



Cartographie de la diversité des sols viticoles de versant par imagerie à haute résolution : contribution à la connaissance des terroirs.

Emmanuel Chevigny

► To cite this version:

Emmanuel Chevigny. Cartographie de la diversité des sols viticoles de versant par imagerie à haute résolution : contribution à la connaissance des terroirs.. Environnement et Société. Université de Bourgogne, 2014. Français. NNT: . tel-01114910

HAL Id: tel-01114910

<https://hal.science/tel-01114910>

Submitted on 10 Feb 2015

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

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

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE
UFR des Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Environnement
UMR 6298 ARTEHIS

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Bourgogne
Discipline : Sciences de la Terre

par Emmanuel CHEVIGNY

Soutenance publique le 11 septembre 2014

Cartographie de la diversité des sols viticoles de versant par imagerie à haute résolution : contribution à la connaissance des terroirs

Directeur de thèse
Pierre CURMI

Co-directeur de thèse
Christophe PETIT

Co-encadrante
Amélie QUIQUEREZ

Membres du Jury :

VAN LEEUWEN C.	Professeur	Bordeaux Sciences Agro	Rapporteur
ALLEMAND P.	Professeur	Université Claude Bernard Lyon 1	Rapporteur
VAUDOUR E.	Maître de conférences	AgroParisTech	Examinatrice
GARCIA J.-P.	Professeur	Université de Bourgogne	Examineur
BROSSAUD F.	Docteur	BIVB	Examineur
CURMI P.	Professeur	Agrosup Dijon	Directeur
PETIT C.	Professeur	Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne	Co-directeur
QUIQUEREZ A.	Maître de conférences	Université de Bourgogne	Co-encadrante

Remerciements

Au terme de ce travail, j'aimerais adresser mes premiers remerciements à mes encadrants, Pierre Curmi, Christophe Petit et Amélie Quiquerez. Merci à vous pour votre engagement dans ce travail, pour vos conseils, pour toute l'aide et l'enseignement que vous avez pu m'apporter au cours de cette thèse. Je tiens plus particulièrement à remercier Amélie qui a toujours su être à l'écoute, dans les bons moments comme dans les plus difficiles.

Je remercie les membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail : Kees Van Leuween, Pascal Allemand, Emmanuelle Vaudour, Jean-Pierre Garcia et Franck Brossaud.

Je tiens à remercier également toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide pour le bon déroulement de ce travail. Je pense ainsi à l'équipe du Pôle Image de Lyon 1, et plus particulièrement à Philippe Grandjean, pour s'être rendu disponible en fonction des caprices de la météo bourguignonne. Merci à l'équipe de Besançon de Chrono-Environnement, Vincent Bichet, Christophe Loup, Charly Massa, Jean-Pierre Simonnet, Marguerite Perrey, qui m'ont accueilli dans leur laboratoire pour diverses analyses. Merci également à l'équipe dijonnaise de Biogéosciences, Pierre Pellenard, Ludovic Bruneau et Jean Lévêque, de m'avoir donné l'opportunité de réaliser des analyses au sein de leur laboratoire. Merci à Mireille Boilletot d'Agrosup Dijon pour son aide et sa disponibilité, ainsi qu'à Christian Camerlynck pour tous les conseils qu'il m'a prodigués en géophysique, pour son aide sur le terrain et le prêt de matériel.

Je suis également très reconnaissant envers tous les gens de la vigne de m'avoir donné accès à leurs parcelles. Je remercie plus particulièrement Denis Fetzmann et Boris Champy, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et le soutien matériel apporté lors des prospections géophysiques. Merci également à Michel et Sébastien Deschamps pour tous les renseignements qu'ils m'ont donnés et pour le prêt d'un enjambeur lors de la prospection géophysique. Je ne saurais oublier Luc Pavelot, Claude de Nicolay, Christophe Denis, Laurent Fournier, Maurice Chapuis, Pablo Chevrot, et tous les autres...

Mille mercis à Françoise pour toute l'aide que tu as pu m'apporter, pour ces bons moments passés ensemble sur le terrain à planter des électrodes, pour les petites excursions géologiques sur la Côte et pour tout ce que tu m'as appris pendant ces années de thèse. Que l'aventure continue...

Merci à toi, Carmela, pour ces longues heures passées sur mes écrits en anglais...

Un grand merci à Laetitia Bassereau et Brigitte Colas d'Artheis, car vous avez toujours su répondre à mes requêtes administratives.

Merci à tous mes amis pour leur aide et leur soutien. Je vous salue tous... Rodrigue, Alain, Christophe, Charline, Charly, Anthony, Benjamin, Estelle, Laetitia, Ronan, Marion, Paco, Lucas, Florent, Diane, et le meilleur pour la fin, Manu, avec qui j'ai partagé cette thèse et la sienne à distance. C'est un grand plaisir de te revoir dans la région.

Je tiens également à remercier toute ma famille pour le soutien qu'elle a pu m'apporter pendant ces années, et plus particulièrement mes parents, mes sœurs, ma belle-mère, et mon beau-frère Fred, pour toute leur aide et leurs conseils.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans m'adresser à toi, Stéphanie, qui a suivi cette thèse du début jusqu'à la fin. Toi qui as su faire preuve d'une très grande patience, surtout en ces derniers mois. Toi qui as toujours su m'épauler dans les moments difficiles. Toi qui, il y a déjà trois ans déjà, as mis au monde le bonheur de ma vie, notre petite Margaux. Merci pour tout !

*« On n'hérite pas la terre de nos ancêtres,
on l'emprunte à nos enfants. »*

Antoine de Saint-Exupéry

Table des matières

Introduction générale	1
Partie I Sol et substrat géologique de la Côte viticole : cadre général, outils et méthodes	9
Chapitre 1 Contexte de l'étude : les versants viticoles de la Côte	11
1.1 La Côte viticole	13
1.1.1 Son histoire géologique.....	14
1.1.2 Les sols de la Côte.....	19
1.2 Caractéristiques géomorphologiques et géopédologiques des sites d'étude	22
1.3 Le paysage viticole	26
1.3.1 Le vignoble côte-d'orien : un vignoble pluriséculaire	26
1.3.2 Structuration et entretien du vignoble	30
1.4 La notion de « terroir »	33
1.5 Conclusion	35
Chapitre 2 Cartographie du sol et du substrat géologique : outils et méthodes	37
2.1 Les méthodes de cartographie conventionnelles	40
2.1.1 La carte géologique : objectifs et méthodes de production	40
2.1.2 La carte pédologique : objectifs et conception.....	41
2.1.3 Quelle échelle spatiale pour les études des terroirs viticoles ?	46
2.2 Apports de la télédétection par imagerie et de la géophysique en cartographie	49
2.2.1 La télédétection par imagerie	50
2.2.1.1 Principe.....	50
2.2.1.2 Télédétection et pédologie.....	55
2.2.2 Méthodes d'investigation géophysique du substrat et du sol.....	63
2.2.2.1 La résistivité électrique	63
2.2.2.2 Technique de caractérisation du substrat : la tomographie électrique	67
2.2.2.3 Cartographie en continu des propriétés du sol : le système ARP®	71
2.2.2.4 Application et choix des techniques en contexte viticole	73
2.3 Conclusion	75
CHAPITRE 3 Approche interdisciplinaire de la cartographie à haute résolution de la diversité des sols viticoles de versant et de ses déterminants	77
3.1 Élaboration d'un modèle numérique de terrain à haute résolution spatiale	81
3.2 Détermination du substrat géologique	82
3.2.1 Acquisition des profils par tomographie électrique	82
3.2.2 Traitement des données de résistivité apparente	83
3.2.3 Interprétation géologique du profil de résistivité	84

3.3	Cartographie des états de surface du sol par analyse d'images THRS	85
3.3.1	<i>Acquisition des images THRS</i>	85
3.3.2	<i>Prétraitements des images THRS</i>	87
3.3.3	<i>Méthode de classifications des images</i>	89
3.4	Caractérisation des états de surface	92
3.4.1	<i>Analyses des états de surface sur le terrain</i>	92
3.4.2	<i>Analyses au laboratoire</i>	93
3.4.3	<i>Inventaire des pratiques culturales</i>	95
3.4.4	<i>Test de séparabilité des EDS reconnus par imagerie</i>	96
3.5	Caractérisation des types de sol	97
3.5.1	<i>Sondages à la tarière</i>	97
3.5.2	<i>Caractérisation physico-chimique des sols</i>	98
3.6	Cartographie de l'érosion	99
3.7	Détermination de l'évolution de l'occupation du sol	100
3.8	Conclusion	101
Synthèse de la première partie « Sol et substrat géologique de la Côte viticole : cadre général, outils et méthodes »		103
Partie II Diversité géopédologique à l'échelle du versant pour divers contextes géologiques		109
CHAPITRE 4 Caractérisation de la diversité géopédologique par imagerie. Application à l'échelle du versant		111
4.1	Diversité géopédologique du versant d'Aloxe-Corton à forte variabilité de faciès	114
4.1.1	<i>Topographie du versant d'Aloxe-Corton</i>	114
4.1.2	<i>Caractérisation du substrat géologique du versant d'Aloxe-Corton</i>	115
4.1.3	<i>Cartographie des états de surface du sol (EDS)</i>	121
4.1.3.1	<i>Acquisition des images THRS</i>	121
4.1.3.2	<i>Classification d'images et détermination des classes d'EDS</i>	122
4.1.3.3	<i>Caractérisation des paramètres physico-chimiques des EDS</i>	123
4.1.3.4	<i>Séparabilité des EDS reconnus par imagerie selon leurs paramètres physico-chimiques</i>	126
4.1.3.5	<i>Influence des pratiques culturales sur la reconnaissance des EDS</i>	128
4.1.4	<i>Description et typologie des sols du versant d'Aloxe-Corton</i>	130
4.1.5	<i>Cartographie des sols du versant d'Aloxe-Corton par la démarche interdisciplinaire</i>	134
4.1.6	<i>Cartographie des sols du versant d'Aloxe-Corton par la méthode ARP®</i>	135
4.1.6.1	<i>Acquisition des cartes de résistivité électrique</i>	135
4.1.6.2	<i>Variabilité lithologique et pédologique</i>	137
4.2	Article 1 : (En préparation) Imagery data as a tool for soil mapping in vineyard hillslopes (Burgundy, France)	147
4.3	Caractérisation géopédologique du versant de Cheilly-lès-Maranges à faible variabilité de faciès	171

