau, P., Beaudou, A., Bornand, M., Boulaine, J., Bresson, L.M., Brethes, A., Chrétien, J., Favrot, J.-C., Jabiol, B., Jamagne, M., Kaloga, B., Laplace-Dolonde, A., Loyer, J.-Y., Luspascu, G., Marius, C., Ninov, N., Podwojevski, P., Pouget, M., Quantin, P., Righi, D., Rossignol, J.-P., Ruellan, A., Van Vliet, B., Vizier, J.-F., 1995. Référentiel pédologique. INRA, Paris, 332 p.

Baines, D., Smith, D.G., Froese, D.G., Bauman, P., Nimeck, G., 2002. Electrical resistivity ground imaging (ERGI): a new tool for mapping the lithology and geometry of channel-belts and valley-fills. Sedimentology 49, 441-449.

Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llasat, M.C., Naulet, R., Lemaitre, F., Barrera, A., 2003. Stationarity analysis of historical flood seris in France and Spain (14th-20th centuries). Natural Hazards and Earth System Sciences 3, 583-592.

Bartz, J., 1974. Die Mächtigkeit des Quartärs im Oberheingraben. An Isopach Map of the Quaternary Deposits of the Rhinegraben. In: Illies et Fuchs, (Eds), Approaches to Taphrogenesis, Stuttgart, Schweizerbart, 78-87.

Bendix, J., Hupp, C.R., 2000. Hydrological and geomorphological impacts on riparian plant communities. Hydrological Processes 14, 2977-2990.

Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Francés, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V.R., Enzel, Y., Bardossy, A., Coeur, D., Bobée, B., 2004. Use of Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. Review of Scientific Methods. Natural Hazards 31, 623-643.

Benito, G., Díez-Herrero, A., and Fernández de Villalta, M., 2003. Magnitude and Frequency of Flooding in the Tagus Basin (Central Spain) over the Last Millenium. Climatic Change 58, 171-192.

Beresnev, I.A., Hruby, C.E., Davis, C.A., 2002. The use of multi-electrode resisitivity imaging in gravel prospecting. Journal of Applied Geophysics 49, 245-254.

Berglund, B.E., 2003. Human impact and climate changes. Synchronous events and a causal link? Quaternary International 105, 7-12.

Berger, J.-F., Fiches, J.-L., Gazenbeek, M., 2003. Origin of fluvial fluctuations of the river Vidourle and their effect on the organisation and evolution of the site of Ambrussum (Herault, France) between the Iron Age and Late Antiquity. In: Fouache, (Ed.), The Mediterranean World Environment and History. Proceedings of the International Conference on Environmental Dynamics and History in Mediterranean Areas, Paris, 24-26 April 2002. Elsevier, Paris, 77-108.

Berger, J.-F., Fiches, J.-L., Gazenbeek, M., 2004. La gestion du risque fluvial à Ambrussum durant l'Antiquité par les riverains du Vidourle.In: Burnouf et Leveau, (Eds.), Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris, 419-435.

Biellmann, D., 1992. Moustiques et milieux rhénans. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 824, 213-219.

Biellmann, P., 1987. Les tuiles de la 1ère légion Martia trouvées à Biesheim-Oedenburg. Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt et du Ried 2, 8-15.

Biellmann, P., 1988. Biesheim-Oedenburg: un bimillénaire. Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt et du Ried 3, 21-30.

Biellmann, P., 1996. Le premier camp d'Oedenburg (Biesheim-Kunheim). Annuaire de la Société d'histoire de la Hardt et du Ried 9, 17-32.

Biellmann, P., 1997. Observations sur l'occupation romaine tardive du site d'Oedenburg (Biesheim-Kunheim). Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt et du Ried 10, 17-38.

Biellmann, P., 2000. La prospection pédestre à Oedenburg (Biesheim-Kunheim) en 1999. Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt et du Ried 13, 18-22.

Biellmann, P., 2001. Une nécropole du Bas-Empire à Oedenburg (Biesheim-Kunheim). Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt et du Ried 14, 9-20.

Blanalt J.-G., Eller J.-P., Fluck P., Geffroy J., Hillermann G., Jehl M., Monnet C., Shreiner J., Eckerle A., Sittler C., Schwoerer P., Tricart J., Hirth C., Vogt M., Weil R., Siat A. (1974) Notice explicative de la carte géologique de la France à 1/ 50 000, Feuille Colmar-Artolsheim.

Blazer, E., 1931. Souvenirs montbéliardais, tome 2. Les inondations à Montbéliard en 1910 et avant. Ville de Montbéliard, 194 p.

Blum, M.D., Törnqvist, T.E., 2000. Fluvial responses to climate and sea level change: A review and look forward. Sedimentology 47, 2-48.

Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., Bonani, G., 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. Science 294, 2130-36.

Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Alamasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I., Bonani, G., 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. Science 278, 1257-1266.

Bork HR, Bork H, Dalchow C, Faust B, Piorr HP, Schatz T., 1998. Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Wirkungen des Menschen auf Landschaften. Klett-Perthes. Gotha 328.

Brádzil, R., Pfister, C., Wanner, H., Von Storch, H., Luterbacher, J., 2005. Historical Climatology in Europe - The State of the Art. Climatic Change 70. 363-430.

Brádzil, R., Glaser, R., Pfister, C., Dobrovolný, P., Antoine, J.-M., Barriendos, M., Camuffo, D., Deutsch, M., Enzi, S., Guidoboni, E., Kotyza, O., Rodrigo, F.S., 1999. Flood events of selected european rivers in the sixteenth century. Climatic Change 43, 239-285.

Bravard, J.-P., Verot-Bourrely, A., Salvador, P.G., 1992. Le climat d'après les informations fournies par les enregistrements sédimentaires fluviatiles étudiés sur des sites archéologiques. In : Les nouvelles de l'Archéologie 50, 7-13.

Bravard, J.-P., Amoros, C., Pautou, G., 1986. Impact of civil engineering works on the successions of comminities in a fluvial system. Oikos 42, 92-111.

Bridge, J.S., 2004. Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record. Blackwell Publishing, Oxford 491p.

Bridge, J.S., Alexander, J., Collier, R.E., Gawthorpe, R.L., Jarvis, J., 1995. Ground-penetrating radar and coring used to study the large-scale structure of point-bar deposits in three dimensions. Sedimentology 42, 839-852.

Bridge, J.S., Smith, N.D., Trent, F., Gabel, S.L., Bernstein, P., 1986. Sedimentology and morphology of a low-sinuosity river: Calamus River, Nebraska Sand Hills. Sedimentology 33, 851-870.

Brookes, C.J., Hooke, J.M. and Mant, J., 2001. Modelling vegetation interactions with channel flow in river valleys of the Mediterranean region. CATENA 40, 93-118.

Brown A.G., 1997. Alluvial geoarchaeology. Floodplain archaeology and environmental change. Cambridge manuals in archaeology, Cambridge University Press, 377 p.

Bruneton, H., Arnaud-Fassetta, G., Provansal, M., Sistach, D., 2001. Geomorphological evidence for fluvial change during the Roman Period in the lower Rhone valley (southern France). CATENA 45, 287-312.

Bristow, C.S., Best, J.L., 1993. Braided rivers: perspectives and problems. In Best et Bristow (Eds), Braided Rivers, Geological Society of London Special Publication 75, 1-11.

Bristow, C.S., 1987. Brahmaputra River: Channel migration and deposition. In Ethridge, Flores et Harvey (Eds), Recent developments in fluvial sedimentology, Society of Economic Palentologists and Mineralogists Special Publications 39, 63-74.

Carbiener, R., 1969. Le Grand Ried d'Alsace, écologie d'un paysage. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 1, 15-44.

