



**HAL**  
open science

# Les formes agraires, reliques dans les paysages de l'Est de la France : les approches géoarchéologiques et géographiques au service de l'écologie historique

Benjamin Keller

## ► To cite this version:

Benjamin Keller. Les formes agraires, reliques dans les paysages de l'Est de la France : les approches géoarchéologiques et géographiques au service de l'écologie historique. Géographie. Université de Strasbourg, 2023. Français. NNT : 2023STRAH013 . tel-04757150

**HAL Id: tel-04757150**

**<https://theses.hal.science/tel-04757150v1>**

Submitted on 28 Oct 2024

**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 STRASBOURG

**ÉCOLE DOCTORALE n°413 Sciences de la Terre et de l'Environnement**  
**Laboratoire Image, Ville, Environnement UMR 7362**

## **THÈSE** présentée par : **Benjamin Keller**

soutenue le : **26 septembre 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : Géographie/Géoarchéologie

---

## **Les formes agraires, reliques dans les paysages de l'Est de la France**

Les approches géoarchéologiques et géographiques au service de l'écologie historique

---

**Directeur de thèse :**

**M. SCHWARTZ Dominique,** Professeur émérite, Université de Strasbourg

**Codirecteur de thèse :**

**M. ERTLEN Damien,** Maître de conférences (HDR), Université de Strasbourg

**Rapporteurs externes :**

**Mme. CARCAUD Nathalie** Professeure, L'institut Agro Rennes /Angers

**M. MARTY Pascal** Professeur, UAR 3129 CNRS - Maison Française d'Oxford

**Examineurs externes :**

**Mme. BAL Marie-Claude** Maître de conférences, Université de Limoges

**Mme. GARNIER Aline** Maître de conférences, Université de Paris Est-Créteil



*A mon père*



*« Certes, le paysage n'est pas affaire de spécialiste  
et encore moins de discipline scientifique constituée.  
Il n'est pas de « science du paysage » au sens large du terme.  
Il n'y en aura sans doute jamais. »*

Georges Bertrand, 1978



# Remerciements

---

Tout d'abord, je voudrais remercier les membres du jury Nathalie Carcaud, Pascal Marty, Marie-Claude Bal et Aline Garnier pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à l'examen de ce manuscrit. Un merci également à la région Grand Est pour avoir financé ma thèse pendant 3 ans.

Je voudrais, dans un premier temps, remercier mon directeur de thèse Dominique Schwartz pour m'avoir permis de faire des trous un peu partout en Alsace/Lorraine ! Sans lui, creuser dans des tas de pierre ne me serait jamais venu à l'esprit. Clairement merci ! Je voudrais le remercier de m'avoir permis de faire cette thèse, et de m'avoir accompagné sur le terrain et tout au long de ce travail. Pédologue hors pair (l'Arleston du sol même), j'ai pu enrichir mes connaissances en science du sol et en science vinicole, en toute modération. Je suis heureux d'avoir mis ma petite pierre à l'édifice de ses recherches.

Je voudrais remercier, bien entendu, mon codirecteur de thèse, Damien Ertlen, d'avoir réussi à me faire creuser des trous depuis mon master. Sans lui, je n'y serai pas arrivé. Je voudrais le remercier de m'avoir accompagné tout au long de cette thèse, et surtout pour le temps qu'il a donné pour sa rédaction. Un grand merci pour sa bienveillance et l'attention qu'il a accordée à mon travail, même lorsque le vert inondait mes posters et que mes figures avaient l'apparence de « Picsou magazine ». Le « petit Benjamin Keller » est bien grand grâce à lui.

Martine Trauttman, tu dois être tellement habituée à lire des remerciements dans toutes les thèses des doctorants que tu as aidés que tu ne dois plus t'en souvenir. En conséquence, je ne vais pas te remercier. Donc, je ne te remercierai pas pour toutes les analyses de sol que tu as réalisées. Je ne vais pas non plus te remercier pour ta sympathie et ta gentillesse à mon égard. À l'avenir, je te remercierai de ne plus me remercier lorsque je t'offre des macarons pour me faire pardonner des nombreuses bévues commises au laboratoire.

Un grand merci à Vincent Robin qui m'a formé en pédoanthracologie. Merci pour sa disponibilité et sa sympathie tout au long de cette thèse. Pierre-Alexis Herrault et Gilles Rixhon, merci à vous pour votre contribution indéniable à cette thèse. Merci pour votre aide, vos conseils, les parties de ping-pong (même si le niveau de Gilles laisse à désirer) et l'ensemble de votre œuvre personnel dans les bars et ailleurs. Merci aussi à Timothée Jautzy et Valentin Chardon pour leur présence en particulier en cette fin de thèse mais aussi leurs conseils, et les parties de ping-pong (encore). Vivement les sorties VTT ! Je remercie également Ferréol Salomon pour les échanges et conseils qu'il a pu me donner au détour d'un couloir.

Merci à tous les anciens doctorants avec qui j'ai passé de très beaux moments, Angela Osorio (et Simon), Caline Ly Keng (et Jens), Corentin Berger (et Mera), sans vous cette thèse n'aurait pas été la même.



Je remercie toutes les personnes qui ont pu m'aider sur le terrain ou au laboratoire. Fabio Cumetti, David Pinto, Quentin Poterek, Jean François Lopez, Manon Kohler, Jean Baptiste Ortlieb, Barbora Vyslouzilova, Ludek Sefrna, mon petit Louis Hubert, ma p'tite maman Christiane Keller et d'autres merci à vous ! Mais aussi à Cloé Dugrillon et Leah Holguin qui ont corrigé certaines des parties en anglais.

Un merci sincère à tous les collègues du laboratoire Image, Ville, Environnement, Estelle Baehrel, Grzegorz Skupinski, Kenji Fujiki, Romain Wenger, Clément Bressant, Cassandra Euzen, Coraline Fuchs, Claire Rambeau, Alain Clappier, Jean-Luc Ponche et d'autres.

Un merci à tous mes amis et mes potes bonhommiens qui pensent toujours que je travaille sur des cailloux et à Jean François Botinnelli pour l'ouverture de la Fosse sur le site GAR.

Je voudrais remercier mes quatre greffiers, Leïto, feu Bakounine, Anoukis et Bookchin pour leur aide sans commune mesure pour l'écriture régulière de ma thèse. Leur « pate » dans ma thèse est indéniable !

Un merci à mes sœurs Marie (Nath et Margot) et Salomé (et Jojo) ainsi qu'à ma mère pour leur soutien.

Pour finir, je voudrais remercier avec la plus grande tendresse ma Cécile qui m'a soutenu et écouté avec la plus grande bienveillance. Sans ta présence la fin de l'écriture de la thèse n'aurait pas été aussi douce.

# Résumé

---

L'apparition des premiers agriculteurs durant le Néolithique a été un tournant majeur dans l'anthropisation des milieux. Des systèmes de formes agraires ou former field système (FFS) sont encore présents dans les paysages actuels. Ces structures dessinent ces anciens parcellaires et renferment des archives pédo-sédimentaires qui peuvent nous renseigner sur les environnements passés et leurs dynamiques. Le « système agraire » tel que définit dans cette thèse est la manifestation (micro-)topographique d'un ensemble de processus d'exploitation des terres. Rarement isolé, chaque microrelief matérialise un ancien champ de culture. Ces formes agraires constituent un maillage parfois dense du paysage. Rideaux de culture, murgers et champs bombés possèdent une géométrie ou « agro-morphologie » propre résultant de différentes pratiques culturelles. Les murgers possèdent des formes très variées et caractéristiques de l'épierrement des champs pouvant sceller des paléosols. Les rideaux de culture localisés sur versants constituent un ensemble de ressauts parallèles résultant d'une accumulation par colluvionnement ou par labours répétitifs. L'invention de la charrue à versoir fixe est un facteur prépondérant de la forme des champs bombés. Ces reliques omniprésentes dans le paysage de l'est de la France sont conservées dans les espaces forestiers ou de prairie. Cette thèse s'articule autour de trois objectifs principaux : (i) identifier et inventorier les formes agraires dans l'est de la France ; (ii) dater les formes agraires, c'est-à-dire déterminer l'époque de la première mise en culture de la parcelle, mais aussi identifier les périodes et les dynamiques de changement d'occupation du sol par l'étude des archives pédo-sédimentaires ; (iii) déterminer les trajectoires temporelles des paysages associés

Une base de données inédite a pu être établie dans l'est de la France dans les départements pourvus de données LiDAR. Ainsi 1700 centroïdes ont été générés correspondants à un système de formes agraires. Cette base de données n'est pas exhaustive. Néanmoins, elle montre l'existence et l'ampleur spatiale de formes résultants de pratiques culturelles anciennes dans des paysages préservés de l'agriculture moderne, tels que le Pays de Bitche (57) et les Hautes Vosges (68).

L'application de la pédoanthracologie à l'étude des rideaux de culture a permis d'appréhender les trajectoires temporelles complexes de ces formes. L'analyse des charbons de bois réalisée sur six rideaux de cultures a permis de déterminer pour quatre d'entre eux une origine médiévale. Un seul rideau de culture possédait une origine moderne. Toutefois, sans la présence de paléosols, la datation précise de ces formes agraires à partir de l'analyse seule des charbons de bois reste complexe dans un profil de sol très homogène. L'application de l'appareil portable de luminescence stimulée optiquement (P-OSL) a démontré tout son intérêt dans la détermination des limites supérieur et inférieur de paléosols dans les champs bombés.

L'application de la base de données a permis d'explorer les anciens systèmes de champs dans les Hautes-Vosges, et leur distribution spatiale, révélant la pertinence de l'utilisation des formes agraires dans la caractérisation des forêts anciennes. Certaines de ces formes agraires sous forêt au 19<sup>e</sup> siècle ont pu être identifiées permettant de quantifier les forêts anciennes « perturbées » depuis la période médiévale. Ces découvertes ouvrent de nouvelles perspectives pour évaluer avec précision l'âge des écosystèmes forestiers, et révèlent également un schéma évolutif de changement d'utilisation des terres similaire à celui observé dans d'autres régions montagneuses européennes.

**Mots clefs** : Pratiques culturelles anciennes, ancien système de champs, rideaux de culture, champs bombés, murgers, trajectoire temporelle des paysages, archives pédo-sédimentaires, pédoanthracologie, géo-histoire, lecteur de luminescence portable (P-OSL).

# Abstract

---

The appearance of the first farmers during the Neolithic period was a major turning point in the anthropization of the environment. Former field systems (FFS) are still present in today's landscapes. These structures represent ancient land parcels, and contain soil and sedimentary archives that can tell us a great deal about past environments and their dynamics. FFS as defined in this thesis is the (micro-)topographical manifestation of a set of land use processes. Rarely isolated, each micro-relief represents an ancient cultivated field. These agrarian forms form a sometimes dense mesh in the landscape. Lynchet, stone walls and ridge & furrows have their own geometry or "agro-morphology" resulting from different farming practices. Stone walls have a wide variety of shapes, characteristic of the stonework of fields that can seal in palaeosols. Lynchet located on slopes constitute a set of parallel projections resulting from accumulation by colluvium or repetitive ploughing. The invention of the fixed heavy plough is a major factor in the shape of these ridge & furrows. These ubiquitous relics of the eastern French landscape are preserved in forest and grassland areas. This thesis has three main objectives: (i) to identify and inventory the FFS in eastern France; (ii) to date the FFS, i.e. to determine when the plot was first cultivated, but also to identify the periods and dynamics of land-use change through the study of pedo-sedimentary archives; (iii) to determine the temporal trajectories of the associated landscapes.

An unprecedented database has been established in eastern France in departments with LiDAR data. A total of 1700 centroids were generated, corresponding to a system of agrarian landforms. This database is not exhaustive. Nevertheless, it shows the existence and spatial extent of forms resulting from ancient farming practices in landscapes preserved from modern agriculture, such as the Pays de Bitche (57) and the Hautes Vosges (68).

The application of pedoanthracology to the study of lynchet has enabled us to understand the complex temporal trajectories of these forms. Charcoal analysis carried out on six lynchet enabled us to determine a medieval origin for four of them. Only one lynchet had a modern origin. However, without the presence of palaeosols, precise dating of these agrarian forms from charcoal analysis alone remains complex in a very homogeneous soil profile. The application of a portable luminescence reader (P-OSL) device has demonstrated its value in determining the upper and lower limits of paleosols in ridge & furrows.

Application of the database has enabled us to explore FFS in the Hautes-Vosges, and their spatial distribution, revealing the relevance of using agrarian forms in characterizing ancient forests. Some of these agrarian forms under forest in the 19<sup>th</sup> century have been identified, enabling us to quantify the old-growth forests "disturbed" since the medieval period. These findings open up new prospects for accurately assessing the age of forest ecosystems, and also reveal an evolutionary pattern of land-use change similar to that observed in other European mountain regions.

**Keywords:** Ancient cultivation practices, former field systems (FFS), lynchet, ridge & furrows, stone walls, temporal trajectory of landscapes, pedo-sedimentary archives, pedoanthracology, geo-history, portable luminescence reader (P-OSL).

# Table des matières

---

REMERCIEMENTS .....	5
RESUME .....	7
ABSTRACT.....	8
TABLE DES MATIERES .....	9
INTRODUCTION GENERALE .....	15
CHAPITRE 1 .....	19
L'ETUDE, L'ANALYSE ET LA DETECTION DES FORMES AGRAIRES ANCIENNES .....	19
<b>1.1. La mémoire des pratiques culturelles : l'étude des formes agraires de l'Est de la France.....</b>	<b>20</b>
1.1.1. Les formes agraires de l'Est de la France .....	20
1.1.2. Rideaux de culture (ou <i>lynchet</i> ) .....	22
1.1.2.1. Etymologie .....	22
1.1.2.2. Historiographie .....	22
1.1.2.3. Intérêt scientifique actuel.....	24
1.1.2.4. Âge des rideaux de culture .....	25
1.1.3. Champs bombés (ou <i>ridge and furrows</i> ) .....	25
1.1.3.1. Origine .....	25
1.1.3.2. Historiographie .....	25
1.1.3.3. Intérêt scientifique actuel.....	28
1.1.3.4. Âge des champs bombés .....	28
1.1.4. Murger (ou <i>stone walls</i> ) .....	28
1.1.4.1. Définition, origine et recherche scientifique .....	28
1.1.4.2. Formes agraires hybrides et murgers .....	30
1.1.4.3. Âge des murgers .....	30
1.1.4.4. Intérêt scientifique actuel.....	31
1.1.5. Intérêt de l'étude des formes agraires pour la compréhension des paysages actuels .....	31
1.1.5.1. Documenter les changements d'occupation du sol anciens.....	31
1.1.5.2. Influence des pratiques culturelles dans les paysages actuels .....	33
<b>1.2. Paléo-indicateurs des activités humaines : les archives pédo-sédimentaires .....</b>	<b>34</b>
1.2.1. Pédoanthracologie .....	35
1.2.1.1. Définition et origine .....	35
1.2.1.2. Intérêt, avantage et limite de la méthode .....	36
1.2.1.3. Défrichement et mise en culture, l'application de la pédoanthracologie dans des anciens champs .....	37
1.2.2. Spectroscopie proche infrarouge (SPIR) ou near-infrared spectroscopy (NIRS) .....	38
1.2.3. Lecteur de luminescence portable (P-OSL) .....	39
1.2.3.1. Principe de la datation par OSL.....	39
1.2.3.2. Principe et intérêt du P-OSL.....	39

<b>1.3.</b>	<b>Acquisition de la donnée : méthodologie, base de données et spatialisation des formes agraires.....</b>	<b>41</b>
1.3.1.	Formes agraires et LiDAR .....	41
1.3.2.	Système d'information géographique (SIG) appliqué aux formes agraires .....	41
1.3.3.	La base de données spatialisée des formes agraires .....	42
1.3.4.	Spatialisation des formes agraires .....	44
<b>1.4.</b>	<b>Conclusion du chapitre 1 .....</b>	<b>46</b>
 <b>CHAPITRE 2 .....</b>		<b>47</b>
 <b>EXPLORING THE PAST THROUGH LYNCHET LANDSCAPES IN THE VOSGES MOUNTAINS AND LORRAINE PLATEAU (FRANCE).....</b>		<b>47</b>
<b>2.1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>50</b>
<b>2.2.</b>	<b>Study Area .....</b>	<b>52</b>
2.2.1.	Vosges Mountains and Lorraine Plateau .....	52
2.2.2.	MBW and WBT (Lorraine Plateau) .....	54
2.2.3.	SAA, GAR, ALP et GOLF (Vosges Mountains).....	54
<b>2.3.</b>	<b>Methods .....</b>	<b>56</b>
2.3.1.	Geoarchaeological data.....	56
2.3.1.1.	Pedological analysis (Figure 10) .....	56
2.3.1.2.	Pedoanthracology .....	56
2.3.1.3.	Radiocarbon dating ( <sup>14</sup> C).....	57
2.3.1.4.	Near infrared spectroscopy .....	57
2.3.2.	Geo-historical data .....	58
<b>2.4.</b>	<b>Results.....</b>	<b>59</b>
2.4.1.	Pedological and pedoanthracological data .....	59
2.4.1.1.	Trench analysis.....	59
2.4.1.2.	Analysis of taxon and charcoal concentration in soil .....	61
2.4.2.	Charcoal dating (Figure 11) .....	62
2.4.2.1.	Dating and tree taxa .....	63
2.4.3.	Organic matter origin (NIRS) .....	63
2.4.4.	Geo-historical analysis.....	64
<b>2.5.</b>	<b>Discussion.....</b>	<b>65</b>
2.5.1.	Lynchet as an archive of past environment .....	65
2.5.2.	Lynchet medieval origin .....	66
2.5.2.1.	Vosges Mountains.....	66
2.5.2.2.	Lorraine Plateau .....	67
2.5.3.	Land use trajectories .....	68
2.5.3.1.	MBW site: Lorraine Plateau .....	68
2.5.3.2.	WBT site: Lorraine Plateau.....	70
2.5.3.3.	SAA site: Vosges Mountains.....	71
2.5.3.4.	GAR site: Vosges Mountains .....	72
2.5.3.5.	ALP and GOLF site: Vosges Mountains .....	74
<b>2.6.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>74</b>

CHAPITRE 3 .....	77
RIDGE AND FURROWS AS A LEGACY: A PEDO-SEDIMENTARY AND GEO-HISTORICAL ARCHIVE APPROACH .....	
	77
<b>3.1. Introduction.....</b>	<b>80</b>
<b>3.2. Study sites .....</b>	<b>82</b>
3.2.1. General presentation .....	82
3.2.2. Site description.....	85
<b>3.3. Methods.....</b>	<b>86</b>
3.3.1. Geoarchaeological methods.....	86
3.3.1.1. Pedological analysis .....	86
3.3.1.2. Pedoanthracology.....	86
3.3.1.3. Near infrared spectroscopy to monitor vegetation history .....	87
3.3.1.4. Sampling and analysis with the portable OSL reader (P-OSL).....	87
3.3.2. Geo-historical data .....	88
<b>3.4. Results.....</b>	<b>89</b>
3.4.1. Pedo-sedimentary data .....	89
3.4.1.1. Soil profile analysis.....	89
3.4.1.2. Charcoals samplings and dating.....	91
3.4.1.3. Organic matter origin (NIRS).....	91
3.4.2. P-OSL analysis .....	93
3.4.3. Geo-historical data .....	94
<b>3.5. Discussion.....</b>	<b>95</b>
3.5.1. Analysis of ridge soil morphology .....	95
3.5.2. Determining buried soils under ridges .....	95
3.5.3. Future dating strategy.....	97
3.5.4. Pedological and P-OSL signal interpretation in the furrows .....	98
3.5.5. Modern and contemporary history of ridge and furrows .....	98
3.5.5.1. BAT site .....	98
3.5.5.2. HIN site.....	99
3.5.5.3. GUB site .....	99
<b>3.6. Conclusion .....</b>	<b>101</b>
CHAPITRE 4 .....	103
SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF FOREST ECOSYSTEMS REVEALED BY THE LIDAR-BASED CHARACTERIZATION OF MEDIEVAL FIELD SYSTEMS (VOSGES MOUNTAINS, FRANCE) .....	
	103
<b>4.1. Introduction.....</b>	<b>106</b>
<b>4.2. Study area .....</b>	<b>108</b>
4.2.1. Physical characteristics of the Hautes-Vosges .....	108
4.2.2. Historical overview .....	110
4.2.3. Former field systems in the Hautes-Vosges .....	110
4.2.3.1. Ridge and furrow .....	111

4.2.3.2.	Terraced slopes: agricultural terraces and lynchets .....	112
4.2.3.3.	Stone walls .....	112
<b>4.3.</b>	<b>Material and methods .....</b>	<b>113</b>
4.3.1.	LiDAR data, processing, and digitizing of former field systems .....	113
4.3.2.	Ancient and current land-cover mapping .....	114
4.3.3.	Geospatial analysis .....	114
4.3.3.1.	Describing the topography of former field systems .....	114
4.3.3.2.	Reconstructing land-use and land-cover changes .....	114
<b>4.4.</b>	<b>Results .....</b>	<b>115</b>
4.4.1.	Spatial inventory of former field systems .....	115
4.4.2.	Former field system elevation, slope, and exposure .....	118
4.4.3.	Assessment of land-use and land-cover changes .....	119
4.4.3.1.	Evolution of the spatial density of former field systems within the catchments .....	119
4.4.3.2.	Dynamics of cultivated areas in the Hautes-Vosges .....	120
4.4.3.3.	Assessment of forests' lifespans .....	121
<b>4.5.</b>	<b>Discussion .....</b>	<b>121</b>
4.5.1.	On the importance of LiDAR data for mapping former field systems at large scales .....	121
4.5.2.	Spatial distribution of former field systems as a function of topography .....	122
4.5.3.	Land-use changes in the Hautes-Vosges over centuries reveal a classic pattern of landscape evolution in European mountain regions .....	123
4.5.4.	Implications of former field system mapping for understanding forest age, composition, and structure .....	124
<b>4.6.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>127</b>
<b>CHAPITRE 5 .....</b>		<b>129</b>
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>		<b>129</b>
<b>5.1.</b>	<b>Base de données spatialisée .....</b>	<b>130</b>
5.1.1.	L'apport de la base de données spatialisées à l'étude des formes agraires .....	130
5.1.2.	Quelle suite pour la base de données ? .....	131
5.1.2.1.	La détection de formes agraires à l'échelle du Grand Est .....	131
5.1.2.2.	Amélioration de la base de données .....	132
5.1.2.3.	Base de données et intérêts écologiques .....	133
5.1.2.4.	Une base de données à l'échelle européenne .....	133
<b>5.2.</b>	<b>Apports et limites de l'étude des formes agraires .....</b>	<b>134</b>
5.2.1.	L'analyse des charbons dans les rideaux de culture .....	134
5.2.2.	Le cas du site de WBT (Achen, 57) .....	135
5.2.2.1.	Dater le système agraire .....	135
5.2.2.2.	Intérêt d'un prélèvement pédoanthracologique sur l'ensemble du profil de sol de la tranchée... ..	136
5.2.3.	Apports de l'application du P-OSL sur les champs bombés .....	137
5.2.4.	Analyse croisée des données .....	138
5.2.4.1.	Entre la plaine d'Alsace et les Hautes-Vosges .....	138
5.2.5.	Les espaces de grandes cultures : les crêtes de labour et les terrasses .....	139
5.2.5.1.	Les crêtes de labour .....	139
5.2.5.2.	Les terrasses agricoles .....	139

5.2.6.	Systèmes de formes agraires complexes .....	140
<b>5.3.</b>	<b>De nouvelles perspectives pour l'étude des murgers .....</b>	<b>144</b>
5.3.1.	Datation des murgers, quelles méthodes appliquer ? .....	144
5.3.1.1.	Datation par nucléides cosmogéniques .....	144
5.3.1.2.	Datation par luminescence .....	145
5.3.1.3.	Datations des charbons de bois dans la commune du Bonhomme : apport pour l'histoire de la région .....	145
5.3.2.	Apports scientifiques de l'étude des murgers.....	148
<b>5.4.</b>	<b>Conclusion du chapitre 5 .....</b>	<b>149</b>
	<b>TABLE DES FIGURES.....</b>	<b>151</b>
	<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>155</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIES.....</b>	<b>157</b>
	<b>ANNEXES .....</b>	<b>175</b>





# Introduction générale

---

L'étude des paysages n'est pas récente, elle fut l'apanage des géographes et ce depuis l'émergence de la géographie classique dite vidalienne (Paul Vidal de La Blache, 1845-1918) entre la fin du 19<sup>e</sup> et le début du 20<sup>e</sup> siècle (Davodeau, 2009). L'approche « vidalienne » jette les bases de l'analyse des paysages mais « s'en tient souvent à l'apparence des choses et ses données hétéroclites laissent dans l'ombre les infrastructures et leurs fonctionnements [...] et bloque toute tentative de conceptualisation du paysage » (Bertrand, 1984). L'analyse des paysages « demande de prendre en compte à la fois des réalités immédiatement visibles, des objets, et les relations qu'ils entretiennent, des processus » (Marty et al., 2006).

Notion complexe, le paysage renvoie à de nombreuses définitions et interprétations (Baud et al., 2013 ; Gauché, 2015 ; Paquot, 2016), « c'est un objet géographique riche, polysémique, offrant des angles d'approche multiples » (Clément, 1994). Mal définie par la géographie classique, cette notion s'est retrouvée dans presque toutes les branches de la géographie à un point tel que certains géographes dans les années 70-80 condamnent son utilisation abusive (Baud et al., 2013). George Bertrand est probablement le plus incisif à ce sujet précisant que le paysage est « un terme désuet et imprécis, donc commode, que chacun utilise à sa guise, le plus souvent en y adjoignant un qualificatif de restriction qui en altère le sens (« paysage géomorphologique », « paysage végétal » etc.) (Bertrand et Tricart, 1968) et ajoutera quelques années plus tard que le paysage est un « maître mot faible et pervers plein de sens et de contresens tout en laxisme ou en fausse rigueur » (Bertrand, 1984).

Le terme paysage devenu confus, certains géographes comme V.B Sochava développent celui de « géosystème » (Beroutchachvili et Bertrand, 1978), que le biogéographe George Bertrand appliquera dans de nombreuses études de type géosystémique (Clément, 1994). Cette nouvelle approche dite systémique permet de définir le paysage comme un objet dynamique et complexe incluant l'action anthropique. Un renouveau dans l'analyse des paysages ! Pour George Bertrand et Jean Tricart (1968), la vision du paysage ou plutôt de celle du géosystème « n'est pas la simple addition d'éléments géographiques disparates. C'est, sur une certaine portion d'espace, le résultat de la combinaison dynamique, donc instable, d'éléments physiques, biologiques et anthropiques qui en réagissant dialectiquement les uns sur les autres font du paysage un ensemble unique et indissociable en perpétuelle évolution. ». Bien que globalisante, les études géosystémiques réalisées en France ou en Espagne semblent avoir certaines limites, notamment l'aspect subjectif qui n'est pas réellement prise en compte et la dimension historique (historicité du paysage) « trop souvent ignorée [...] Pourtant, la dimension historique des paysages dans les régions de civilisation agraire ancienne est un aspect incontournable » (Clément, 1994). D'autant plus que cette approche semble restreindre et limiter la possibilité de généraliser l'analyse à des échelles régionales ou à l'échelle d'un massif des phénomènes agraires qui sortent du « déterminisme naturel », en atteste la définition donnée par Pierre George et Fernand Verger (2013) qui le définit comme une « unité paysagère de taille inférieure à celle de la région naturelle, caractérisée par son homogénéité géomorphologique et bioclimatique et par sa dynamique naturelle ou anthropique ». La notion de paysage prenant en compte une dimension que le géosystème

n'inclut pas, George Bertrand la « réintègre » dans ce qu'il appelle le système GTP (Géosystème, Territoire et Paysage), qui « tente de prendre en compte le milieu géographique au sens large, à la fois physique et culturel » (Bertrand et Bertrand, 2014).

« Indiscutablement, la notion de paysage comporte des points faibles », néanmoins c'est un outil simple d'utilisation mais qui implique « un effort de rigueur dans la définition retenue » (Clément, 1994). Largement employé dans de nombreuses disciplines (Paquot, 2016), contribuant ainsi à sa dissonance sémantique, la sagesse voudrait que son utilisation soit abandonnée. Pourtant, dans cette cacophonie paysagère, le choix de la simplicité permet, au contraire, de gagner en clarté. Xavier Rochel (2016) fait le choix de ne pas « répéter un débat maintes fois synthétisé, [...] de donner une approche personnelle à la fois claire et ouverte, opératoire dans le domaine de l'étude ». Aborder son analyse nécessite de définir clairement et précisément celui dont il est question dans cette thèse.

Pour dire simplement les choses, l'analyse du paysage comporte une part subjective et une part objective (Girel, 2006 ; Marty et al., 2006) que Brossard et Wieber (1984) définissent respectivement comme un « spectacle perçu plus ou moins nettement par les divers groupes d'usagers » et comme le « signe d'un système de forces en action produisant des objets (d'origine abiotique, biotique ou construits par l'homme) ». Dans cette thèse, nous aborderons l'analyse du paysage de l'est de la France exclusivement par une approche objective, c'est-à-dire par une démarche basée sur la lecture et la compréhension du paysage par la détection d'objets (Marty et al., 2006) et plus précisément des formes agraires, des microreliefs, résultant de pratiques culturelles anciennes abandonnées, aujourd'hui dans leur grande majorité sous forêt ou sous prairie. La détection de ces objets anciens s'intègre pleinement dans ce que Chouquer et Favory (1981) appellent : l'archéologie du paysage. Ces formes agraires se retrouvent dans le paysage actuel et constituent « les résidus des strates anciennes de l'aménagement du territoire » (Chouquer et Favory, 1981). Il ne s'agit pas de repérer uniquement des objets ponctuels dénués de toute problématique, mais bien de détecter un ensemble de formes dans un paysage défini et de les cartographier. Le « système agraire » auquel nous faisons référence n'est pas un ensemble de processus d'exploitation des terres à des fins productivistes constitué d'un ensemble de modalités techniques (rotation triennale des cultures) mises en œuvre sur des parcelles cultivées à l'identique. Nous nous intéressons ici spécifiquement à la manifestation physique de ces pratiques, et non à leur modalité. Rarement isolées, chaque microrelief matérialise un ancien champ de culture. Ces formes agraires constituent un maillage parfois dense du paysage que nous qualifions de système d'anciens champs ou de système de formes agraires (ou former field system, Herrault et al., 2021 ; Keller et al., 2023). Chaque type de forme, rideau de culture, murger et champ bombé possède une géométrie ou une « agro-morphologie » (Langewitz et al., 2021) propre résultant de différentes pratiques culturelles. Les murgers possèdent des formes très variées et caractéristiques de l'épierrement des champs. Les rideaux de culture localisés sur versants constituent un ensemble de ressauts parallèles résultant d'une accumulation sédimentaire par colluvionnement ou par labours répétitifs en limite de parcelle. L'invention de la charrue à versoir fixe est un facteur prépondérant de la forme des champs bombés. Ces reliques dans le paysage de l'est de la France sont au cœur de ce travail qui lie le passé avec le présent. C'est une fenêtre ouverte sur l'occupation du sol à travers le temps et permet, par leur analyse, de définir des évolutions temporelles des paysages. L'intérêt premier est de déterminer l'histoire du ou

des paysages. Mettre en lumière les changements d'occupation du sol et les adaptations des sociétés rurales aux variations paléoclimatiques (Petit Âge Glaciaire ou Optimum médiéval) peut être une information non négligeable afin d'anticiper les limites et les possibilités de l'adaptation de nos sociétés au futur changement climatique. Mieux comprendre les trajectoires temporelles des paysages c'est aussi éclairer le présent avec l'aide du passé et déterminer les liens « entre les communautés végétales et animales et les populations humaines » (Girel, 2006). L'analyse des écosystèmes actuels est limitée par un chronocentrisme sur l'époque contemporaine en raison d'un manque de données des dynamiques paysagères antérieures au 18<sup>e</sup> siècle. L'étude des sols et la spatialisation des formes agraires permettent de donner une dimension spatio-temporelle plus ancienne des écosystèmes que celle proposée par l'étude seule des cartes historiques. Cette donnée au service de l'écologie historique permettra à l'avenir, nous l'espérons, de mieux comprendre la répartition des espèces floristiques et faunistiques des paysages.

Pour cela l'interdisciplinarité est indispensable. Cette thèse s'articule entre une approche géoarchéologique (étude de la forme agraire) à travers la pédologie et l'anthracologie principalement, et entre une approche géographique visant l'étendue de ces formes à plusieurs échelles spatiales à travers l'exploitation d'un système d'information géographique (SIG). D'autres disciplines satellites tels que l'histoire, gravitant autour des approches principales, viennent augmenter la robustesse des analyses géoarchéologiques et géographiques. Ces données nous permettent de multiplier les canaux d'informations qui peuvent être résumés par trois types. (i) Les archives pédo-sédimentaires sont les éléments conservés dans les sols comme les charbons de bois, la matière organique (MO) et les éléments minéraux. (ii) Les archives historiques regroupent à la fois les cartes anciennes, les photos aériennes, les données historiques et archéologiques (sous forme d'article scientifique). (iii) Les données géomatiques représentant l'ensemble des données relatives à la détection, la digitalisation (à l'aide des données LiDAR, light detection and ranging) et la définition des caractéristiques physiques (altitude, pente, exposition...) des formes agraires, mais aussi les données d'occupation du sol ancienne et récente (cartes historiques et photos aériennes).

L'utilisation de ces données est essentielle pour nous permettre d'atteindre les objectifs visés par cette thèse qui sont :

- Identifier un grand nombre de formes agraires dans l'est de la France et principalement sur le massif Vosgien.

- Dater les formes agraires, c'est-à-dire déterminer la première mise en culture de la parcelle mais aussi déterminer les périodes et la dynamique de changement d'occupation du sol. Pour cela les datations radiocarbone (<sup>14</sup>C) des charbons de bois sont indispensables ainsi que l'identification systématiques des espèces. Un objectif secondaire sera de montrer l'intérêt de l'utilisation de l'identification et de la datation des charbons de bois dans les rideaux de culture, ainsi que l'utilisation de l'appareil portable de luminescence stimulée optiquement (P-OSL) dans l'analyse des champs bombés. L'utilisation des archives historiques (cartes anciennes et données historiques et archéologiques) permettra de discuter des résultats obtenus.

- Déterminer les trajectoires temporelles d'un paysage à l'aide de ces nouvelles données couplées avec d'autres données historiques et géohistoriques.

Définir les trajectoires temporelles des paysages à partir de l'étude des formes agraires demande une approche multiscalaire. Nous commençons du ponctuel au général, c'est-à-dire par l'étude d'une forme d'un rideau de culture, d'un murger ou d'un champ bombé et élargissons au système de formes agraires (à l'échelle du versant) jusqu'à l'échelle d'un massif ou d'un paysage précis. Néanmoins, la généralisation à une grande échelle n'est pas toujours évidente. La notion de « paysage palimpseste », chère à la géographie, a induit une interprétation erronée, celui d'un paysage stratifié. Or, comme le rappelle Cédric Lavigne (2003) « les formes paysagères se transmettent et se transforment selon des processus et des temporalités, faites de potentialités et de décalages, qui leur sont propres et qui ont à voir avec les conditions socioéconomiques de production ». Par conséquent, c'est un objectif complexe que d'essayer de définir les différentes périodes d'anthropisation de ces paysages.

Afin de répondre à ces objectifs cette thèse s'articulera en 5 chapitres. Le premier chapitre présente un état de l'art des formes agraires (rideaux de culture, pierriers et champs bombés), un bref état de l'art des méthodes utilisées dans cette thèse et la méthodologie utilisée pour réaliser une base de données sur les formes agraires. Le chapitre 2 sera consacré à l'étude des rideaux de culture par l'utilisation des archives pédologiques dans le massif Vosgien et sur le plateau Lorrain (soumis à Geoarchaeology). Le chapitre 3 sera consacré à l'étude de champs bombés et l'utilisation du P-OSL dans le fossé Rhéna (68 et 67) et dans le Pays de Bitche (57) (en vue d'une soumission dans The Holocene). Le chapitre 4 sera consacré à une étude globale de toutes les formes agraires présentées dans cette thèse dans les Hautes Vosges (68) et la trajectoire temporelle des paysages associés (publié dans Anthropocene ; Keller et al. 2023). Le chapitre 5 se concentrera sur les apports et les perspectives de cette thèse.

# Chapitre 1

---

## **L'étude, l'analyse et la détection des formes agraires anciennes**

Ce chapitre se concentre sur l'étude des formes agraires anciennes dans l'est de la France, en particulier dans les départements de la Moselle, du Bas-Rhin, et du Haut-Rhin. Deux grands types de paysages peuvent être identifiés : les paysages de grande culture du Fossé Rhénan et des plateaux lorrains, et les paysages protégés de l'agriculture intensive, localisés dans le massif vosgien et à l'état fragmentaire dans les zones de grande culture. Dans ces deux paysages, il peut se retrouver des systèmes de champs anciens, surtout dans les paysages « protégés ». Les rideaux de culture, les champs bombés et les murgers se situent dans ces paysages et possèdent un intérêt d'autant plus important. Les mutations des systèmes de production agricole ont entraîné une redistribution des terres entre agriculture, forêt et pâturage. La surface forestière française a presque doublé entre le milieu du 19<sup>e</sup> siècle et la fin du 20<sup>e</sup> siècle, tandis que les prairies ou milieux ouverts ont diminué en France depuis le milieu du 20<sup>e</sup> siècle, mais reste importante même dans les départements ciblés. Les anciens champs cultivés se retrouvent fréquemment sous prairie ou sous forêt, pouvant influencer la biodiversité. L'analyse des archives pédo-sédimentaires piégées dans ces formes est nécessaire pour retracer ces changements. Les études réalisées en Alsace et en Lorraine ont montré que de nombreuses formes agraires étaient préservées sous prairie ou forêt. En conséquence, une base de données spatialisée a été constituée pour recueillir et gérer ces données, en utilisant des logiciels tels que PostgreSQL, PostGIS et QGIS. La base de données comporte différentes tables pour caractériser les formes agraires. Jusqu'à présent, environ 1700 systèmes de formes agraires ont été recensés.

# 1.1. La mémoire des pratiques culturelles : l'étude des formes agraires de l'Est de la France

## 1.1.1. Les formes agraires de l'Est de la France

Les paysages actuels ont été marqués dans leur vaste majorité par les activités agraires anciennes (Williams, 2000). Dans les départements de la Meurthe et Moselle (54), de la Moselle (57), du Bas-Rhin (67), du Haut-Rhin (68) et des Vosges (88), ces activités ont laissé un héritage conséquent, matérialisé par les formes agraires. Ces paysages peuvent être multiples, en fonction de leur contexte historique, géographique, géologique, écologique, socio-économique etc. Néanmoins, dans notre secteur d'étude, il est possible de les regrouper en deux grandes catégories paysagères par leur occupation du sol actuel : (i) Dans les paysages de grande culture du Fossé Rhénan et des plateaux lorrains, malgré les grands remembrements des années 70 et l'arasement d'une partie significative de ces reliques par les pratiques intensives (Flatrès et Flatrès, 1997), des formes agraires anciennes sont encore détectables. Les crêtes de labour ou *Ackerberg* (Juillard, 1953 ; Callot, 1977), et sur prairie et sous forêt des champs bombés (Ewald, 1969 ; Callot, 1977 ; Sittler & Hauger, 2007 ; Sittler et al., 2015), parfois des murgers dans les zones de terrasses viticoles (Figure 1a) ; (ii) Les paysages préservés des pratiques agricoles intensives. Sur les sommets et les versants des plateaux, des collines ou des zones montagneuses de nombreuses formes héritées se retrouvent sous forêt ou sous prairie tel que des

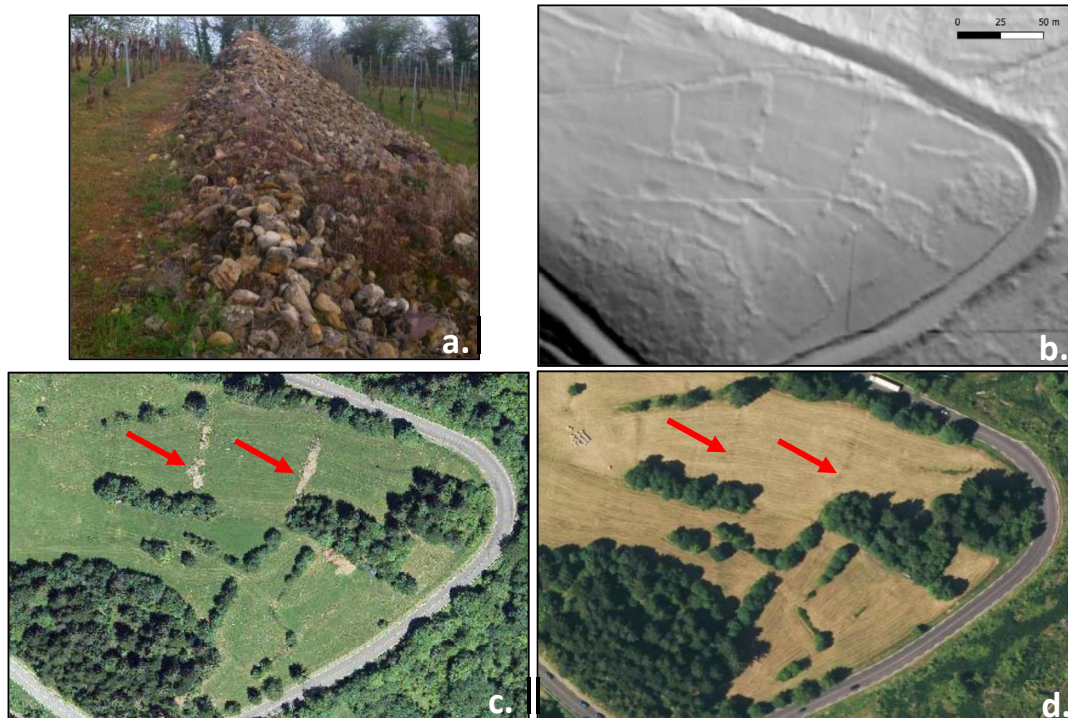


Figure 1 : Photo d'un murger situé dans le vignoble (a) de Sigolsheim (68). Modèle numérique de terrain (MNT) du système de murgers et de rideaux de culture (b) au Bonhomme (68) ; Photos aériennes d'un arasement de murger sur prairie dans la commune du Bonhomme (68) ; murger en place en 2015 (c) ; murger arrasé en 2018 (d). Source : géoportail.fr

rideaux de cultures, des terrasses et des murgers (Castellani, 1998 ; Schwartz et al., 2003, 2012 ; Georges-Leroy et al., 2007a, 2007b, 2009, 2012 ; Froehlicher, 2016 ; Georges-Leroy, 2020 ; Schwartz, 2018 ; Schwartz et al., 2019, 2020 ; Keller et al., 2023) et dans certains cas des champs bombés (Blanchemanche, 1990 ; Kraemer et Moulis, 2007).

Ces deux paysages regroupent un panel de formes agraires qui résultent des potentialités de l'environnement, de l'innovation des techniques de culture et du pragmatisme des populations qui se sont établies (Tableau 1). Les crêtes de labour ainsi que les terrasses ne sont pas étudiées dans ce travail de thèse et pour plusieurs raisons. Outre le fait que nous ne pouvions nous intéresser à toutes les formes agraires, par manque de temps et de moyen financier. Les terrasses ne résultent pas d'une accumulation terrigène continue dans le temps mais résultent le plus souvent d'une ou des phases de construction/destruction (cf. partie 5.2.5.2). Les hiatus ne permettent pas une reconstitution paléoenvironnementale continue. Les crêtes de labour se situent en plaine Rhénane dont le recouvrement du LiDAR n'est pas complet. *A contrario*, les Hautes Vosges bénéficient d'une couverture totale. Nous avons, par conséquent, déployé plus d'effort sur ce secteur. Les formes retenues sont, dans leur grande majorité, d'origine médiévale donnant une certaine unité de temps à notre étude. L'origine des terrasses et des crêtes de labour est bien moins évidente. Néanmoins, la partie 5.2.5 leur est consacrée dans le chapitre 5, car elles sont toutes aussi importantes pour saisir l'histoire des paysages dans l'est de la France. Les rideaux de culture et les champs bombés feront l'objet d'une attention particulière dans cette thèse puisque le chapitre 2 et 3 (p 47 et p 77) leur est consacré, respectivement. Les murgers sont brièvement nommés dans le chapitre 2 et 4 (p 47 et p 103) en raison de leur présence, et même souvent de leur superposition avec les rideaux de culture. Néanmoins, les quelques résultats n'ont pu faire l'objet d'un chapitre entier, mais sont brièvement présentés dans le chapitre 5 (cf. partie 5.3). Ces 3 formes se situent dans l'écrasante majorité des cas dans les paysages « protégés » nous permettant de dégager des trajectoires temporelles des paysages (forêt et prairie).

Dans ce chapitre nous réaliserons un état de l'art de chaque type de forme agraire énoncé précédemment ainsi que l'intérêt d'étudier des formes agraires dans le paysage et leur influence sur les paysages actuels, puis nous ferons un bref état de l'art des méthodes utilisées pour analyser les archives pédo-sédimentaires prélevées dans les formes agraires, avant de terminer sur la méthode utilisée pour l'acquisition des données spatiales des reliques agraires sur un large territoire, et la présentation d'une carte synthétique.



Tableau 1 : Type de forme agraire étudié ou non dans cette thèse et leur présence ou non dans les paysages de grande culture ou dans les paysages “protégés” (forêt ou prairie).

	Champs bombés	Rideaux de culture	Murgers	Terrasses	Crêtes de labour
<b>Paysages de grande culture</b>	Présents (Étudiés)	Rares (Non étudiés)	Rares (Non étudiés)	Rares (Non étudiées)	Présentes (Non étudiées)
<b>Paysages “protégés”</b>	Présents (Étudiés)	Présents (Étudiés)	Présents (Étudiés)	Présentes (Non étudiées)	Absentes (Non étudiées)

## 1.1.2. Rideaux de culture (ou *lynchet*)

### 1.1.2.1. Etymologie

Selon Aufrère (1929) le terme de rideaux apparaît en France aux alentours du 19<sup>e</sup> siècle et correspond dans notre ancienne langue au « diminutif ridel, devenu rideau par vocalisation, [il] a le sens de « froncement, repli » ; il sert à désigner une petite ride, un pli de terrain ». L'origine étymologique du mot définit une forme topographique, aucune relation n'est faite avec l'action anthropique en concomitance avec les phénomènes érosifs. Le sens évolue en 1929 et désigne « un talus fait par l'homme entre la route et les terres ou entre deux héritages voisins » (Aufrère, 1929). En Angleterre c'est le terme *lynchet* qui lui est associé qui est un dérivé de l'Anglo-Saxon du mot *hlinc* utilisé pour désigner un talus ou une crête, souvent un élément naturel, avec la connotation secondaire d'une marque de frontière (Wood, 1961). La version anglaise ou française possède une définition assez similaire et elles ont tous deux une origine ancienne.

### 1.1.2.2. Historiographie

L'intérêt pour ces formes agraires débute entre la fin du 19<sup>e</sup> siècle et le début 20<sup>e</sup> siècle (Lasne, 1892 ; Gosselet, 1906). À partir de cette période, la première question qui semble animer les « spécialistes » est la question de leur origine morphologique, pour certains, ils sont une résultante de caractéristiques géologiques (rejet de faille ou lié à des phénomènes de dissolution karstique, Lasne, 1892 ; Gosselet, 1906 ; Evrard, 1951 ; Bracq et Delay, 1997), théorie mise à mal par la découverte de trace de labour à la base du rideau (Wood, 1961 ; Nyssen et al., 2000); pour d'autres elles résultent d'un terrassement délibéré (Raistrick et Chapman, 1929 ; Fénelon, 1956), théorie largement réfutée actuellement en raison de l'ouverture de nombreuses fosses et tranchées pédologiques montrant une accumulation d'éléments terrigènes dans le talus (Ford et al., 1988 ; Bernard-Allée et Valadas, 1992 ; Sillar et al., 2008 ; Nyssen et al., 2014 ; Froehlicher, 2016 ; Nielsen et Dalsgaard, 2017 ; Schwartz et al., 2020) et ne résultant pas de l'excavation volontaire de la base du rideau (ou *lynchet*). Ces deux notions sont très largement utilisées dans la littérature scientifique. Néanmoins, d'autres termes peuvent

être employés tel que banquette de culture pour désigner des rideaux (Bernard-Allée et Valadas, 1992). Dans la littérature anglophone l'utilisation du terme *terrace* (Stolz et al., 2012 ; Houfková et al., 2015 ; Larsen et al., 2016) ou *ploughed-on terrace* (Patro et al., 2008) utilisé à défaut de *lynchet*, rendant plus compliqué la recherche de référence dans le domaine. Cette confusion ou omission peut-être due à l'ambivalence des processus de formation qui peut exister entre une terrasse et un rideau, et probablement à la définition du rideau ou de *lynchet* manquant peut être de précision.

George et Verger (2013) définissent le rideau comme un « ressaut de terrain à l'aval d'un champ : la limite entre deux parcelles devient un talus par accumulation de terre labourée au-dessus et descente de celle-ci au-dessous ». Même si cette définition explique la création du ressaut de terre par les phénomènes de transfert de terre labourée, celle-ci ne précise aucunement l'érosion résultant du ruissellement. Cette accumulation progressive (colluvions) est pourtant une des clefs d'identification du rideau. Bernard-Allée et Valadas (1992) définissent les rideaux comme « des microformes situées à l'aval des parcelles de culture. Elles se matérialisent dans le paysage par des talus [...] qui accidentent les versants en grandes marches d'escalier [...] Ces microformes sont la conséquence indirecte de la mise en culture des versants et de la dénudation des sols par l'homme. Elles résultent d'une lente descente des matériaux sous l'action de processus naturels (tel que le ruissellement diffus) et de leur accumulation progressive en bas de parcelle. Les banquettes commencent à se former dès lors que les limites des parcelles deviennent fixes et que l'accumulation des sédiments se fait au même endroit pendant plusieurs décennies voire plusieurs siècles : sur une tourbière enherbée, derrière une haie. » Cette définition donne à la fois la dimension paysagère, topographique, érosive, chronologique et agraire des rideaux, mais elle essentialise la dimension érosive au ruissellement. Or, comme l'ont démontré Nyssen et al. (2010 et 2014) cette dimension comporte aussi celle de l'érosion par le labour qui est un facteur important dans l'exhaussement du profil de sol. Néanmoins, cette dimension n'est pas suffisante puisque Turner et al. (2021) montrent que des terrasses peuvent se former par accumulation terrigène derrière un mur. Dans ce cas, une dernière dimension doit également être prise en compte, la prédominance du facteur « involontaire » proposé par Froehlicher (2016), Schwartz et al. (2020) et Keller et al. (2023). Ce terme pose une certaine ambiguïté. En effet, dans le cas du muret appareillé ou du murger posé en limite de parcelle, l'action « volontaire » de limiter l'érosion est indiscutable, mais c'est probablement aussi le cas pour la mise en place d'une haie ou d'une fascine ; même si les haies peuvent avoir d'autres fonctions (matérialisation de limite de parcelle, empêcher le bétail d'entrer ou sortir, barrière naturelle militaire etc.). Il est vrai que l'intervention « volontaire » humaine s'arrête à la construction du mur, et que l'accumulation terrigène contre le mur ou le murger et ainsi la création du talus reste un processus majoritairement « involontaire ». Mais pourquoi ne pas simplifier le facteur dominant du rideau de culture à l'accumulation progressive (par ruissellement et labour) de matériaux en limite de parcelle derrière une haie, un mur, un murger, une fascine, etc. Cette définition s'opposerait donc à une construction rapide dans le temps et par des travaux d'excavation importants comme une terrasse agricole. Ceci permettrait d'éviter l'utilisation de terrasse (ou terrasse/rideau), dans le cas d'un rideau avec un mur, d'ailleurs Vervust et al. (2020) utilisent le terme *stone-faced lynchets* en présence d'un « mur ». Si ce dernier avait été retiré bien avant l'analyse de la forme agraire (par arasement ou par récupération des pierres pour du bâti par exemple), le doute ne se

serait pas posé, la forme aurait été définie comme un rideau. Nous avons pu observer dans la commune d'Achen (57) un rideau possédant un reliquat de muret appareillé (Figure 2), a-t-il été monté avant la formation du rideau ? Ou après ? Nous ne le savons pas, toujours est-il qu'il s'agit bien d'un talus formé par accumulation de terre.



Figure 2 : Rideau de culture avec un ressaut de ~2 m (a) présentant un petit muret appareillé en son milieu (b) dans la commune d'Achen (57), situé dans le Pays de Bitche.

### 1.1.2.3. Intérêt scientifique actuel

La vitesse d'accumulation des colluvions dans le rideau est peut-être l'un des facteurs qui a relancé, selon Brown et al. (2020), l'intérêt pour l'étude des rideaux ces 20 dernières années. La vitesse et la hauteur de l'exhaussement du profil de sol selon Froehlicher (2016) sont conditionnées par de nombreux facteurs tels que **le climat** (pluviométrie), **l'érodibilité du sol** (stabilité structurale), **la pratique culturale** (techniques de labour mobilisation plus importante ou non du matériel), **le degré de pente** (influence l'énergie du ruissellement), **la distance** (laissée entre chaque parcelle de culture), **le type de culture**, **le temps** (durée d'existence de la parcelle), **l'épaisseur du sol** (de départ) etc. Cette caractéristique permet au chercheur d'estimer des taux d'érosion. L'étude réalisée par Froehlicher (2016) a permis d'estimer des taux d'érosion minima à mi-versant de  $0.45 \text{ kg/m}^2/\text{an}$ , ce qui représente les pertes moyennes actuelles en terre de l'agriculture moderne. Nyssen et al. (2010) en Ethiopie ont montré des taux d'érosion générés par le labour de 11 à  $91 \text{ kg/m}^2/\text{an}$ . L'estimation de l'érosion par le labour et par le ruissellement et l'accumulation dans le rideau permet aussi d'estimer l'âge de certains rideaux de culture (Nyssen et al., 2014). Dans le domaine de l'écologie et de l'intérêt des « services écosystémiques » les rideaux de culture sont aussi étudiés en raison du stockage du carbone (Walter

et al., 2003 ; Follain et al., 2007 ; Zádorová et al., 2018). Le dernier intérêt important, actuellement, est l'apport pour l'histoire des paysages agraires et pour la compréhension des paysages actuels.

#### 1.1.2.4. Âge des rideaux de culture

L'âge de ces structures peut s'étaler sur de longues périodes et, à l'instar des terrasses, à travers des échelles séculaires voire millénaires. Certaines peuvent dater de la fin de l'Âge de Bronze, de l'époque romaine, mais aussi du Moyen Âge et se retrouvent dans quasiment toute l'Europe (cf. partie 2.1).

### 1.1.3. Champs bombés (ou *ridge and furrows*)

#### 1.1.3.1. Origine

Les premières définition et explication de la forme en France apparaissent semble-t-il au 19<sup>e</sup> siècle dans le célèbre *Principes raisonnés d'agriculture* de Albrecht Daniel Thaër (1814), comme étant une « forme de planches ou billons de champs légèrement bombés ; on leur a donné cette forme, soit avec la charrue, soit avec une bêche, lorsqu'on a établi la prairie », un long paragraphe est écrit par la suite sur l'intérêt de ces formes pour l'écoulement des eaux. Albrecht Daniel Thaër pense qu'elle résulte de la mise en place de prairies, ce qui semble discutable, même si Kerridge (1951) indique que cette même pratique a été « observée » dans le Derbyshire et en d'autres endroits en Angleterre. D'ailleurs, en Angleterre, il semble plus compliqué de donner une référence ancienne donnant une définition aussi complète, néanmoins, le terme *ridge and furrows* semble déjà utilisé au début du 19<sup>e</sup> siècle (Vancouver, 1810).

#### 1.1.3.2. Historiographie

Les champs bombés sont, comme leur nom l'indique, des parcelles ou un système de parcelles présentant un billon, bombement ou une crête (*ridge*) séparée par un sillon (*furrow*), une raie ou creux/creusement. Entre deux sillons, se trouve un billon (*ridge and furrows*). Les champs bombés sont donc « une succession de crêtes et de creux [...] dont la trame permet de reconstituer l'anatomie de parcelles anciens. » (Sittler et Hauger, 2007). Si l'on compare les études de Dion (1983), Blaising (2010) et Langewitz et al. (2021), la taille des parcelles peut varier de 6 à 25 m de large, et de 41 à 760 m de long. L'amplitude verticale entre les sillons et les billons varie de 26 à 120 cm. Selon Kerridge (1951) cette grande variabilité des largeurs peut s'expliquer en partie par la nature des sols, les conditions climatiques et la nature des outils agricoles. La forme en coupe des champs bombés peut elle aussi être très variée (Langewitz et al., 2021), que certains ont essayé de classer par type afin de les dater, pensant que chaque forme avait une période précise (Upex, 2004). Malgré une très grande hétérogénéité des systèmes de champs bombés, de nombreuses études ont permis de mieux définir

l'origine de ce bombement. Contrairement à la France, l'Angleterre semble avoir une longue tradition de recherche, en témoigne les débats et controverses autour des travaux de Kerridge (1951 et 1955).

L'étude de ces formes agraires semble commencer en Angleterre dès le milieu du 20<sup>e</sup> siècle et s'intéresse à leur formation, leurs utilisations et leurs fonctions (Orwin, 1938 ; Beresford, 1948 ; Kerridge, 1951, 1955 ; Eyre, 1955). En France, les études sont très disparates chronologiquement, mais elle commence timidement après le milieu du 20<sup>e</sup> siècle (Ewald, 1969 ; Callot, 1977 ; Dion, 1983 ; Blanchemanche, 1990). L'origine de leur formation en bombement fait débat chez nos amis anglais et deux possibilités sont avancées. (i) La volonté de surélever la partie centrale afin de drainer le sol en utilisant la charrue (Kerridge, 1951), (ii) le résultat « naturel » sans volonté particulière de l'utilisation de la charrue (Beresford, 1948). La nuance est faible, mais les deux hypothèses s'accordent sur un point, l'utilisation de la charrue à versoir fixe détermine l'exhaussement du profil de sol. Certains auteurs rappellent, néanmoins, que la bêche dans de rares cas pouvait former certains champs bombés (Dion, 1983 ; Blanchemanche, 1990 ; Langewitz et al., 2021). Actuellement, nombre d'études ont montré que l'invention de la charrue à versoir fixe et conséquemment le labour en ados sont les deux facteurs déterminants dans la généralisation de la forme bombée des champs (Ewald, 1969 ; Dion, 1983 ; Sittler et Hauger, 2007 ; Blaising, 2010 ; Sittler et al., 2015 ; Langewitz et al., 2020, 2021), dont certains estiment sa généralisation en Europe entre le 17<sup>e</sup> et le 18<sup>e</sup> siècle (Dion, 1983). En réalité, sa diffusion est plutôt située aux alentours de 1000 AD (Kraemer et Moulis, 2007 ; Andersen et al., 2016). L'expression de labour en ados vient du fait que « le laboureur adossait les *raies* les unes contre les autres en faisant le tour du champ » (Blaising, 2010). En effet, cette technique consistait à labourer en commençant par le milieu du nouveau champ (billon) situé entre deux limites de parcelles (sillons), puis arrivé en bout de parcelle à tourner autour du premier labour, et ainsi de suite du centre vers la périphérie de la parcelle. Ceci favorise l'accumulation de terre au centre de la parcelle et exhausse le profil de sol au fil des années (Figure 3, Dion, 1983 ; Blaising, 2010). Selon Ewald (1969), la fonction de drainage n'est valable que dans certains cas et ne représente pas la majorité. Tout dépend de la situation géographique comme le montre Dion (1983) dans la plaine de la Lyse. Kerridge précise déjà en 1951 que l'apparition de la charrue à versoir fixe à la place de l'araire a permis de cultiver des terres argileuses (lourdes) normalement délaissées en raison de la difficulté de labourer et du risque d'engorgement régulier de ces terres. En effet, le labour dit en « ados » présente quelques avantages dont (i) le rehaussement du champ permettant ainsi de limiter l'excès d'eau dans le sol (Dion, 1983 ; Kraemer et Moulis, 2007 ; Blaising, 2011 ; Andersen et al., 2016 ; Langewitz et al., 2021 ; Hirsch et al., 2023), (ii) la possibilité de cultiver sur des terres lourdes ou argileuses (Blaising, 2010) dont l'utilisation permet de labourer de manière plus profonde limitant la présence d'adventice et d'améliorer la fertilité du sol (Andersen et al., 2016), (iii) la fixation des limites des champs représentées par les sillons (Ewald, 1969 ; Blanchemanche, 1990 ; Langewitz et al., 2021) et (iv) la limitation de l'érosion lorsque le champ était labouré (de travers ou horizontalement) en pente (Blanchemanche, 1990). Pour cette dernière raison, par ailleurs, certains champs bombés peuvent être confondus avec des rideaux de culture (Brown et al., 2020). La fixation des limites de champs, selon Ewald 1969, pourrait s'être maintenue dans le temps permettant de reconstituer des finages anciens. Cette forme agraire possède bien d'autres avantages qui sont exploités et explorés dans des études plus récentes.

## Zur Entstehung der Wölbäcker

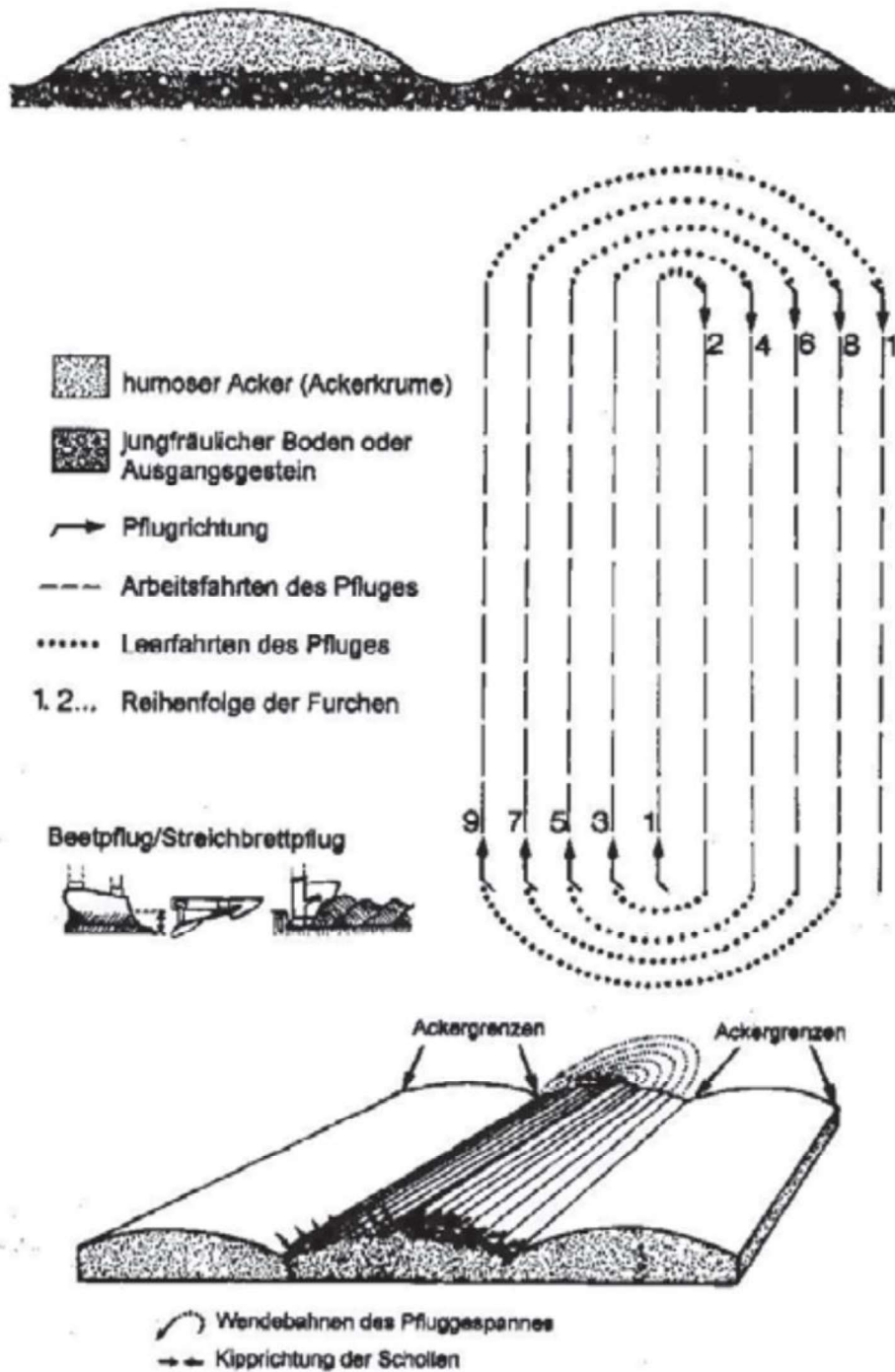


Figure 3 : Schéma explicatif de la genèse de champs bombés avec une charrue à versoir fixe. Humoser acker = champs humifère, jungfräulicher boden = sol vierge, pflugrichtung = sens de la charrue, arbeitsfahrten des Pfluges = les trajets de travail de la charrue, leerfahrten des Pfluges= les déplacements à vide de la charrue, reihenfolge der Furchen = ordre des sillons (Hauger et al. 2001 in Sittler et al., 2015).

### 1.1.3.3. Intérêt scientifique actuel

L'intérêt scientifique pour cette forme agraire semble s'être accéléré avec notamment l'essor du LiDAR dans le domaine de la prospection archéologique. Outre le fait qu'il a permis de calculer et de déterminer des caractéristiques physiques plus rapidement qu'aucune autre étude de terrain (Sittler et Hauger, 2007), cet outil a permis de détecter et de spatialiser ces champs sur de vastes étendues, et surtout dans des espaces forestiers, parfois anciens où même un œil aguerri ne peut les percevoir. Ce regain scientifique doit aussi être relié au développement de l'écologie historique britannique dans les années 80 dont une attention particulière est donnée aux ressources forestières en Europe en raison de l'influence à long terme de l'histoire de l'utilisation des terres sur les caractéristiques édaphiques (Girel, 2006 ; Bergès et Dupouey, 2021). Le fait que ces anciens champs aient été cultivés et conséquemment fertilisés induit des changements sur les caractéristiques chimiques du sol, mais la microtopographie particulière des champs bombés influence aussi de manière significative les sols et la végétation (cf. 1.1.5.2). Le dernier intérêt notoire est de dater ces formes afin de déterminer l'influence et la durée de ces pratiques culturelles sur les prairies et les forêts actuelles (cf. Chapitre 3 p 77).

### 1.1.3.4. Âge des champs bombés

Selon Blanchemanche (1990), « le champ uniformément plat semble bien avoir été une rareté dans les campagnes européennes jusqu'à la fin du 19<sup>e</sup> siècle », en effet, les formes bombées se retrouvent un peu partout en Europe centrale et possèdent toutes une date *ante quem* située aux alentours du 10<sup>e</sup> siècle (en raison de l'invention de la charrue à versoir fixe), d'ailleurs les études semblent montrer que nombre de ces formes ont été formées au cours de la période médiévale (cf. partie 3.1).

## 1.1.4. Murger (ou *stone walls*)

### 1.1.4.1. Définition, origine et recherche scientifique

Les *murgers* (ou *stone walls*) sont un amoncellement de pierre de tailles plus ou moins importantes, souvent en limite de parcelles, et résultant de l'épierrement des champs au fil du temps. Les pierres ainsi levées pouvaient être réutilisées à des fins de délimitation du parcellaire, mais également au remplissage de fossés de drainage, de création de *loges* (ou *capitelles* selon les régions) pouvant permettre de stocker les outils et les récoltes (Blanchemanche, 1990). Les structures peuvent avoir des formes circulaires ou linéaires (Schwartz *et al.*, 2003, 2012 ; Thorson, 2004, 2005 ; Georges-Leroy *et al.*, 2007a, 2007b ; Overland et Hjelle, 2013 ; Ives, 2015 ; Landois *et al.*, 2019 ; Georges-Leroy, 2020 ; Sobala, 2021). Ces structures peuvent avoir des tailles très variées de 10 m de large, de 4 m de hauteur et de 100 m de long en Alsace (Schwartz *et al.*, 2003), de 1 à 8 m de large, de 1 m à 4 m de hauteur et de 100 m de long en Pologne (Duma *et al.*, 2020), et dans le nord-est des Etats-Unis certains

murs peuvent atteindre 1,5 m de hauteur et avoir 1 à 1.5 m de large (Johnson et Ouimet, 2014). Outre leur taille très variée, les murgers peuvent présenter des parements d'un côté, des deux côtés ou aucun (Schwartz *et al.*, 2003 ; Combaud *et al.*, 2012 ; Duma *et al.*, 2020), ce double parement avec en son milieu un amas de pierres résulte selon Blanchemanche (1990) de l'épierrement des champs des deux propriétaires accolées l'un à l'autre et l'établissement des murs respectifs). L'ensemble des murgers ou le système de murgers peut constituer un réseau parfois très dense et sur des zones étendues de plusieurs km<sup>2</sup> (Johnson and Ouimet, 2016) et prenant ainsi un aspect réticulé (Sørensen, 1982 ; Nielsen, 1984 ; Schwartz *et al.*, 2003, 2012 ; Spek *et al.*, 2003 ; Kooistra et Maas, 2008 ; Landois *et al.*, 2019 ; Duma *et al.*, 2020).