4.3.1	Topographie du versant de Cheilly-lès-Maranges	171
4.3.2	Détermination du substrat géologique du versant de Cheilly-lès-Maranges.....	172
4.3.3	Cartographie des états de surface par imagerie THRS.	177
4.3.3.1	Acquisition des images THRS.	177
4.3.3.3	Paramètres physico-chimiques et séparabilité des classes d'EDS	179
4.3.4	Description des sols et typologie.....	185
4.3.5	Cartographie des sols du versant de Cheilly-lès-Maranges	189
4.4	Ouverture vers une cartographie sur une surface plus étendue	190
4.4.1	Classification des EDS à partir de l'orthophotographie IGN	191
4.4.1	Caractérisation du substrat géologique à haute résolution sur de vastes espaces	192
4.4.1	La spectroscopie proche infrarouge comme outil de détermination des sols	192
Synthèse de la deuxième partie « Diversité géopédologique à l'échelle du versant pour divers contextes géologiques »		197
Partie III Diversité des sols à l'échelle parcellaire : facteurs naturels et anthropiques.....		209
Chapitre 5 Diversité des sols viticoles à l'échelle parcellaire : influence des facteurs naturels sur l'érosion .		211
5.1	Article 2 : Assessing the impact of soil surface characteristics on vineyard erosion from very high spatial resolution aerial images.....	215
5.2	Influence de la pierrosité sur l'érosion des sols viticoles à l'échelle parcellaire.....	239
5.2.1	Contexte et acquisition des données.....	239
5.2.2	Distribution de la pierrosité de surface et de l'érosion	240
5.3	Conclusion.....	243
Chapitre 6 L'homme, acteur de la construction des sols viticoles : une histoire plurimillénaire		245
6.1	Impacts de l'homme sur le temps long.....	248
6.1.1	Exemple de l'occupation des versants durant l'Antiquité	248
6.1.2	Mise en culture sur d'anciennes carrières et gravières.....	260
6.1.3	Les apports de terre.....	265
6.2	Impacts de l'homme à moyen terme	269
6.2.1	Article 3: Lithology, landscape structure and management practice changes: key factors patterning vineyard soil erosion at metre-scale spatial resolution.....	271
6.2.2	Influence de l'occupation ancienne du sol sur l'érosion actuelle.	297
6.3	Impacts de la mécanisation sur les sols viticoles.....	310
6.3.1	La compaction du sol	310
6.3.2	Travaux de préparation avant plantation.....	314
6.4	Conclusion.....	316
Synthèse de la troisième partie « Diversité des sols à l'échelle de la parcelle : facteurs naturels et anthropiques »		319
Discussion générale et conclusions		327

Bibliographie	335
Liste des figures et des tableaux	355
Annexes	369

Liste des abréviations

ACP : analyse en composantes principales

AOC : appellation d'origine contrôlée

ARP : automatic resistivity profiling

DRX : diffractométrie de rayons X

EDS : état de surface du sol

ERT : electrical resistivity tomography

GPS : global positioning system

ISODATA : iterative self-organizing data analysis technique algorithm

ISOMAP : isometric feature mapping

LiDAR : light detection and ranging

MNE : modèle numérique d'élévation

MNT : modèle numérique de terrain

MUCEP : multipole continuous electrical profiling

PCA : principal component analysis

RMS : root mean square

RVB : rouge vert bleu

SIG : système d'information géographique

SUM : stock unearthing measurement

SVM : support vector machine

THRS : très haute résolution spatiale

t-SNE : t-distributed stochastic neighbor

UCS : unité cartographique de sol

UTS : unité typologique de sol

VHSR : very high spatial resolution

Introduction générale

Introduction générale

Le terroir est une notion qui résulte d'interactions entre des facteurs physiques du milieu, des facteurs climatiques, des facteurs biologiques et des facteurs anthropiques (Vaudour, 2003). Il s'agit d'une notion complexe, abordée le plus souvent, en fonction des préoccupations des scientifiques, par des approches pluridisciplinaires qui ne sont pas systématiquement mises en commun pour en donner une compréhension globale (Rouvellac, 2013). Dans les études de terroir, le sol représente une composante essentielle, en raison de sa diversité qui lui confère des aptitudes agroviticoles particulières ayant un impact sur la production de la vigne et sur la qualité du raisin (Vaudour et Shaw, 2005). À ce jour, le développement de nouveaux vignobles de qualité dans le monde entraîne une concurrence de plus en plus marquée entre les régions viticoles (Morlat, 2001). Ainsi, le terroir est de plus en plus utilisé comme support de communication, et permet ainsi à la filière vitivinicole de mettre en avant les caractères uniques de chaque région viticole. Pour préserver l'authenticité des terroirs et les spécificités de chacun, la protection de ce patrimoine sol est donc cruciale (Boulanger-Fassier, 2008).

Les sols viticoles présentent une forte diversité due à l'action de plusieurs facteurs physiques (climat, substrat, topographie), biologiques (organismes vivants) et anthropiques, qui vont déterminer les processus pédogénétiques conduisant, au cours du temps, à leur différenciation (Delmas, 1971). Le facteur anthropique recouvre à la fois les pratiques culturales actuelles (principalement liées à la mécanisation) (Gaviglio, 2013) et anciennes (évolution du parcellaire et de son occupation, apports de terre exogènes, etc.) (Garcia, 2010). Pour caractériser la diversité des sols viticoles, il est donc nécessaire d'identifier les facteurs qui contribuent à leur formation par une approche interdisciplinaire croisant la géologie, la géomorphologie, la pédologie, l'histoire de l'occupation du sol et des pratiques culturales. C'est cette démarche que nous adopterons dans le cadre de ce travail.

Le sol est une ressource très faiblement renouvelable dont la formation a requis des milliers d'années (de l'ordre de 0,058 à 0,083 mm/an dans le monde), mais qui peut être dégradé par l'érosion en l'espace de quelques années (de l'ordre de 0,95 mm/an dans le monde) (Montgomery, 2007), et plus particulièrement en secteur viticole (Cerdan *et al.*, 2010 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002). En effet, les sols ont subi une importante dégradation à la fois physique (érosion hydrique, tassement), biologique (diminution de la biomasse et de la diversité microbienne) et chimique (contamination par les métaux lourds), suite au développement d'une viticulture intensive dans les années 60-70, marqué par la mécanisation de l'entretien du vignoble (Gaviglio, 2013). Aujourd'hui, la filière viticole cherche à adapter les pratiques culturales pour une meilleure gestion et préservation des sols viticoles. Cette prise de conscience représente un enjeu national, qui se traduit par la mise en place du plan Écophyto 2018 visant à diminuer l'utilisation des pesticides de 50 % d'ici 2018 (Ministère de l'agriculture et de

la pêche, 2008). Elle a également été motivée par les consommateurs qui souhaitent, aujourd'hui, consommer des produits sains, issus d'une viticulture respectueuse de l'environnement (Boulanger-Fassier, 2008). Ces évolutions du mode de gestion du vignoble ont pour but de diminuer l'utilisation des produits phytosanitaires afin de préserver la qualité des sols et des eaux. Pour limiter les dégradations physiques du sol liées à l'érosion hydrique, des solutions sont également mises en œuvre telles que l'enherbement des inter-rangs et des contours de parcelle, la construction de collecteurs et de bacs de rétention d'eau (Le Bissonnais et Andrieux, 2006). Une bonne gestion des sols, sous forme d'une viticulture raisonnée, biologique ou en biodynamie, est donc primordiale pour pérenniser cette ressource dans le présent et le futur, et une meilleure connaissance de celle-ci, de sa diversité et son fonctionnement s'avère nécessaire, surtout à l'heure où un changement climatique planétaire est observé.

La planète connaît à ce jour un changement climatique qui entraîne, et va entraîner, des répercussions qualitatives et quantitatives sur la production viticole (Pieri, 2010). Cette modification du climat se manifeste par une tendance à l'augmentation des températures et une variabilité plus importante de la pluviométrie. Cependant, les dernières années ont surtout été marquées par un dérèglement climatique annuel qui a conduit à une succession de millésimes contrastés, avec des années sèches et des années plus pluvieuses. Les stratégies actuelles de gestion des sols ne permettent pas de s'adapter facilement à ces contrastes climatiques qui peuvent induire des déséquilibres agronomiques (carences, baisse de vigueur, irrégularité des rendements) (Christen, 2004). De plus, le changement climatique se caractérise par une augmentation des précipitations intenses favorisant la dégradation des sols par l'érosion hydrique, considérée désormais comme un enjeu international. En effet, la Commission des Communautés Européennes (CEE) reconnaissait déjà, en 2002, que l'érosion des sols pouvait être « *considérée, avec différents degrés de gravité, comme un problème rencontré dans toute l'Union Européenne* ». L'érosion a un impact économique sur la filière viticole (remontées des terres érodées, pertes de nutriments) et sur l'environnement proche du vignoble (pollution des eaux, inondations, coulées boueuses) (Le Bissonnais *et al.*, 2002).

Afin d'aboutir à une meilleure gestion du vignoble, le sol doit être caractérisé à un niveau de précision qui puisse permettre d'en prédire le comportement agronomique, à savoir le niveau de la série de sol américaine « Soil Series » (National Cooperative Soil Survey, 1999). Ce type de caractérisation peut alors être utilisé pour définir des aptitudes spécifiques du sol, comme l'estimation de la réserve utile en eau, ou pour déterminer les aléas érosifs des sols. Pour parvenir à ce niveau d'observation, il est nécessaire d'utiliser des outils et une échelle adaptés. Ainsi, les études des terroirs viticoles qui intègrent le paramètre sol sont le plus souvent réalisées à une grande échelle spatiale, supérieure au 1/25 000 (Vaudour, 2003), utilisant des cartes qui proposent des itinéraires cultureux adaptés aux divers types de sol. Cette caractérisation à grande échelle du sol répond aux attentes d'une viticulture de précision, qui a pour objectif d'optimiser le rendement et la qualité de la production

viticole, tout en minimisant son impact sur l'environnement. Depuis plusieurs années, de nouvelles technologies, basées sur l'utilisation de l'imagerie aérienne et plus récemment de l'imagerie aérospatiale, sont développées pour répondre aux besoins de ce type de viticulture, facilitant ainsi la caractérisation de diverses propriétés de la vigne (la vigueur, le suivi de maturité) (Hall *et al.*, 2002) ; elles peuvent aussi être utilisées pour des travaux de cartographie du sol. D'autres technologies, comme les investigations géophysiques de subsurface, sont employées pour déterminer la distribution spatiale des sols, ou de certaines de ses propriétés, à haute résolution (Buvat *et al.*, 2014; Samouëlian *et al.*, 2005). Toutes ces technologies permettent d'identifier à haute résolution les paramètres du milieu qui influencent la production viticole et assurent ainsi, à la filière viticole, une meilleure gestion de sa production. Ces techniques employées dans diverses régions viticoles à travers le monde n'ont jusqu'à présent pas été utilisées sur la Côte viticole bourguignonne.