Carbiener, R., 1974. Le Rhin et l'Alsace. Histoire de l'évolution des rapports entre l'homme et un grand fleuve. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 757, 61-69.

Carbeiner, R., 1997. Le Grand Ried d'Alsace. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 734, 15-44.

Carbiener, R., Trémolière, M., 1990. The Rhine rift valley groundwater table and Rhine river interaction : evolution of their susceptibility to pollution. Regulated Rivers, Research and Management 5, 375-389.

Carbiener, R., Tremolière, M., 2003. La ripisylve du Rhin et ses connexions. Histoire, évolution naturelle et anthropique. In: Piégay, Pautou et Ruffinoni (Eds), Les forêts riveraines des cours d'eau. Ecologie, fonctions et gestion. Institut pour le développement forestier. 240-271.

Cestre, A., 1877. Ruines d'Oedenburg sur le Rhin (banlieue de Biesheim). Notice avec carte des lieux et dessins des objets trouvés en novembre 1877, Journal d'Altkirch, 1.

Champion, M., 1858-1864. Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours. Dunod, Paris, 6 volumes.

Champion, M., 1863. Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours, T. 5: Bassin du Rhin. Dunod, Paris 283 p.

Chbab, E.H., 1995. How Extreme were the 1995 Flood Waves on the Rivers Rhine and Meuse? Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 20, 5-6, 455-458.

Chiarello, E., Amoros, C., Pautou, G., Jolion, J.-M., 1998. Succession modeling of river floodplain landscapes. Environmental Modelling and Software 13, 75-85.

Chiarello, E., Jolion, J.-M., Amoros, C., 1996. Regions growing with the stochastic pyramid: Application in landscape ecology. Pattern Recognition 29, 61-75.

Church, M., 1978. Paleohydrological reconstruction from a Holocene Valley fill. In: Miall, (Ed.), Fluvial Sedimentology, Memory of the Canadian Society of Petroleum Geology, Calgary, 5, 743-772.

Conrad, O., 1999. Fléaux et calamités naturelles au siècle dernier dans le Haut-Rhin. Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt et du Ried 12, 115-136.

Contejean, C., 1892. L'hiver de 1890 à 1891 à Montbéliard. Société d'Emulation de Montbéliard, 25-40.

Contejean, C., 1894. L'hiver et la sécheresse de 1893 à Montbéliard. Société d'Emulation de Montbéliard, 163-178.

Contejean, C., 1902. Le climat de Montbéliard. Société d'Emulation de Montbéliard, 19-43.

Contejean, C., 1989. Du climat de Montbéliard au XVIIème siècle. Société d'Emulation de Montbéliard 84. 349-380.

Coste, A., 1860. Notice historique et topographique sur la ville de Vieux-Brisach, avec le plan de la ville en 1692, Mulhouse.

Coulthard, T.J., 2005. Effects of vegetation on braided stream pattern and dynamics. Water Resources Research 41, 94-103.

Criqui, G., 1981. Le régime hydraulique, les crues et les inondations du Rhin. In: Aycoberry et Ferro, (Eds.), Une histoire du Rhin. Ramsay, Paris, 317-336.

Dabas, M., Carmerlynck, C., Bossuet, G., Pétrequin, P., Bailly, M., 1999. Détection par méthode radar de niveaux anthropiques du Néolithique final sous le niveau actuel du lac de Chalain (France).

Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la Terre et des Planètes 328, 509-514.

Davis, J.L., Annan, A.P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting 37, 531-551.

De la Vega, M., Osella, A., Lascano, E. 2003. Joint inversion of wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil. Journal of Applied Geophysics 54, 97-109.

Debart, J.-M., 1975. Subsistances et prix des grains à Montbéliard de 1571 à 1793. Société d'Emulation de Montbéliard 98. 297p.

Debart, J.-M., 1989. Pour une histoire du climat de Montbéliard à l'époque moderne. Société d'Emulation de Montbéliard 84. 343-348.

Decoville-Faller, M., 1961. Les transformations hydrographiques réalisées depuis un siècle dans la région de Neuf-Brisach. Regio Basiliensis 2, 113-133.

Deiller, A.-F., Walter, J.-M.N., Trémolières, M., 2001. Effects of flood interruption on species richness, diversity and floristic composition of woody regeneration in the Upper Rhine alluvial hardwood forest. Regulated Rivers, Research and Management 17, 393-405.

Demanet, D., Pirard, E., Renardy, F., Jongmans, D., 2001. Application and processing of geophysical images for mapping faults. Computers and Geosciences 27, 1031-1037.

Descombes, R., 1995. L'eau dans la ville. Des métiers et des hommes. Hirlé, Strasbourg 351p.

Dollfus, J., 1960. L'homme et le Rhin. In: Deffontaines, (Ed.), Géographie humaine, Gallimard, Abbeville, 398 p.

Douard, A., Carbiener, R., 1992. La confluence Rhin- Sauer : Structure et fonctionnement d'un secteur quasi-deltaïque. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 824, 106-113.

Dreßler, M., Selig, U., Dörfler, W., Adler, S., Schubert, H., Hübener, T., 2006. Environmental changes and the Migration Period in northern Germany as reflected in the sediments of Lake Dudinghausen. Quaternary Research 66, 25-37.

Duprat, A., Simler, L., Valentin, J., 1979. La nappe phréatique de la plaine du Rhin en Alsace. Sciences Géologiques, Mémoire 60. 266 p.

Duvernoy, M., 1882. Ephémérides du Comté de Montbéliard, présentant, pour chacun des jours de l'année, un tableau des faits politiques, religieux et littéraires les plus remarquables de l'histoire de ce comté et des seigneuries qui en dépendaient, dès le treizième siècle jusqu'en 1793 ; avec une introduction historique, et la série des comtes de Montbéliard. CM-658.

Edel, J.-B., Whitechurch, H., Diraison, M., 2006. Seismicity wedge beneath the Upper Rhine Graben due to backwards Alpine push? Tectonophysics 428, 49-64.

Eisenmenger, G., 1907. Etudes sur l'évolution du Rhin et du système hydrographique rhénan. Bonvalot-Jouve, Paris 512 p.

Ethridge, F.G., Skelly, R.L., Bristow, C.S., 1999. Avulsion and crevassing in the sandy, braided Niobrara River: complex response to base-level rise and aggradation. In: Smith et Rogers, (Eds.), Fluvial Sedimentology VI. International Association of Sedimentologists Special Publication 28. Blackwell Science, London, 179- 191.

Eschner, T.R., Hadley, R.F., Crowley, K.D., 1983. Hydrologic and morphologic changes in channels of the Platte River basin in Colorado, Wyoming and Nebraska: A historical perspective, 1-39.

Eschweiler, W., 1959. L'hydrologie du Rhin à l'aval de Bâle. Le Rhin entre Bâle et Emmerich. La Houille Blanche 2, 125-160.

Emery, D., Myers, K.J., 2004. Sequence Stratigraphy. Blackwell Science, Oxford, 297 p.

Fäh, D., Giardini, D., Bay, F., Bernardi, F., Braunmiller, J., Deichmann, N., Furrer, M., Gantner, L., Gisler, M., Isenegger, D., Jimenez, M.J., Kästli, P., Koglin, R., Masciadri, V., Rutz, M., Scheidegger, C., Schibler, R., Schorlemmer, D., Schwarz-Zanetti, G., Steimen, S., Sellami, S., Wiener, S., Wössner, J., 2003. Earthquake catalogue of Switzerland (ECOS) and the related macroseismic database. Eclogae Geologicae Helveticae 96, 219-236.

Fäh, D., Steimen, S., Oprsal, I., Ripperger, J., Wössner, J., Schatzmann, R., Furger, A., Spottke, I., Huggenberger, P., 2006. The earthquake of 250 A.D. in Augusta Raurica, a real event with a 3D site-effect? Journal of Seismology 10, 21-28.