En France, pour manifester la présence d'un « tas de pierres » résultant d'un épierrement, il existe de nombreux termes presque autant que de régions. Au 19<sup>e</sup> siècle dans le bassin parisien et le nord-est de la France le terme « *murgée, mergiers* ou *murger* » est utilisé, dans l'Indre et le Morvan on utilise le mot « *chinon* » (Blanchemanche, 1990), « *clapier* » dans les Hautes-Alpes (Girel *et al.*, 2010) et « *steinrudeln* » lui est préféré en Alsace (Schwartz *et al.*, 2003). Mais c'est le plus souvent le terme *murger* qui ressort des écrits scientifiques (Schwartz *et al.*, 2003, 2012 ; Combaud *et al.*, 2012 ; Froehlicher, 2016 ; Landois *et al.*, 2019 ; Georges-Leroy, 2020). Dans d'autres régions européennes, des systèmes d'anciens champs sont souvent associés au lever de pierres et leur amoncellement et la composition de mur en pierre sèche. Les *céide fields* que l'on retrouve en Irlande (Caulfield *et al.*, 1997 ; Whitefield, 2017) ou *celtic fields* en Angleterre (Crawford, 1923), Danemark (Sørensen, 1982) ou au Pays-Bas (Spek *et al.*, 2003 ; Kooistra et Maas, 2008) représentant d'anciens champs supposés datés de l'Antiquité. Ces parcelles sont de forme plus ou moins rectangulaires délimitées par des talus constitués de matériaux sableux ou par des murs en pierre (Spek *et al.*, 2003 ; Kooistra et Maas, 2008), résultant pour certains de l'épierrement des champs (Nielsen, 1984). Ces systèmes de champs portent parfois également des rideaux de culture (Nielsen, 1984 ; Ford *et al.*, 1988). Cette nomenclature correspond en réalité à des systèmes de champs situés dans le nord de l'Europe regroupant indépendamment presque tout type de structures agraires. Cette nomenclature paraît peu appropriée lorsqu'il s'agit d'étudier des murgers. Dans la littérature scientifique anglophone, on retrouve également le terme *cairnfield* ou *cairn* qui provient probablement du mot celtique *car* signifiant pierre (Blanchemanche, 1990). Ce terme, contrairement au *celtic fields*, suggère des zones agricoles délimitées par des murs (*cairnfield*) ou de petit tas de pierres (*cairn*) au milieu des parcelles (Nielsen, 1984 ; Overland et Hjelle, 2013 ; Ives, 2015 ; Bettineschi *et al.*, 2022), néanmoins le terme *cairn* peut être utilisé lorsqu'il s'agit d'empilement de pierres ostentatoires (Haiman, 1992 ; Bettineschi *et al.*, 2022) ou de construction effondrée (Hunt *et al.*, 2016). Un dernier terme très utilisé dans la littérature anglophone est celui de *stone walls* (parfois *stone pile*) correspondant le plus généralement à un réseau de murs linéaire ou des limites de champs en mur de pierre (Thorson, 2004, 2005 ; Collier, 2013 ; Johnson et Ouimet, 2014, 2016, 2018 ; Gadot *et al.*, 2018 ; Duma *et al.*, 2020 ; Vervust *et al.*, 2020 ; Sobala, 2021) au Royaume Uni, c'est le terme employé par le département de l'environnement (Defra) dans une étude réalisée pour la protection et l'identification des *stones walls* (Land Use Consultants and AC Archaeology, 2007). Néanmoins, ce terme peut être utilisé pour tout type de mur de soutènement (Agnoletti *et al.*, 2015 ; Turner *et al.*, 2021) ou d'enclos pour des pratiques pastorales (Ageby *et al.*, 2022) sans qu'il n'y ait eu



nécessairement d'épierrement important. En définitive, il semble qu'il n'existe pas dans la langue anglaise un terme présentant l'avantage d'être aussi précis que celui de *murger*.

#### 1.1.4.2. Formes agraires hybrides et murgers

Comme nous l'avons vu les termes « *cairn* » ou « *stone walls* » peuvent entraîner des confusions parce qu'ils peuvent ne pas résulter d'une mise en culture. *A contrario*, nous utilisons dans ce travail de thèse le terme *murger* pour exprimer la volonté d'une mise en culture. Cependant, certaines formes agraires hybrides constituées de muret peuvent être confondues avec ce dernier. Les *bourheux* que l'on retrouve dans les Vosges (88) sont des enclos constitués de murets plus ou moins circulaires permettant une culture vivrière (Rochel, 2004), probablement servaient-ils à empêcher les bêtes d'entrer à l'intérieur des cultures ? D'autres structures associées aux pratiques pastorales dans les Alpes résultant de construction en pierre sèche (Ageby et al., 2022 ; Bettineschi et al., 2022) – et qui ressemblent audit *bourheux* - peuvent être confondus avec les murgers. Ces formes résultent de l'extraction des pierres *in situ*, certes, mais ne constituent pas nécessairement un épierrement majeur du site, en tout cas rien ne permet de le confirmer. Leur seul objectif est de contenir (enclos) ou d'exclure (exclos) les bêtes, par conséquent, ces formes ne constituent pas des preuves de mise en culture. Néanmoins, les sols pouvaient également faire l'objet d'épierrement important dans le cas d'établissement de prairie et de pastoralisme (Ives, 2015) et de façon parfois spectaculaire, comme cela a pu être le cas dans les garrigues de Fitou « ou des centaines de parcs à moutons cloisonnés par des murailles de plusieurs mètres de hauteur et de largeur ont été édifiés sur plusieurs siècles » (Blanchemanche, 1990). Ce constat complexifie la dénomination de certaines formes hybrides constituées de pierres sèches, résulte-t-elle d'un véritable épierrement ? Ou s'agit-il d'un enlèvement de quelques pierres au sol pour constituer des murs ?

#### 1.1.4.3. Âge des murgers

L'épierrement des champs est attesté au moins depuis l'Antiquité par des écrits d'agronomes latins dans des textes anciens d'arpentage romain (Chouquer et Favory, 2001), ainsi que Pline en ~250 BC citant Théophraste, dont il dit à propos d'un propriétaire d'un champ ; « ... il perdit pour l'avoir épierré un terrain qui semblait bon. Son blé fût gelé n'étant plus protégé par les pierres qu'il avait ôtées » (Blanchemanche, 1990). Toutes les pierres ne faisaient pas l'objet d'une levée systématique, en effet, Olivier de Serres en 1600 recommandait que dans les sols argileux on laisse « celle de la grandeur d'une noix » notamment dans les sols lourds et Duhamel du Monceau dira plus tard en 1762 de ne retirer que celle plus grosse « qu'un poing » (Blanchemanche, 1990). C'est une pratique pluriséculaire, ainsi les murgers peuvent avoir des âges bien différents suivant leurs localisations géographiques. Aux Etats Unis, une majorité de ces formes datent de l'arrivée des colons européens au 17<sup>e</sup> siècle (Ives, 2015 ; Johnson et Ouimet, 2016). Au Danemark, en Irlande, au Pays Bas, en France et en Israël nombreux sont ceux ayant une origine antique (Sørensen, 1982 ; Nielsen, 1984 ; Spek et al., 2003 ;

Georges-Leroy et al., 2012 ; Gadot et al., 2018) ou entre la fin de la période antique et le début du Moyen Âge (Overland et Hjelle, 2013). La période médiévale est également bien représentée au Danemark, en République Tchèque et en France (Nielsen, 1984 ; Schwartz et al., 2003, 2012 ; Combaud et al., 2012 ; Georges-Leroy et al., 2012 ; Houfková et al., 2015 ; Landois et al., 2019). C'est une forme très présente sur tout le territoire européen ainsi qu'en Amérique du Nord et au Moyen Orient. L'ancienneté et l'ubiquité de ces formes en font un sujet très important pour la recherche.

#### 1.1.4.4. Intérêt scientifique actuel

Les murgers, tels que nous les avons définis, sont omniprésents sur une partie considérable de l'œkoumène, par conséquent, ils présentent un intérêt majeur dans l'étude de leur spatialisation dans les paysages actuels. À l'instar des champs bombés, leur détection et leur analyse à l'aide des données LiDAR demeurent un atout majeur pour l'archéologie (Kooistra et Maas, 2008 ; Johnson et Ouimet, 2014 ; Duma et al., 2020 ; Georges-Leroy, 2020) mais aussi pour l'écologie historique, afin de déterminer des changements d'occupation du sol à des échelles pluriséculaires (Georges-Leroy et al., 2012 ; Johnson et Ouimet, 2018 ; Sobala, 2021 ; Keller et al., 2023 ; Jackovičová et al., 2023). L'âge de ces structures, comme nous l'avons montré, s'étend sur des millénaires et leur datation représente un point central des études menées en Europe (mais aussi aux Etats-Unis et en Israël) afin de mieux saisir l'évolution des paysages et l'impact sur les espèces végétales et animales. L'aspect écologique des murs en pierre sèche a été très peu étudié, pour Collier (2013) pourtant, ils peuvent être considérés comme des habitats voir des écosystèmes nouveaux. Manenti confirme cette idée dans une étude réalisée en 2014 montrant que la biodiversité sur des murs appareillés en pierre sèche résultant de pratiques culturelles est bien plus grande que sur des escarpements rocheux et sur des murs qu'il dit artificiels. Les épierrements peuvent engendrer des espaces remarquables après leur abandon tel que des prairie sèche plateaux et collines calcaires (Schwartz et al., 2003, 2012) ou des garrigues comme celle du Fitou (Blanchemanche, 1990). Néanmoins, aucune étude ne semble avoir été réalisée sur les conséquences de l'épierrement sur la faune et la flore comparativement avec une zone non épiermée. Pourtant les conséquences des pratiques culturelles peuvent avoir une influence sur le long terme sur de nombreux aspects du géosystème.

#### 1.1.5. Intérêt de l'étude des formes agraires pour la compréhension des paysages actuels

##### 1.1.5.1. Documenter les changements d'occupation du sol anciens

À partir de la fin du 19<sup>e</sup> siècle en France « les changements intervenus dans l'utilisation des terres suite aux mutations des systèmes de production agricole ont amené à une sélection des terroirs et à une redistribution des terres affectées à l'agriculture, à la forêt et au pâturage » (Marty et Lepart, 2001). En conséquence, la surface des forêts françaises a presque doublé entre le milieu du 19<sup>e</sup> siècle et la fin du 20<sup>e</sup> siècle de 9 millions à 16 millions d'hectares (Cinotti, 1996). Cette évolution peut s'avérer

différente dans chaque département suivant de nombreux facteurs telle que la densité de population, la qualité des sols, la surface boisée de départ, le relief etc. Dans les départements étudiés dans cette thèse, le taux des espaces boisés a augmenté de  $12 \pm 3$  % dans le Bas-Rhin et le Haut-Rhin, et de  $6 \pm 3$  % en Moselle (Koerner et al., 2000). Cette variation est également présente à l'intérieur de chaque département. À titre d'exemple, le Haut-Rhin présente un taux de boisement de 40 % (Institut National de l'Information Géographique et Forestière, 2022), dont environ 23 % est représenté par les espaces boisés des Hautes-Vosges, qui ne couvrent que 30 % du territoire haut-rhinois, *a contrario* de la plaine rhénane qui en occupe plus de 60 %. Entre le milieu du 19<sup>e</sup> siècle et 2012, les Hautes-Vosges ont connu une augmentation de leur taux de boisement, passant de 58 677 ha à 81 724 ha (Keller et al., 2023), soit une hausse de 20 % ce qui est bien au-dessus de la moyenne du département. Ces données confirment que, dans les régions industrielles, les terres marginales moins productives, comme les massifs montagneux aux sols ingrats, ont été délaissées au profit des plaines plus adaptées à la mécanisation, dans le but de maximiser les rendements économiques. Ce phénomène conduisant à la régénération des forêts sur des terres ayant parfois éprouvé une longue histoire d'exploitation agricole (Ellis, 2021).

*A contrario* des forêts, les prairies ou milieux ouverts sont en déclin en France depuis au moins le milieu du 20<sup>e</sup> siècle et se sont stabilisées à partir de 2003, représentant environ 4 millions ha de prairie perdue entre 1967 et 2007 (Peyraud et al., 2012), malheureusement, l'acquisition de données avant le 20<sup>e</sup> siècle semble complexe en raison de données incomplètes sur les prairies au 19<sup>e</sup> siècle (Huyghe, 2008). Néanmoins, la méthode proposée par Favre et al. (2017) de normalisation de la digitalisation des cartes d'État-major à l'échelle du territoire français, permettra vraisemblablement de pallier ce manque. Dans les régions cible en 2016, la part des prairies permanentes représente entre 20 et 40 % dans le Bas-Rhin, le Haut-Rhin et la Moselle (Schils et al., 2022). La prairie est un terme générique qui regroupe en réalité les prairies permanentes (non retournée pendant au moins 5 ans pouvant être ressemée naturellement) et temporaires. Ici, nous utiliserons le mot prairie ou milieux ouvert pour parler des prairies permanentes, qui sont très majoritaires sur le territoire français, étant estimées à ~10 millions ha contre ~2 millions ha de prairies temporaires (Huyghe, 2008 ; Peyraud et al., 2012). Nous pensons qu'il n'est pas nécessaire d'en établir la distinction. Les données sur le changement d'occupation du sol entre espaces agricoles (prairies ou champs) et espaces forestiers sont bien documentées telles qu'en Méditerranée (Debussche et al., 1999) ou sur l'ensemble de la France (Mather et al., 1999). *A contrario*, les changements d'occupation du sol depuis le 19<sup>e</sup> siècle des espaces cultivés vers les prairies en France ne sont pas documentés à l'échelle des régions. Dans le chapitre 4 (p 103), nous montrons que ces transitions d'espaces cultivés anciens vers des espaces de prairies peuvent être plus importantes que vers des espaces forestiers à l'échelle d'un massif comme les Hautes Vosges. Il semble que dans certains paysages français, les anciens systèmes de champs se retrouvent bien souvent sous prairie. Ces milieux ouverts sont généralement maintenus grâce aux activités agro-pastorales actuelles qui par leurs pratiques d'amendement (épandage de fumier) modifient les caractéristiques édaphiques, ceci rendant plus difficile l'interprétation des données sur l'influence des pratiques culturelles anciennes. *A contrario*, les forêts sont moins sujettes aux épandages même si sur sol acide des amendements calci-magnésiens peuvent avoir lieu et peuvent influencer le

cortège floristique (Renaud et al., 2009). Malgré ces influences récentes, des études mettent « en évidence le poids de l'histoire dans la combinaison biogéographique » (Houzard, 1992) ; évaluer l'état des forêts ou des prairies en France sans connaître son histoire, peut constituer un biais dans l'interprétation des données, ainsi que dans leur gestion.

#### 1.1.5.2. Influence des pratiques culturelles dans les paysages actuels

Les agriculteurs du début du 19<sup>e</sup> siècle remarquaient qu'un billon large permettait d'avoir une épaisseur de sol plus importante que dans le cas d'un billon étroit. Ce constat leur fit remarquer que la végétation était plus ou moins identique sur les champs étroits, contrairement aux champs larges « qui ont une fertilité relative aux diverses épaisseurs de terre » (Académie nationale de Metz, 1830) influençant probablement le cortège floristique. Ce constat empirique est en accord avec les études réalisées plus d'un siècle plus tard en Angleterre. La première étude du genre est vraisemblablement celle de Harper et Sagar en 1953. Cette étude montre une influence de la microtopographie des champs bombés sur les groupes d'espèces présentes sur prairie et notamment sur les renoncules en raison de l'augmentation de la teneur en eau dans le sillon. D'autres études iront plus loin, montrant que le régime hydrique du sol influence la croissance des plantes (Langewitz et al., 2021), telles que des arbres dans des régions à pluviométrie élevée (Moffat et Roberts, 1989). La teneur en eau plus importante dans le sillon n'est pas liée à la hauteur de la nappe phréatique, ni à l'écoulement des crêtes, mais à la différence de taille des pores entre le sillon et billon (Hirsch et al., 2023). Cette différence est le résultat du tassement in situ par translocation des éléments du sol du billon vers le sillon (Cannon et Reid, 1993). Cette forme « agro-morphologiques » (Langewitz et al., 2021) particulière induit des variations dans le sillon de la teneur de certains éléments du sol, tel que le carbone (Alcántara et al., 2017 ; Hirsch et al., 2023) mais aussi en azote total (Langewitz et al., 2021). Les champs bombés ont une influence marquée par leur succession de sillons et de billons induisant de forte micro-variabilité sous forêt ou prairie. À cela, s'ajoute en plus la modification éventuelle du caractère chimique du sol par la fertilisation. Certaines études ont montré que les sols, issus de champs bombés, avaient été fertilisés (Langewitz et al., 2021) par de l'épandage d'excrément d'animaux (porc) et même humain, avec une intensité assez faible, et ne présentent aucun apport avéré de cendre ou de charbon (Langewitz et al., 2022).

La fertilisation des champs est une pratique qui remonte au moins à l'Antiquité. En effet, l'épandage de fumier est une pratique ancienne. Nombreux sont les auteurs romains comme Caton l'Ancien (2<sup>e</sup> siècle BC), Columelle (1<sup>er</sup> siècle AD) ou Pline l'Ancien (1<sup>er</sup> siècle AD) à écrire sur les pratiques de l'amendement. Ces trois auteurs sont repris à l'époque médiévale (14<sup>e</sup> siècle). Au cours de l'époque moderne, Olivier de Serre (1600) décrira de façon précise la préparation du fumier (Poirier et Nuninger, 2012). L'amélioration des terres par amendement est depuis au moins deux millénaire une technique agricole répandue mais limitée en quantité par le fait que la plupart des fermes avaient peu de bétail (Baratay, 2008). Selon Poirier et Nuninger (2012), il existe deux types d'amendements : minérale et organique. (i) L'amendement minéral consiste en marnage ou chaulage (mais aussi à l'apport de cendres), c'est-à-dire à l'apport d'une roche marneuse ou de chaux composée de calcium et d'argile améliorant à la fois la fertilité chimique et physique en modifiant la texture du sol (pour un sol

acide et trop sableux par exemple) ainsi que la structure. (ii) L'amendement organique résultant de l'apport de matière végétale (tourbe, litière, paille, etc) ou animale/humaine. Les deux apports organiques sont généralement mélangés avec potentiellement d'autres déchets ménagers tels que des tessons ou céramiques (Poirier et Nuninger, 2012). Les résultats les plus spectaculaires des épandages que l'on retrouve de l'Allemagne à la Scandinavie, mais particulièrement en Flandres, sont des sols d'origine médiévale appelés *Plaggen soils* (Goldammer et Page, 2000 ; Langohr, 2001). Cet anthroposol, à horizon Ap très épais, résulte du prélèvement de sol tourbeux utilisé comme litière dans les étables, et ensuite épandu dans les champs (Blume et Leinweber, 2004). De manière générale, les épandages ne changent pas de manière aussi visible le caractère pédologique. Néanmoins, la modification et l'augmentation des teneurs en éléments chimiques (teneur en azote, en carbone, en phosphore etc.) peuvent être importantes et durables dans les sols (Koerner et al., 1997, 1999 ; Verheyen et al., 1999 ; Jussy et al., 2001 ; Dupouey et al., 2002 ; Fraterrigo et al., 2006 ; Bürger, 2007 ; Dambrine et al., 2007 ; Georges-Leroy et al., 2009), ce qui influence positivement la croissance des arbres (Koerner et al., 1999), et de manière significative la biodiversité avec une augmentation du nombre d'espèces présentes (Dambrine et al., 2007 ; Dupouey et al., 2007b). Toutefois, l'installation de certaines espèces limite la croissance de celles caractérisant des forêts anciennes (Dupouey et al., 2002). Néanmoins, certaines forêts anciennement cultivées présentent une plus grande richesse en espèces (Koerner et al., 1997, 1999) ou une différenciation d'espèces plutôt à tendance héliophile que dans les forêts anciennes (Sciama et al., 2009). Afin d'améliorer la gestion de la biodiversité, il est nécessaire de prendre en compte certains facteurs, dont le type d'utilisation des terres, les propriétés du sol, les critères qui ont conduit à l'abandon des systèmes agraires, et ne pas uniquement faire une liste d'espèces typiques de forêts anciennes (Sciama et al., 2009). Il est nécessaire de prendre en compte ces facteurs dans une analyse multiscalaire. La prédominance des facteurs anthropiques doit être prise en compte dans l'approche et l'analyse des paysages actuels. Déterminer les trajectoires temporelles des anciens systèmes de champs de culture implique d'analyser les archives pédologiques afin de dater et définir les changements d'occupation du sol.

## **1.2. Paléo-indicateurs des activités humaines : les archives pédo-sédimentaires**

Une des difficultés rencontrées dans le domaine de la géoarchéologie est de trouver des archives sédimentaires, pédologiques et archéologiques. Dans les zones d'agriculture intensive ou lorsque les sols sont mis à nu, les processus géomorphologiques (éoliens, fluviaux et gravitationnels) sont responsables de l'ablation des sols, favorisant ainsi la perte d'archives pédo-sédimentaires accumulées sur des échelles pluriséculaires ou plurimillénaires. Face à cette perte d'information, l'étude des formes agraires héritées présente deux avantages.

(i) Par leur processus de construction, certaines formes agraires permettent de sceller des paléosols, principalement sous les murgers de façon imparfaite (Schwartz et al., 2003, 2012) - nous y reviendrons plus bas - mais aussi dans les rideaux de culture (Froehlicher, 2016) et les champs bombés (Langewitz et al., 2020). Ces paléosols sont protégés des facteurs climatiques, floristiques, faunistiques

et anthropiques, permettant ainsi la conservation d'archives qui peuvent nous renseigner sur les environnements qui ont précédé la phase de mise en culture et les changements d'occupation du sol. Les contenus paléobiologiques des sols, tels que les charbons de bois et la matière organique (MO), sont particulièrement adaptés à l'étude de ces paléosols. Les sols conservés directement sous les murs sont imparfaitement fossilisés. Des transferts de MO d'âge récents peuvent avoir lieu au sein du mur en raison de l'absence de matrice fine et de la présence de nombreux interstices, rajeunissant ainsi l'âge de la MO du paléosol. Ceci augmente l'incertitude des datations radiocarbones, mais permet de donner un âge maximum au mur (Schwartz et al., 2003), c'est-à-dire que son édification est nécessairement plus récente que cette date. Notons également que la pédofaune peut être encore active au sein du mur et dans le sol et entraîner des micro-charbons en profondeur.

(ii) Certaines formes agraires comme les rideaux de culture et les champs bombés résultent d'accumulations terrigènes successives. Le rideau de culture résulte de colluvions provenant du ruissellement et du labour, le champ bombé résulte de l'accumulation par labours successifs au centre de la parcelle. Ces matériaux terrigènes (ou colluvions) constitutifs de la forme agraire sont une archive temporelle intéressante et peuvent nous renseigner sur l'âge de ces formes et sur les dynamiques d'occupation du sol. *A contrario* des paléosols, ces sols sont soumis aux aléas anthropiques et naturels et notamment à un brassage permanent (bioturbation) par la pédofaune (principalement les vers de terre) ne permettant pas de fonctionner par logique stratigraphique. Les horizons constitutifs des sols ne peuvent pas être interprétés par chronologie relative, l'horizon le plus profond n'est pas nécessairement le plus ancien et les éléments qui le constituent tels que la MO, les sédiments et les charbons de bois peuvent être d'un âge plus récent et/ou plus ancien. Toutefois, dans les sols, l'âge moyen ou temps moyen de résidence de la MO croît avec la profondeur (Guillet, 1979). Cette logique peut également être appliquée aux sédiments lors d'accumulation successive, comme ont pu le montrer Vervust et al. (2020) dans un rideau de culture dont l'âge des sédiments croît avec la profondeur.

Ces accumulations terrigènes successives sont des archives pédo-sédimentaires précieuses et les charbons qu'elles peuvent contenir nous permettent de déterminer l'âge relatif des sols, les changements d'occupation du sol ou la paléovégétation présente avant la mise en culture et après l'abandon du champ de culture. Ces sols peuvent être utilisés pour déterminer des trajectoires temporelles des paysages et permettront d'établir des liens entre les pratiques culturelles anciennes et les cortèges floristiques et faunistiques actuels.

## 1.2.1. Pédoanthracologie

### 1.2.1.1. Définition et origine

La pédoanthracologie est l'étude des bois carbonisés, conservés dans les sols ; elle vise à identifier et dater de façon absolue les charbons de bois (Carcaillet et Talon, 1996). En raison de l'ubiquité des charbons de bois, cette méthode est utilisée en de nombreuses régions du monde et dans des problématiques variées (Nelle et al., 2013). Les prémisses de la pédoanthracologie peuvent être attribuées à Michel Thinon en 1978, dont la première étude du genre provient d'un constat simple révélé

lors d'une étude pédologique, sur le versant sud du Mont-Ventoux, que de nombreux charbons de bois étaient présents dans de nombreux profils de sol, et même parfois à plus d'un mètre de profondeur. C'est donc au cours de cette étude analysant 19 profils qu'une première méthode d'identification de charbons de bois de très petites tailles et de datation voit le jour. Thinon (1978) conçoit cette nouvelle méthode comme un moyen « de réaliser de véritables cartes chronologiques de la végétation, documents synthétiques de première valeur en paléobiogéographie, et de fournir de précieux arguments quant au déterminisme climatique ou anthropique de l'évolution de la végétation au cours des derniers millénaires ».

### 1.2.1.2. Intérêt, avantage et limite de la méthode

La pédoanthracologie permet de reconstituer des paléovégétations ligneuses incendiées au cours de l'Holocène (Carcaillet et Talon, 1996 ; Talon et al., 2005 ; Talon, 2010 ; Robin et Nelle, 2014 ; Robin *et al.*, 2012, 2014), de définir l'origine anthropique de certaines pelouses d'altitude (Carcaillet et Thinon, 1996 ; Talon et al., 1998 ; Carnelli et al., 2004 ; Goepp, 2007 ; Cunill et al., 2012 ; Bal et al., 2015), l'influence des pratiques humaines sur la dynamique de la végétation (Touflan et Talon, 2008 ; Touflan et al., 2010), d'identifier des variabilités climatiques régionales au cours de l'Holocène (MacDonald et al., 2000) ou l'identification des espèces exploitées et les périodes d'exploitation pour la production de charbon de bois (Nelle, 2003 ; Ludemann, 2010 ; Deforce et al., 2013 ; Benatti et al., 2018 ; Gocel-Chalté et al., 2020). L'étude des charbons de bois dans les sols présente des intérêts non-négligeables expliquant leur large utilisation.

Il existe deux avantages notoires à l'étude des charbons de bois dans les sols. (i) C'est un signal local (Nelle et al., 2013 ; Feiss et al., 2017 ; Robin et al., 2018), seules les particules < 400µm peuvent être transportées par le vent et les panaches convectifs de fumée (Wein et al., 1987 ; Clark, 1988). De plus, l'identification du taxon ne peut être réalisée que sur des charbons >1mm (Carcaillet et Thinon, 1996). (ii) Les charbons se dégradent lentement dans les sols permettant d'identifier les espèces et de les dater même après plusieurs milliers d'années (Nelle et al., 2013), à l'exception des contextes de colluvionnement intense qui sont en capacité de les dégrader (de Lafontaine et Asselin, 2011).

Si la stratification des charbons de bois peut, dans de rares cas, s'avérer possible dans les sols (Robin et al., 2012), dans l'écrasante majorité des cas la bioturbation mélange verticalement la couche de sol empêchant la stratification des charbons de bois (Carcaillet, 2001 ; Schwartz et al., 2005 ; Goepp et al., 2007 ; Robin et al., 2014), générant parfois une inversion des datations, un charbon plus ancien pouvant se situer au-dessus d'un charbon plus récent. Trois autres possibilités peuvent générer des inversions dans le profil de sol : (i) le transport par ruissellement (Carcaillet et Thinon, 1996 ; Robin et Nelle, 2014), ce qui peut présenter des difficultés dans l'interprétation des datations dans l'étude des lynchets (cf. Chapitre 3). (ii) De la même manière, le labour peut générer des remontées de charbon (Bal, 2022). (iii) « L'effet vieux bois », résultant de la datation par radiocarbone (C<sup>14</sup>) d'un arbre ancien ou mort pouvant conduire à dater l'âge de la mort du cerne (ou de l'arbre) et non du feu en lui-même (Carcaillet et Talon, 1996 ; Gavin, 2001). Notons que déjà à l'échelle du profil de sol, une grande

variabilité chronologique peut exister, car il existe une grande variabilité de l'anthracocénose à des échelles métriques sur le terrain (Feiss, 2016 ; Feiss et al., 2017).

Dans un contexte agraire, une limite peut également être soulevée, celle de l'amendement, qui peut augmenter potentiellement cette variabilité. Les cendres et charbons peuvent être intégrés au fumier avec tous autres déchets produits par la ferme selon les écrits de Columelle (1<sup>er</sup> siècle) ; néanmoins, selon Poirier et Nuninger (2012) l'utilisation de cendres pour fertiliser les champs n'est attestée par aucun indice archéologique, ce que corrobore l'étude de Langewitz et al. (2022). Cette pratique semble avoir été réalisée plutôt dans les jardins (Koerner et al., 1999) à proximité des habitations et de la présence de déchets ménagers. Épandre des cendres sur de grandes surfaces supposerait d'en avoir en grandes quantités. Il n'existe aucune certitude concernant cette pratique, contrairement à l'utilisation du feu comme moyen de défrichage d'une parcelle.

### 1.2.1.3. Défrichage et mise en culture, l'application de la pédoanthracologie dans des anciens champs

Le défrichage par le feu à des fins agricoles est un phénomène s'étendant sur toute l'Europe, et ce, depuis au moins le Néolithique (Williams, 2000). En Europe tempérée, les forêts de feuillus sont difficilement inflammables (Krivtsov et al., 2009). Un feu naturel dans ces conditions n'est pas chose aisée. Seul l'abattage des arbres à l'aide de combustible peut permettre de brûler une telle forêt (Eckmeier et al., 2007) augmentant de manière significative l'apport en phosphore soluble assimilable rapidement par les cultures, et favorisant nettement leur croissance (Rösch et al., 2002). Gouriveau et al. (2020) ont montré à travers l'analyse de deux tourbières dans les Vosges du Nord (57) une corrélation entre l'augmentation des particules carbonisées et l'augmentation du pollen de céréales depuis l'âge du Fer. Un constat similaire fait par Bal et al., (2011) dans les Pyrénées Centrales (Espagne) démontre également un lien très fort entre la récurrence des incendies et les activités agropastorales, et cela, depuis la fin de l'âge du Bronze. D'autres études archéologiques et paléo-écologiques montrent cette même tendance (Dambrine et al., 2007 ; Rius et al., 2009), il en est de même concernant certaines sources historiques démontrant que cette pratique est encore utilisée dans les Vosges au 18<sup>e</sup> siècle (Garnier, 2004). Dans ce contexte d'anciens champs, l'étude des charbons de bois dans des formes agraires présenterait l'avantage de pouvoir dater la mise en culture, mais aussi les changements d'utilisation du sol au cours du temps.

Il existe peu d'études utilisant la pédoanthracologie pour l'étude des formes agraires. Dans l'est des Pyrénées, la méthode a été utilisée pour dater plusieurs terrasses montrant que ces dernières présentaient plusieurs phases d'occupation illustrées par deux étapes de construction des terrasses. Les datations des charbons ont permis d'estimer la première phase de terrassement à l'Âge du Bronze (Bal et al., 2010 ; Bal, 2022). Dans les Vosges du Sud, ce sont des rideaux de culture qui ont permis de dater deux phases de défrichage, une au cours du Haut Moyen Âge correspondant à la mise en culture du site, puis un nouveau défrichage post-Guerre de Trente Ans (1618-1648) (Schwartz et al., 2020). En Allemagne centrale, Stolz et al. (2012) ont utilisé la pédoanthracologie combinée avec des datations OSL afin de dater des rideaux. Les premières traces d'utilisation des terres remontent à l'âge



du fer, mais les rideaux ont été estimés pour la plupart du Haut Moyen Âge. La même démarche est proposée par Larsen et al. (2016) et date des rideaux de la période médiévale, mais démontrent des changements de l'utilisation des terres au cours du temps, en effet, un site est successivement passé en culture puis en sylviculture (de bouleau). On peut également citer les travaux de Schwartz et al. (2012) qui estime des murs de murgers d'origine médiévale à partir de datations sur des charbons prélevés sous le murger. Avec toutes les précautions nécessaires, la pédoanthracologie semble être une méthode pertinente dans l'étude des formes agraires permettant de reconstituer des phases d'occupation du sol.

### 1.2.2. Spectroscopie proche infrarouge (SPIR) ou near-infrared spectroscopy (NIRS)

La spectroscopie proche infrarouge est utilisée en chimie organique depuis la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle. Depuis les années 2000, son utilisation a connu une forte augmentation grâce à son couplage avec des méthodes de statistiques multivariées qui permettent de prendre en compte rapidement l'ensemble du spectre. Le spectre lui-même contient un grand nombre d'informations sur le contenu organique d'un échantillon et est souvent considéré comme l'empreinte digitale de la matière organique (Palmborg and Nordgren 1996). En science du sol, l'utilisation du proche et du moyen infrarouge a également explosé dans les années 2000, principalement sous la forme de méthodes quantitatives qui permettent de prédire simultanément plusieurs paramètres physico-chimiques du sol (Cécillon et al., 2008 ; Chang et al., 2001 ; Barthès et al., 2006). Au laboratoire Image, Ville, Environnement une méthode originale et qualitative (NIRS-qual) a été développée pour reconnaître l'origine végétale de matières organiques anciennes stockées dans des paléosols ou des horizons profonds (Ertlen, 2009 ; Ertlen et al., 2015 ; Ertlen et al., 2010 ; Ertlen, 2022). Cette méthode a déjà été appliquée sur des paléosols piégés sous des murs (Schwartz et al., 2012), et nous l'appliquons également sur les rideaux de culture et les champs bombés, aussi bien aux paléosols fossilisés sous les structures qu'au matériel pédo-colluvial qui contiennent les rideaux de culture et les champs bombés. Le principe de la méthode consiste à comparer, par l'intermédiaire d'un modèle statistique, les spectres d'échantillons étudiés avec des spectres de référence mesurés sur des échantillons, dont l'origine de la matière organique est bien connue. Le référentiel qui s'est construit progressivement depuis une quinzaine d'années est maintenant jugé fiable pour reconnaître les grandes phases de défrichement en Europe tempérée (Ertlen, 2022). Les sites de référence sous prairie et sous forêt sont nombreux et bien caractérisés. En revanche, le référencement de sites cultivés pose plus de problèmes méthodologiques et il est encore considéré comme en cours de développement. Ceci nous a amené à appliquer la méthode avec différentes configurations du référentiel de la plus robuste à la plus exploratoire.

## 1.2.3. Lecteur de luminescence portable (P-OSL)

### 1.2.3.1. Principe de la datation par OSL

L'OSL (Optical Stimulated Luminescence) fait partie des méthodes de datation dites paléodosimétriques. Cette méthode permet de déterminer la durée d'enfouissement (ou âge d'enfouissement) d'un sédiment depuis sa dernière exposition à la lumière. Les minéraux, quartz et/ou feldspath, omniprésents à la surface de la terre, sont considérés comme des « géochronomètres » (Mercier, 2008) en raison des défauts cristallins permettant de piéger des électrons. Ces derniers sont soumis à une irradiation naturelle (U, Th, K40) provenant de leur milieu environnant, impliquant leur « déplacement » vers ces « pièges ». Tant qu'un sédiment reste enfoui et non exposé à la lumière, il accumule des électrons. L'exposition à la lumière du soleil implique la remise à zéro, c'est-à-dire le déplacement des électrons vers leur point de départ. Le sédiment exposé à une stimulation optique artificielle, permet aux chercheurs de déterminer un signal de luminescence. Ce signal appelé paléodose (De), exprimé en gray (Gy), permet avec la mesure du débit de dose (Da), qui est la dose d'irradiation mesurée que subit le sédiment par année (Gy/an), de déterminer un âge depuis son dernier enfouissement (Mercier, 2008).

### 1.2.3.2. Principe et intérêt du P-OSL

Le concept d'OSL portable a été développé entre les années 1994 et 2011, période au cours de laquelle plusieurs appareils (4 au total) de mesure ont été développés (Munyikwa et al., 2021), dont le plus largement utilisé est le modèle développé par le Scottish Universities Environmental Research Centre (SUERC) décrit par Sanderson et Murphy (2010). Le P-OSL (ou *portable luminescence reader*) permet de mesurer un signal de luminescence naturel, donc de mesurer le nombre de photons émis par un échantillon de sédiment. La différence entre l'OSL et le P-OSL est que le protocole de mesure est moins contraignant et beaucoup plus rapide (env. deux minutes par échantillon). Le P-OSL ne permet pas de donner une paléodose (De) mais un signal naturel (photon/seconde) sur un échantillon "brut" (non traité en laboratoire) résultant de différents paramètres (temps d'enfouissement, degré de blanchiment, granulométrie...) depuis la mise en place du dépôt (Sanderson et Murphy, 2010). Cette méthode prospective permet d'identifier les variations du signal de luminescence sur l'ensemble d'un profil de sol, soit sur les échantillons prélevés et traités en laboratoire ou directement sur le terrain (protégé de la lumière). La bioturbation dans les sols, rend difficile l'utilisation des datations par OSL, ou du moins, sans réaliser plusieurs mesures avec un risque élevé de datations infructueuses. Le P-OSL pourrait permettre d'éviter les datations infécondes, en identifiant les séquences du dépôt potentiellement problématiques. Il peut être également utilisé pour étudier le blanchiment des sédiments (King et al., 2014) mais aussi pour des approximations d'âge ou des âges relatifs sur des échantillons (Brill et al., 2016), raison pour lesquelles, le P-OSL a été utilisé dans des environnements fluviaux/colluviaux, côtiers, glacio-lacustres, éoliens mais aussi archéologiques (Munyikwa et al., 2021).

Dans les formes agraires, la méthode a déjà été éprouvée par quelques études montrant une grande utilité dans la détection de lacunes temporelles, de discontinuité ou d'accumulation progressive de sédiments dans la construction principalement de terrasses ou *stone walls* (Kinnaird et al., 2017 ; Porat et al., 2019 ; Vervust et al., 2020 ; Turner et al., 2021 ; Brown et al., 2023). Selon Kinnaird et al. (2017) le P-OSL permet d'élucider les méthodes de construction et les modifications morphologiques et structurelles des terrasses, mais précise qu'un certain nombre d'échantillons présentent des doses (ou un signal) très hétérogène, montrant alors que les sédiments contiennent des matériaux d'âge mixte en raison notamment d'un blanchiment partiel. Vervust et al. (2020) ont poussé plus loin la méthode en réalisant dans une tranchée une interpolation du signal OSL brut relevé directement sur le profil de sol avec l'analyse en laboratoire de la sensibilité (luminescence par unité de dose, comptes par Gy) de ces mêmes échantillons. Ceci a permis une réévaluation de l'interprétation de la stratigraphie fondée sur le signal brut, mais aussi de générer une interpolation de la dose apparente en Gy (Figure 4). Pour résumer le P-OSL présente deux avantages décisifs, (i) cette méthode permet d'élaborer des stratégies d'échantillonnage mieux informées et plus efficaces, (ii) et permet de combiner cette approche avec des analyses de laboratoire ultérieures, afin d'évaluer la chronologie de l'ensemble du profil sédimentaire (Turner et al., 2021).

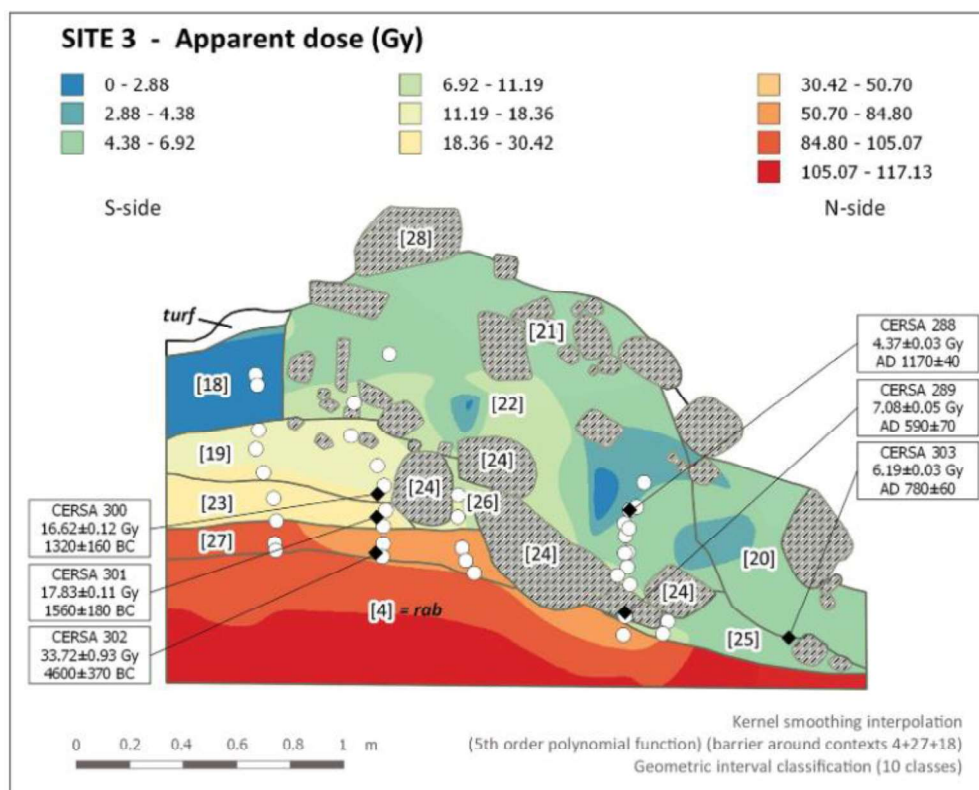


Figure 4 : Coupe d'un rideau de culture paré d'un mur construit à l'âge du fer en creusant dans des sols plus anciens de l'âge du bronze. La figure montre une interpolation de la dose apparente (Gy), ainsi que les datations par OSL PD (OSL profiling and dating, Vervust et al., 2020).

## **1.3. Acquisition de la donnée : méthodologie, base de données et spatialisation des formes agraires**

### **1.3.1. Formes agraires et LiDAR**

L'arrivée du LiDAR dans le domaine de l'archéologie a permis de faciliter la détection de microreliefs dans le paysage, et ce quel que soit le couvert végétal. Cette technologie « consiste à collecter des mesures de distance à un objet à l'aide d'un télémètre laser dont le faisceau lumineux est balayé à la surface de la terre par un miroir oscillant » (Nuninger et al., 2010). Ces mesures permettent de produire un nuage de point (tous géoréférencés) qui, une fois traité par une méthode de filtrage, produit un modèle numérique de terrain (MNT). Aux alentours des années 2010, de nouvelles méthodes de classification sont élaborées, afin d'extraire des points qui discriminent au mieux l'objet archéologique (Nuninger et al., 2010) et plus récemment nombre de travaux développent des méthodes d'auto-détection d'objets variés (Trier et al., 2015 ; Verschoof-van der Vaart et Lambers, 2019) mais aussi de formes agraires (Herrault et al., 2021), dont pour l'instant l'acquisition reste manuelle, à l'instar du travail réalisé dans cette thèse.

L'utilisation du LiDAR a permis de franchir une nouvelle dimension dans l'analyse spatiale et historique des systèmes d'anciens champs (Sittler et al., 2007 ; Basoge et al., 2010 ; Nuninger et al., 2010). Cet outil permet de détecter des microtopographies qui ne sont pas toujours visibles lors de prospection de terrain. Dans une étude menée par Georges-Leroy et al. (2009) l'utilisation du LiDAR permet, sous forêt, de détecter 50 % de parcelles fossilisées supplémentaires par rapport aux seules prospections de terrain. Nombre d'études en Alsace et en Lorraine ont utilisé cet outil afin de déterminer avec précision la nature des formes conservées sur des surfaces importantes (Sittler et Hauger, 2007 ; Georges-Leroy et al., 2009, 2012 ; Schwartz et al., 2012 ; Sittler et al., 2015 ; Georges-Leroy, 2020 ; Keller et al., 2023). Ces études ont pu montrer qu'un grand nombre de ces formes était préservé sous prairie ou forêt. Dans ce travail, nous avons essayé de collecter un grand nombre de systèmes agraires et de les intégrer dans une base de données spatialisée.

### **1.3.2. Système d'information géographique (SIG) appliqué aux formes agraires**

De nombreux travaux de recherche à l'Université de Strasbourg (mémoires de recherche, thèse et articles scientifiques) ont permis de répertorier un grand nombre de formes agraires dans le Haut-Rhin (Schwartz et al., 2003, 2012 ; Lejeune, 2015 ; Froehlicher, 2016 ; Dapiaggi, 2017 ; Piccitto, 2018) et en Moselle principalement dans le Pays de Bitche (Keller, 2018 ; Cumetti, 2020). Dans ce travail de thèse, nous avons répertorié les données existantes et ajouté par analyse des MNT et par vérification sur le terrain un grand nombre de données. La disponibilité plus précoce du MNT complet sur le Haut-Rhin explique le plus grand nombre de données accumulées sur ce département (le MNT du Bas-Rhin n'était pas disponible au commencement de cette thèse). La vérification sur le terrain n'est pas toujours

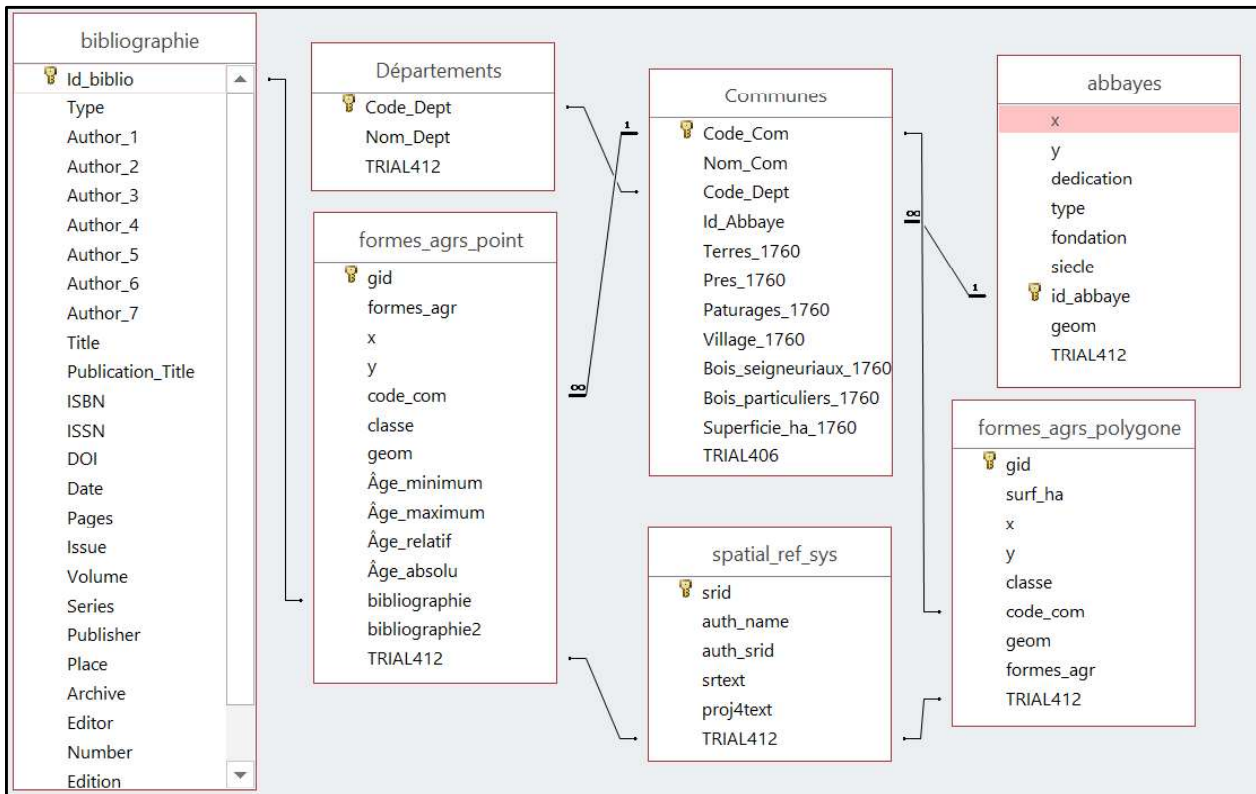
nécessaire, certaines formes, telles que les champs bombés, ont une agro-morphologie caractéristique (Figure 3), contrairement aux rideaux de culture qui peuvent être confondus avec des terrasses, et les murgers avec des andains forestiers (ce dernier cas reste cependant rare). Certaines formes ont pu être atténuées (avec le temps) ou tout simplement arasées, résultat, dans la grande majorité des cas, du remembrement des années 70 (Froehlicher, 2016 ; Keller, 2018) ou plus récents (Figure 1c et d). L'arasement implique également l'isolement de certaines formes dans l'espace ce qui ne permet pas de les identifier comme un système d'anciens champs (Keller et al., 2023). Ces formes ne peuvent être sélectionnées en raison de la confusion avec d'autres formes ponctuelles telles que des chemins.

Dans ce travail, nous avons mis en place une base de données spatialisée favorisant l'acquisition, la gestion, la visualisation et l'analyse de plusieurs phénomènes spatialisés représentés par les formes agraires. Toutes ces données ont été compilées dans un projet open source appelé *PostgreSQL v13.0* qui est un système de gestion de base de données relationnelle-objet (SGBDRO) ou *object-relational database management system* (ORDBMS) (Drake et Worsley, 2002). Nous avons utilisé l'interface *pgAdmin 4 v 4.30* qui constitue un outil d'administration graphique de *PostgreSQL* (<https://www.pgadmin.org/>). L'avantage de cet outil libre est qu'il propose une extension appelée *PostGIS v3.3.3* permettant la manipulation d'informations géographiques spatialisées (<https://postgis.net/>). La visualisation de ces données s'est faite à l'aide du logiciel de cartographie *QGIS 3.22.2 Bialowieza*. L'objectif est d'obtenir une haute résolution des logiques d'implantation des formes agraires en combinant plusieurs données, tels que les sites identifiés (shapefile) leurs âges, la localisation d'objets historiques (ex : des Abbayes anciennes), la bibliographie associée à certains sites, etc.

### 1.3.3. La base de données spatialisée des formes agraires

La base de données est composée de 7 tables composées de différents champs permettant de caractériser au mieux chaque table (Figure 5). La table *bibliographie* permet de retrouver l'auteur ou les auteurs relatifs aux (ou à la) forme(s) agraire(s) présentant des données de recherche. La table *formes\_agrs\_point* répertorie toutes les formes agraires relevées dans les régions cibles (majoritairement Haut-Rhin et Moselle). Ces points représentent le centroïde d'une zone regroupant plusieurs formes ou d'un polygone (digitalisé). Tous les points ne sont pas nécessairement un centroïde, c'est-à-dire un point au milieu d'un polygone d'un ensemble de forme agraire. Il arrive qu'un ensemble de forme agraire n'ait pas fait encore l'objet d'une digitalisation, mais qu'un point précise leur présence. La table *formes\_agrs\_polygone* représente les polygones réalisés pour déterminer la surface d'emprise d'un système de formes agraires différencié par la nature de la forme (champs bombés, rideaux de culture/terrasse et murger). Dans la table *commune* et *departements* il ne s'agit, ni plus ni moins, des informations relatives aux communes et aux départements dans lesquels se retrouvent des formes agraires. Nous avons ajouté une table *Abbaye* car, selon Schwartz et al. (2020), il est fort probable que la généralisation dans les Hautes Vosges des systèmes de rideaux de culture soit directement liée avec

l'implantation de nombreuses abbayes au cours du Haut Moyen Âge. La table *spatiale\_ref\_sys* contient les références spatiales des points et polygones des formes agraires.



**Figure 5 : Modèle conceptuel des données (MCD) des formes agraires dans les régions cibles (Haut-Rhin, Bas-Rhin et Moselle)**

Pour l'instant, 1700 points ont été relevés (Tableau 2) et compilés dans la base de données représentant une ou plusieurs formes agraires (centroïdes d'un polygone). Les terrasses et rideaux de culture ont été regroupés dans la même classe en raison de l'impossibilité de les différencier par MNT. Seule l'ouverture d'une tranchée ou d'une fosse permet de les différencier. Il ne s'agit que de formes agraires « anciennes » les terrasses associées aux zones viticoles alsaciennes ne sont donc pas prises en compte. Au total, 1055 points correspondent à des champs bombés principalement dans la plaine du Haut-Rhin et dans le Pays de Bitche (Moselle), 155 murgers principalement représentés dans les Hautes Vosges et les collines sous-vosgiennes et 490 Rideaux/Terrasses représentés en majorité dans le Haut-Rhin. Seul le département du Haut Rhin a fait l'objet d'un relevé quasi-exhaustif sur l'ensemble de son territoire, du fait d'un recouvrement total par le LIDAR datant de 2008. En Moselle, c'est principalement la partie sud-est du Pays de Bitche qui a bénéficié d'un vol LIDAR en 2019 (Cumetti, 2020).

**Tableau 2 : Nombre de points correspondant à un ensemble de formes agraires (centroïde d'un polygone) ou d'une forme isolée dans les départements du Bas-Rhin (67), du Haut-Rhin (68), de la Moselle (57) et des Vosges (88)**

<b>Formes agraires</b>	<b>Bas-Rhin</b>	<b>Haut-Rhin</b>	<b>Moselle</b>	<b>Vosges</b>	<b>Total</b>
<i>Champs bombés</i>	65	525	464	1	1055
<i>Murgers</i>	21	118	16		155
<i>Rideaux/Terrasses</i>	14	311	165		490
<b>Total général</b>	<b>100</b>	<b>954</b>	<b>645</b>	<b>1</b>	<b>1700</b>

### 1.3.4. Spatialisation des formes agraires

Une analyse générale et comparative de la répartition des formes agraires dans les trois régions cibles (Bas-Rhin, Haut-Rhin et Moselle) n'est pas pertinente, eu égard à l'indisponibilité du LiDAR sur l'ensemble des départements. Ici, nous faisons une analyse très brève de la répartition des formes agraires, le chapitre 4 (p 103) faisant une analyse plus poussée dans les Hautes Vosges.

Dans la partie sud-est du Pays de Bitche, même si le nombre de points représentant les champs bombés sont plus importants que ceux des rideaux/terrasse (Figure 6), les surfaces correspondant aux surfaces occupées aux sols sont de 514 ha et 606 ha (Ertlen, 2022), respectivement. Les champs bombés peuvent occuper les fonds de vallée, les sommets des plateaux ou les versants (avec une pente moyenne de 8°, Cumetti, 2020) cette répartition est en partie conditionnée par la lithologie contrastée du Pays de Bitche.

Dans le Haut-Rhin, le relevé peut être considéré comme quasi-exhaustif, surtout dans les Hautes Vosges. Pour le moment, toutes les formes agraires représentées par des points n'ont pas fait l'objet d'une digitalisation permettant d'établir des surfaces d'occupation. Toutefois, il est possible de dresser une répartition des formes dans le Haut-Rhin. Les champs bombés sont de loin les formes les plus représentées dans la plaine rhénane, avec une bipartition entre le nord et le sud qui peut s'expliquer par la conservation sous forêt, sous prairie/verger plus importants dans cette partie (Piccitto, 2018). Il est probable que l'importance des surfaces de culture intensive dans la partie centrale et du nord du Haut-Rhin y explique la faible conservation de champs bombés. Dans les Hautes Vosges, ils occupent principalement les fonds de vallon. De manière générale, les rideaux de culture et les murgers occupent principalement les zones montagneuses ou les petits reliefs de plaine.

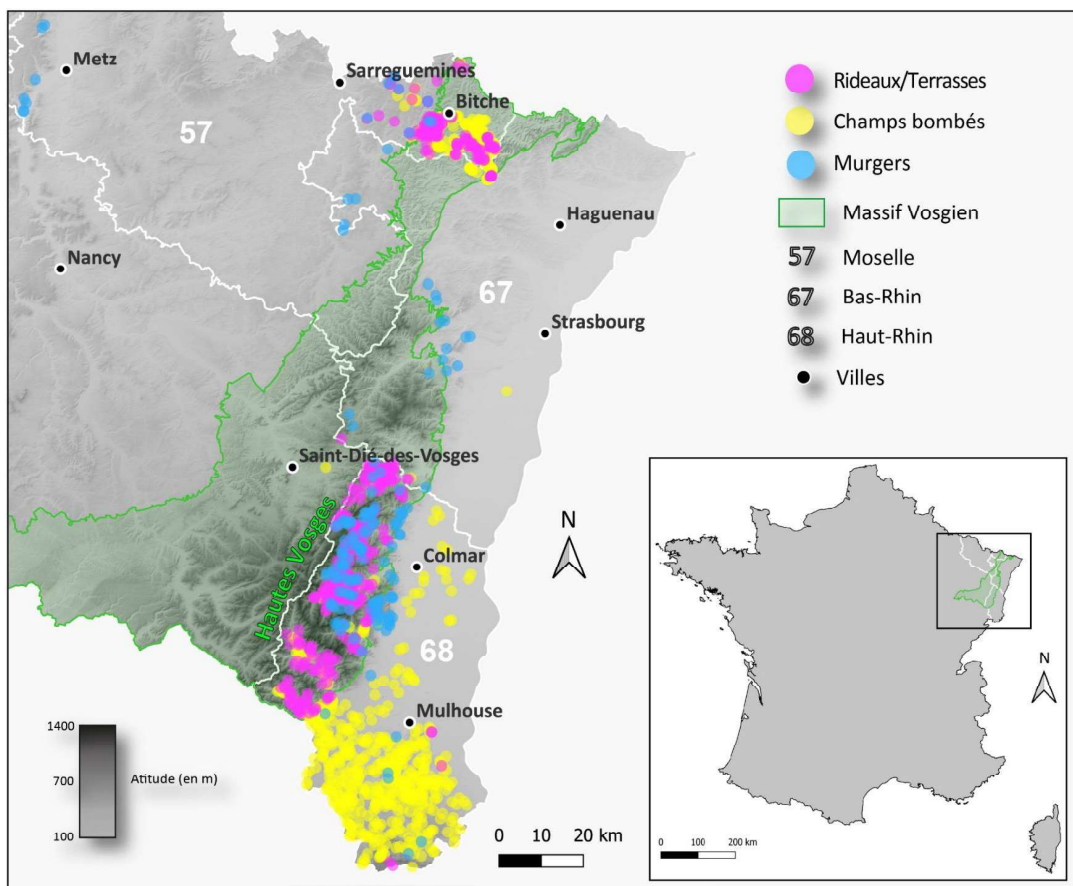


Figure 6 : Carte de localisation des formes agraires (rideaux/terrasses, champs bombés et murgers) dans l'est de la France dans les départements de la Moselle, du Bas-Rhin et du Haut-Rhin



## 1.4. Conclusion du chapitre 1

Nous soulignons l'importance capitale de l'étude des éléments du patrimoine agraire pour la compréhension approfondie de l'histoire rurale de la région. Ce chapitre nous permet d'obtenir un aperçu précieux de l'interaction entre l'agriculture passée et les paysages actuels, et met en évidence la nécessité de préserver les formes agraires anciennes en tant que témoins de notre héritage agricole et culturel. Pour atteindre ces objectifs, il est indispensable d'acquérir des données sur les formes agraires à grande échelle. L'acquisition de données dans le Haut-Rhin et dans une partie de la Moselle a démontré que de nombreuses formes agraires étaient préservées sous des prairies ou des forêts.

Ce chapitre met également en évidence l'intérêt grandissant des études géoarchéologiques mais aussi écologiques sur les rideaux de culture, les champs bombés et les murgers. Les méthodes d'analyse des archives pédo-sédimentaires permettent de mieux comprendre l'histoire agraire et les trajectoires temporelles de ces formes agraires. Les changements d'occupation du sol amorcés en France depuis le 19<sup>e</sup> siècle, avec une conquête des espaces forestiers sur les anciens espaces agricoles ou d'un abandon sous prairies, ont nécessairement des conséquences sur la biodiversité et les caractéristiques du sol, notamment en lien avec les pratiques culturelles. L'analyse de ces archives est donc essentielle pour saisir ces évolutions. Les rideaux de culture comme nous l'avons démontré possèdent l'avantage de résulter d'un colluvionnement résultant de l'exploitation de la parcelle à travers le temps. À cet égard, leur étude est d'autant plus fondamentale qu'elle constitue une archive temporelle quasi-continu entre sa mise en culture et son abandon.

# Chapitre 2

---

## Exploring the past through lynchet landscapes in the Vosges Mountains and Lorraine Plateau (France)

Article soumis dans la revue *Geoarchaeology*

### Résumé

Les rideaux de culture sont des talus ou ressauts formés par l'érosion et l'accumulation de sédiments en aval des parcelles agricoles et offrent des indications précieuses sur l'activité agricole passée. Ces microtopographies couvrent de vastes zones et servent d'indicateurs des changements historiques dans l'utilisation des terres. Par conséquent, leur omniprésence en Europe les rend particulièrement intéressantes. Dans cette étude, nous proposons une approche géoarchéologique pour analyser six rideaux de culture, quatre dans les Vosges et deux sur le plateau Lorrain (France). Les rideaux de culture peuvent être considérés comme des archives de sol sans organisation stratigraphique ni séquence chronologique, rendant difficile de déterminer leur âge et d'identifier les changements d'occupation du sol au cours du temps. Pour pallier à ces limites, nous proposons d'analyser ces archives pédo-sédimentaires par l'identification et la datation des charbons de bois, mais également de déterminer l'origine de la matière organique en utilisant la spectroscopie proche infrarouge (NIRS). Ces données sont combinées avec les archives historiques et géo-historiques, afin de déterminer l'âge, la végétation et les changements passés d'utilisation des terres associés aux paysages des rideaux de culture. En combinant ces multiples sources de données, nous sommes plus à même de montrer le développement chronologique de ces anciens systèmes agricoles, et de découvrir des informations précieuses sur l'histoire du paysage.

La datation des charbons de bois suggère une plus grande fréquence des incendies à partir du Moyen Âge. Les datations s'alignent sur la dynamique régionale des incendies anthropogéniques, indiquant une utilisation potentielle du feu pour défricher les espaces forestiers et une mise en culture. Nous démontrons également la difficulté d'extrapoler la datation d'un rideau de culture à l'ensemble du système de rideaux. Nos résultats soulignent les difficultés d'interpréter la formation et la datation des rideaux de culture et du système sur la seule base des analyses des charbons de bois. Cependant, nous soulignons l'intérêt de l'application de la pédoanthracologie aux rideaux de culture pour déterminer la dynamique des changements d'utilisation des terres dans les anciens champs.

# Exploring the past through lynchet landscapes in the Vosges Mountains and Lorraine Plateau (France)

Benjamin Keller<sup>1</sup>, Damien Ertlen<sup>1</sup>, Vincent Robin<sup>2</sup>, and Dominique Schwartz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE) – UMR 7362, CNRS – University of Strasbourg, 3 rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France

<sup>2</sup>Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC) - UMR 7360 CNRS - University of Lorraine, 8 rue du Général Delestraint, 57070 Metz, France

**Keywords:** Lynchet, former field systems, clearing forest, charcoals, geo-historical data, NIRS Landscape history

## Abstract

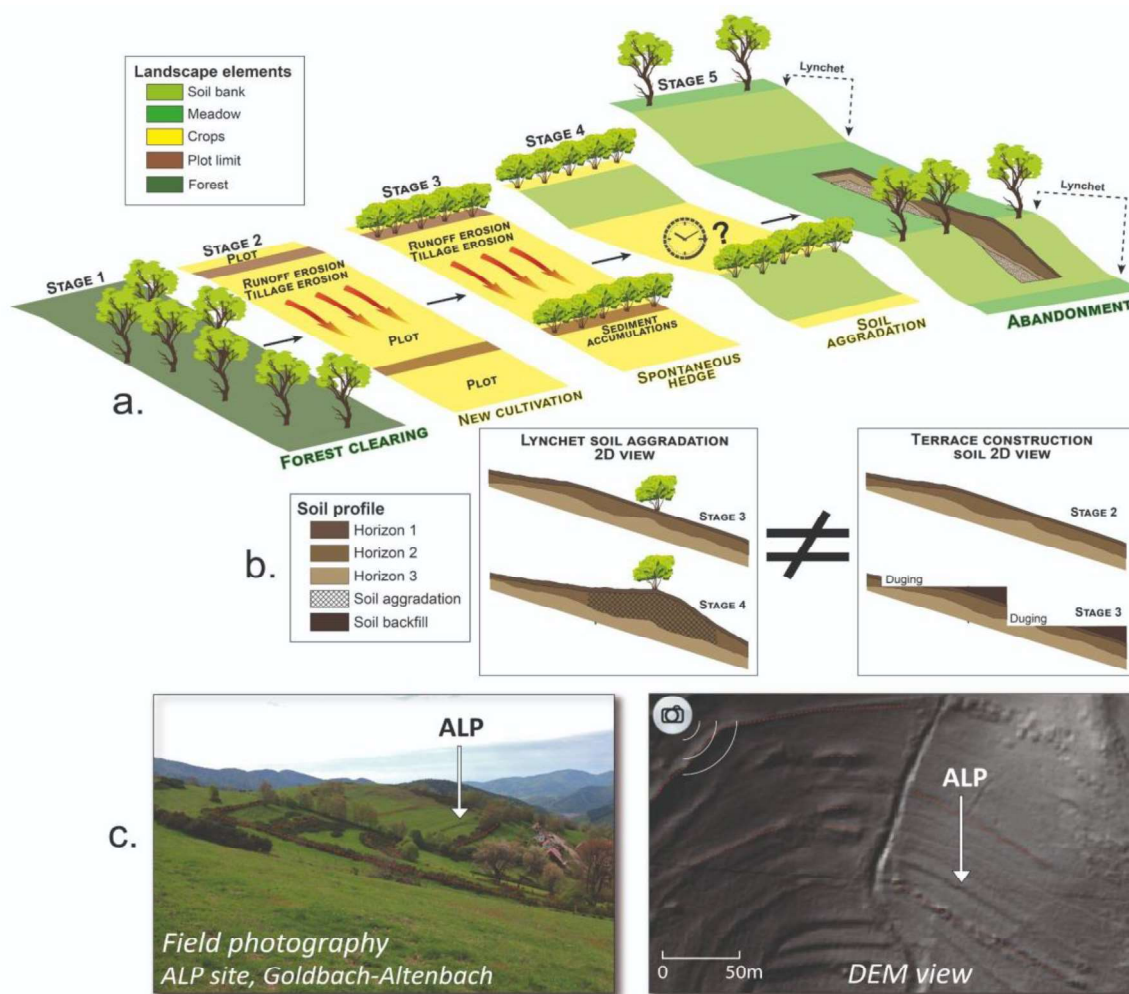
Lynchets are ridges formed by erosion and sediment accumulation downstream of agricultural plots and offer valuable insights into past agricultural activity. These microtopographies cover vast areas and serve as indicators of historical changes in land use. As a result, their ubiquity across Europe makes them particularly interesting. In this study, we propose a geoarchaeological approach to analyze six lynchets, four in the Vosges Mountains and two on the Lorraine Plateau (France). The lynchets can be considered soil archives with no stratigraphic organization or chronological sequence from bottom to top, making it difficult to determine the age of the lynchets and identification of changes in land use over time. To this end, we propose the analysis of historical and geo-historical archives combined with the pedo-sedimentary archives of lynchets through charcoal identification and dating combined with nearinfrared spectroscopy (NIRS) to determine the age, vegetation, and past landuse changes associated with lynchet landscapes. By combining these multiple data sources, we are better able to show the chronological development of these ancient agricultural systems and uncover valuable information on landscape history. Charcoal dating suggests a higher frequency of fires from the Middle Ages. The dating aligns with the regional dynamics of anthropogenic fires, indicating a potential use of fire for cultural purposes. We also demonstrate the difficulty of extrapolating the dating of a lynchet to the entire lynchet system. Our results highlight the difficulties of interpreting the formation and dating of lynchets and the lynchet system on the sole basis of charcoal analysis. However, we highlight the value of applying pedoanthracology to lynchets to determine the dynamics of land use change in former fields.

## 2.1. Introduction

The emergence of agriculture is a factor accelerating the anthropization of European landscapes, particularly through land clearing (Williams, 2000). Determining the periods of cultivation and abandonment of field systems is an essential element in understanding anthropogenic landscapes (Brown et al., 2021). For several decades, the use of light detection and ranging (LiDAR) has made it possible to detect and spatialize ancient field systems, especially under forest cover, more efficiently on a larger scale (Sittler et al., 2007, 2015; Georges-Leroy et al., 2009; Landois et al., 2019; Schwartz et al., 2020). Reconstructing the history of land use and thus determining the ecological legacy associated with these land uses is an essential benchmark for more effective current environmental governance (Ellis, 2021).

In the Vosges mountain range, among the detected and spatialized former field systems, lynchets represent a significant area (Keller et al., 2023). Lynchets are microtopographies that result from erosion and sediment accumulation downstream of an agricultural parcel, creating a ridge (Figure 7a). The soil bank or ridge results from aggradation of the soil profile by sediment accumulation at the bottom of a cultivated plot. Tillage erosion and runoff erosion are the two processes responsible for sediment transfer downslope (Nyssen et al., 2010), behind a hedge (e.g., Froehlicher, 2016), or a stone wall (e.g., Georges-Leroy et al., 2009). Lynchet systems can be dense with the ridges almost parallel to each other and perpendicular to the direction of the slope (Figure 7c). These microrelief features are evidence of present or past agricultural use and can form a dense spatial system, with numerous lynchets spaced from 10 to 50 meters apart and sometimes more, that can represent large areas exceeding hundreds of hectares (Keller et al., 2023). Each ridge or soil bank represents the boundary of a former crop field; hence, a crop field is bounded by two ridges. A lynchet is not an intentional construction, unlike an agricultural terrace, which is the result of excavating the soil from upstream to downstream (Figure 7b). A lynchet is the result of soil aggradation, which is partly dependent on the duration of ploughing; and therefore, on the time spent in cultivation (Figure 7a). This sedimentary accumulation over several centuries or sometimes several millennia can be considered as a pedosedimentary archive, allowing the trace of temporal trajectories of land use and landscape. From a soil science point of view, it can be described as cumulic soil; from a geomorphological point of view, it can be described as colluvial deposits.

Lynchets are ubiquitous in northern European landscapes such as Germany (Stolz et al., 2012; Larsen et al., 2016), England (Ford et al., 1988; Sillar et al., 2008; Brown, 2009; Brown et al., 2020; Vervust et al., 2020), France (Bernard-Allée & Valadas, 1992; Walter et al., 2003; Georges-Leroy et al., 2009; Chartin et al., 2011; Froehlicher, 2016; Georges-Leroy, 2020; Schwartz et al., 2020), Belgium (Nyssen et al., 2014), Denmark (Nielsen, 1984; Nielsen & Dalsgaard, 2017), the Czech Republic (Houfková et al., 2015; Zádorová et al., 2018), or Poland (Sobala, 2021). Lynchets are a footprint of past activities, which determine a new temporal reference to reconstruct landscape changes over longtime



**Figure 7: Description and identification of a lynchets; (a) Theoretical stages of lynchets formation a.: Stage 1, Clearing of the forest ( this stage can be repeated between stage 3 and 5); Stage 2, crop cultivation on small fields and beginning of erosion process transfers; Stage 3, Establishment of a hedge and accumulation of sediments upstream of it, beginning of soil aggradation; Stage 4: Soil aggradation depending on several factors (intensity of rainfall, time spent in cultivation, slope, intensity of tillage, edaphic characteristics, etc.); Stage 5: Abandonment of the lynchets system and conversion to forest or conversion to grassland; the terrace is the result of voluntary overburdening upstream and deposition of fill downstream visible in the soil profile. (b) Morphostratigraphic differences between a lynchets and an agricultural terrace; the terrace is the result of voluntary overburdening upstream and deposition of fill downstream visible in the soil profile. (c) Lynchets system in the Vosges mountain range Goldbach-Altenbach study site (ALP).**

scales (Keller et al., 2023). In France, despite the 1950s large land levelling consolidations, lynchets are often preserved in areas of limited extensive agriculture.