En Bourgogne, la Côte viticole se caractérise par une grande diversité de sols sur des espaces restreints, du fait que le vignoble est implanté sur une zone de relief où les variations lithologiques se succèdent sur de courtes distances (Mériaux *et al.*, 1981). Les sols viticoles de la Côte, par leur mise en culture depuis plusieurs siècles, ont été, et sont modifiés par les activités humaines anciennes et actuelles. Comme pour la plupart des vignobles, la Côte est soumise à une érosion hydrique intense qui conduit à une importante dégradation des sols (Brenot *et al.*, 2008). Dans ce contexte de culture pérenne, ces sols apparaissent donc comme un objet d'étude permettant de caractériser l'impact de l'homme sur le sol. Le sol ayant un rôle majeur sur les terroirs viticoles, cette caractérisation à haute résolution contribuerait à une meilleure connaissance de ces terroirs, d'autant plus pertinente que la Bourgogne est un exemple type de la notion de « terroir » : à elle seule, elle détient le quart des appellations d'origine contrôlées françaises (AOC) (Hinnewinkel, 2004). Au-delà des questions scientifiques, les enjeux patrimoniaux et culturels sont importants pour la connaissance et la valorisation des terroirs viticoles, à l'heure où la Côte demande le classement de ses *climats* au patrimoine mondial de l'UNESCO (Garcia, 2011a).

Ce travail de thèse s'inscrit dans une démarche interdisciplinaire autour du sol viticole ; il a pour objectif majeur de caractériser la diversité des sols viticoles de la Côte et d'identifier les facteurs qui ont contribué à cette diversité, par une approche intégrant des données géologiques, géomorphologiques, pédologiques et historiques. Ce travail étant financé par la Région Bourgogne et le Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne (BIVB), l'étude a été réalisée sur plusieurs secteurs géographiques de la Côte afin d'avoir une vision d'ensemble de la diversité pédologique. Ainsi, les résultats obtenus permettront une meilleure connaissance des sols viticoles sur la Côte, de leur diversité, de leur construction et de leur fonctionnement.

La problématique de cette thèse se résume en trois questions :

1 – L'imagerie à très haute résolution spatiale peut-elle être utilisée comme outil d'aide à la cartographie en secteur viticole ?

Cette première question cherche à évaluer le potentiel de divers outils basés sur l'imagerie, tels que la télédétection par imagerie, les investigations géophysiques de subsurface, les modèles numériques de terrain. Pour caractériser l'ensemble de la diversité géopédologique, ces outils ont été utilisés à très haute résolution spatiale.

2 – Quels sont les facteurs qui contrôlent la diversité pédologique des sols viticoles de versant de la Côte ?

L'utilisation des divers outils à haute résolution va permettre de déterminer les facteurs qui contrôlent la diversité des sols viticoles de la Côte, comme les facteurs naturels et anthropiques. La détermination de ces facteurs est fondée sur une démarche interdisciplinaire, basée sur des approches géologiques, géomorphologiques, pédologiques et historiques.

3 – La diversité des sols viticoles est-elle dépendante de l'échelle spatiale d'observation ?

Pour cette dernière question, l'objectif est de déterminer d'une part, si la diversité des sols observée à l'échelle de la parcelle est plus importante que celle observée à l'échelle du versant, et d'autre part, si les facteurs qui contrôlent cette diversité sont différents.

La restitution de ce travail se structure en trois parties. Dans une première partie, nous présenterons le contexte général de l'étude, suivi d'une synthèse bibliographique des méthodes de cartographie dont le but est d'identifier les outils les plus adaptés à une cartographie à très haute résolution des sols, en contexte viticole. À partir de cet état de l'art, la démarche cartographique définie est appliquée sur plusieurs versants de la Côte dans une deuxième partie. Les résultats obtenus permettent alors d'identifier les facteurs qui contrôlent la diversité des sols à l'échelle du versant et de proposer un modèle d'organisation spatiale de ceux-ci à cette même échelle. Dans une troisième partie, à partir des démarches cartographiques entreprises à l'échelle de la parcelle, nous exposerons notre réflexion sur les facteurs qui influencent la diversité des sols à l'échelle locale. Enfin, seront discutés l'apport méthodologique de cette démarche interdisciplinaire ainsi que l'influence des facteurs de contrôle et des échelles spatio-temporelles sur la diversité des sols.

Partie I - Sol et substrat géologique de la Côte viticole : cadre général, outils et méthodes

Chapitre 1 - Contexte de l'étude : les versants viticoles de la Côte

Chapitre 1 Contexte de l'étude : les versants viticoles de la Côte

Ce chapitre présente le contexte général de l'étude, et se décompose en trois parties :

- le contexte géologique et pédologique de la Côte viticole et des secteurs étudiés,
- le contexte historique du vignoble de la Côte,
- la définition de la notion de terroir, et les différentes approches des études de terroirs.

1.1 La Côte viticole

La Côte viticole se développe sur un relief de failles exposé à l'est séparant les plateaux calcaires à l'ouest, de la plaine de la Saône à l'est (Figure 1.1). Elle s'étend sur une étroite bande de quelques kilomètres de largeur sur une soixantaine de kilomètres du nord au sud. La Côte se subdivise en deux parties, la Côte de Nuits, au nord, qui s'étend de Dijon à Corgoloin, selon une direction N-S, et la Côte de Beaune, au sud, de Nuits-Saint-Georges jusqu'à Sampigny-lès-Maranges, selon une direction NNE-SSO. À l'extrémité méridionale de la Côte de Beaune, le versant viticole quitte la vallée de la Saône pour s'enfoncer dans la vallée de la Dheune, puis de son affluent la Cosanne jusqu'à Sampigny-lès-Maranges.

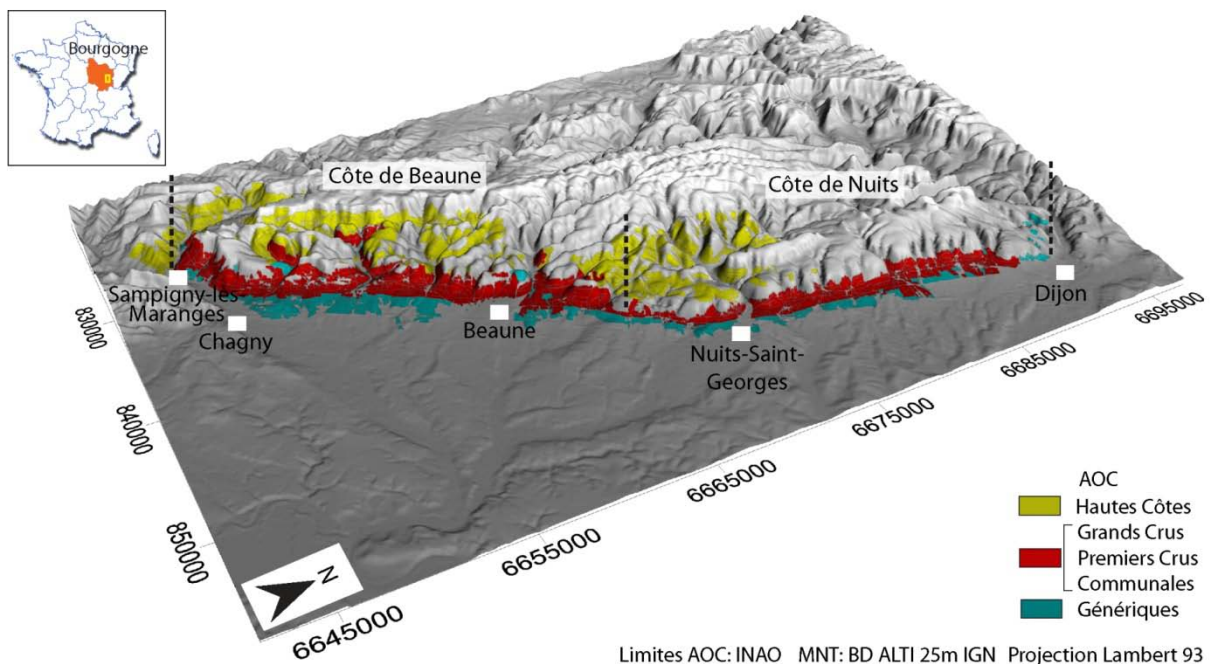
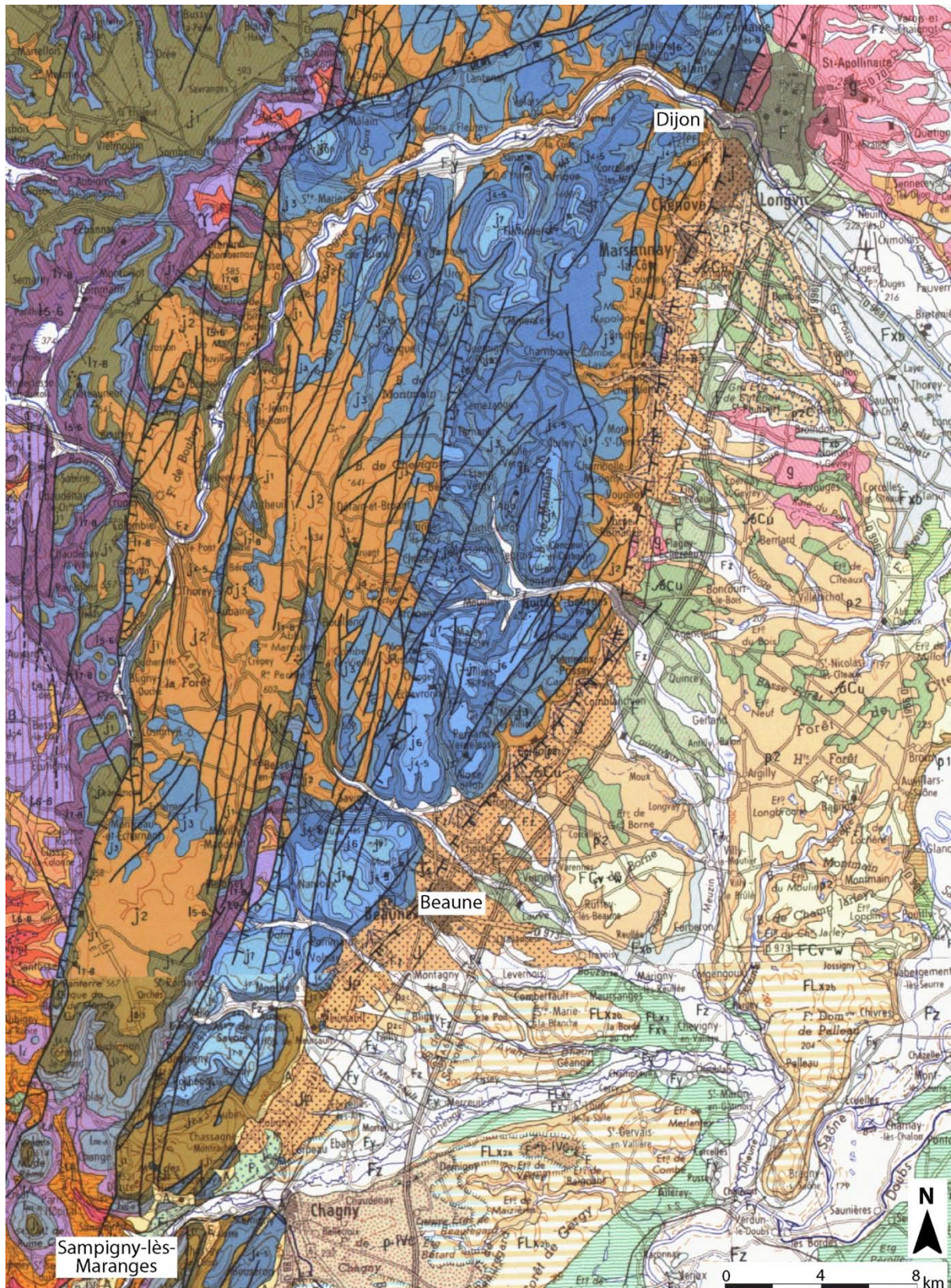