Ferdière, A., Dabas, M., Delétang, H., Jung, C., Zimmermann, W. H., 2006. La prospection. Collection Archéologique, Errance, 248 p.

Friedmann, A., 2000. Die Spät- und Postglaziale Landschafts- und Vegetationsgeschichte des südlichen Oberrheintieflands und Schwarzwalds. Freiburger Geographische Hefte 62.

Friend, P.F., Sinha, R., 1993. Braiding and meandering parameters. In Best et Bristow (Eds), Braided Rivers. Geological Society of London Special Publications 75, 105-113.

Fellmann, R., 1995. Germania superior, in der Städte von den Raurikern aber Augusta Raurikon und Argentovaria. Kritische Bemerkungen zu civitas und colonia im Raurikergebiet. In Koenig et Rebetez, (Eds.), Arculiana Festschrift Hans Bögli, Avenches, L.A.O.T.T., 289-301.

Gaffney, V., Patterson, H., Piro, S., Goodman, D., Nishimura, Y., 2004. Multimethodological Approach to Study and Characterize Forum Novum (Vescovio, Central Italy). Archaeological Prospection 11, 201-212.

Girardclos, O., 1999. Dendrochronologie du Chêne, influences des facteurs stationnels et climatiques sur la croissance radiale, cas des sols hydromorphes et des climats atlantiques. Applications paléoécologiques aux bois subfossiles du marais de Brière (Loire-Atlantique). Thèse de l'Université de Franche-Comté, Besançon, 377 p.

Glaser, R., 2001. Klimageschichte Mitteleuropas, 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen, Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt. 226 p.

Glaser, R., Stangl, H., 2003. Historical floods in the Dutch Rhine Delta. Natural Hazard and Earth System Sciences 3, 605-613.

Golbéry, P., (De), 1828. Antiquités de l'Alsace ou châteaux, églises et autres monuments des départements du Haut-et du Bas-Rhin, Mulhouse, Paris, Engelmann et Cie.

Gölz, E., 1990. Suspended sediment and bedload problems of the upper Rhine, CATENA 17, 127-140.

Gowlett, J.A.J., 1997. High definition archaeology: ideas and evaluation. World Archaeology 29, 152-171.

Graf, W.L., 1978. Fluvial adjustments to the spread of Tamarisk in the Colorado Plateau region. Geological Society of America Bulletin 89, 1491-1501.

Gran, K., Paola, C., 2001. Riparian vegetation controls on braiding stream dynamics. Water Resources Research 37, 3275-3283.

Green, J.C., 2005. Modelling flow resistance in vegetated streams: review and development of new theory. Hydrological Processes 19, 1245-1259.

Gregory, D.I., Schumm, S.A., 1987. The Effect of Active Tectonics on Alluvial River Morphology. In Richards, (Ed.) River Channels: Environment and Process. Blackwell, Oxford, 41-68.

Gregory, K.J., Benito, G., Dikau, R., Golosov, V., Jones, J.A.A., Macklin, M.G., Parsons, A.J., Passmore, D.G., Poesen, J., Starkel, L., Walling, D.E., 2006a. Past hydrological events related to understanding global change: An ICSU research project. CATENA 66, 2-13.

Gregory, K.J., Benito, G., Dikau, R., Golosov, V., Johnstone, E.C., Jones, J.A.A., Macklin, M.G., Parsons, A.J., Passmore, D.G., Poesen, J., Soja, R., Starkel, L., Thorndycraft, V.R., Walling, D.E., 2006b. Past hydrological events and global change. Hydrological Processes 20, 199-204.

Gurnell, A.M., Petts, G.E., Hannah, D.M., Smith, B.P.G., Edwards, P.J., Kollmann, J., Ward, J.V., Tockner, K. 2001. Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. Earth Surface Processes and Landforms 26, 31-62.

Gregory, K.J., 2003. Palaeohydrology, environmental change and river channel management. In: Gregory et Benito, (Eds.), Palaeohydrology: Understanding Global Change. J. Wiley and Sons, Chichester, 357-378.

Hagedorn, E.-M., 2004. Sedimentpetrographie und Lithofazies der Jungtertiären und Quartären Sedimente im Oberrheingebeit. PhD Thesis, 248 p.

Hardy, R. J., 2006. Fluvial geomorphology. Progress in Physical Geography 30, 553-567.

Hatt, J.-J., 1954. Les fouilles de Strasbourg en 1953 et 1954, découverte d'un dépotoir de céramiques. Gallia 12, 323-339.

Hatt, J.-J., 1966a. Le Rhin dans l'Histoire. L'Antiquité. Connaissance du Rhin, Saisons d'Alsace, Strasbourg, 153 p.

Hatt, J.-J., 1966b. Ehl (Ellelum?). Gallia 24, 313-319.

Heller, P.L., Paola, C., 1996. Downstream changes in alluvial architecture: an exploration of controls on channel-stacking patterns. Journal of Sedimentary Research 66, 297-306.

Hong, L.B., Davis, T.R.H., 1979. A study of stream braiding. Geological Society of America Bulletin 79, 391-394.

Howard, A.D., Keech, M.E., Vincent, C.L., 1970. Topological and geometrical properties of braided rivers. Water Resource Research 6, 1674-1688.

Huggenberger, P., 1993. Radar facies: recognition of characteristic braided river structures of the Pleistocene Rhine gravel (NE part of Switzerland). In: Best et Bristow, (Eds.), Braided Rivers. Geological Society of London Special Publication 75, 163-175.

Hupp, C.R., 2000. Hydrology, geomorphology and vegetation of Coastal Plain rivers in the south-eastern USA. Hydrological Processes 14, 2991-3010.

Illies, J.H., 1974a. Taphrogenesis, introductory remarks. In: Illies et Fuchs, (Eds.), Approaches to Taphrogenesis. Stuttgart, Schweizerbart, 1-13.

Illies, J.H., 1974b. Taphrogenesis and plate tectonics. In: Illies et Fuchs, (Eds.), Approaches to Taphrogenesis. Stuttgart, Schweizerbart, 433-460.

Illies, J.H., 1977. Ancient and recent rifting in the Rhinegraben. Geologie en Mijnbouw 56, 329-350.

Jacobeit, J., Glaser, R., Luterbacher, J., Nonnenmacher, M., Wanner, H., 2003a. Links between flood events in central Europe since AD 1500 and the large-scale atmospheric circulation. In: Thorndycraft, Benito, Barriendos et Llasat, (Eds), Palaeofloods, Historical Floods and Climatic Variability: Applications in Flood Risk Assessment (Proceedings of the PHEFRA Workshop, Barcelona, 16-19th October, 2002).

Jacobeit, J., Glaser, R., Luterbacher, J., Wanner, H., 2003b. Links between flood events in central Europe since AD 1500 and large-scale atmospheric circulation modes. Geophysical Reseach Letters 30, 1-4.

Johnstone, E., Macklin, M.G., Lewin, J., 2006. The development and application of a database of radiocarbon-dated Holocene fluvial deposits in Great Britain. CATENA 66, 14-23.

Jol, H.M., Smith, D.G., 1991. Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. Canadian Journal of Earth Sciences 28, 1939-1947.

Jol, H.M., 1995. Ground penetrating radar antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity. Exploration Geophysics 43, 693-709.

Kern, K., 1992. Restoration of Lowland Rivers: the German Experience. In: Carling et Petts, (Eds), Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives. John Wiley and Sons Ltd. 279-298.

Kern, E., 1994. Biesheim-Kunheim (Haut-Rhin). In: Petit et Mangin, (Eds.). Atlas des agglomérations secondaires de la Gaule Belgique et des Germanies, Errance, Paris, 159-161.