Numerous relative dating techniques have been used to estimate the age of these microreliefs, such as annual estimates of pedosedimentary accumulation (Nyssen et al., 2014), the presence of artifacts and archaeological features (Ford et al., 1988; Georges-Leroy et al., 2009; Brown, 2009; Georges-Leroy, 2020), Optically Stimulated Luminescence (OSL) (Froehlicher, 2016; Vervust et al., 2020), carbon-14 ( $^{14}\text{C}$ ) dating of charcoal (Bernard-Allée & Valadas, 1992) combined with OSL (Stolz et al., 2012; Larsen et al., 2016). Nevertheless, few studies have performed tree species identification of charcoal collected from the pedosedimentary accumulation (Schwartz et al., 2020). Charcoal study not only allows for the estimation of lynchets age, but also for the determination of land use trajectories and the identification of paleo-vegetation. The forest composition and temperate climate in northeast France do not favor natural fires (Krivtsov et al., 2009; Robin & Nelle, 2014). Therefore, the presence of charcoal

in soils is a good indicator of the anthropization of an environment. Additionally, soil organic matter from the pedosedimentary accumulation analyzed by near infrared spectroscopy (Ertlen et al., 2010) can give information about past vegetation. Instead of producing an event archive like charcoal, it gives a more continuous image of past vegetation and is complementary to anthracology.

The purpose of this study is twofold. First, is to date the lynchets and lynchet agricultural systems. Although a number of lynchets, mostly in northern Europe, date to the Bronze Age (1800-800 year BC) or Iron Age (800-25 year BC) (Sillar et al., 2008; Froehlicher, 2016; Nielsen & Dalsgaard, 2017; Vervust et al., 2020) and the Gallo-Roman period (Ford et al., 1988; Ruffaldi et al., 2007; Nyssen et al., 2014), most landforms date to the Middle Ages (Bernard-Allée & Valadas, 1992; Brown, 2009; Nyssen et al., 2014; Houfková et al., 2015; Froehlicher, 2016; Larsen et al., 2016; Schwartz et al., 2020; Vervust et al., 2020). Additionally, many iconographic works from the 15<sup>th</sup> to 17<sup>th</sup> centuries, such as illuminations or engravings (Schwartz et al., 2019), depict lynchets, often materialized as hedges. By obtaining chronological data at a regional scale, we can better understand the chronology of these ancient agricultural systems. The second objective is to identify land use changes. By combining the identification of fire clearing periods and tree species with soil, geo-historical, palynological, archaeological, and historical data from sites, it is possible to define the temporal trajectories of these landscapes.

## **2.2. Study Area**

### **2.2.1. Vosges Mountains and Lorraine Plateau**

Sites are in or near the Vosges Mountains, a low mountain range oriented from north to south located in northeast France. Its absolute elevations range from ~200 to 1424 m a.s.l. (Figure 8). Climate accordingly evolves from oceanic to almost semi-continental, reflected by a very strong W-E rainfall gradient between the Lorraine Plateau (800 mm/year in Sarreguemines), the Vosges (the south >2300 mm/year; the north a maximum of 1600 mm/year) and the Rhine Graben (550 mm/year in Colmar and 665 mm/year in Strasbourg) located directly to the east. In the Vosges, at 1200 m, winters are cold and summers are mild with 4°C to 5°C on average, while in the Lorraine Plateau, average temperatures are around +9° to +10°C (Wahl, 2007). The SAA, GAR, ALP and GOLF sites are located in the Vosges, specifically the Crystalline Vosges. The Crystalline Vosges are dominated by granitic and metamorphic formations due to the uplift and erosion of sedimentary formations since the Mio-Pliocene, exposing the Hercynian basement, whose Quaternary glaciations contributed to the shaping of the relief (Mercier, 2014). The MBW and WBT sites are in the direct vicinity of the Vosges in the Lorraine Plateau (Figure 8). The Lorraine Plateau, dominated by limestone formations, is a set of *cuestas* whose dip follows that of the sedimentary layers towards the east, resulting from the geological evolution of the eastern Parisian basin and the differential erosion of the sedimentary layers (Cojan et al., 2007).

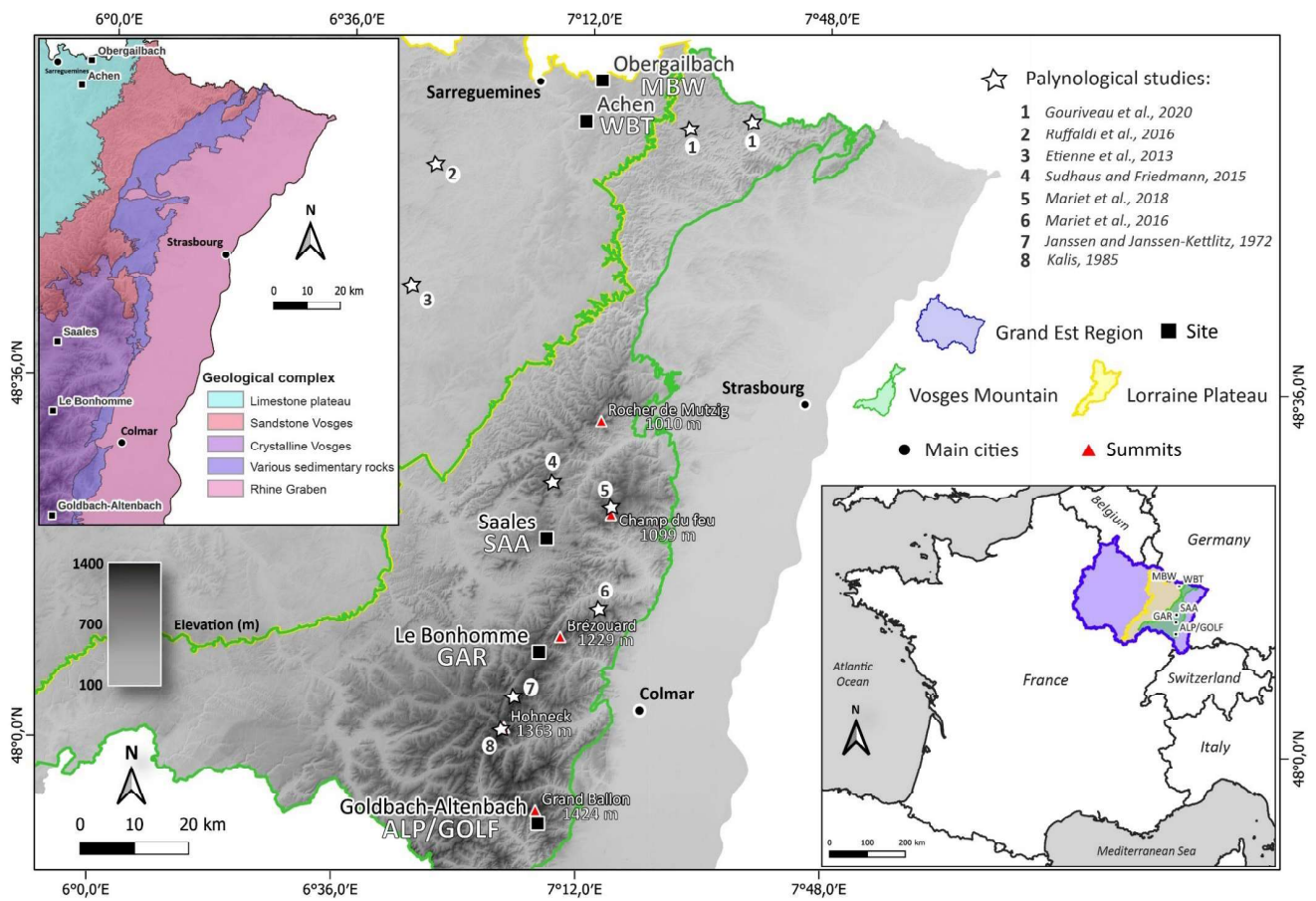


Figure 8: Location of study sites carried in or near the Vosges Mountain range. Location of the Grand Est administrative region, the Vosges Mountain range and Lorraine Plateau (bottom right of the image). Location of geological outcrop (top left of the image).



### 2.2.2. MBW and WBT (Lorraine Plateau)

MBW lynchet, located in the municipality of Obergailbach (57), is situated on a northern 9 % gentle slope with an altitude of 352 m (Figure 9a). The site is currently located under a sparse forest. Land use is mostly dominated by grassland and crops. In the site vicinity, some lynchets are still preserved and often topped by hedges. The vast re-parcelling operation of the mid-20<sup>th</sup> century (Flatrès & Flatrès, 1997) may have erased a large part of the lynchet system.

WBT lynchet, located in the commune of Achen (57), is situated on a northeastern slope of 15 % and an altitude of 283 m (Figure 9b). The site is currently on a meadow with a tree hedge (~15 m high) above the lynchets. Within a few years, the height of the trees could redefine the land use as a sparse forest with a significant herbaceous layer. The majority of lynchets are under meadow, while some are under forest. The lynchet network is dense and presents important homogeneity plots with ~20 m of space between each. Presumably, the vast re-parcelling operation has removed a large majority of the lynchets present on this slope and in the village. A stone wall resulting from the removal of field stones is located a few meters from WBT. Near the site, land use is dominated by meadows, with a much smaller forest on top of the slope and a few fields.

### 2.2.3. SAA, GAR, ALP et GOLF (Vosges Mountains)

SAA lynchet, located in Saâles municipality (67), is situated on a southeastern slope of 12 % and a moderate altitude of 582 m (Figure 9c). The site is currently on a meadow in the vicinity of a forest. A number of lynchet networks are well preserved and have been identified with important homogeneity plots. In the site vicinity, land use is dominated by grassland and forest. Archaeologically, the commune has numerous mining sites, including a 16<sup>th</sup> century mining site located upstream from the site at ~150m.

GAR lynchet, located in Le Bonhomme commune (68), is situated on a northeastern slope with an average of 13 % and a high altitude of 835 m (Figure 9d). The site is currently on a meadow in the vicinity of a forest. In the GAR site vicinity, the identified lynchet network is moderate, with the presence of numerous stone walls adjacent to the site. In addition, numerous stone walls and lynchets were identified ~1 km away. The land use is dominated by grassland and woodland. Archaeologically, the commune has numerous mining sites and metallurgical furnaces (4) dating from the 15<sup>th</sup> and 16<sup>th</sup> centuries. Two metallurgical sites are in the site vicinity at ~200m and ~400m.

ALP and GOLF lynchets, both located in Goldbach-Altenbach commune (68), are situated on a southwest and southeast slope with significant slopes of 19 % and 22 %, and high altitudes of 857 m and 685 m. (Figure 9e and f). The ALP site is currently on grassland near a forest, while the GOLF site is under forest. The identified lynchet network is extremely dense and homogenous, regularly spaced at 10 to 20 m apart depending on the slope, with the presence of numerous stone walls. Land use is dominated by forest and some grassland.

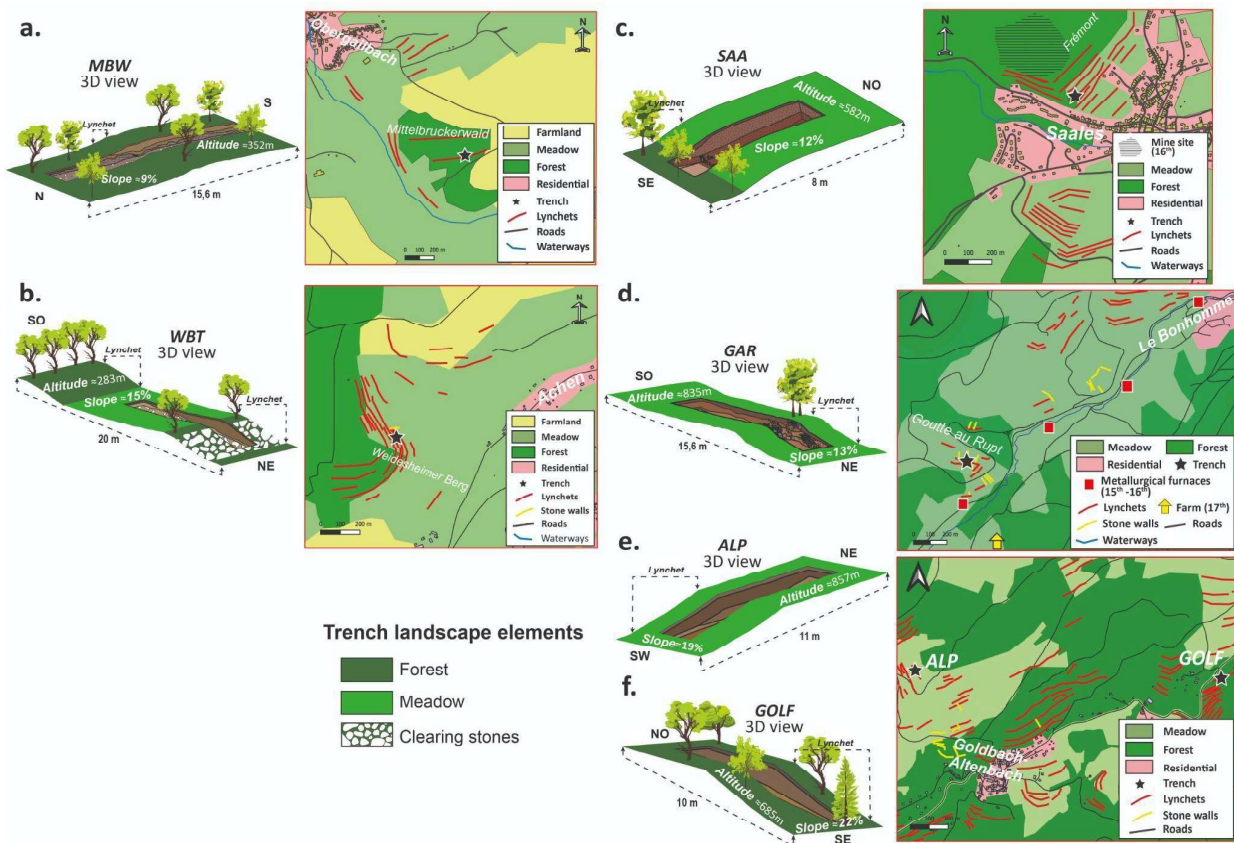


Figure 9: Land use map of the MBW (a), WBT (b), SAA (c), GAR (d), ALP (e) and GOLF (f) sites with the Lynchet system (red line), some of which are associated with stone walls (yellow line). Location of the trench (black star) in the MBW lynchet in Obergaillbach municipality (a); Location of the trench (black star) in the WBT lynchet in Achen municipality (b); Location of the trench (black star) in the SAA lynchet in Saâles municipality with an archaeological site (c); Location of the trench (black star) made in the GAR lynchet in Le Bonhomme commune with archaeological sites (d); Location of the trench (black star) made in the ALP and GOLF lynchet in Goldbach-Altenbach commune (e and f).

## 2.3. Methods

### 2.3.1. Geoarchaeological data

#### 2.3.1.1. Pedological analysis (Figure 10)

Six soil profiles were sampled every 5 cm (e.g., 0-5 cm, 5-10 cm, down to the bottom of the trench) in the part of the trench with the thickest pedo-sedimentary accumulation. Depending on bulk density and coarse elements, the samples are between 100 and 400 g. All samples were oven-dried at 40°C and sieved through a 2 mm mesh. Total carbon (C(t)) analyses were carried out on ground samples with a Flash 2000 N and NC elemental analyzer, as well as the measurement of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) to determine soil organic matter. A particle size analysis was performed on each sample using a Beckman Coulter LS13 320 laser particle size analyzer. The texture of the soil profiles is determined from the United States department of agriculture (USDA) soil texture triangle. Micromorphological and macromorphological analyses were carried out for the ALP and GOLF soil profiles (Schwartz et al., 2020).

#### 2.3.1.2. Pedoanthracology

In the 6 profiles, samples were taken from the soil horizons of interest from the upper to the lower limit to determine the clearing (forest) phases. Because bioturbation generates fragmentation as well as burial of charcoals, there is almost no stratification of charcoals in soils (Carcaillet & Talon, 1996; Carcaillet, 2001; Schwartz et al., 2005). We have therefore chosen to match the sampling of the other indicators used in the study to be able to develop a general analysis that is as complementary as possible. Sampling the upper and lower limits of the soil horizons, and those formed by pedosedimentary accumulation, allows further discussion of the possible inherited charcoals by transfer to the slope. Horizons less than 15 cm thick were not sampled. This arbitrary limit is chosen to reduce the number of samples and potentially redundant analysis. A total of 14 soil samples between 1 and 7 kg were taken from the selected horizons of each lynchet. Charcoals > 1 mm were extracted from the soil samples by wet sieving and recovered by flotation. Charcoals < 1 mm were not considered in this study, as they are generally too small for taxonomic identification. We determined the total charcoal richness of the soil as the concentration of charcoal per unit of sediment: charcoal concentration in soil in mg/kg (Figure 10). This is the dry weight in mg of charcoal pieces larger than 1 mm divided by the dry weight of the soil profile in kg (Talon, 2010; Robin et al., 2014). This provides comparable quantitative data between the different soil horizons. We also obtained comparative data for soil taxonomic assemblages. All charcoal fragments extracted from the soil samples were taxonomically identified using a diascope microscope (Zeiss Axio Imager.M2m, ×100, ×200, ×500) based on wood anatomy atlases (Schweingruber, 2016) and the reference collection of charred wood of the Image, Ville, Environnement laboratory (LIVE UMR 762, University of Strasbourg). The results of the analysis are expressed as the number of the taxon in relation to the total number: charcoal taxonomical spectrum, expressed in % (Figure 10). In the WBT

and SAA soil profiles, some charcoals >5 mm were extracted directly, identified and dated, and were not integrated in the analysis of the charcoal concentration in soil or the charcoal taxonomical spectrum (Figure 10). Currently, only the analysis of the fraction >2mm has been completed on SAA, ALP, and GOLF. Enough dates for SAA have not yet been obtained.

#### 2.3.1.3. Radiocarbon dating ( $^{14}\text{C}$ )

Charcoals sent for dating were selected according to their species, the number of charcoals in the profile, and sometimes the horizon in which the charcoal was located. Consequently, four charcoals were dated at the Beta Analytic Laboratory and twenty-seven charcoals were dated at the Poznan Radiocarbon Laboratory, using AMS (acid-alkalinepretreatment) radiocarbon dating. Calibrations were calculated with the Calib 8.20 (Stuiver et al., 2022) calibration program using the IntCal20 atmospheric curve calibration (Reimer et al., 2020). A total of 31 charcoals were dated (Figure 11): 8 out of 17 identified in MBW, 6 out of 62 identified in WBT, 2 out of 9 identified in SAA, 9 out of 256 identified in GAR, 4 out of 164 identified in ALP, and 2 out of 195 identified in GOLF.

#### 2.3.1.4. Near infrared spectroscopy

Qualitative near infrared spectroscopy (NIRS-qual) is an analytical method involving diffuse reflectance measurement in the near infrared region (1100-2500 nm), allowing the determination of the vegetation source of soil organic matter. The NIR spectra are the fingerprint of the soil organic matter (Palmborg & Nordgren, 1996; Coûteaux et al., 2003). Use of NIRS for evaluation of the vegetational origin of the soil organic matter was established by Ertlen et al. (2010). The approach compares the NIR spectrum of a sample of an unknown origin with a library of reference samples using multivariate discriminant analysis. The spectral reference library of 1365 spectra was established based on samples from soil horizons or soil material with well-known organic matter origin. Two main vegetation groups are distinguished: woodland and open.

Samples were taken from the same six profiles as pedoanthracology, but with a systematic vertical resolution from 5 cm to 10 cm. All samples were oven-dried and sieved through a 2 mm mesh, then placed one by one in a rotating cup (diameter 9 cm) and scanned in the wavelength range of 10,000 to 4000  $\text{cm}^{-1}$  with a resolution of 2  $\text{cm}^{-1}$ . An FT-IR Frontier Spectrometer (PerkinElmer, USA) was used with a  $\text{CaF}_2$  beam-splitter, with an integrating sphere and an InGaAs detector. The measured reflectance (R) was transformed into absorbance (A) by using the following equation:  $A = \log_{10}(1/R)$ .

For mathematical pretreatment and statistical treatment, we followed the methodology proposed by Strouhalová et al. (2019), supported by Ertlen et al., (2010) and Viscarra Rossel and Webster (2011). The resulting matrix has 1510 rows (1364 reference spectra + 156 unknown samples) and 737 columns (8  $\text{cm}^{-1}$  wide wave number bands). The Mahalanobis distance is used to evaluate the discrimination between the two groups of reference samples (open landscape / forest). The calculated two-sided model of the reference library was applied on the set of 156 spectra samples from the 6 studied trenches with unknown history. The comparison of values from the multiple discriminant analysis of the unknown data

with the reference library data enables an interpretation of the soil organic matter origin (open landscape or forest). To study the evolution of the vegetation over time, we examined the score of the multiple discriminant analysis of the NIR spectra at every sampled depth. This approach allows for the identification of relevant tendencies during the accumulation phase until present day (Ertlen et al., 2015).

### 2.3.2. Geo-historical data

Geo-historical data are very valuable as they allow the estimation of land use over ~260 years. Several types of old maps from the mid-18<sup>th</sup> and mid-19<sup>th</sup> centuries can be used to determine land use before the 20<sup>th</sup> century:

- The 1760 finage plans or Alsace cadastre is a set of maps made by the commune and is a faithful representation of the land use almost covering the entire Vosges Mountains (Figure 8). The Alsace cadastre (Figure 13) was produced between 1760 and 1764 at a scale of 1:5280 on the initiative of Jacques Pineau (Baron de Lucé). This tax cadastre was made in order to achieve a fairer compensation of the tax burden by the kingdom of France, to which the majority of Alsatian territory was attached after the treaties of Westphalia in 1648 (Tschaen, 2011).

- The topographic atlas of Bitche County was completed in 1758 (ADM Archives départementales de Metz, 1758). The purpose behind the creation of these maps was to facilitate forest development for the Duke of Lorraine (Rochel, 2017). These maps cover an area of 562 km<sup>2</sup>, partially in the Bitche region and partially in the northeastern Lorraine Plateau (Figure 8). They represent high resolution information, as is the case with the Alsace cadastre, because of the ~1:2983 scale.

- The *Etat Major* maps (freely available at <https://www.geoportail.gouv.fr/carte> or <https://remonterletemps.ign.fr/>, Institut géographique national (IGN), 2022) made between 1818 and 1866 cover the whole of France (in 273 sheets) at 1:80,000, and from 1830 at 1:40,000 (Figure 13). These maps give an accurate picture of land use, although this accuracy seems to deteriorate in mountainous areas (Dupouey et al., 2007a).

For the post-20<sup>th</sup> century period, aerial photographs (Figure 13) and the 1950 map of the Institut National Géographique (IGN) allow land use to be determined accurately. For the 21<sup>st</sup> century, satellite images were used.

A timeline was created from these geo-historical data, delimited by a boundary between the mid-17<sup>th</sup> century and >2010 (Figure 13). The minimum threshold of 1648 was chosen because of the Thirty Years' War, which for the sites located in the Vosges led to a drastic fall in population between 1630 and 1634 (Garnier, 2004). For example, the village of Le Bonhomme (Figure 8) was decimated and left deserted for several years (Jéhin, 1991; Baradel, 2003). As a result, the end of the Thirty Years' War (1648) led to fields becoming overgrown, and some sites were abandoned. The repopulation of this part of the Vosges progressed slowly until the end of the 17<sup>th</sup> century, and numerous ordinances were promulgated under Louis XIV to encourage settlers to move onto abandoned lands (Garnier, 2004). The minimum threshold was also chosen according to the sites under forest, inducing a forest presence of at least > 50 years.

## 2.4. Results

### 2.4.1. Pedological and pedoanthracological data

#### 2.4.1.1. Trench analysis

The SAA, GAR, ALP, and GOLF sites are in the Vosges Mountains (Figure 8) and were developed on alterites (periglacial slope formations). MBW and WBT are in the Lorraine Plateau (Figure 8) and were developed on marl-limestone slopes. The trench profiles all show soil-sediment accumulation at the edge of the soil bank (Figure 10). This confirms that these former fields are lynchets.

The soil profile of the MBW trench (Figure 10a) does not present a constant homogeneity (texture and structure). In fact, the texture of the soil is composed of a dominant silt loam (USDA) in the S1 horizon and a dominant silty clay loam (USDA) in the S2 horizon with a massive structure. Texture is very similar to that of its parent material (marl-limestone). The downstream part does not have a silt loam horizon but a darker coloured S3 silty clay loam (USDA) horizon (more incorporated in organic matter). The downstream part of the trench has a poorly developed soil that has probably been truncated by erosion. This textural difference may be related to the transfer of soil materials by runoff or tillage erosion. The S1 horizon is, therefore, a colluvial horizon originating from soils (neoluvisols) formed on loess veneers located at the top of the slope, loess being composed of 40 % to 70 % silt (Smalley et al., 2011).

The soil profile of the WBT trench (Figure 10b) shows a constant homogeneity (texture and structure) with a very marked thickening at the lynchet. The whole profile has a silty clay loam texture (USDA) with a massive structure. The soil is very stony (10 to 15 cm in height), forcing the farmers of the time to remove the stones. This may explain the presence of a stone wall on the soil bank (Figure 9b), a 'small' stone wall in the terminal part of the trench (Figure 10b), as well as a more imposing stone wall slightly inclined in the axis of the slope near WBT (~5 m) (Figure 9b and Figure 15). The erosive phenomena (runoff) are probably very limited in view of the very clayey texture (Cerdan et al., 2006).

The soil profile of the SAA trench (Figure 10c) shows a consistent homogeneity (texture and structure) with a thickening at the lynchet. SAA has a drainage furrow under the soil bank, probably put in place at the time of site cultivation. The whole profile has a sand texture (USDA).

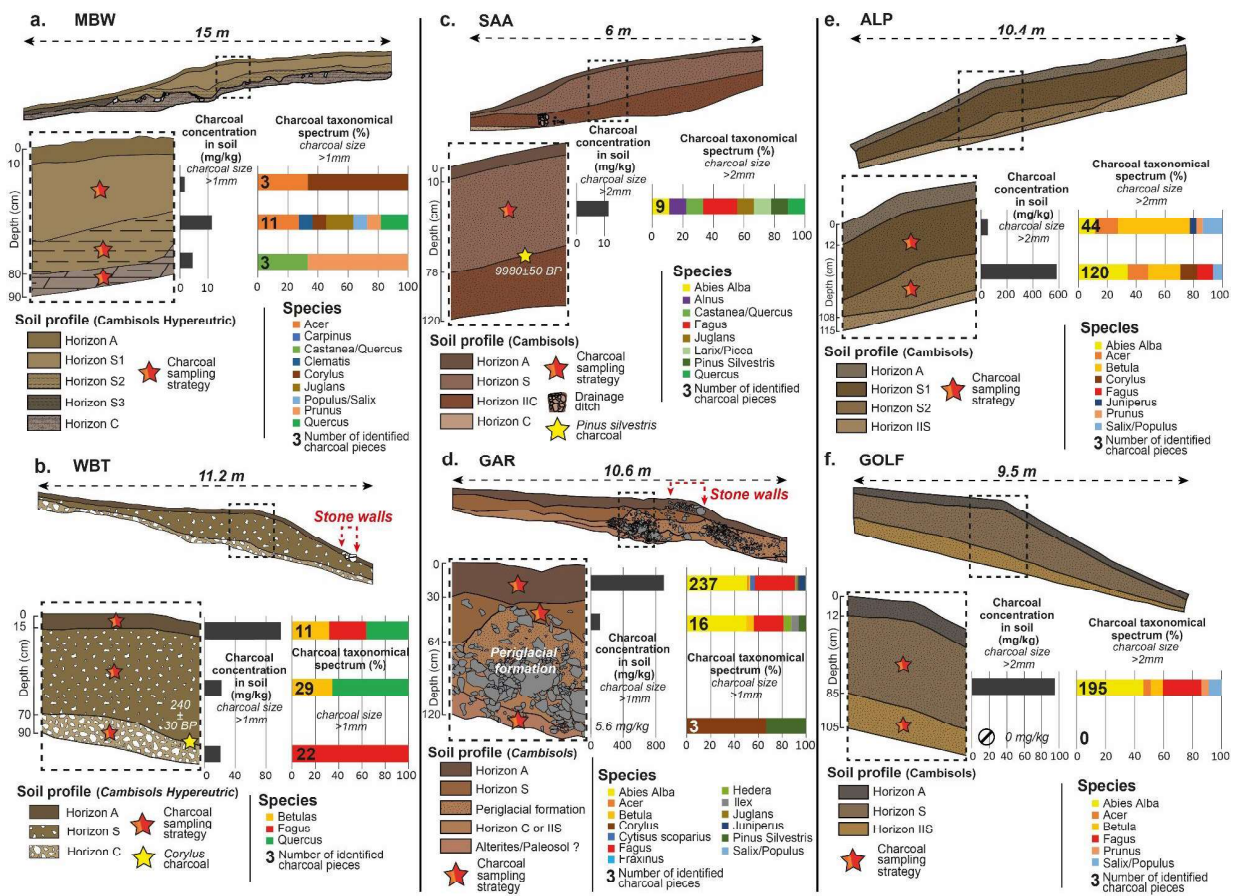


Figure 10: Trench soil profile with charcoal concentration in soil per taxa (mg/kg) (mg/kg) per sampled horizon and the part (%) of charcoal pieces per species sampled in the lynchet at site MBW (a), WBT (b), SAA (c), GAR (d), ELP (e) and GOLF (f); Some charcoals were sampled opportunistically (yellow star) at site WBT (b) and SAA (c).

The soil profile of the GAR trench (Figure 10d) is more complex, as a periglacial formation disrupted the profile. This formation is composed of a pile of boulders and centimetric stones of various sizes with a very fine interstitial matrix (silty-sandy-clay) and numerous gravels. The whole of the periglacial formation shows no pedological features. A stone wall is present at the level of the soil bank in the A horizon (probably due to the spalling of the GAR site). The downstream profile of GAR, like MBW, appears to have been truncated by erosion (runoff or tillage). Textural analyses in the field revealed a sandy matrix in the A horizon and a sandy-silty matrix in the S horizon.

The soil profile of the ALP and GOLF trenches (Figure 10e and f) show a consistent homogeneity (texture and structure) with a significant thickening at the lynchet. The texture in both trench profiles is sandy loam (USDA). The only difference between these two profiles is the S2 horizon, which has coarser colluvial material (coarse sand and gravel in large numbers). Micromorphological analyses were carried out by Schwartz et al. (2020), revealing secondary dusty-silty linings, demonstrating that the soil surface had been exposed by ploughing, stumping, or agricultural work (Deák et al., 2017). The analyses also showed that the base of the soil had clayey coatings typical of illuviation phenomena in the formation of a luvisol LV horizon laid down under forest cover. Macromorphological observation revealed levels richer in grass-like phytoliths suggesting a prairie-type open landscape. The appearance of these phytoliths is blunt and has an isolated configuration attesting to mechanical tillage (Vrydaghs et al., 2017).

#### 2.4.1.2. Analysis of taxon and charcoal concentration in soil

Comparing the charcoal concentration in soil of the six studied sites, it appears that the charcoal concentration of the sampled soils varies greatly within the sampled soils trenches and between the sites. This is a common observation about the soil charcoal records (Talon et al., 2005; Robin et al., 2012, 2018; Feiss et al., 2017). This is related to on-site conditions influencing the past fire regime and the possibilities of man-made fires (e.g., type of fuel, biomass to burn, fire intensity), which then induce large heterogeneities of the on-site charcoal signal. Nevertheless, charcoal has been found on all the studied sites and permitted the identification of 703 charcoal pieces in total (Figure 10).

In MBW, nine taxa were identified (Figure 10a). No single taxon dominates the whole profile. The profile consists of two pioneer species (*Clematis* and *Salix/Populus*), numerous post-pioneer species (*Acer*, *Corylus*, *Carpinus*, *Juglans*, *Prunus* and *Quercus*), and no dryads. The S2 horizon is composed of a greater number of charcoals (11) and taxa (8). The charcoal concentration in soil is highest in the S2 horizon with ~12 mg/kg, five times higher than in the S1 horizon (~2.4 mg/kg).

In WBT, only three taxa were identified (Figure 10b). *Fagus* and *Quercus* dominate the whole profile. Oak is a post-pioneer species (secondary species) while beech is a sciaphilous species (Dumé et al., 2018). *Betula* is a pioneer species that can be found in relatively open or degraded forests (Dumé et al., 2018). The charcoal concentration in soil is very high in the A horizon (~100 mg/kg), i.e. five times higher than in the S horizon (~22 mg/kg), while the number of charcoals found is higher in the S horizon (29 compared to 22 in the A horizon). This indicates that the charcoals in the S horizon are more fragmented and smaller than in the overlying horizon.



In SAA, eight taxa were identified (Figure 10c). No single taxon dominates the whole profile. The species spectra consist of pioneer (*Alnus*), post-pioneer (*Juglans*, *Pinus sylvestris*, *Quercus*), and dryad species (*Abies alba* and *Fagus*).

In GAR, thirteen taxa were identified (Figure 10d). Many pioneer species are represented such as *Betula*, *Salix/Populus*, *Cytisus scoparius* and *Juniperus*, as well as post-pioneer species (*Acer*, *Corylus*, *Fraxinus*, *Juglans* and *Pinus sylvestris*) and dryads (*Abies alba*, *Fagus*, *Hedera* and *Ilex*). *Fagus* and *Abies Alba* largely dominate the species spectra. The A horizon has the highest total charcoal concentration in soil with 897 mg/kg. The number of charcoals is also very high with 237 charcoals identified. The charcoal concentration in soil decreases significantly in the S horizon with 108 mg/kg with only 16 charcoals showing the presence of some large charcoals. In the 'alterites or paleosol' layer, the charcoal concentration in soil drops drastically to 5.6 mg/kg, consisting of 3 charcoals identified as *Corylus* and *Pinus silvestris*. As pedological processes, mainly bioturbation, are almost nonexistent in the periglacial formation, the transfer of charcoal between horizons seems very limited.

In ALP, eight taxa were identified (Figure 10e). *Betula* dominates the S1 horizon and *Abies alba* dominates the S2 horizon. The profile consists of three pioneer species (*Betula*, *Juniperus* and *Salix/Populus*), three post-pioneer species (*Acer*, *Corylus* and *Prunus*), and two dryad species (*Abies alba* and *Fagus*). The S2 horizon is composed of many charcoals (120), which is three times as many as the S1 horizon (44). The charcoal concentration in soil is highest in the S2 horizon with ~581 mg/kg, eleven times higher than in the S1 horizon (~52 mg/kg).

In GOLF, six taxa were identified (Figure 10f). *Abies alba* and *Fagus* dominate the S horizon. The profile consists of two pioneer species (*Betula* and *Salix/Populus*), two post-pioneer species (*Acer* and *Prunus*) and two dryad species (*Abies alba* and *Fagus*). The S horizon is composed of a very large number of charcoals (195) and no charcoals >2 mm for the IIS horizon. The charcoal concentration in soil is ~95 mg/kg.

## 2.4.2. Charcoal dating (Figure 11)

Out of 31 charcoals, 3 date from the Mesolithic period (9000-5000 BC). 3 charcoals are dated to the ancient period (2 charcoals from the Gallo-Roman period and 1 charcoal from the Iron Age), 11 charcoals are dated to the Middle Ages, 11 charcoals are dated to the modern/contemporary period (15-20<sup>th</sup> century) and 3 charcoals are dated between the medieval and modern/contemporary period. In total, 25 charcoals out of 31 (81 %) are dated to the medieval or contemporary period (6-20<sup>th</sup> century).

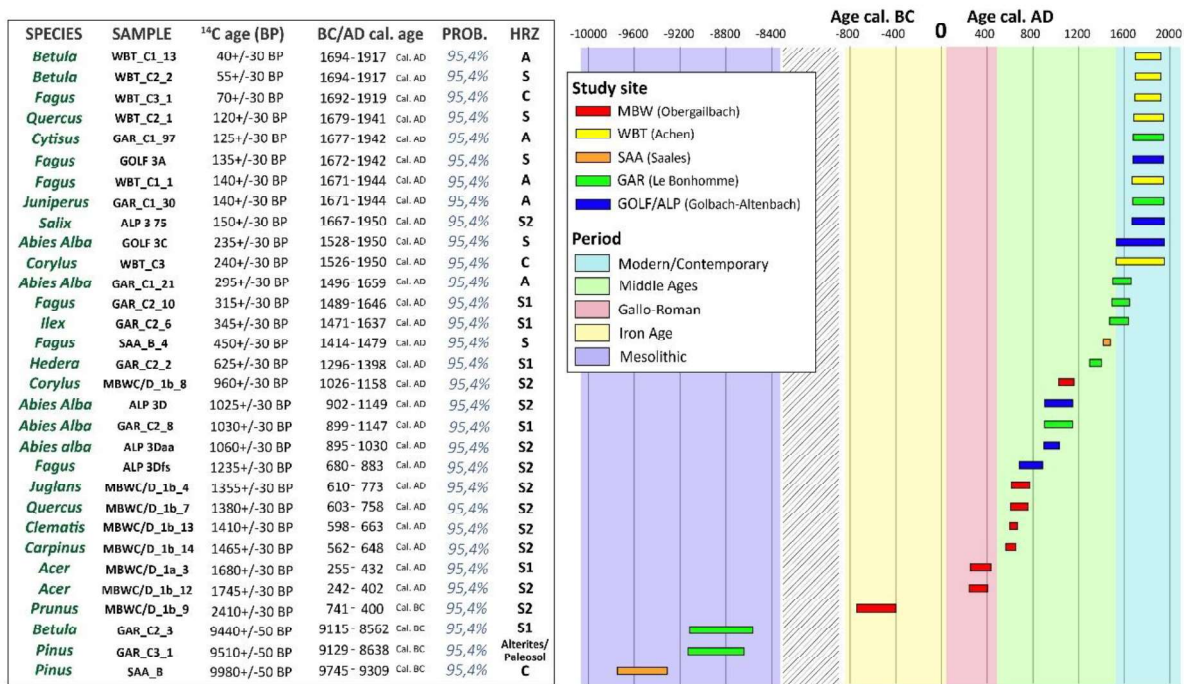


Figure 11: AMS-<sup>14</sup>C dates of the single charcoal pieces from the investigated sites MBW, WBT, SAA, GAR, ALP and GOLF (left). Calibration in BC and AD based on the IntCal20 atmospheric curve calibration (Reimer et al., 2020). Timeline with each dating in chronological order (right) from oldest to the left to most recent on the right for each site: MBW (red), WBT (yellow), SAA (orange), GAR (green), GOLF and ALP (blue)

### 2.4.2.1. Dating and tree taxa

The charcoals dated to the Mesolithic period (*Pinus* and *Betula*) correspond to the regional palynological data from the Vosges Mountains (Figure 11, Hatt, 1937; Sudhaus & Friedmann, 2015; Gouriveau et al., 2020). The species dated to the ancient period all correspond to post-pioneer species. Species dated to the medieval period show one pioneer species (*Clematis*), 4 post-pioneer species (*Corylus*, *Carpinus*, *Juglans*, and *Quercus*) and 6 dryad species (*Abies alba* X3, *Fagus* X2 and *Hedera*). The species dated to the modern/contemporary period are pioneer species for 5 charcoals (*Betula* X2, *Salix*, *Cytisus scoparius* and *Juniperus*), post-pioneer species for 2 charcoals (*Corylus* and *Quercus*) and 7 charcoals are dryad species (*Abies alba* X2, *Fagus* X4 and *Ilex*).

### 2.4.3. Organic matter origin (NIRS)

From the six analyzed profiles, the organic matter content was sufficient in all profiles for ALP, GOLF, GAR and WBT (Figure 12). On MBW and SAA, the organic matter was too low at the bottom of the profile and results were discarded. GAR, ALP and GOLF show a similar tendency with an open landscape signal or tendency on the first 15 cm, and a clear tendency to forest vegetation at the bottom of the profile. However, the GAR profile shows a slight tendency to openness around 80 cm depth. The MBW profile shows a near forest signal at the top moving fast to an open landscape from 10 cm. The

top of the SAA profile and the entire WBT profiles show negative values that are clearly on the side of the forest but out of the reference spectrum range, which make it difficult to interpret.

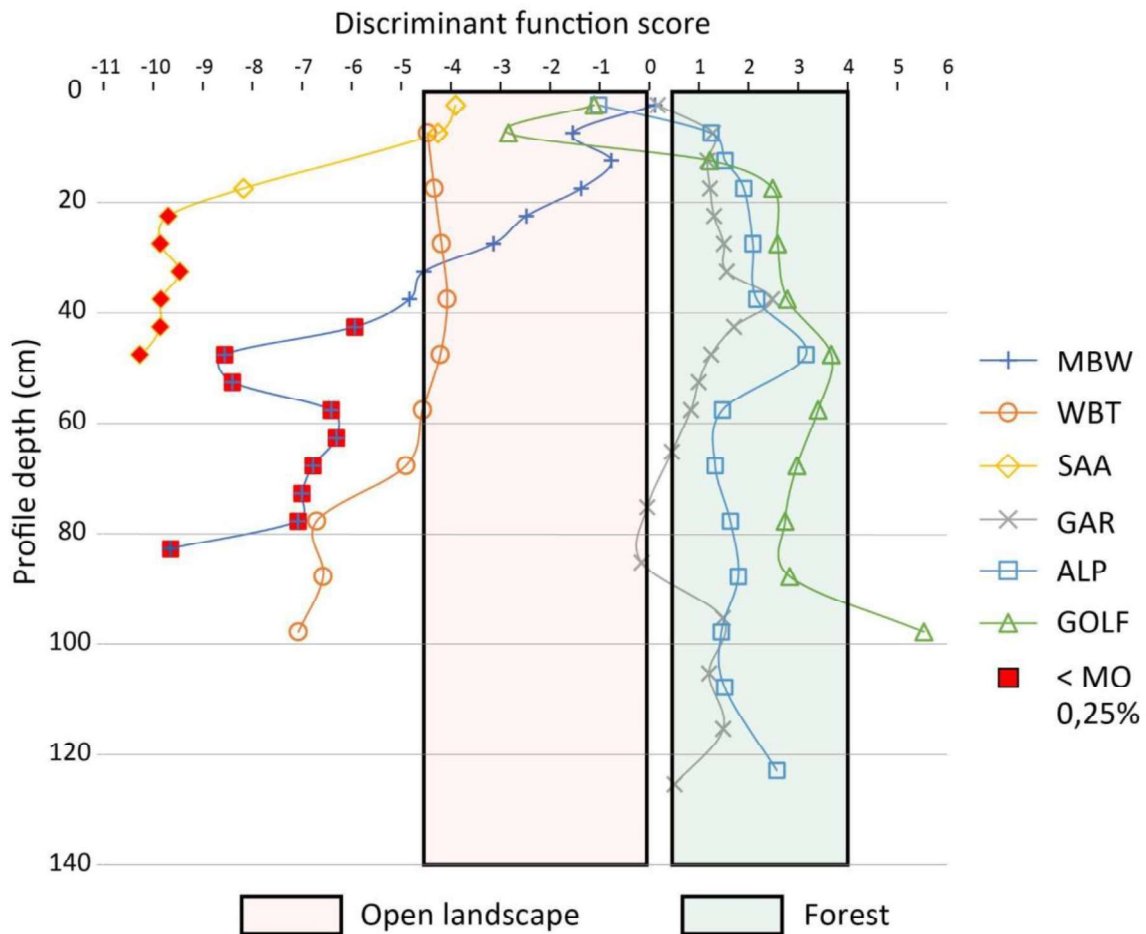


Figure 12: Discriminant scores obtained from the NIR spectra measured on soil organic matter from the six pedosedimentary profiles.

#### 2.4.4. Geo-historical analysis

The geo-historical data (Figure 13) shows a bipartition of cultivated sites between ~1760 and today. The WBT and SAA sites are still cultivated during this period. WBT has been cultivated since at least ~1760. The SAA site was cultivated in the mid-19<sup>th</sup> century, unfortunately no data is available for the earlier period, as the Alsatian cadastre of 1760 is missing in this commune. MBW, GAR, ALP and GOLF have not been cultivated since at least ~1760. The land use of sites WBT, SAA, GAR and GOLF has been changing since 1760, with at least one period under grassland. In contrast to the MBW and ALP sites, whose land use has remained stable, under forest or grassland, since at least ~1760. SAA, GAR and GOLF sites have been under forest at least once, unlike the WBT site. SAA is the only site that has had three land use changes in ~200 years.

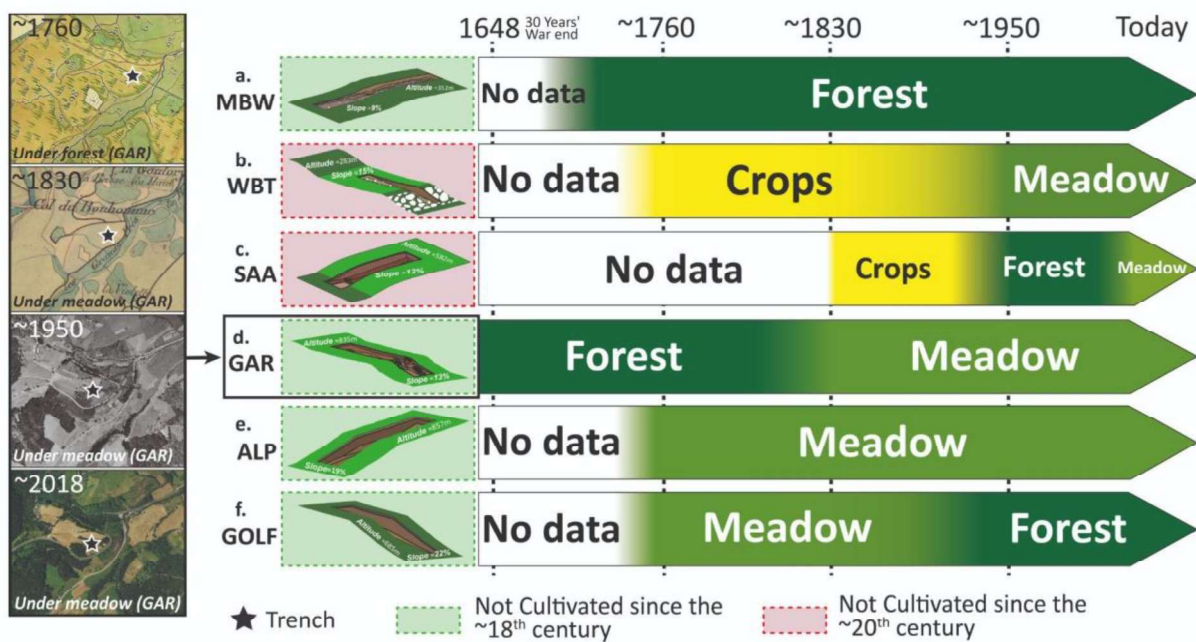


Figure 13: Timeline (right) of geo-historical data (example with site GAR, left, section 2 part 2.3) for sites MBW (a), WBT (b), SAA (c), GAR (d), ALP (e) and GOLF (f). The sites are distinguished into two categories: not cultivated since the ~18<sup>th</sup> century (green rectangle) and not cultivated since the ~20<sup>th</sup> century (red rectangle).

## 2.5. Discussion

### 2.5.1. Lynchet as an archive of past environment

From the geoarchaeological and palaeoecological point of view, lynchets are hybrid objects. From a geomorphological point of view, this is an accumulation of colluvial material. Profiles were selected where the soil bank is the thickest. Nevertheless, the profiles never clearly present a stratified deposit. On the contrary, the units described look like a succession of soil horizons. The processes of profile heightening depend on the importance of the dominant factors in the accumulation process (slope, tillage erosion, texture, etc.). Nevertheless, the accumulation process behind the hedge can be relatively slow.

Consequently, sediments are never really buried and the pedogenetical process keeps going during the aggradation process. The analyzed material can be interpreted as a cumelic soil (i.e., slow accumulation of sediment coincident with weathering; Johnson et al., 2015). While geomorphological processes are drastically reduced with the cessation of cultivation, the pedogenetical processes continue until present day, which favors the predominance of soil traits. For these reasons, the archives must be considered as a soil archive without stratigraphic organization, and without possibility to read a chronology from bottom to the top (Brasseur et al., 2022). The collected charcoals may be analyzed as a multiple fire assemblage at the profile scale and not at the layer scale. The NIRS approach is different because, despite bioturbation, soil organic matter presents a mean residence time gradient that allows

a chronological interpretation (Ertlen et al., 2015). The lynchets allow us to determine the land use trajectories of a slope or at least the part upstream of the lynchet. As charcoals above 0.4 mm cannot be transported over long distances (Clark, 1988), it is a local paleo woody indication, unlike palynology (Feiss et al., 2017; Robin et al., 2018). Using only pedoanthracology limits the interpretation of the dates. Combined with multiple data (Figure 14), it is possible to hypothesize how land use has changed over time.

## 2.5.2. Lynchet medieval origin

Among the 31 dated charcoals, three date from before the arrival of the first cultivators in Europe, ~5500 BC (Kalis, 1985). The charcoals dated to the Mesolithic period do not provide any relevant information to this study (Figure 11). They can either be inherited from the paleosoil buried under the lynchet, especially when they were found at the bottom of the profile, or they can be discharged from the soils upstream and transported with erosion processes. This process can also concern younger charcoals that match the history of agriculture and could mislead the interpretation. Nevertheless, charcoal dating shows a higher frequency from the Middle Ages onwards and geo-historical data suggest that MBW, GAR, ALP and GOLF were abandoned before the middle of the 18<sup>th</sup> century (Figure 14). However, from these data, asserting a medieval origin of the lynchet systems in the study area is not straightforward. The regional history and palaeoecological data that shows a very different chronology of anthropization between the Vosges Mountains and the Lorraine Plateau can strengthen the medieval hypothesis.

### 2.5.2.1. Vosges Mountains

Archaeological evidence from the Crystalline Vosges before the medieval period are weak. In the Vosges Mountains, many abbeys were founded between the end of the 6<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> centuries. In the southern Vosges, four abbeys were founded: Saint-Amarin around 623 AD, Murbach around 728, Liepvre in 770, and Masevaux around 780 (Bornert, 2008). Through royal donations and great lords, the abbeys quickly acquired large properties and thus, power. For example, Murbach received from Charlemagne, around the year 800, the upper half of the Thur Valley, of which the ALP and GOLF sites are a part. At a time when feudalism was in its infancy, the abbeys exercised control over most of the land outside the royal and ducal domains in the 9<sup>th</sup> and 10<sup>th</sup> centuries (Parmentier, 2012). This suggests that it was the ecclesiastical powers that were at the origin of this mode of land exploitation. Nevertheless, cereal pollen reached its peak in the middle of the Middle Ages between the 11<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> centuries (Janssen & Janssen-Kettlitz, 1972; Kalis, 1985; Sudhaus & Friedmann, 2015; Mariet et al., 2018), parallel to the construction of numerous castles (> 45) and other abbeys between the 10<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> centuries (Bornert, 2008; Koch, 2012). Largescale mining of the Vosges Mountains also took place between the 8<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> centuries.

This period between the 8<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> centuries probably marks the establishment of lynchet systems. The end of the Middle Ages and the beginning of the modern period (14-17<sup>th</sup> century) is marked

by social disorganization, leading to a decline in agricultural activities and a concomitant forest reconquest according to pollen records (Mariet et al., 2018; Gouriveau et al., 2020). It could have been caused by several Black Death epidemics during the 14<sup>th</sup> century, as well as successive disastrous wars (e.g., the Hundred Years' War from 1337 to 1453), and reached its peak during the Thirty Years' War (1618-1648), so that the population of Alsace, the former easternmost region of the Grand Est, was halved by 1640 (Vogler, 1998). After 1648, it was progressively annexed by the Kingdom of France with the edicts of Louis XIV (1662, 1682 and 1687) to repopulate the devastated areas (Garnier, 2004; Emig, 2012). Since the last mountain range wide deforestation phase in the 18<sup>th</sup> century (Gebhardt et al., 2015), forestry and supporting industrial and pastoral activities have prevailed in the Vosges until the 20<sup>th</sup> century (Garnier, 2004). The regional history of the Vosges supports the hypothesis of a medieval origin of the majority of lynchets.

#### 2.5.2.2. Lorraine Plateau

Agricultural development of the Lorraine Plateau seems to start well before the Middle Ages (Etienne et al., 2013; Ruffaldi et al., 2016; Gouriveau et al., 2020). The MBW and WBT sites are located at low elevations (Figure 8 and Figure 9), where numerous archaeological sites, such as burial tombs, villae, and a Roman city, dated to the Iron Age and Gallo-Roman period are also present (< 4 km, Petit & Santoro, 2016; Boulanger, 2021), indicating a probable continuity of anthropization since at least the Iron Age. The Gallo-Roman period in the Lorraine Plateau already reaches a forest minimum with some areas dominated by meadows (Etienne et al., 2013), and others by cereal cultivation (Ruffaldi et al., 2016). In contrast to the Hautes-Vosges, the intensity of cereal cultivation does not only reach a maximum during the medieval period but seems to vary according to location (Figure 8). The palynological data in the vicinity of the MBW and WBT sites show a cereal maximum during the Middle Ages in ~1100 and a maximum deforestation in ~1150 (Figure 8, Gouriveau et al., 2020). This intensification coincides with the appearance of numerous abbeys during the Merovingian period (5<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> century, Gaillard, 1993) and the presence of funerary sites in this same period (Schmit et al., 2017). The diocese of Metz, which was probably founded at the end of the 3<sup>rd</sup> century (Choux, 1974), had a dozen abbeys in the 9<sup>th</sup> century (Gaillard, 1993). Two abbeys are located in the northeast of the Lorraine Plateau ~10km from the MBW and WBT sites. The late medieval period in the northeastern Lorraine Plateau is marked by reforestation (Gouriveau et al., 2020). This decrease in anthropization can be explained by the same social unrest such as epidemics, famines, and wars, observed in the Vosges Mountains. The regional history of the Lorraine Plateau shows that anthropization, and especially the presence of cereal cultivation, is proven as early as the Iron Age. The establishment of the lynchet systems in this region may have a medieval origin according to the charcoal we studied in MBW but this is not clearly confirmed by historical and pollen data.

## 2.5.3. Land use trajectories

### 2.5.3.1. MBW site: Lorraine Plateau

The dating in the MBW site profile shows four different periods. A *Prunus* is dated to 741-400 cal. BC, an *Acer* is dated to 255-432 cal. AD in the S1 horizon, 6 charcoals are dated to 242-402 cal. AD and 562-773 cal. AD in the S2 horizon, and a *Corylus* is dated to 1026-1158 cal. AD (Figure 14). The dating of the charcoals in the MBW site seem to be consistent with the regional dynamics of anthropogenic fires determined from carbonized microscopic particles and ashes found in a peat bog (~20 km from the sites) in the Northern Vosges (Figure 8). The study by Gouriveau et al. (2020) shows a strong increase in fires from the Iron Age onwards with two marked intensifications in the late Gallo-Roman period (~460) and during the Late Middle Ages (~1385) (Figure 14). The curves of crop pollens and charred particles show a strong similarity until the 12/13<sup>th</sup> century (Figure 14), indicating the potential use of fire to create cultivation areas. However, the four charcoal samples dated to the Iron Age, Gallo-Roman period and the Central Middle Ages provide no evidence in favour of the lynchet's establishment. The accumulation of colluvial material should have favored the contribution of numerous charcoals dated to the same periods (recall that 7 charcoals have been dated out of 11 identified in the S2 horizon, Figure 10 and Figure 14). The dispersion of <sup>14</sup>C ages in soils is often large. This may be related to three factors. The first being that charcoals can originate from different fire episodes and are intensively stirred and mixed in soils by bioturbation (Carcaillet, 2001; Schwartz et al., 2005; Goepp, 2007; Goepp et al., 2007; Robin et al., 2014). It is probably the case of *Acer* located in the S1 horizon, which the date inversion seems to point to. The data indicates that the two *Acer* charcoals come from the same tree. The second is influenced by slope, as erosion and transport downslope can lead to a mixture of charcoal assemblages that can generate inconsistencies in fire interpretation (Robin & Nelle, 2014). It is possible that the *Prunus* and *Acer* charcoals are linked to the destocking by runoff during the cultivation of the site and stored in the lynchet. The third is the "old wood" problem (Bowman, 1990; Carcaillet & Talon, 1996; Gavin, 2001). The two *Acer* charcoals dated between 242 and 432 cal. AD could correspond to the same *Acer* tree that can live up to 150 years (Dumé et al., 2018). The two Gallo-Roman charcoals could be contemporary with the charcoals dated between 562 and 773 cal. AD. There are two hypotheses that remain anecdotal but not impossible. The first hypothesis, where some chronologically erratic charcoal like *Corylus* (dated to 1026 and 1158 cal. AD) is a result of an amendment due to the use of ash as fertilizer (Poirier & Nuninger, 2012; Fournier, 2019), but ash seems to be used more in gardens (Koerner et al., 1999), rather than large plots. The second, is the cause of an unintentional fire, which some historical sources mention during the modern period (Garnier, 2004).

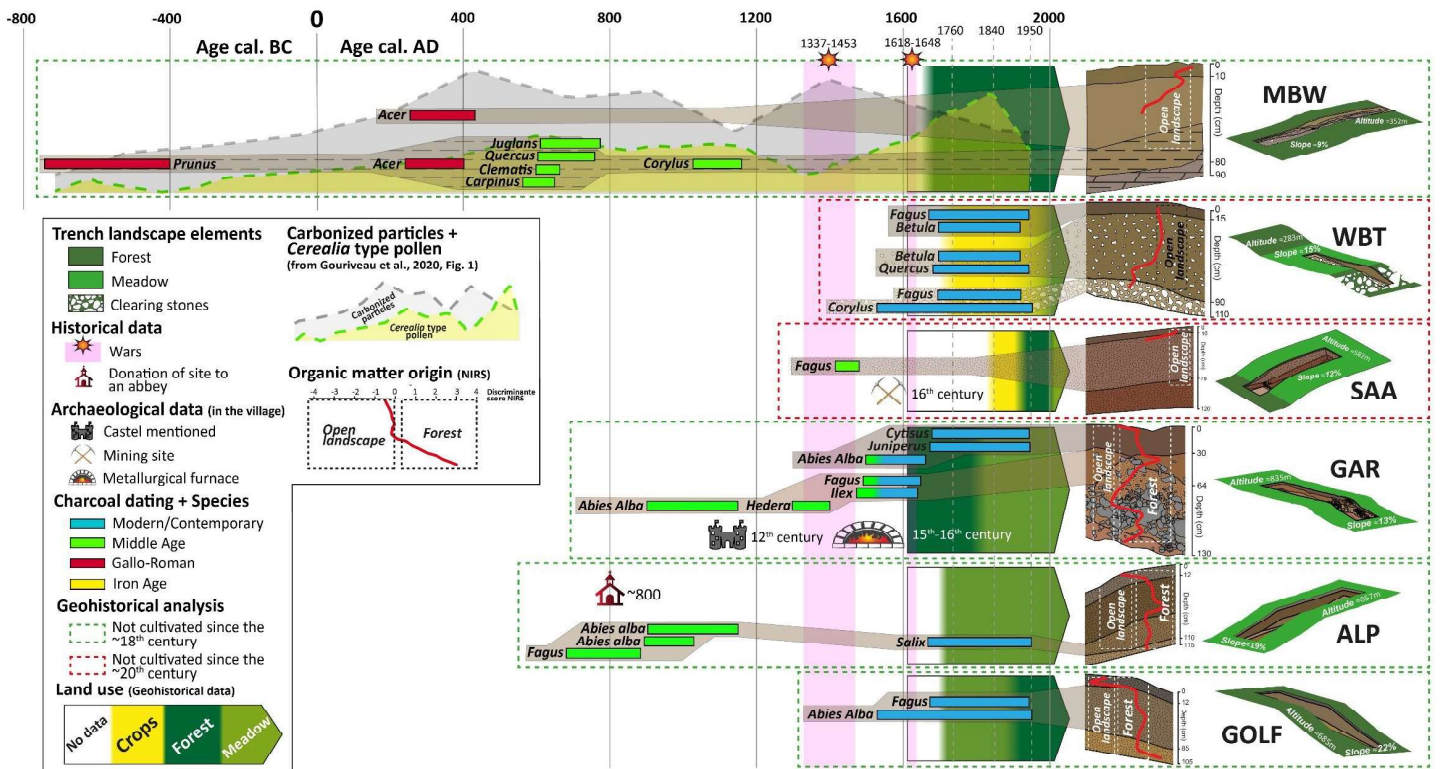


Figure 14: Timeline per site combined with geo-historical data, archaeological/historical data, pediaanthropological data (charcoal dating) and NIRS data. Cerealia type pollen data and carbonized particles (Gouriveau et al., 2020) data used only for MBW and WBT.



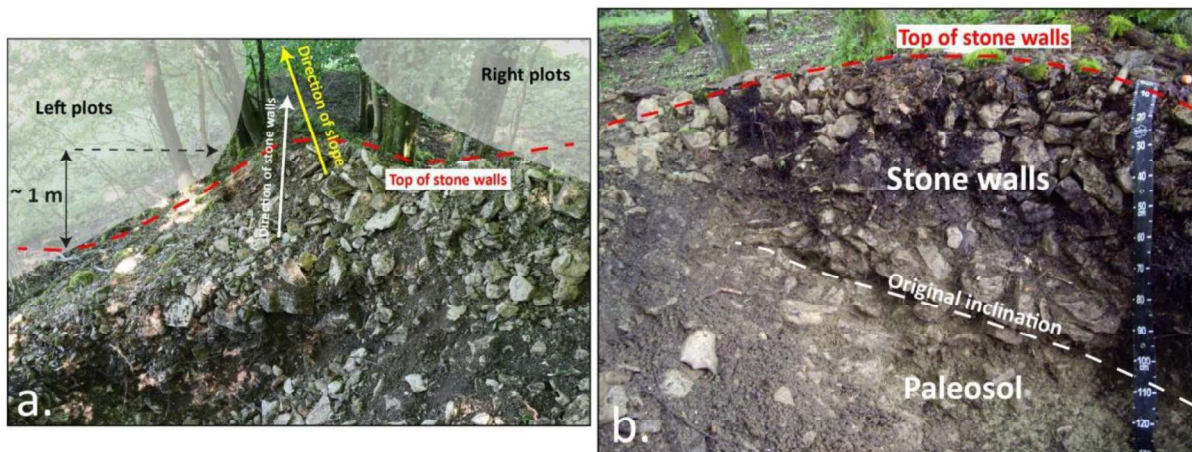
In addition, the maximum cultivation period appears to be reached in the ~7<sup>th</sup> century and was maintained until the end of the ~12<sup>th</sup> century (Gouriveau et al., 2020). This period corresponds to the four charcoals found in the S2 horizon dated between 562 and 773 cal AD (~650 cal AD). The number of dated charcoals corresponding (4 charcoals out of 11 identified, Figure 10) to the same period, the heterogeneity of the species, as well as the palaeoenvironmental data, plead in favor of a Merovingian origin for the lynchets. The burnt species (*Carpinus*, *Clematis*, *Quercus* and *Juglans*) are all post-pioneer, indicating a logged or more recent forest. It is possible that the forest has been managed since at least the Iron Age. In fact, the MBW forest (Figure 9) is still managed and has been for at least 250 years and shows the same phytocoenosis. This testifies in favor of a forest exploited well before the Merovingian period and explains the presence of charcoal dated to earlier periods. However, we cannot say whether all the lynchets present in the vicinity of the site are dated to the Merovingian period. It is possible that the charcoals dated before this period come from sites exploited upstream from MBW. The presence of neoluvisol formed on loess may have favored the establishment of culture well before the Merovingian period. Moreover, some lynchets were still under cultivation in the 18<sup>th</sup> century, not allowing an *ante quem* date.

#### 2.5.3.2. WBT site: Lorraine Plateau

In contrast to MBW, the dating of charcoals at WBT sites show a homogeneity of fire periods. The dating of the entire soil profile of the WBT site shows that all the charcoals are of modern/contemporary origin (Figure 14). Soil with a texture of more than 30% clay greatly limits the intensity of soil erosion (Cerdan et al., 2006). It is likely that this is limiting the removal of charcoal from upstream of the lynchets. In addition, we believe that bioturbation could not have removed charcoals from recent amendment or clearing over the entire profile (90 cm). Moreover, the *Corylus* charcoal collected at the upper limit of the C horizon (Figure 10) is located under a large stone. This evidence indicates that the charcoal could not have been positioned post-deposition under this stone. This charcoal would date the beginning of the lynchets formation. Data from the Bitche topographical atlas of 1758 seems to confirm this hypothesis. The map indicates that the forest at the top of the WBT site (Figure 9) was “*a few years ago much more considerable, a large part of it was cleared*” (ADM Archives départementales de Metz, 1758, p. 145) on the western side. The atlas specifies that this is mainly the western slope and not the eastern slope on which the WBT site is located. However, the atlas does not specify that the eastern part has not been cleared, but it does specify that it is mainly a large area to the west, possibly indicating the most impacted area. The WBT lynchets would have formed between ~1700 and 1950 in less than 250 years. This hypothesis is possible according to the work of Nyssen et al. (2014), who estimate the aggradation of lynchets in Belgium based on estimated erosion rates by non-mechanical ploughing, in addition to cross-sectional area, average slope gradient, and soil bulk density. This study shows that lynchets can form between 217 and 585 years in sufficiently steep slopes. According to the formula proposed by Nyssen et al. (2014) the WBT lynchets would have formed between 209 and 376 years ago, periods depending on the contribution of tillage erosion (50% or 90%). The lynchets system at the WBT site could date from the modern period (~18<sup>th</sup> century). Moreover, palynological data near the site (Figure 8) show a peak in crop pollen in 1850 (Gouriveau et al, 2020, Figure 14), which could be related to the expansion of the

cultivation areas as realized at the WBT site. In addition, the homogeneity of the lynchets plot (Figure 10) argues in favor of the synchronization of all plots during the same period.

Nevertheless, a large (~110 cm high) stone wall is present a few meters from WBT (Figure 9 and Figure 15) and appears to rest on a lynchet. This stone wall has an asymmetrical shape resulting from an altitude difference of ~1 m between the right and left plots. The opening of a pit confirmed that this stone wall was resting on a palaeosol that was already sloping (Figure 15) and that the stone walls were built after the formation of the lynchet. In addition, the stone walls are composed of numerous small stones, mainly at the top. In general, farmers in the 17<sup>th</sup> century did not remove stones smaller than a fist (Blanchemanche, 1990), as these did not hinder ploughing. The cutting of the stones would result from the freezing of larger blocks, as Schwartz *et al.* (2003) have already demonstrated on stone walls in the Vosges Mountains. In addition, the stone walls were heavily clogged with soil, suggesting a certain age (Georges-Leroy, 2020). The stone walls are not from the modern period. If we consider that the lynchet, on which the stone walls are placed, was formed in ~200 years, the spalling and gelifraction of the stones should have taken place in less than 50 years, which seems impossible. Additionally, some of the lynchets already seem to be under forest (Figure 9) on the topographic atlas of the Count of Bitche of 1758. This would mean that two phases of cultivation took place, one before the 18<sup>th</sup> century and the other at the beginning of the 18<sup>th</sup> century. The NIRS discriminant function score confirms this hypothesis with an almost constant open landscape signal (Figure 14), which means that the site, since the formation of the lynchet, has probably never passed under forest. Some of the lynchets are potentially older and the 18<sup>th</sup> century phase would be one of densification of the lynchet system.



**Figure 15:** Stone wall in the municipality of Achen located a few meters from the WBT site. Photo taken on the slope separating a meadow or two fields on either side, a difference of one meter in height separates the left field from the right (a). Photo of the profile of the stone wall and the paleosol with the original slope of the soil on which the stones were deposited (b).

### 2.5.3.3. SAA site: Vosges Mountains

The SAA site is in the extreme north of the Vosges Mountains with the lowest altitude (Figure 8 and Figure 9), which may have favored, contrary to the GAR, ALP and GOLF group, a constant occupation dynamic of the site. Moreover, the village of Saâles (Figure 9c) has significant mining

resources exploited since at least the 7th-8th century (Magar, 2021), which may indicate a continuous anthropization of the site since this period. Unfortunately, we have not yet been able to date any more charcoals in the SAA lynchet. In addition, geo-historical data from the 18<sup>th</sup> century is missing. This is a very complex site due to the presence of a mine and smelter site in the vicinity. The late medieval charcoal (Figure 14) may be the result of mining dated to the 16<sup>th</sup> century (Leypold, 1995), located above SAA (Figure 9). The SAA site, however, appears to have remained under grassland or cultivation for a long time.

#### 2.5.3.4. GAR site: Vosges Mountains

The dating of the GAR site shows several periods of fire as does that of the MBW site. The possibility of destocking by erosion is limited, as the GAR site is almost at the top of the slope. The presence of a charcoal (*Betula*) dated between 8562 and 9115 cal. BC in the S1 horizon (Figure 10 and Figure 11) located above the periglacial formation is probably the result of bioturbation. Like MBW, there are two erratic charcoals. *Hedera* dated to 1296-1398 cal. AD and *Abies alba* dated to 899-1147 cal. AD (Figure 14).

In contrast to the MBW site, a large amount of archaeological, historical and to a lesser extent, palynological data allows us to further discuss the potential age of the lynchet and land use changes. *Abies alba* and *Hedera* charcoals dated to the medieval period with a gap of ~250 years. As *Abies alba* can live ~200-300 years (Dumé et al., 2018), it could be contemporary with *Hedera* charcoal. *Hedera* can be a contemporary of *Ilex*, *Fagus* and *Abies alba* (dated between 1471 and 1659). It is also possible that *Hedera*, which likes to settle in hedges is the result of hedge maintenance (Dumé et al., 2018). The age of *Abies alba* charcoal (899-1147 cal. AD) corroborates with palynological data showing an increase in cultivation in the Central Middle Ages (between 11<sup>th</sup> and 13<sup>th</sup> century) in the Crystalline Vosges (Janssen & Janssen-Kettlitz, 1972; Kalis, 1985; Sudhaus & Friedmann, 2015; Mariet et al., 2016, 2018, Figure 8), and mostly an abrupt decrease of *Abies* after 1000 AD (Mariet et al., 2018). This period corresponds to the dating of *Abies alba*.