Figure 1.1 Carte du vignoble de la Côte et de ses Appellations d'Origine Contrôlées (AOC) (source INAO), et Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la Côte (source BD ALTI 25m IGN).

1.1.1 Son histoire géologique

À la fin du Paléozoïque, les dépôts marins du Mésozoïque sédimentent lors de la mise en place du premier cycle transgressif marin sur la surface pénéplanée, résultant de l'érosion de la chaîne hercynienne (Rat, 1986). Ces dépôts forment la majeure partie des affleurements observés sur la Côte (Figure 1.2). Cette transgression marine en provenance des régions germaniques et alpines atteint la Bourgogne au cours du Trias moyen (247,2 - 237 Ma). Les dépôts sont principalement gréseux et argileux (figurés orange sur la Figure 1.2). Le passage progressif à une mer ouverte assez profonde conduit à une sédimentation essentiellement marneuse caractérisant le Jurassique inférieur (201,3 - 174,1 Ma) (figurés violet sur la Figure 1.2). Pendant le Jurassique moyen (174,1 - 163,5 Ma) la mise en place de plates-formes carbonatées, au sein de ces mers tropicales épicontinentales, permet le dépôt de sédiments calcaires et argileux sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Ces dépôts de natures diverses présentent différents faciès sédimentaires, *i.e.* calcaires bioclastiques, calcaires argileux, calcaires oolithiques, calcaires sublithographiques (figurés marron-orangé sur la Figure 1.2). Lors du Jurassique supérieur (163,5 - 145 Ma), un nouvel approfondissement des conditions de dépôt favorise une sédimentation marneuse (figurés bleu sur la Figure 1.2). Ce cycle se termine par la régression purbeckienne à la fin du Jurassique. Au cours du Crétacé inférieur (145 - 105,5 Ma), la mer avance de nouveau en Bourgogne et cette avancée se marque par une sédimentation carbonatée. Suite au bombement du Seuil de Bourgogne, une phase d'érosion des continents a alors lieu, contemporaine au retrait de la mer. Le troisième cycle transgressif engendre le retour de la mer à la fin du Crétacé inférieur, les dépôts détritiques sableux devenant plus calcaires, puis marneux pour laisser place aux formations crayeuses. La fin du Crétacé marque le retrait définitif de la mer en Bourgogne (Rat, 1974). Cette émergence va marquer le début d'une longue érosion des dépôts du Crétacé et du Jurassique supérieur, qui va se terminer au cours de l'Éocène (56 - 33,9 Ma), période à laquelle la quasi-totalité des dépôts du Crétacé aura disparu.

La mise en place du relief de la Côte a débuté au cours de l'Oligocène (33,9 - 23,3 Ma). L'étirement de la croûte continentale au sommet du bombement thermique contemporain de la collision alpine conduit à l'effondrement du fossé bressan. Le substrat géologique constitué de calcaires et de marnes jurassiques subit alors une intense fracturation liée à l'effondrement de ce rift avorté. Le relief résultant de cet effondrement présente des failles orientées N10° en Côte de Nuits, et N30° en Côte de Beaune, constituant l'assise du vignoble. Cette bordure occidentale du fossé est composée de plusieurs compartiments faillés qui s'affaissent en direction de l'est en formant des « marches d'escalier ». Ce relief marque la transition entre les gradins de la Montagne et des Hautes Côtes, à l'ouest, et la plaine de la Saône, à l'est. Les formations marno-calcaires jurassiques qui constituent les plateaux calcaires bourguignons, à 500 m d'altitude, se retrouvent à plus d'un kilomètre de profondeur sous le remplissage de la plaine de la Saône (forages d'Argilly et de Barges, BRGM, 1957). De l'Oligocène au Miocène (23,3 - 5,3 Ma), le climat est tropical et le relief subit une intense



érosion, qui conduit à la formation de dépôts alluvionnaires conglomératiques recouverts par des dépôts épais de formations palustro-lacustres datant du Plio-Quaternaire (2,6 Ma) (Petit, 1993) (figurés en couleurs pastel sur la Figure 1.2). La géométrie du réseau de failles qui constitue ce relief est, à ce jour, encore mal connue. Une faille majeure à fort rejet (supérieur à 1500 m) parallèle au relief serait accompagnée de failles secondaires. Selon Rat (1986), la faille majeure, localisée au niveau de la zone de piedmont, mettrait en contact les formations jurassiques avec des formations tertiaires et quaternaires de la plaine de la Saône (Figure 1.3). Les récentes études géologiques réalisées sur la Côte ont montré que le relief de Côte, issu de l'érosion d'une zone de fracturation complexe, ne résulte pas d'une unique faille bordière à jeu normal (Garcia et Petit, 2005 ; Vannier-Petit *et al.*, 2011).

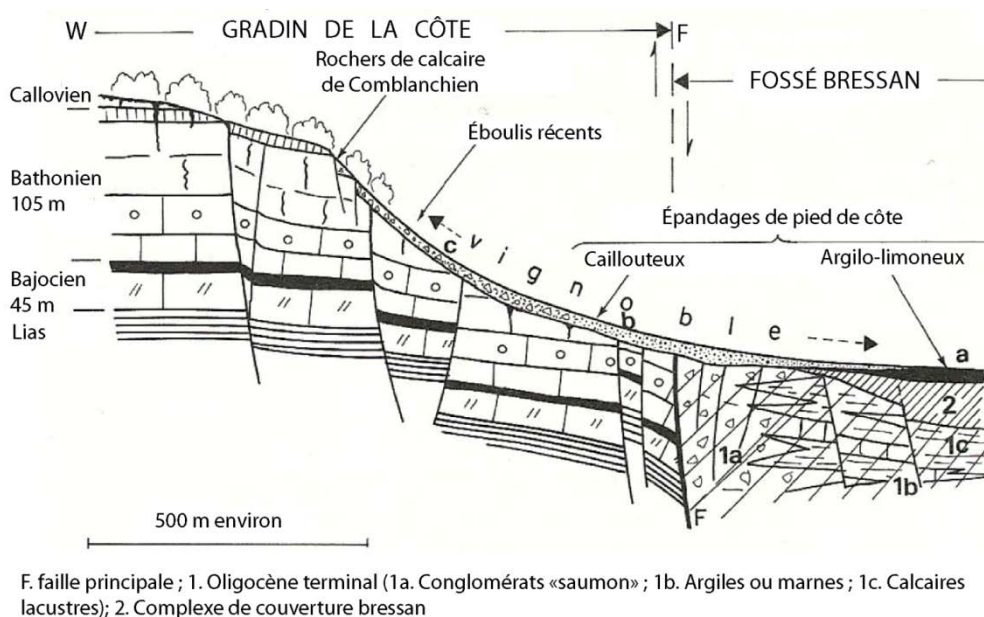
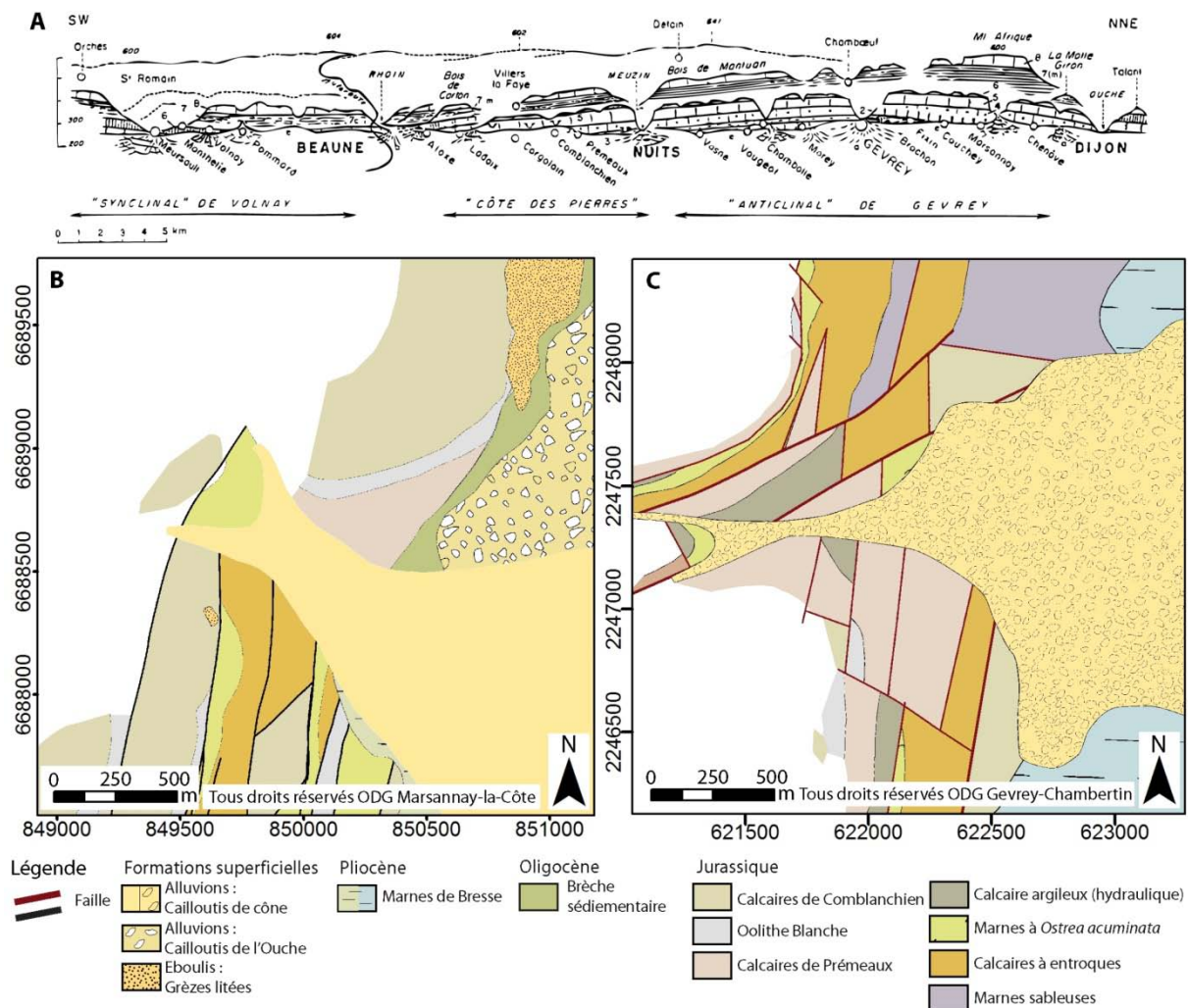


Figure 1.3 Coupe géologique transversale de la Côte de Nuits (Rat, 1986).