Kerr, R.A., 2001. A variable sun paces millennial climate. Science 294, 1431-1433.

Klein, J.-P., Carbeiner, R., Steimer, F., Trendel, J.-M., 1992. Les réserves naturelles des forêts alluviales rhénanes d'Erstein et d'Offendorf : Un patrimoine biologique européen. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 1 (824), 21-58.

Kraay, C.M., 1962. Die Münzfunde von Vindonissa (bis Trajan). Veröffentlichungen der Gesellschaft pro Vindonissa 5, 26-29.

Knighton, A.D., Nanson, G.C., 1993. Anastomosis and the continuum of channel pattern. Earth Surface Processes and Landforms 18, 613-625.

Lamb, H.H., 1977. Climate: Present, Past and Future. Vol.2. Climatic History and the Future. London.

Lambert, J., Winter, T., Dewez, T., Sabourault, P., 2005. New hypotheses on the maximum damage area of the 1356 Basel Earthquake (Switzerland). Quaternary Science Reviews 24,

Landon, N., Piegay, H., 1994. L'incision de deux affluents subméditerranéens du Rhône : la Drôme et l'Ardèche. Revue Géographique de Lyon 69, 63-72.

Lane, E.W., 1957. A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodable material. MRD Sediment series 9, United States Engineering Division, Missouri River, Corps Engineers, Omaha, Nebraska.

Lang, A., Bork, H.-R., Mäckel, R., Preston, N.,Wunderlich, J., Dikau, R., 2003. Changes in sediment flux and storage within a fluvial system: some examples from the Rhine catchment. Hydrological Processes 17, 3321-3334.

Lefoulon, R., 1959. L'aménagement du Rhin sur le tronçon entre Bâle et Strasbourg. La Houille Blanche 2, 203-306.

Leopold, L.B., Wolmann, M.G., Miller, J.P., 1957. Fluvial Processes in Geomorphology. Freeman, San Francisco, 522 p.

Leopold, L.B., Wolman, M.G., 1957. River Channel Patterns, Braided, Meandering, and Straight, United States Geological Survey, Professional Paper, 282B, 39-85

Le Roy Ladurie, E., 1968. Histoire du climat depuis l'An Mil, Flammarion, Paris, 376 p.

Leroy-gourhan, A., Brézillon, M., 1966. L'habitation Magdalénienne n°1 de Pincevent près Montereau (Seine et Marne). Gallia Préhistoire 9, 263-385.

Leuschner, H.H., 1992. Subfossil trees, in Tree-rings and Environment. Proceedings of the International Dendrochronological Symposium, sept 1990, Ystad, Sweden. Lundqua Report 34, 193-197.

Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting 44, 131-152.

Loke, M.H., Dahlin, T., 2001. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. Journal of Applied Geophysics 49, 149-162.

Lorenzo, H., Arias, P., 2005. A Methodology for Rapid Archaeological Site Documentation Using Ground-Penetrating Radar and Terrestrial Photogrammetry. Geoarchaeology: An International Journal 20, 521-535.

Lunt, I.A., Bridge, J.S., Tye, R.S., 2004. A quantitative, three dimensional depositional model of gravely braided rivers. Sedimentology 51, 377-414.

Mäckel, R., Zollinger, G., 1995. Holocene river and slope dynamics in the Black Forest and Upper Rhine Lowlands under the impact of man. Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., Suppl. Bd. 100, 89-100.

Mäckel, R., Seidel, J., 2003. Der Kaiserstuhl - Ein Vulkan im Oberrheingraben. In: Institut Für Länderkund : Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland 2, 64-65.

Mäckel, R., Schneider, R., Friedmann, A., Seidel, J., 2002. Environmental changes and human impact on the relief development in the upper Rhine valley and Black Forest (South-West-Germany) during the Holocene. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Bd. 128, 31-45.

Mäckel, R., Schneider, R., Seidel, J., 2003. Anthropogenic impact on the landscape of southern Badenia (Germany) during the Holocene- documented by Colluvial and Alluvial sediments. Archaeometry 45, 487-501.

Mackey, S.D., Bridge, J.S., 1995. Three dimensional model of alluvial stratigraphy: theory and application. Journal of Sedimentary Research, 65, 7-31.

Macklin, M.G., Johnstone, E., Lewin, J., 2005. Pervasive & long term forcing of Holocene river instability & flooding in Great Britain by centennial-scale climate change. The Holocene 15, 937-943.

Macklin, M.G., Benito, G., Gregory, K.J., Johnstone, E., Lewin, J., Soja, R., Starkel, L., Thorndycraft, V.R., 2006. Past hydrological events reflected in the Holocene fluvial history of Europe. CATENA 66, 145-154.

Macklin, M.G., Lewin, J., 2003. River sediments, great floods and centennial-scale Holocene climate change. Journal of Quaternary Science 18, 101-105.

Magny, M., 2004. Holocene climatic variability as reflected by mid-European lake-level fluctuation and its probable impact on prehistoric humain settlement. Quaternary International 113, 65-80.

Magny, M., 1992. Holocene lake-level fluctuations in Jura and the northern subalpine ranges, France: regional pattern and climatic implications. Boreas 21, 319-334.

Magny, M., 1993a. Solar influences on Holocene climatic changes illustrated by correlations between past lake-level fluctuations and the atmospheric 14C record. Quaternary Research 40, 1-9.

Magny, M., 1993b. Holocene fluctuations of lake levels in the French Jura and sub-Alpine ranges and their implications for past general circulation pattern. The Holocene 3, 306-313.

Magny, M., Bégeot, C., Guiot, J., Peyron, O., 2003. Contrasting patterns of hydrological changes in Europe in response to Holocene climate cooling phases. Quaternary Science Reviews 22, 1589-1596.

Maillet, G., Rizzo, E., Revil, A., Vella, C., 2005. High resolution electrical resistivity tomography (ERT) in a transition zone environment: Application for detailed internal architecture and infilling processes study of a Rhône River paleo-channel. Marine Geophysical Researches 26, 317-328.

Maire, G., Sanchez-Perez, J.M., 1992. Influence des aménagements hydrauliques du Rhin sur le fonctionnement hydrologique des forêts riveraines d'Alsace. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 824, 9-19.

Makaske, B., 2001. Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products. Earth-Science Reviews 53, 149-196.

Mandy, E., 1997. L'eau à Monbéliard au 18ème siècle. Mémoire de maîtrise d'Histoire, Université de Franche-Comté. 192p. CM-1256.

Marchal M., Delmas, G., 1959. L'aménagement du Rhin à courant libre de Bâle à Lauterbourg, La Houille Blanche 2, 177-202.

Marston, R.A., Girel, J., Pautou, G., Piegay, H., Bravard, J.-P., Arneson, C., 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. Geomorphology 13, 121-131.

Martin, P., (De), 1989. Cet été de 1304 où l'on traversa le Rhin à pied en Haute-Alsace, Physio-Géo. 19, 101-110.

Maurer, A., 1993. Nouvelles découvertes sur le vicus d'Oedenburg-Biesheim, Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt et du Ried 6, 8-10.

Mayewski, P.A., Rohling, E.E., Stager, J.C., Karlén, W., Maasch, K.A., Meeker, L.D., Meyerson, E.A., Gasse, F., van Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R.R., Steig, E.J., 2004. Holocene climate variability. Quaternary Research 62, 243-255.

Meghraoui, M., Delouis, B., Ferry, M., Giardini, D., Huggenberger, P., Spottke, I., Granet, M., 2001. Active Normal Faulting in the Upper Rhine Graben and Paleoseismic Identification of the 1356 Basel Earthquake. Science 1356, 6480-850.