Additionally, the Le Bonhomme commune seems to have been inhabited well before the 14<sup>th</sup> century, since a castle, the Jutenburg, is mentioned in 1162 as belonging to the Count of Eguisheim (Jéhin, 1995). However, there is no historical source to indicate whether the surrounding land was farmed during this period. Only one farm is mentioned in 1675 located on the opposite slope to the GAR site (Figure 9) belonging to the Ribeaupierre seigneurie (Litchle, 1989). This farm is probably older, since the Ribeaupierres acquired the usufruct of the land and the castle in 1325 (Jéhin, 1991), and the farm may have already belonged to the Counts of Eguisheim in the ~11<sup>th</sup> century. Le Bonhomme village experienced a demographic expansion in the 16<sup>th</sup> century (Jéhin, 2000), probably induced by the boom in silver production (Fluck & Florsch, 1996; Bonnamour et al., 2010). Numerous metallurgical workshops are attested to in the vicinity of the GAR site (Figure 9), installed between the end of the 15<sup>th</sup> and the end of the 16<sup>th</sup> centuries (Figure 14, Jéhin, 1991; Fluck & Florsch, 1996; Bonnamour et al., 2010), before a decline at the beginning of the 17<sup>th</sup> century and a definitive stop at the end of the Thirty Years' War (Fluck & Florsch, 1996; Jéhin, 2010). The establishment of this "industry" led to massive deforestation (Fluck & Florsch, 1996) in order to produce charcoal (Garnier, 2004). On the boundary plans of 1760,

the GAR site is indicated as being part of the *Louschbach forest*. This same forest was made available in ~1550 to meet the wood needs of the four nearby foundries (Figure 9, Garnier, 2004). A historical archive from 1571 indicates that the *Louschbach forest* was almost exhausted (Fluck & Florsch, 1996) and possibly already so in 1558 (Garnier, 2004). The Louschbach forest was an important resource for the lordly foundries. The lords of Ribeaupierre would probably not have allowed their tenant to exploit GAR after the clearing in ~1550. Moreover, a hundred years between ~1550 and the ravages of the Thirty Years' War, would have been necessary to form the lynchet, which seems insufficient insofar as the erosive phenomena are limited because of the almost summit situation of GAR. In addition, the Alsatian cadastre (1760) specifies that the Louschbach forest is a "high fir forest on good soil" (freely available at <https://archives.haut-rhin.fr>, Archives départementales du Haut-Rhin, 2023) indicating a forest  $\geq 100$  years old (pioneer forest  $> 100$  years old, Schnitzler, 1997). The amendment also seems unlikely. According to historical data, Le Bonhomme commune had 41 arpents of cultivated land in 1632 (Litchle, 1996) and 64 arpents in 1760. In addition, the land and meadows exploited by the farm located in front of GAR have been recorded since 1689 (Litchle, 1989) and correspond perfectly to those recorded on the Alsatian cadastre of 1760. Moreover, some of the uncultivated land was cleared in 1689 (Litchle, 1989). This historical data shows that if GAR had been exploited before the Thirty Years' War, the farmer would have re-exploited this land.

This data indicates two things about the site. First, the GAR site was probably used for charcoal production between ~1550 and ~1571, which corresponds to the dates of *Ilex*, *Fagus* and *Abies alba* (dated between 1471 and 1659). This change in land use has also been observed in central Germany (Larsen et al., 2016). Furthermore, this could explain the high charcoal concentration in soil in the A horizon. In charcoal production areas, the transport of charcoals could result in the loss of charred residues (Bal, 2022). Second, the site was under forest from the 16<sup>th</sup> century and probably already during the 15<sup>th</sup> century, until the 19<sup>th</sup> century. During the 19<sup>th</sup> century the GAR site passed under meadow (Figure 14). In the Vosges, the beginning of the 18<sup>th</sup> century was marked by a major demographic boom which resulted in significant clearing of land, culminating in 1770 (Garnier, 2000). Le Bonhomme commune was no exception: according to estimates, in 1720 the village had ~136 inhabitants (Jordan, 1996), in 1790 the village had 888 inhabitants (Baradel, 2003), and in 1831 the village had 1431 inhabitants (Jéhin, 1991). This demographic surge led to numerous constructions in 1758, generating massive land clearing (Jéhin, 1991). Moreover, in 1778, to compensate for this demographic increase and the need for wood, a third of the seigneurial woods were given to the communities of the valley, of which Le Bonhomme village was one (Baradel, 2003). It was, therefore, during this period at end of the 18<sup>th</sup> century, that the high fir forest, still shown as a seigneurial wood on the 1760 plans, was cut down. Subsequently, *Cytisus* and *Juniperus* became established on the forest plot sometime after the logging. After a clearing, probably at the beginning of the 19<sup>th</sup> century, the GAR site was converted into grassland. This is consistent with *Cytisus* and *Juniperus* charcoals dated to the modern/contemporary period ( $\geq 16712$  AD). These two pioneer species are the first to recolonize newly deforested areas or abandoned meadows in the Crystalline Vosges (Goepp, 2007). During this period, Le Bonhomme seems to have turned to cheese production. The number of dairy cows increased between 1797 and 1805 from 463 to 650 (Baradel, 2003), necessitating an increase in the number of pastures or meadows.

Based on historical analysis and dating, the origin of the lynchet system at the GAR site dates from the medieval period. For the moment, a precise date is still unknown, but it seems that its origin is situated between the 10<sup>th</sup> and 13<sup>th</sup> centuries. The site then passed under forest before the 16<sup>th</sup> century and was exploited for its timber and charcoal production. The site probably fell under forest during or after the 14<sup>th</sup> century. Repeated famines, epidemics like the Black Death, and warlike incursions like the Hundred Years' War, led to a demographic decline in the Le Bonhomme region (Baradel, 2003). At the beginning of the 19<sup>th</sup> century, the forest was cut down and turned into meadowland or pasture.

#### 2.5.3.5. ALP and GOLF site: Vosges Mountains

As we have shown, the MBW and GAR sites show a relative dispersion of <sup>14</sup>C ages. A notable exception to this pattern is represented by the case of the Golbach-Altenbach commune sector (GOLF and ALP). Here, only two periods were dated. A first phase of clearing took place between 680 and 1149 cal. AD and seems to correspond to the establishment of the land plot (Figure 14). At that time, the Upper Thur Valley, of which Golbach-Altenbach is a part, belonged to the abbey of Murbach, the most powerful abbey in Alsace, to whom it had been bequeathed around the year 800 (Schwartz et al., 2020). The clearing was thus conducted under its authority, probably around 900. A second series of ages is between 1526 (*terminus post quem*, <sup>14</sup>C) and 1760 (*terminus ante que*, on the Alsatian cadastre) corresponding to a reopening after the abandonment of the sector during the Thirty Years' War, between 1634 and 1760. As for the GAR site, this period is marked by a reclamation of the sites in favor of the meadows.

## 2.6. Conclusion

This study demonstrates the benefits of using pedoanthracology for lynchet analysis. We identify that the majority of these lynchets have a medieval origin, probably High Middle Ages (6-10<sup>th</sup> century) for three of the landforms (MBW, ALP and GOLF). We show that some sites, such as the GAR site, have a complex chronology with land use changes that are sometimes centennial, demonstrating socio-economic variations. Pedoanthracology has been used to highlight these land use changes, sometimes supported by other data. We thus show that dating and identification of charcoal species are essential for understanding the temporal trajectories of ancient cropping systems, even if the temporal variability of the dates needs to be complemented by historical, archaeological and palynological data. We also highlight the homogeneity of medieval and modern/contemporary dates in the Vosges Mountains (GAR, SAA, ALP and GOLF). This raises the question of the late maintenance of vast forest areas, between the Vosges summits and the Rhine plain and the valley bottoms, all of which were largely cleared from the Neolithic period. It is possible that in these intermediate areas, late forest clearings were carried out under the aegis of monastic authorities, as seems to be the case in the Rhine Graben region, where the presence of abbeys created between the 7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> centuries coincides with the existence of vast lynchet plots (Schwartz et al., 2019, 2020). Nevertheless, as we were able to demonstrate with the WBT site and as already demonstrated by Vervust et al. (2020) and Georges-Leroy et al. (2012), the change in

scale between the dating of a lynchet and that of a lynchet plot raises questions, even when the  $^{14}\text{C}$  dates do not show dispersion, and especially when very little additional information is available. The dispersion of  $^{14}\text{C}$  dates that we were able to note within the MBW and GAR soil profile, some of which come from inherited charcoals (either present before the formation of the lynchets or accumulated by colluvium), and others from later clearing episodes when the environments were reopened, would be important to be able to determine the date corresponding to the formation of the lynchet.

In the case of the WBT site, we have shown that it is not easy to determine the age of the lynchet system, even when this system shows a high degree of homogeneity that may indicate a synchronic construction. If in the case of Goldbach-Altenbach (ALP and GOLF) the attribution to the Early Middle Ages was relatively simple (Schwartz et al., 2020), the general dispersion of the ages requires the use of other geochronological methods that could provide additional information than only  $^{14}\text{C}$  dating on charcoal. The use of OSL has already been carried out in the southern Rhine Graben with convincing results (Froehlicher et al., 2016; Stolz et al., 2012; Larsen et al., 2016). Nevertheless, luminescence dating has certain limitations, including the risk of incomplete bleaching (Sanderson & Murphy, 2010), especially as bioturbation in soils prevents stratification. However, prospective application of OSL dating using a portable OSL reader (P-OSL), developed by Sanderson and Murphy (2010), could allow evaluation of luminescent signal intensity changes in the soil profile and to assist to choose the samples dating. This method has already been successfully used in agricultural terraces or lynchet to obtain a detailed chronology of sediment accumulation (Porat et al., 2019; Vervust et al., 2020; Turner et al., 2021).

## **Funding**

This work was funded by the Region Grand Est and by the Labex DRIIHM, the French programme "Investissements d'Avenir" (ANR-11-LABX-0010), which is managed by the Agence Nationale de la Recherche.



# Chapitre 3

---

## **Ridge and furrows as a legacy: a pedo-sedimentary and geo-historical archive approach**

Article en vue d'une soumission dans la revue *The Holocene*

### **Résumé**

Les champs bombés représentent un système de parcelles et sont un héritage d'anciennes pratiques agricoles résultant majoritairement de la période médiévale. En Europe occidentale, les champs bombés couvrent parfois de vastes zones de forêts et de prairies, où ils sont préservés des pratiques agricoles actuelles. Ces (micro-)topographies résultent de l'accumulation de terre au milieu de la parcelle, suite à des labours répétés sur une période suffisamment longue pour former un billon. Cette accumulation peut sceller un paléosol en raison des volumes importants qui se sont accumulés au fil du temps. L'accumulation et le paléosol peut être considéré comme un archivage de données pédo-sédimentaire. Ces données ainsi que les données historiques du site peuvent nous aider à mieux comprendre la trajectoire temporelle de ces paysages anthropogéniques. Dans cette étude, nous explorons le potentiel du lecteur de luminescence portable (luminescence stimulée optiquement ; P-OSL) pour identifier la présence et les limites du sol enfoui dans les billons. Nous avons appliqué cette méthode à trois sites différents. Nous montrons que l'application de cette méthode dans les champs bombés est efficace pour identifier les limites présentant des signaux de luminescence d'intérêt archéologique. En conséquence, la stratégie d'échantillonnage pour la datation OSL est mieux informée et plus efficace.



D'autre part, les données géo-historiques montrent qu'un site a été abandonné sous forêt dès le milieu du 19<sup>e</sup> siècle. Les deux autres sites ont été cultivés en prairie jusqu'au milieu du 20<sup>e</sup> siècle. L'analyse pédologique dans un site sous couvert forestier démontre une différenciation post-abandon de la pédogenèse entre le billon et le sillon. Les anciennes pratiques culturales peuvent donc générer une variabilité pédologique métrique. L'analyse pédoanthracologique d'un des sites situés en prairie a permis d'identifier des défrichements et une mise en culture post-guerre de Trente Ans (après 1648). A travers cette étude pluridisciplinaire, nous démontrons l'intérêt de prendre en compte ces données dans la compréhension des paysages anthropiques, et de les considérer pour la gestion et la conservation des paysages.

# Ridge and furrows as a legacy: a pedo-sedimentary and geo-historical archive approach

Benjamin Keller<sup>1</sup>, Gilles Rixhon<sup>1</sup>, Vincent Robin<sup>2</sup>, Dominique Schwartz<sup>1</sup> and Damien Ertlen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE) – UMR 7362, CNRS – University of Strasbourg, 3 rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France

<sup>2</sup>Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC) - UMR 7360 CNRS - University of Lorraine, 8 rue du Général Delestraint, 57070 Metz, France

**Keywords:** Former field systems, ancient forest, LiDAR, anthropogenic landscapes, Hautes-Vosges, low mountain range

## Abstract

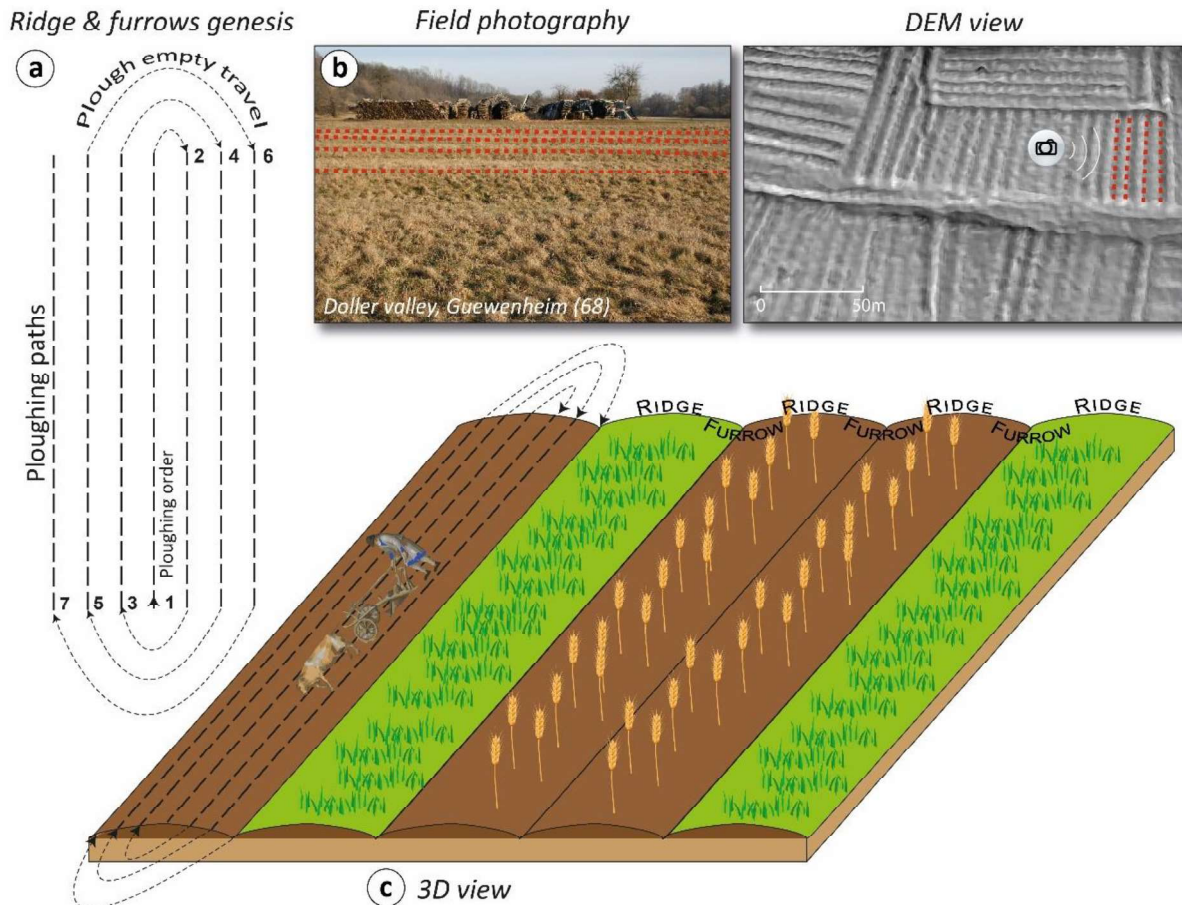
Ridge and furrows represent a system of agricultural plots and are a legacy of ancient practices, mainly from the medieval period. In Western Europe, ridge and furrows sometimes cover large areas under forest and grassland, where they are preserved from current agricultural practices. These micro-topographies result from the accumulation of soil in the middle of the plot due to repeated ploughing over a sufficiently long period to form a ridge. This accumulation can seal off a palaeosol due to the large volumes that have built up over time. Its pedo-sedimentary record along with historical site data can help us to better understand the temporal trajectory of these anthropogenic landscapes. In this study we explore the potential of the portable luminescence reader (optically stimulated luminescence; P-OSL) for identifying the presence and limits of buried soil in ridges. We applied this method to three different sites. We show that the application of this method in ridges and furrows is efficient for identifying boundaries with luminescence signals of archaeological significance. As a result, the sampling strategy for OSL dating is better informed and more effective.

On the other hand, geo-historical data show that a site was abandoned under the forest as early as the mid-19<sup>th</sup> century. The other two sites were cultivated on grassland until the mid-20<sup>th</sup> century. Pedological analysis in the site forested demonstrates post-abandonment differentiation of pedogenesis between ridge and furrow. Old cultivation practices can thus generate metric pedological variability. Pedoanthracological analysis of one of the grassland sites identified post-Thirty Years' War clearing and cultivation (after 1648). Through this multidisciplinary study, we demonstrate the value of taking these data into account in understanding anthropogenic landscapes, and of considering them for landscape management and conservation.

### 3.1. Introduction

Ridge and furrows are plots or a system of plots with a ridge between two furrows. This agrarian shape typically involves a succession of ridges and furrows, whose pattern makes it possible to reconstruct the anatomy of ancient plots (Ewald 1969; Sittler and Hauger, 2007). In France and Germany, the width and length of these plots range between 6 to 25 m, and 41 to 760 m, respectively, whereas the vertical amplitude between furrows and ridges can vary from 26 to 120 cm (Dion, 1983; Blaising, 2010; Langewitz et al., 2021). According to Kerridge (1951), this large width variability can be explained in part by the nature of the soil, climatic conditions and the nature of farming implements. The cross-sectional shape of ridge and furrows can also strongly vary (Langewitz et al., 2021). Upex (2004) attempted to classify them by type in order to date them, believing that each shape had a precise period.

The study of these "agro-morphological" forms (Langewitz et al., 2021) seems to have begun in Germany as early as the 19<sup>th</sup> century (von Braunmühl, 1842; Hartmann, 1876), and in England from the middle of the 20<sup>th</sup> century, focusing on their formation, uses and functions (Orwin, 1938; Beresford, 1948; Kerridge, 1951, 1955; Eyre, 1955). In France, studies began during the mid-20<sup>th</sup> century (Ewald, 1969; Callot, 1977; Dion, 1983; Blanchemanche, 1990). In the mid-20<sup>th</sup> century in England, two possibilities were put forward to explain their formation: (i) using the plough to raise the central part to drain the soil (Kerridge, 1951), (ii) using the heavy plough without any particular intention (Beresford, 1948). The nuance is slight, but both hypotheses agree on one point: the use of the heavy plough determines the elevation of the ridge. However, some authors point out that, in rare cases, spades can form certain ridge and furrows (Dion, 1983; Blanchemanche, 1990). Today, many studies agree that the invention of the heavy plough was a determining factor in the generalization of the ridge and furrow shape (Ewald, 1969; Dion, 1983; Sittler and Hauger, 2007; Blaising, 2010; Sittler et al., 2015; Langewitz et al., 2020, 2021). Dion, (1983) estimates its widespread use in Europe between the 17<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> centuries. In reality, its spread is more likely to have occurred around 1000 AD (Kraemer and Moulis, 2007; Andersen et al., 2016). This technique consisted in ploughing starting in the middle of the new field located between two plot boundaries. Then, when the plough reached the end of the plot, the ploughshare was lifted out of the ground so that it could be repositioned and ploughed in the other direction, and so on from the center to the periphery of the plot (Figure 16a). This favours the accumulation of soil in the center of the plot (the ridge) and raises the soil profile over the years (Figure 16c, Dion, 1983; Blaising, 2010). According to Ewald (1969), the drainage function is only valid in certain cases and does not represent the majority. The heavy plough not only made it possible to plough normally neglected land, but also to considerably improve yields (Andersen et al., 2016). Indeed, this plough offers a number of advantages, including (i) raising the field to limit excess water in the soil (Dion, 1983; Kraemer and Moulis, 2007; Blaising, 2011; Andersen et al., 2016; Langewitz et al., 2021; Hirsch et al, 2023), (ii) the possibility of cultivating on clay soils (Blaising, 2010), reducing weeds and improving soil fertility (Andersen et al., 2016), (iii) fixing field boundaries represented by furrows (Ewald, 1969;



**Figure 16 :** Description and identification of a ridge and furrow system; (a) and (c) ploughing using heavy plow and genesis of ridge and furrow formation (inspired by Hauger et al., 2001); (b) photograph and digital terrain model (DTM) view of a ridge and furrow system in the Upper Rhine Graben study site Guewenheim, (GUB); (c) 3D representation of a ridge and furrow system.

Blanchemanche, 1990; Langewitz et al., 2021) and (iv) limiting erosion when the field was ploughed (crosswise or horizontally) on a slope (Blanchemanche, 1990). For the latter reason, some ridge and furrows fields can be mistaken for lynchets (Brown et al., 2020).

These forms can be found on all grain sizes constituting soil material: sandy (Langewitz et al., 2020), silty (Alcántara et al., 2017) and clayed. In Europe, the maintenance of ridges and furrows depends on their preservation under meadows or under forest landuse and can cover large areas on flood plains. (Dion, 1983; Sittler et al., 2015). The study of these agrarian forms is of great interest because of their ubiquity in Europe, but also for the study of the potential pedo-sedimentary archive they contain. These agrarian forms can sometimes cover and fossilize a palaeosol due to the significant thickness of the soil accumulation on the ridge. These archives can be used to reconstruct environmental dynamics from the Middle Ages to the Anthropocene (Langewitz et al., 2020). Determining the temporal trajectories of these agrarian forms is a necessary key to understand anthropogenic landscapes. Their study is of both historical and ecological interest. Reconstructing the land-use dynamics of these agrarian forms will enable better integration of forest and grassland ecosystem management policies.

While the *terminus post quem* is the 10th century matching the invention of the heavy plow, their erection can extend to the 19<sup>th</sup> century (Langewitz et al., 2020). A number of studies provided a more

precise timeline for their establishment during the medieval period. In the northern part of the Grand Est region (France, Figure 17), Blaising and Frauciel (2007) and Blaising (2011) determined a *terminus post quem* in the 12<sup>th</sup> century, based on the superposition with excavated archaeological remains. The most precise dates were carried out in central and northern Germany. At five forested sites, Alcántara et al. (2017) estimated, on the basis of historical data, an origin from either the 11<sup>th</sup> or the 14<sup>th</sup> century. Langewitz et al. (2020) combined OSL and radiocarbon dating methods at nine sites: they range from the early Middle Ages (7-8<sup>th</sup> centuries) to the late Middle Ages (14-15<sup>th</sup> centuries). Similar early estimations were made in northern England (Brown et al., 2023). This period, which predates the invention of the heavy plough, support the hypothesis that some ridge and furrows fields can be built with a spade or hoe (Langewitz et al., 2021; Hirsch et al., 2023).

In the Upper Rhine Graben, a number of studies already noted the presence of fossilized ridge and furrows under grassland (Figure 16b) or forest (Ewald, 1969; Callot, 1977; Sittler & Hauger, 2007; Sittler et al., 2015). Sittler et al. (2015) were able to estimate their formation between the 11<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> centuries while others studies dated their appearance before the 15<sup>th</sup> century (Ewald, 1969; Sittler & Hauger, 2007). In the Vosges Mountains, very few studies have been carried out on these agrarian forms. In the south, they are confined to the valley bottoms (Keller et al., 2023). In the north, because of the lower altitude and more gentle slopes, these forms are more widespread.

Our study includes two sites in the Upper Rhine Graben and one in the northern Vosges Mountains. The aim of this study is twofold. Firstly, it aims to attempt to identify the buried palaeosol under or inside the ridges from a soil-sediment archives approach. The second objective is to identify changes in land use. By combining the identification of fire clearing periods and tree species with pedological, geomorphological, geo-historical and historical data from the sites. Based on these data, it is possible to define the temporal trajectories of landscapes.

## **3.2. Study sites**

### **3.2.1. General presentation**

The studied ridge and furrows are located in the Grand Est region of eastern France (Figure 17). The Vosges Mountains and Upper Rhine Graben are the two geological units that dominate the eastern part of the region. The Vosges is a low mountain range running north-south. Its absolute altitude ranges from ~200 to 1424 m a.s.l. above sea level. Due to its orientation and the influence of an oceanic to (almost) semi-continental climate, there is a very steep rainfall gradient between the Vosges Mountains and the Upper Rhine Graben (François & Humbert, 2000). The BAT site is located in the northern part of the Vosges Mountains, where the geological structure corresponds to a monoclinical plateau made of Buntsandstein sandstones inclined to the northeast, (Bonnell & Tholozan, 2007). The BAT soil is accordingly developed on sandstone alterites. The HIN and GUB sites are located in the Upper Rhine Graben, which is filled by sedimentary formations. HIN and GUB soils are developed on loess deposits and on alluvial deposits of the Doller river, respectively.

Ridges and furrows are unevenly distributed across the eastern part of the Grand Est region, due to the absence of LiDAR data in some areas (Figure 17). Generally speaking, ridges and furrows are found mainly in alluvial plains and valley bottoms. To the south of the city of Mulhouse, the presence of numerous ridge and furrows is the result of land being maintained as grassland, in contrast to the area between Mulhouse and Colmar, which is mainly cropland. In the northern Vosges mountains, forests and meadows dominate, enabling ridge and furrows to be maintained.

The BAT site was chosen because of the LiDAR acquisition in 2019 in the northern Vosges Mountains and the following local study focused on agrarian forms (Cumetti 2020; Ertlen 2022). This enabled us to select the best-preserved ridges and furrows, i.e. with a height difference between ridge and furrow superior to 50 cm. Ridge and furrows were already investigated in the northern Upper Rhine Graben (near HIN, Sittler et al., 2015), in the south (Ewald, 1969) and in the north part on the German side of the Rhine (Sittler & Hauger, 2007). But were limited to a spatial approach without pedosedimentary investigations. This is why the HIN and GUB sites were chosen. The ridges and furrows, located on an alluvial terrace of the Doller, were eroded by the river after they had been cultivated. In addition to providing an insight into the historical dynamics of the Doller, this also potentially provide a *terminus post quem* for the ridges and furrows.

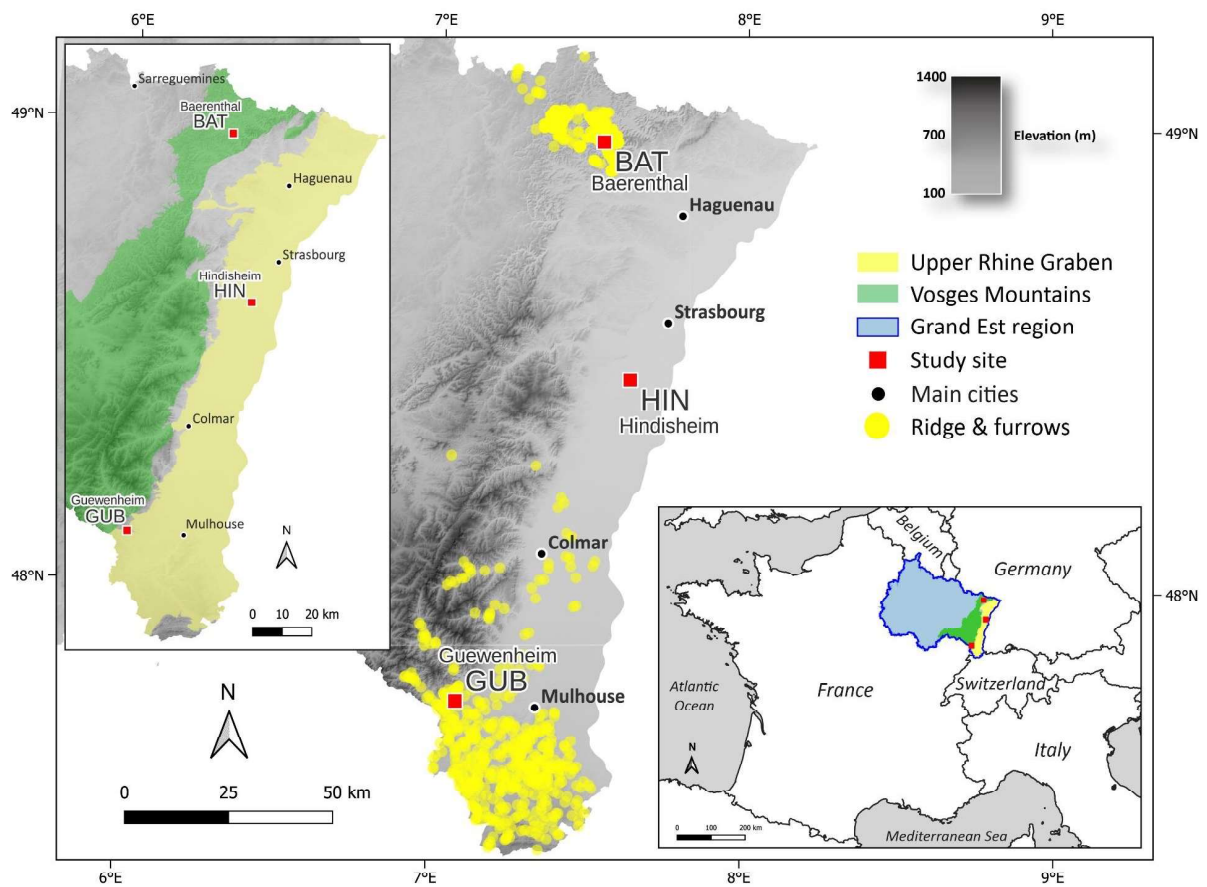


Figure 17: Location of ridge and furrows (yellow circles) in the Grand Est Region. Location of study sites and communes (red square) of Baerenthal (BAT), Hindisheim (HIN) and Guewenheim (GUB). Location of the Grand Est region, Vosges Mountains and Upper Rhine Graben (bottom right of image). Location of Vosges Mountains and Upper Rhine Graben (top left of image).

### 3.2.2. Site description

BAT ridge and furrows are located in the municipality of Baerenthal (locality of Betteli). They are situated on a northern hillslope with a very gentle slope of 3 % and an altitude of 220 m (Figure 18a). The site is currently on meadow and the ridge and furrows line up in the direction of the slope. The field systems to the north of the site face south-west/north-east, while those to the south face north/south.

HIN ridge and furrows are located in the municipality of Hindisheim (locality of Heumaennel). They are situated at a lower altitude of 151 m on a flat surface (Figure 18b). The site is currently under forest and the ridge and furrows oriented north-west/south-east. Whilst the absence of LiDAR in this area impedes the detection of other old field systems, our field observations confirm that other systems exist in the vicinity of HIN, preserved under forest. It is possible that other ridge and furrow systems may have existed in areas currently under cultivation. It seems that the vast reparceling operation of the mid-20<sup>th</sup> century (Flatrès & Flatrès, 1997) may have erased a large part of ridge and furrows.

GUB ridge and furrows are located in the municipality of Guewenheim nearby the forest of Eichwald. They are situated at an altitude of 337 m on an alluvial terrace of the Doller river (Figure 18b). The site is currently on meadow and the ridge and furrows almost oriented to north/south. There are a lot of ridge and furrows in the vicinity of the site. Some field systems oriented to north/south and the other part oriented to south-west/north-east. To the north-east of the GUB site, a few ridges and furrows are forested, but most are on grassland.

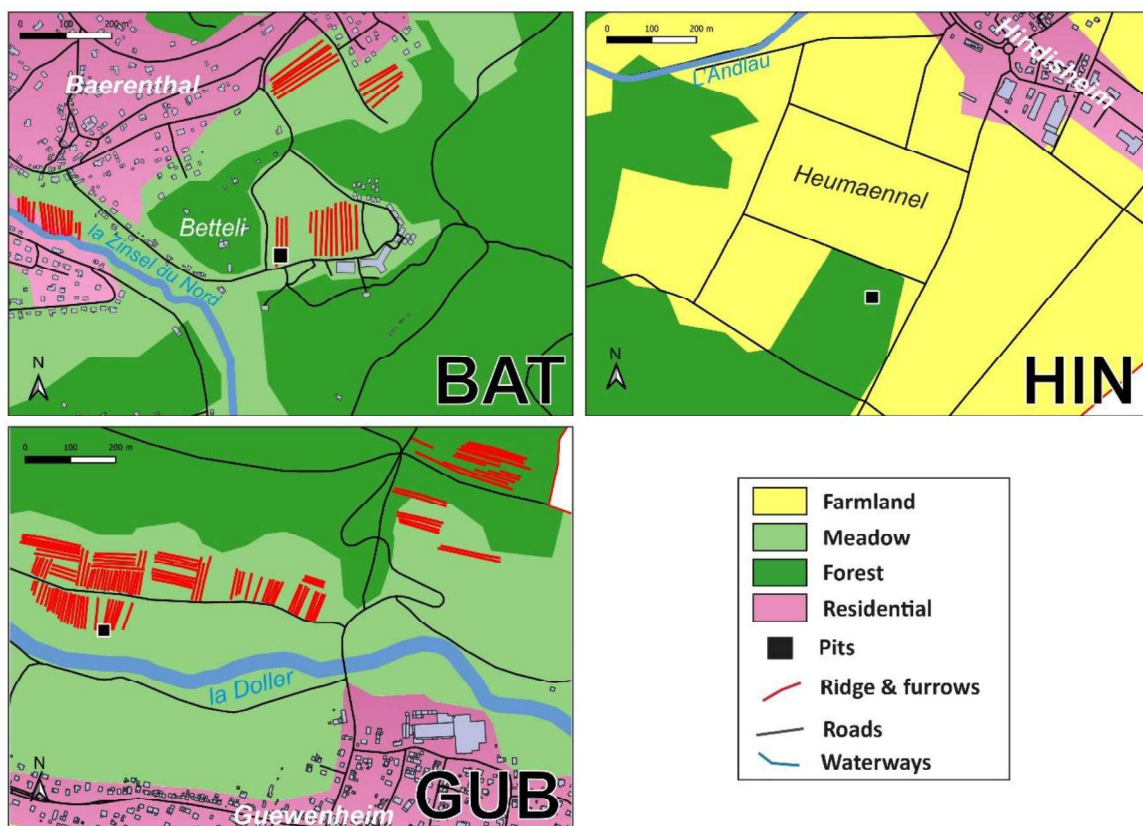


Figure 18 : Land use map of the BAT, HIN and GUB sites with the ridge and furrows system (red line corresponds to the ridges). Location of the excavated pits (black square) Source: CORINE Land Cover 2012 land cover database.



## 3.3. Methods

### 3.3.1. Geoarchaeological methods

#### 3.3.1.1. Pedological analysis

On each of the three sites two pits have been sampled one in the ridge and the other in the furrow. The six soil profiles were sampled every 5 cm (0-5 cm, 5-10 cm etc. down to the bottom of the pit). A total of 34 samples were taken from the BAT site, 31 from the HIN site and 16 from the GUB site. Depending on bulk density and coarse elements the samples are between 100 and 400 g. All samples were oven-dried at 40°C and sieved through a 2 mm mesh. Total carbon (C(t)) analyses were carried out on ground samples with a Flash 2000 NC elemental analyser as well as the measurement of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) in order to determine soil organic carbon (C<sub>(org)</sub>). A particle size analysis was performed using a Beckman Coulter LS13 320 laser particle size analyzer. The texture of the soil profiles is determined from the United States department of agriculture (USDA) soil texture triangle.

#### 3.3.1.2. Pedoanthracology

Two pits were sampled in the BAT and HIN ridges only. Each sample was taken between 20 and 25 cm depth in order to respect the horizon boundary (from the upper to the lower boundary) to determine the clearing phases (forest). As bioturbation causes charcoal fragmentation and burial, stratification of charcoal in soils is virtually non-existent (Carcaillet & Talon, 1996; Carcaillet, 2001; Schwartz et al., 2005). We therefore chose to base our sampling on pedological characteristics, and to maintain the same thickness for all samples as far as possible. Due to the high concentration of fragments between 20 and 40 cm in the BAT soil profile, one sample is only 15 cm thick (between 40 and 55 cm) in order to better fit with the distribution of the charcoals. On both sites 4 soil samples were collected from five up to seven kg. Charcoals > 1 mm were extracted from the soil samples by wet sieving and recovered by flotation. Charcoals < 1 mm were not considered in this study, as they are generally too small for taxonomic identification (Robin & Nelle, 2014). All charcoal fragments extracted from the soil samples were taxonomically identified using a diascope microscope (Zeiss Axio Imager.M2m, ×100, ×200, ×500), based on wood anatomy atlases (Schweingruber, 2016) and the reference collection of charred wood of the LIVE laboratory (UMR 762, University of Strasbourg). Due to the absence of charcoal at the HIN site, only 85 charcoal fragments were analysed.

A charcoal was dated in the BAT soil profile, due to the high concentration of charcoals between 20 and 40 cm. The charcoal was dated at the Poznan Radiocarbon Laboratory, using AMS (acid-alkaline pretreatment) radiocarbon dating. Calibrations were calculated with the Calib 8.20 (Stuiver et al., 2022) calibration program using the IntCal20 atmospheric curve calibration (Reimer et al., 2020).

### 3.3.1.3. Near infrared spectroscopy to monitor vegetation history

Qualitative near infrared spectroscopy (NIRS-qual) is an analytical method involving diffuse reflectance measurement in the near infrared region (1100-2500 nm) allowing the determination of the vegetation source of soil organic matter (Ertlen et al. 2010). The NIR spectra are considered as the fingerprint of the soil organic matter (Palmborg & Nordgren, 1996; Coûteaux et al., 2003). The approach is based on comparison of NIR spectrum of a sample of an unknown origin with a library of reference (made up of 1365 spectra) samples using multivariate discriminant analysis. Two main vegetation groups are distinguished: woodland and open vegetation.

Samples were taken from the three pits dug into the ridges with a systematic vertical resolution from 5 cm or 10 cm according to the sites. All samples were oven-dried and sieved through a 2 mm mesh and were placed one by one in a rotating cup (diameter 9 cm) and scanned in the wavelength range of 10000 to 4000  $\text{cm}^{-1}$  with a resolution of 2  $\text{cm}^{-1}$ . An FT-IR Frontier Spectrometer (PerkinElmer, USA) was used with a CaF<sub>2</sub> beam-splitter, with an integrating sphere and with an InGaAs detector. The measured reflectance (R) was transformed into absorbance (A) by using the following equation:  $A = \log_{10}(1/R)$

For mathematical pre-treatment and statistical treatment, we followed the methodology proposed by Strouhalová et al. (2019) also supported by Ertlen et al., (2010) and Viscarra Rossel and Webster (2011). The Mahalanobis distance is used to evaluate the discrimination between the two groups of reference samples (open landscape / forest). The comparison of values from the multiple discriminant analysis of the unknown data with the reference library data enables one to interpret the origin of the soil organic matter (open landscape or forest). To study the evolution of the vegetation over time, we examined the score of the multiple discriminant analysis of the NIR spectra at every sampled depth. This approach allows for the identification of relevant tendencies of the palaeosol, during the accumulation phase (tillage) and up to the present day (Ertlen et al., 2015).

### 3.3.1.4. Sampling and analysis with the portable OSL reader (P-OSL)

The same sampling strategy was used in each soil profile. A 20 cm-long and 3 cm in diameter PVC tube was inserted every 3 to 5 cm into the soil profile down to the bottom of the pit. Samples were taken from both the ridge and the furrow pits (except at site GUB, due to the shallow soil depth in the furrow). A total of 26 samples were taken from BAT ridge, 23 from BATS ridge, 32 from HINB furrow, 15 from HINS ridge and 8 from GUB furrow.

Samples were analyzed in a darkroom laboratory. There were oven-dried at 40°C. Measurements were made using the SUERC P-OSL (Sanderson & Murphy, 2010). This device measures natural OSL (blue light with a wavelength  $\approx 470$  nm for the quartz luminescence signal) and IRSL signals (infrared light with a wavelength  $\approx 880$  nm for feldspar luminescence signal). The raw measurement results were then processed on Rstudio software (<https://www.rstudio.com>) using the R Luminescence package (Kreutzer et al., 2012), to subtract background noise and extract only measurements from the first 10 seconds of stimulation in both wavelengths. Evolution of photon numbers can be reconstructed along

depth profiles. If certain conditions are met, signal intensity can be considered as a proxy for relative burial age (e.g. Sanderson and Murphy, 2010 but also for the upper limit of the palaeosol).

### 3.3.2. Geo-historical data

To reconstruct land use in the modern and contemporary period of BAT, HIN and GUB sites, several types of old maps from the mid-18<sup>th</sup> and mid-19<sup>th</sup> centuries were used to determine land use. For the post-20<sup>th</sup> century period, aerial photographs (Figure 21) and the 1950 map of the Institut National Géographique (IGN) allow the land use to be determined accurately. For the 21<sup>st</sup> century, satellite images were used. LiDAR data were also used to reconstruct the paleodynamics of the Doller River (GUB site). It was also used to identify ridge and furrow systems at the BAT and GUB sites. Unfortunately, LiDAR is still incomplete at the HIN site.

The finage plans or Alsace cadastre (Figure 21, Archives départementales du Haut-Rhin, 2023) were produced between 1760 and 1764 at a scale of 1:5280 on the initiative of Jacques Pineau (Baron de Lucé). This tax cadastre was made in order to achieve a fairer compensation of the tax burden by the kingdom of France, to which Alsace (the majority of its territory) was attached after the treaties of Westphalia in 1648 (Tschaen, 2011). The Alsace cadastre is a set of maps produced for each commune, with a highly accurate representation. This map only covers the GUB site.

The Etat Major maps (Institut géographique national (IGN), 2023) made between 1818 and 1866 cover the whole of France (in 273 sheets) at 1:80,000 and from 1830 at 1:40,000 (Figure 21). These maps give an accurate picture of land use, although this accuracy seems to be deteriorating in mountainous areas (Dupouey et al., 2007a). These maps give a fairly accurate picture of land use. Nevertheless, the cadastre was revised between the end of the 19<sup>th</sup> and the beginning of the 20<sup>th</sup> century (Bibliothèque nationale et universitaire de Strasbourg (BNU) & Bibliothèque nationale de France (BNF), 2023). These new maps were more accurate than those of the mid-19<sup>th</sup> century (Figure 21). These updated cadastres in Alsace/Lorraine are sometimes in German, if the map was produced before 1918, and sometimes in French after 1918. For all three sites, Etat Major maps and maps from the late 19<sup>th</sup> and early 20<sup>th</sup> centuries were used.

Based on these geo-historical data, a chronological frieze was created, delimited between the 17<sup>th</sup> century and 2010. The minimum limit of 1648 was chosen because of the Thirty Years' War which, for sites in the Vosges Mountains and Upper Rhine Graben, led to a drastic drop in population, mainly between 1630 and 1634 (Vogler, 1998; Garnier, 2004).

## 3.4. Results

### 3.4.1. Pedo-sedimentary data

#### 3.4.1.1. Soil profile analysis

The soil profiles of the BAT (ridge) and BATS (furrow) pits (Figure 19a) are homogeneously sandy (USDA) with  $\approx 92\%$  of sand in accordance with its sandstone parent material. The IIS horizon has a more fluffy structure and a lighter color (7.5YR 7/3 on the Munsell chart) than the S horizon. This colour difference is linked to the higher  $C_{(Org)}$  content of the S horizon. BAT and BATS also feature a concentration of charcoal between 20 and 40 cm from the surface with sometimes several charcoals fragments forming thin layers.

The soil profile of the HINS pit (furrow, Figure 19b) present a constant homogeneity, the texture of the soil is composed of a dominant silt loam (USDA) with  $\approx 70\%$  of silt. The soil profile of the HINB pit (ridge, Figure 19b) is more heterogeneous. The texture of the soil is composed of a dominant silt loam (USDA), but the soil contains more clay between 60 and 80 cm, which confirms the field observations. That is why it has been designated as a Bt horizon despite, clay accumulation remains low. The Sca horizon has a slightly higher  $CaCO_3$  content.

The soil profile of the GUB and GUS pit (Figure 19c) present a constant homogeneity, the texture of the soil is composed of a dominant sandy loam (USDA) with  $\approx 70\%$  of sand. Texture is very similar to the matrix of its parent material. Both soil profiles are very shallow, with GUB at 33 cm and GUS at 25 cm because the C horizon is composed of alluvial cobbles in a coarse sandy matrix.

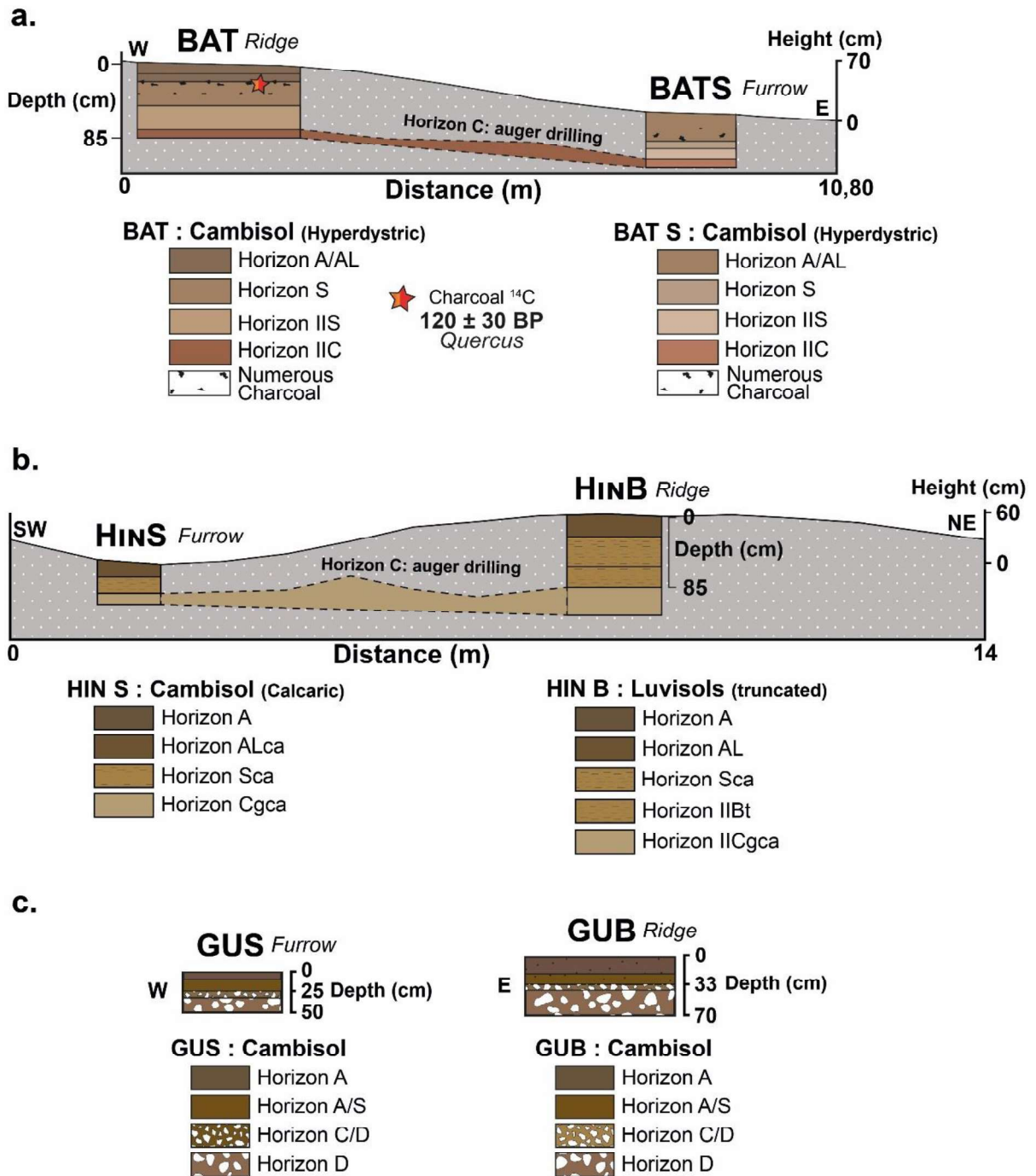


Figure 19 : Topography and organization of soil horizons observed in the six pits and by auger in the ridge and furrows at BAT (a), HIN (b) and GUB site (c).

#### 3.4.1.2. Charcoals samplings and dating

Charcoal analyses were carried out in the BAT soil profile only between 20 and 40 cm in the layer with the highest concentration of charcoal. Analyses of 85 charcoals showed the presence of a large majority of *Quercus* (74 fragments), some *Carpinus* (6 fragments), *Betula* (3 fragments), *Pinus silvestris* (1 fragment) and *Populus* (1 fragment). The charcoals correspond to pioneer (*Betula*, *Populus* and *Pinus silvestris*) and post-pioneer species. This may indicate that the forest was recent or managed. Concerning the soil-anthracological samples taken in HIN. A total absence of charcoal was noted throughout the soil profile. The charcoal sent for dating in BAT corresponds to a *Quercus* of modern/contemporary age (>1679, Figure 19a).

#### 3.4.1.3. Organic matter origin (NIRS)

All NIRS results for the soil profiles fell within or very close to the range of the reference soil spectra (Figure 20, pink and green boxes). The  $C_{org}$  content was sufficient in the GUB and HINB profiles. For BAT, the  $C_{org}$  content was too low from 57.5 cm up to 82.5 cm. The results cannot be considered for these six samples. BAT shows a clear open landscape tendency in the first 20 cm, and from 20 cm a clear forest signal appears up to 55 cm. The two samples at depths > 80 cm show an open landscape trend. The GUB profile gives an exclusively open landscape signal. Conversely, HINB gives a clear forest signal.

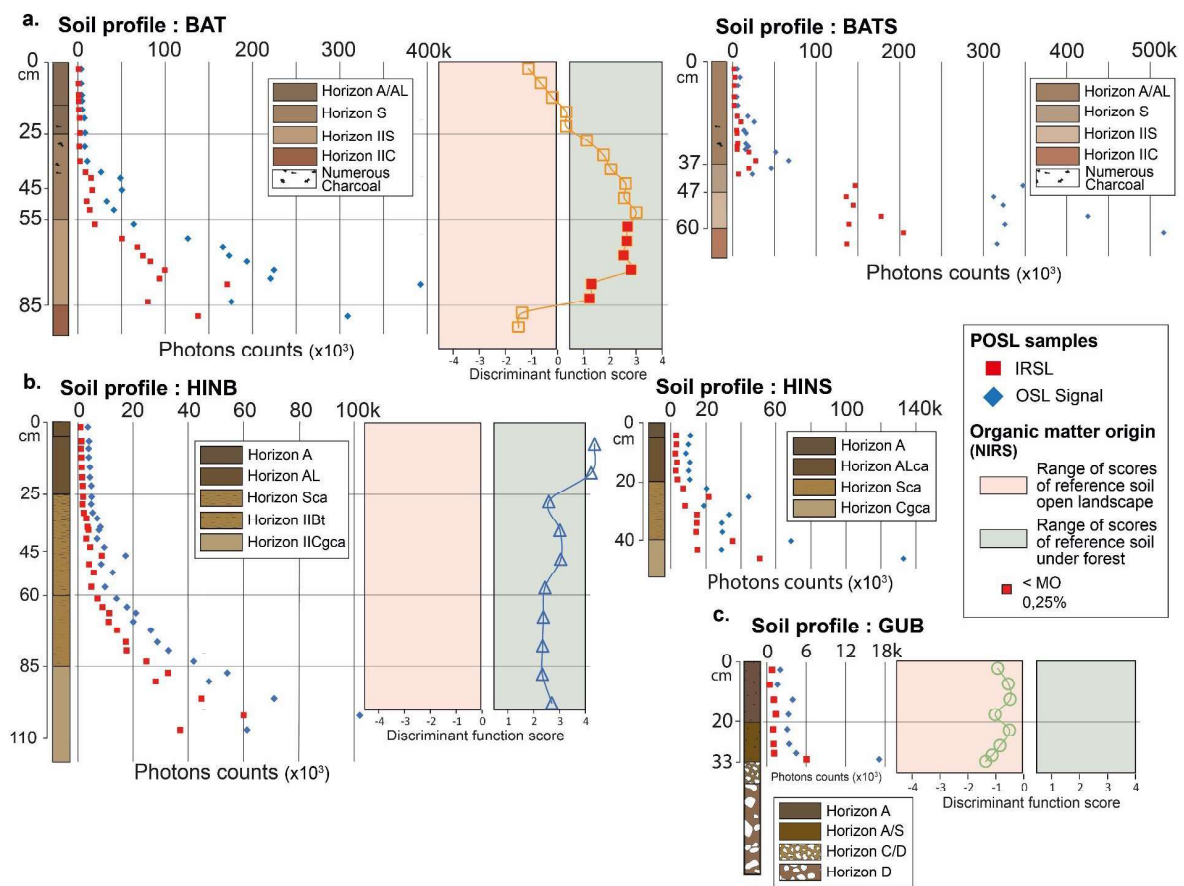


Figure 20 : Discriminant function obtained from reference spectra and scores obtained from the NIR spectra measured on soil organic matter from the BAT (a), HINB (b) and GUB (c) ridge pedosedimentary profiles. POSL signal at the site BAT (a), HINB (b) and GUB (c) in the ridge (BAT, HINB et GUB) and in the furrow (BATS et HINS).

### 3.4.2. P-OSL analysis

In the BAT profile, the values observed in the IRSL and OSL signal range from 691 to 170985 photons and from 3906 to 392264, respectively (Figure 20a). In the BATS profile, the values observed in the IRSL and OSL signals range from 1399 to 204526 and from 5357 to 516096, respectively. In the HINB profile the values observed in the IRSL and OSL signal range from 1025 to 60036 and from 3674 to 102051, respectively (Figure 20b). In the HINS profile, the values observed in the IRSL and OSL signals range from 2578 to 50779 and from 8623 to 132869, respectively. In the GUB profile, the values observed in the IRSL and OSL signals range from 419 to 6048 and from 1630 to 17091, respectively (Figure 20c).

The POSL signal of the BAT and HINB (ridges) profile is uniform up to  $\approx 40$  cm (Figure 20a and b). In the S and Sca horizon the signal increase slightly with a local maximum around 45 cm and decrease again till 50 cm. The local maximum is proportionally stronger for the OSL signal. From 55 cm and 60 cm for BAT (horizon IIS) and HINB (horizon IIBt) respectively a regular increase in signal is observed. The increase in photon number denotes progressive burial of the sediment. A uniform signal, on the other hand, is indicative of sediment updating. Values are low and uniform across all soil profiles on the upper part of the ridges, the result of homogeneous bleaching, probably due to ploughing. This uniform signal is also found on the soil profiles located in the furrows (BATS and HINS) in the A/AL horizon. GUB is the only profile to present an almost exclusively uniform signal with a drastic increase at 33 cm at the edge of the C horizon (Figure 20c).

The BAT (ridge) and BATS (furrow) profiles seem to present two signal inversions (photon count decreasing with depths instead of increasing, Brown et al. 2023), one in the S horizon and another at the end of IIS horizon for BAT, and one in the AL horizon and at the transition between AL horizon and IIS horizon for BATS. On both profiles the first inversions occurs below the charcoals concentration limit.



### 3.4.3. Geo-historical data

Geo-historical data show that the BAT site was cultivated in the mid-19<sup>th</sup> century (Figure 21). GUB was cultivated around 1760. Both sites were definitively abandoned in the mid-20<sup>th</sup> century and are still covered by grassland today. GUB underwent three changes in land use between 1760 and 1950, linked with the fluctuations in the Doller riverbed. HIN has been under forest since the mid-19<sup>th</sup> century. Unfortunately, no maps prior to the 19<sup>th</sup> century have been found for the HIN and BAT sites.

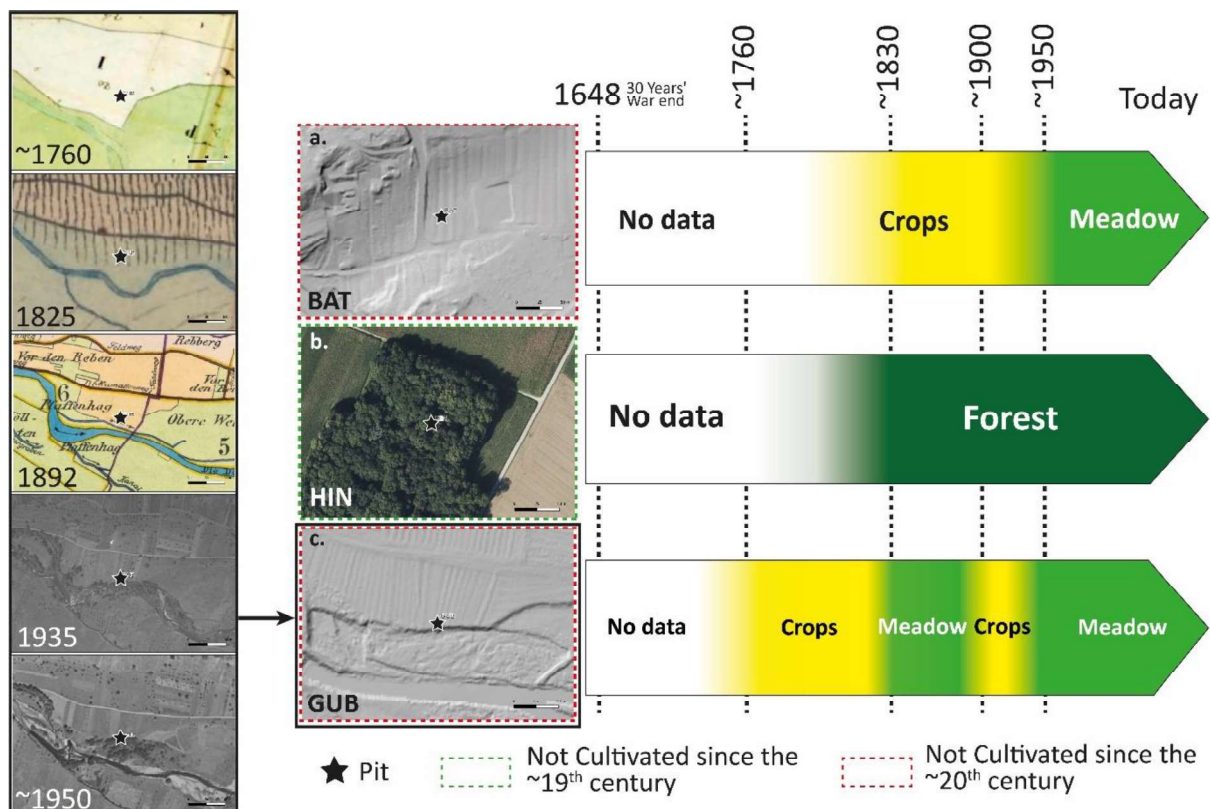


Figure 21 : Timeline (right) of geohistorical data (example with GUB site, left) for BAT (a), HIN (b) and GUB (c). The sites are distinguished into two categories: not cultivated since the ~19<sup>th</sup> century (green rectangle) and not cultivated since the ~20<sup>th</sup> century (red rectangle). BAT and GUB site with a DTM view and HIN site with satellite picture. Source: described in 3.3.2

## 3.5. Discussion

### 3.5.1. Analysis of ridge soil morphology

As shown by Langewitz et al. (2021), the absence of a distinct A horizon beneath the ploughed part of the ridge means that the entire soil layer has been mixed (Figure 19). Consequently, at the BAT, HIN and GUB sites, ridges were constructed using a heavy plough. This means that at least 20 cm of the palaeosol was ploughed and mixed from the very first ploughing. After several years, or even centuries, this palaeosol was covered in the center of the ridge by a thick layer of soil. Under these conditions, it is not easy to determine the precise upper boundary of the palaeosol buried under the ridges using a pedological approach alone. Only in HIN ridge appear a supplementary horizon (IIBt) in comparison with the furrow that is 25 cm thick. The Sca is also 15 cm thicker under the ridge.

### 3.5.2. Determining buried soils under ridges

Even if pedological approaches, as we have shown with the BAT and HINB profiles, can unseal the limits of certain pedologically homogeneous units, the application of P-OSL as a tool for identifying palaeosol boundaries can usefully support field analyses. P-OSL can be used to determine the depth at which the "root" of the palaeosol is located. In Figure 22 all the soil profiles show a uniform OSL and IRSL signal on the top of the ridge. This is typical of the part of the soil that has been regularly ploughed and thus homogenized and regularly exposed to light (Brown et al., 2023). In the BAT and HINB ridges, the signal is uniform up to 40 cm depth (Figure 22a and b). Although it should be noted that the BAT and HIN sites are different in many aspects (i.e. pedological, geographical and geological), their profiles show a very similar signal between the ridge and the furrow. In ridges, the P-OSL signal show a slight evolution or a break in signal almost at the same depth (between 40 and 50 cm). This inversion can match the downward limit at which ploughing was able to mix the sediments. Such inversions in the P-OSL signal have already been observed in terraces at the limit of uniform units typical of ploughed soils (Kinnaird et al., 2017; Turner et al., 2021; Brown et al., 2023). Consequently, the horizon under this signal inversion could thus correspond to the buried soil. This is confirmed by the OSL and IRSL signals below, which show a stable

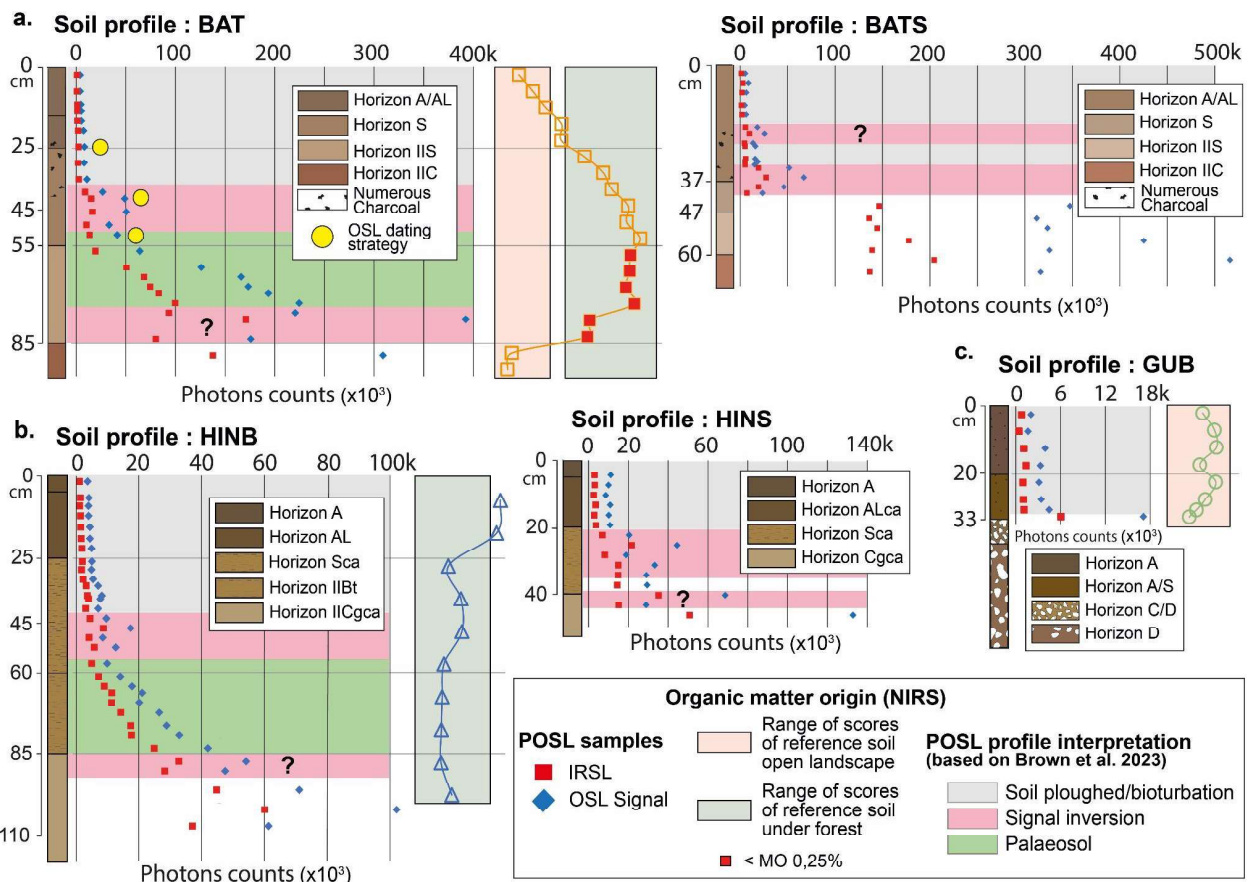


Figure 22 : (a) POSL signal, OSL dating strategy (circle yellow) and NIRS scores at the site BAT in the profile BAT (ridge) and in the profile BATS (furrow); (b) POSL signal and NIRS scores at the site HIN in the profile HINB (ridge) and in the profile HINS (furrow); (c) POSL signal and NIRS scores at the site GUB in the profile GUB (ridge). POSL profile interpretation is realized with Brown et al. 2023.

intensity/depth relationship, indicating the progressive burial of soil sediments over time. This also confirms by the pedological analyses. Our soil analysis showed for HINB the presence of a luvisol truncated probably by ploughing (horizon IIBt). It is the same observation in BAT with the presence of the IIS horizon. The GUB soil profile is the only one to show no buried soil evidence, probably due to its too shallow depth in relation with a parent material that is unsuitable for deep soil and nearly impossible to plough (Figure 22c).

### 3.5.3. Future dating strategy

We confirm what many studies have shown about the potential of the P-OSL method to better constrain the sampling strategy for later luminescence sampling (Kinnaird et al., 2017; Porat et al., 2019; Turner et al. 2021). In the GUB profile, the total absence of palaeosol unfortunately means that OSL dating cannot be applied (Figure 22c). The BAT and HINB soil profiles show a promising POSL signal for OSL dating. However, the nature of the parent rock in the HINB profile raises questions about the suitability of this method as interpretation of OSL age estimates performed on loess from the Upper Rhine Graben is hazardous (Wuscher, 2021). The OSL and IRSL signals in the BAT profile show a certain similarity, indicating the same pattern of paleodosimetric information (Figure 22a). OSL dating could then be carried out.

Possible sampling location for further OSL dating, i.e., four samples, in the BAT profile is based on the interpretation of the P-OSL profile, soil analyses and geo-historical data (Figure 22a). The first sample could be collected at the boundary between the AL and S horizons (25 cm) for three reasons: (i) it is located above the limit of charcoal concentration, enabling comparison between radiocarbon and OSL dates ; (ii) it shows a slight increase in the P-OSL signal and a shift in the origin of organic matter towards a forest-dominated signal ; (iii) this is the downward limit reached by ploughing until the early 20<sup>th</sup> century, as soil analyses have shown. The second and third samples could be collected from the signal inversion below the charcoal concentration ( $\approx 40$  cm) and from the boundary between this inversion and the palaeosol ( $\approx 50$  cm), respectively. We believe that the inversion of the P-OSL signal (probably linked to early ploughing) and the palaeosol boundary are the most interesting samples for approximating the age of the ridge and furrows. We hypothesize that these were the first ploughing activities to bury the surface of the palaeosol, thus resetting the luminescence signal to zero. This part of the soil is no longer affected by successive ploughings due to sediment accumulation. This would mean that the P-OSL signal could be used to estimate the age of the first ploughing activities. OSL dating will enable us to confirm or refute this hypothesis.

### 3.5.4. Pedological and P-OSL signal interpretation in the furrows

We show a very clear differentiation between HINB and HINS soil in the ridge and furrow (Figure 19). Hirsch et al (2023) also observed a different post-abandonment pedogenesis between ridge and furrow. This favors greater spatial soil heterogeneity. Nevertheless, the BAT and GUB sites do not show significant horizon differentiation. The GUB site, probably due to its shallow soil thickness, did not allow the development of post-abandonment pedogenesis on a palaeosol (bedrock), favoring a differentiation of soil profiles. The BAT site shows some differences, notably in colorimetry between horizons, probably due to a difference in  $C_{(Org)}$  content. The weak pedological differentiation at the BAT site may be due to the late abandonment of the site on grassland at the beginning of the 20<sup>th</sup> century, in contrast to HIN. By contrast, all sites of Hirsch et al. study (2023) were forested in the mid-20<sup>th</sup> century.

In BATS and HINS the P-OSL signals do not show progressive burial of sediments (Figure 22a). In the furrow, this can be explained by the fact that the layer of soil affected by ploughing is progressively moved towards the center of the field (to the ridge). The HINS furrow shows a uniform signal up to 20 cm depths. The BATS furrow shows a slight signal inversion at 20 cm whose interpretation remains complex. This could be due to lateral transfer from the ridge or because of ploughing during the 17<sup>th</sup> or 18<sup>th</sup> century. Contrary to the palaeosol presence, signal inversion is present in the furrows and in the ridges (HIN and BAT). At equal depths, the BAT and BATS signals are virtually identical down to 40 cm. Beyond this depth, the BATS signal shows higher values. This shows that it is the parent material of the soil profile. Signal intensity in HINS is slightly higher than in HINB. In addition, the HINS signal is much higher from 25 cm upwards, probably due to ploughing in the parent material. These inversions of the P-OSL signal are difficult to interpret in furrows. At the BAT site, comparison of the two P-OSL signals suggests that the inversion is due to ploughing activity. At HINS, however, a lateral transfer from the ridge to the furrow is likely, as mentioned above for BATS. Explaining these inversions at different depths.