Ce relief laisse affleurer de Dijon à Sampigny-lès-Maranges, sur quelques centaines de mètres d'épaisseur, des formations géologiques qui s'étagent du Trias jusqu'au Jurassique supérieur. Sur les versants de la Côte de Nuits, les formations du Jurassique moyen sont les plus fréquentes à l'affleurement, dominées par des calcaires avec, sporadiquement, quelques formations marneuses. Les versants de la Côte de Beaune sont majoritairement constitués de formations marneuses et calcaires du Jurassique moyen et supérieur. Pour expliquer cette différence d'affleurement des formations géologiques entre la Côte de Nuits et la Côte de Beaune, Rat (1986) a émis l'hypothèse de la présence de deux ondulations transversales d'axe ouest-est dénommées « voussures ». Ces deux ondulations formeraient « l'anticlinal » de Gevrey en Côte de Nuits et « le synclinal » de Volnay en Côte de Beaune (Figure 1.4A). Ce schéma structural de la Côte a été largement diffusé dans le « monde viticole » et est encore à ce jour largement utilisé. Or, de nouvelles investigations géologiques, à l'échelle du 1/10 000, réalisées notamment sur les aires d'appellations Marsannay et Gevrey-

Chambertin, en Côte de Nuits, ont mis en évidence la présence de failles transversales au relief principal de la Côte, situées à l'aplomb des principales vallées sèches (Figure 1.4B et C) (Vannier-Petit *et al.*, 2012). Ces failles sont interprétées comme des failles décrochantes où s'amortiraient les failles de direction nord-sud (motif de failles en « queue de cheval »). Cette structuration explique également le décalage est-ouest sur les versants de part et d'autre des vallées sèches. Ce nouveau modèle structural de la Côte, combinant des failles décrochantes à un dense réseau de failles nord-sud, permet de réfuter l'hypothèse des deux ondulations transversales proposée par Pierre Rat.



Au cours du Quaternaire, la formation d'une calotte de glace en Arctique conduit à la mise en place de périodes glaciaires et interglaciaires qui façonnent le relief actuel. Ces alternances de périodes froides et plus tempérées contribuent à la mise en place de formations superficielles qui se déposent localement sur les versants. Ces périodes glaciaires étaient caractérisées par la présence d'un pergélisol épais empêchant l'infiltration de l'eau, qui dégèle au printemps et en été, dans le substrat sous-jacent. Les eaux, ruisselant alors en surface, forment des torrents impétueux qui creusent, au cours du temps, des vallées perpendiculaires au relief de la Côte, dénommées « combes ». La localisation de ces combes s'explique probablement par une plus grande sensibilité à l'érosion de ces couloirs de fracturation (Vannier-Petit *et al.*, 2012). Les éléments arrachés au relief sont alors transportés et déposés au débouché des combes en lobes anastomosés, formant ainsi des cônes alluviaux ou « cônes de déjection ». Ces dépôts sont constitués d'éléments de toutes tailles : blocs, galets, sables et argiles.

De plus, ce climat froid est propice à la mise en place, sur les versants, d'éboulis cryoclastiques nommés « grèzes litées ». Ces grèzes se sont formées en Bourgogne, principalement sur les versants exposés à l'est, par des cycles de gel-dégel (Journaux, 1976). Elles prédominent dans la partie nord de la Côte, sur les versants exposés au sud (Marsannay-la-Côte, Chambolle-Musigny, Pommard) (Figure 1.5). L'eau, qui s'infiltre dans les fissures de la roche, provoque une augmentation de pression lors du gel de celle-ci, induisant une fragmentation de la roche en petits clastes de la taille des graviers.

Par ailleurs, ces alternances gel-dégel contribuent à la mise en place du système géomorphologique de base de corniche comme l'explique l'abbé Joly (1968). Ce système résulte du démantèlement des corniches de calcaires bajociens par des infiltrations d'eau dans les fissures de la roche. Ces conditions de gel-dégel, favorables aux mouvements de masse, provoquent un affaissement des bords de la corniche et un glissement sur les pentes des pans détachés. Peu visibles à l'affleurement, ces barres rocheuses, dispersées sur les versants argileux liasiques, retiennent derrière elles des matériaux variés (calcaires, limons des plateaux) de différentes tailles (blocs, sables cryoclastiques, argiles) (Petit, 1989) (Figure 1.5).

Toutes ces modifications géomorphologiques ont conduit à une diversification des formations lithologiques à l'échelle locale sur les versants. Ces formations superficielles forment aujourd'hui le substrat de certains sols viticoles.



Figure 1.5 Grèzes litées observées à l’affleurement au lieu-dit « Le Clos du Roy » en appellation Marsannay (gauche). Les éléments lithiques sont de taille infra-centimétrique. Ressaut topographique correspondant à un pan de falaise de Calcaires à Entroques glissé sur le versant marneux au lieu-dit « La Fussière » en appellation Maranges (droite) (Vannier-Petit, 2013).

1.1.2 Les sols de la Côte

Ces diverses formations géologiques ont conduit à une importante diversité des sols sur les versants (Gadille, 1967 ; Mériaux *et al.*, 1981). D’après Mériaux *et al.* (1981) et Leneuf (1988), ce vignoble de versant présente un schéma de distribution des sols en topolithoséquence. Celle-ci se définit comme une succession de solums¹ à morphologies différentes, ordonnés en fonction de leur position sur le versant et de la lithologie (Baize, 2004).

En Côte de Nuits, les sols viticoles de haut de versant sont des sols bruns calcaires² (Calcosols argilo-caillouteux³). Quand la pente augmente, les sols soumis à l’érosion s’amincissent, les sols bruns calcaires laissent place aux rendzines (Rendosols argilo-caillouteux). Quand la pente diminue, les sols bruns calcaires sont de nouveau majoritaires vers le bas de versant. Enfin, dans la partie située en aval, les sols sont composés de sols bruns épais argileux, calcaires ou calciques, parfois légèrement lessivés (Brunisols) (Figure 1.6).

En Côte de Beaune, la topolithoséquence se caractérise par des rendzines en partie amont (Rendosols hypercalcaires argilo-limoneux), évoluant en sols bruns calcaires (Calcosols) dans la partie la plus pentue du versant. Le passage à des pentes faibles sur le versant marque la transition avec les sols bruns calciques épais (Calcisols luviqes). À l’aval, les sols bruns épais et les sols bruns légèrement lessivés recouvrent, en majeure partie, le vignoble installé en secteur de plaine (Figure 1.6).

¹ Organisation des tranches verticales d’une couverture pédologique observable en un lieu. Cette notion de solum remplace l’ancien terme de « profil » (Baize, 2004).

² Classification CPCS, 1967

³ Classification Référentiel Pédologique, 2008

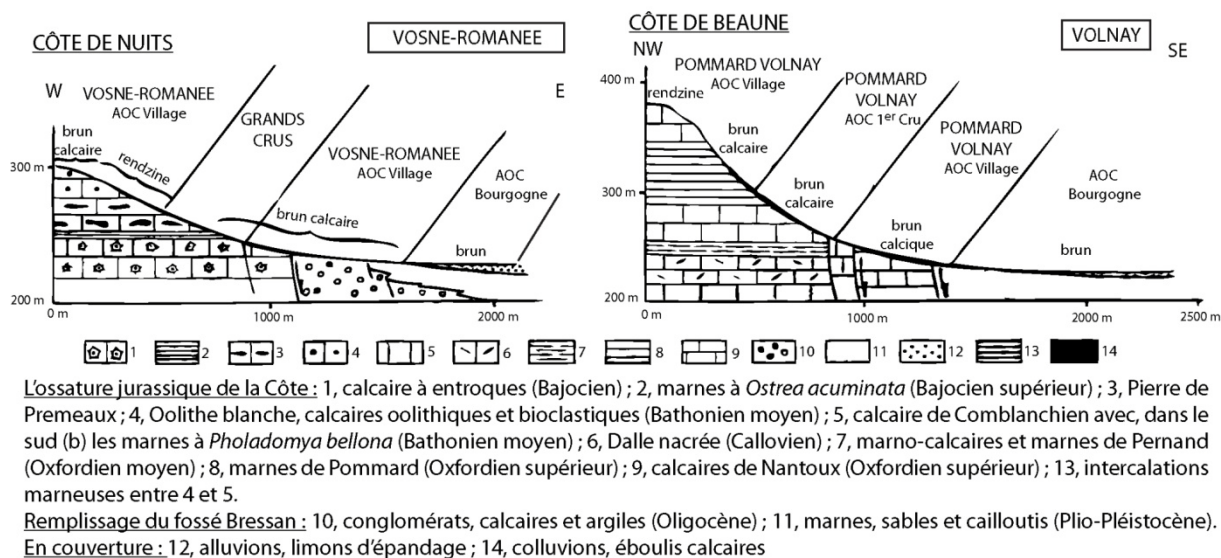


Figure 1.6. Schémas des topolithoséquences en Côte de Nuits et en Côte de Beaune, et limites des AOC (d'après Leneuf, 1988).