Miall, A., (Ed.), 1996. The Geology of Fluvial Deposits. Springer, Berlin, 596p.

Miramont, C., Jorda, M., Pichard, G., 1998. Evolution historique de la morpho-genèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la moyenne Durance (France du Sud-Est). Géographie physique et Quaternaire 52, 3, 1-13.

Möberg, A., Sonechkin, D.M., Holmgren, K., Datsenko, N.M., Karlén, W., 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. Nature 433, 613-617.

Mosley, M.P., 1982. Analysis of the effect of changing discharge on channel morphology and instream uses in a braided river, Ohau River, New Zealand. Water Resources Research 18, 800-812.

Mudelsee, M., Börgen, M., Tetzlaff, G., Feck-Yao, W., 2002. Towards predicting catastrophic flood events: an analysis of historical data of rivers Elbe and Oder. In Tetzlaff, Trautmann et Radtke (Eds.), Zweites Forum Katastrophenvorsorge, Extreme Natureignisse-Folgen, Vorsorge, Werkzeuge, DKKV, Bonn. 103-111.

Mudelsee, M., Börgen, M., Tetzlaff, G., Grünewald, U., 2003. No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. Nature 425, 166-169.

Naulet, R., Lang, M., Ouarda, T.B.M.J., Coeur, D., Bobée, B., Recking, A., Moussay, D., 2005. Flood frequency analysis on the Ardèche river using French documentary sources from the last two centuries. Journal of Hydrology 313, 58-78.

Neal, A., Roberts, C.L., 2000. Applications of ground penetrating radar (GPR) to sedimentological, geomorphological and geoarchaeological studies in coastal environments. In: Pye et Allen, (Eds.), Coastal and Estuarine Environments: Sedimentology, Geomorphology and Geoarchaeology. Geological Society, Special Publications 175, 139-171.

Nuber, H.U., Reddé, M., Jacomet, S., Joly, M., Popovitch, L., Schibler, J., Seitz, G., Fort, B., Matter, G., Pellissier, J., Petit, C., Viroulet, B., Wolf, J.-J., 2002. Le site militaire romain d'Oedenburg (Biesheim-Kunheim, Haut-Rhin, France). Premiers résultats. Germania 80, 169-242.

Ollive, V., Petit, C., Garcia, J.-P., Reddé, M., 2006. Rhine flood deposits recorded in the Gallo-Roman site of Oedenburg (Haut-Rhin, France). Quaternary International 150, 28-40.

Ollive, V., Petit, C., Garcia, J.-P., Reddé, M., Popovitch, L., Biellmann, P., Château-Smith, C., 2007. Roman Rhine settlement dynamics evidenced by coin distribution in a fluvial environment (Oedenburg, Upper Rhine, France). Journal of Archaeological Science, in press.

Ouchi, S., 1985. Response of alluvial rivers to slow active movement. Geological Society of America Bulletin, 96, 504-515.

Murray, A.B., Paola, C., 1994. A cellular model of braided rivers. Nature, 371, 54-57.

Pautou, G., Decamps, H., Amoros, C., Bravard, J.-P., 1985. Successions végétales dans les couloir fluviaux : L'exemple de la plaine alluvial du Haut-Rhône français. Bulletin Ecologique 16, 203-212.

Pautou, G., Piégay, H., Ruffinoni, C., 2003. Forêts riveraines, ripisylves ou forêts alluviales : un compartiment complexe de l'hydrosystème. In Piégay, Pautou et Ruffinoni (Eds.), Les forêts riveraines des cours d'eau. Ecologie, fonctions et gestion. Institut pour le développement forestier. 10-28.

Pardé, M., 1959. Quelques considérations générales sur l'hydrologie du Rhin et sur les aménagements de ce fleuve. La Houille Blanche 2, 101-114.

Passega, R., 1957. Texture as a characteristic of clastic deposition. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 41, 1952-1984.

Patzelt, G., 1977. Der zeitliche Ablauf undd as Ausmass postglazialer Klimaschwankungen in den Alpen In: Frenzel (Ed.), Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in Tirol 6, 93-123.

Petit, C., Girarclos, O., Ollive, V., Reddé, M., 2007. Milieux humides et aménagements anthropiques dans la plaine du Rhin: Le site romain d'Oedenburg (Haut-Rhin). VIIème Colloque AGER, Silva et Saltus en Gaule romaine. Dynamique et gestion des forêts et des zones rurales marginales.

Petit, C., Camerlynck, C., Deweirdt, E., Durlet, C., Garcia, J.-P., Gauthier, E., Ollive, V., Richard, H., Walhen, P., 2006. Géoarchéologie du site antique de Molesme en vallée de Laignes (Côte d'Or) : mise en évidence de l'impact anthropique sur la sédimentation alluviale. Gallia 63, 263-281.

Pfister, C., Weingartner, R., Luterbacher, J., 2006. Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: a methodological approach. Hydrological Sciences Journal 51, 966-985.

Pfister, C., 1988, Une retrospective météorologique de l'Europe. Un système de reconstitution de l'évolution du temps et du climat en Europe depuis le Moyen-Age central. Histoire & Mesure, III-3, 313-358.

Pfister, C., Brádzil, R., Glaser, R., Barriendos, M., Camuffo, D., Deutsch, M., Enzi, S., Guidoboni, E., Kotyza, O., Militzer, S., Raczii, L., Rodrigo, F.S., 1999. Documentary evidence on climate in sixteenth-century Europe. Climatic Change 43, 55-110.

Pflug, R., 1982. Bau und Entwicklung des Oberrheingrabens: Darmstadt. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 145 pp.

Pilcher J.-R., Baillie M.G.L., Brown D.M., Mc Cormac F.G. (1996). Hydrological data from the long Irish subfossil oak record. In: Dean, Meko et Swetnam (Eds.), Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference on Tree Rings, may 1994, Tucson Arizona, 259-264.

Pišut, P., 2002. Channel evolution of the Pre-channelized Danube River in Bratislava, Slovakia (1712-1886). Earth Surface Processes and Landforms 27, 369-390.

Plouin S., Reddé M., Boutantin C., (Eds.), 2001. La frontière romaine sur le Rhin supérieur. A propos des fouilles récentes de Biesheim-Kunheim. Ville de Biesheim, 104 p.

Probst, J.-L., 1992. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. Sciences géologiques 94, Université de Strasbourg, 161 p.

Provost, M., 1984. L'homme et les fluctuations climatiques en Gaule dans la deuxième moitié du 2ème siècle après Jésus-Christ, Revue archéologique 1, 71-78.

Provansal, M., Berger, J.F., Bravard, J.-P., Salvador, P.G., Arnaud-Fassetta, G., Bruneton, H., Verot-Bourrely, A., 1999. Le régime du Rhône dans l'Antiquité et au Haut Moyen-Age. Gallia 56, 13-32.

Pétry, F., Kern, E., 1978. Un Mithraeum à Biesheim. Cahiers d'archéologie et d'histoire d'Alsace 21, 5-32.

Reddé, M., 2002. Le site militaire romain d'Oedenburg, L'Archéologue - Archéologie Nouvelle 58, 26-30.

Reddé, M., Brulet, R., Fellmann, R., 2006. L'architecture de la Gaule romaine. Les fortifications militaires. Documents d'Archéologie Française 100, MSH-Ausonius, Bordeaux, 476 p.

Reddé, M., Nuber, H.U., Jacomet, S., Schibler, J., Schucany, C., Schwartz, P.-A., Seitz, G., Ginella, F., Joly, M., Plouin, S., Hüster Plogmann, H., Petit, C., Popovitch, L., Schlumbaum, A., Vandorpe, P., Viroulet, B., Wick, L., Wolf, J.-J., Gissinger, B., Ollive, V., Pellissier, J., 2005. Oedenburg. Une agglomération d'époque romaine sur le Rhin supérieur. Gallia 62, 215-277.