### 3.5.5. Modern and contemporary history of ridge and furrows

#### 3.5.5.1. BAT site

This site was cultivated in the mid-19<sup>th</sup> century (Figure 21a) and we believe that it was under forest before this period. The concentration of charcoal between 20 and 40 cm seems to correspond to post-Thirty Years' War forest clearing. The dated charcoal from a fragments layer is >1679. This period is known in the Vosges Mountains as a particularly murderous period between 1630 and 1634 (Garnier, 2004). The commune of Baerenthal, part of the Hanau-Lichtenberg county, was no exception. A forest composed of pioneer and post-pioneer species could be the consequence of this demographic collapse. Royal decrees (1662, 1682 and 1687) aimed at repopulating and clearing the county led to a massive influx of Swiss migrants, which peaked in 1683 and 1688 (Bodmer, 1930). Fifty years later, the area was once again repopulated. The demographic data available show that the population of Baerenthal village

increased sharply between 1793 and 1841 from 384 up to 1540 inhabitants. Moreover, it should be underlined that charcoal fragments in BAT and BATS are abundant and concentrated in a thin layer (Figure 19a). The NIRS signal in BAT also shows a forestry trend from 22.5 cm up to 52.5 cm (Figure 20a). In view of the geo-historical data, clearing must have taken place before  $\approx$  1840 (Figure 21a). Based on this data, we can affirm that land clearing took place between the end of the 17<sup>th</sup> century and the beginning of the 19<sup>th</sup> century.

### 3.5.5.2. HIN site

HIN has not been cultivated since the 19<sup>th</sup> century (Figure 21b). It is highly probable that the HIN site was abandoned after the Thirty Years' War, meaning that it has been under forest since at least the 17<sup>th</sup> century. This is consistent with the study carried out by Sittler and Hauger (2007) in the Upper Rhine Graben near Rastatt (Germany), where a 15<sup>th</sup> century ditch intersected ridge and furrows, suggesting that they necessarily predate this period. The NIRS score shows a continuous forest influence across the entire profile, which may argue in favor of an old-growth forest (Figure 20b). The mean age of residence (MRT) of the  $C_{(Org)}$  increases with depth. An open landscape signal should have appeared at depth, but this is not the case (Ertlen et al. 2015). Nevertheless, the signal is getting closer to the open landscape reference between 15 and 25 cm depth. There are therefore two possibilities: either the HIN site has remained under forest long enough to make the cultivated influence too weak, or the site has not been cultivated long enough to significantly modify the NIRS score. This second possibility is in contradiction with the idea that ridge and furrow need a long period of cultivation to be built. The low influence of the cultivation period could also be explained by a low contribution of organic matter in comparison with forest because of organic matter negative balance in agricultural fields. The current forest is composed mainly of beech and hazel, with ivy on the ground, which could argue in favour of a fairly old forest. However, there are no data to indicate the exact age of the forest. The soil-anthracological sampling showed a total absence of charcoal in the soil. The same is observed on the ridge and furrows on the North German plain in the Altmark region (Langewitz et al., 2020). In the Neolithic period, clearing was not carried out with fire, but probably with tools, in order to preserve the wood as timber. In Europe, this trend in alluvial plains with loessic soils had already been demonstrated by Williams (2000).

### 3.5.5.3. GUB site

Land use at GUB changed several times between the 18<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries (Figure 21). But this site has been cultivated at least since the mid-18<sup>th</sup> century. NIRS data confirms that this site was open landscape for a long time. This site had been selected because of the presence of two alluvial terraces (MNT, Figure 23). We assumed that the establishment of terrace number one was concomitant with the erosion of the ridge and furrows. The land register showed the former course of the Doller and the boundary of GUB's land parcels. After georeferencing historical and aerial maps (Figure 23), we were able to establish that the cadastre dated from 1892. Figure 23 shows that the cadastre is in line with the

historical map (disregarding calibration errors). GUB's land parcels were not eroded before 1892. The 1935 aerial photo confirms this. The Doller stream moved northwards, scouring the base of Terrace one and gradually eroding the land. Consequently, Terrace number two, the erosion of the plots and GUB's definitive abandonment to grassland date from the early 20<sup>th</sup> century. Nevertheless, it is possible that other ridge and furrows were located at the site of Terrace one. The accuracy of historical maps leaves much to be desired, but the 1760 map shows that Terrace one was already present at that time. This terrace therefore predates 1760.



Figure 23 : DTM of the GUB site (first image on the left) with terrace 1 (no dating) and terrace 2 (dating between 1892 and 1950). The 1892 land register is shown in purple. Source: described in 3.3.2

### **3.6. Conclusion**

P-OSL is a valuable tool to study ridge and furrows pedo-stratigraphy. This is a promising step towards better interpreting soil analyses and palaeosol identification.

At present, the ridges and furrows in our study have all been abandoned to grassland or forest. We therefore believe that the study of field systems is important for landscape management and conservation. Due to their particular agro-morphology, ridges and furrows influence the water content between furrow and ridge (Langewitz et al., 2021; Hirsch et al., 2023). The presence of these agrarian forms is also an indicator of chemical soil modification (Alcántara et al., 2017; Langewitz et al., 2021, 2022; Hirsch et al., 2023). It is essential for understanding the current spatial distribution of species and potential temporal changes in species responses to disturbance (Cannon et Reid, 1993). The detection and spatialization of these agro-morphologies (and other forms) are relevant indicators for assessing the influence and disturbance of current landscapes.





# Chapitre 4

---

## **Spatio-temporal dynamics of forest ecosystems revealed by the LiDAR-based characterization of medieval field systems (Vosges Mountains, France)**

Article publié dans la revue *Anthropocene*

### **Résumé**

Les reliques des pratiques agricoles ont fortement marqué de nombreux paysages modernes et ont ainsi considérablement perturbé les écosystèmes forestiers au cours des derniers siècles. Les anciens champs des Hautes-Vosges (nord-est de la France) datent principalement de la période médiévale (du 6<sup>e</sup> au 15<sup>e</sup> siècle de l'ère chrétienne) et consistent en des structures parcellaires ou linéaires sur les pentes des collines et dans le fond des vallées. Ces éléments résiduels se répartissent en trois catégories : les champs bombés, les ressauts (rideau de culture / terrasse agricole) et les murgers. Le LiDAR (détection et télémétrie par ondes lumineuses) peut détecter des caractéristiques de microrelief, telles que les empreintes topographiques de ces systèmes de champs sur des zones étendues, et ainsi établir une nouvelle base temporelle pour reconstruire les changements forestiers sur des échelles de temps relativement longues, c'est-à-dire avant les premières cartes topographiques historiques.

Ici, nous avons numérisé d'anciens systèmes de champs dans le sud-est du massif des Vosges à partir d'un MNT à haute résolution dérivé du LiDAR afin d'évaluer leur distribution spatiale à l'échelle de la chaîne de montagnes (1185 km<sup>2</sup>) et en relation avec la topographie. Les anciens systèmes de

culture couvrent environ 6,6 % de la zone d'étude (78,5 km<sup>2</sup>), les ressauts (55,5 km<sup>2</sup>) et les murgers (20,6 km<sup>2</sup>) étant plus répandus que les champs bombés (2,4 km<sup>2</sup>). Les anciens systèmes de champs sont préférentiellement situés sur les pentes orientées vers le sud au-dessus d'un seuil de 800 m d'altitude ; ce schéma indique des pratiques agricoles systématiques dans l'ensemble de la région. Nous comparons ensuite les caractéristiques spatiales dérivées du LiDAR avec une carte de France du 19<sup>ème</sup> siècle et une base de données régionale moderne sur l'occupation des sols afin de déduire les trajectoires spatio-temporelles des paysages. Nous observons que les anciens systèmes de champs ont été progressivement, mais de manière inégale, abandonnés et transformés en prairies ou en forêts. L'abandon des champs agricoles au milieu du 19<sup>e</sup> siècle et leur conversion en prairies et en forêts dépendent fortement de la pente et de l'altitude (prairies et forêts : 18-19° et 610-620 m). Ces valeurs diffèrent de celles associées aux sites agricoles encore cultivés aujourd'hui (environ 16° et 550 m).

Enfin, nous démontrons la pertinence de l'intégration des anciens systèmes de champs pour caractériser les zones de forêts anciennes. Moins de 2 % de la zone cartographiée comme forêt au 19<sup>e</sup> siècle était cultivée entre le 6<sup>e</sup> et le 15<sup>e</sup> siècle. Plus important encore, notre approche quantifie les zones de forêts anciennes perturbées et non perturbées à l'échelle d'une chaîne de montagnes. Cette étude ouvre de nouvelles perspectives pour l'évaluation précise de l'âge des écosystèmes forestiers, mais elle révèle également un modèle d'évolution de l'utilisation des terres dans les Hautes-Vosges qui est similaire à celui observé dans d'autres régions montagneuses d'Europe.

# Spatio-temporal dynamics of forest ecosystems revealed by the LiDAR-based characterization of medieval field systems (Vosges Mountains, France)

Benjamin Keller<sup>1</sup>, Pierre Alexis Herrault<sup>1</sup>, Dominique Schwartz<sup>1</sup>, Gilles Rixhon<sup>2</sup>, and Damien Ertlen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE) – UMR 7362, CNRS – University of Strasbourg, 3 rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France

<sup>2</sup>Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), 1 quai Koch, 67000 Strasbourg, France

**Keywords:** Former field systems, ancient forest, LiDAR, anthropogenic landscapes, Hautes-Vosges, low mountain range

## Abstract

Relics of past agricultural practices, former field systems have strongly imprinted many modern landscapes and have thus significantly disrupted forest ecosystems over the last centuries. Former field systems in the Hautes-Vosges mountain range (north-eastern France) date primarily to the medieval period (6<sup>th</sup> to 15<sup>th</sup> century C.E.) and consist of parcelled or linear structures on hillslopes and valley floors. These residual features fall into three categories: ridge and furrow, terraced slopes, and stone walls. LiDAR (light detection and ranging) can detect microrelief features, such as the topographical imprints of these field systems over extended areas, and thereby establish a new temporal baseline for reconstructing forest changes over relatively long timescales, i.e., before the first historical topographic maps.

Here, we digitize former field systems in the south-eastern Vosges from a high-resolution LiDAR-derived DEM to assess their spatial distribution at the mountain-range scale (1185 km<sup>2</sup>) and in relation to topography. Former field systems cover approx. 6.6 % of the study area (78.5 km<sup>2</sup>), with terraced slopes (55.5 km<sup>2</sup>) and stone walls (20.6 km<sup>2</sup>) covering a greater extent than ridge and furrow (2.4 km<sup>2</sup>). Former field systems are preferentially located on south-facing slopes above an 800 m a.s.l. threshold; this pattern indicates systematic past agricultural practices across the entire region. We then compare the LiDAR-derived spatial features with a 19<sup>th</sup>-century map of France and a modern regional land-cover database to derive the spatio-temporal trajectories of landscapes. We observe that former field systems were progressively, but unevenly, abandoned and transformed into grasslands or forests. This mid-19<sup>th</sup> century abandonment of agricultural fields and their conversion to grassland and forest is highly dependent on slope and elevation (grassland and forest: 18–19° and 610–620 m). These values differ from those associated with agricultural sites that remain under cultivation today (approx. 16° and 550 m).

Finally, we demonstrate the relevance of integrating former field systems for characterizing areas of ancient forest. Less than 2 % of the area mapped as forest in the 19<sup>th</sup> century was cultivated between the 6<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup> century. Most importantly, our approach quantifies disturbed and undisturbed ancient forest areas at the mountain-range scale. While this study opens new perspectives for accurately assessing the age of forest ecosystems, it also reveals an evolutionary pattern of land-use change in the Hautes-Vosges that is similar to that observed in other European mountainous regions.

## 4.1. Introduction

The shaping of modern landscapes is the combined result of physical, chemical, and biological processes coupled with anthropic activities. Human pressure has progressively intensified and spread across the Earth's surface, the initial tipping point probably arising with the appearance of the first cultivators (Williams, 2000). Multiple studies have identified the emergence of agriculture (and pastoralism) as the critical factor that accelerated human influence on ecosystems, including forest clearing (Williams, 2000; Olofsson and Hickler, 2008; Ruddiman and Ellis, 2009). Vast areas in Europe have been cultivated or grazed since ca. 4500 B.C.E., thereby altering forest coverage over time. Since the early- to mid-19<sup>th</sup> century C.E., forests have expanded in Europe; at least half of today's European forested areas cover former farmland, pasture, or moorland (Bergès and Dupouey, 2021).

Originally developed by historical ecologists, the concept of ancient forest is particularly relevant to the study of forest biodiversity (Peterken, 1977; Goldberg et al., 2007; Hermy and Verheyen, 2007; Bergès and Dupouey, 2021). Ancient forests are areas that have been continuously covered by forest since their first appearance on historical maps dating from the mid-19<sup>th</sup> century (e.g., Herrault et al., 2015; Cateau et al., 2018). Land-use trajectories over the last decades and centuries are key for understanding the current spatial distribution of species (Compton and Boone, 2000) and possible time lags in species' responses to disturbances (Cannon and Reid, 1993; Carrari et al., 2016; Dambrine et al., 2007; Dupouey et al., 2002; Hermy and Verheyen, 2007; Koerner et al., 1997; Sciama et al., 2009). In Europe, these ages are probably a minimum because the production date of the maps roughly matches a minimum in forest extent. However, verifying this assumption is difficult because of the scarcity of historical data before the first available national topographic maps. Palaeoecological and (geo)archaeological studies provide data at millennial timescales, albeit with limited spatial precision for the former and often a highly localized spatio-temporal coverage for the latter (Rösch, 1992, 1998; Dreßler et al., 2006; Brown, 2009; Mäkel et al., 2009; Wieckowska et al., 2012; Doyen et al., 2013; Etienne et al., 2013; Knapp et al., 2013; Nyssen et al., 2014; Robin et al., 2014; Robin and Nelle, 2014; Sudhaus and Friedmann, 2015; Larsen et al., 2016; Alcántara et al., 2017; Gouriveau et al., 2020). Moreover, the limited pre-19<sup>th</sup> century large-scale spatial data, i.e., covering at most the last 200 to 300 years, is prone to numerous geometric and semantic uncertainties (Vallauri et al., 2012, Kaim et al., 2016; Bergès and Dupouey, 2021).

Light detection and ranging's (LiDAR) ability to penetrate forest canopies and detect microrelief has greatly improved identifying past agricultural imprints over large areas (Sittler and Hauger, 2007). LiDAR can (i) detect microrelief features inherited from periods well before those covered by early

historical maps and (ii) provide a new temporal baseline for the spatio-temporal analysis of ecosystems (Devereux et al., 2005; Affek, 2015; Ives, 2015; Sobala, 2021). Archaeological prospection involves detecting former field systems on LiDAR-derived digital terrain models (DTM) (Johnson and Ouimet, 2014, 2016, 2018; Sittler et al., 2015; Brown et al., 2020; Duma et al., 2020; Georges-Leroy, 2020); the application of LiDAR increases the detection of fossilized plots (under forest) by 50 % relative to field identification only (Georges-Leroy et al., 2009).

Former field systems result from ancient agricultural practices, and they shape many modern landscapes (Blanchemanche, 1990). Each former system is characterized by a distinct shape or morphology and delimits a former agricultural plot. Their study requires their preservation; this limitation prevents their study in lowland areas where modern agricultural activities have removed these traces. In north-eastern France, however, the southern part of the Vosges Mountains, referred to from now on as the Hautes-Vosges (i.e., the highest part of the Vosges range), provides a unique natural laboratory for studying former field systems. First, the region has remained largely unspoiled by extensive agriculture. Second, regional land use for agricultural activities (crops) is chronologically well constrained (Garnier, 2000; Parmentier, 2012; Sudhaus and Friedmann, 2015; Mariet et al., 2018; Schwartz et al., 2020). Neither large-scale forest clearance nor any form of exploitation occurred before the establishment of medieval agriculture (6-15th century C.E.) in the Hautes-Vosges (Sudhaus and Friedmann, 2015). Several lines of evidence indicate a medieval origin for the ridge and furrow, terraced slopes, and stone walls associated with former field systems (Janssen and Janssen-Kettlitz, 1972; Garnier, 2004).

We focus on the eastern part of the Hautes-Vosges because of the extensive historical records and the availability of a complete LiDAR cover. These two factors allow the detailed characterization of former field systems and the associated historical agricultural land use. Our findings should therefore provide new insight into the spatio-temporal dynamics of forest biodiversity in this region. The importance of our study relates to the extended timespan, i.e., up to 1000 years, over which former field systems are considered across an extensive region (1185 km<sup>2</sup>). We aim to answer three questions:

- What is the spatial distribution of each type of former field system, i.e., terraced slopes, stone walls, and ridges and furrows?
- What are the main topographic features, i.e., elevation, slope, and exposure, associated with former field systems in the Hautes-Vosges?
- How can the study of former field systems help characterize ancient forests (sensu Dupouey et al., 2007a)?

We identify and characterize former field systems by applying a 1 m resolution DEM derived from ground-filter airborne LiDAR in the six main watersheds of the eastern Hautes-Vosges. We then compare our LiDAR-derived spatial forms with 19<sup>th</sup>-century État Major topographical maps and a regional land-cover database (Coopération pour l'information géographique en Alsace (CIGAL), 2023) to derive the spatio-temporal trajectories of these former field systems. Finally, we evaluate the importance of considering medieval field systems when characterizing present-day forests. Although existing approaches for determining the age of these agricultural remnants rely on historical maps

(Dupouey et al., 2007a), we demonstrate the utility of LiDAR data for extending forest mapping and estimates of forest age to much earlier periods.

## **4.2. Study area**

### **4.2.1. Physical characteristics of the Hautes-Vosges**

The Vosges Mountains (elevation 200–1425 m a.s.l.) are a low mountain range located in NE France (Figure 24). These mountains experience a strong Foehn effect (François and Humbert, 2000) because of (i) the NNE–SSW orientation of the main drainage divide and (ii) the dominant lows coming from the Atlantic Ocean. The regional climate varies from oceanic to (almost) semi-continental, reflected by a very steep west-to-east precipitation gradient between the heart of the Hautes-Vosges (>2300 mm/yr) and the Upper Rhine graben (550 mm/yr in Colmar). Winters are generally cold and summers are mild (mean annual temperature of 11 °C).

The 1185 km<sup>2</sup> study area covers the eastern Hautes-Vosges (southern Alsace) and includes six major catchments with watersheds ranging from 111 to 277 km<sup>2</sup>. From north to south, they are the Liepvrette, Weiss/Strengbach, Fecht, Lauch, Thur, and Doller watersheds. The regional geology is dominated by crystalline rocks (Skrzypek, 2011), mostly plutonic formations (e.g., various granites in the Fecht catchment) and secondarily metamorphic formations (e.g., schists in the upper Lauch catchment). Volcanic rocks, e.g., latites, are found in the southernmost areas, e.g., the Doller catchment. Forests currently cover more than 70 % of the study area; however, large meadows, in particular pastures and hay meadows, remain a prominent feature in some catchments, e.g., the Weiss/Strengbach and Fecht watersheds.

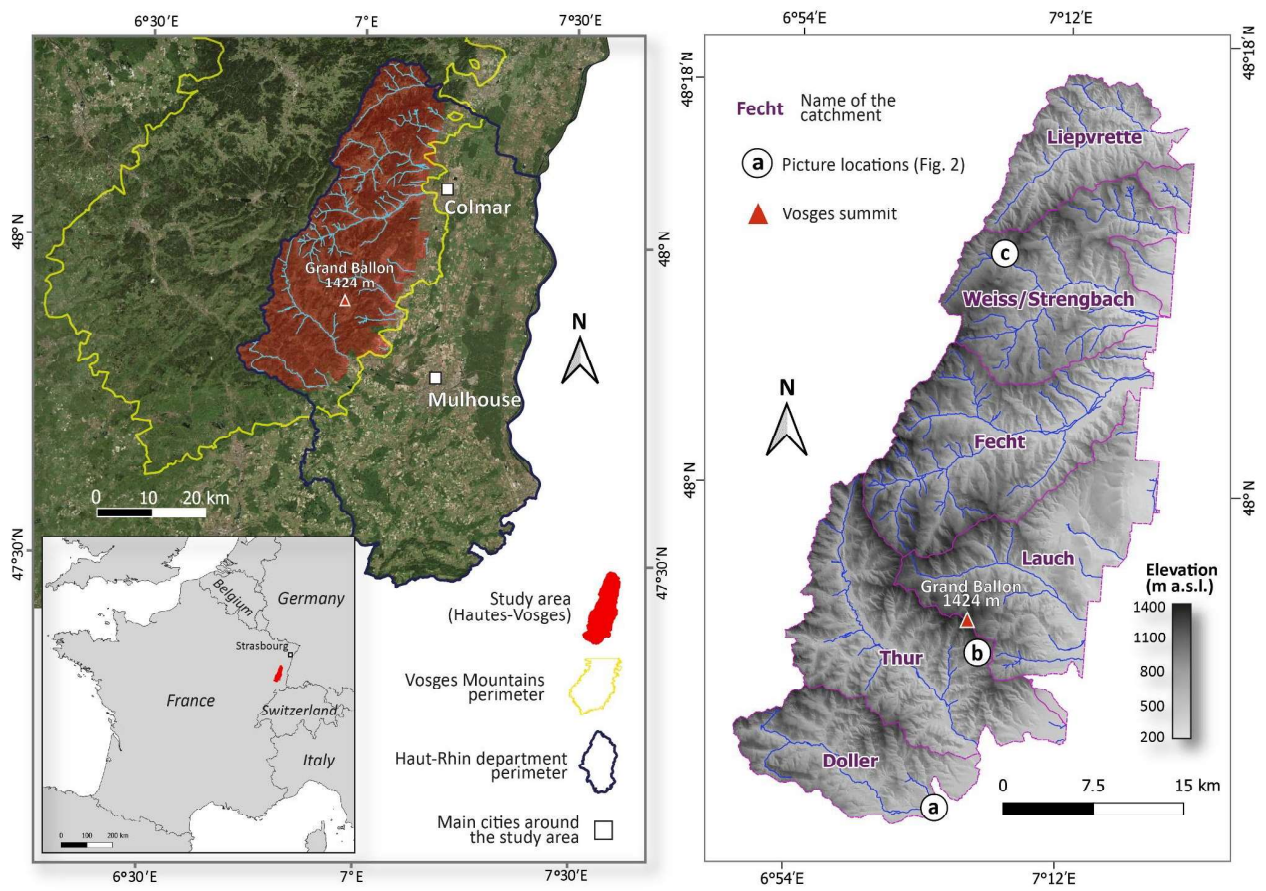


Figure 24 : Location of the Hautes-Vosges study area (1185 km²) in north-eastern France (right); topography of the six catchments (left)

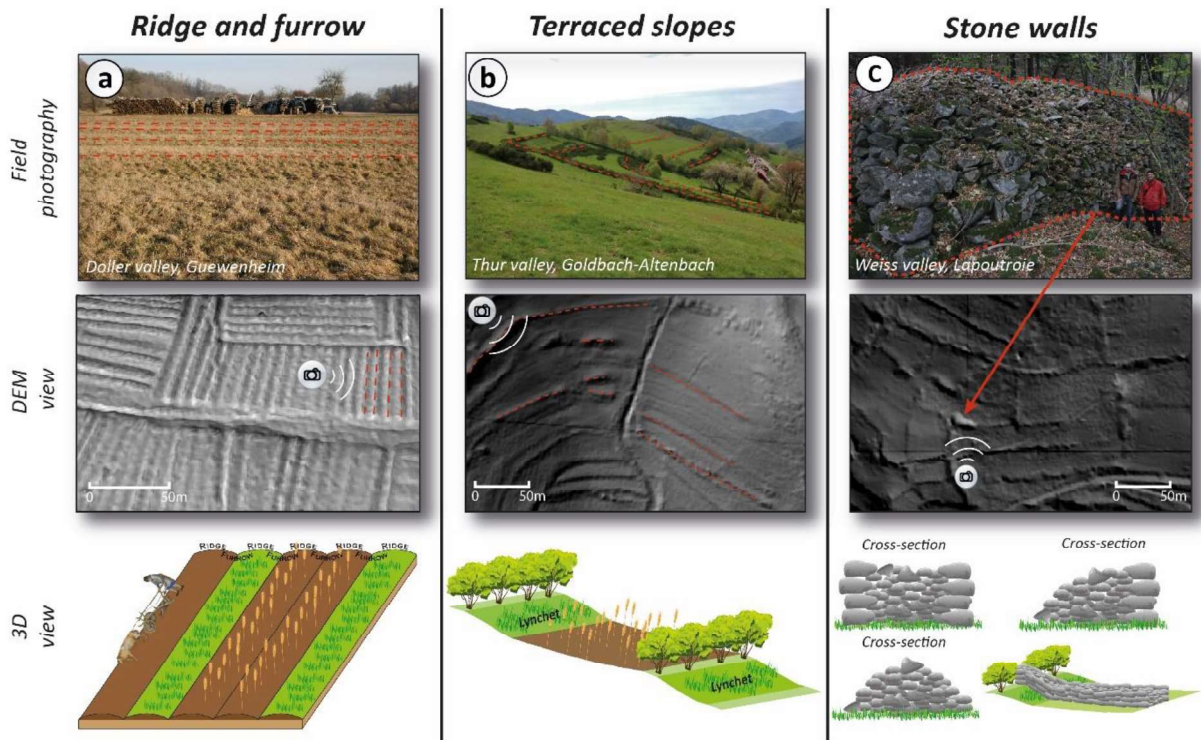


### 4.2.2. Historical overview

No significant forest clearance or large-scale exploitation occurred in the Hautes-Vosges before the introduction of farming in the early Middle Ages (6–8<sup>th</sup> century C.E.) under the authority of a dozen influential abbeys (Schwartz et al., 2020; Sudhaus and Friedmann, 2015). Four of these abbeys are located in our study area (Bornert, 2008). Although Charlemagne, for instance, granted the Murbach Abbey the entire upper half of the Thur Valley (ca. 800 C.E.), the abbeys controlled most of the land surface at the very beginning of feudalism (9–10<sup>th</sup> century), except for the royal domains and ducal lands (Parmentier, 2012). Anthropogenic activities intensified ca. 1050 C.E. (Janssen and Janssen-Kettlitz, 1972) in association with the 10<sup>th</sup> to 12<sup>th</sup> century construction of numerous castles (> 45) and abbeys in the region (Bornert, 2008, Koch, 2012). Social disorganization at the end of the Middle Ages and the onset of the early Modern period (14–17<sup>th</sup> century) led to a decline in farming, thereby favouring forest recovery in the Hautes-Vosges (Mariet et al., 2018) and the bordering regions (Ruffaldi et al., 2007). This disorganization stemmed from several Black Death outbreaks during the 14<sup>th</sup> century and successive disastrous wars, e.g., the Hundred Years' War (1337–1453), and peaked during the Thirty Years' War (1618–1648). By 1640, the population of Alsace had fallen by half (Vogler, 1998). After 1648, the Hautes-Vosges were progressively annexed by the Kingdom of France, accompanied by Louis XIV's edicts (1662, 1682, and 1687) to repopulate the devastated areas (Garnier, 2000; Emig, 2012). The most recent deforestation phase in the region dates from the 18<sup>th</sup> century (Gebhardt et al., 2015), with forestry, supporting industries, and pastoral activities prevailing in the Hautes-Vosges (Garnier, 2004). This historical context suggests a medieval origin (6–15<sup>th</sup> century) for the ancient agricultural practices shaping the Hautes-Vosges landscapes.

### 4.2.3. Former field systems in the Hautes-Vosges

Crop fields, pastoralism, and forestry were three common and widespread ancient agricultural practices in the Hautes-Vosges (Garnier, 2004). Here, we define former field systems as the remaining landforms inherited from the crop fields; their microrelief results from the intense ploughing over time or (at a minimum) land processing for subsequent tillage. Whether these ploughed fields were dedicated to cereal farming cannot be ascertained, as 1) the fragmentary historical archives record only local practices across much of the Hautes-Vosges (Garnier, 2004); and 2) the insufficient spatial resolution of the few palynological studies covering the Middle Ages prevents documenting a large-scale regional pattern of cereal cultivation (*Cerealia*, *Vitis*), and these analyses do not provide information about specific locations (Janssen and Janssen-Kettlitz, 1972, Mariet et al., 2016).



**Figure 25 : Former field systems in the Hautes-Vosges, NE France; field- and LiDAR-images and schematic representations of (a) ridge and furrow, (b) terraced slopes, and (c) stone walls**

Each type of former field is characterized by a singular shape and/or morphology and delimits a former agricultural plot. Although a few isolated occurrences have been reported, former fields are spatially clustered, producing conspicuous patterns of these remaining landforms across the region; these features are described as spatial systems regardless of their type. In the Hautes-Vosges, ridge and furrow (Figure 25a), terraced slopes (Figure 25b), and stone walls (Figure 25c) are the three main types of former field systems.

#### 4.2.3.1. Ridge and furrow

Ridge and furrow systems are ancient, elongated plots characterized by several bulges (or smooth ridges), each separated by a hollow referred to as a furrow (Figure 25a). Each ridge between two furrows represents a former agricultural parcel, and several adjacent ridges represent a system of agricultural parcels. In Europe, the peculiar shape of these fields most likely results from the use of the fixed mouldboard plough (Dion, 1983; Sittler et al., 2007, 2015). Single-sided ploughing from the plot centre to its edge gradually increased the soil's thickness in the central part, eventually producing this typical bulged topography. The establishment of ridges and furrows can be traced to the first half of the Middle Ages and the invention of this heavy plough around the 10th century (Andersen et al., 2016). This dating is consistent with that proposed by multiple studies in Germany (Sittler and Haugler, 2007; Alcántara et al., 2017; Langewitz et al., 2020) and England (Brown, 2009). In the easternmost areas of France, ridge and furrow has been previously observed in lowland areas (Sittler et al., 2007) and along valley floors draining the Hautes-Vosges (this study).

#### 4.2.3.2. Terraced slopes: agricultural terraces and lynchets

Topographically, agricultural terraces and lynchets are similar landforms, as they are both characterized by “ridges subparallel to the maximum slope” (Brown et al., 2021, p. 2; Figure 25b). Exhibiting successive strips that run roughly parallel to each other at different elevations, agricultural terraces are intentionally shaped. The extracted material is deposited downslope to create an embankment—supported or not by a wall—whereas the upslope surface is flattened. By contrast, lynchets are closely related to the presence of former or still-existing hedges (e.g., Froehlicher, 2016) or walls (e.g., Georges-Leroy et al., 2009). Upslope sediment accumulation results in a sharp topographic step in the direct vicinity of the obstacle and gentler slopes between two successive hedges/walls. Surface run-off and tillage erosion are the two main processes responsible for sediment mobilization along the hillslope (Nyssen et al., 2014). Our study area is dominated by lynchets, although agricultural terraces occur; we use the term ‘terraced slopes’ to represent both features. Although a few lynchets date to the Bronze Age (Froehlicher, 2016; Nielsen and Dalsgaard, 2017) and Gallo–Roman Period (Ruffaldi et al., 2007; Nyssen et al., 2014), this landform dates predominantly to the Middle Ages (Bernard-Allée and Valadas, 1992; Brown, 2009; Nyssen et al., 2014; Froehlicher, 2016; Larsen et al., 2016), including one site located within our study area (Schwartz et al., 2020). Lynchets are regularly depicted in European iconographic works, such as illuminations or engravings dating from the 15th to 17th century (Schwartz et al., 2019).

#### 4.2.3.3. Stone walls

Stone walls are cropping systems characterized by reticulated, linear, or circular wall structures (Schwartz et al., 2003; Figure 25c). In some instances, stone walls can be paired; however, unlike ridge and furrow, they do not necessarily exhibit a regular plot network. These walls result from stone displacement at the surface and stone unearthing and removal from the subsurface when cultivating new plots or for facilitating ploughing (Johnson and Ouimet, 2016). Large clasts and blocks were moved minimally, deposited along the plot’s edges in many cases or even left in the plot centre. In the latter case, these accumulations are termed ‘cairns’ or ‘stone piles’ (Ives, 2015). Stone walls are found in other French regions, such as the Langres Plateau, and are also widely reported in the low mountain ranges of Poland, e.g., the Sanok–Turka and Izera Mountains and the Silesian and Żywiec–Kysuce Beskids (Affek, 2015; Landois et al., 2019; Duma et al., 2020; Sobala, 2021). Radiocarbon dating of fossilized charcoal and organic matter from underlying palaeosols placed the origin of the stone walls in our study area in the Middle Ages (Schwartz et al., 2003), a dating confirmed by the historical studies of Combaud et al. (2012) and Landois et al. (2019). Field observations have revealed that many stone walls were built (and persist) on older terraced slopes dating to the Middle Ages (Froehlicher, 2016). Stone walls thus probably reflect subsequent agricultural practices during the medieval period.

## 4.3. Material and methods

### 4.3.1. LiDAR data, processing, and digitizing of former field systems

We used airborne laser scanning (ALS) data obtained from the French Mapping Agency (RGE-Altitude) under an Open Government Licence. The complete aerial survey (2921 km<sup>2</sup>) of the Hautes-Vosges was performed in January 2013 during leaf-off conditions. Raw data comprised 1 × 1 km tiles of point-cloud data in LAS format for which each pulse was classified, e.g., 'ground', 'building', 'vegetation'. Point-spacing of ground-classified points ranged from 0.5 to 1 m and varied among tiles mainly because of differential vegetation density and the presence of anthropic structures. This French Mapping Agency data set is available as a digital elevation model (DEM). The visibility of former field systems and other features at the ground surface varies because of the heterogeneous density of ground-classified points in the LiDAR data across the study area. Rugged topography and forested areas comprising several dense strata complicated the identification of former field systems. In addition to the classical hillshade layer, we applied alternative visualization techniques, i.e., PCA components and sky-view factor, where needed, via analysis of high-resolution aerial photographs (1950–1970).

DEM visualization techniques allowed the comprehensive detection of former field systems (Bennett et al., 2012). Although automated or semi-automated detection can successfully reproduce the major trends characterizing the landscape (Hesse, 2012; Guyot et al., 2018; Herrault et al., 2021), these approaches rarely yield convincing, exhaustive results. We thus digitized each field system as a single polygon despite three main methodological complications limiting a complete picture of past agricultural activities in the region. First, field systems in the Hautes-Vosges are generally fossilized under forests or grasslands; therefore, their surface has likely been smoothed (grassland) or hidden by vegetation (forest). Second, despite the relatively limited extent of agriculture currently practised in the Hautes-Vosges, several ancient landforms, including field systems, may have been eliminated from the landscape. Third, we disregarded vineyard areas along the eastern foothills of the Hautes-Vosges, including agricultural terraces, because of uncertain chronological constraints, i.e., some remain in use today, thereby masking a hypothetical medieval origin. Against these factors, the number of detected former field systems should thus be considered a minimum estimate. However, we illustrate below that our methodology yields a reliable spatial pattern of former field systems across the study area.

Finally, we defined specific rules to ensure a homogeneous output across the study area. First, we only digitized former field systems when the structure pertained to a field network. Isolated occurrences are more uncertain because of remaining artefacts in the DEM, e.g., resulting from a lower number of pulses. Thus, a single polygon encompassed several occurrences of a given former field system within a single, well-defined area. We digitized each field system type separately to generate three types of polygon. Second, the digitization scale of each type of former field system ranged from 1:1000 to 1:3000 to ensure similar accuracy levels for demarcating polygon boundaries. Finally, we cropped single polygons following the natural drainage or water channels because these features naturally delimit the spatial occurrence of former field systems.

### 4.3.2. Ancient and current land-cover mapping

Two supplementary data sets were used to reconstruct the spatio-temporal evolution of land use. First, we used historical maps drawn by the French Army (referred to as État Major maps) between 1825 and 1866 at a 1:40000 scale (freely available at <https://www.geoportail.gouv.fr/carte> or <https://remonterletemps.ign.fr/>, Institut géographique national (IGN), 2022). The advantages of these maps are twofold: (i) former land-use categories (e.g., forests, grasslands, croplands, and man-made structures) are represented in colour; and (ii) they are accurate in terms of planimetry, i.e., relatively high accuracy, and semantics (lower accuracy; Herrault et al., 2015). The maps used in this study were georeferenced and manually digitized by the French Natural Regional Park Ballon des Vosges following Favre et al. (2017). Second, we used a regional land-cover database produced by the manual digitization of colour orthophotographs that cover the entire Region Grand-Est (CIGAL, 2023). We selected this database for its spatial scale (1:50,000) and high semantic accuracy, i.e., 55 thematic classes, to facilitate comparisons with land-cover data extracted from the État Major maps.

### 4.3.3. Geospatial analysis

#### 4.3.3.1. Describing the topography of former field systems

We analysed the digitized data set from the LiDAR-derived DEM using the spatial analyst functions of QGIS 3.4 to obtain each former field system's elevation, slope, and exposure. Pixel statistics were extracted for every digitized object and reported as the average value. These indicators were then analysed individually or jointly to explore potential causal inter-relationships, e.g., elevation versus exposure.

#### 4.3.3.2. Reconstructing land-use and land-cover changes

Land-use and land-cover changes were analysed in three manners. First, we calculated the spatial density of cultivated areas at each date in each catchment. This approach permitted characterizing the spatial distribution of cultivated areas as a function of local topographic characteristics and possible differences in human occupation history from one catchment to the other. We therefore merged all thematic classes related to cultivation practices in the ca. mid-19<sup>th</sup> century data set, i.e., cultivated orchards, crops, and vegetables, into a single class. All thematic classes related to annual and permanent crops in the '2012' data set, i.e., orchards and other specific crops, were likewise merged.

Second, the intensity and the direction of changes were jointly investigated, i.e., how each LiDAR-derived former field system evolved over time. Therefore, we considered the LiDAR-derived DEM as the baseline and compared it to both data sets, i.e., the mid-19<sup>th</sup> century and 2012, via the spatial intersection function of QGIS 3.4. All thematic classes present in the two most recent data sets were

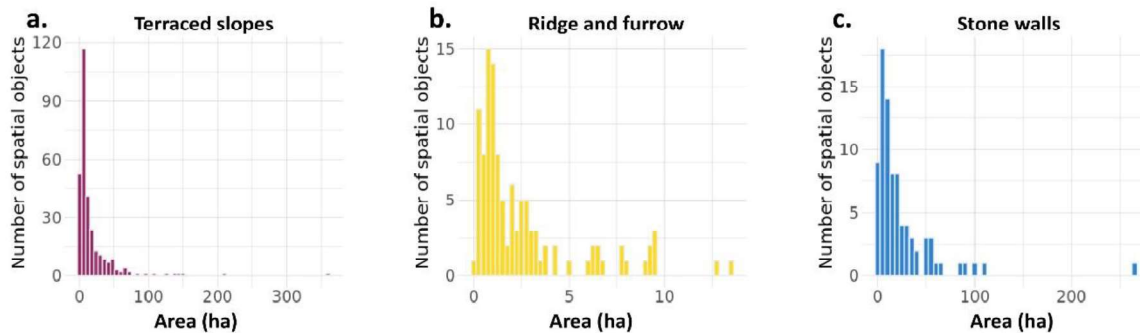
aggregated accordingly into four thematic classes: 'grasslands', 'forests', 'crops', and 'artificial'. A Sankey diagram presents the land-cover trajectories (R package 'networkD3' version 0.4).

Third, we enhanced our detection of ancient forests, hitherto exclusively based on the *État Major* maps at regional scales (Dupouey et al., 2007a) by studying the former field systems at the mountain-range scale. Field systems are used as a new baseline to provide novel insights into the spatio-temporal dynamics of forest ecosystems and potentially improve our understanding of long-term effects on current biodiversity in these forests. Thus, current forests in the 2012 data set were successively intersected with those represented on the *État Major* maps (mid-19<sup>th</sup> century data set) and the LiDAR-derived field system polygons. This process produced three forest groupings differing in their temporal trends: forest present in (1) 2012; (2) forest present in the mid-19<sup>th</sup> century and in 2012; and (3) former field systems under forest since (at least) the mid-19<sup>th</sup> century.

## **4.4. Results**

### **4.4.1. Spatial inventory of former field systems**

Former field systems cover approx. 6.6 % of the study area (564 polygons covering 7856 ha). At the individual scale, however, the size of the field system varies greatly, ranging from 0.04 ha to 443 ha. The observed frequency of polygon areas shows a positive skew, reflecting the predominantly small nature of the former field system areas, < 25 ha for terraced slopes and stone walls, < 5 ha for ridge and furrow (Figure 26). Terraced slopes (5551 ha) and stone walls (2062 ha) cover a much larger area than ridge and furrow (243 ha). Moreover, we also document the overlapping of former field systems, especially between terraced slopes and stone walls. This overlap represents 5.6% (439 ha) of the total former field systems' surface and mostly occurs in the Fecht and Weiss/Strengbach catchments (361 ha).



**Figure 26 : Occupation surface (ha) of each polygon of (a) terraced slopes, (b) ridge and furrow, and (c) stone walls in the Hautes-Vosges, France**

The only feature shared among all catchments is the predominance of terraced slopes, which ranges from 60 % (Fecht) to 94 % (Thur); the exception is the Lauch catchment, in which stone walls largely dominate (88 %; Figure 27a). The heterogeneous nature of the former field system spatial distribution is highlighted in three ways. First, only half of the catchments, i.e., the Fecht, Lauch, and Liepvrette, host all types of former field systems (Figure 27a). Among them, the Fecht and Lauch watersheds also include > 75 % of all documented stone walls. In contrast, only a single ridge and furrow area occurs at the outlet of the Liepvrette catchment (Figure 27a). Pairings of terraced slopes–ridge and furrow are observed in the Doller and Thur catchments, and terraced slopes–stone wall pairs are observed in the Weiss/Strengbach catchment. Second, a contrasting spatial pattern can be observed for stone walls and ridge and furrow (Figure 27a). Whereas the former are absent in the southern part of the study area (Thur and Doller catchments), ridge and furrow is absent from the northern sectors (except for a single case in the Liepvrette watershed). The Doller catchment includes > 50 % of all documented ridge and furrow. Third, the spatial frequency of all former field systems (regardless of their type) exhibits a generally increasing S–N gradient (Figure 27b). Former field system density remains stable around 3–4 ha/km<sup>2</sup> in the southern half of the study area (i.e., Doller, Thur, and Lauch watersheds); this density is significantly greater in the northern part with maximum densities observed within the northernmost Weiss/Strengbach catchment (> 12.5 ha/km<sup>2</sup>).

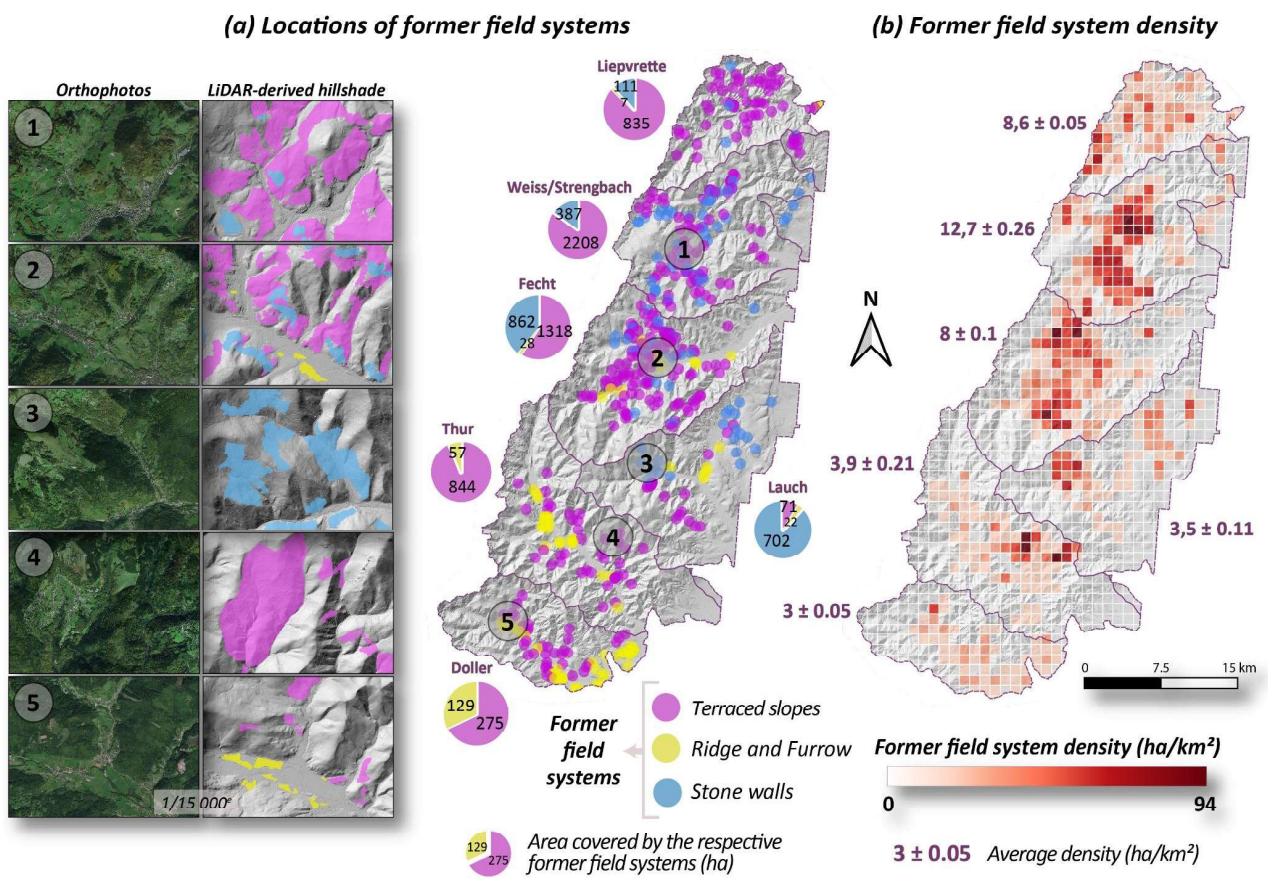


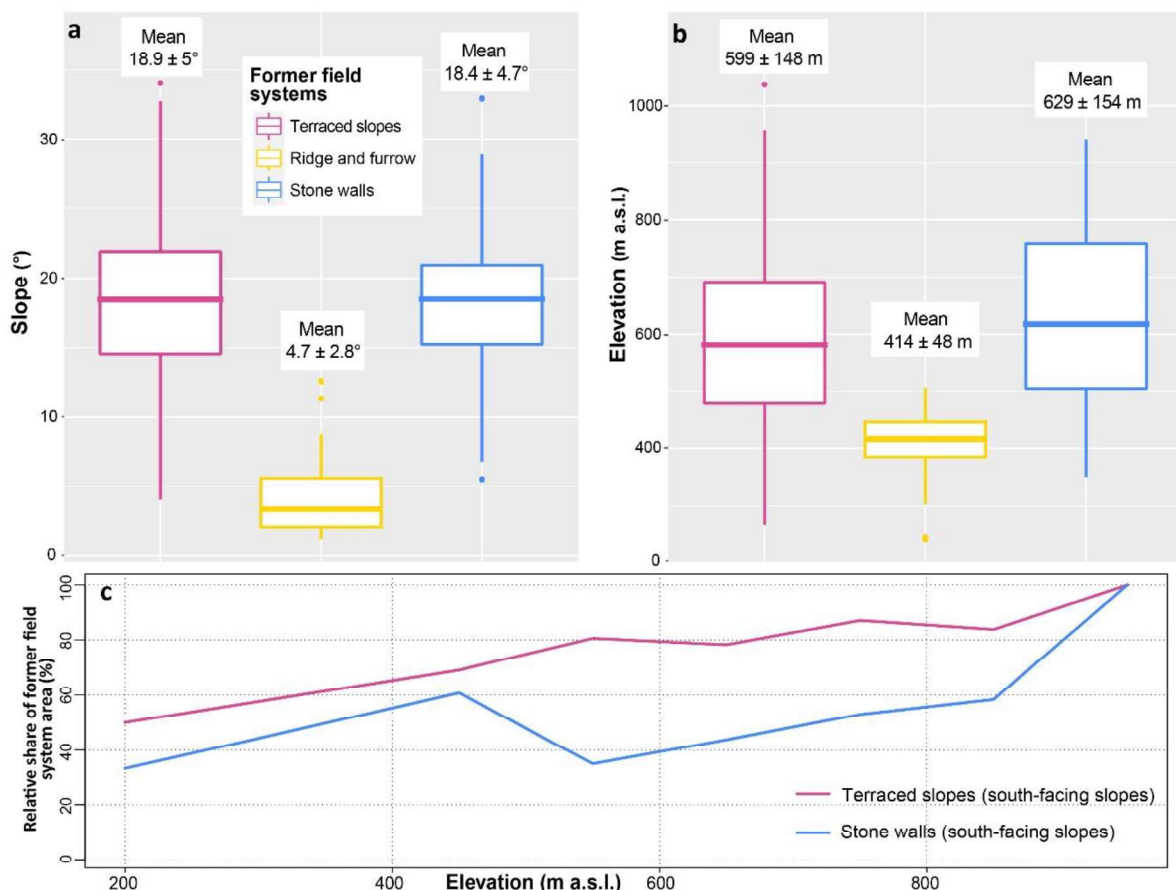
Figure 27 : Spatial distribution of (a) the location of former field systems (centroid of polygons classified by former field system category) with respective former field systems (ha) in the six Hautes-Vosges catchments and (b) density (ha/km<sup>2</sup>) of digitized former field systems across the study site with the average density of former field system in each of the six catchments.



#### 4.4.2. Former field system elevation, slope, and exposure

We determined the topographic characteristics of the three field system types (Figure 28). The mean elevation of terraced slopes and stone walls is  $599 \pm 148$  m and  $629 \pm 154$ , respectively, whereas ridge and furrow systems are found at  $414 \pm 48$  m and vary less in their elevation.

Terraced slopes and stone walls are observed in various hillslope settings and have a mean slope of  $18.9^\circ \pm 5^\circ$  and  $18.4^\circ \pm 4.7^\circ$ , respectively (Figure 28a), although about half of the terraced slopes and stone walls occur on either gentle ( $4^\circ$ – $7^\circ$ ) and steep ( $29^\circ$ – $33^\circ$ ) hillslopes. These features are also preferentially located on south-facing slopes at higher elevations (Figure 28c). Most terraced slopes lie on south-facing slopes above 250 m, and the proportion having a southern exposition increased continuously with elevation, reaching 100% at sites above 900 m. A similar trend is observed for stone walls, although the relationship between elevation and exposure is less clear. Above 900 m, 100 % of stone walls are located on south-facing slopes. Ridge and furrow occurs mainly in the southern part of the study area and are significantly under-represented relative to the other former field systems. They are mainly found in relatively flat areas (i.e., mean slope of  $4.7^\circ \pm 2.8^\circ$ ), at lower elevations (i.e.,  $414 \pm 48$  m a.s.l.), and with no preferential exposure.



**Figure 28 : Topographical characteristics of the three types of former field systems; (a) boxplots illustrating the statistical distribution of slope; (b) boxplots illustrating the statistical distribution of elevation; and (c) line plots illustrating the evolution of the relative surface area of terraced slopes and stone walls located on south-facing slopes**

### 4.4.3. Assessment of land-use and land-cover changes

#### 4.4.3.1. Evolution of the spatial density of former field systems within the catchments

The proportion of cultivated area within the study area increased from the medieval period (cultivated area Medieval = 6.6 %; 7856 ha) to the mid-19<sup>th</sup> century (cultivated areamid-19<sup>th</sup> = 13.6 %; 16127 ha). This surface decreased drastically from the mid-19<sup>th</sup> century to 2012 (cultivated area 2012 = 1.6 %; 1664 ha). However, we can separate the catchments into two groups based on their different cultivated area trajectories between the medieval period and the mid-19<sup>th</sup> century. The Fecht and Weiss/Strengbach watersheds had comparable cultivated surface areas during this period having consistent 7 % and 12 % cultivated surfaces of the total catchment areas, respectively (Figure 29). In contrast, the cultivated surfaces of the Doller, Liepvrette, Thur, and Lohbach watersheds increased by 14 %, 25 %, 8 %, and 7 %, respectively, between the medieval period and the mid-19<sup>th</sup> century. We also note a generalized and marked decrease in cultivated area from the mid-19<sup>th</sup> century to 2012, ranging from 7 % in the Fecht to 32 % in the Liepvrette watershed. In 2012, the proportions of cultivated area were comparable with those of the medieval period in the Doller, Lohbach, and Thur catchments, whereas the proportion of agricultural land in 2012 was at its lowest level in the three other watersheds.

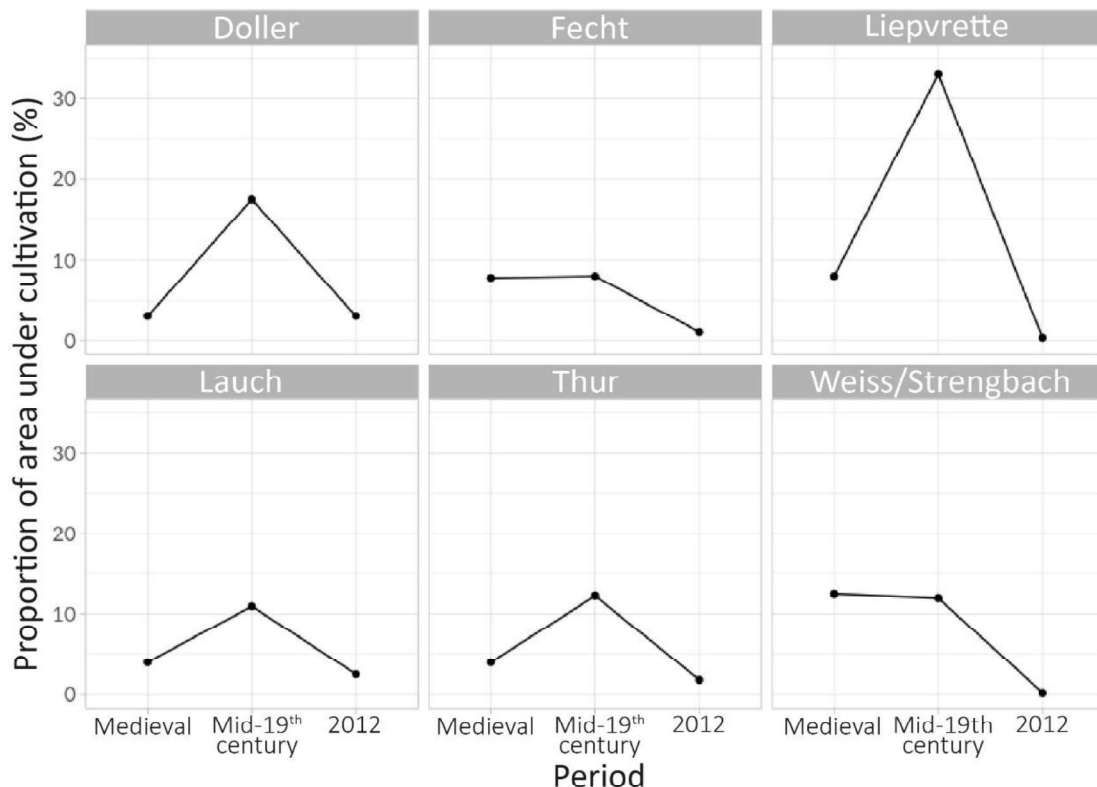


Figure 29 : Line plots illustrating the evolution of the relative surface of cultivated area in the six catchments

#### 4.4.3.2. Dynamics of cultivated areas in the Hautes-Vosges

The evolution and intensity of changes from the medieval period until 2012 can be represented in a Sankey diagram (Figure 30). From the medieval period to the mid-19<sup>th</sup> century, 45 % and 14 % (3513 ha, and 1120 ha) of the former field systems converted into grasslands and forests, respectively, whereas 40 % (3128 ha) of the original land use remained the same (croplands). After the mid-19<sup>th</sup> century, 60 % of croplands evolved into grasslands (1857 ha), whereas only a very small fraction of croplands (3 %; 102 ha) remained in 2012. In contrast, most grasslands present in the mid-19<sup>th</sup> century remained until 2012 (57 %; 2018 ha). Importantly, 38 % (1322 ha) of grasslands and 34 % (1071 ha) of croplands in the mid-19<sup>th</sup> century had been converted into forests by 2012. This points to landscape encroachment by woody vegetation following the agricultural abandonment of these areas. Interestingly, a non-negligible part of forests observed in 2012 derived from former field systems that had converted into forest as early as the mid-19<sup>th</sup> century (1.5 %; 877 ha). Finally, the first appearance of artificial areas was marginal between the medieval period and the mid-19<sup>th</sup> century (1 %; 94 ha) and increased only slightly between the mid-19<sup>th</sup> century and 2012; a small portion of croplands and grasslands (3 %; 99 ha and 3 %; 121 ha, respectively) transitioned into artificial areas.

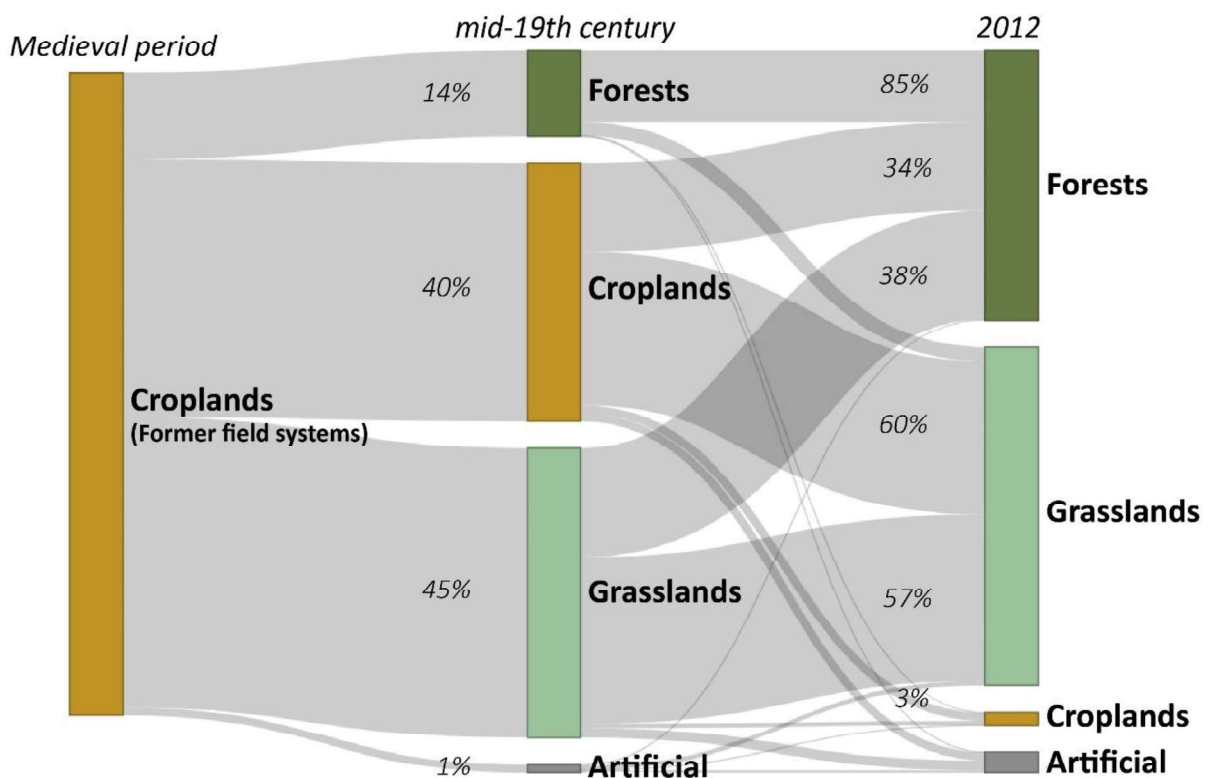


Figure 30 : Sankey diagram for change detection analysis of cultivated areas for the medieval period to the mid-19<sup>th</sup> century to 2012. The stacked bars represent the relative abundance of each land-cover type in the medieval period (first vertical bar), the mid-19<sup>th</sup> century (second vertical bar), and 2012 (third vertical bar). The weighting of each component in the stacked bars is proportional to the relative abundance of the studied land-cover type

#### 4.4.3.3. Assessment of forests' lifespans

The mapping of large-scale former field systems informs on the spatial distribution of ancient forests and highlights the complexity of ecosystem trajectories within this single label, which until now has been based only on their presence in the *État Major* maps (Dupouey et al., 2007a; Tableau 3). Forests only present in 2012 (hereinafter as 'young forest') and those present both in the mid-19<sup>th</sup> century and 2012 (hereinafter as 'ancient forest') covered 28.2% (23,047 ha) and 71.8% (58,677 ha) of the entire forested area, respectively. The spatial matching of ancient forest with former field system polygons highlighted that 1.5% (877 ha) of these were cultivated during the medieval period, covering 1.1 % (877 ha) of the present-day total forested area. Most of these specific forest patches lie in three river catchments, i.e., Fecht, Lauch, and Weiss/Strengbach, with an average of  $225 \pm 27$  ha per catchment.

Tableau 3 : Surface areas of the various forest types in the study area

Forest type	Surface area (ha)	Relative surface (%) in the current forest surface area	Relative surface (%) in the ancient forest surface area
Young forest	23 047	28.2	
Ancient forest	58 677	71.8	
Ancient forest cultivated during the medieval period	877	1.1	1.5
Ancient forest not cultivated during the medieval period	57 800	98.9	98.5

## 4.5. Discussion

### 4.5.1. On the importance of LiDAR data for mapping former field systems at large scales

To our knowledge, this study presents the first map of medieval cultivated areas at the mountain-range scale. Overall, we mapped 7856 ha of cultivated areas, separated into 5551, 2062, and 243 ha of terraced slopes, stone walls, and ridge and furrow, respectively (Figure 26). Two main factors explain the over-representation of terraced slopes relative to the other former field systems. (1) Because of their nature, terraced-slope settings cover larger areas than stone walls or ridge and furrow; and (2) terraced

slopes occur predominantly on hillslopes that were less affected by large reparcelling; therefore, their preservation over time was favoured and permitted the high-quality visualization in the LiDAR-derived DEM. By contrast, ridge and furrow preferentially occurs in flat areas, particularly valley bottoms; thus, these features are more prone to removal by anthropogenic activities.

Numerous recent studies have demonstrated the importance of LiDAR for detecting former field systems for reconstructing historical landscapes (Johnson and Ouimet, 2014, 2016; Duma et al., 2020; Georges-Leroy, 2020). Here, we demonstrate the importance of large-scale LiDAR surveys for detecting and interpreting microrelief preserved from periods much older than the first available national topographic maps. In this context, we believe that new large-scale landscape observations through remote sensing, especially LiDAR, should be encouraged to greatly expand the assessment of land-use history. The use of freely distributed ALS data, such as RGE-Altitude (Herrault et al., 2021), should also be pursued, as these data cover large territories (Figure 27b), and their acquisition period (leaf-off period) allows for detecting inherited microrelief features, despite moderate pulse densities. Nonetheless, moderate pulse densities are also a potential source of uncertainty because certain former field systems, i.e., those currently covered by forests, could be insufficiently captured owing to a low laser pulse density/forest cover density ratio.

#### 4.5.2. Spatial distribution of former field systems as a function of topography

We noted a strong relationship between terraced slopes and stone walls and elevation exposure, indicating systematic past agricultural practices across the mountain range. Terraced slopes are preferentially located on south-facing slopes above approx. 250 m (Figure 28c). The settlement of new communities, such as monasteries during the 7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> centuries, required more food resources and, therefore, the optimization of croplands (Schwartz et al., 2019). Numerous abbeys were founded in the 7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> centuries in the Hautes-Vosges (Bornert, 2008). As they represented the main political power at local and regional scales, these abbeys were most likely responsible for establishing these croplands. In the Fecht catchment, pollen records highlight an increase in non-arboreal and cereal pollen from the 8<sup>th</sup> century onwards (Janssen and Janssen-Kettlitz, 1972). Some terraced slopes may be older; however, little archaeological evidence currently supports this possibility. The presence of pre-8<sup>th</sup> century communities is rarely described in the literature, except during the Iron Age when very localized forest-clearing phases occurred in the Hautes-Vosges above 1000 m (Goepp, 2007). Most stone walls are found on south-facing slopes, and they are the dominant former field system above approximately 800 m (Figure 28c). We assume that medieval populations expanded the cultivated area because of an increasing population and were therefore forced to use all potentially suitable surfaces, including the less optimal ones. However, above a certain elevation threshold (~ 800 m), the mean climatic conditions most probably constrained settlements to south-facing slopes.

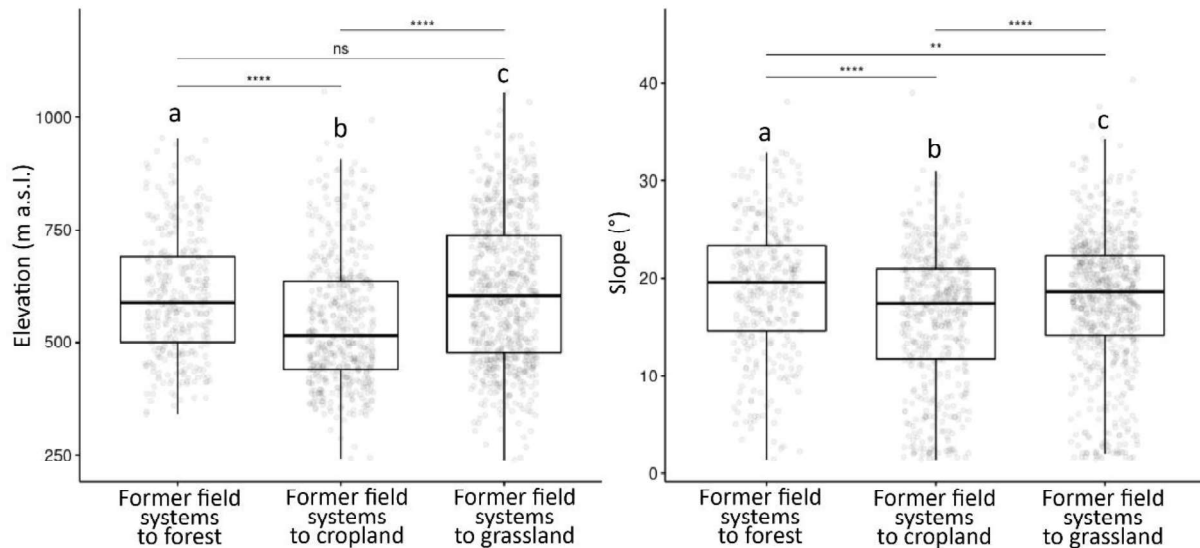
### 4.5.3. Land-use changes in the Hautes-Vosges over centuries reveal a classic pattern of landscape evolution in European mountain regions

From this mapping of former field systems, we can reconstruct the long-term evolution of cultivated areas. By determining the proportion of area under cultivation in each catchment at different moments, we could distinguish two categories that differ mainly in their respective trajectories of cultivated area between the medieval period and the mid-19<sup>th</sup> century (Figure 29). Whereas the Fecht and the Weiss/Strengbach catchments presented stable proportions of cultivated area, the Doller, Liepvrette, Thur, and Lauch watersheds experienced a marked increase in cultivated area over this time interval. We propose three explanatory factors. First, edaphic, lithologic, and/or microclimatic conditions can restrict an increase in cropland extent because of insufficient soil fertility, unsuitable structural characteristics of the soil, or relatively harsh climatic conditions (Lal et al., 2007; Hugues et al., 2018). Therefore, the medieval cultivated areas in the Fecht and Weiss/Strengbach catchments likely reflect the maximum potential of cultivation (Figure 27a), leaving only the most remote and unsuitable areas covered by native vegetation. This hypothesis could be tested using the BRGM geological maps to describe the lithology or local meteorological data to characterize the effects of the local climate. These parameters should be analysed to assess possible interactions with local relief, e.g., exposure and slope.

Second, local population trends did not favour expansion for more food resources and surplus production, which would explain the relative stability of cropland area during this period. Future work could focus on the historical demographic census at the municipal scale to explore spatial disparities between catchments (Johnson et al., 2016; Guetté et al., 2018), although rural population data before cultivation in 1840 are likely scarce, rendering this task particularly challenging.

Third, the sporadic levelling (destruction) of former field systems over time may underestimate the proportion of area cultivated during the medieval period. The vast reparcelling operation in the mid-20<sup>th</sup> century erased many of the former field systems from the landscape (Flatrès and Flatrès, 1997). Nevertheless, the Hautes-Vosges remained relatively unaffected by this process, unlike the lowland areas to the east.

We also noted a classic pattern of land-use evolution commonly observed in temperate regions over the past millennia (Ellis, 2021). First, a large part of former field systems was diverted from their primary use between the medieval period and the mid-19<sup>th</sup> century (Figure 30). This may indicate that their inherent characteristics did not provide favourable settings for new croplands in response to higher societal demands and higher productivity. Consequently, former field systems evolved mainly into grasslands and, to a lesser extent, forests. Thus, less suitable former field systems were possibly used for livestock grazing, whereas the most remote and unsuitable former field systems were already covered by regenerated forest at this time. Conversely, croplands in the mid-19<sup>th</sup> century likely reflect the most accessible and suitable areas. Those former field systems transitioning to croplands exhibited the lowest slope and the lowest elevation (Figure 31) relative to former field systems that became forests or grasslands.



**Figure 31 : Boxplot illustrating the distribution of elevation (left) and slope (right) for three distinct transition classes between the medieval period and the mid-19<sup>th</sup> century, including (a) former field systems to forest, (b) former field systems to cropland, and (c) former field systems to grasslands (c). A student t-test determined whether the groups differed statistically. Note p-value <0.0001 (\*\*\*\*); <0.001 (\*\*); <0.01 (\*\*); <0.05(\*); (ns) non-significant, i.e., >0.05**

We also observed a significant decrease in the cultivated area from the mid-19<sup>th</sup> century to 2012 (Figure 29). Similar processes in temperate regions are explained mainly by the depopulation of rural areas and radical transformations in agricultural systems (Landis, 2017). Thus, new arable lands were implemented almost exclusively in the flattest areas and most productive soils (Ellis, 2019; Meyfroidt et al., 2018). As a result, these lands with long histories of prior agricultural land use were converted to grasslands or led to forest regeneration through the forest transition process (Mather et al., 1999). The Hautes-Vosges forest is currently widely dominated by beech and fir (Sell, 1998), which are widely harvested, although not through very intensive practices. Grasslands correspond mainly to mountain meadows located approximately above 800 m, and their persistence is therefore particularly dependent on traditional activities such as pastoralism.