Ces topolithoséquences caractérisant les sols viticoles de la Côte présentent de nombreuses variantes, qui s'expliquent par une structuration géologique complexe et une forte diversité lithologique. La distribution spatiale des sols sur la Côte est également influencée par la présence des nombreuses combes qui entaillent le relief principal. Cette distribution spatiale peut être observée sur la carte pédologique de la France au 1/100 000, feuille de Beaune (Figure 1.7) (Chrétien, 1996). Au débouché des combes, le dépôt de formations superficielles (cônes de déjection) conduit au développement de sols bruns calcaires et bruns calciques colluviaux (UC15). Les vallées du Meuzin (Nuits-Saint-Georges) et de la Bouzaize (Beaune) présentent des Fluviosols calcaires hydromorphes (UC1), du fait de la présence constante de la nappe phréatique. Enfin, des épandages à chailles, localement répartis sur la Côte (Nuits-Saint-Georges, Pernand-Vergelesses), conduisent à la formation de sols bruns lessivés (Néoluvisols) (UC22).

Pour étudier la diversité géopédologique de la Côte à l'échelle du versant, trois sites ont été sélectionnés de par leur diversité géologique, représentative de celle de la Côte. Ainsi, ces sites peuvent être utilisés comme secteurs de référence pour produire une cartographie sur un territoire plus vaste (Favrot, 1989). Ces sites sont situés sur les communes de :

- Couchey (Côte de Nuits, 21),
- Aloxe-Corton (Côte de Beaune, 21),
- Cheilly-lès-Maranges (Côte de Beaune, 71).

Les sites de Couchey et d'Aloxe-Corton sont distants de 27 km, ce dernier étant localisé à 6 km au nord de Beaune. Le site de Cheilly-lès-Maranges est situé à 7 km au sud de Beaune. Les secteurs étudiés sont des transects amont-aval dont les limites correspondent à l'extension maximale du vignoble et couvrent une superficie d'environ 11 ha chacun.

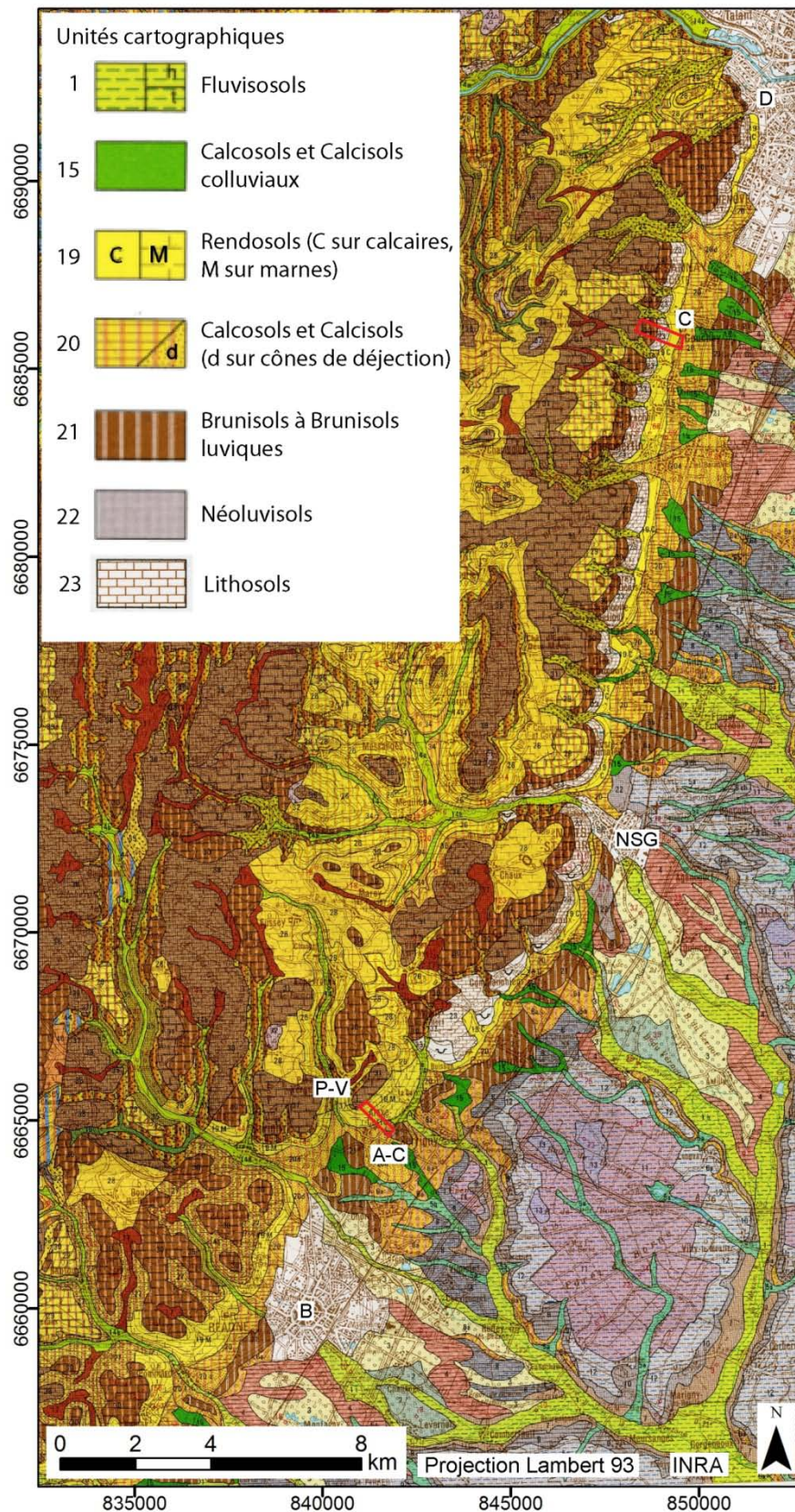


Figure 1.7 Extrait de la carte pédologique de la France au 1/100 000, feuille de Beaune n°12, ciblé sur le secteur de la Côte (Chrétien, 1996). Les communes sont référencées par une lettre majuscule ; D : Dijon ; C : Couchey ; NSG : Nuits-Saint-Georges ; A-C : Aloxe-Corton ; P-V : Pernand-Vergelesses ; B : Beaune. Les encadrés de couleur rouge correspondent aux secteurs d'étude (à l'exception de Monthelie et Cheilly-les-Maranges situés plus au sud).

1.2 Caractéristiques géomorphologiques et géopédologiques des sites d'étude

Le transect d'étude du versant viticole de Couchey, situé en partie septentrionale de la Côte de Nuits, se situe sur la limite administrative des villages de Couchey au nord et de Fixin au sud (Figure 1.8). Le versant est entaillé par deux combes, la Combe de Vaulon au nord et la Combe Laveau au sud. Le transect d'étude, d'une surface de 11 ha, est limité à l'amont par une forêt fermée de feuillus ainsi qu'une forêt ouverte, classées en zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique de type 1 (ZNIEFF1). À l'aval, le secteur d'étude est limité par la route des Grands Crus. Le versant présente une morphologie de forme concave, représentative de la Côte de Nuits, dont l'altitude varie de 386 m à 283 m, et les pentes de 3° à 32°.

Les formations géologiques affleurant sur le versant s'étagent du Lias (Jurassique inférieur) au Callovien (Jurassique moyen) (Figure 1.9). Cela correspond à la plus grande diversité géologique que l'on puisse observer sur les versants de la Côte de Nuits. La zone amont présente principalement des calcaires très fins, compacts, de couleur grise, sublithographiques ; il s'agit de la formation des Calcaires de Comblanchien (formation J2c) (Figure 1.8). En contrebas, les Calcaires de Comblanchien sont en contact par faille avec des calcaires bioclastiques, de couleur beige-orangé, correspondant aux formations des Calcaires de Ladoix et des Calcaires de Dijon-Corton (formation J3-2). Les Calcaires de Comblanchien affleurent à nouveau dans la partie médiane du versant. Des formations colluviales de versant drapent la partie aval du versant (formation V).

Sur le versant viticole de Couchey, les sols évoluent selon le modèle de topolithoséquence de la Côte de Nuits. Trois unités cartographiques principales couvrent le secteur d'étude (Figure 1.7). L'UC 23, située à l'amont, se caractérise par un complexe d'affleurements rocheux, blocs et sols très superficiels, humifères, argilo-limoneux, non calcaires, non ou peu caillouteux, de type Lithosols ; l'UC 19C de sols calcaires et caillouteux, à textures variées, peu profonds (< 40 cm), sensibles à l'érosion et formés sur des calcaires durs, de type Rendosols. L'UC 20, positionnée en zone de piedmont, présente des sols calcaires, plus ou moins caillouteux, limono-argileux à argileux, sains, moyennement profonds à profonds (40 cm à 1 m), qui se développent sur des colluvions de bas de pente et appartiennent aux Calcosols et Calcisols.

En Côte de Beaune, le premier secteur d'étude, d'une surface de 11 ha, se situe dans la partie septentrionale de la Côte de Beaune, sur le versant exposé à l'est de la commune d'Aloxe-Corton. Le transect d'étude s'étend du bois de Corton qui borde les premières parcelles de vigne à l'amont, jusqu'à la route départementale D974 qui marque l'extension maximale du vignoble en direction de la plaine. Le versant présente une morphologie de forme convexo-concave, typique de la Côte de Beaune. L'altitude varie de 335 m à 233 m sur le transect, et les pentes de 0° à 30°.