Reece, R., 1972. Roman coins in northern France and the Rhine Valley. Numismatic Chronicle 12, 159-165.

Reineck, H.E., Singh, I.B., 1980. Depositional Sedimentary Environments. Springer, Berlin 551pp.

Rémond, F., 2004. Apports de la tomographie électrique à l'étude de la côte viticole bourguignone. Mémoire de D.E.A., Université de Bourgogne, 50 p.

Renfrew, C., 1976. Archaeology and the Earth Sciences, In: Davidson et Shackley, (Eds.), Geoarchaeology, Westview, London, 1-5.

Richards, K.S., 1982. Rivers: form and process in alluvial channels. Routledge, London, 361p.

Riley, D.N., 1946. The technique of air-archaeology. Archaeological Journal 101, 1-16.

Rivière, A., 1977. Méthodes granulomètriques, Techniques et Interprétations, Paris, Masson, 182 p.

Rizzo, E., Chianese, D., Lapenna, V., 2005. Magnetic, GPR and geoelectrical measurements for studying the archaeological site of 'Masseria Nigro' (Viggiano, southern Italy). Near Surface Geophysics 3, 13-19.

Roberts, J., 2000: The influence of physical and physiological characteristics of vegetation on their hydrological response. Hydrological Processes 14, 2885-2901.

Rust, B.R., 1978. A classification of alluvial channel systems. In: Miall, (Ed.) Fluvial Sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geology Memoirs, 5, pp. 187-198.

Schöpflin, J.-D., Ravenez, L.W., 1849. Autres localités habitées par les Romains en Alsace, Haut-Rhin. In: Perrin, (Ed.), L'Alsace illustrée, Mulhouse, 595-600.

Smith, D.G., Jol, H.M., 1995. Ground penetrating radar: antennae frequencies and maximum probable depths in Quaternary sediments. Journal of Applied Geophysics 33, 93-100.

Smith, D.G., Smith, N.D., 1980. Sedimentation in anastomosed river systems: examples from alluvial valleys near Bauff, Alberta. Journal of Sedimentary Petrology 50, 157-164.

Salvador, P.G., Vérot-Bourrély, A., Bravard, J.P., Franc, O., Macé, S., 2002. Les crues du Rhône à l'époque gallo-romaine dans la région lyonnaise. In: Bravard et Magny, (Eds.), Histoire des rivières et des lacs de Lascaux à nos jours. Errance, Paris. 215-221.

Schnitzler, A., 1995. Succession and zonation in gallery forest. Journal of Vegetation Science 6, 479-486.

Schäfer, W., 1973. Der Oberrhein, sterbende Landschaft Natur und Museum 103, 1-29.

Schumm, S.A., 1981. Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. Society of Economic Palentologists and Mineralogists Special Publication 31, 19-29.

Schumm, S.A., 1977. The Fluvial System, Wiley, New York.

Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., Herzog, I., 1990. Archaeological Prospecting and Remote Sensing. Cambridge University Press, Cambridge, 674 pp.

Seren, S., Eder-Hinterleitner, A., Neubauer, W., Groh, S., 2004. Combined high-resolution magnetics and GPR surveys of the roman town of Flavia Solva. Near Surface Geophysics 2, 63-68.

Sell, Y., Berchtold, J.-P., Callot, H., Hoff, M., Gall, J-C., Walter, J.-M., 1998. L'Alsace et les Vosges. Géologie, milieux naturels, flore et faune, Delachaux et Niestlé, Paris, 354 p.

S.E.M. Société d'Emulation de la Ville de Montbéliard, 1997. Carte de Montbéliard.

Shaaban, F.F., Shaaban, F.A., 2001. Use of two-dimensional electric resistivity and ground penetrating radar of archeological prospecting at the ancient capital of Egypt. African Earth Sciences 33, 661-671.

Shanley, K.W., McCabe, P.J., 1991. Predicting facies architecture through sequence stratigraphy-an example from the Kaiparowits Plateau, Utah. Geology 19, 742-745.

Shanley, K.W., McCabe, P.J., 1994. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 78, 544-568.

Sittler, C., 1969. Le fossé Rhénan en Alsace: aspect structural et histoire géologique. Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique 11, 465-494.

Skelly, R.L., Bristow, C.S., Ethridge, F.G., 2003. Architecture of channel-belt deposits in an aggrading shallow sandbed braided river: the lower Niobrara River, northeast Nebraska. Sedimentary Geology 158, 249-270.

Starkel, L., Soja, R., Michczyn´ska, D.J., 2006. Past hydrological events reflected in Holocene history of Polish rivers. CATENA 66, 24-33.

Starkel, L., Gregory, K.J., Thornes, J.B., 1991. Temperate Palaeohydrology. Fluvial Processes in the Temperate Zone during the last 15000 years. J. Wiley and Sons, Chichester, 548 p.

Starkel, L., 2002. Change in the frequency of extreme events as the indicator of climatic change in the Holocene (in fluvial systems). Quaternary International 91, 25-32.

Stapert, D., Street, M., 1997. High resolution or optimum resolution? Spatial analysis of the Federmesser site at Andernach, Germany. World Archaeology 29 (2), 172-194.

Striedter, K., 1988. Le Rhin en Alsace du Nord au Subboréal. Genèse d'une terrasse fluviatile holocène et son importance pour la mise en valeur de la vallée. Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire 1, 5-10.

Stuiver, M., Braziunas, T.F., 1993. Sun, ocean, climatic and atmospheric CO2-an evaluation of causal and spectral relationship. The Holocene 3, 289-304.

Stuiver, M., Reimer, P.J., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, F.G., Van Der Plicht, J., Spurk, M., 1998. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. Radiocarbon 40, 1041-83.

Sturm, K., Glaser, R., Jacobeit, J., Deutsch, M., Brádzil, R., Pfister, C., 2001. Floods in Central Europe since AD 1500 and their Relation to the Atmospheric Circulation. PGM 148 (6), 18-27.

Suzuki, K., Toda, S., Kusunoki, K., Fujimitsu, Y., Mogi, T., Jomori, A., 2000. Case studies of electrical and electromagnetic methods applied to mapping active faults beneath the thick quaternary. Engineering Geology 56, 29-45.

Tabacchi, E., Lambs, L., Guilloy, H., Planty- Tabacchi, A-M., Muller, E., Décamps, H., 2000. Impacts of riparian vegetation on hydrological processes. Hydrological Processes 14, 2959-2976.

Tal, M., Gran, K., Murray, A.B., Paola, C., Hicks, D.M., 2003. Riparian vegetation control on channel characteristics in multi-thread rivers. Water Science and Application XX, XX-XX.

Tardy, Y., 1986. Le cycle de l'eau. Climat, paléoclimats et Géochimie globale. Le régime hydrologique. Masson, Paris, 338 p.

Theobald N., Ménillet F., Lougnon J., Bonnet C., Fluck P. (1978) Notice explicative de la carte géologique de la France à 1/ 50 000, Feuille Neuf-Brisach.

Théobald, N., 1948. Carte de la base des formations alluviales dans le sud du fossé rhénan. Mémoires du service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, Strasbourg, 9. 77 p.

Thorndycraft VR, Benito G. 2006a. Late Holocene fluvial chronology in Spain: the role of climatic variability and human impact. CATENA 66, 34-41.

Thorndycraft, V.R., Benito, G., 2006b. The Holocene fluvial chronology of Spain: evidence from a newly compiled radiocarbon database. Quaternary Science Reviews 25, 223-234.

Thorne, C.R., 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion. In: Hey, Bathurst and Thorne (Eds.), Gravel-bed rivers: fluvial processes, engineering and management, Wiley and Sons, Chichester, England, 227-271.