#### 4.5.4. Implications of former field system mapping for understanding forest age, composition, and structure

The spatial matching of former field systems and (ancient and recent) forest spatial objects helps determine forest age. More specifically, the methodological framework presented here provides a more nuanced analysis of ancient forests by describing their previous nature. We determined that 70 % of existing forests had been mapped in the État Major maps (Tableau 3) and can therefore be considered ancient forests according to Dupouey et al. (2007a). This proportion is significantly higher than estimates for France in general (~30 %) and for the Haut-Rhin department (~40 %). Within these ancient forests, our analysis of landscape dynamics highlighted that 1.5 % (877 ha) of these areas were under cultivation in the medieval period (Tableau 3). These forest patches have an average surface area of  $1.7 \pm 4$  ha at an average elevation of  $636 \pm 141$  m.

First, our approach validates using *État Major* maps to characterize forest age at a large scale. A forest identified in these maps is older than the date of mapping and therefore belongs to a non-cleared forest core. Nevertheless, this assumption remains difficult to verify because of the scarcity of historical data at such a large scale before the first national topographic maps. For existing and known ages of former field systems (ca. ~6<sup>th</sup> to ~15<sup>th</sup> century C.E.), we can conclude that nearly all detected ancient forests have likely been present since the medieval period in the Hautes-Vosges. Moreover, despite known pulses of forest-clearing stages in our study area (Janssen and Janssen-Kettlitz, 1972; Sudhaus and Friedmann, 2015), most of the existing forest cores were continuously present.

Second, these disturbed ancient forests, although not particularly abundant, demonstrate the existence of different spatio-temporal dynamics among ancient forests (Figure 32). Previously, most research considered ancient forests as a uniform entity. Several studies have provided lists of floristic species for ancient and recent forests (Hermy et al., 1999; Dupouey et al., 2002); however, these studies also showed high intraclass heterogeneity and non-significant differences between ancient and recent forests. Therefore, our detection of a greater diversity of spatio-temporal dynamics among ancient forests improves our understanding of any compositional heterogeneity or similarity among ancient forests.

Finally, former field systems are essential research objects for investigating forest ecosystem structure in many European regions. Forest stand age is a key parameter for forest management and conservation strategies. Moreover, in many forest ecosystems, age is directly linked to forest structure, and, as a result, vertical forest structural information is often used as a proxy for age. Therefore, further ALS point cloud-based analyses are required (Racine et al., 2014; Schumacher et al., 2020) to evaluate potential structural differences between original and disturbed ancient forest and recent forest.



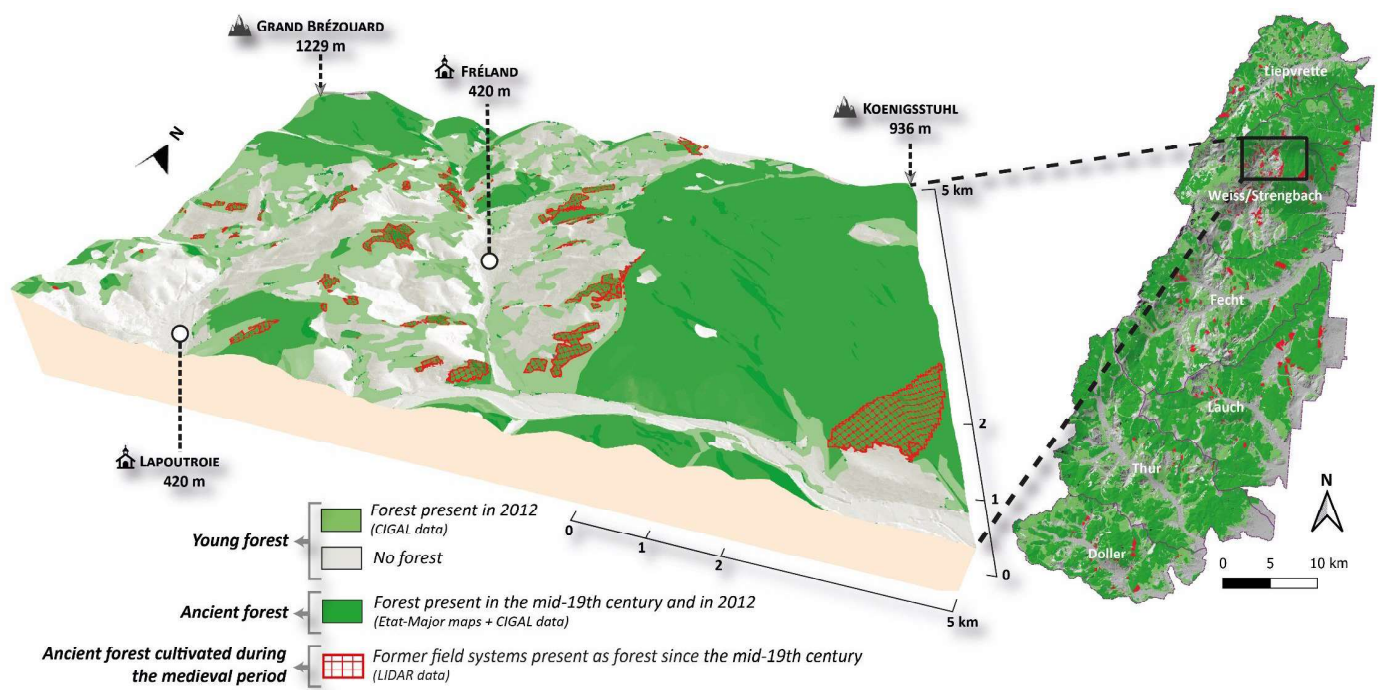


Figure 32 : Spatial distribution of the forest patches classified according to their spatio-temporal trajectory in the full study area (right) and the Weiss/Strengbach catchment (left); patches are noted as ancient forest (dark green), young forest (light green), and ancient forest cultivated during the medieval period (red)

## 4.6. Conclusion

Our LiDAR-based analysis of former field systems in a low-elevation mountain range illustrated centennial-scale land-use trajectories and improved our understanding of the hidden complexity of ancient forests. We found a high proportion of areas cultivated during the medieval period reflected specific topographic attributes, indicating systematic agricultural practices across this mountainous study area. Land-use trajectories over centuries revealed a classic evolutionary pattern observed in European mountainous regions: older, extensive agricultural areas subjected to active land-clearing phases were progressively abandoned, leading to marked increases in forest cover, a pattern known as 'forest transition'. A minute fraction ( $< 2\%$ ) of these ancient forests cover former field systems. This limited coverage demonstrates the accuracy of the 19<sup>th</sup> century État Major maps for assessing forest age from at least the Middle Ages. Moreover, the location of these disturbed ancient forests over extensive areas paves the way for novel applications to understand the legacy effects of land use on present-day forest biodiversity.



# Chapitre 5

---

## Conclusion et perspectives

Cette thèse s'inscrit dans la continuité de nombreux travaux visant à étudier les paysages actuels à travers la détection et l'étude des formes agraires anciennes. Les rideaux de culture, les murgers et les champs bombés sont les témoins de ces pratiques culturelles anciennes, et nous soulignons l'importance de les étudier. L'interdisciplinarité a joué un rôle essentiel dans cette étude, en combinant les approches et connaissances en pédologie, en anthracologie, géographie et histoire. Les archives pédo-sédimentaires, les archives historiques et les données géomatiques ont fourni des informations précieuses pour l'identification et la datation des formes agraires, ainsi que pour la compréhension des trajectoires temporelles des paysages.

## 5.1. Base de données spatialisée

### 5.1.1. L'apport de la base de données spatialisées à l'étude des formes agraires

Un des premiers objectifs de cette thèse consistait à compléter un inventaire spatialisé des formes agraires héritées. Un grand nombre de formes agraires dans l'est de la France ont été détectées, grâce à de nombreux travaux de recherche réalisés au sein du laboratoire Image Ville Environnement (Schwartz et al., 2012 ; Lejeune, 2015 ; Froehlicher, 2016 ; Dapiaggi, 2017 ; Piccitto, 2018 ; Keller, 2018 ; Cumetti, 2020). La base de données a permis d'explorer les anciens systèmes de champs dans les Hautes-Vosges, d'identifier leur distribution spatiale, et de révéler la pertinence de l'utilisation des cartes de l'Etat Major dans la caractérisation des forêts anciennes. Ces formes agraires couvrent 6,6 % (78,5 km<sup>2</sup>) de la surface des Hautes-Vosges, et elles ont été progressivement abandonnées et transformées en prairies ou en forêts, de manière inégale. L'abandon des champs au profit des prairies ou des forêts au milieu du 19<sup>e</sup> siècle dépend fortement de la pente et de l'altitude. Par exemple, les prairies et les forêts se trouvent généralement sur des pentes de 18 à 19 degrés et à une altitude de 610 à 620 mètres, tandis que les sites agricoles toujours cultivés au milieu du 19<sup>e</sup> siècle ont une pente moyenne de 16 degrés et une altitude moyenne de 550 mètres. Les anciens systèmes de champs se trouvent principalement sur les pentes orientées au sud, au-delà d'un certain seuil d'altitude (plus l'altitude augmente et plus la proportion de formes agraires situées en adret augmente). Ces formes héritées sont représentatives des zones anciennement cultivées au cours de la période médiévale dans les Hautes-Vosges. Néanmoins, certaines formes ont pu être arasées, comme nous le montrons, dans la partie 4.4.1, induisant nécessairement une perte d'information. L'évaluation de cette perte permettrait d'avoir une idée plus précise de la représentativité des surfaces occupées par chaque type de forme agraire.

La base de données a permis de quantifier les zones de forêts anciennes perturbées et non perturbées à l'échelle d'un massif. Ces découvertes ouvrent de nouvelles perspectives pour évaluer avec précision l'âge des écosystèmes forestiers. Elles permettent de révéler un schéma évolutif de changement d'utilisation des terres similaire à celui observé dans d'autres régions montagneuses européennes. Toutefois, l'approche utilisée dans les Hautes-Vosges n'est pas reproductible dans le fossé rhénan et sur le plateau lorrain. La mise en culture du fossé rhénan et du plateau lorrain est bien plus précoce, comme nous l'avons montré dans les chapitres 2 (cf. partie 2.5.2.2) et 3 (cf. partie 3.5.5.2). Il est difficile de dire avec certitude, si une grande majorité de ces formes agraires ont une origine médiévale. Une analyse plus détaillée serait nécessaire avant de pouvoir évaluer l'âge de ces systèmes agraires.

## 5.1.2. Quelle suite pour la base de données ?

### 5.1.2.1. La détection de formes agraires à l'échelle du Grand Est

Cette base de données n'est pas encore exhaustive dans l'est de la France en raison, comme nous l'avons déjà maintes fois exprimé, de l'absence de donnée LiDAR sur une grande partie du territoire. Le lancement du programme national LiDAR haute densité (Figure 33, <https://www.ign.fr> "Cartographie de la France en 3D," 2022) permettra de généraliser la détection de formes agraires. Cette détection à large échelle ainsi que l'évolution rapide des technologies et des méthodes d'analyse spatiale, offrent de nouvelles opportunités pour l'étude des paysages. Outre l'utilisation des MNT à très haute résolution (Cucchiari et al., 2020) permettant d'améliorer la précision et la résolution des cartographies paysagères, c'est surtout l'intégration de l'apprentissage automatique (Herrault et al., 2021) qui pourra faciliter la détection et l'analyse des formes agraires à grande échelle. La base de données spatialisée proposée dans cette thèse à l'aide d'outils en accès libre, rend possible une méthode généralisable à l'ensemble de la France. Nous nous sommes principalement concentrés sur l'est de la France, mais l'amélioration des méthodes d'auto-détection permettra à d'autres régions de bénéficier de la même approche. La comparaison entre différentes régions permettrait d'évaluer les similitudes et les différences dans les processus de formation des paysages et d'explorer les variations régionales, d'autant plus que la France bénéficiera bientôt d'une couverture totale d'ici 2025. Toutefois, cette base de données reste perfectible et de nombreuses pistes d'amélioration sont envisageables.

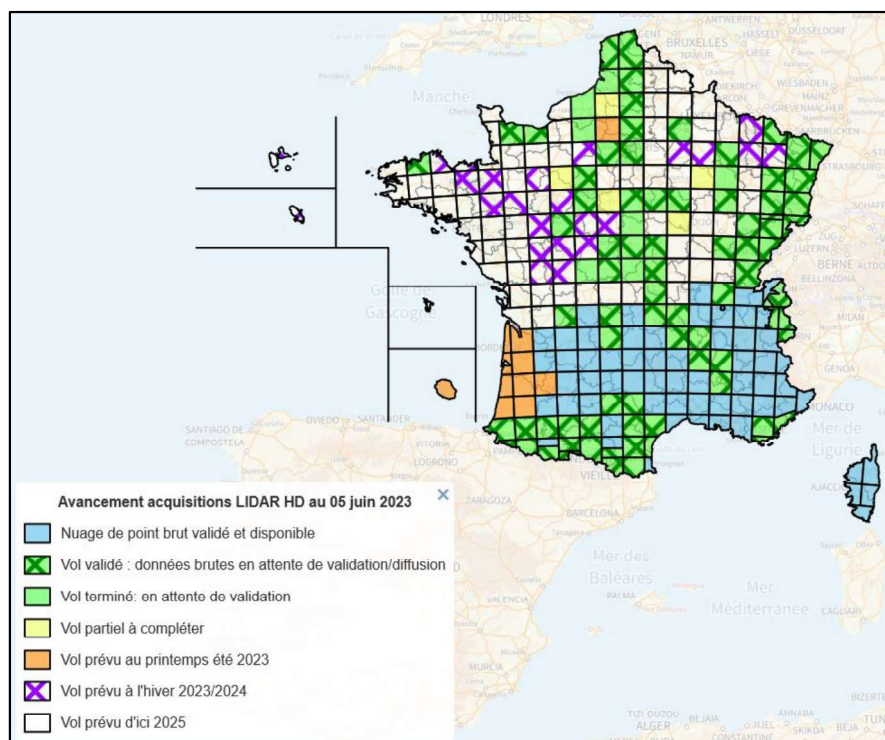


Figure 33 : Carte de la France représentant les dalles des données LiDAR déjà acquises ou en voies d'acquisition, datée du 5 juin 2023. Source : <https://macarte.ign.fr/carte/322ea69dab4c7e5afabc6ec7043b5994/acquisitionslidarhd>

### 5.1.2.2. Amélioration de la base de données

Dans la table *commune* (Figure 5), il était prévu d'ajouter les données des cartes de 1760 (surface des prés de fauche, des pâturages, etc.) afin de réaliser des traitements statistiques. Nous souhaitons déterminer les liens entre les caractéristiques des formes agraires et l'occupation des terres en 1760. Ces cartes appelées aussi cadastre d'Alsace (cf. partie 2.3.2 et 3.3.2) ne couvrent en réalité que les départements du Haut-Rhin et du Bas-Rhin (Tschaen, 2011). Contrairement aux cartes de l'État-major, elles ne permettraient pas une généralisation à l'échelle française. Toutefois, la digitalisation de ces cartes ajouterait une dimension temporelle supplémentaire aux formes agraires, comme nous avons pu le montrer dans les Hautes-Vosges (chapitre 4, p 103). Dans les zones montagneuses, ces dernières sont souvent moins précises, pouvant générer des erreurs d'interprétation (Dupouey et al., 2007a). La Figure 34 permet d'estimer cette perte d'information entre la carte de l'État-major et celle du cadastre d'Alsace. Sur la carte de l'État-major, le figuré matérialisant le relief (partie nord-est, Figure 34a) masque l'occupation du sol, créant une mésinterprétation de la donnée et une perte d'informations. Ajoutée à cela, la diversité du figuré sur le cadastre d'Alsace permet d'avoir une meilleure compréhension de l'utilisation des terres. Les prairies sont toutes sans exception indiquées comme pâture ou prés de fauche. Sur les cartes de l'État-major, certaines « prairies » sont indiquées par un bleu délavé (partie sud-est) que l'on peut confondre avec les zones de culture (généralement de couleur blanche).

La table *abbayes* établie pour permettre de mettre en relation les formes agraires n'a pas fait l'objet d'analyse plus poussée pour l'instant. Au départ, nous souhaitons établir des analyses des relations spatiales entre formes agraires et abbayes, en nous inspirant des travaux de Schwartz et al. (2020). Un lien étroit semble exister entre la spatialisation des rideaux de culture et la localisation de certaines abbayes dans les Hautes-Vosges. Nous souhaitons élargir cette analyse à toutes les formes agraires. Néanmoins, les archives historiques sur les donations faites aux abbayes semblent montrer que certaines terres qui leur sont attribuées peuvent être éloignées (Bornert, 2008). Les relations spatiales pourraient être élargies à l'ensemble des implantations médiévales connues. Le centre du village avec la période de la première mention, les châteaux-forts (même si beaucoup ont disparu) et

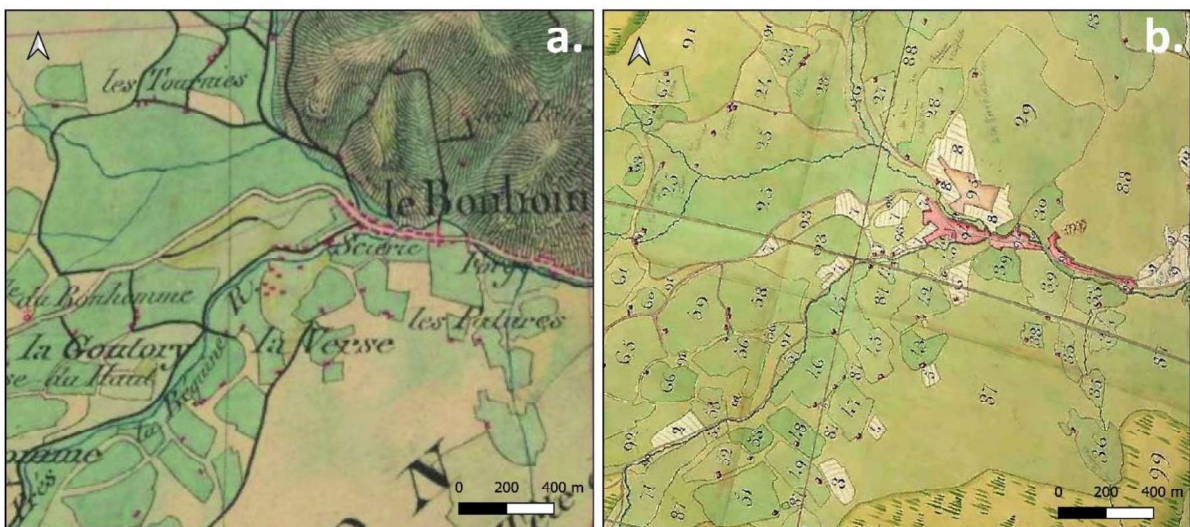


Figure 34 : Carte de l'Etat-Major (a) et du cadastre d'Alsace (b) dans la commune du Bonhomme située dans les Hautes-Vosges

tous les édifices monastiques (Abbayes, prieuré ou couvent) afin d'évaluer les relations spatiales potentiels qui pourraient exister avec les formes agraires.

### 5.1.2.3. Base de données et intérêts écologiques

Comme nous l'avons déjà expliqué dans le chapitre 1 dans la partie 1.1.5 , l'influence des pratiques culturelles peut avoir des répercussions sur les caractéristiques édaphiques et sur le cortège floristique d'une forêt, et ce, à des échelles pluriséculaires voire plurimillénaires. Ces zones de forêt ancienne « perturbée » représentent 877 ha, une surface non-négligeable. Une étude écologique et pédologique dans ces zones permettrait de déterminer à l'échelle des Hautes-Vosges l'influence ou non de ces pratiques culturelles.

Il convient de souligner ici l'importance de la préservation et de la gestion des paysages. Les résultats de cette thèse mettent en évidence l'évolution des paysages au fil du temps et les traces des activités humaines. Il est donc essentiel de prendre en considération ces données dans l'analyse des écosystèmes actuels. Mais aussi de protéger les paysages historiques et culturels. L'étude de ces formes nous montre que les paysages agraires anciens étaient diversifiés, présentant des « agromorphologies » variées engendrant des systèmes de parcelles complexes. Ces paysages anciens et leur complexité sont sans commune mesure avec nos paysages agricole actuels, dont plus de 70 % des haies auraient disparu depuis 1945 (CGAAER, 2023). À travers cette comparaison, nous cherchons à montrer l'intérêt de promouvoir des pratiques agricoles durables qui préservent la biodiversité des paysages. La compréhension de ces espaces, aussi bien leur composante culturelle que leur composante environnementale constituera un référentiel plus solide pour les gestionnaires et les acteurs du territoire. Leurs décisions pourront s'inscrire dans un cadre plus durable.

### 5.1.2.4. Une base de données à l'échelle européenne

Cette base de données a permis d'approfondir notre compréhension des paysages de l'est de la France en mettant en évidence les formes agraires anciennes. Elle souligne également l'importance de l'interdisciplinarité et de l'utilisation de différentes sources d'information pour une analyse approfondie des paysages. Elle a démontré l'importance de répertorier et de spatialiser les formes agraires pour permettre une meilleure compréhension des paysages, tout en soulignant les défis liés à la généralisation des résultats à une échelle régionale. Brown et al. (2020) ont réalisé une étude répertoriant les terrasses et rideaux de culture sur le pourtour européen. L'objectif était de réaliser une analyse interculturelle pour comprendre l'évolution des terrasses agricoles et la réponse humaine aux variations environnementales, même dans des conditions de production sociale différentes. Cette base de données a pu mettre à jour les raisons de l'implantation des terrasses. Les terrasses, notent les auteurs, sont une réponse multifactorielle et non-linéaire à la pression démographique, mais déclenchée par de multiples scénarios sociaux possibles. De la même manière, les rideaux de culture, les murs et les champs bombés se retrouvent un peu partout en Europe, comme nous avons pu le préciser dans les chapitres 1 (cf. partie 1.1.4), 2 (cf. partie 2.1) et 3 (cf. partie 3.1). Une base de données des études



réalisées à l'échelle européenne permettrait d'appréhender les variabilités temporelles (lorsqu'elles sont datées) et donc de déterminer les facteurs socio-historiques induisant l'apparition de certaines formes agraires, mais aussi d'évaluer les avantages environnementaux (stockage de carbone, maintien de haies vives, influence sur la flore et la faune) dans les paysages européens. Leur préservation représente un intérêt écologique mais aussi culturel. Le maintien de ce paysage patrimonial nous semble nécessaire pour mieux comprendre leur trajectoire socio-historique, afin de mieux anticiper certaines problématiques liées au réchauffement climatique.

## **5.2. Apports et limites de l'étude des formes agraires**

### **5.2.1. L'analyse des charbons dans les rideaux de culture**

À l'instar de Bal (2020), nous montrons que l'application de la pédoanthracologie est parfaitement adaptée pour l'étude des formes agraires, même sans la présence de paléosol. Les rideaux de culture sont à la frontière entre un sol et des colluvions. Puisque la pédoanthracologie pratiquée dans les sols s'affranchit de la stratigraphie en compensant par l'identification et la datation de très nombreux fragments (31 datations sur 703 charbons identifiés). Elle est, par conséquent, bien adaptée à l'étude des rideaux. Dans les rideaux de culture, cette méthode a montré de nombreux avantages qui ont permis d'appréhender les trajectoires temporelles complexes des rideaux de culture. L'analyse des charbons a permis d'identifier quatre rideaux d'origine médiévale et une d'origine moderne, au prix tout de même d'un effort important de datations radiocarbone.

À titre d'exemple, l'analyse combinée des données historiques et paléoenvironnementales et pédoanthracologiques a mis en évidence sur le site GAR (Le Bonhomme, 68), au moins trois changements d'occupation du sol. (i) Le site est cultivé au cours du Moyen Âge ; (ii) puis abandonné sous forêt avant d'être exploité pour la production de charbon au milieu du 16<sup>e</sup> siècle ; la forêt est défrichée et (iii) le site passe sous prairie au cours du 19<sup>e</sup> siècle. Entre la coupe forestière et la mise en prairie (fauche ou pâture), le site est envahi par des genêts et des genévriers puis il est défriché. Toutefois, sans présence de paléosols bien marqué, la datation précise de ces formes à partir de l'analyse seule des charbons de bois reste complexe. Ainsi, dans un sol homogène, nous confirmons ce que beaucoup d'études ont déjà démontré (Talon et al. 2005, Robin et al. 2012, 2018, Feiss et al 2017), à savoir que la concentration en charbon de bois des sols varie considérablement au sein des tranchées de sols échantillonnés et entre les sites.

## 5.2.2. Le cas du site de WBT (Achen, 57)

### 5.2.2.1. Dater le système agraire

Comme nous avons pu le signifier dans le chapitre 2 (cf. partie 2.6), dater l'ensemble du système de forme agraire à partir de la datation d'une forme agraire n'est pas évident. Lavigne (2003) rappelle qu'un système de forme agraire doit être pensé en termes de morphologie dynamique. Les formes agraires se transmettent ; des formes antiques peuvent se maintenir dans des trames de la période médiévales. En conséquence, il serait nécessaire d'analyser, au préalable avant datation, la morphologie du système agraire dans son ensemble. L'analyse des données LiDAR peut permettre de déterminer les formes agraires possédant une trame commune. Vervust et al. (2020) dans leur étude ont utilisé au préalable des interprétations de datation relative à partir de la morphologie du système agraire. Pour vérifier ces interprétations, ils ont daté plusieurs formes agraires et démontré la justesse de ces datations relatives. A titre d'exemple, nous avons tenté de reconsidérer le site de WBT à Achen (cf. partie 2.2.2 et 2.5.3.2) comme un système dynamique. Pour rappel, certains rideaux de culture doivent être datés de la période moderne, mais la présence d'un murger superposant un rideau de

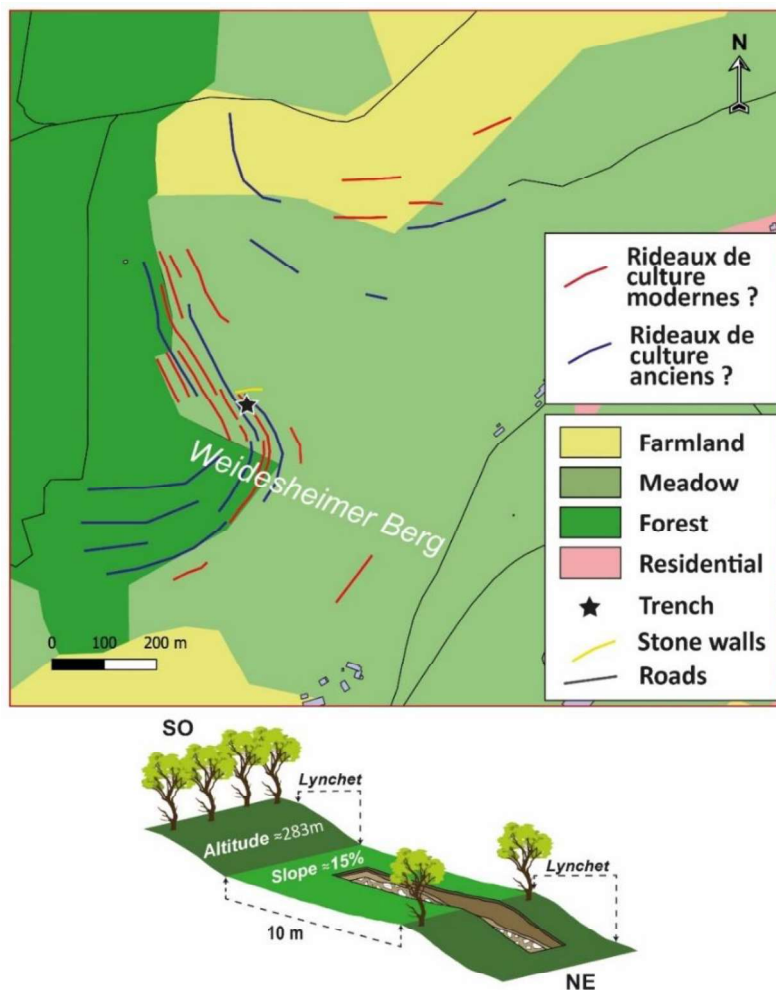


Figure 35 : Carte du site WBT (étoile noire) dans la commune d'Achen (57). Système de rideaux de culture estimé comme moderne (trait rouge) et système de rideaux de culture estimé comme ancien (trait bleu). Représentation du site WBT en 3D avec l'espacement de 10 m.

culture indique une phase culture plus ancienne. Grace aux données LiDAR (acquises récemment), nous avons pu détecter certaines formes agraires se retrouvant sous forêt et en place avant le 18<sup>e</sup> siècle (Figure 35). Le système de rideaux de culture plus ancien semble moins dense, c'est-à-dire que l'espacement entre chaque rideau est > 10 m. Il est probable que la densité des parcelles ait été augmentée après la guerre de Trente Ans. Des rideaux de culture modernes ont pu alors s'intercaler dans la trame de base. Notons ici qu'il ne s'agit que d'hypothèse, mais nous montrons dans ce cas précis que l'accès aux données LiDAR peut être déterminant.

Le site WBT (Achen, 57) a mis en évidence la complexité de dater une structure et de l'extrapoler à l'ensemble du système de formes agraires. En conséquence, la généralisation des datations doit être prise avec mesure, en raison de la transmission et de la transformation des formes paysagères, selon des processus et des temporalités propres à chaque contexte socioéconomique. La notion de paysage palimpseste, en tant que paysage stratifié se doit d'être nuancée.

#### 5.2.2.2. Intérêt d'un prélèvement pédoanthracologique sur l'ensemble du profil de sol de la tranchée

Dans chaque rideau de culture, nous avons prélevé les échantillons de sol dans le niveau colluvial, c'est-à-dire dans la partie exhaussée du profil de sol de la tranchée. Ceci pour des raisons que nous avons évoquées dans le chapitre 2 (cf. partie 2.1 et 2.5.1). Nous pensons que si les sédiments s'accumulent à la limite de la parcelle, pourquoi n'en serait-il pas de même pour les charbons ? Si tel est le cas, alors nous devrions observer une augmentation du nombre de charbons et de l'anthracomasse totale dans l'horizon colluvionné. Nous avons réalisé dans le site WBT et dans d'autres sites plusieurs prélèvements pédoanthracologiques sur plusieurs profils le long de la tranchée (Figure 36). Les résultats de l'analyse sur ce site montrent que l'anthracomasse ainsi que le nombre de charbons augmentent considérablement vers l'aval de la tranchée. Ceci confirme notre hypothèse. Notons toutefois qu'il est nécessaire de prendre en considération le contexte historique du site. À partir des premières analyses réalisées (incomplètes) sur le site GAR, nous avons mis en lumière des limites dans l'hypothèse de départ. Le site GAR ne semble pas montrer d'augmentation significative de l'anthracomasse ni du nombre de charbons le long de la tranchée. Le site GAR a connu une histoire complexe, comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 2 (cf. partie 2.5.3.4). Le site a connu une période de charbonnage au 16<sup>e</sup> siècle, pouvant conduire à une perte de charbon de bois lors du transport surtout le long des chemins (Bal, 2022). D'après nos observations, il arrive que des rideaux de cultures aient pu être réutilisés comme chemin. Cela a pu être le cas pour le site GAR. Toutefois, les résultats de WBT sont prometteurs et permettraient d'utiliser les rideaux comme une archive de paléo-incendie sur une partie du versant, c'est-à-dire en amont du ressaut. La distribution des charbons dans les sols est aléatoire et hétérogène comme le montrent Feiss et al. (2017). Ainsi pour avoir le meilleur spectre de charbon bois du sol et représentatif du cortège arbustif passé, l'étude des rideaux de culture peut être intéressante pour deux raisons. (i) il permet de déterminer l'historique de l'utilisation des terres et la gestion du site, comme nous l'avons démontré avec GAR, et ainsi mieux interpréter les résultats obtenus. (ii) il permet l'accumulation des charbons sur l'ensemble du linéaire du ressaut. Ainsi, l'ensemble des charbons est représentatif de la surface et sur l'ensemble du linéaire entre deux rideaux.

Bien entendu, ces résultats sont pour l'instant hypothétiques, d'autres analyses devront être menées pour vérifier leur robustesse.

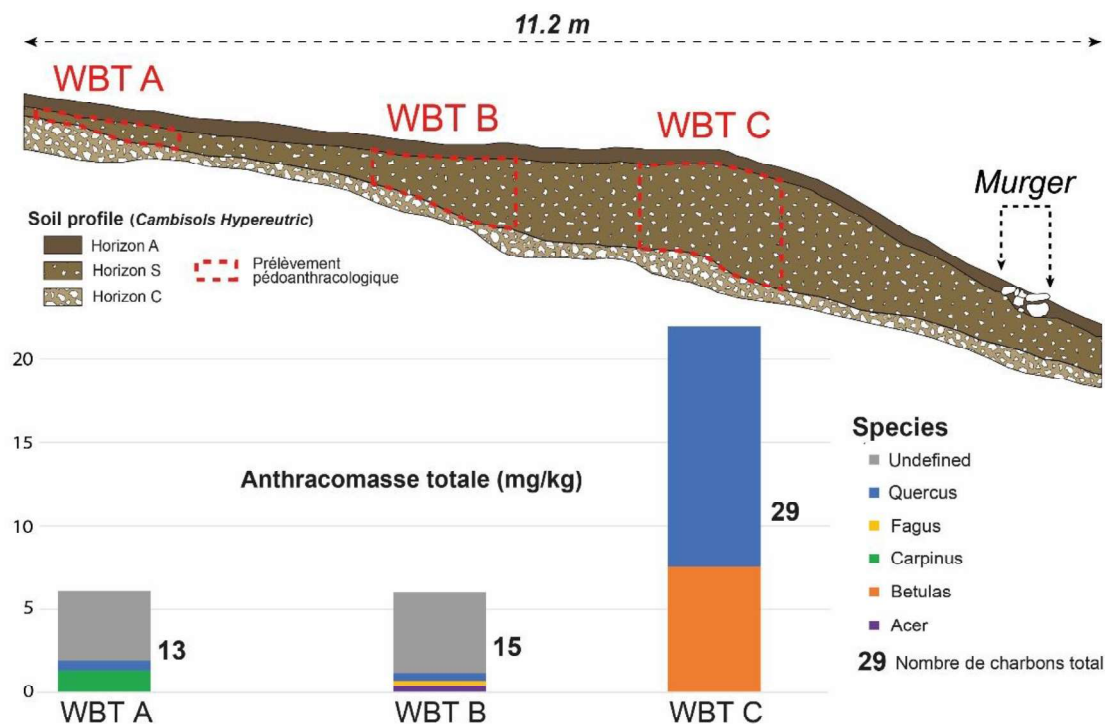


Figure 36 : Tranchée de sol du site WBT dans le comuune d'Achen (57) avec la localisation des prélèvements anthracologiques dans l'horizon S (ou colluvioné) de WBT A (en amont), WBT B et WBT C (en aval). Graphique représentant l'anthracomasse total par prélèvement par type d'espèce, ainsi que le nombre total de charbons pesé.

### 5.2.3. Apports de l'application du P-OSL sur les champs bombés

Pour l'instant, aucune datation n'a pu être effectuée par OSL dans les champs bombés. Toutefois, l'utilisation du P-OSL a mis en évidence ce que Vervust et al. (2020) et Turner et al (2021) avaient déjà démontré. Cette méthode permet d'élaborer des stratégies d'échantillonnage mieux informées, comme nous l'avons mise en lumière dans le site BAT (Baerenthal, 57). L'application du P-OSL dans les champs bombés a permis d'éliminer certains profils de sol, comme sur le site GUB (Guewenheim, 68). Nous montrons que l'utilisation du P-OSL permet de détecter la présence du paléosol. L'augmentation progressive et constante du signal démontre que l'enfouissement des sédiments s'est fait par enfouissement progressif, matérialisant la limite entre sol labouré et paléosol. *A contrario*, un signal linéairement constant (verticalement) démontre que l'ensemble de la couche de sol concerné a été labouré. Néanmoins et malgré un signal asymptotique, nous montrons qu'il est nécessaire de prendre en compte la nature de la roche mère. Les sols développés sur loess posent question, quant à la possibilité d'utiliser la méthode de datation par OSL, comme l'a démontré Wuscher (2021). Ceci amoindrit les possibilités de dater les champs bombés dans certaines zones, surtout en l'absence de

charbons, comme ce fut le cas sur le site HIN (Hindisheim, 67, cf. partie 3.5). Dans le cas de HIN, le défi méthodologique est de taille. Malgré cela, l'utilisation du P-OSL semble particulièrement prometteuse dans les champs bombés. Le cas du site BAT est encourageant (cf. partie 3.5). La présence de charbon et l'utilisation du signal P-OSL afin de déterminer une stratégie de datation, nous permettra de croiser les datations OSL et radiocarbone.

## 5.2.4. Analyse croisée des données

A travers cette thèse, nous avons réalisé deux études importantes dans les Vosges. *A contrario*, l'étude du fossé rhénan et des collines sous-vosgiennes n'ont pas fait l'objet d'une attention aussi importante. Cette asymétrie analytique, entre ces trois ensembles géographiques, s'explique par le fait que nombre de formes agraires sont mieux préservées dans les Vosges, et que le LiDAR en plaine d'Alsace est encore incomplet. Pourtant à l'origine de cette thèse, nous souhaitions définir les trajectoires temporelles entre les zones « protégés » et les zones de grande culture. Nombre d'études se sont consacrées à l'étude des Vosges ou de la plaine rhénane, mais très peu ont articulé leur recherche entre ces deux ensembles.

### 5.2.4.1. Entre la plaine d'Alsace et les Hautes-Vosges

Nous avons, auparavant, émis l'hypothèse du maintien tardif des forêts dans les Vosges contrairement à la plaine alsacienne (partie 2.6). Le site HIN et les sites GAR, ALP, GOLF et SAA montrent une opposition nette entre les régimes de feux du fossé rhénan et ceux du massif vosgien. Ceci pose la question du maintien tardif de vastes espaces forestiers, entre les sommets vosgiens d'une part et la plaine rhénane d'autre part, largement défrichée dès le Néolithique. Ce constat confirme l'affirmation faite par Williams (2000) qui indique que dans les plaines alluviales sur sol lœssique, privilégiées en raison de leur fertilité, le bois était utilisé pour la construction de maisons. Il était, par conséquent, coupé à l'aide de haches en pierre et non brûlé. Dans le massif vosgien, il s'avère d'autant plus probable que le développement de ce massif se soit fait sous l'égide d'autorités ecclésiastiques par une utilisation plus systématique du feu, comme le proposent Schwartz et al. (2020). Les champs dans la plaine d'Alsace apparaissent dès le Néolithique. Même si des événements sont venus perturber son exploitation (guerre de Trente Ans), elle n'a pas connu d'abandon aussi conséquent que le massif vosgien. Réaliser une analyse comparative des pratiques agricoles entre ces deux ensembles géographiques permettrait, comme nous venons de le montrer précédemment, de mieux comprendre les adaptations ou stratégies différentes pour cultiver des milieux montagneux ou de plaines. L'étude des formes agraires dans les plaines de grande culture du Haut-Rhin et du Bas-Rhin mettrait à jour les dynamiques d'exploitation entre ces deux ensembles.

## 5.2.5. Les espaces de grandes cultures : les crêtes de labour et les terrasses

Nous avons préféré nous concentrer sur les espaces préservés de l'agriculture extensive, c'est pourquoi, les crêtes de labour n'ont pas été abordées dans cette thèse. *A contrario*, nous avons décidé d'exclure les terrasses agricoles pour des raisons méthodologiques. Pourtant ces deux formes permettraient de faire le lien entre plaine, colline et montagne. Nous nous affairons ici à présenter l'intérêt de l'étude des crêtes de labour et des terrasses, ainsi que les perspectives de recherche possible.

### 5.2.5.1. Les crêtes de labour

Les crêtes de labour sont des monticules de terre linéaires créés par les retournements de la charrue en début de parcelle (Juillard, 1953 ; Callot, 1977). Au fil du temps, le labour répété pendant probablement plus d'un millénaire peut entraîner des accumulations dépassant le mètre d'épaisseur. Ces formations témoignent d'une agriculture qui s'est prolongée sur des parcelles relativement stables en termes de limites spatiales. Le changement de pratiques agricoles et le remembrement des terres ne conduisent pas nécessairement à la destruction de ces structures, comme nous l'avons précisé (cf. partie 1.1). Elles peuvent, en réalité, préserver d'anciens sols renfermant parfois des vestiges archéologiques ou des archives pédo-sédimentaires qui peuvent nous éclairer sur l'âge des structures et les méthodes de culture employées. Étudier ces formes conjointement avec les champs bombés pourrait permettre d'avoir une compréhension plus précise des changements des pratiques culturales en plaine rhénane. L'application de la pédoanthracologie pouvant être limitée dans la plaine d'Alsace, pour les raisons évoquées dans la partie 5.2.4.1, l'apport du P-OSL permettra de détecter plus facilement le ou les paléosols, et de dater avec plus de précision la crête de labour.

### 5.2.5.2. Les terrasses agricoles

Les terrasses agricoles présentent un attrait important, forme omniprésente à l'échelle mondiale (Spencer et Hale, 1961) ; elles font, par conséquent, l'objet de nombreuses études au niveau européen (Brown et al., 2020, 2021 ; Turner et al., 2021). Néanmoins et malgré leur présence probable sous prairie ou sous forêt dans les régions d'étude, nous avons choisi de ne pas nous concentrer sur l'analyse de ces formes agraires, et ce, pour deux raisons. (i) Les terrasses peuvent connaître des phases d'abandon définitive et/ou de destructions et de reconstruction pouvant induire une perte d'information (Krahtopoulou et Frederick, 2008 ; Gadot et al., 2018 ; Porat et al., 2019). Toutefois, des études interdisciplinaires récentes s'appuyant sur l'utilisation du P-OSL (Porat et al., 2019 ; Turner et al., 2021 ; Brown et al., 2023) permettent de mieux identifier les phases d'abandon/destruction. (ii) Leur construction par excavation du *solum* de l'amont vers l'aval, est réalisée à une échelle de temps très courte et ne fournit pas un enregistrement sur le temps long tel que les rideaux de culture. Néanmoins, il arrive que certaines terrasses présentent un paléosol, et comme l'a démontré l'étude de Bal (2020),

une lecture précise de ce dernier permet une meilleure définition des horizons pour les prélèvements pédoanthracologiques. Ces éléments mettent en lumière les possibilités de datation des terrasses. Dans la commune du Bonhomme, nous avons essayé de dater une terrasse (cf. partie 5.3.1), car elle semblait présenter une phase différente de culture et probablement plus récente que celles des systèmes de murgers. Dans les Hautes-Vosges, nous supposons que certains ressauts pourraient être des terrasses. Elles pourraient correspondre à une mise en valeur différente de celle des rideaux de culture ou des murgers. Aucune étude ne s'est réellement consacrée à la datation des terrasses dans les Vosges ou dans les collines sous-vosgiennes. Dans les zones viticoles, selon la croyance populaire, beaucoup datent du 19<sup>e</sup> siècle, or des archives historiques attestent la présence de vigne et de terrassement dès le Moyen-Âge (Vogler, 1998). Dans le chapitre 4 (p 103), nous avons retiré de notre analyse les zones de viticulture, car nous ne pouvions assurer de leur origine médiévale. Pourtant de nombreuses terrasses sont abandonnées actuellement dans les collines sous-vosgiennes. L'étude de ces formes agraires à un intérêt pour l'archéologie agraire et pour la compréhension de l'histoire socio-économique médiévale s'articulant entre les Vosges, la plaine rhénane et les collines sous vosgiennes.

Outre le fait de croiser les analyses entre ces trois ensembles géographiques, nous pensons que croiser les analyses à partir de formes agraires se superposant permettrait de déterminer différentes phases de culture. L'analyse du chapitre 2 et 4 (p 50 et p 106), montre que des formes agraires se superposent. De nombreux murgers peuvent recouvrir des terrasses, mais aussi des rideaux de culture.

### 5.2.6. Systèmes de formes agraires complexes

En Moselle (cf. Figure 15 ; Schwartz, 2018), dans le Haut-Rhin (cf. partie 4.4.1) ; Schwartz et al., 2012 ; Froehlicher, 2016), le Bas-Rhin (Figure 37b et c), dans les Hautes-Alpes (Figure 37a et b ; Schwartz, 2018) ou même en Pologne (Sobala, 2021) certains murgers viennent reposer sur des terrasses ou des rideaux de culture. Cette superposition indique un épierrement post terrassement ou post mise en place du rideau de culture. Dans le cas d'un murger recoupant une terrasse, il est difficile de dire avec certitude, si entre le terrassement et l'épierrement un temps relativement important les sépare. *A contrario*, dans le cas d'un rideau de culture, le temps est forcément conséquent en raison de l'exhaussement lent et progressif du talus. Il est certain que deux étapes se sont succédées. Les murgers sont bien plus récents que le rideau de culture, comme nous l'avons évoqué dans le cas du site WBT (cf. partie 2.5.3.2). Si les murgers et les terrasses ou les rideaux de culture sont fréquemment associés, il arrive que, dans de rares cas, des champs bombés viennent s'intercaler entre deux rideaux de culture (Figure 37c et d). Les champs bombés peuvent être postérieurs si ces derniers se situent perpendiculairement aux ressauts. Dans le cas de champs bombés parallèles, la création de plusieurs talus peut avoir lieu et générer des formes hybrides (entre champs bombés et rideaux de culture). Ces formes ont déjà été observées dans le Pays de Bitche (Cumetti, 2020) mais aussi dans le Haut-Rhin (Figure 38). Elles ne résultent absolument pas d'une temporalité différente. Les champs bombés situés entre des rideaux de culture ont été pour l'instant très peu observés (à notre connaissance). *A contrario*, les murgers recouvrant des talus ne sont pas des cas isolés. Dans le chapitre 4 (cf. partie 4.4.1), nous avons montré que la superposition de ces formes ne représentait que 5.6 % (439 ha) de la surface

totale couverte par les formes agraires. Néanmoins, il est possible que ces formes aient été arasées au moment de l'agrandissement des prairies de fauche pour faciliter le passage des machines (Figure 1). L'étude de l'arasement de ces formes permettrait d'estimer la réelle superposition de ces formes. Nous avons pu observer à Achen (57) sur le site WBT d'immenses tas de pierres chaotiques sous forêt. Nous pensons que ces pierres proviennent d'anciens murgers. Sur la Figure 39, on peut observer dans la commune de Lapoutroie (68) d'immense tas de pierres en bordure de prairie (flèche rouge). Des micro-talus matérialisés sur le MNT par des traits moins marqués (flèche jaune) délimitant les anciennes parcelles, marquant l'emplacement perdu des murgers.

La superposition des murgers sur les rideaux de culture permet d'établir deux grandes phases de mise en culture. Par conséquent, elle dénote deux phases chronologiquement différentes, mais permet aussi d'identifier des changements socio-économiques ou un bouleversement dans les pratiques agraires. D'autant plus que nos datations réalisées dans les rideaux de culture ne nous permettent pas de donner un âge précis. A titre d'exemple, Vervust et al. (2020) ont démontré une évolution diachronique d'un rideau de culture. Une première phase de culture continue entre l'Âge du Fer moyen et le Haut Moyen Age ayant constitué le rideau de culture, puis une seconde phase à la fin du Moyen Age constitué d'un nouveau parement de pierre dans le talus. Ceci révèle, selon les auteurs, un changement des pratiques de gestion des cultures. De la même manière, nous pensons que les murgers correspondent, lorsqu'ils superposent des rideaux, à un changement de gestion au cours de la période médiévale. En effet, les seules datations réalisées dans le Haut-Rhin sur trois murgers donnent un *terminus post quem* du Haut Moyen Âge (Schwartz et al., 2012). La présence de rideaux et de murgers pourrait indiquer une évolution diachronique au cours de la période médiévale. Leur étude est par conséquent capitale pour déterminer avec certitude cette chronologie.



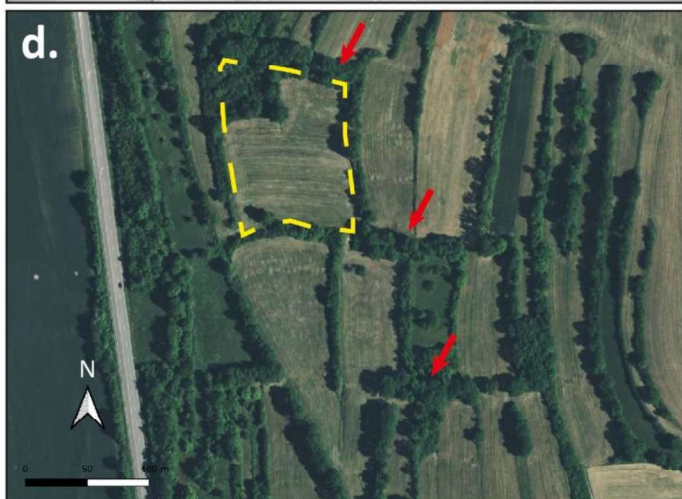
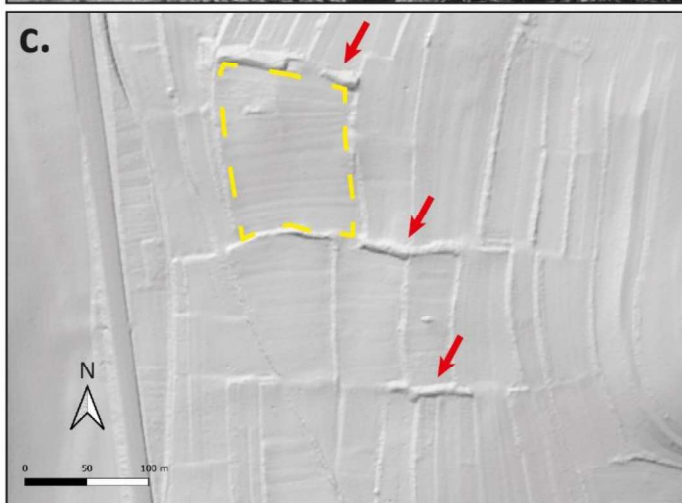


Figure 37 : Prise de vue aérienne en 2018 (a, source : [www.geoportail.gouv.fr](http://www.geoportail.gouv.fr)) et photo en 1929 (b, source : Girel et al., 2010) de murgers (flèches rouges) superposant des terrasses dans la commune de Villar-d'Arène (05) ; MNT (c) et prise de vue aérienne (d) représentant des murgers (flèche rouge) superposant des rideaux de culture ou des terrasses, ainsi que des champs bombés (à peine visible) entre deux ressaut (pointillés jaunes) dans la commune de Marmoutier (67).

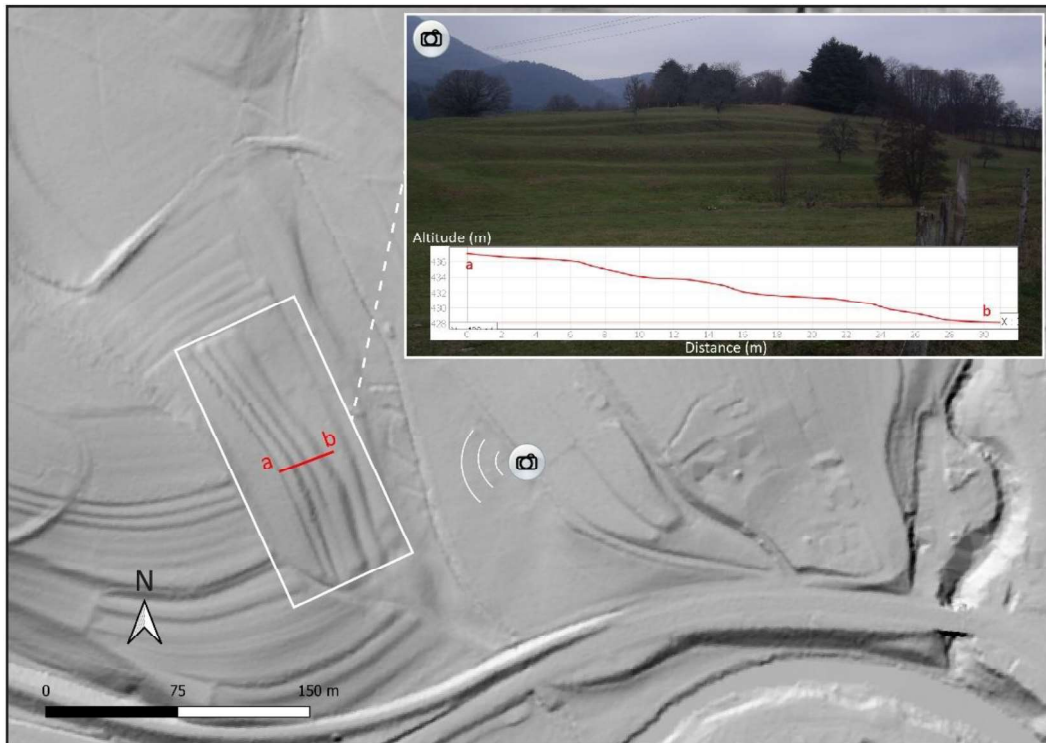


Figure 38 : MNT montrant des formes hybrides entre des champs bombés et des rideaux de culture dans la commune de Masevaux (68) au lieu-dit du Zollenbourg.

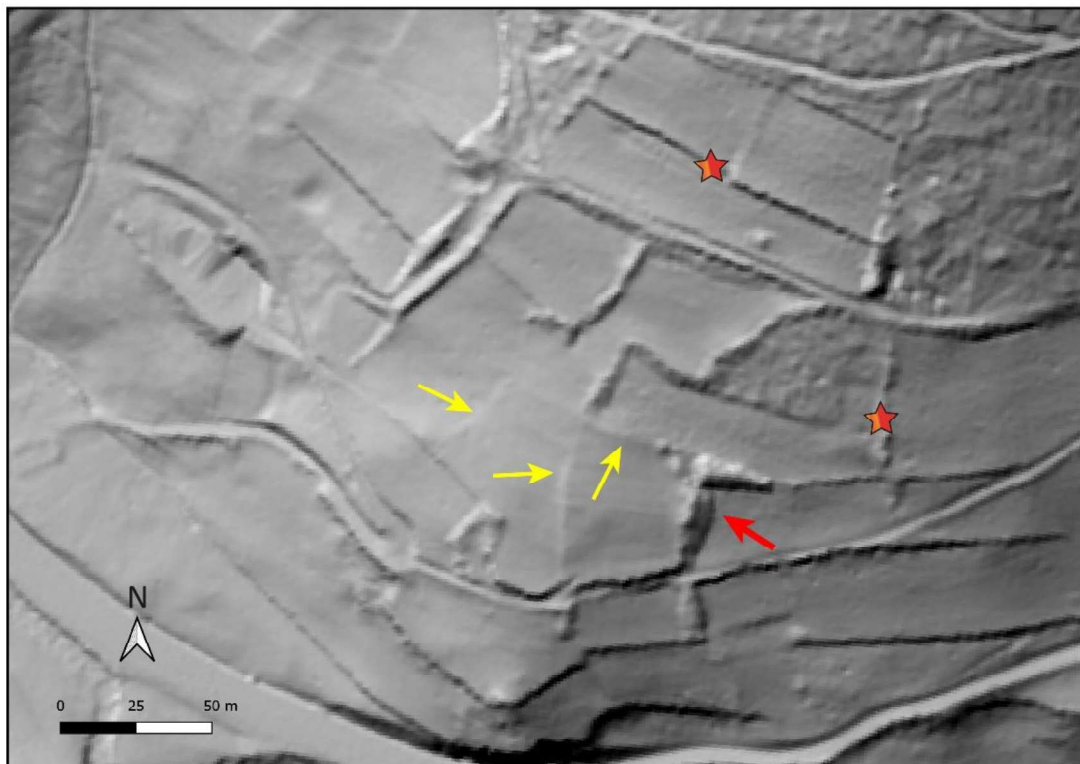


Figure 39 : MNT situé dans la commune de Lapoutroie (68) au lieu-dit des Cammes, montrant la présence de murger gigantesque ~4 m de haut (flèche rouge) en bordure de prairie. Les flèches jaunes indiquent les anciennes limites de champs encore visible et l'emplacement des murgers arrasés. Prélèvement pour datation au  $^{10}\text{Be}$  sur des pierres constituant un murger et une terrasse (étoiles rouges)

## 5.3. De nouvelles perspectives pour l'étude des murgers

L'étude des murgers a fait l'objet d'une attention particulière dans cette thèse. Toutefois, aucun chapitre ne s'est concentré uniquement sur cette forme. *A contrario*, les rideaux de culture ont pris une place plus importante. Pour une raison simple, avant le début de cette thèse, aucune étude sur les rideaux de culture n'avait réalisé d'inventaire et de datation conséquente (à l'exception de Schwartz et al., 2020), dans le secteur du massif vosgien. Schwartz et al. (2012) avaient déjà réalisé un premier inventaire des murgers dans le massif, et quelques charbons avaient été datés au début des années 2000 (Schwartz et al., 2003). Pour ces raisons, des questions de temps et d'un manque de données nouvelles, nous nous sommes moins concentrés sur les murgers. Néanmoins, des échanges franco-tchèques avec l'université de Prague par l'intermédiaire de Barbora Vyslouzilova et de Ludek Sefrna sur des murgers dans la région des Sudètes, ainsi que des analyses récentes (2023) réalisées par l'INRAP dans le secteur du Zinnkoepflé dans la commune de Soulmatt (68), nous permettraient d'apporter de nouvelles informations sur ces formes. La base de données initiée par D. Schwartz démontrant une présence importante de ces formes (Figure 40a), ainsi que les quelques données collectées au gré de la thèse permettra de proposer une nouvelle synthèse régionale, et même une histoire croisée franco-tchèque. Les premiers résultats et réflexion sur les méthodes de datation sont donc présentés dans cette partie en vue d'une nouvelle synthèse.

### 5.3.1. Datation des murgers, quelles méthodes appliquer ?

#### 5.3.1.1. Datation par nucléides cosmogéniques

Les murgers scellent un paléosol, néanmoins, comme nous l'avions déjà évoqué dans la partie 1.2 du chapitre 1, ce dernier n'est pas parfaitement isolé de son environnement. Dater ces formes est un réel défi méthodologique. Pour pallier cette limite, nous avons réalisé des prélèvements sur des pierres provenant de deux murgers et d'une terrasse dans les communes de Lapoutroie (Figure 39) et du Bonhomme (Site BON, Figure 40b, c et d). Dans le but de déterminer la période de mise en place des pierres par datation d'isotopes cosmogéniques (principalement  $^{10}\text{Be}$ ). Cette méthode de datation permet d'estimer la première fois qu'un minéral ait vu la « lumière du jour ». Les nucléides radioactifs ( $^{10}\text{Be}$  et d'autres comme  $^{36}\text{Cl}$  ou  $^{27}\text{Al}$ ) sont produits *in situ* dans les minéraux, tels que le quartz, en raison de leur exposition au flux de rayons cosmiques. Il s'agit donc de mesurer la concentration de ces nucléides cosmogéniques (Gosse & Phillips, 2001 ; Lebatard & Bourlès, 2015) pour dater la mise à l'exposition de la pierre. Les premières analyses ont permis d'estimer un âge aux alentours de 70 000 ans... Date aberrante, à moins de remettre en question l'arrivée des premiers cultivateurs en Europe (~5700 BC) ou de penser que Néandertal faisait pousser du blé. Néanmoins, ce résultat démontre que les pierres utilisées pour construire les murgers étaient soit très proches de la surface du sol, soit sous un amas de pierres de faible épaisseur. On estime généralement que la spallation, qui est la voie de production dominante des nucléides cosmogéniques, s'effectue dans les 3-4 premiers mètres de la

lithosphère (Rixhon, 2018). Dans la région des Sudètes (République Tchèque), nous avons pu observer un rocher placé dans un murger qui avait été fracturé par une barre à mine. Eu égard à sa masse, cette roche a forcément été fracturée sur place. La face fracturée nous semblait avoir été protégée des rayons cosmiques. Les datations nous ont malheureusement démontré le contraire. Elles sont toutes autant aberrantes. L'utilisation de cette méthode pour dater des murgers dans ce contexte semble compliqué.

#### 5.3.1.2. Datation par luminescence

Ageby et al. (2012) ont tenté de dater des murs en pierre sèche en utilisant la datation par luminescence stimulée par infrarouge (IRSL), sur la face n'étant plus exposée à la lumière (datation par enfouissement). Les datations ont estimé, avec plus ou moins de précision, que les murs dataient du Moyen-Age. Cette méthode peut être intéressante à utiliser, néanmoins, les auteurs précisent qu'il est nécessaire de prélever et de dater plusieurs pierres pour augmenter la robustesse des datations, ceci rendant cette opération très coûteuse.

L'utilisation du P-OSL dans ce cas permettrait d'estimer la limite du paléosol et de dater le sédiment sous les pierres. Cette possibilité permettrait d'avoir un *terminus ante-quem*, c'est à dire de déterminer l'âge d'enfouissement du sol sur lequel les pierres ont été déposées. Combiné avec la pédoanthracologie, le P-OSL permettra de mieux discuter du *terminus ante-quem*. Dans le cas de murgers, la datation du paléosol reste la meilleure des possibilités.

#### 5.3.1.3. Datations des charbons de bois dans la commune du Bonhomme : apport pour l'histoire de la région

Nous avons ouvert deux murgers au lieu-dit du Rain de la Verse, dans la commune du Bonhomme, afin de prélever des charbons dans le paléosol (Figure 40b et c). La commune est riche en murgers et rideaux de culture. Pour rappel, un de ces rideaux a fait l'objet d'une attention toute particulière dans le chapitre 2 (cf. partie 2.5.3.4). Le site GAR se situe en amont de la vallée de la commune (Figure 40c) non loin des murgers. De manière générale, le système de murger possède une forme réticulée (Figure 40d). Nous avons procédé à cinq datations, dont deux dans BON et trois dans RDV (Figure 41). Les périodes s'étalent entre 9119 cal. BC et 1222 cal. AD. La datation des charbons a donné un *terminus ante quem* dans BON située entre 1044 et 1222 AD, correspondant à *Abies alba*. Cette période coïncide parfaitement avec la limite inférieure trouvée dans GAR avec un charbon *Abies alba* daté entre 899 et 1147 AD (Figure 11 et Figure 13). Ces résultats corroborent également avec les datations de Schwartz et al. (2003 et 2012) supposant une érection des murgers aux 11<sup>e</sup> et 12<sup>e</sup> siècles. Dans le cas de BON et GAR, notons que les deux charbons sont des sapins et qu'ils ont brûlé à la même période. Ajoutons également que la première mention du château du Judenbourg, château situé dans la commune du Bonhomme, est donné en 1162 (Jéhin, 1991). De nombreux éléments semblent confirmer l'origine des formes agraires aux alentours du 11<sup>e</sup> siècle au Bonhomme, mais aussi des murgers dans les Vosges, cela reste à confirmer avec les données de l'INRAP à Soultzmatt (68).

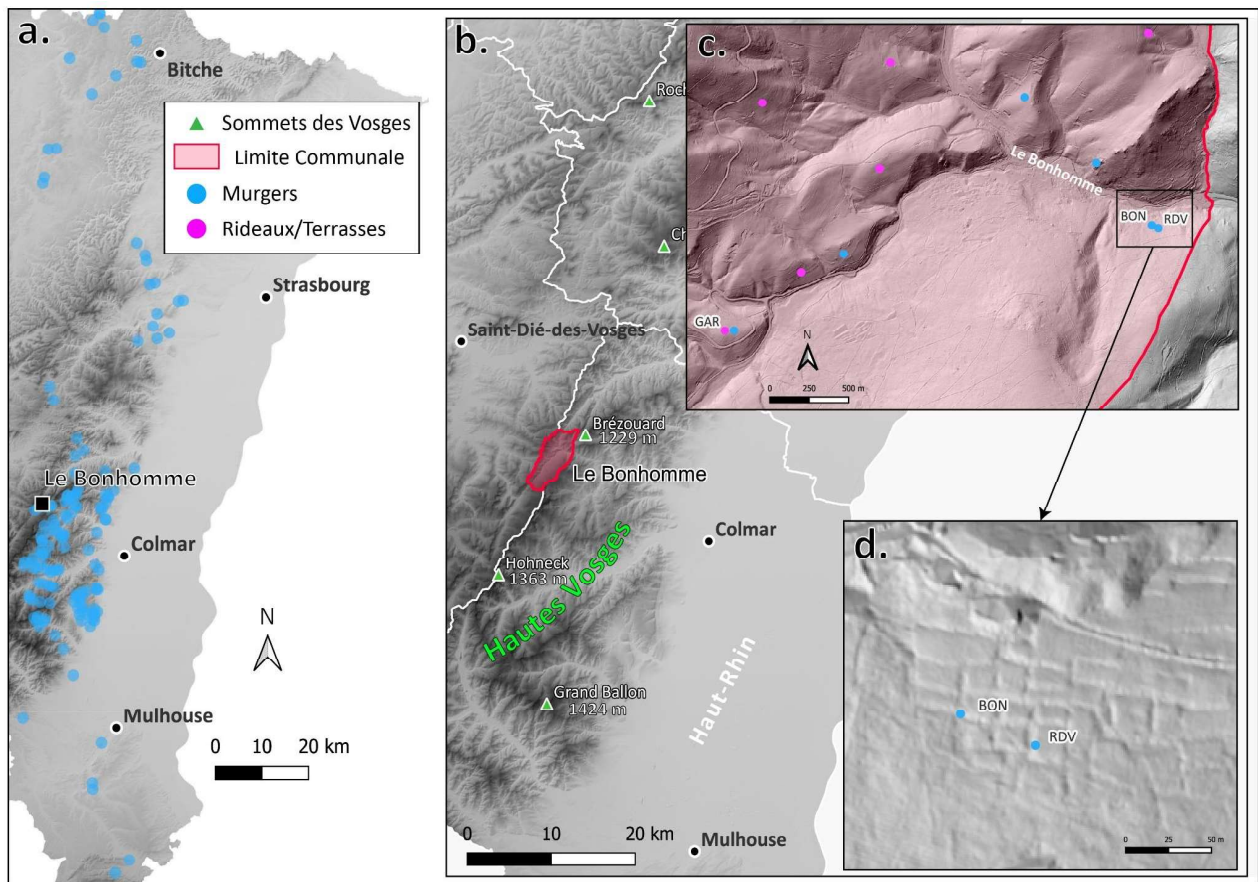


Figure 40 : Carte de localisation générale des murgers dans l'est de la France (a), Carte de localisation de la commune du Bonhomme située dans les Hautes Vosges (b). Carte de la commune du Bonhomme avec les sites de localisation des murgers BON et RDV, ainsi que la localisation du site d'étude du rideau de culture GAR (c). MNT du système de murgers et l'emplacement des murgers BON et RDV situés à 710 m d'altitude (d).

Nous souhaitons mettre en avant un autre élément que nous pouvons établir à partir des datations de BON et RDV sur l'histoire du Bonhomme. Trois charbons sont datés de l'Âge du Bronze. La présence de ces charbons datés entre 1897 et 1416 BC correspondent à l'âge estimé de quatre haches découvertes sur l'ancienne route du col du Bonhomme (Baradel, 2003). La paléovégétation semblait être dominée par une hêtraie-sapinière. Ceci est confirmé par l'étude de Janssen et Janssen-Kettlitz (1972) réalisé sur la tourbière du Tanet située entre le Hohneck et le village du Bonhomme (Figure 40b). Le diagramme pollinique met en évidence des fluctuations de la hêtraie-sapinière à partir de 3205±35 BP, ce qui correspond aux âges des charbons de bois prélevés sous le murger. Ces données vont également dans le sens de l'étude menée par Goepp (2007) sur les chaumes du Hohneck, mettant en lumière l'exploitation de ces chaumes au cours de l'Âge du Bronze. Cinq charbons extrait d'un profil de sol sont datés entre 1447 et 1883 BC correspondant aux datations de BON et RDV. Dans sa thèse, Goepp (2007) proposait l'hypothèse du développement d'activités pastorales sur les sommets vosgiens dès l'âge du Bronze Ancien. Les charbons découverts sur les sites BON et RDV sont possiblement les conséquences de ces pratiques pastorales. Dans ce cas, une question se pose, y avait-il des activités pastorales au Bronze Ancien avant l'érection du système de murgers dans la commune du Bonhomme ? Si oui, cela signifierait que le pastoralisme a pu prendre place à des altitudes bien moins importantes (710 m).

Un dernier élément intéressant comparativement entre GAR et RDV concerne le paléo incendie d'une forêt composée de *Pinus* et de *Betula*, daté de la même période entre ~9200 et ~8500 BC. Même constat sur les Hautes Chaumes du Rossberg pour Goepp (2007), deux datations de *Pinus* à la même

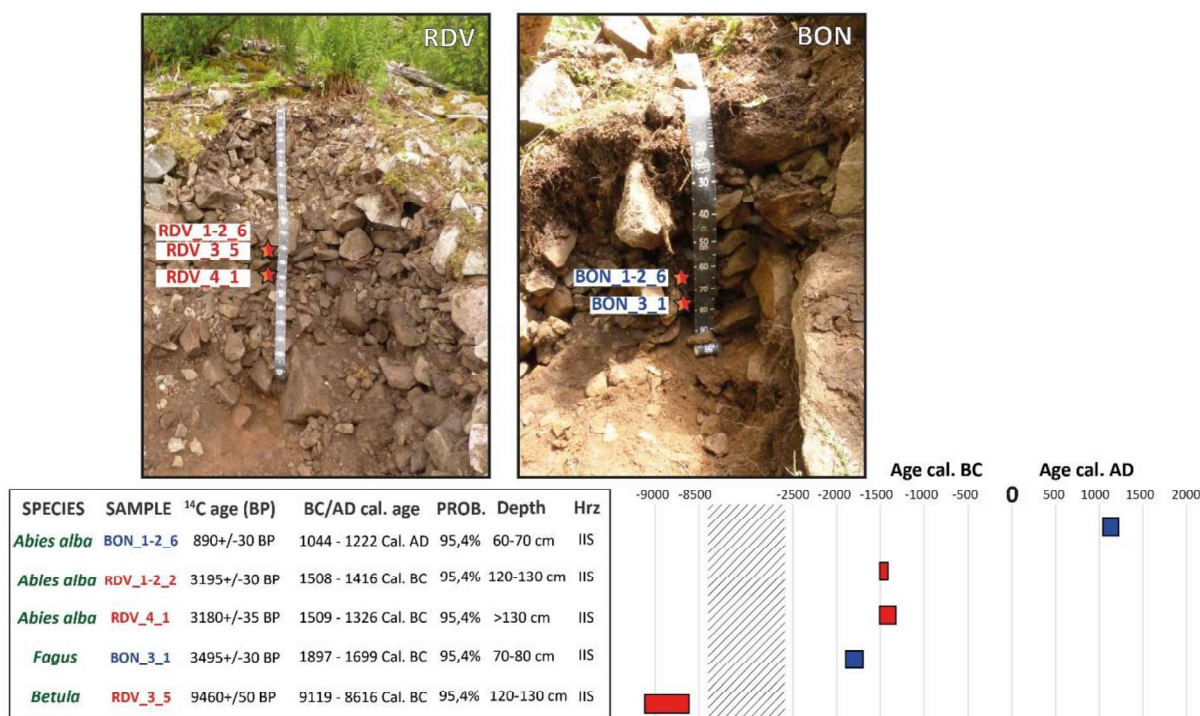


Figure 41 : Images des profils des « paléosols » scellés sous les murgers de RDV et BON, avec la localisation des prélèvements des charbons identifiés et datés par <sup>14</sup>C. Tableau récapitulatif des datations avec les indications relatives aux charbons (gauche). Frise chronologique des datations (gauche). Les charbons de bois ont été datés au Poznan Radiocarbon Laboratory, en utilisant la datation radiocarbone AMS (prétraitement acide-alcalin). Les calibrations ont été calculées avec le programme de calibration Calib 8.20 (Stuiver et al., 2022) en utilisant la calibration de la courbe atmosphérique IntCal20 (Reimer et al., 2020).