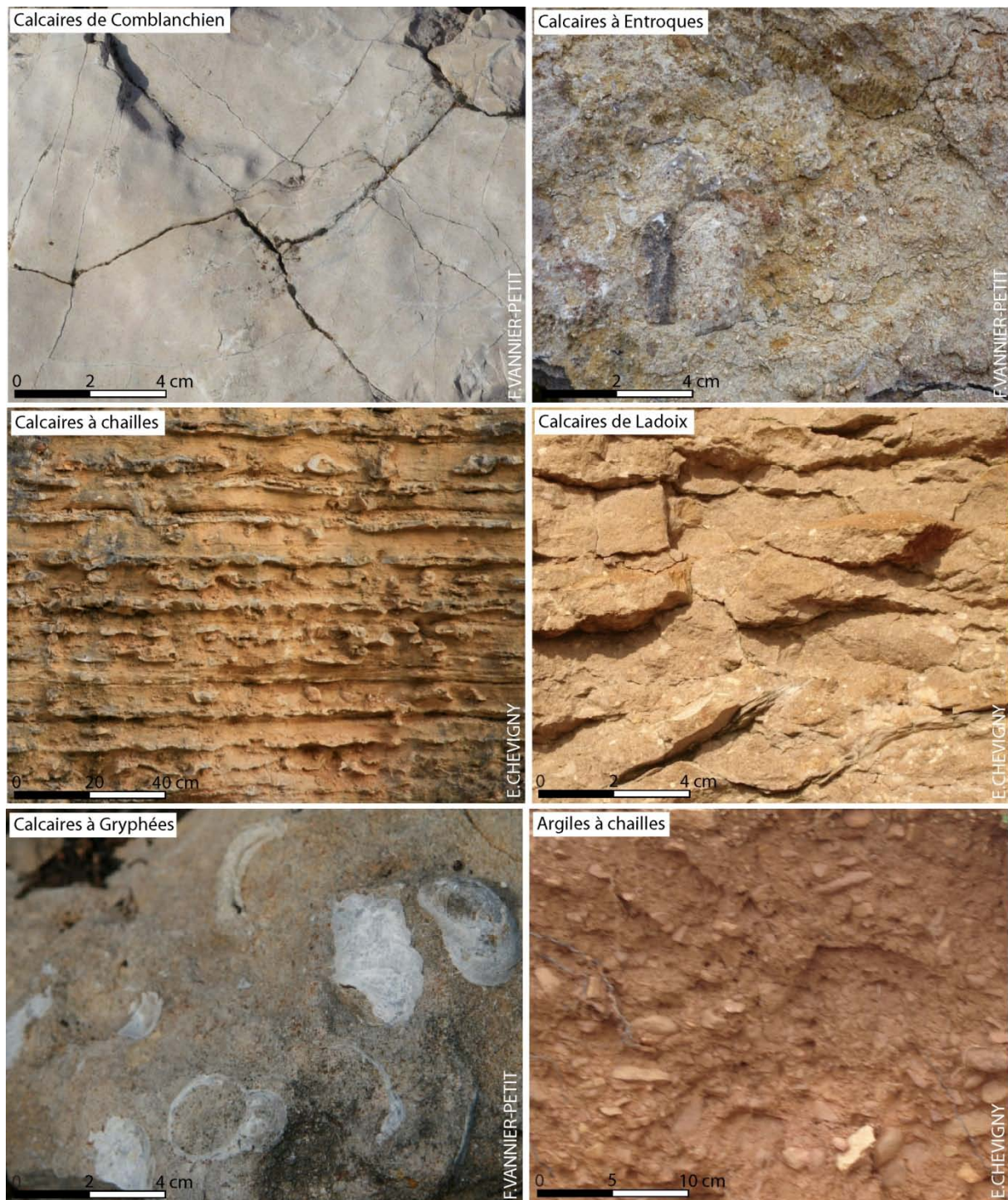


Figure 1.8 Illustration de diverses formations géologiques observées sur la Côte présentant divers faciès sédimentaires.

Les formations géologiques constituant cette partie de versant s'étagent du Bathonien à l'Oxfordien, avec des formations Plio-Quaternaire en zone de piedmont. Sur la carte géologique de la France au 1/50 000 (feuille de Beaune, n°526), les grandes unités géologiques qui couvrent le versant peuvent être observées (Figure 1.9). À l'amont, les plus hautes parcelles de vigne sont plantées sur une

formation marno-calcaire, de couleur beige, partiellement silteuse, avec des niveaux de calcaires à chailles, datant de l'Oxfordien : les Marnes de Pernand (formation A/J5-6a) (Figure 1.8). La limite basale de cette formation se matérialise par un repère stratigraphique, datant de l'Oxfordien moyen : l'Oolithe Ferrugineuse (formation J5a). Dans la partie médiane, une formation de versant composée de limons à cailloutis recouvre des calcaires bioclastiques : les Calcaires de Ladoix et les Calcaires de Dijon-Corton (formation V/J2d-3). À l'aval, les limons à cailloutis de la Côte (formation V) recouvrent partiellement les formations palustro-lacustres, marneuses, riches en silts et en micas, de couleur grise, datant du Plio-Quaternaire : les Marnes de Bresse (formation pIV).

La distribution des sols du versant viticole d'Aloxe-Corton se caractérise par une topolithoséquence définie par trois unités cartographiques (Figure 1.7). À l'amont, l'UC 19M délimite des Rendosols caillouteux, peu épais, formés sur des alternances marno-calcaires ; dans le versant, l'UC 20d correspond à des Calcosols et Calcisols qui se développent sur des cônes de déjection. L'UC 21 située à l'aval, présente des sols épais, non caillouteux, argilo-limoneux en surface, argileux avec signes d'hydromorphie en profondeur, de type Brunisols à Brunisols luviqes.

À l'extrémité méridionale de la Côte de Beaune, sur le versant de Cheilly-lès-Maranges, le secteur d'étude, d'une superficie de 11 ha, est limité à l'amont par la falaise de Calcaires à Entroques, et à l'aval par une ancienne ligne de chemin de fer, transformée en voie verte. L'altitude s'étage de 390 m à 260 m, les pentes varient de 1° à 25°. Le versant présente une morphologie convexo-concave avec un replat dans la partie médiane. L'exposition du versant est particulière – exposition au sud – et résulte, en partie, de l'effondrement d'une grande dépression d'orientation NE-SO, au Carbonifère (359 – 299 Ma), au cours de l'orogénèse varisque responsable de la formation du bassin houiller de Blanzky-Le Creusot. Le secteur pénéplané à la fin du Permien (299 – 251 Ma) a enregistré par la suite des dépôts d'origine marine au cours du Mésozoïque. La mise en place de l'effondrement du fossé bressan au cours de l'Oligocène a fait rejouer les anciens accidents d'orientation NE-SO, en créant le relief actuel. Cette complexité tectonique du secteur confère à l'aire d'appellation « Les Maranges » une diversité lithologique que l'on n'observe pas sur les autres aires d'appellation de la Côte.

Les formations géologiques qui constituent le versant de Cheilly-lès-Maranges s'étagent du Rhétien-Hettangien (Trias) jusqu'au Bajocien (Jurassique inférieur) (Figure 1.9). Au pied de la falaise de Calcaires à Entroques (formation J1a), les formations lithologiques sont principalement marneuses, formations des marnes toarciennes (formation l7-8) et pliënsbachiennes (formation l6a). Les Calcaires à Entroques sont des calcaires grenus contenant de nombreux débris d'entroques, de couleur brune (Figure 1.8). Les marnes toarciennes sont constituées de marnes et d'argiles de teinte sombre, riche en bélemnites. Les marnes pliënsbachiennes sont composées de marnes micacées gris bleuté à noires, renfermant des nodules de pyrite. Une formation calcaire, de faible épaisseur, marque la transition entre les marnes toarciennes et les marnes pliënsbachiennes : il s'agit des Calcaires à Gryphées géantes (formation l6b). Ces calcaires sont parfois argileux, de couleur gris à brun, avec des gryphées géantes éparées, ils alternent avec des petits niveaux marneux. À l'aval, la formation des Calcaires à Gryphées du Sinémurien affleure (formation l3-5). La formation est composée de calcaires micritiques compacts gris-bleu organisés en bancs décimétriques séparés par des joints marneux sombres. Enfin, dans la partie la plus méridionale du versant, une formation argilo-silteuse avec des passées de grès fins affleure. Elle correspond aux dépôts de la transgression marine de la fin du Trias (formation t10-l2).

Le secteur d'étude situé sur la commune de Cheilly-lès-Maranges ne figurant actuellement sur aucune carte pédologique, la description des sols du versant n'est pas traitée ici.

Sur ces sites d'études, la culture de la vigne présente depuis plusieurs siècles a façonné au cours du temps le paysage viticole que l'on connaît actuellement.

1.3 Le paysage viticole

1.3.1 Le vignoble côte-d'orien : un vignoble pluriséculaire

Les premières mentions textuelles du vignoble côte-d'orien datent du célèbre panégyrique des habitants de la ville d'Autun (*Augustodunum*) adressé à l'empereur Constantin, datant de 312 apr. J.-C. La traduction de ce document latin proposée par Galletier (1952) témoigne de la présence de vignes dans le territoire du *Pagus Arebrignus*, correspondant aux actuelles Côte de Beaune et Côte de Nuits (Figure 1.10A). Cette traduction tend à localiser la position du vignoble à l'amont de la plaine. Une nouvelle traduction du document, au regard d'observations de terrain, proposée par Garcia (2011b), permet de préciser la localisation de la vigne en secteur de plaine, comme l'a déjà indiqué Brun (2005).

« Bien plus ce fameux pagus Arebrignus lui-même est bien vainement objet d'envie puisqu'on n'y voit de culture de la vigne qu'en une seule situation ; en arrière, en effet, le reste du terrain ne présente que lieux impraticables de forêts et de grottes, sûres tanières de bêtes sauvages. Or, cette fameuse plaine qui est située

en dessous et qui s'étend jusqu'à la Saône, fut, à ce que j'entends dire, certes charmante autrefois, quand l'évacuation des eaux était assurée par un entretien continu grâce à des fossés ouverts qui drainaient les limites de chaque domaine. Mais maintenant, en raison des canaux obstrués par les dégradations, même si une terre située dans le bas est fertile, elle est transformée en mares et en marécages. Ainsi les vignes mêmes, qui sont admirées par ceux qui ne connaissent pas ce qu'elles étaient, sont à ce point amoindries par la vieillesse qu'elles ont du mal à profiter maintenant des soins qu'on leur prodigue. En effet les racines des ceps, dont nous ne savons presque plus l'âge, empêchent de donner aux fosses une profondeur normale à cause de multiples et énormes replis. En conséquence, les provins se trouvent à découvert, lavés par les pluies, brûlés par le soleil. Et nous ne pouvons pas, comme c'est courant en Aquitaine et dans d'autres provinces, allouer n'importe où un terrain à une nouvelle vigne, car sur la partie supérieure ce n'est qu'une suite de rochers, et dans la partie basse, une terre de maigre qualité exposée aux gelées.»