Thorne, C.R., Lewin, J., 1979. Bank processes, bed material movement and planform development in a meandering river. In: Rhodes and Williams, (Eds.), Adjustments of the Fluvial System, Kendall/Hunt Publishing Co, Dubuque, Iowa, 117-137.

Thorne, C.R., (Ed.), 1990. Vegetation and erosion. Chichester, Wiley.

Thorne, C.R., Russel, A.P.G., Alam, M.K., 1993. Planform pattern and channel evolution of the Bramaputra River, Bangladesh. In: Best et Bristow, (Eds.), Braided Rivers, Geological Society of London Special Publication 75, 257-276.

Tooth, S., Nanson, G.C., 2000. The role of vegetation in the formation of anabranching channels in an ephemeral river, Northern plains, arid central Australia. Hydrological Processes 14, 3099-3117.

Trémolières, M., Sanchez-Perez, J.-M., Schnitzler, A., Schitt, D., 1998. Impact of river management history on the community structure, species composition and nutrient status in the Rhine alluvial hardwood forest. Plant Ecology 135, 59-78.

Tricart, J., Bravard, J.-P., 1991. Le cours périalpin du Rhin, du Rhône et du Danube : aménagement fluvial et dérives de l'environnement. Annales de Géographie 561-562, 668-713.

Tulla, J.G., (von), 1825. Uber die rektifikation des Rheins, von seinem Austrii aus der Schweiz bis zu zeinem Eintritt in das Grossherzognum Hessen, Karlsruhe, 60p.

Tulla, J.G., (von), 1827. Sur la rectification du cours du Rhin, depuis son débouché de la Suisse jusqu'à son entrée dans le grand duché de Hesse-Darmstadt, Journal de la société des sciences, agriculture et arts de Strasbourg.

Ulbrich, U., Fink, A., 1995. The January 1995 Flood in Germany: Meteorological Versus Hydrological Causes, Physics and Chemistry of the Earth 20, 439-444.

Urban, E., Scheer, E., Scheer, F., 1984. Textes et Histoires pour Kunheim. Dans la plaine du Rhin, un village transplanté. Maisons Paysannes d'Alsace et Mairie de Kunheim 76 p.

Urz, R., Röttger, K., Thiemeyer, H., 2002. Von der Natur- zur Kulturlandschaft-Das mittlere Lahntal (Hessen) in vor- und frühgeschichtlicher Zeit. Germania 80, 269-293.

Vandenberghe, J., 2002. The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary. Quaternary International 91, 17-23.

Van Geel, B., Raspopov, O.M., Renssen, H., van der Plicht, J., Dergachev, V.A., Meijer, H.A.J., 1999. The role of solar forcing upon climate change. Quaternary Science Reviews 18, 331-38.

Vaquero, J.M., 2004. Solar signal in the number of floods recorded for the Tagus River Basin over the Last Millennium. Comment on 'Magnitude and Frequency of Flooding in the Tagus Basin (Central Spain) over the Last Millennium' by G. Benito et al. (2003). Climatic Change 66, 23-26.

Vogt, H., 1988. Le site de Strasbourg, Aux origines de l'Alsace, Les musées de la Ville de Strasbourg, 10-12.

Wessels, M., 1998. Natural environmental changes indicated by Late Glacial and Holocene sediments from Lake Constance, Germany. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 140, 421-432.

Walser, E., 1959. Le bassin du Rhin à l'amont de Bâle et l'influence des lacs sur le régime du fleuve. La Houille Blanche 2, 115-124.

Werner, L.G., 1934. Les divagations du Rhin dans le Haut-Rhin. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 1.

Wetzel, L., 1855. Recueil mémorable de Hugues Bois-de-Chesne. Chronique inédite du XVIIe siècle. Société d'Emulation de Montbéliard. 109-192. CM-1107.

Wetzel, L., 1859. Chroniques de J.-G. Perdrix, conseiller du comte George II de Montbéliard (1659-1689). Société d'Emulation de Montbéliard, 187-245. CM-1107.

Williams, P.F., Rust, B.R., 1969. The sedimentology of a braided river. Journal of Sedimentary Petrology 39, 649-679

Wolman, M.G., Miller, J.P., 1960. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. Journal of Geology 68, 54-74.

Wood, A.L., Simon, A., Downs, P.W., Thorne, C.R., 2001. Bank-toe processes in incised channels: the role of apparent cohesion in the entrainment of failed bank materials. Hydrological Processes 15, 39-61.

Wright, V.P., Marriot, S.B., 1993. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: the role of floodplain sediment storage. Sedimentary Geology 86, 203-210.

Zehner, M., 1998. Carte Archéologique de la Gaule. Le Haut-Rhin, 375 p.

Zolitschka, B., Behreb, K.-E., Schneiderc, J., 2003. Human and climatic impact on the environment as derived from colluvial, fluvial and lacustrine archives examples from the Bronze Age to the Migration period, Germany. Quaternary Science Reviews 22, 81-100.

TABLE DES MATIERES

RESUME 3
ABSTRACT 4
SOMMAIRE 9
INTRODUCTION 13
CHAPITRE 1 : Contexte géologique et géomorphologique du graben du Rhin, et hydrologie du Rhin 19
1. Géologie du graben du Rhin 21
2. Géomorphologie de l'Alsace 27
2.1. La région de la Hardt 27
2.2. Les Rieds 27
2.3. Les forêts alluviales 29
2.3.1. Le stade forestier pionnier 29
2.3.2. Le stade forestier intermédiaire 31
2.3.3. Le stade forestier terminal 32
2.3.4. La succession forestière du Rhin 32
3. Le Rhin 35
3.1. Le bassin-versant du Rhin 35
3.2. L'hydrologie du Rhin 37
3.3. Les crues 37
CHAPITRE 2 : Dynamique alluviale du Rhin au cours des périodes historiques recentes 39
1. Dynamique historique du paysage 43
1.1. Objectifs de l'étude des cartes anciennes 43
1.1.1. Les aménagements de la plaine du Rhin 45
1.1.2. L'impact des aménagements du Rhin sur la végétation riveraine 45
1.1.3. Le cadre de l'étude 47
1.2. Le choix de la zone d'étude 49
1.2.1. Les aménagements anthropiques 49
1.2.2. Le style en tresses et en anastomoses du Rhin 51
1.2.3. Les forêts naturelles rhénanes 53
1.2.4. Le choix des cartes 53
1.3. Résultats 55
1.3.1. L'état au 17ème siècle : approche qualitative 55
1.3.2. L'état au 18ème siècle : approche quantitative 57
1.3.2.1 Le matériel de l'étude quantitative 59
- Les fortifications 59
- Les villages et bâtiments isolés 61
- Les chemins et routes 61
- Les digues, les épis et les canaux 61
- Les zones cultivées 61
- Les forêts 62
- Les prairies humides barres non végétalisés 62
- Les barres non végétalisées 62
- Les chenaux actifs 62
1.3.2.2. Méthode de réalisation du S.I.G. 63
1.3.2.3. La qualité de l'information 63
1.3.2.4. Résultats 65
- Etat de la plaine du Rhin en 1689 65
- Etat de la plaine du Rhin en 1705 67

- De 1689 à 1705 ... 67
- Etat de la plaine du Rhin en 1715 ... 70
- De 1705 à 1715 ... 70
- Etat de la plaine du Rhin en 1767 ... 71
- Des années 1715 aux années 1767 ... 72