époque. Ces données sont en accord avec les diagrammes polliniques théorique des Vosges démontrant que cette période est dominée par *Pinus* et *Betula* (Guillet et al., 1976 ; de Klerk, 2014), avant un déclin amorcé aux alentours de 8000 BC (en raison de l'expansion de *Corylus*).

### 5.3.2. Apports scientifiques de l'étude des murgers

Nous montrons ici l'intérêt de dater plusieurs systèmes agraires dans un ensemble présentant une homogénéité historique (ici à l'échelle d'une commune), ce qu'avaient déjà démontré certaines études utilisant la pédoanthracologie (Bal et al., 2010 ; Schwartz et al. 2020 ; Bal, 2022). Dans ce cas précis, nous montrons qu'appliquer la pédoanthracologie dans deux types de forme agraire ou deux systèmes agraires, à l'intérieur d'une limite d'une petite zone géographique, peut permettre d'augmenter la robustesse de l'interprétation des paléo-incendies. De manière générale, ces données sont très prometteuses et elles permettent de dresser un tableau plus précis de l'âge de ces structures. Une nouvelle synthèse régionale permettra de déterminer si l'ensemble des murgers du massif vosgien correspond à une phase commune, et un changement des pratiques culturelles suite à une évolution socio-économique au milieu du Moyen Âge. L'étude croisée avec les murgers tchèques permettra, nous l'espérons, de comparer les pratiques entre l'Europe centrale et l'Europe de l'Ouest. Elle représentera la première étude interculturelle sur les murgers. Les murgers (ainsi que les rideaux de culture) peuvent représenter des surfaces très importantes en Tchéquie, et ils sont souvent couverts par des haies vives jouant un rôle important dans les paysages, souvent monotones, en favorisant la biodiversité et la géodiversité (Jackovičová et al., 2023). Comme le précisent Schwartz et al. (2020) certains paysages tchèques peuvent nous donner une approximation de l'aspect de ces paysages anciens du massif vosgien.

## 5.4. Conclusion du chapitre 5

Cette thèse a permis d'approfondir notre compréhension des paysages de l'est de la France en mettant en évidence les formes agraires anciennes et leur évolution dans le temps. Elle souligne l'importance de l'approche objective, c'est-à-dire de la détection des formes agraires dans une base de données spatialisées, dans l'analyse du paysage, tout en mettant en lumière les défis liés à la généralisation des résultats à une échelle telle que les Hautes-Vosges. Ce travail démontre également la pertinence d'une approche interdisciplinaire, notamment par l'utilisation de différentes sources d'information pour une analyse approfondie des paysages. La pédoanthracologie présente un intérêt non négligeable dans l'étude des formes agraires, lorsqu'elle est associée aux données historiques, archéologiques et paléoenvironnementales. Le P-OSL avait déjà été utilisé dans l'étude des terrasses et des rideaux. Nous montrons ici que son application dans les champs bombés permet d'identifier dans le billon le paléosol et d'aider à la stratégie de datation par OSL.

Ce travail exprime à plusieurs reprises l'importance de considérer ces systèmes de formes agraires comme un indicateur d'anthropisation des paysages à des échelles séculaires et millénaires. À ce titre, ce travail avait, en partie, été conçu pour apporter sa pierre à l'édifice de l'écologie historique. Ces données mettent en lumière, ce que beaucoup d'études ont déjà démontré, à savoir que de nombreux écosystèmes actuels possèdent des trajectoires temporelles complexes. Cette base de données, par conséquent, permettra de constituer un référentiel plus solide pour les gestionnaires et les acteurs du territoire. En outre, ce travail montre les trames variées des parcellaires anciens (linéaires, réticulées ou ponctuelles) mais aussi la grande densité du parcellaire. Notons également que ces systèmes de formes agraires étaient pourvus de nombreuses haies vives (à l'exception des champs bombés), comme le démontre des enluminures du 15<sup>e</sup> et 16<sup>e</sup> siècle (Schwartz et al., 2019) et l'étude des toponymes en Alsace (Froehlicher, 2016). De nombreux lieux-dits sont affublés des termes *heck* ou *hagen*, signifiant haie en langue germanique. Par conséquent, il est indéniable que ces systèmes de formes anciennes nous questionnent sur l'uniformité de nos paysages agricoles.





# Table des figures

Figure 1 : Photo d'un murger situé dans le vignoble (a) de Sigolsheim (68). Modèle numérique de terrain (MNT) du système de murgers et de rideaux de culture (b) au Bonhomme (68) ; Photos aériennes d'un arasement de murger sur prairie dans la commune du Bonhomme (68) ; murger en place en 2015 (c) ; murger arrasé en 2018 (d). Source : géoportail.fr.....	20
Figure 2 : Rideau de culture avec un ressaut de ~2 m (a) présentant un petit muret appareillé en son milieu (b) dans la commune d'Achen (57), situé dans le Pays de Bitche. ....	24
Figure 3 : Schéma explicatif de la genèse de champs bombés avec une charrue à versoir fixe. Humoser acker = champs humifère, jungfräulicher boden = sol vierge, pflugrichtung = sens de la charrue, arbeitsfahrten des Pfluges = les trajets de travail de la charrue, leerfahrten des Pfluges= les déplacements à vide de la charrue, reihenfolge der Furchen = ordre des sillons (Hauger et al. 2001 in Sittler et al., 2015).....	27
Figure 4 : Coupe d'un rideau de culture paré d'un mur construit à l'âge du fer en creusant dans des sols plus anciens de l'âge du bronze. La figure montre une interpolation de la dose apparente (Gy), ainsi que les datations par OSL PD (OSL profiling and dating, Vervust et al., 2020). ....	40
Figure 5 : Modèle conceptuel des données (MCD) des formes agraires dans les régions cibles (Haut-Rhin, Bas-Rhin et Moselle).....	43
Figure 6 : Carte de localisation des formes agraires (rideaux/terrasses, champs bombés et murgers) dans l'est de la France dans les départements de la Moselle, du Bas-Rhin et du Haut-Rhin .....	1
Figure 7: Description and identification of a lynchet; (a) Theoretical stages of lynchet formation a.: Stage 1, Clearing of the forest ( this stage can be repeated between stage 3 and 5); Stage 2, crop cultivation on small fields and beginning of erosion process transfers; Stage 3, Establishment of a hedge and accumulation of sediments upstream of it, beginning of soil aggradation; Stage 4: Soil aggradation depending on several factors (intensity of rainfall, time spent in cultivation, slope, intensity of tillage, edaphic characteristics, etc.); Stage 5: Abandonment of the lynchet system and conversion to forest or conversion to grassland. (b) Morphostratigraphic differences between a lynchet and an agricultural terrace; the terrace is the result of voluntary overburdening upstream and deposition of fill downstream visible in the soil profile. (c) Lynchet system in the Vosges mountain range Goldbach-Altenbach study site (ALP). ....	51
Figure 8: Location of study sites carried in or near the Vosges Mountain range. Location of the Grand Est administrative region, the Vosges Mountain range and Lorraine Plateau (bottom right of the image). Location of geological outcrop (top left of the image). ....	1
Figure 9: Land use map of the MBW (a), WBT (b), SAA (c), GAR (d), ALP (e) and GOLF (f) sites with the Lynchet system (red line), some of which are associated with stone walls (yellow line). Location of the trench (black star) in the MBW lynchet in Obergailbach municipality (a); Location of the trench (black star) in the WBT lynchet in Achen municipality (b); Location of the trench (black star) in the SAA lynchet in Saâles municipality with an archaeological site (c); Location of the trench (black star) made in the GAR lynchet in Le Bonhomme commune with archaeological sites (d); Location of the trench (black star) made in the ALP and GOLF lynchet in Goldbach-Altenbach commune (e and f). ....	1
Figure 10: Trench soil profile with charcoal concentration in soil per taxa (mg /kg) (mg /kg) per sampled horizon and the part (%) of charcoal pieces per species sampled in the lynchet at site MBW (a), WBT (b), SAA (c), GAR (d), ELP (e) and GOLF (f); Some charcoals were sampled opportunistically (yellow star) at site WBT (b) and SAA (c).....	1
Figure 11: AMS- <sup>14</sup> C dates of the single charcoal pieces from the investigated sites MBW, WBT, SAA, GAR, ALP and GOLF (left). Calibration in BC and AD based on the IntCal20 atmospheric curve calibration (Reimer et al., 2020). Timeline with each dating in chronological order (right) from oldest on the left to most recent on the right for each site: MBW (red), WBT (yellow), SAA (orange), GAR (green), GOLF and ALP (blue) .....	63
Figure 12: Discriminant scores obtained from the NIR spectra measured on soil organic matter from the six pedosedimentary profiles. ....	64

Figure 13: Timeline (right) of geo-historical data (example with site GAR, left, section 2 part 2.3) for sites MBW (a), WBT (b), SAA (c), GAR (d), ALP (e) and GOLF (f). The sites are distinguished into two categories: not cultivated since the ~18 <sup>th</sup> century (green rectangle) and not cultivated since the ~20 <sup>th</sup> century (red rectangle). .....	65
Figure 14: Timeline per site combined with geo-historical data, archaeological/historical data, pedoanthrological data (charcoal dating) and NIRS data. Cerealia type pollen data and carbonized particles (Gouriveau et al., 2020) data used only for MBW and WBT.....	1
Figure 15: Stone wall in the municipality of Achen located a few meters from the WBT site. Photo taken on the slope separating a meadow or two fields on either side, a difference of one meter in height separates the left field from the right (a). Photo of the profile of the stone wall and the paleosol with the original slope of the soil on which the stones were deposited (b). .....	71
Figure 16 : Description and identification of a ridge and furrow system; (a) and (c) ploughing using heavy plow and genesis of ridge and furrow formation (inspired by Hauger et al., 2001); (b) photograph and digital terrain model (DTM) view of a ridge and furrow system in the Upper Rhine Graben study site Guewenheim, (GUB); (c) 3D representation of a ridge and furrow system.....	81
Figure 17: Location of ridge and furrows (yellow circles) in the Grand Est Region. Location of study sites and communes (red square) of Baerenthal (BAT), Hindisheim (HIN) and Guewenheim (GUB). Location of the Grand Est region, Vosges Mountains and Upper Rhine Graben (bottom right of image). Location of Vosges Mountains and Upper Rhine Graben (top left of image).....	1
Figure 18 : Land use map of the BAT, HIN and GUB sites with the ridge and furrows system (red line corresponds to the ridges). Location of the excavated pits (black square) Source: CORINE Land Cover 2012 land cover database. ....	85
Figure 19 : Topography and organization of soil horizons observed in the six pits and by auger in the ridge and furrows at BAT (a), HIN (b) and GUB site (c). .....	90
Figure 20 : Discriminant function obtained from reference spectra and scores obtained from the NIR spectra measured on soil organic matter from the BAT (a), HINB (b) and GUB (c) ridge pedosedimentary profiles. POSL signal at the site BAT (a), HINB (b) and GUB (c) in the ridge (BAT, HINB et GUB) and in the furrow (BATS et HINS).....	1
Figure 21 : Timeline (right) of geohistorical data (example with GUB site, left) for BAT (a), HIN (b) and GUB (c). The sites are distinguished into two categories: not cultivated since the ~19 <sup>th</sup> century (green rectangle) and not cultivated since the ~20 <sup>th</sup> century (red rectangle). BAT and GUB site with a DTM view and HIN site with satellite picture. Source: described in 3.3.2 .....	94
Figure 22 : (a) POSL signal, OSL dating strategy (circle yellow) and NIRS scores at the site BAT in the profile BAT (ridge) and in the profile BATS (furrow); (b) POSL signal and NIRS scores at the site HIN in the profile HINB (ridge) and in the profile HINS (furrow); (c) POSL signal and NIRS scores at the site GUB in the profile GUB (ridge). POSL profile interpretation is realized with Brown et al. 2023.....	1
Figure 23 : DTM of the GUB site (first image on the left) with terrace 1 (no dating) and terrace 2 (dating between 1892 and 1950). The 1892 land register is shown in purple. Source: described in 3.3.2 .....	100
Figure 24 : Location of the Hautes-Vosges study area (1185 km <sup>2</sup> ) in north-eastern France (right); topography of the six catchments (left) .....	109
Figure 25 : Former field systems in the Hautes-Vosges, NE France; field- and LiDAR-images and schematic representations of (a) ridge and furrow, (b) terraced slopes, and (c) stone walls .....	111
Figure 26 : Occupation surface (ha) of each polygon of (a) terraced slopes, (b) ridge and furrow, and (c) stone walls in the Hautes-Vosges, France .....	116
Figure 27 : Spatial distribution of (a) the location of former field systems (centroid of polygons classified by former field system category) with respective former field systems (ha) in the six Hautes-Vosges catchments and (b) density (ha/km <sup>2</sup> ) of digitized former field systems across the study site with the average density of former field system in each of the six catchments. ....	117
Figure 28 : Topographical characteristics of the three types of former field systems; (a) boxplots illustrating the statistical distribution of slope; (b) boxplots illustrating the statistical distribution of	

elevation; and (c) line plots illustrating the evolution of the relative surface area of terraced slopes and stone walls located on south-facing slopes .....	118
Figure 29 : Line plots illustrating the evolution of the relative surface of cultivated area in the six catchments .....	119
Figure 30 : Sankey diagram for change detection analysis of cultivated areas for the medieval period to the mid-19 <sup>th</sup> century to 2012. The stacked bars represent the relative abundance of each land-cover type in the medieval period (first vertical bar), the mid-19 <sup>th</sup> century (second vertical bar), and 2012 (third vertical bar). The weighting of each component in the stacked bars is proportional to the relative abundance of the studied land-cover type.....	120
Figure 31 : Boxplot illustrating the distribution of elevation (left) and slope (right) for three distinct transition classes between the medieval period and the mid-19 <sup>th</sup> century, including (a) former field systems to forest, (b) former field systems to cropland, and (c) former field systems to grasslands (c). A student t-test determined whether the groups differed statistically. Note p-value <0.0001 (****); <0.001 (**); <0.01 (**); <0.05(*); (ns) non-significant, i.e., >0.05 .....	124
Figure 32 : Spatial distribution of the forest patches classified according to their spatio-temporal trajectory in the full study area (right) and the Weiss/Strengbach catchment (left); patches are noted as ancient forest (dark green), young forest (light green), and ancient forest cultivated during the medieval period (red).....	126
Figure 33 : Carte de la France représentant les dalles des données LiDAR déjà acquises ou en voies d'acquisition, datée du 5 juin 2023. Source : <a href="https://macarte.ign.fr/carte/322ea69dab4c7e5afabc6ec7043b5994/acquisitionslidarhd">https://macarte.ign.fr/carte/322ea69dab4c7e5afabc6ec7043b5994/acquisitionslidarhd</a> .....	131
Figure 34 : Carte de l'Etat-Major (a) et du cadastre d'Alsace (b) dans la commune du Bonhomme située dans les Hautes-Vosges.....	132
Figure 35 : Carte du site WBT (étoile noire) dans la commune d'Achen (57). Système de rideaux de culture estimé comme moderne (trait rouge) et système de rideaux de culture estimé comme ancien (trait bleu). Représentation du site WBT en 3D avec l'espacement de 10 m.....	135
Figure 36 : Tranchée de sol du site WBT dans le comuune d'Achen (57) avec la localisation des prélèvements anthracologiques dans l'horizon S (ou colluvioné) de WBT A (en amont), WBT B et WBT C (en aval). Graphique repésentant l'anthacomasse total par prélèvement par type d'espèce, ainsi que le nombre total de charbons pesé.....	137
Figure 37 : Prise de vue aérienne en 2018 (a, source : <a href="http://www.géoportail.gouv.fr">www.géoportail.gouv.fr</a> ) et photo en 1929 (b, source : Girel et al., 2010) de murgers (flèches rouges) superposant des terrasses dans la commune de Villar-d'Arène (05) ; MNT (c) et prise de vue aérienne (d) représentant des murgers (flèche rouge) superposant des rideaux de culture ou des terrasses, ainsi que des champs bombés (à peine visible) entre deux ressaut (pointillés jaunes) dans la commune de Marmoutier (67)..	142
Figure 39 : MNT situé dans la commune de Lapoutroie (68) au lieu-dit des Cammes, montrant la présence de murger gigantesque ~4 m de haut (flèche rouge) en bordure de prairie. Les flèches jaunes indiquent les anciennes limites de champs encore visible et l'emplacement des murgers arrasés. Prélèvement pour datation au <sup>10</sup> Be sur des pierres constituant un murger et une terrasse (étoiles rouges).....	143
Figure 38 : MNT montrant des formes hybrides entre des champs bombés et des rideaux de culture dans la commune de Masevaux (68) au lieu-dit du Zollenbourg. ....	143
Figure 40 : Carte de localisation générale des murgers dans l'est de la France (a). Carte de localisation de la commune du Bonhomme située dans les Hautes Vosges (b). Carte de la commune du Bonhomme avec les sites de localisation des murgers BON et RDV, ainsi que la localisation du site d'étude du rideau de culture GAR (c). MNT du système de murgers et l'emplacement des murgers BON et RDV situés à 710 m d'altitude (d).....	1
Figure 41 : Images des profils des « paléosols » scellés sous les murgers de RDV et BON, avec la localisation des prélèvements des charbons identifiés et datés par <sup>14</sup> C. Tableau récapitulatif des datations avec les indications relatives aux charbons (gauche). Frise chronologique des datations (gauche). Les charbons de bois ont été datés au Poznan Radiocarbon Laboratory, en utilisant la datation radiocarbone AMS (prétraitement acide-alkalin). Les calibrations ont été calculées avec le programme de calibration Calib 8.20 (Stuiver et al., 2022) en utilisant la calibration de la courbe atmosphérique IntCal20 (Reimer et al., 2020). ....	147



# Liste des tableaux

Tableau 1 : Type de forme agraire étudié ou non dans cette thèse et leur présence ou non dans les paysages de grande culture ou dans les paysages "protégés" (forêt ou prairie).....	22
Tableau 2 : Nombre de points correspondant à un ensemble de formes agraires (centroïde d'un polygone) ou d'une forme isolée dans les départements du Bas-Rhin (67), du Haut-Rhin (68), de la Moselle (57) et des Vosges (88).....	44
Tableau 3 : Surface areas of the various forest types in the study area .....	121



# Bibliographies

- Académie nationale de Metz. (1830). *Mémoires de l'Académie nationale de Metz*. Editions le Lorrain.
- ADM Archives départementales de Metz. (1758). France : Atlas topogéographique du Comté de Bitche. *Archive number: AD 57, CP 986–988, B 10139–10140*, 395.
- Affek, A. (2015). Exploring the past Carpathian landscape : The application of LiDAR and archival cadastral maps. *Archaeologia Polona*, 53, 243-248.
- Ageby, L., Angelucci, D. E., Brill, D., Carrer, F., Brückner, H., & Klasen, N. (2022). Dating dry-stone walls with rock surface luminescence : A case study from the Italian Alps. *Journal of Archaeological Science*, 144, 105625. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2022.105625>
- Agnoletti, M., Conti, L., Frezza, L., Monti, M., & Santoro, A. (2015). Features Analysis of Dry Stone Walls of Tuscany (Italy). *Sustainability*, 7(10), 13887-13903. <https://doi.org/10.3390/su71013887>
- Alcántara, V., Don, A., Well, R., & Nieder, R. (2017). Legacy of medieval ridge and furrow cultivation on soil organic carbon distribution and stocks in forests. *Catena*, 154, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.013>
- Andersen, T. B., Jensen, P. S., & Skovsgaard, C. V. (2016). The heavy plow and the agricultural revolution in Medieval Europe. *Journal of Development Economics*, 118, 133-149. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2015.08.006>
- Archives départementales du Haut-Rhin. (2023). *Plans de finage 1760*. <https://archives.haut-rhin.fr/search/home>
- Aufrère, L. (1929). Les rideaux [Étude topographique]. *Annales de Géographie*, 38(216), Article 216.
- Baize, D., & Girard, M.-C. (2009). *Référentiel pédologique*. Editions Quae.
- Bal, M.-C. (2022). Approche géoarchéologique des terroirs montagnards par la pédoanthracologie : L'exemple de la montagne d'Enveig (Pyrénées Orientales, France). In D. Galop (Éd.), *Paysages et environnement : De la reconstitution du passé aux modèles prospectifs* (p. 133-150). Presses universitaires de Franche-Comté. <https://doi.org/10.4000/books.pufc.43045>
- Bal, M.-C., Allée, P., & Liard, M. (2015). The origins of a *Nardus stricta* grassland through soil charcoal analyses : Reconstructing the history of a mountain cultural landscape (Mont Lozère, France) since the Neolithic. *Quaternary International*, 366, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.054>
- Bal, M.-C., Pelachs, A., Perez-Obiol, R., Julia, R., & Cunill, R. (2011). Fire history and human activities during the last 3300cal yr BP in Spain's Central Pyrenees : The case of the Estany de Burg. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 300(1-4), Article 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.12.023>
- Bal, M.-C., Rendu, C., Ruas, M.-P., & Campmajo, P. (2010). Paleosol charcoal : Reconstructing vegetation history in relation to agro-pastoral activities since the Neolithic. A case study in the Eastern French Pyrenees. *Journal of Archaeological Science*, 37(8), 1785-1797. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.035>
- Baradel, Y. (2003). *Du val d'Orbey au canton de Lapoutroie : Un pays welche*. Société d'histoire du canton de Lapoutroie-Val d'Orbey.
- Baratay, É. (2008). *Bêtes de somme : Des animaux au service des hommes*. Éd. de la Martinière.
- Barthès, B. G., Brunet, D., Ferrer, H., Chotte, J.-L., & Feller, C. (2006). Determination of total carbon and nitrogen content in a range of tropical soils using near infrared spectroscopy : Influence of replication and sample grinding and drying. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 14(5), 341-348.
- Basoge, F., Koupaliantz, L., Kreis, N., & Sittler, B. (2011). Lidar surveys in the upper rhine valley new insights for archeological and landscape applications. *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, 193, Article 193.
- Baud, P., Bourgeat, S., & Bras, C. (2013). *Dictionnaire de géographie* (5e éd). Hatier.



- Benatti, A., Bal, M. C., Allée, P., Bosi, G., Dallai, D., & Mercuri, M. (2018). Charcoal Kilns in the Northern Apennines (Italy): Forest Exploitation by Past Societies in Mountain Areas. *Interdisciplinaria Archaeologica, Natural Sciences in Archaeology*, 9(2), Article 2.
- Bennett, R., Welham, K., Hill, R. a., & Ford, A. (2012). A Comparison of Visualization Techniques for Models Created from Airborne Laser Scanned Data. *Archaeological Prospection*, 19(1), 41-48. <https://doi.org/10.1002/arp.1414>
- Beresford, M. W. (1948). Revisions in Economic History: XI. Ridge and Furrow and the Open Fields. *The Economic History Review*, 1(1), 34-45. <https://doi.org/10.2307/2590002>
- Bergès, L., & Dupouey, J.-L. (2021). Historical ecology and ancient forests: Progress, conservation issues and scientific prospects, with some examples from the French case. *Journal of Vegetation Science*, 32(1), e12846. <https://doi.org/10.1111/jvs.12846>
- Bernard-Allée, P., & Valadas, B. (1992). L'état des recherches sur l'archéologie agraire en Limousin. *Norois*, 156, Article 156.
- Beroutchachvili, N., & Bertrand, G. (1978). Le géosystème ou «système territorial naturel». *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 49(2), 167-180. <https://doi.org/10.3406/rqps.1978.3548>
- Bertrand, C., & Bertrand, G. (2014). La nature-artefact: Entre anthropisation et artialisement, l'expérience du système GTP (Géosystème-Territoire-Paysage). *L'Information géographique*, 78(3), 10-25. <https://doi.org/10.3917/liq.783.0010>
- Bertrand, G. (1984). Les géographes français et leurs paysages. *Annales de géographie*, 93(516), 218-229. <https://doi.org/10.3406/geo.1984.20250>
- Bertrand, G., & Tricart, J. (1968). Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 39(3), 249-272. <https://doi.org/10.3406/rqps.1964.4776>
- Bettineschi, C., Magnini, L., Giovanni, A., & De Guio, A. (2022). Clearance cairnfields forever: Combining AI and LiDAR data in the Marcesina upland (northern Italy). *POST-CLASSICAL ARCHAEOLOGIES*, 12, 49-68.
- Bibliothèque nationale et universitaire de Strasbourg (BNU) & Bibliothèque nationale de France (BNF). (2023). *Plans cadastraux—France—(1890 -1918)*. <https://gallica.bnf.fr/accueil/fr/content/accueil-fr?mode=desktop>
- Blaising, J. M. (2010). La charrue, outil de modelage du paysage durant le dernier millénaire. M.-H. Benetière (éd), *Le jardinier et ses outils*. Paris, ministère de la Culture et de la Communication, 7-15.
- Blaising, J.-M. (2011). Archéologie du paysage à Saint Epvre en vallée de la Nied française. *Inrap, Renaissance du vieux Metz*(171), Article 171.
- Blaising, J.-M., & Frauciel, M. (2007). Haute-yutz, le temps d'un village. *Société d'histoire et d'archéologie de la Lorraine*, 3/4, Article 3/4.
- Blanchemanche, P. (1990). *Bâtisseurs de paysages: Terrassement, épierrement et petite hydraulique agricoles en Europe XVII. - XIX. siècles*. Éd. de la Maison des Sciences de l'Homme.
- Blume, H., & Leinweber, P. (2004). Plaggen Soils: Landscape history, properties, and classification. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167(3), 319-327. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420905>
- Bodmer, W. (1930). *L'immigration suisse dans le comté de Hanau-Lichtenberg au XVIIe siècle*. Impr. Heitz & Cie.
- Bonnamour, G., Camizuli, E., & Marconnet, C. (2010). Fouille archéologique préventive « Le Cerisier », commune du Bonhomme (Haut-Rhin, avril 2006): Vestiges métallurgiques liés à la production d'argent dans la région de Sainte-Marie-aux-Mines. *ArchéoSciences*, 34, 187-196. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.2751>
- Bonnel, P., & Tholozan, A. (2007). Genèse et développement des tourbières du pays de Bitche dans les Vosges du Nord. *Origine, fonctionnement et conservation des tourbières, actes du colloque de Goutelas*. CRENAM. Univ. de Saint-Etienne, 145-167.
- Bornert, R. (2008). Les origines du monachisme en Alsace. *Revue d'Alsace*, 134(134), Article 134. <https://doi.org/10.4000/alsace.983>

- Boulanger, K. (2021). *Les villas gallo-romaines de Damblain et de Bulgnéville (France, Vosges) : Vers un « modèle » d'établissement agro-pastoral ?* 193-210. <https://doi.org/10.11588/propylaeum.800>
- Bowman, S. (1990). *Radiocarbon Dating*. University of California Press.
- Bracq, P., & Delay, F. (1997). Transmissivity and morphological features in a chalk aquifer : A geostatistical approach of their relationship. *Journal of Hydrology*, 191(1), 139-160. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03074-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03074-0)
- Brasseur, B., Ertlen, D., & Robin, V. (2022). Soil Archives : Where Soilscape History Meets Present-day Ecosystems. In *Historical Ecology : Learning from the Past to Understand the Present and Forecast the Future of Ecosystems* (Wiley, p. 85-97). <https://doi.org/10.1002/9781394169764>
- Brill, D., Jankaew, K., & Brückner, H. (2016). Towards increasing the spatial resolution of luminescence chronologies – Portable luminescence reader measurements and standardized growth curves applied to a beach-ridge plain (Phra Thong, Thailand). *Quaternary Geochronology*, 36, 134-147. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.09.003>
- Brossard, T., & Wieber, J.-C. (1984). Le paysage : Trois définitions, un mode d'analyse et de cartographie. *L'Espace géographique*, 13(1), 5-12. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1984.3887>
- Brown, A. G. (2009). Colluvial and alluvial response to land use change in Midland England : An integrated geoarchaeological approach. *Geomorphology*, 108(1-2), 92-106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.12.021>
- Brown, A. G., Fallu, D., Cucchiario, S., Alonso, M., Albert, R. M., Walsh, K., Pears, B. R., Scaife, R., Langdon, C., Tarolli, P., Cockroft, D., Snape, L., Lang, A., Ascough, P., Zhao, P., Van Oost, K., & Waddington, C. (2023). Early to Middle Bronze Age agricultural terraces in north-east England : Morphology, dating and cultural implications. *Antiquity*, 1-19. <https://doi.org/10.15184/aqy.2023.1>
- Brown, A. G., Fallu, D., Walsh, K., Cucchiario, S., Tarolli, P., Zhao, P., Pears, B. R., van Oost, K., Snape, L., Lang, A., Albert, R. M., Alsos, I. G., & Waddington, C. (2021). Ending the Cinderella status of terraces and lynchets in Europe : The geomorphology of agricultural terraces and implications for ecosystem services and climate adaptation. *Geomorphology*, 379, 107579. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107579>
- Brown, A., Walsh, K., Fallu, D., Cucchiario, S., & Tarolli, P. (2020). European agricultural terraces and lynchets : From archaeological theory to heritage management. *World Archaeology*, 52(4), 566-588. <https://doi.org/10.1080/00438243.2021.1891963>
- Bürger, K. (2007). Impact des anciennes formes d'utilisation sur les sols forestiers dans les Vosges et en Forêt Noire. *Forêt, archéologie et environnement*, 175-180.
- Callot, H. J. (1977). *Modèle agraire et parcellaire dans la plaine d'Alsace* [Thèse]. Université de Strasbourg.
- Cannon, P. M., & Reid, I. (1993). The Influence of Relic Ridge-and-Furrow on the Soil Water Regime and the Plant Community of an Ancient Meadow, Cumbria, England. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 3(1), Article 1. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/2997559>
- Carcaillet, C. (2001). Are Holocene wood-charcoal fragments stratified in alpine and subalpine soils? Evidence from the Alps based on AMS 14C dates. *The Holocene*, 11(2), 231-242. <https://doi.org/10.1191/095968301674071040>
- Carcaillet, C., & Talon, B. (1996). Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols : Exemple de quelques sols des Alpes. *Géographie physique et Quaternaire*, 50(2), Article 2.
- Carcaillet, C., & Thion, M. (1996). Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne valley (North French Alps) : Methodology and preliminary data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91(1-4), Article 1-4. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7)
- Carnelli, A. L., Theurillat, J.-P., Thion, M., Vadi, G., & Talon, B. (2004). Past uppermost tree limit in the Central European Alps (Switzerland) based on soil and soil charcoal. *The Holocene*, 14(3), 393-405. <https://doi.org/10.1191/0959683604hl715rp>
- Carrari, E., Ampoorter, E., Verheyen, K., Coppi, A., & Selvi, F. (2016). Former charcoal kiln platforms as microhabitats affecting understorey vegetation in Mediterranean forests. *Applied Vegetation Science*, 19(3), 486-497. <https://doi.org/10.1111/avsc.12238>

- Castellani, C. (1998). Évolution d'un géosystème communal industrialisé des Côtes de Meuse : L'exemple de Foug. *Revue Géographique de l'Est*, 38(1), 17-30. <https://doi.org/10.3406/rgest.1998.2480>
- Cateau, E., Herrault, P.-A., Sheeren, D., Ladet, S., & Brustel, H. (2018). The influence of spatial and temporal discontinuities of forest habitats on the current presence of flightless saproxylic beetles. *PLOS ONE*, 13(5), e0197847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197847>
- Caulfield, S., O'Donnell, R. G., & Mitchell, P. I. (1997). <sup>14</sup>C Dating of a Neolithic Field System at Céide Fields, County Mayo, Ireland. *Radiocarbon*, 40(2), 629-640. <https://doi.org/10.1017/S0033822200018567>
- Cécillon, L., Barthès, B., Gomez, C., Damien, E., Génot, V., Hedde, M., Stevens, A., & Brun, J.-J. (2008). Assessment and monitoring of soil conditions using indexes based on near infrared reflectance (NIR) spectroscopy. *Eurosoil*, 103.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., King, C., Antoni, V., Surdyk, N., Dubus, I., Arrouays, D. D., & Desprats, J.-F. (2006). Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n 3 : Synthèse et recommandations générales. *BRGM*, 87.
- CGAAER. (2023). *La haie, levier de la planification écologique* (22114; p. 116). Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire.
- Chang, C.-W., Laird, D. A., Mausbach, M. J., & Hurburgh, C. R. (2001). Near-infrared reflectance spectroscopy—principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 480-490.
- Chartin, C., Bourennane, H., Salvador-Blanes, S., Hirschberger, F., & Macaire, J.-J. (2011). Classification and mapping of anthropogenic landforms on cultivated hillslopes using DEMs and soil thickness data—Example from the SW Parisian Basin, France. *Geomorphology*, 135(1-2), 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.020>
- Chouquer, G., & Favory, F. (1981). Le paysage, objet de l'archéologique. *Revue d'Archéométrie*, 5(1), 51-60. <https://doi.org/10.3406/arsci.1981.1172>
- Chouquer, G., & Favory, F. (2001). *L'arpentage romain : Histoire des textes, droit, techniques*. Errance.
- Choux, J. (1974). Le diocèse de Metz, sous la direction de Henri Tribout de Morembert. *Revue d'histoire de l'Église de France*, 60(165), 342-343.
- Cinotti, B. (1996). Évolution des surfaces boisées en France : Proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle. *Revue Forestière Française*, 6, 547. <https://doi.org/10.4267/2042/26776>
- Clark, J. S. (1988). Particle Motion and the Theory of Charcoal Analysis : Source Area, Transport, Deposition, and Sampling. *Quaternary Research*, 30(1), Article 1. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(88\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90088-9)
- Clément, V. (1994). Contribution épistémologique à l'étude du paysage. *Mélanges de la Casa de Velázquez*, 30(3), Article 3. <https://doi.org/10.3406/casa.1994.2718>
- Cojan, I., Brulhet, J., Corbonnois, J., Devos, A., Gargani, J., Harmand, D., Jaillet, S., Jouve, A., Laurain, M., Lejeune, O., Roux, J. L., Losson, B., Marre, A., Moreau, M.-G., Ricordel, C., Simon-Coinçon, R., Stab, O., Thiry, M., & Voinchet, P. (2007). *Morphologic evolution of eastern Paris Basin : "Ancient surfaces" and Quaternary incisions*.
- Collier, M. J. (2013). Field Boundary Stone Walls as Exemplars of 'Novel' Ecosystems. *Landscape Research*, 38(1), 141-150. <https://doi.org/10.1080/01426397.2012.682567>
- Combaud, A., Petit, C., Chalumeau, L., & Vannier-Petit, F. (2012). Les cabottes et murgers de l'appellation Marsannay (Bourgogne, France) : Un patrimoine méconnu. *IXe Congrès International des Terroirs vitivinicoles 2012*, 2-9, 31-33.
- Compton, J. E., & Boone, R. D. (2000). Long-term impacts of agriculture on soil carbon and nitrogen in New England forests. *Ecology*, 81(8), 2314-2330. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[2314:LTIOAO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[2314:LTIOAO]2.0.CO;2)
- Coopération pour l'information géographique en Alsace (CIGAL). (2023). Base de données d'occupation du sol CIGAL 2011/2012 v2 (BdOCS20112012-CIGAL v2). *Alsace*. [https://data.geocatalogue.fr/id/dataset/FR\\_-236700019-BdOCS20112012-CIGAL-V2](https://data.geocatalogue.fr/id/dataset/FR_-236700019-BdOCS20112012-CIGAL-V2)

- Coûteaux, M.-M., Berg, B., & Rovira, P. (2003). Near infrared reflectance spectroscopy for determination of organic matter fractions including microbial biomass in coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(12), 1587-1600. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.08.003>
- Crawford, O. G. S. (1923). Air Survey and Archaeology. *The Geographical Journal*, 61(5), 342. <https://doi.org/10.2307/1781831>
- Cucchiari, S., Fallu, D. J., Zhang, H., Walsh, K., Van Oost, K., Brown, A. G., & Tarolli, P. (2020). Multiplatform-SfM and TLS Data Fusion for Monitoring Agricultural Terraces in Complex Topographic and Landcover Conditions. *Remote Sensing*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/rs12121946>
- Cumetti, F. (2020). *Archéologie du champ dans le Pays de Bitche : Analyse spatiale et morphologique des champs bombés* [Mémoire de Master 2]. Université de Strasbourg.
- Cunill, R., Soriano, J.-M., Bal, M.-C., Pèlachs, A., & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: A pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4-5), 373-384. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0342-y>
- Dambrine, E., Dupouey, J.-L., Laüt, L., Humbert, L., Thion, M., Beaufils, T., & Richard, H. (2007). Present forest biodiversity patterns in France related to former roman agriculture. *Ecology*, 88(6), Article 6. <https://doi.org/10.1890/05-1314>
- Dapiaggi, D. (2017). *Les ordres religieux médiévaux à l'origine de la planification agraire ? Etude des relations spatiales entre l'implantation des monastères et la répartition des rideaux de culture dans le Haut-Rhin* [Mémoire de Master 1]. Université de Strasbourg.
- Davodeau, H. (2009). L'évaluation du paysage, premier acte des politiques paysagères. *Projets de paysage. Revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace*, 2, Article 2. <https://doi.org/10.4000/paysage.28699>
- Deák, J., Gebhardt, A., Lewis, H., Usai, M. R., & Lee, H. (2017). Soils Disturbed by Vegetation Clearance and Tillage. In *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology* (p. 231-264). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118941065.ch28>
- Debussche, M., Lepart, J., & Dervieux, A. (1999). Mediterranean landscape changes: Evidence from old postcards. *Global Ecology and Biogeography*, 8(1), 3-15. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1999.00316.x>
- Deforce, K., Boeren, I., Adriaenssens, S., Bastiaens, J., De Keersmaeker, L., Haneca, K., Tys, D., & Vandekerckhove, K. (2013). Selective woodland exploitation for charcoal production. A detailed analysis of charcoal kiln remains (ca. 1300–1900 AD) from Zoersel (northern Belgium). *Journal of Archaeological Science*, 40(1), 681-689. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.07.009>
- de Klerk, P. (2014). *Palynological research of the Vosges Mountains (NE France) : A historical overview*.
- de Lafontaine, G., & Asselin, H. (2011). Soil charcoal stability over the Holocene across boreal northeastern North America. *Quaternary Research*, 76(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.06.006>
- Devereux, B. J., Amable, G. S., Crow, P., & Cliff, A. D. (2005). The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity*, 79(305), 648-660. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00114589>
- Dion, R. (1983). Un exemple de modèle agraire : Les champs bombés dans la plaine de la Lys. *Hommes et Terres du Nord*, 2, 1-12.
- Doyen, É., Vannièrre, B., Berger, J.-F., Arnaud, F., Tachikawa, K., & Bard, E. (2013). Land-use changes and environmental dynamics in the upper Rhone valley since Neolithic times inferred from sediments in Lac Moras. *The Holocene*, 23(7), 961-973. <https://doi.org/10.1177/0959683612475142>
- Drake, J. D., & Worsley, J. C. (2002). *Practical PostgreSQL*. O'Reilly Media, Inc.
- 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(1), 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.02.007>
- Duma, P., Latocha, A., Łuczak, A., & Piekalski, J. (2020). Stone Walls as a Characteristic Feature of the Cultural Landscape of the Iżera Mountains, southwestern Poland. *International Journal of Historical Archaeology*, 24(1), 22-43. <https://doi.org/10.1007/s10761-019-00501-2>

- Dumé, G., Gauberville, C., Mansion, D., & Rameau, J.-C. (2018). *Flore forestière française : Guide écologique illustré* (Nouvelle éd). Centre national de la propriété forestière, Institut pour le développement forestier.
- Dupouey, J. L., Dambrine, E., Laffite, J. D., & Moares, C. (2002). Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecological Society of America*, 83(11), Article 11.
- Dupouey, J.-L., Bachacou, J., Cosserat-Mangeot, R., Aberdam, S., Vallauri, D., & Chappart, G. (2007a). *Vers la réalisation d'une carte géoréférencée des forêts anciennes de France*. 15.
- Dupouey, J.-L., Sciamia, D., Laffite, J.-D., Georges-Leroy, M., & Dambrine, E. (2007b). Impact des usages agricoles antiques sur la végétation en forêt de Saint-Amond : Interaction avec le traitement sylvicole actuel. *Forêt, archéologie et environnement*, 181-189.
- Eckmeier, E., Rösch, M., Ehrmann, O., Schmidt, M. W. I., Schier, W., & Gerlach, R. (2007). Conversion of biomass to charcoal and the carbon mass balance from a slash-and-burn experiment in a temperate deciduous forest. *The Holocene*, 17(4), 539-542. <https://doi.org/10.1177/0959683607077041>
- Ellis, E. C. (2019). Sharing the land between nature and people. *Science*, 364(6447), 1226-1228. <https://doi.org/10.1126/science.aax2608>
- Ellis, E. C. (2021). Land Use and Ecological Change : A 12,000-Year History. *Annual Review of Environment and Resources*, 46(1), 1-33. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-010822>
- Emig, C. (2012). Alsace entre guerres et paix. *Actes des congrès nationaux des sociétés historiques et scientifiques*, 136(1), 195-207.
- Ertlen, D. (2009). *Archivages pédologique et dynamiques environnementales : Mise au point d'une nouvelle méthode de reconnaissance des paléovégétations, fondée sur l'analyse spectroscopique dans le proche infrarouge (SPIR) des matières organiques de sols et paléosols* [Thèse]. Université de Strasbourg.
- Ertlen, D. (2022). *Les temporalités emboîtées des relations Homme-milieu : Approches géographiques des systèmes paysagers* [HDR]. Université de Strasbourg.
- Ertlen, D., Schwartz, D., Brunet, D., Trendel, J.-M., Adam, P., & Schaeffer, P. (2015). Qualitative near infrared spectroscopy, a new tool to recognize past vegetation signature in soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 82, 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.12.019>
- Ertlen, D., Schwartz, D., Trautmann, M., Webster, R., & Brunet, D. (2010). Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, 61(2), Article 2. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01219.x>
- Etienne, D., Ruffaldi, P., Dupouey, J. L., Georges-Leroy, M., Ritz, F., & Dambrine, E. (2013). Searching for ancient forests : A 2000 year history of land use in northeastern French forests deduced from the pollen compositions of closed depressions. *The Holocene*, 23(5), 678-691. <https://doi.org/10.1177/0959683612470173>
- Evrard, E. (1951). Recherches sur l'évolution karstique du pays de Herve. *Ann. Soc. géol. Belgique*, 74, M71-104.
- Ewald, K. C. (1969). *Agrarmorphologische Untersuchungen im Sundgau (Oberelsass) unter besonderer Berücksichtigung der Wölbäcker* [Thesis]. Académie des sciences naturelles de Bâle-Campagne.
- Eyre, S. R. (1955). The Curving Plough-Strip and Its Historical Implications. *The Agricultural History Review*, 3(2), 80-94.
- Favre, C., Grel, A., Granier, E., Cosserat-Mangeot, R., Bachacou, J., Leroy, N., & Dupouey, J.-L. (2017). *Digitalisation des cartes anciennes. Manuel pour la vectorisation de l'usage des sols et le géoréférencement des minutes 1:40 000 de la carte d'Etat-Major* (Version 13.3; p. 79). INRA.
- Feiss, T. (2016). *Histoire et dynamique des forêts anciennes du nord de la France par l'étude des archives du sol. Approche méthodologique et statistique de la pédoanthracologie*. [Mention Sciences Ecologiques Spécialité écologie historique]. Université de Picardie Jules Verne.
- Feiss, T., Horen, H., Bresseur, B., Lenoir, J., Buridant, J., & Decocq, G. (2017). Optimal sampling design and minimal effort for soil charcoal analyses considering the soil type and forest history. *Vegetation History and Archaeobotany*, 26(6), 627-637. <https://doi.org/10.1007/s00334-017-0624-0>

- Fénelon, P. (1956). Les « rideaux » de Picardie et de la Péninsule ibérique. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 33(255), 2-9. <https://doi.org/10.3406/bagf.1956.7499>
- Flatrés, H., & Flatrés, P. (1997). Mutations agricoles et transformations des paysages en Europe. *Noroi*, 173(1), 173-193. <https://doi.org/10.3406/noroi.1997.6779>
- Fluck, P., & Florsch, N. (1996). L'archéologie du feu : Les fonderies d'argent du Bonhomme (première partie). *Bulletin de la Société d'Histoire du Canton de Lapoutroie et Val d'Orbey*, 15, 9-28.
- Follain, S., Walter, C., Legout, A., Lemercier, B., & Dutin, G. (2007). Induced effects of hedgerow networks on soil organic carbon storage within an agricultural landscape. *Geoderma*, 142(1), 80-95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.002>
- Ford, S., Bowden, M., Mees, G., & Gaffney, V. (1988). The Date of the « Celtic » Field-Systems on the Berkshire Downs. *Britannia*, 19, 401. <https://doi.org/10.2307/526208>
- Fournier, P. (2019). Boues, fumiers et déchets entre villes et campagnes dans la France moderne : Les enjeux économiques de l'insalubrité. In Marc Conesa et Nicolas Poirier (dir.), *Fumiers ! Ordures ! Gestion des déchets dans les campagnes de l'Occident médiéval et moderne, Actes des XXXVIIIes Journées internationales d'histoire de l'abbaye de Flaran, 14-15 octobre 2016*. Presses Universitaires du Mirail. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02154214>
- François, D., & Humbert, J. (2000). Quantification spatiale des précipitations. Applications au Nord-Est de la France. *Revue Géographique de l'Est*, 40(1-2), Article 1-2. <https://doi.org/10.4000/rge.4159>
- Fraterrigo, J. M., Turner, M. G., & Pearson, S. M. (2006). Interactions between past land use, life-history traits and understory spatial heterogeneity. *Landscape Ecology*, 21(5), 777-790. <https://doi.org/10.1007/s10980-005-5955-z>
- Froehlicher, L. (2016). *Les haies, une alternative à l'openfield dans les zones loessiques d'Alsace ? Perspectives historiques, systèmes agraires du futur, érosion, effets sur le colluvionnement et le stockage du carbone* [Thesis]. Université de Strasbourg.
- Froehlicher, L., Schwartz, D., Ertlen, D., & Trautmann, M. (2016). Hedges, colluvium and lynchets along a reference toposequence (Habsheim, Alsace, France) : History of erosion in a loess area. *Quaternaire. Revue de l'Association Française Pour l'étude Du Quaternaire*, vol. 27/2, Article 27/2. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.7569>
- Gadot, Y., Elgart-Sharon, Y., Ben-Melech, N., Davidovich, U., Avni, G., Avni, Y., & Porat, N. (2018). OSL dating of pre-terraced and terraced landscape : Land transformation in Jerusalem's rural hinterland. *Journal of Archaeological Science : Reports*, 575-583.
- Gaillard, M. (1993). Les abbayes du diocèse de Metz au IXe siècle. Décadence ou réforme. *Revue d'histoire de l'Église de France*, 79(203), Article 203. <https://doi.org/10.3406/rhcf.1993.1115>
- Garnier, E. (2000). Les forêts vosgiennes à l'épreuve des tempêtes sous l'Ancien Régime (XVIIe et XVIIIe siècles). *Revue Géographique de l'Est*, 40(3). <https://doi.org/10.4000/rge.4114>
- Garnier, E. (2004). *Terre de conquêtes : La forêt vosgienne sous l'Ancien Régime*. Fayard.
- Gauché, E. (2015). Le paysage à l'épreuve de la complexité : Les raisons de l'action paysagère. *Cybergeog*, 29. <https://doi.org/10.4000/cybergeog.27245>
- Gavin, D. G. (2001). Estimation of Inbuilt Age in Radiocarbon Ages of Soil Charcoal for Fire History Studies. *Radiocarbon*, 43(1), 27-44. <https://doi.org/10.1017/S003382220003160X>
- Gebhardt, A., Schwartz, D., Ertlen, D., Campaner, A., Meyer, N., & Langohr, R. (2015). Impacts des anciennes activités humaines dans les sols vosgiens actuellement sous couvert forestier. *Revue du Nord 23 Hors Série Collection Art et Archéologie*, 59-71.
- George, P., & Verger, F. (2013). *Dictionnaire de la géographie* (4<sup>e</sup> éd.). Puf.
- Georges-Leroy, M. (2020). Typologie d'après LiDAR des structures agraires et parcellaires fossilisées sous couvert forestier en Lorraine. *Archéologies numériques*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2020.0521>
- Georges-Leroy, M., Bock, J., Dambrine, E., & Dupouey, J. L. (2009). Le massif forestier, objet pertinent pour la recherche archéologique. L'exemple du massif forestier de Haye (Meurthe-et-Moselle). *Revue Géographique de l'Est*, 49/2-3, 20.

- Georges-Leroy, M., Bock, J., Dambrine, É., & Dupouey, J.-L. (2012). Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. *ArchéoSciences*, 35, Article 35. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.3015>
- Georges-Leroy, M., Heckenbenner, D., Laffite, J.-D., Meyer, N., Dambrine, E., & Dupouey, J. L. (2007a). Les parcellaires anciens fossilisés dans les forêts lorraines. *Forêt, archéologie et environnement*, 121-130.
- Georges-Leroy, M., Tolle, F., & Nouvel, P. (2007b). *Analysis of the Intensity of Agrarian Exploitation by Spatial Analysis of Ancient Field Systems Preserved by Forest Cover*.
- Girel, J. (2006). Quand le passé éclaire le présent : Écologie et histoire du paysage. *Géocarrefour*, 81(4), Article 4. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.1622>
- Girel, J., Quétier, F., Bignon, A., & Aubert, S. (2010). *Histoire de l'agriculture en Oisans Haute Normandie et pays faranchin : Villar d'Arène, Hautes-Alpes*. Jardin botanique alpin du Lautaret.
- Gocel-Chalté, D., Guerold, F., Knapp, H., & Robin, V. (2020). Anthracological analyses of charcoal production sites at a high spatial resolution : The role of topography in the historical distribution of tree taxa in the northern Vosges mountains, France. *Vegetation History and Archaeobotany*. <https://doi.org/10.1007/s00334-020-00769-z>
- Goepp, S. (2007). *Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme* [Thesis]. Université Louis Pasteur.
- Goepp, S., Schwartz, D., Thinon, M., & Jeunesse, C. (2007). Pédanthracologie, dynamiques de végétation et anthropisation dans les Hautes-Vosges (Massif du Rossberg, Haut-Rhin, France). *Forêt, archéologie et environnement*, 35-43.
- Goldammer, J. G., & Page, H. (2000). Fire history of Central Europe : Implications for prescribed burning in landscape management and nature conservation. *Freiburg (Germany), Global Fire Monitoring Center (GFMC), Fire Ecology Research Group*.
- Goldberg, E., Kirby, K., Hall, J., & Latham, J. (2007). The ancient woodland concept as a practical conservation tool in Great Britain. *Journal for Nature Conservation*, 15(2), 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2007.04.001>
- Gosse, J. C., & Phillips, F. M. (2001). Terrestrial in situ cosmogenic nuclides : Theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 20(14), 1475-1560. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00171-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00171-2)
- Gosselet, J. (1906). *Observations sur les creuses de l'Artois et de la Picardie et réflexions sur l'importance de la dissolution souterraine de la craie* (Annales de la Société Géologique du Nord 35). Liégeois-Six.
- Gouriveau, E., Ruffaldi, P., Duchamp, L., Robin, V., Schnitzler, A., & Walter-Simonnet, A.-V. (2020). Holocene vegetation history in the Northern Vosges Mountains (NE France) : Palynological, geochemical and sedimentological data. *The Holocene*, 30(6), 888-904. <https://doi.org/10.1177/0959683620902229>
- Guetté, A., Godet, L., & Robin, M. (2018). Historical anthropization of a wetland : Steady encroachment by buildings and roads versus back and forth trends in demography. *Applied Geography*, 92, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.01.012>
- Guillet, B. (1979). Etude du renouvellement des matières organiques des sols par les radioisotopes (<sup>14</sup>C). *Pédologie*, 2, 210-226.
- Guillet, B., Janssen, C. R., Kalis, A. J., & De Valk, E. J. (1976). La végétation pendant le Post-Glaciaire dans l'Est de la France. *La préhistoire française*, 2, 82-87.
- Guyot, A., Hubert-Moy, L., & Lorho, T. (2018). Detecting Neolithic Burial Mounds from LiDAR-Derived Elevation Data Using a Multi-Scale Approach and Machine Learning Techniques. *Remote Sensing*, 10(2), 225. <https://doi.org/10.3390/rs10020225>
- Haiman, M. (1992). Cairn Burials and Cairn Fields in the Negev. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, 287, 25-45. <https://doi.org/10.2307/1357137>
- Harper, J. L., & Sagar, G. R. (1953). Some aspects of the ecology of buttercups in permanent grassland. *Proceedings of the British Weed Control Conference*, 1, 256-265.
- Hartmann, A. (1876). *Zur Hochäckerfrage* (Universitäts-Buchdruckerei, München.).

- Hatt, J.-P. (1937). Contribution à l'analyse pollinique des tourbières du Nord-Est de la France. *Bulletin du Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.3406/sgeol.1937.1124>
- Hauger, K., Riedinger, R., & Sittler, B. (2001). Wölbäcker im Landkreis Rastatt—Auf den Spuren mittelalterlicher Ackerfluren. *Heimatbuch des Landkreises Rastatt*, 163-172.
- Hermey, M., Honnay, O., Firbank, L., Grashof-Bokdam, C., & Lawesson, J. E. (1999). An ecological comparison between ancient and other forest plant species of Europe, and the implications for forest conservation. *Biological Conservation*, 91(1), 9-22. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(99\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00045-2)
- Hermey, M., & Verheyen, K. (2007). Legacies of the past in the present-day forest biodiversity : A review of past land-use effects on forest plant species composition and diversity. In T. Nakashizuka (Éd.), *Sustainability and Diversity of Forest Ecosystems : An Interdisciplinary Approach* (p. 361-371). Springer Japan. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-73238-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-4-431-73238-9_1)
- Herrault, P.-A., Poterek, Q., Keller, B., Schwartz, D., & Ertlen, D. (2021). Automated detection of former field systems from airborne laser scanning data : A new approach for Historical Ecology. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, 102563. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102563>
- Herrault, P.-A., Sheeren, D., Fauvel, M., & Paegelow, M. (2015). Vectorisation automatique des forêts dans les minutes de la carte d'état-major du 19e siècle. *Revue Internationale de Géomatique*, 25(1), Article 1. <https://doi.org/10.3166/RIG.25.35-51>
- Hesse, R. (2012). Using lidar-derived Local Relief Models (Irm) as a new tool for archaeological prospection. In S. J. Kluiving & E. B. Guttman-Bond (Éds.), *Landscape Archaeology between Art and Science* (p. 369-378). Amsterdam University Press. <https://www.jstor.org/stable/j.ctt6wp79m.30>
- Hirsch, F., Schneider, A., van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., Rübiger, C., Raab, A., & Raab, T. (2023). Soil properties and tree growth at medieval ridge and furrow sites in Brandenburg, northeastern Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, n/a(n/a), 1-11. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200345>
- Houfková, P., Bumerl, J., Pospíšil, L., Karlík, P., Beneš, J., Bernardová, A., Hrabalíková, M., Molnárová, K. J., & Hejcman, M. (2015). Origin and development of long-strip field patterns : A case study of an abandoned medieval village in the Czech Republic. *CATENA*, 135, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.06.017>
- Houzard, G. (1992). Biogéographie et histoire en France. *Cahier des Annales de Normandie*, 24(1), 19-31. <https://doi.org/10.3406/annor.1992.4069>
- Hughes, R. E., Weiberg, E., Bonnier, A., Finné, M., & Kaplan, J. O. (2018). Quantifying Land Use in Past Societies from Cultural Practice and Archaeological Data. *Land*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/land7010009>
- Hunt, W., Hartley, R., McCune, B., Ali, N., & Thornton, T. (2016). Maritime Alpine Cairns in Southeast Alaska : A Multidisciplinary Exploratory Study. *Anthropology Faculty Publications*, 169.
- Huyghe, C. (2008). La multifonctionnalité des prairies en France : I. Les fonctions de production. *Cahiers Agricultures*, 17(5), 427-435. <https://doi.org/10.1684/agr.2008.0234>
- Institut géographique national (IGN). (2023). *Remonter le temps*. <https://remont.erletemps.ign.fr/>
- Institut National de l'Information Géographique et Forestière. (2022). *Résultats Départementaux—Inventaire Forestier*. <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique251>
- Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN). (2021, juillet 5). *LiDAR HD : Vers une nouvelle cartographie 3D du territoire*. <https://www.ign.fr/institut/lidar-hd-vers-une-nouvelle-cartographie-3d-du-territoire>
- Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN). (2022, mai 16). *Cartographie de la France en 3D : Un dispositif d'accompagnement pour favoriser l'exploitation des données LiDAR*. <https://www.ign.fr/espace-presse/un-dispositif-daccompagnement-pour-favoriser-l'exploitation-des-donnees-Lidar>
- Ives, T. H. (2015). Cairnfields in New England's forgotten pastures. *Archaeology of Eastern North America*, 43, 119-132.



- Jackovičová, J., Dolejš, M., & Riezner, J. (2023). Spatial determinants of the distribution of lynchets and stone walls in NW Czechia: A broad-scale study. *Applied Geography*, 158, 103036. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103036>
- Janssen, C. R., & Janssen-Kettilitz, E. L. (1972). A post-Atlantic pollen sequence from the Tourbière du Tanet (Vosges, France). *Mededelingen van Het Botanisch Museum En Herbarium van de Rijksuniversiteit Te Utrecht*, 388(1), 65-77.
- Jéhin, P. (1991). Chronologie du Bonhomme. *Bulletin de la Société d'Histoire du Canton de Lapoutroie et Val d'Orbey*, 10, 36-38.
- Jéhin, P. (1995). Le château du Judenbourg et ses mystères (XIIe—XVIe siècles). *Bulletin de la Société d'Histoire du Canton de Lapoutroie et Val d'Orbey*, 14, 44-49.
- Jéhin, P. (2000). Les origines du village du Bonhomme. *Bulletin de la Société d'Histoire du Canton de Lapoutroie et Val d'Orbey*, 19, 17-22.
- Jéhin, P. (2010). Les débuts de l'industrie dans le canton de Lapoutroie dans la première moitié du XIXe siècle. *Bulletin de la société d'histoire du canton de Lapoutroie-Val d'Orbey*, 29, 41-47.
- Johnson, B. G., Layzell, A. L., & Eppes, M. C. (2015). Chronosequence development and soil variability from a variety of sub-alpine, post-glacial landforms and deposits in the southeastern San Juan Mountains of Colorado. *CATENA*, 127, 222-239. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.026>
- Johnson, K. M., & Ouimet, W. B. (2014). Rediscovering the lost archaeological landscape of southern New England using airborne light detection and ranging (LiDAR). *Journal of Archaeological Science*, 43, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.12.004>
- Johnson, K. M., & Ouimet, W. B. (2016). Physical properties and spatial controls of stone walls in the northeastern USA: Implications for Anthropocene studies of 17th to early 20th century agriculture. *Anthropocene*, 15, 22-36. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.07.001>
- Johnson, K. M., & Ouimet, W. B. (2018). An observational and theoretical framework for interpreting the landscape palimpsest through airborne LiDAR. *Applied Geography*, 91, 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.12.018>
- Jordan, B. (1996). Les edifices religieux dans le Val d'Orbey de la Guerre de Trente Ans a la revolution française. *Bulletin de la Société d'Histoire du Canton de Lapoutroie et Val d'Orbey*, 15, 39-51.
- Juillard, E. (1953). Formes de structure parcellaire dans la plaine d'Alsace. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 30(232), Article 232. <https://doi.org/10.3406/baqf.1953.7411>
- Jussy, J. H., Koerner, W., Moares, C., Dambrine, E., Dupouey, J.-L., Zeller, B., & Benoit, M. (2001). Influence de l'usage ancien des sols sur le cycle de l'azote dans les forêts vosgiennes. *Etude et Gestion des Sols*, 8(2), Article 2.
- Kaim, D., Kozak, J., Kolecka, N., Osta, K., & Radeloff, V. C. (2016). Broad scale forest cover reconstruction from historical topographic maps. *Applied Geography*, 10.
- Kalis, A. (1985). *Un miroir éloigné : Les défrichements anthropogènes dans les zones de basse altitude, réfléchis dans des diagrammes polliniques montagnards* (p. 195-211).
- Keller, B. (2018). *Histoire des paysages agraires dans le Pays de Bitche depuis l'Antiquité : Approches géographiques et paléo-écologiques* [Mémoire de Master 2]. Université de Strasbourg.
- Keller, B., Herrault, P. A., Schwartz, D., Rixhon, G., & Ertlen, D. (2023). Spatio-temporal dynamics of forest ecosystems revealed by the LiDAR-based characterization of medieval field systems (Vosges Mountains, France). *Anthropocene*, 42, 100374. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2023.100374>
- Kerridge, E. (1951). Ridge and Furrow and Agrarian History. *The Economic History Review*, 4(1), 14-36. <https://doi.org/10.2307/2591655>
- Kerridge, E. (1955). A Reconsideration of Some Former Husbandry Practices. *The Agricultural History Review*, 3(1), 26-40.
- King, G. E., Sanderson, D. C. W., Robinson, R. A. J., & Finch, A. A. (2014). Understanding processes of sediment bleaching in glacial settings using a portable OSL reader. *Boreas*, 43(4), 955-972. <https://doi.org/10.1111/bor.12078>

- Kinnaird, T., Bolòs, J., Turner, A., & Turner, S. (2017). Optically-stimulated luminescence profiling and dating of historic agricultural terraces in Catalonia (Spain). *Journal of Archaeological Science*, 78, 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.11.003>
- Knapp, H., Robin, V., Kirleis, W., & Nelle, O. (2013). Woodland history in the upper Harz Mountains revealed by kiln site, soil sediment and peat charcoal analyses. *Quaternary International*, 289, 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.03.040>
- Koch, J. (2012). *L'art de bâtir dans les châteaux forts en Alsace ( Xe-XIIIe siècle)* [Thesis, Université de Lorraine]. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749223>
- Koerner, W., Benoît, M., Dambrine, E., & Dupouey, J. L. (1999). Influence des anciennes pratiques agricoles sur la végétation et les sols des forêts reboisées dans le massif vosgien. *Revue Forestière Française*, 2, Article 2. <https://doi.org/10.4267/2042/5433>
- Koerner, W., Cinotti, B., Jussy, J. H., & Benoît, M. (2000). Evolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIXème siècle : Identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Revue Forestière Française*, 3, Article 3. <https://doi.org/10.4267/2042/5359>
- Koerner, W., Dupouey, J. L., Dambrine, E., & Benoit, M. (1997). Influence of Past Land Use on the Vegetation and Soils of Present Day Forest in the Vosges Mountains, France. *The Journal of Ecology*, 85(3), Article 3. <https://doi.org/10.2307/2960507>
- Kooistra, M. J., & Maas, G. J. (2008). The widespread occurrence of Celtic field systems in the central part of the Netherlands. *Journal of Archaeological Science*, 35(8), 2318-2328. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.03.007>
- Kraemer, C., & Moulis, C. (2007). Pour une archéologie agraire de la plaine vosgienne. L'exemple de Châtenois au Moyen Âge. *Journées d'études vosgiennes*, 69-88. <https://bmi.agglo-epinal.fr/Default/doc/SYRACUSE/577048/pays-de-chatenois-la-ruralite-dans-la-plaine-des-vosges-actes-des-journees-d-etudes-vosgiennes-chate>
- Krahtopoulou, A., & Frederick, C. (2008). The stratigraphic implications of long-term terrace agriculture in dynamic landscapes: Polycyclic terracing from Kythera Island, Greece. *Geoarchaeology*, 23(4), 550-585. <https://doi.org/10.1002/gea.20231>
- Kreutzer, S., Schmidt, C., Fuchs, M. C., Dietze, M., Fischer, M., & Fuchs, M. (2012). Introducing an R package for luminescence dating analysis. *Ancient TL*, 30(1), 1.
- Krivtsov, V., Vigy, O., Legg, C., Curt, T., Rigolot, E., Lecomte, I., Jappiot, M., Lampin-Maillet, C., Fernandes, P., & Pezzatti, G. B. (2009). Fuel modelling in terrestrial ecosystems : An overview in the context of the development of an object-orientated database for wild fire analysis. *Ecological Modelling*, 220(21), Article 21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.08.019>
- Lal, R., Reicosky, D. C., & Hanson, J. D. (2007). Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.004>
- Landis, D. A. (2017). Designing agricultural landscapes for biodiversity-based ecosystem services. *Basic and Applied Ecology*, 18, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2016.07.005>
- Landois, R., Garcia, J.-P., & Quiquerez, A. (2019). Un habitat groupé antérieur au xiiè siècle préservé sous forêt : Le site de Goa (Val-Suzon, Côte-d'Or). *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre | BUCEMA*, 23.1, Article 23.1. <https://doi.org/10.4000/cem.16385>
- Langewitz, T., Fülling, A., Klamm, M., & Wiedner, K. (2020). Historical classification of ridge and furrow cultivation at selected locations in Northern and central Germany using a multi-dating approach and historical sources. *Journal of Archaeological Science*, 123, 105248. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105248>
- Langewitz, T., Wiedner, K., Fritsch, D., & Eckmeier, E. (2022). Improvement of soil fertility in historical ridge and furrow cultivation. *Geoarchaeology*, 37(5), 750-767. <https://doi.org/10.1002/gea.21916>
- Langewitz, T., Wiedner, K., Polifka, S., & Eckmeier, E. (2021). Pedological properties related to formation and functions of ancient ridge and furrow cultivation in Central and Northern Germany. *CATENA*, 198, 105049. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105049>
- Langohr, R. (2001). L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien—Apports de l'archéopédologie. *Étude et Gestion des Sols*.