1.3.2.5. Les surfaces mesurées ... 72
1.3.2.6. L'évolution de l'indice de tressage ... 73
1.4. Discussion ... 79
1.4.1. Cinétique des changements ... 79
1.4.2. Les caractéristiques à long terme ... 79
1.4.3. Le rôle de la végétation ... 80
1.4.4. Le rôle du Climat ... 81
1.4.5. Le rôle de l'Homme ... 83
1.4.6. Bilan du jeu des facteurs ... 84
1.5. Conclusion ... 85
2. L'évolution de la fréquence des inondations du Rhin d'après les sources documentaires ... 87
2.1 Introduction ... 87
2.1.1. Les objectifs de l'étude ... 87
2.1.2. Les sources documentaires ... 89
2.1.3. Historique de la méthode ... 90
2.1.4. La documentation disponible ... 91
2.2. Résultats ... 92
2.2.1. Le codage des données d'inondations ... 92
2.2.2. Mode de description des résultats ... 93
2.2.3. Les variations de fréquence des inondations ... 94
2.2.3.1. Le bassin-versant du Rhin ... 94
- La Moselle ... 94
- La Meurthe ... 95
- L'Ill ... 95
- Le Rhin ... 97

2.2.3.2. Le bassin-versant du Rhône ... 98
- La Saône ... 98
- La Lizaine ... 98
- Le Doubs ... 98
- Le Rhône ... 99
- L'Isère ... 99
- La Durance ... 100

2.2.3.3. Le bassin-versant de la Loire ... 100
- Le Maine ... 100
- La Loire ... 100

2.2.3.4. Le bassin-versant de la Seine ... 102
- La Seine ... 102
- L'Yonne ... 103

2.2.3.5. Les tendances générales ... 103
2.3. Discussion ... 105
2.4. Conclusion ... 110
3. Les acquis de ce chapitre ... 111

CHAPITRE 3 : Le site d'Oedenburg....113
1. L'occupation connue du site 115
1.1. De la découverte à aujourd'hui 115
1.2. Les prospections pédestres 119
1.3 Le site en Alsace romaine 121
2. L'approche Géomorphologique 123
2.1. Objectifs de l'approche géomorphologique 123
2.2. Le paysage alluvial actuel 124
2.2.1 Les photos aériennes redressées 124
2.2.1.1 Objectifs de l'étude 124
2.2.1.2 Redressement et géoréférencement des photographies aériennes obliques 127
2.2.1.3. Observation des anomalies de croissance 129
➢ La zone A 131
✓ Observations 131
✓ Interprétation 131
➢ La zone B 133
✓ Observations 133
✓ Interprétation 133
➢ La zone C 134
✓ Observation 134
✓ Interprétation 134
2.2.2. La topographie du site d'Oedenburg 135
2.2.2.1 Objectif du relevé topographique en contexte archéologique alluvial 135
2.2.2.2 Méthode du relevé topographique 137
2.2.2.3 Le modèle numérique de terrain 139
➢ La zone géomorphologique A 139
➢ La zone géomorphologique B 139
➢ La zone géomorphologique C 143
2.3. La ville antique et son occupation dans le paysage alluvial 145
2.3.1. Les apports de la prospection magnétique à l'établissement du plan diachronique de la ville antique 145
2.3.1.1. Introduction 145
2.3.1.2. Observations et interprétations 147
➢ La zone géomorphologique A 147
➢ La zone géomorphologique B 149
➢ La zone géomorphologique C 151
2.3.1.3. Conclusion 152
2.3.2. Distribution spatiale du mobilier : le cas des monnaies romaines 153
2.3.2.1. Avant propos et résumé 153
2.3.2.2 Roman Rhine settlement dynamics evidenced by coin distribution in a fluvial environment (Oedenburg, Upper Rhine, France) 157
3. L'approche environnementale 169
3.1. Objectifs de l'approche environnementale 169
3.2. Impact du climat, de la forêt riveraine et de l'occupation humaine sur la dynamique alluviale du Rhin au cours de l'Holocène et notamment durant la periode antique 171
3.2.1. Introduction 171
3.2.2. Le paléochenal occidental 171
3.2.2.1. Présentation du paléochenal occidental 171
3.2.2.2. Les méthodes employées 172

- Principe et méthode du géoradar 172
- Méthode de relevé stratigraphique 173
- La micro granulométrie 174
- Le dosage de la matière organique 174
- La susceptibilité magnétique 174
- Les prélèvements archéobotaniques 175
- Les prélèvements radiocarbones 175

3.2.2.3. La géométrie des dépôts sédimentaires 175
- Le profil géophysique géoradar 175
- La coupe du paléochenal occidental : faciès et géométries 179
  - ✓ Phase 1/ La mise en place des galets et graviers 179
  - ✓ Phase 2/ L'incision de la terrasse weichsélienne 181
  - ✓ Phase 3/ Le premier comblement : les dépôts sablo argileux (faciès a) 181
  - ✓ Phase 4/ La seconde incision du chenal Tardiglaciaire 183
  - ✓ Phase 5/ Première phase de comblement du second chenal 183
  - ✓ Phase 5/ La deuxième phase du remplissage 184
    - Phase 5.1/ La mise en place de la sédimentation organique 185
    - Phase 5.3/ La reprise de la sédimentation organique 187
    - Phase 5.4/ L'enregistrement d'un événement hydrologique extrême 189
    - Phase 5.5/ La reprise d'une sédimentation organique fine 191
  - ✓ Phase 6/ La troisième phase du remplissage du paléochenal : les apports colluviaux 192
  - ✓ Phase 7/ La fin du remplissage du paléochenal 192
  - ✓ Phase 8/ L'exploitation agricole de la plaine du Rhin 192

3.2.2.4. Les résultats d'analyses archéobotaniques 193
- L'analyse des macro-restes végétaux 193
- Les résultats de palynologie 193
  - ✓ La colonne palynologique au repère 65 m 195
  - ✓ La colonne palynologique au repère 45 m 197
    - La zone pollinique locale ZPL1 197
    - La zone pollinique locale ZPL2 198
  - ✓ La colonne palynologique au repère 35m 199
    - Aspects généraux de la séquence pollinique à 35m 199
    - La zonation pollinique locale proposée 201
    - La Zone Pollinique Locale ZPL3 201
    - La Zone Pollinique Locale ZPL4 202
    - La zone pollinique locale ZPL5 203

3.2.2.5. Conclusion 204

3.2.3. Le paléochenal oriental et la zone des temples 207

3.2.3.1. Présentation 207

3.2.3.2. Les méthodes employées 207
- Principe et méthode de la tomographie électrique 207
- Les forages 213
- La micro granulométrie 213
- Les prélèvements palynologiques 214
- La fouille de la zone des temples 214

3.2.3.3 La géométrie des dépôts sédimentaires 215

- Le paléochenal oriental 215
  - Le profil électrique 1 du paléochenal oriental 215
  - Les forages réalisés le long du profil électrique 1 219
  - Le profil électrique 2 du paléochenal oriental 223
  - Les forages réalisés le long du profil électrique 2 225
- Le paléochenal ancien de la Zone A 229
  - Le profil électrique 3 du paléochenal ancien 229
  - Les forages réalisés le long du profil électrique 3 231
- Les paléochenaux de la zone des temples 235
  - Le profil électrique 4 à proximité de la zone des temples 235
  - La quantification de l'aménagement du paléochenal dans la zone des temples 237

3.3. Enregistrement stratigraphique anthropisé 239

3.3.1. Avant propos et résumé 239

3.3.2. Rhine floods deposits recorded on the Gallo-Roman site of Oedenburg (Haut-Rhin, France) 241

3.3.3. Milieux humides et aménagements anthropiques dans la plaine du rhin : le site romain d'Oedenburg (Haut-Rhin) 255

4 Les acquis de ce chapitre 272

CONCLUSION 273

BIBLIOGRAPHIE 281

TABLE DES MATIERES 299