- Larsen, A., Robin, V., Heckmann, T., Fülling, A., Larsen, J. R., & Bork, H.-R. (2016). The influence of historic land-use changes on hillslope erosion and sediment redistribution. *The Holocene*, 26(8), 1248-1261. <https://doi.org/10.1177/0959683616638420>
- Lasne, H. (1892). Sur les terrains phosphatés des environs de Doullens. Etage Sénonien et terrains superposés (2e note). *Bulletin de la Société géologique de France*, 20, 211-236.
- Lavigne, C. (2003). De nouveaux objets d'histoire agraire pour en finir avec le bocage et l'openfield. *Etudes rurales*, 167-168, 133-185.
- Lebatard, A.-E., & Bourlès, D. (2015). Quantification des processus superficiels et datation par les radionucléides cosmogéniques <sup>10</sup>Be, <sup>26</sup>Al et <sup>36</sup>Cl. *Quaternaire*, vol. 26/3, 193-213. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.7339>
- Lejeune, S. (2015). *Application de la spectroscopie proche-infrarouge à l'identification des activités agricoles médiévales : Le cas des collines sous-vosgiennes en Alsace*. [Mémoire de Master 1]. Université de Strasbourg.
- Leypold, D. (1995). Mines et métallurgie du fer dans le massif vosgien de l'Antiquité au XIXe siècle : L'exemple de la Vallée de la Bruche. *Fédération des sociétés d'histoire et d'archéologie d'Alsace*, 335-340.
- Litchle, F. (1989). Les metairies de la seigneurie de Rireaupierre dans la vallée de la Weiss. *Bulletin de la Société d'Histoire du Canton de Lapoutroie et Val d'Orbey*, 8, 34-39.
- Litchle, F. (1996). La population du haut de la vallée de la Weiss et ses réserves céréalières en 1693. *Bulletin de la Société d'Histoire du Canton de Lapoutroie et Val d'Orbey*, 15, 35-38.
- Ludemann, T. (2010). Past fuel wood exploitation and natural forest vegetation in the Black Forest, the Vosges and neighbouring regions in western Central Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1-2), 154-165. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.09.013>
- MacDonald, G. M., Velichko, A. A., Kremenetski, C. V., Borisova, O. K., Goleva, A. A., Andreev, A. A., Cwynar, L. C., Riding, R. T., Forman, S. L., Edwards, T. W. D., Aravena, R., Hammarlund, D., Szeicz, J. M., & Gattaulin, V. N. (2000). Holocene Treeline History and Climate Change Across Northern Eurasia. *Quaternary Research*, 53(3), 302-311. <https://doi.org/10.1006/qres.1999.2123>
- Mäckel, R., Friedmann, A., & Sudhaus, D. (2009). Environmental changes and human impact on landscape development in the Upper Rhine region. *ERDKUNDE*, 63(1), 35-49. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2009.01.03>
- Magar, F. (2021). Saâles – Le Sapin-Dessus. *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia*, 4.
- Manenti, R. (2014). Dry stone walls favour biodiversity : A case-study from the Appennines. *Biodiversity and Conservation*, 23(8), Article 8. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0691-9>
- Mariet, A.-L., Bégeot, C., Gimbert, F., Gauthier, J., Fluck, P., & Walter-Simonnet, A.-V. (2016). Past mining activities in the Vosges Mountains (eastern France) : Impact on vegetation and metal contamination over the past millennium. *The Holocene*, 26(8), 1225-1236. <https://doi.org/10.1177/0959683616638419>
- Mariet, A.-L., Walter-Simonnet, A.-V., Gimbert, F., Cloquet, C., & Bégeot, C. (2018). High-temporal resolution landscape changes related to anthropogenic activities over the past millennium in the Vosges Mountains (France). *Ambio*, 47(8), 893-907. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1044-9>
- Marty, P., & Lepar, J. (2001). Forêts et milieux ouverts : Anciennes et nouvelles légitimités (Forests and open landscapes : old and new legitimacies). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 78(2), 177-189. <https://doi.org/10.3406/bagf.2001.2216>
- Marty, P., Lepar, J., & Caplat, P. (2006). Géographie et écologie des paysages : Quelles relations ? (Geography and landscape ecology : which relationships ?). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 83(3), 355-367. <https://doi.org/10.3406/bagf.2006.2521>
- Mather, A. S., Fairbairn, J., & Needle, C. L. (1999). The course and drivers of the forest transition : The case of France. *Journal of Rural Studies*, 15(1), 65-90. [https://doi.org/10.1016/S0743-0167\(98\)00023-0](https://doi.org/10.1016/S0743-0167(98)00023-0)
- Mercier, J.-L. (2014). Glacial Imprint on the Main Ridge of the Vosges Mountains. In M. Fort & M.-F. André (Éds.), *Landscapes and Landforms of France* (p. 161-169). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7022-5\\_16](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7022-5_16)

- Mercier, N. (2008). Datation des sédiments quaternaires par luminescence stimulée optiquement : Un état de la question. *Quaternaire*, vol. 19/3, Article 19/3. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.3932>
- Meyfroidt, P., Roy Chowdhury, R., de Bremond, A., Ellis, E. C., Erb, K.-H., Filatova, T., Garrett, R. D., Grove, J. M., Heinimann, A., Kuemmerle, T., Kull, C. A., Lambin, E. F., Landon, Y., le Polain de Waroux, Y., Messerli, P., Müller, D., Nielsen, J. Ø., Peterson, G. D., Rodriguez García, V., ... Verburg, P. H. (2018). Middle-range theories of land system change. *Global Environmental Change*, 53, 52-67. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.006>
- Moffat, A. J., & Roberts, C. J. (1989). The Use of Large Scale Ridge and Furrow Landforms in Forestry Reclamation of Mineral Workings. *Forestry*, 62(3), 233-248. <https://doi.org/10.1093/forestry/62.3.233>
- Munyikwa, K., Kinnaird, T. C., & Sanderson, D. C. W. (2021). The potential of portable luminescence readers in geomorphological investigations : A review. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(1), 131-150. <https://doi.org/10.1002/esp.4975>
- Nelle, O. (2003). Woodland history of the last 500 years revealed by anthracological studies of charcoal kiln sites in the Bavarian Forest, Germany. *Phytocoenologia*, 33(4), 667-682. <https://doi.org/10.1127/0340-269X/2003/0033-0667>
- Nelle, O., Robin, V., & Talon, B. (2013). Pedaanthracology : Analysing soil charcoal to study Holocene palaeoenvironments. *Quaternary International*, 289, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.024>
- Nielsen, N. H., & Dalsgaard, K. (2017). Dynamics of Celtic fields-A geoarchaeological investigation of Øster Lem Hede, Western Jutland, Denmark. *Geoarchaeology*, 32(3), 414-434. <https://doi.org/10.1002/gea.21615>
- Nielsen, V. (1984). Prehistoric Field Boundaries in Eastern Denmark. *Journal of Danish Archaeology*, 3(1), 135-163. <https://doi.org/10.1080/0108464X.1984.10589919>
- Nuninger, L., Fruchart, C., & Opitz, R. (2010). LiDAR : Quel apport pour l'analyse des paysages ? *Bulletin AGER*, 20, Article 20.
- Nyssen, J., Debever, M., Poesen, J., & Deckers, J. (2014). Lynchets in eastern Belgium—A geomorphic feature resulting from non-mechanised crop farming. *Catena*, 121, 164-175.
- Nyssen, J., Haile, M., Moeyersons, J., Poesen, J., & Deckers, J. (2000). Soil and water conservation in Tigray (Northern Ethiopia) : The traditional dagat technique and its integration with introduced techniques. *Land Degradation & Development*, 11(3), 199-208. [https://doi.org/10.1002/1099-145X\(200005/06\)11:3<199::AID-LDR376>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1099-145X(200005/06)11:3<199::AID-LDR376>3.0.CO;2-Y)
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Deckers, J., & Haile, M. (2010). Genèse de rideaux suite à la culture attelée : Observations en Ethiopie pour mieux comprendre les paysages ruraux européens. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 54, 117-122.
- Olofsson, J., & Hickler, T. (2008). Effects of human land-use on the global carbon cycle during the last 6,000 years. *Vegetation History and Archaeobotany*, 17(5), 605-615. <https://doi.org/10.1007/s00334-007-0126-6>
- Orwin, C. S. (1938). Observations on the Open Fields. *The Economic History Review*, 8(2), 125-135. <https://doi.org/10.2307/2590820>
- Overland, A., & Hjelle, K. L. (2013). Pollen analysis in the context of clearance cairns from boreal forests – a reflection of past cultivation and pastoral farming. *Journal of Archaeological Science*, 40(2), 1029-1041. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.031>
- Palmborg, C., & Nordgren, A. (1996). Partitioning the variation of microbial measurements in forest soils into heavy metal and substrate quality dependent parts by use of near infrared spectroscopy and multivariate statistics. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(6), 711-720. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00173-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00173-5)
- Paquot, T. (2016). *Le paysage*. La Découverte; Cairn.info. <https://www.cairn.info/Le-paysage--9782707166982.htm>
- Parmentier, D. (2012). *Abbayes des Vosges : Quinze siècles d'histoire*. la Nuée bleue Éd. Serpenoise.
- Patro, M., Węgorok, T., & Zubala, T. (2008). Ploughed-on terraces in loess landscape of strongly developed high plains. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation*, 39(1), 95-101. <https://doi.org/10.2478/v10060-008-0009-2>

- Peterken, G. F. (1977). Habitat conservation priorities in British and European woodlands. *Biological Conservation*, 11(3), 223-236. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(77\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0006-3207(77)90006-4)
- Petit, J.-P., & Santoro, S. (2016). Le centre public d'une agglomération secondaire de la cité des Médiomatriques : Bliesbruck (Moselle). *Gallia*, 73(2), Article 2. <https://doi.org/10.4000/gallia.2734>
- Peyraud, J.-L., Peeters, A., & De Vlieghe, A. (2012). Place et atouts des prairies permanentes en France et en Europe. *Fourrages*, 211, 195-204.
- pgAdmin—PostgreSQL Tools. (2023). Consulté 10 juin 2023, à l'adresse <https://www.pgadmin.org/>
- Piccitto, A. (2018). *Inventaire, analyse spatiale, et évolution temporelle des champs bombés dans le Haut-Rhin* [Mémoire de Master 1]. Université de Strasbourg.
- Poirier, N., & Nuninger, L. (2012). Techniques d'amendement agraire et témoins matériels : Pour une approche archéologique des espaces agraires anciens. *Histoire & Sociétés Rurales*, 2, 11-50.
- Porat, N., López, G. I., Lensky, N., Elinson, R., Avni, Y., Elgart-Sharon, Y., Faershtein, G., & Gadot, Y. (2019). Using portable OSL reader to obtain a time scale for soil accumulation and erosion in archaeological terraces, the Judean Highlands, Israel. *Quaternary Geochronology*, 49, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2018.04.001>
- PostGIS. (s. d.). PostGIS. Consulté 10 juin 2023, à l'adresse <https://postgis.net/>
- Racine, E. B., Coops, N. C., St-Onge, B., & Bégin, J. (2014). Estimating Forest Stand Age from LiDAR-Derived Predictors and Nearest Neighbor Imputation. *Forest Science*, 60(1), 128-136. <https://doi.org/10.5849/forsci.12-088>
- Raistrick, A., & Chapman, S. E. (1929). The lynchet groups of upper Wharfedale, Yorkshire. *Antiquity*, 3(10), 165-181.
- Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., Manning, S. W., Muscheler, R., ... Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725-757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Renaud, J.-P., Picard, J.-F., Dupouey, J.-L., & Nys, C. (2009). Influence de l'amendement sur la composition et la dynamique du cortège floristique pour des peuplements situés sur sols acides. *Revue Forestière Française*, 3. <https://doi.org/10.4267/2042/30101>
- Rius, D., Vannière, B., & Galop, D. (2009). Fire frequency and landscape management in the northwestern Pyrenean piedmont, France, since the early Neolithic (8000 cal. BP). *The Holocene*, 19(6), 847-859. <https://doi.org/10.1177/0959683609105299>
- Rixhon, G. (2018). Cosmogenic Dating. In *The Encyclopedia of Archaeological Sciences* (1<sup>re</sup> éd.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119188230>
- Robin, V., Bork, H.-R., Nadeau, M.-J., & Nelle, O. (2014). Fire and forest history of central European low mountain forest sites based on soil charcoal analysis : The case of the eastern Harz. *The Holocene*, 24, 35-47.
- Robin, V., & Nelle, O. (2014). Contribution to the reconstruction of central European fire history, based on the soil charcoal analysis of study sites in northern and central Germany. *Vegetation History and Archaeobotany*, 23(S1), Article S1. <https://doi.org/10.1007/s00334-014-0438-2>
- Robin, V., Nelle, O., Talon, B., Poschlod, P., Schwartz, D., Bal, M.-C., Allée, P., Vernet, J.-L., & Dutoit, T. (2018). A comparative review of soil charcoal data : Spatiotemporal patterns of origin and long-term dynamics of Western European nutrient-poor grasslands. *The Holocene*, 28(8), 1313-1324. <https://doi.org/10.1177/0959683618771496>
- Robin, V., Rickert, B.-H., Nadeau, M.-J., & Nelle, O. (2012). Assessing Holocene vegetation and fire history by a multiproxy approach : The case of Stodthagen Forest (northern Germany). *The Holocene*, 22(3), 337-346. <https://doi.org/10.1177/0959683611423687>
- Rochel, X. (2004). *Gestion forestière et paysages dans les Vosges d'après les registres de martelages du XVIII<sup>e</sup> siècle : Essai de biogéographie historique* [These de doctorat, Nancy 2]. <https://www.theses.fr/2004NAN21030>

- Rochel, X. (2016). *Paysages naturels, paysages construits : Géographie historique et usage des archives dans l'étude de paysages dits naturels (forêts, saltus)* [HDR]. Université de Lorraine.
- Rochel, X. (2017). Une biogéographie historique. *Histoire & mesure*, XXXII(2), Article 2. <https://doi.org/10.4000/histoiremesure.6076>
- Rösch, M. (1992). Human impact as registered in the pollen record : Some results from the western Lake Constance region, Southern Germany. *Vegetation History and Archaeobotany*, 1(2), 101-109. <https://doi.org/10.1007/BF00206090>
- Rösch, M. (1998). The history of crops and crop weeds in south-western Germany from the Neolithic period to modern times, as shown by archaeobotanical evidence. *Vegetation History and Archaeobotany*, 7(2), 109-125. <https://doi.org/10.1007/BF01373928>
- Rösch, M., Ehrmann, O., Herrmann, L., Schulz, E., Bogenrieder, A., Goldammer, J. P., Hall, M., Page, H., & Schier, W. (2002). An experimental approach to Neolithic shifting cultivation. *Vegetation History and Archaeobotany*, 11(1-2), Article 1-2. <https://doi.org/10.1007/s003340200016>
- Ruddiman, W. F., & Ellis, E. C. (2009). Effect of per-capita land use changes on Holocene forest clearance and CO<sub>2</sub> emissions. *Quaternary Science Reviews*, 28(27-28), 3011-3015. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.05.022>
- Ruffaldi, P., Etienne, D., Laplaige, C., Bégeot, C., Dambrine, E., & Walter-Simonnet, A.-V. (2016, janvier 15). *Dynamique holocène de la végétation et impact anthropique dans les zones de basses altitudes de Lorraine (France)*. XXIVe colloque APLF (Unpublished). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4301.4168>
- Ruffaldi, P., Ritz, F., Richard, H., Dambrine, E., & Dupouey, J. L. (2007). Analyse pollinique de la mardelle d'Assenoncourt (Moselle, France) : Impact des pratiques agricoles sur la biodiversité végétale en milieu forestier. *Forêt, archéologie et environnement*, 48-56.
- Sanderson, D. C. W., & Murphy, S. (2010). Using simple portable OSL measurements and laboratory characterisation to help understand complex and heterogeneous sediment sequences for luminescence dating. *Quaternary Geochronology*, 5(2-3), Article 2-3. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2009.02.001>
- Schils, R. L. M., Bufe, C., Rhymer, C. M., Francksen, R. M., Klaus, V. H., Abdalla, M., Milazzo, F., Lellei-Kovács, E., Berge, H. ten, Bertora, C., Chodkiewicz, A., Dămățircă, C., Feigenwinter, I., Fernández-Rebollo, P., Ghiasi, S., Hejduk, S., Hiron, M., Janicka, M., Pellaton, R., ... Price, J. P. N. (2022). Permanent grasslands in Europe : Land use change and intensification decrease their multifunctionality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 330, 107891. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107891>
- Schmit, S., Schnitzler, A., & Chalté, D. (2017). De la Préhistoire aux Mérovingiens : Inventaire des sites archéologiques du Pays de Bitche. *La Revue du Pays de Bitche*, 16, 2-36.
- Schnitzler, A. (1997). Prise en compte des cycles sylvigénétiques naturels pour une saine définition de la gestion conservatoire : L'exemple des Basses Vosges gréseuses. In *Forêts* (p. 58-86). Editions Quae.
- Schumacher, J., Hauglin, M., Astrup, R., & Breidenbach, J. (2020). Mapping forest age using National Forest Inventory, airborne laser scanning, and Sentinel-2 data. *Forest Ecosystems*, 7(60), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00274-9>
- Schwartz, D. (2018). L'occupation des sols aux époques médiévales dans les vallées alsaciennes. Nouvelles hypothèses ouvertes par l'étude des rideaux de culture. *Actes du 19e colloque réunissant des universitaires de Strasbourg et de Poznań en 2016*, 35-49.
- Schwartz, D., Bernardy, L., Jouve-Litaudon, C., & Vonna, A. (2003). Le Bickenberg à Osenbach (Haut-Rhin). Etude d'un paysage d'enclos médiéval sur les collines calcaires sèches sous-vosgiennes. *Revue Géographique de l'Est*, 43, 81-94.
- Schwartz, D., Ertlen, D., Battmann, J., Caspard, M., Gebhart, A., Goepf, S., Basoge, F., Koupaliantz, L., & Metz, B. (2012). Études actuelles sur un type de paysage encore très peu connu en Alsace : Les paysages d'enclos médiévaux. Extension, typologie, éléments de datation. *Des hommes aux champs. Pour une archéologie des espaces ruraux du Néolithique au Moyen Âge*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 305-326.
- Schwartz, D., Froehlicher, L., & Vorburger, F. (2019). *Rideaux de culture et paysages de haies dans les vallées alsaciennes à la fin des époques médiévales : De la reconstitution des espaces au questionnement chronologique par l'iconographie*. 57-73.

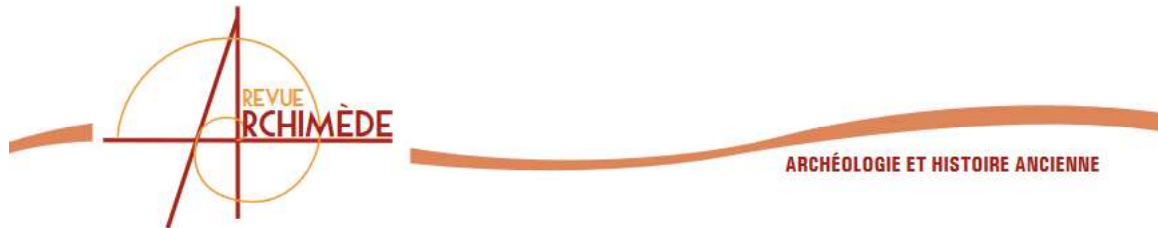
- Schwartz, D., Robin, V., Adam, P., Schaeffer, P., Gebhardt, A., Herrault, P.-A., Keller, B., Dapiaggi, D., Stevenel, C., Thiss, M., Trautmann, M., & Ertlen, D. (2020). Les géosciences au service de l'archéologie agraire. Une étude de cas sur les rideaux de culture de Goldbach (68). *Archimède. Archéologie et histoire ancienne*, 7, 205-216. <https://doi.org/10.47245/archimede.0007.act.08>
- Schwartz, D., Thinon, M., Goepp, S., Schmitt, C., Casner, J., Rosique, T., Wuscher, P., Alexandre, A., Dambrine, É., Martin, C., & Guillet, B. (2005). Premières datations directes de défrichements protohistoriques sur les chaumes secondaires des Vosges (Rossberg, Haut-Rhin). Approche pédoanthracologique. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(14), Article 14. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.06.004>
- Schweingruber, F. H. (2016). *Mikroskopische Holzanatomie : Formenspektren mitteleuropäischer Stamm- und Zweighölzer zur Bestimmung von rezentem und subfossilem Material = Anatomie microscopique du bois: Identification de matériel récent et subfossile d'essences de l'Europe centrale en tenant compte de la variabilité de structure du bois de tronc et de branche* (3. Auflage 1990). Verlag Kessel.
- Sciama, D., Augusto, L., Dupouey, J.-L., Gonzalez, M., & Moares Domínguez, C. (2009). Floristic and ecological differences between recent and ancient forests growing on non-acidic soils. *Forest Ecology and Management*, 258(5), 600-608. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.04.027>
- Sell, Y. (Éd.). (1998). *L'Alsace : Géologie, milieux naturels, flore et faune*. Delachaux et Niestlé.
- Sillar, B., Sommer, U., & Davis, R. (2008). West Dean 2008 : Excavation of Bronze Age lynchets on Little Combes Hill. *Archaeology International*, 11(1). <https://doi.org/10.5334/ai.1115>
- Sittler, B., & Hauger, K. (2007). Les apports du laser aéroporté à la documentation de parcelles anciens fossilisés par la forêt : L'exemple des champs bombés de Rastatt en Pays de Bade. *Forêt, archéologie et environnement*, 155-161.
- Sittler, B., Riedinger, R., & Spatz, P. (2015). *Agrarmorphologische Bodendenkmäler als Zeugen historischer und neuzeitlicher Landnutzung im Oberrheingraben*. 8, 177-207.
- Sittler, B., Weinacker, H., Gultlinger, M., & Koupaliantz, L. (2007). The potential of Lidar in assessing elements of cultural heritage hidden under forests. In Z. Bochenek (Éd.), *New developments and challenges in remote sensing : Proceedings of the 26th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, Warsaw, Poland, 29 May—2 June 2006* (p. 539-548). Millpress.
- Skrzypek, E. (2011). *Contribution structurale, pétrologique et géochronologique à la tectonique intracontinentale de la chaîne hercynienne d'Europe (Sudètes, Vosges)* [PhD thesis, University of Strasbourg]. <https://www.theses.fr/2011STRA6151>
- Smalley, I., Marković, S. B., & Svirčev, Z. (2011). Loess is [almost totally formed by] the accumulation of dust. *Quaternary International*, 240(1-2), 4-11. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.07.011>
- Sobala, M. (2021). Do historical maps show the maximal anthropopressure in the Carpathians? *Journal of Mountain Science*, 18(8), 2184-2200. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6680-z>
- Sørensen, P. H. (1982). The Use of Air Photographs in Celtic Field Studies. *Journal of Danish Archaeology*, 1(1), 77-86. <https://doi.org/10.1080/0108464X.1982.10589877>
- Spek, T., Waateringe, W. G., Kooistra, M., & Bakker, L. (2003). Formation and Land-Use History of Celtic Fields in North-West Europe – an Interdisciplinary Case Study at Zeijen, the Netherlands. *European Journal of Archaeology*, 6(2), 141-173. <https://doi.org/10.1179/eja.2003.6.2.141>
- Spencer, J. E., & Hale, G. A. (1961). The Origin, nature, and Distribution of Agricultural terracing. *Pacific Viewpoint*, 2(1), 1-40. <https://doi.org/10.1111/apv.21001>
- Stolz, C., Böhnke, S., & Grunert, J. (2012). Reconstructing 2500 years of land use history on the Kemel Heath (Kemeler Heide), southern Rhenish Massif, Germany. *E&G Quaternary Science Journal*, 61(2), 169-184. <https://doi.org/10.3285/eq.61.2.05>
- Strouhalová, B., Ertlen, D., Šefrna, L., Novák, T. J., Virágh, K., & Schwartz, D. (2019). Assessing the vegetation history of european chernozems through qualitative near infrared spectroscopy. *Quaternaire. Revue de l'Association Française Pour l'étude Du Quaternaire*, vol. 30/3, Article 30/3. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.12101>
- Stuiver, M., Reimer, P. J., & Reimer, R. W. (2022). *Calib 8.2*. <http://calib.org>

- Sudhaus, D., & Friedmann, A. (2015). Holocene Vegetation and Land Use History in the Northern Vosges (France). *E&G Quaternary Science Journal*, 64(2), 55-66. <https://doi.org/10.3285/eg.64.2.01>
- Talon, B. (2010). Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: Evidence from soil charcoal. *The Holocene*, 20(1), Article 1. <https://doi.org/10.1177/0959683609348842>
- Talon, B., Carcaillet, C., & Thion, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'holocène dans les Alpes françaises. *Géographie physique et Quaternaire*, 52(2), Article 2.
- Talon, B., Payette, S., Filion, L., & Delwaide, A. (2005). Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in Southern Québec, Canada, from charred wood in mineral soils. *Quaternary Research*, 64(1), 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.03.003>
- Thaër, A. D. (1814). *Principes raisonnés d'agriculture*. J. J. Paschoud.
- Thion, M. (1978). La pédoanthracologie: Une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le Néolithique. *C.R. Acad. Sc. Paris D*, 287, 1203-1206.
- Thorson, R. (2004). *Stone by Stone: The Magnificent History in New England's Stone Walls*. Bloomsbury USA.
- Thorson, R. (2005). *Exploring Stone Walls: A Field Guide to New England's Stone Walls*. Bloomsbury Publishing.
- Touflan, P., & Talon, B. (2008). Étude pédoanthracologique à haute résolution spatiale de l'histoire holocène d'une forêt subalpine (Alpes du Sud, France). Données préliminaires. *Ecologia mediterranea*, 34(1), 13-23. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2008.1395>
- Touflan, P., Talon, B., & Walsh, K. (2010). Soil charcoal analysis: A reliable tool for spatially precise studies of past forest dynamics: a case study in the French southern Alps. *The Holocene*, 20(1), 45-52. <https://doi.org/10.1177/0959683609348900>
- Trier, Ø. D., Zorzea, M., & Tønning, C. (2015). Automatic detection of mound structures in airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.01.005>
- Tschaen, L. (2011). Un cadastre de province méconnu: Le cadastre d'Alsace (1760-1764). *Revue XYZ*, 126, 43-56.
- Turner, S., Kinnaird, T., Varinlioglu, G., Şerifoğlu, T. E., Koparal, E., Demirciler, V., Athanasoulis, D., Ødegård, K., Crow, J., Jackson, M., Bolòs, J., Sánchez-Pardo, J. C., Carrer, F., Sanderson, D., & Turner, A. (2021). Agricultural terraces in the Mediterranean: Medieval intensification revealed by OSL profiling and dating. *Antiquity*, 95(381), 773-790. <https://doi.org/10.15184/aqy.2020.187>
- Upex, S. (2004). A classification of ridge and furrow by an analysis of cross-profiles. *Landscape History*, 26(1), 59-75. <https://doi.org/10.1080/01433768.2004.10594562>
- Vallauri, D., Grel, A., Granier, E., & Dupouey, J.-L. (2012). *The forests of Cassini. A quantitative analysis and comparison to current forests* (p. 64). Report WWF/INRA. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=The+forests+of+Cassini.+A+quantitative+analysis+and+comparison+to+current+forests&author=Vallauri+%2C+Daniel%0A++++++%28WWF%2C+Marseille%28France%29.%29&publication\\_year=2012](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The+forests+of+Cassini.+A+quantitative+analysis+and+comparison+to+current+forests&author=Vallauri+%2C+Daniel%0A++++++%28WWF%2C+Marseille%28France%29.%29&publication_year=2012)
- Vancouver, C. (1810). *General view of the agriculture of Hampshire: Including the Isle of Wight: drawn up for the Board of agriculture and internal improvement*. R. Phillips.
- Verheyen, K., Bossuyt, B., Hermy, M., & Tack, G. (1999). The land use history (1278-1990) of a mixed hardwood forest in western Belgium and its relationship with chemical soil characteristics. *Journal of Biogeography*, 26(5), 1115-1128. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1999.00340.x>
- Verschoof-van der Vaart, W. B., & Lambers, K. (2019). Learning to Look at LiDAR: The Use of R-CNN in the Automated Detection of Archaeological Objects in LiDAR Data from the Netherlands. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.5334/jcaa.32>
- Vervust, S., Kinnaird, T., Herring, P., & Turner, S. (2020). Optically stimulated luminescence profiling and dating of earthworks: The creation and development of prehistoric field boundaries at Bosigran, Cornwall. *Antiquity*, 94(374), 420-436. <https://doi.org/10.15184/aqy.2019.138>



- Viscarra Rossel, R. A., & Webster, R. (2011). Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible–near infrared spectra. *European Journal of Soil Science*, 62(4), 637-647. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01356.x>
- Vogler, B. (1998). *L'Alsace, une histoire* (7. éd). Éd. Oberlin.
- von Braunmühl, A. (1842). *Über die sogenannten Bisange oder Hochäcker* (Aus dem IV. Bande Heft 3 des Oberbayerischen Archivs (München).).
- Vrydaghs, L., Devos, Y., & Pető, Á. (2017). Opal Phytoliths. In *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology* (p. 155-163). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118941065.ch18>
- Wahl, L. (2007). *Introduction au cadre naturel de la Lorraine et de la Région Lorraine, Luxembourg, Rhénanie-Palatinat, Sarre*. 8.
- Walter, C., Merot, P., Layer, B., & Dutin, G. (2003). The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. *Soil Use and Management*, 19(3), 201-207. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00305.x>
- Wein, R. W., Burzynski, M. P., Sreenivasa, B. A., & Tolonen, K. (1987). Bog profile evidence of fire and vegetation dynamics since 3000 years BP in the Acadian Forest. *Canadian Journal of Botany*, 65(6), 1180-1186. <https://doi.org/10.1139/b87-164>
- Whitefield, A. (2017). Neolithic 'Celtic' Fields? A Reinterpretation of the Chronological Evidence from Céide Fields in North-western Ireland. *European Journal of Archaeology*, 20(2), 257-279. <https://doi.org/10.1017/ear.2016.5>
- Wieckowska, M., Dörfler, W., & Kirleis, W. (2012). Vegetation and settlement history of the past 9000years as recorded by lake deposits from Großer Eutiner See (Northern Germany). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 174, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.01.003>
- Williams, M. (2000). Dark ages and dark areas : Global deforestation in the deep past. *Journal of Historical Geography*, 26(1), 28-46. <https://doi.org/10.1006/jhge.1999.0189>
- Wood, P. D. (1961). Strip Lynchets Reconsidered. *The Geographical Journal*, 127(4), 449. <https://doi.org/10.2307/1792798>
- Wuscher, P. (2021). *Loess, alluvions et dépôts de pente du Fossé rhénan en Alsace de l'Eemien à l'Anthropocène : Approche pédosédimentaire, géomorphologie et chronostratigraphie* [These de doctorat, Strasbourg]. <https://www.theses.fr/2021STRAH009>
- Zádorová, T., Penížek, V., Žížala, D., Matějovský, J., & Vaněk, A. (2018). Influence of former lynchets on soil cover structure and soil organic carbon storage in agricultural land, Central Czechia. *Soil Use and Management*, 34(1), 60-71. <https://doi.org/10.1111/sum.12406>

## Annexe 1 : Schwartz et al., 2020. Article publié dans la revue *Archimède*.



### LES GÉOSCIENCES AU SERVICE DE L'ARCHÉOLOGIE AGRAIRE. UNE ÉTUDE DE CAS SUR LES RIDEAUX DE CULTURE DE GOLDBACH (68)

Dominique SCHWARTZ <sup>1,\*</sup>, Vincent ROBIN <sup>2</sup>, Pierre ADAM <sup>3</sup>, Philippe SCHAEFFER <sup>3</sup>,  
Anne GEBHARDT <sup>1,4</sup>, Pierre-Alexis HERRAULT <sup>1</sup>, Benjamin KELLER <sup>1</sup>, Daniele DAPIAGGI <sup>1,5</sup>,  
Claire STEVENEL <sup>1,5</sup>, Maxime THISS <sup>1,5</sup>, Martine TRAUTMANN <sup>6</sup>, Damien ERTLEN <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Image, Ville, Environnement ; UMR 7362 UNISTRA/CNRS

<sup>2</sup> Laboratoire interdisciplinaire des environnements continentaux (LIEC), Université de Lorraine

<sup>3</sup> Laboratoire de Biogéochimie Moléculaire, UMR 7177 UNISTRA/CNRS

<sup>4</sup> INRAP Grand Est

<sup>5</sup> Étudiants du master Géographie Environnementale, UNISTRA

<sup>6</sup> UMS 830, EOST, CNRS

\*dominique.schwartz@live-cnrs.unistra.fr

#### RÉSUMÉ

Les rideaux de culture sont des talus qui se forment involontairement à l'amont d'une haie, par accumulation de colluvions érodées dans les champs. Ils peuvent constituer des parcellaires de très grande extension spatiale, caractérisés par des parcelles étroites, allongées perpendiculairement à la pente. L'histoire de ces parcellaires et leur datation sont encore très mal connues. Les résultats présentés ici concernent un parcellaire de plusieurs centaines d'hectares localisé à Goldbach-Altenbach, dans les Vosges haut-rhinoises. Les résultats obtenus sur deux coupes transversales à des rideaux de culture montrent que le parcellaire

a été mis en place vers 900 AD, puis que la zone a été brièvement abandonnée pendant la Guerre de Trente Ans. La datation vers 900 AD suggère que ce parcellaire a été mis en place sous l'autorité de l'abbaye de Murbach. L'ensemble de la zone a en effet été donné à cette abbaye vers 800 AD.

Lynchets correspond to talus slopes that are formed unintentionally at the top of hedgerows by the accumulation of colluvial deposits originating from eroded fields. They may represent highly extended parcellar surfaces, characterized by narrow plots, extending perpendicularly to the slope. The history of these plots and their dating are still largely unknown. Our results deal with a land patch of several hundreds of hectares located at Goldbach-Altenbach, in the Vosges (Haut-Rhin). It could be determined on two cross-sections cutting the lynchets transversally that the parcellar plot was formed ca. 900 AD, after which the place was briefly abandoned during the Thirty Years War. The dating at ca. 900 AD suggests that this parcellar area was installed under the authority of the Murbach Abbey. The whole sector was indeed donated to the Abbey ca. 800 AD.

#### MOTS-CLÉS

Archéologie agraire,  
pédoarchéologie,  
rideau de culture,  
massif Vosgien,  
pédoanthracologie,  
datation 14C.

#### KEYWORDS

Land archaeology,  
pedoarchaeology,  
lynchets,  
Vosges Massif,  
pedoanthrology,  
14C dating.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

## Annexe 2 : Salomon et al., 2020. Article publié dans la revue *Scientific Drilling*.

Sci. Dril., 27, 35–47, 2020  
https://doi.org/10.5194/sd-27-35-2020  
© Author(s) 2020. This work is distributed under  
the Creative Commons Attribution 4.0 License.



**Scientific Drilling**  
Open Access

Science Reports

### High-resolution late Holocene sedimentary cores record the long history of the city of Cádiz (south-western Spain)

Ferreól Salomon<sup>1</sup>, Dario Bernal-Casasola<sup>2</sup>, José J. Díaz<sup>2</sup>, Macarena Lara<sup>2</sup>, Salvador Domínguez-Bella<sup>3</sup>,  
Damien Ertlen<sup>1</sup>, Patrick Wassmer<sup>1,4</sup>, Pierre Adam<sup>5</sup>, Philippe Schaeffer<sup>5</sup>, Laurent Hardion<sup>1</sup>,  
Cécile Vittori<sup>1</sup>, Stoil Chapkanski<sup>4</sup>, Hugo Delille<sup>6</sup>, Laurent Schmitt<sup>1</sup>, Frank Preusser<sup>7</sup>,  
Martine Trautmann<sup>8</sup>, Alessia Masi<sup>9</sup>, Cristiano Vignola<sup>9</sup>, Laura Sadori<sup>9</sup>, Jacob Morales<sup>10</sup>,  
Paloma Vidal Matutano<sup>10,11</sup>, Vincent Robin<sup>12</sup>, Benjamin Keller<sup>1</sup>, Ángel Sanchez Bellón<sup>3</sup>,  
Javier Martínez López<sup>3</sup>, and Gilles Rixhon<sup>1,13</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Image Ville Environnement (UMR 7362), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)/Université de Strasbourg, 3 rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France

<sup>2</sup>Departamento de Historia, Geografía y Filosofía, Área de Arqueología, Universidad de Cádiz, Avenida Doctor Gómez Ulla 1, 11003 Cádiz, Spain

<sup>3</sup>Departamento de Ciencias de la Tierra, UGEA-PHAM, Universidad de Cádiz, Avda. República Saharhui s/n, Campus Río San Pedro, Puerto Real, 11510 Cádiz, Spain

<sup>4</sup>Laboratoire de Géographie Physique (UMR-8591), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)/Université Paris 1, Panthéon-Sorbonne, 1 Place Aristide Briand, 92195 Meudon, France

<sup>5</sup>Institut de Chimie de Strasbourg, Biogéochimie moléculaire (UMR-7177), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)/Université de Strasbourg, 4 rue Blaise Pascal, 67000 Strasbourg, France

<sup>6</sup>Laboratoire Archéorient (UMR-5133), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)/Université de Lyon, MOM, 7 rue Raulin, 69007 Lyon, France

<sup>7</sup>Institute of Earth and Environmental Sciences – Geology, University of Freiburg, Albertstr. 23b, 79104 Freiburg, Germany

<sup>8</sup>Laboratoire d'analyse des sols et des formations superficielles (EOST-UMS-830), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)/Université de Strasbourg, 3 rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France

<sup>9</sup>Dipartimento di Biologia Ambientale, Università degli Studi "La Sapienza" di Roma, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Rome, Italy

<sup>10</sup>Departamento de Ciencias Históricas, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Calle Pérez del Toro, 1, Las Palmas de Gran Canaria 35003, Las Palmas, Spain

<sup>11</sup>Université Côte-d'Azur, CEPAM, CNRS, 24 Avenue des Diabes Bleus, 06000 Nice, France

<sup>12</sup>Laboratoire Interdisciplinaire des environnements continentaux (UMR-7360), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)/Université de Lorraine, Campus Bridoux, Rue du Général Delestraint, 57070 Metz, France

<sup>13</sup>Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), 1 Quai Koch, 67000 Strasbourg, France

**Correspondence:** Ferréol Salomon (ferreol.salomon@live-cnrs.unistra.fr)

Received: 30 October 2019 – Revised: 30 December 2019 – Accepted: 6 January 2020 – Published: 27 May 2020

**Abstract.** Today, coastal cities worldwide are facing major changes resulting from climate change and anthropogenic forcing, which requires adaptation and mitigation strategies to be established. In this context, sedimentological archives in many Mediterranean cities record a multi-millennial history of environmental dynamics and human adaptation, revealing a long-lasting resilience. Founded by the Phoenicians around 3000 years ago, Cádiz (south-western Spain) is a key example of a coastal resilient city. This urban centre is considered to be one of the

# Annexe 3 : Herrault et al., 2021. Article publié dans la revue *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.

International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation 104 (2021) 102563



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Applied Earth  
Observations and Geoinformation

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jag](http://www.elsevier.com/locate/jag)



## Automated detection of former field systems from airborne laser scanning data: a new approach for Historical Ecology

P.-A. Herrault<sup>\*</sup>, Q. Poterek, B. Keller, D. Schwartz, D. Ertlen

UMR 7362 LIVE CNRS, University of Strasbourg, 5, rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France

### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Remote Sensing  
Former Field Systems  
Airborne Laser Scanning  
Deep Learning  
Local Binary Patterns  
Historical Ecology

### ABSTRACT

Former field systems (FFS) are the most widespread traces of ancient activities in present European landscapes and represent significant perturbations to ecosystems. Through its ability to penetrate forest canopies and detect microlandforms, Airborne Laser Scanning data reveal archaeological relics over large areas, from periods older than the first available Historical Topographic Maps. Mapping these traces from ALS-derived data (e.g. Digital Elevation Model (DEM)) thus allows for a determination of a new temporal baseline in order to evaluate the effects of a longer history on current patterns of biodiversity. Here, we evaluate the ability of traditional machine learning (Random Forest-RF) and deep learning (Fully Connected Networks-FCN) models to detect Medieval Terraced slopes and Ridges and Furrows (RaF) from an ALS-derived DEM in the southern Vosges (1462 km<sup>2</sup>). We used a combination of Local Binary Patterns and topographical metrics to measure properties of FFS and to train detection models. We then assessed the relative performance of each model semantically and spatially. Our results demonstrated the high suitability of our approach for reproducing major trends in the landscape with a high level of similarity between the predicted and reference spatial patterns (Structural Similarity Index - SSIM > 0.75). RF outperformed FCN for Terraced Slopes, whilst minimizing the false positive rate. FCN slightly outperformed RF for the RaF dataset but showed promising abilities to survey unseen data with a low sensitivity to annotation errors. We suggest that this approach has the potential to offer new spatio-temporal possibilities in Historical Ecology studies as a means of automatically detecting past archaeological ecosystems from a landscape to a regional scale.

### 1. Introduction

Landscape history provides a potential avenue for explaining some of the current patterns of biodiversity (Rhemtulla et al., 2009; Bürgi et al., 2015). Land cover and land use (LUCC) changes produce legacy effects on community structure, biomass, and regional C dynamics (Caspersen et al., 2000; Rhemtulla et al., 2009; Smithwick et al., 2007), which, in turn, alter processes such as soil nutrient dynamics and biodiversity over decades (Fraterrigo et al., 2005; Grossmann and Mladenoff, 2006), centuries (Compton and Boone, 2000), and even millennia (Dupouey et al., 2002). Former field systems (FFS) are the most widespread traces of ancient activities in current European landscapes, and they are the witnesses of deep mutations within ecosystems. Over the millennia, humans have modified the environment by digging, subdividing, and ploughing land for agricultural purposes (Kanianska, 2016). These persistent field systems can maintain themselves for many centuries as microlandforms. These features include ridges and furrows, terraced

slopes, clearing cairns, and Celtic fields (see (Hesse, 2020 and Georges-Leroy, 2020) to get an overview). In Europe, these agriculture-related landforms started to appear in the Bronze Age (Froehlicher et al., 2016) and then became widely established during the later Middle Ages (Schwartz et al., 2020). Extreme historical events (e.g. the Thirty Years' War in Europe) and the emergence of new agricultural techniques led to the abandonment of these fields between the 17th and 19th centuries. From a morphological standpoint, these topographical features exhibit both irregular and regular shapes, depending on local topographic conditions and the degree of preservation. In general, FFS presently covered by forest or grasslands tend to be well preserved, whereas features covered by crops tend to be less visible.

Historical topographic and cadastral maps have been used successfully to assess the effects of past landscapes and their trajectories on the current biodiversity of grasslands (Adriaens et al., 2006; Cousins and Eriksson, 2001; Cousins et al., 2007; Cousins, 2009) and forests (Vellend et al., 2006; Piessens and Hermy, 2006; Kolk et al., 2017). Old aerial and

<sup>\*</sup> Corresponding author.

E-mail address: [pierre-alexis.herrault@live-cnrs.unistra.fr](mailto:pierre-alexis.herrault@live-cnrs.unistra.fr) (P.-A. Herrault).

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102563>

Received 8 June 2021; Received in revised form 10 September 2021; Accepted 27 September 2021

Available online 12 October 2021

1569-8432/© 2021 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# Annexe 4 : Keller et al., 2023. Article publié dans la revue *Anthropocene*.

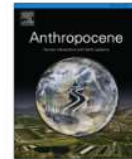
Anthropocene 42 (2023) 100374



Contents lists available at ScienceDirect

Anthropocene

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ancene](http://www.elsevier.com/locate/ancene)



## Spatio-temporal dynamics of forest ecosystems revealed by the LiDAR-based characterization of medieval field systems (Vosges Mountains, France)

Benjamin Keller<sup>a,\*</sup>, Pierre Alexis Herrault<sup>a</sup>, Dominique Schwartz<sup>a</sup>, Gilles Rixhon<sup>a,b</sup>, Damien Ertlen<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE) – UMR 7362, CNRS – University of Strasbourg, 3 rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France  
<sup>b</sup> Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), 1 quai Koch, 67000 Strasbourg, France

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Former field systems  
Ancient forest  
LiDAR  
Anthropogenic landscapes  
Hautes-Vosges  
Low mountain range

### ABSTRACT

Relics of past agricultural practices, former field systems have strongly imprinted many modern landscapes and have thus significantly disrupted forest ecosystems over the last centuries. Former field systems in the Hautes-Vosges mountain range (north-eastern France) date primarily to the medieval period (6–15th century C.E.) and consist of parcelled or linear structures on hillslopes and valley floors. These residual features fall into three categories: ridge and furrow, terraced slopes, and stone walls. LiDAR (light detection and ranging) can detect microrelief features, such as the topographical imprints of these field systems over extended areas, and thereby establish a new temporal baseline for reconstructing forest changes over relatively long timescales, i.e., before the first historical topographic maps. Here, we digitize former field systems in the south-eastern Vosges from a high-resolution LiDAR-derived DEM to assess their spatial distribution at the mountain-range scale (1185 km<sup>2</sup>) and in relation to topography. Former field systems cover approx. 6.6 % of the study area (78.5 km<sup>2</sup>), with terraced slopes (55.5 km<sup>2</sup>) and stone walls (20.6 km<sup>2</sup>) covering a greater extent than ridge and furrow (2.4 km<sup>2</sup>). Former field systems are preferentially located on south-facing slopes above an 800 m a.s.l. threshold; this pattern indicates systematic past agricultural practices across the entire region. We then compare the LiDAR-derived spatial features with a 19th-century map of France and a modern regional land-cover database to derive the spatio-temporal trajectories of landscapes. We observe that former field systems were progressively, but unevenly, abandoned and transformed into grasslands or forests. This mid-19th century abandonment of agricultural fields and their conversion to grassland and forest is highly dependent on slope and elevation (grassland and forest: 18–19° and 610–620 m). These values differ from those associated with agricultural sites that remain under cultivation today (approx. 16° and 550 m). Finally, we demonstrate the relevance of integrating former field systems for characterizing areas of ancient forest. Less than 2 % of the area mapped as forest in the 19th century was cultivated between the 6th and 15th century. Most importantly, our approach quantifies disturbed and undisturbed ancient forest areas at the mountain-range scale. While this study opens new perspectives for accurately assessing the age of forest ecosystems, it also reveals an evolutionary pattern of land-use change in the Hautes-Vosges that is similar to that observed in other European mountainous regions.

### 1. Introduction

The shaping of modern landscapes is the combined result of physical, chemical, and biological processes coupled with anthropic activities. Human pressure has progressively intensified and spread across the Earth's surface, the initial tipping point probably arising with the appearance of the first cultivators (Williams, 2000). Multiple studies

have identified the emergence of agriculture (and pastoralism) as the critical factor that accelerated human influence on ecosystems, including forest clearing (Williams, 2000; Olofsson and Hickler, 2008; Ruddiman and Ellis, 2009). Vast areas in Europe have been cultivated or grazed since ca. 4500 B.C.E., thereby altering forest coverage over time. Since the early- to mid-19th century C.E., forests have expanded in Europe; at least half of today's European forested areas cover former

\* Corresponding author.

E-mail address: [benjamin.keller@live-cnrs.unistra.fr](mailto:benjamin.keller@live-cnrs.unistra.fr) (B. Keller).

<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2023.100374>

Received 20 May 2022; Received in revised form 21 February 2023; Accepted 24 February 2023

Available online 3 March 2023

2213-3054/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

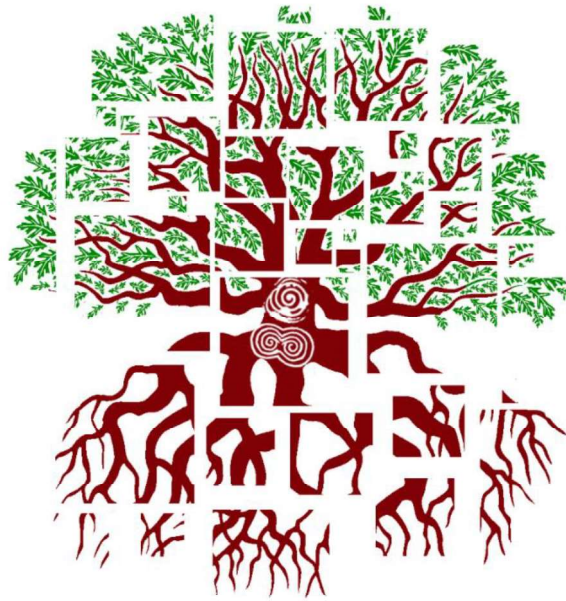
# Annexe 5 : Résumé pour le 7th International Anthracology Meeting Charcoal Science in Archaeology and Palaeoecology, septembre 2019.

anthraco2019 – 7<sup>th</sup> International Anthracology Meeting

Charcoal Science in Archaeology and Palaeoecology

University of Liverpool – Central Teaching Hub, 2-6 September 2019

Hosted by the Department of Archaeology, Classics and Egyptology



## A charcoal study to better understand lynchet construction and lynchet landscape history

Keller, Benjamin<sup>1\*</sup>; Robin, Vincent<sup>2</sup>; Herrault, Pierre-Alexis<sup>1</sup>; Ertlen, Damien<sup>1</sup>; Schwartz, Dominique<sup>1</sup>

\* Corresponding author – Email: [benjamin.keller@live-cnrs.unistra.fr](mailto:benjamin.keller@live-cnrs.unistra.fr)

<sup>1</sup> LIVE - CNRS / University of Strasbourg (France).

<sup>2</sup> LIEC – CNRS / University of Lorraine, Metz (France).

Our study focuses on the Region Grand Est (France), on a specific type of agrarian microtopography. A lynchet is a kind of bank that appears on slopes, that results in most cases from plot soil erosion caused by colluviation or by tillage erosion and sediments accumulation behind a hedge. Most constructions are parallel to the slope, can be numerous, and are sometimes spaced from <10 meters between each lynchet (we talk about hedge system or lynchet system). Contrary to terraces, lynchets are an involuntary structure and not a construction. Indeed, each lynchet corresponds to one plot whose bank represents boundaries that probably allow spontaneous installation of hedges. The lynchet forms in hedge landscapes since the ancient times. Indeed, in France some of these forms have been dated back to end of the Iron Age (2710±200 BP) for the oldest, in Haut-Rhin others have been dated from the High Middle Age (1370±100 BP) (Froehlicher 2016) and from the Central Middle Age (1120 AD) in Massif Central (Bernard-Allée and Valadas 1992) The study of agrarian forms associated with analyses of the pedological, anthracological, and chronological data determine the dynamics of these landscapes of the past. The study of charcoal can teach us a lot about the history of lynchet and hedge, but it also behaves as a palaeoecological reservoir to study the surrounding environment. For example, the charcoals stored in the bank allows us to define the woodlands composition before clearing of the forest or the composition of the hedge itself. It also allows us to date agrarian forms, thus helping us defining the cycles of cultivation, hedge and landscape history. On a broader perspective, our study should bring a better understanding of the human development dynamic and its consequences on landscapes trajectories.

### References

Bernard-Allée P., Valadas B. (1992) L'état des recherches sur l'archéologie agraire en Limousin. *Norois* 156:508–518.

Froehlicher L. (2016) *Les haies, une alternative à l'openfield dans les zones loessiques d'Alsace? Perspectives historiques, systèmes agraires du futur, érosion, effets sur le colluvionnement et le stockage du carbone*. Université de Strasbourg, Strasbourg.

**Annexe 6 : Résumé pour le Séminaire 2019 du Labex DRHIHM, octobre 2019, prix du comité scientifique**



## Histoire des paysages agraires dans le Pays de Bitche depuis l'Antiquité : approches géographiques et paléo-écologiques

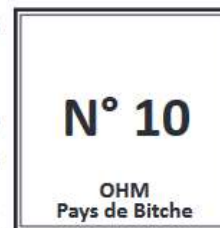
### History of agrarian landscapes in Pays de Bitche since antiquity: geographical and paleo-ecological approaches

Keller, Benjamin<sup>1\*</sup>; Robin, Vincent<sup>2</sup>; Herrault, Pierre-Alexis<sup>1</sup>; Ertlen, Damien<sup>1</sup> and Schwartz, Dominique<sup>1</sup>.

\*Corresponding author (email: benjamin.keller@live-cnrs.unistra.fr)

<sup>1</sup>LIVE - CNRS / University of Strasbourg, France

<sup>2</sup>LIEC - CNRS / University of Lorraine, Metz, France



#### Résumé

Le Pays de Bitche possède une histoire riche et complexe à des échelles pluriséculaires et millénaires. Le recul récent des activités industrielles et militaires associés à une déprise agraire transforment le territoire. Dans ce cadre, l'étude des paysages agraires permet de mieux comprendre les dynamiques humaines et ses conséquences sur les trajectoires temporelles du territoire Bitchois. En effet, les paysages agraires sont souvent résumés aux systèmes d'openfields et de bocages. Pourtant, de nombreuses formes agraires tel que des rideaux de culture, champs bombés, terrasses et murgers, attestent d'une complexité qui ne peut se satisfaire d'une lecture bidimensionnelle du paysage rural. Le Pays de Bitche témoigne de cette diversité paysagère. L'analyse de ces formes à l'échelle locale permet d'en estimer la dynamique. Cette étude s'appuie sur plusieurs disciplines (pédologie, anthracologie, géographie, histoire), afin d'acquérir le plus de données complémentaires sur les formes agraires. Sur le terrain, nous avons analysé deux rideaux de culture situés à Obergailbach et à Achen. Un rideau est un talus apparaissant sur une pente, qui résulte, dans la plupart des cas, de l'érosion du sol de la parcelle causée par colluviation ou par érosion aratoire et l'accumulation de sédiments derrière une haie, un tas de pierre, un muret... Contrairement aux terrasses, les rideaux sont des formes involontaires, c'est-à-dire non-construites. En effet, chaque rideau correspond à une parcelle dont le talus représente les limites qui ont permis l'installation d'une haie. Les identifications de charbons de bois et les datations réalisées à Obergailbach, ont permis de déterminer des premières phases de défrichement à la fin de la période Romaine (321 - 422 cal AD), représentant potentiellement la période de mise en culture de ces terres, et une seconde phase située au Moyen Âge central (1020 - 1155 cal AD), témoignant la complexité des dynamiques du territoire.

Mots-clés : Formes agraires, dynamique paysagère, rideaux de culture, charbons de bois, érosion, pédoanthracologie.

#### Abstract

Pays de Bitche has a rich and complex history on a plurisecular and millenary scale. The recent decline in industrial and military activities associated with land abandonment is transforming the territory. In this context, the study of agrarian landscapes makes it possible to better understand human dynamics and their consequences on the temporal trajectories of the Bitchois territory. Indeed, agrarian landscapes are often summarized as openfields and bocage systems. However, many agrarian forms such as lynchets, ridge and furrow, terraces and murgers, attest to a complexity that cannot be satisfied with a two-dimensional reading of the rural landscape. Pays de Bitche bears witness to this diversity of landscapes. The analysis of these forms at the local level makes it possible to estimate their dynamics. This study is based on several disciplines (pedology, anthracology, geography, history) in order to acquire as much complementary data as possible on agrarian forms. In the field, we analysed two lynchets located in Obergailbach and Achen. A lynchet is a kind of bank that appears on a slope, which results, in most cases, from the erosion of the soil of the plot caused by colluviation or by tillage erosion and sediments accumulation behind a hedge, a pile of stone, a wall... Unlike terraces, lynchets are involuntary forms and not a construction. Indeed, each lynchet corresponds to a plot whose bank represents the limits that allowed the installation of a hedge. The identifications of charcoal and the dates carried out in Obergailbach made it possible to determine the first phases of clearing at the end of the Roman period (321 - 422 cal AD), potentially representing the period of cultivation of these lands, and a second phase located in the Central Middle Ages (1020 - 1155 cal AD), reflecting the complexity of the dynamics of the territory.

Keywords : Agrarian forms, landscape dynamics, lynchets, charcoal, erosion, pedoanthracology.







Geohistory and geoarchaeology study to better understand lynchets construction  
and lynchets landscape history.

Keller B<sup>1\*</sup>, Ertlen D<sup>1</sup>, Robin V<sup>2</sup>, Herrault P A<sup>1</sup>, Schwartz D<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LIVE - CNRS / University of Strasbourg, Strasbourg, France

<sup>2</sup> LIEC – CNRS / University of Lorraine, Metz, France

\* benjamin.keller@live-cnrs.unistra.fr

In Europe, the vast majority of landscapes are the result of a co-construction between Nature and humans. Until the middle of the 20<sup>th</sup> century, men who carved the landscape were mainly farmers, organized collectively and under the aegis of seigniorial or ecclesiastical authorities. In this context, the study of agrarian landscapes makes it possible to better understand human dynamics and their consequences on the temporal trajectories of territories. Indeed, agrarian landscapes are often summarized as open fields and bocage systems. However, many farmer field systems such as lynchets, ridges and furrows, terraces and murgers, attest to a complexity that cannot be understood with a simplistic two-dimensional reading of the rural landscape. The analysis of these farmer field system at the local level makes it possible to estimate their dynamics. This study is based on several disciplines (pedology, anthracology, geography, history) in order to acquire as much complementary data as possible on farmer field system. In this study, we analysed two lynchets located in Moselle (57). A lynchet is a kind of bank that appears on a slope, which results, in most cases, from the erosion of the soil of the plot caused by colluviation or by tillage erosion and sediments accumulation behind a hedge, a pile of stone... Unlike terraces, lynchets are involuntary forms and not constructions. Indeed, each lynchet corresponds to a plot whose bank represents the limits that allowed the installation of a hedge. The identifications of charcoals and their associated time periods carried out in Obergailbach (57) made it possible to determine a first phase of clearing in the older Iron Age (Hallstatt and early La Tene period) (549 – 401 cal BC), potentially representing the period of cultivation of these lands. This first phase originated from the same time as the European Archaeology Park site at Bliesbruck-Reinheim (~4 km of Obergailbach). According to Petit and Santoro (2016), the site acquires its importance during the 5<sup>th</sup> century BC. Three phases have been recorded at the end of Roman period (2 charcoals: *Acer*) and during Merovingian period (4 charcoals: *Juglans*, *Clematis*, *Quercus* and *Carpinus*) and a last phase located in the Central Middle Ages (1020 - 1155 cal AD), reflecting the complexity of the dynamics of the territory.

**Keywords:** farmer field system, landscape dynamics, lynchets, erosion, pedoanthracology.

**Reference:** PETIT J.-P. et SANTORO S., 2016. Le centre public d'une agglomération secondaire de la cité des Médiomatriques : Bliesbruck (Moselle), *Gallia*, vol. 73, n° 2, pp. 213-283.



**Annexe 8 : Résumé pour le colloque : *L'archéopédologie : une approche interdisciplinaire des interactions sociétés/sols*, novembre 2021.**



**L'archéopédologie :**  
une approche interdisciplinaire des relations société-sol

Judi 25 et vendredi 26 Novembre 2021

Campus de l'université de Nanterre  
Bâtiment Max Weber, Salle des conférences

Judi 25 novembre  
CONCEPTS ET MÉTHODES  
APPROCHES PÉDOLOGIQUES DES PALEOENVIRONNEMENTS WEICHÉLIENS ET HOLOCÈNES

Vendredi 26 novembre  
PRATIQUES AGRAIRES  
PAYSAGES AGRAIRES EN FRANCE  
PAYSAGES AGRAIRES EN AMÉRIQUE ET EN AFRIQUE

Colloque (présentiel et distanciel) organisé  
par Christophe PETIT (Université de Paris I Panthéon Sorbonne, UMR 7041 ArScAn)  
et Dominique SCHWARTZ (Université de Strasbourg, UMR 7362 LIVE)

Logos of partner institutions: Université Paris Panthéon Sorbonne, Université de Strasbourg, ARSCAN, UMR 7041 ArScAn, UMR 7362 LIVE, ArChal, Uispp, and Université de Strasbourg.

## Aperçu de l'histoire des paysages agraires à travers les rideaux de culture

Keller, Benjamin<sup>1</sup>; Ertlen, Damien<sup>1</sup>; Robin, Vincent<sup>2</sup>; Herrault, Pierre-Alexis<sup>1</sup> and Schwartz, Dominique<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>LIVE - CNRS / University of Strasbourg, France

<sup>2</sup>LIEC – CNRS / University of Lorraine, Metz, France

Le paysage agricole actuel peut être considéré comme un « palimpseste » des pratiques culturelles passées. L'analyse d'un type spécifique de microtopographie agricole, tel que les rideaux de culture, permet d'en appréhender une partie. Le rideau de culture se matérialise par un talus qui apparaît sur des versants résultants, dans la plupart des cas, de l'érosion du sol de la parcelle cultivée causée par le ruissellement des eaux de surface ou par le labour, entraînant l'accumulation des sédiments derrière une haie. La plupart des rideaux sont parallèles à la pente, peuvent être nombreux, et sont parfois espacés de moins de 10 mètres entre chaque rideau (on parle de système de rideau). Contrairement aux terrasses, les rideaux sont des structures involontaires et non une construction. Chaque rideau correspond à une parcelle dont le talus représente les limites qui permettent probablement l'installation spontanée de haies. La plupart de ces rideaux sont à l'abandon et sont sous forêt ou prairie actuellement. Les formes les plus anciennes sont datées de la transition Bronze-Hallstatt (Froehlicher, 2016) et de l'Antiquité [Georges-Leroy *et al.*, 2009] tandis que la grande majorité des formes sont datées du Moyen Âge [Bernard-Allée et Valadas, 1992; Froehlicher, 2016; Schwartz *et al.* 2020].

L'accumulation sédimentaire et, par conséquent, l'exhaussement du profil de sol, pouvant atteindre un mètre d'épaisseur, est fonction du temps et peut-être considéré comme un enregistrement du passé. L'analyse des archives pédo-sédimentaires stockées dans le rideau et l'analyse des données géo-historiques du territoire permettent de déterminer la dynamique de ces paysages, entre mise en culture et abandon de la parcelle. Dans une perspective plus large, l'étude des formes agricoles devraient permettre de mieux comprendre les trajectoires temporelles des paysages anciens et actuels.

### Références :

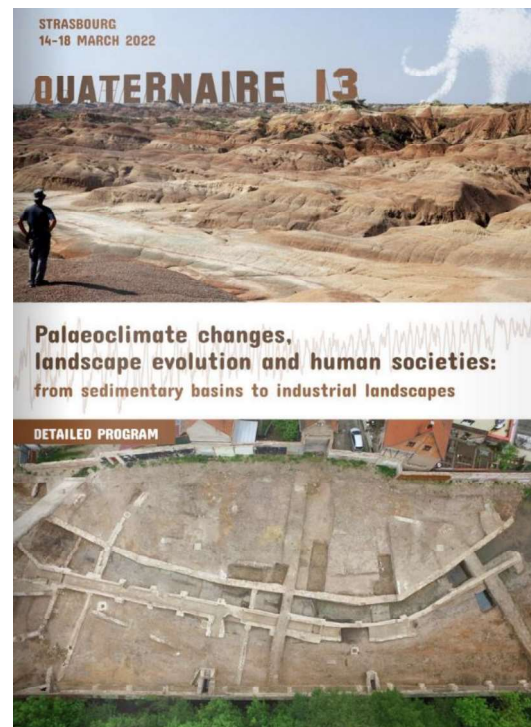
BERNARD-ALLEE P. et VALADAS B., 1992. L'état des recherches sur l'archéologie agricole en Limousin, *Norais*, n° 156, pp 508-518.

FROELICHER L, 2016. *Les haies, une alternative à l'openfield dans les zones loessiques d'Alsace ? Perspectives historiques, systèmes agricoles du futur, érosion, effets sur le colluvionnement et le stockage du carbone*, Université de Strasbourg, Strasbourg, 477 p.

GEORGES-LEROY M. *et al.*, 2009. Le massif forestier, objet pertinent pour la recherche archéologique. L'exemple du massif forestier de Haye (Meurthe-et-Moselle), *Revue Géographique de l'Est*, vol. 49/2-3, 20 p.

SCHWARTZ D. *et al.*, 2020. Les géosciences au service de l'archéologie agricole. Une étude de cas sur les rideaux de culture de Goldbach (68), *Archimède. Archéologie et histoire ancienne*, vol. 7, pp 205-216.

## Annexe 9 : Résumé pour la conférence internationale : *Quaternaire 13 (Q13) in Impacts of past agro-pastoral activities on the structure of landscapes*, mars 2022.



### Geohistory and geoarchaeology study to better understand lynchets construction and lynchets landscape history.

Keller B<sup>2\*</sup>, [Ertlen D<sup>1</sup>](#), [Robin V<sup>1</sup>](#), [Herrault P A<sup>1</sup>](#), [Schwartz D<sup>1</sup>](#)

<sup>1</sup> LIVE - CNRS / University of Strasbourg, Strasbourg, France

<sup>2</sup> LIEC – CNRS / University of Lorraine, Metz, France

\* [benjamin.keller@live-cnrs.unistra.fr](mailto:benjamin.keller@live-cnrs.unistra.fr)

In Europe, the vast majority of landscapes are the result of a co-construction between Nature and humans. Until the middle of the 20th century, men who carved the landscape were mainly farmers, organized collectively and under the aegis of seigniorial or ecclesiastical authorities. In this context, the study of agrarian landscapes makes it possible to better understand human dynamics and their consequences on the temporal trajectories of territories. Agrarian landscapes, indeed, are often summarized as open fields and bocage systems. However, many farmer field systems (FFS) such as lynchets, ridges and furrows, terraces and murgers, attest to a complexity that cannot be understood with a simplistic two-dimensional reading of the rural landscape. The analysis of these FFS at the local level makes it possible to estimate their dynamics. This study is based on several disciplines (pedology, anthracology, geography, history) in order to acquire as much complementary data as possible on FFS. In this study, we analysed three lynchets located in Moselle (57) and in Haut-Rhin (68). A lynchets is a kind of bank that appears on a slope, which results, in most cases, from the erosion of the soil of the plot caused by colluviation or by tillage erosion and sediments accumulation behind a hedge, a pile of stone... Unlike terraces, lynchets are involuntary forms and not constructions. Each lynchets, indeed, corresponds to a plot whose bank represents the limits that allowed the installation of a hedge. The identifications of charcoals and their associated time periods carried out in Obergailbach (57) made it possible to determine a first phase of forest clearing probably during Merovingian period (550 - 711 ca AD), potentially representing the period of cultivation of these lands. In comparison to Obergailbach, the analyses of Achen (57) and Le Bonhomme (68) reflect the complexity of land use and practices.

Keywords: farmer field system (FFS), landscape dynamics, lynchets, charcoal, forest clearing.


**Annexe 10 : Présentation pour la conférence internationale : SFE2-GfÖ-EEF, Ecology and Evolution: New perspectives and societal challenges. Session: the long-term trajectories of the socio-ecosystems: past dynamics and modern legacies, 24 novembre 2022.**



Abstract book – Oral presentations  
Regular sessions




ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE



LABORATOIRE D'ÉCOLOGIE ÉVOLUTION ET ÉCOSYSTEMES



Laboratoire  
image, ville, environnement | LIVE  
de l'Université de Strasbourg  
et du CNRS



Faculté de géographie  
et d'aménagement  
Université de Strasbourg

# Digging further into the past for spatialising forests age ecosystems

Ertlen, Damien<sup>1</sup> ; Keller Benjamin<sup>1</sup> ; Robin, Vincent<sup>2</sup> ; Schwartz, Dominique<sup>1</sup> and Herrault, Pierre-Alexis<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>LIVE - CNRS / University of Strasbourg, France  
<sup>2</sup>LIEC - CNRS / University of Lorraine, Metz, France



## Résumé en français suivi des mots-clés en français

Insérer votre résumé en français (1000 caractères maximum) suivi des mots-clés en français

L'apparition des premiers agriculteurs durant le Néolithique a été un tournant majeur dans l'anthropisation des milieux. Des systèmes de formes agraires ou former field système (FFS) sont encore présents dans les paysages actuels. Ces structures dessinent ces anciens parcellaires et renferment des archives pédo-sédimentaires qui peuvent nous renseigner sur les environnements passés et leurs dynamiques. Le « système agraire » tel que défini dans cette thèse est la manifestation (micro-)topographique d'un ensemble de processus d'exploitation des terres. Rarement isolé, chaque microrelief matérialise un ancien champ de culture. Ces formes agraires constituent un maillage parfois dense du paysage. Rideaux de culture, murgers et champs bombés possèdent une géométrie ou « agro-morphologie » propre résultant de différentes pratiques culturelles. Les murgers possèdent des formes très variées et caractéristiques de l'épierrement des champs pouvant sceller des paléosols. Les rideaux de culture localisés sur versants constituent un ensemble de ressauts parallèles résultant d'une accumulation par colluvionnement ou par labours répétitifs. L'invention de la charrue à versoir fixe est un facteur prépondérant de la forme des champs bombés. Ces reliques omniprésentes dans le paysage de l'est de la France sont conservées dans les espaces forestiers ou de prairie. Cette thèse s'articule autour de trois objectifs principaux : (i) identifier et inventorier les formes agraires dans l'est de la France ; (ii) dater les formes agraires, c'est-à-dire déterminer l'époque de la première mise en culture de la parcelle, mais aussi identifier les périodes et les dynamiques de changement d'occupation du sol par l'étude des archives pédo-sédimentaires ; (iii) déterminer les trajectoires temporelles des paysages associés

Une base de données inédite a pu être établie dans l'est de la France dans les départements pourvus de données LiDAR. Ainsi 1700 centroïdes ont été générés correspondants à un système de formes agraires. Cette base de données n'est pas exhaustive. Néanmoins, elle montre l'existence et l'ampleur spatiale de formes résultants de pratiques culturelles anciennes dans des paysages préservés de l'agriculture moderne, tels que le Pays de Bitche (57) et les Hautes Vosges (68).

L'application de la pédoanthracologie à l'étude des rideaux de culture a permis d'appréhender les trajectoires temporelles complexes de ces formes. L'analyse des charbons de bois réalisée sur six rideaux de cultures a permis de déterminer pour quatre d'entre eux une origine médiévale. Un seul rideau de culture possédait une origine moderne. Toutefois, sans la présence de paléosols, la datation précise de ces formes agraires à partir de l'analyse seule des charbons de bois reste complexe dans un profil de sol très homogène. L'application de l'appareil portable de luminescence stimulée optiquement (P-OSL) a démontré tout son intérêt dans la détermination des limites supérieur et inférieur de paléosols dans les champs bombés.

L'application de la base de données a permis d'explorer les anciens systèmes de champs dans les Hautes-Vosges, et leur distribution spatiale, révélant la pertinence de l'utilisation des formes agraires dans la caractérisation des forêts anciennes. Certaines de ces formes agraires sous forêt au 19e siècle ont pu être identifiées permettant de quantifier les forêts anciennes « perturbées » depuis la période médiévale. Ces découvertes ouvrent de nouvelles perspectives pour évaluer avec précision l'âge des



écosystèmes forestiers, et révèlent également un schéma évolutif de changement d'utilisation des terres similaire à celui observé dans d'autres régions montagneuses européennes.

**Mots clés :**

Pratiques culturelles anciennes, ancien système de champs, rideaux de culture, champs bombés, murgers, trajectoire temporelle des paysages, archives pédo-sédimentaires, pédoanthracologie, géo-histoire, lecteur de luminescence portable (P-OSL).

## Résumé en anglais suivi des mots-clés en anglais

Insérer votre résumé en anglais (1000 caractères maximum) suivi des mots-clés en anglais

The appearance of the first farmers during the Neolithic period was a major turning point in the anthropization of the environment. Former field systems (FFS) are still present in today's landscapes. These structures represent ancient land parcels, and contain soil and sedimentary archives that can tell us a great deal about past environments and their dynamics. FFS as defined in this thesis is the (micro-)topographical manifestation of a set of land use processes. Rarely isolated, each micro-relief represents an ancient cultivated field. These agrarian forms form a sometimes dense mesh in the landscape. Lynchets, stone walls and ridge & furrows have their own geometry or "agro-morphology" resulting from different farming practices. Stone walls have a wide variety of shapes, characteristic of the stonework of fields that can seal in palaeosols. Lynchets located on slopes constitute a set of parallel projections resulting from accumulation by colluvium or repetitive ploughing. The invention of the fixed heavy plough is a major factor in the shape of these ridge & furrows. These ubiquitous relics of the eastern French landscape are preserved in forest and grassland areas. This thesis has three main objectives: (i) to identify and inventory the FFS in eastern France; (ii) to date the FFS, i.e. to determine when the plot was first cultivated, but also to identify the periods and dynamics of land-use change through the study of pedo-sedimentary archives; (iii) to determine the temporal trajectories of the associated landscapes.

An unprecedented database has been established in eastern France in departments with LiDAR data. A total of 1700 centroids were generated, corresponding to a system of agrarian landforms. This database is not exhaustive. Nevertheless, it shows the existence and spatial extent of forms resulting

from ancient farming practices in landscapes preserved from modern agriculture, such as the Pays de Bitche (57) and the Hautes Vosges (68).

The application of pedoanthracology to the study of lynchets has enabled us to understand the complex temporal trajectories of these forms. Charcoal analysis carried out on six lynchets enabled us to determine a medieval origin for four of them. Only one lynchet had a modern origin. However, without the presence of palaeosols, precise dating of these agrarian forms from charcoal analysis alone remains complex in a very homogeneous soil profile. The application of a portable luminescence reader (P-OSL) device has demonstrated its value in determining the upper and lower limits of paleosols in ridge & furrows.

Application of the database has enabled us to explore FFS in the Hautes-Vosges, and their spatial distribution, revealing the relevance of using agrarian forms in characterizing ancient forests. Some of these agrarian forms under forest in the 19th century have been identified, enabling us to quantify the old-growth forests "disturbed" since the medieval period. These findings open up new prospects for accurately assessing the age of forest ecosystems, and also reveal an evolutionary pattern of land-use change similar to that observed in other European mountain regions.

**Keywords :**

Ancient cultivation practices, former field systems (FFS), lynchets, ridge & furrows, stone walls, temporal trajectory of landscapes, pedo-sedimentary archives, pedoanthracology, geo-history, portable luminescence reader (P-OSL).