Panegyriques latins VI, 4-8 ; traduction : J.-P. Garcia et N. Fick

Comme le souligne Brun (2005), ces vignes semblent être assez anciennes puisque les ceps se sont régénérés tant de fois que leurs racines descendent profondément dans le sol. L'interprétation de ce document a conduit Dion (1950) à proposer une mise en culture de la vigne sur la Côte au début du III^e s. apr. J.-C. Cette date d'apparition du vignoble en Côte-d'Or a été réfutée par Thevenot (1951), qui démontra à partir de données archéologiques que l'on ne trouvait plus d'amphores à vin, en provenance d'Italie ou du sud de la Gaule, à partir du milieu du II^e s. apr. J.-C. Cette disparition des amphores a été interprétée comme la mise en place d'une production viticole locale à la fin du I^{er} s. apr. J.-C. D'autres éléments archéologiques ont mis en évidence la présence d'une activité viticole locale côte d'orientale au cours du I^{er} s. apr. J.-C. (Gauthier et Joly, 2003). Parmi ces éléments, on trouve des pépins de raisin dans la *villa* viticole des Tuillières à Selongey (21) datés de 254 apr. J.-C. (Vernou, 2009), des *villas* gallo-romaines à descente de caves en plaine de Saône (Rouvres-en-Plaine, Brognon) (Goguet, 1970 ; Huygen, 1988) et la présence d'outils viticoles dans de nombreuses localités. Tous ces éléments textuels ou archéologiques sont des témoins indirects d'une activité viticole en Côte-d'Or durant l'Antiquité (Chevrier et Garcia, 2011). Récemment, les travaux de Garcia *et al.* (2010) ont mis au jour l'existence d'une vigne gallo-romaine sur la commune de Gevrey-Chambertin (Figure 1.10B). Cette découverte est, aujourd'hui, le premier argument direct et le plus ancien d'une viticulture antique en Côte-d'Or. Les éléments de datation et la taille des fosses suivant une métrique romaine ont permis de dater l'occupation de ce vignoble de la fin du I^{er} s. apr. J.-C. jusqu'au III^e s. apr. J.-C.

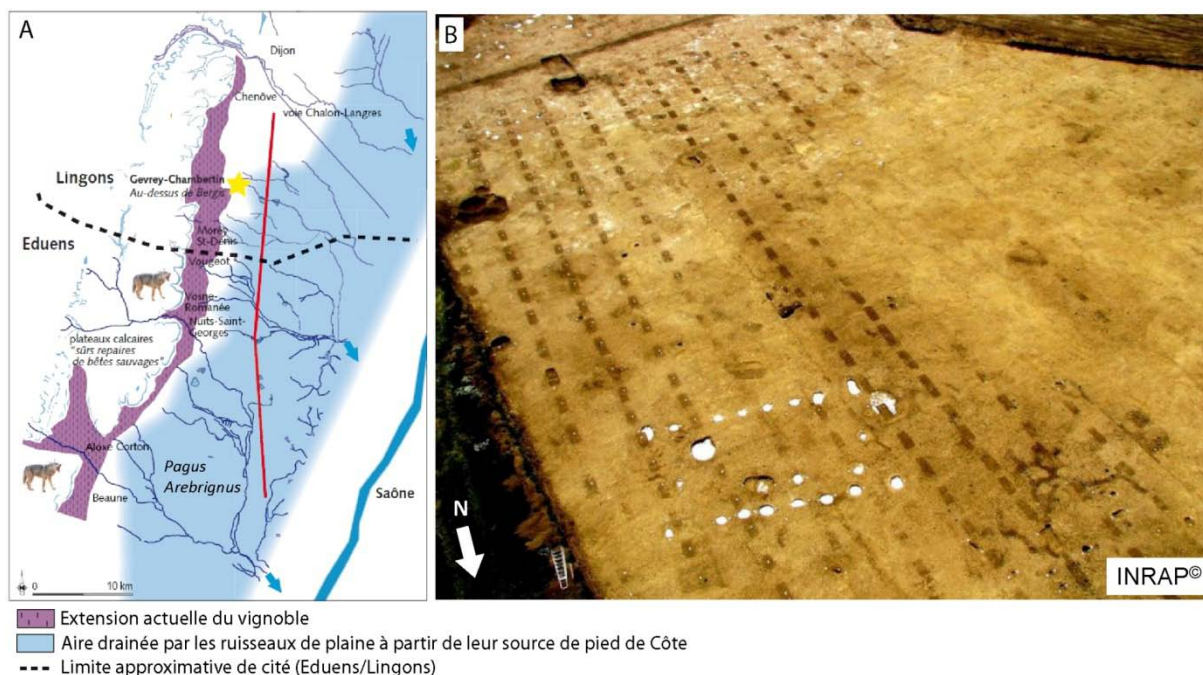


Figure 1.10 Localisation du Pagus Arebrignus, situé au niveau des actuelles Côte de Nuits et Côte de Beaune (A, d'après Chevrier et Garcia, 2011). Photographie aérienne du vignoble gallo-romain de Gevrey-Chambertin, au lieu-dit « Au-dessus de Bergis ». 300 fosses alignées sont réparties sur 26 rangs (B, in Garcia, 2009, photographie INRAP®).

À ce jour, aucune trace textuelle et/ou archéologique ne permet d'affirmer la présence de vignoble implanté en situation de versant à l'Antiquité (Garcia *et al.*, 2008). L'indice le plus ancien remonte au VI^e s., dans la description de la ville de Dijon par l'évêque Grégoire de Tours (cité dans Garcia *et al.*, 2010). Ce dernier relate que « du côté de l'occident sont des montagnes très fertiles, couvertes de vignes, qui fournissent aux habitants un si noble Falerne... ». Plusieurs datations de sols viticoles, réparties sur la Côte, ont permis de dater les premières implantations de la vigne en contexte de versant, probablement de l'époque carolingienne, avec une nette densification au cours du Moyen-Âge (Garcia *et al.*, 2008). Le développement de la viticulture en Côte-d'Or serait alors contemporain de l'implantation d'établissements religieux, cisterciens et bénédictins, à proximité de la Côte (Dion, 1959). C'est ainsi que l'abbaye de Cîteaux a acquis de nombreuses parcelles au cours du temps par donations et achats de parcelles, en créant de nouveaux domaines (Langandré, 2001), alors que d'autres possédaient déjà les leurs, comme l'évêque d'Autun à Alise et Chenôve, et le duc de Bourgogne à Pommard (Richard, 2001). Par ailleurs, les vignobles étaient également la propriété de riches aristocrates. Cette époque du Moyen-Âge fut marquée par des améliorations des techniques vitivinicoles entreprises par les moines, et par le développement de la réputation du vignoble bourguignon en Europe due à l'extension du Duché de Bourgogne dès le XIV^e s. En Bourgogne, depuis la fin du Moyen-Âge, les relations entre le goût des vins et leurs lieux de production ont été observées (Garcia et Labbé, 2011). Cette identification des vins aux lieux a émergé à la fin du XVII^e s.

et surtout au début du XVIII^e s, sans pour autant suivre des normes (Garcia et Labbé, 2012). Les travaux de Garcia et Labbé (2012), réalisés sur le baillage de Dijon du XVI^e s. au XVIII^e s., ont démontré que la hiérarchisation des vins au Moyen-Âge était définie selon un modèle centripète autour de la ville de Dijon. À la fin du XVII^e s., ce modèle du « lieu-prestige » évolua en modèle de « lieu-typicité », où l'on chercha à mettre en valeur la « personnalité » de chaque cru (Labbé et Garcia, 2012). Cette relation entre le lieu et la qualité du vin a conduit à la délimitation d'espaces géographiques qualitatifs, dénommés « *climats* ». Cette conceptualisation de l'espace géographique a par la suite été argumentée par les facteurs naturels qui caractérisent ces espaces, conduisant à l'élaboration des premières classifications des vins de Bourgogne, dont la première fut proposée par l'abbé Arnoux (1728).

Suite à la Révolution Française, les biens du clergé furent confisqués par l'État, et le vignoble connut alors un important morcellement et des changements de propriétaires. Ce morcellement fut amplifié par l'instauration du Code civil sous Napoléon 1^{er} et par l'héritage à parts égales des biens. Au cours des XVIII^e et XIX^e s., le développement des maisons de négoce contribua à développer le commerce des vins de la Côte. Puis, au XIX^e s., la construction du chemin de fer en France facilita le commerce du vin sur le territoire, et les vins des régions du Sud furent alors vendus dans les régions du Nord, ce qui contribua à diminuer la production côte-d'orientale (Combaud, 2008). La hiérarchisation des vins s'affina ; de nouvelles classifications furent proposées par Morelot (1831), puis Lavalley (1855).

À la fin du XIX^e s, le vignoble français est touché par l'invasion d'un insecte parasite conduisant à la destruction du cep de vigne, le phylloxéra. Les premières attaques du phylloxéra ont lieu en Côte-d'Or au cours de l'été 1878 et s'étendent très rapidement (Garrier, 1989). En l'espace de dix ans, l'ensemble du vignoble de la Côte est atteint. Les traitements appliqués pour réduire l'invasion du parasite sont onéreux et ne permettent pas la régénération des ceps atteints. La solution trouvée contre le phylloxéra est la greffe des vignes françaises sur des porte-greffes américains, naturellement résistants au parasite. En 1900, l'ensemble du vignoble de la Côte est reconstitué. Cette crise du phylloxéra eut un impact conséquent sur le vignoble et sur l'activité vitivinicole côte-d'orientale, avec une diminution de 26 % de la superficie du vignoble et un fort déclin démographique, provoqué par la diminution du besoin en main-d'œuvre (Bourgeon, 2001).

Le début du XX^e s. est marqué par un événement majeur, la Première Guerre mondiale, qui entraîne une diminution de la production viticole côte-d'orientale, du fait de nombreuses pertes humaines et donc d'une diminution de la main-d'œuvre. Les premières classifications du XIX^e s. sont formalisées par les Appellations d'Origines Contrôlées (AOC) définies en 1936, suite à la création de l'Institut national des Appellations d'origine des vins et des eaux-de-vie, devenu l'Institut National des Appellations d'Origine (INAO) en 1947, puis l'Institut National de l'Origine et de la Qualité, en 2007.

Tous ces évènements ont façonné le vignoble que l'on connaît aujourd'hui.

1.3.2 Structuration et entretien du vignoble

1.3.2.1 Structuration du vignoble

La mise en culture de la vigne sur les versants au cours du Moyen-Âge a conduit à une certaine structuration du paysage viticole. Des espaces, alors ouverts, ont été fermés par des murs pour former les clos viticoles. Ces derniers marquaient l'emprise foncière des seigneurs, des moines, des chapitres et des évêques (Dumas, 2007), et permettaient surtout de protéger la vigne contre les animaux sauvages, les vols et les dégradations. Les murs en pierres sèches dénommés « meurgers » en Bourgogne ont probablement été érigés à cette époque. Lors des travaux de défonçage ou d'entretien du sol, les cailloux étaient retirés des parcelles et entassés sous forme de tas ou d'amas linéaires, le plus souvent le long des limites parcellaires (Landrieu and Pitiot, 2012). La datation de ces meurgers et leurs fonctions sont encore mal connues. Étaient-ils de simples épierrements des sols viticoles, des parcs pour les animaux (Dumas, 2007), voire, pour certains, d'anciennes zones d'habitats (Landrieu et Pitiot, 2012) ?

Le milieu du XIX^e s. a été marqué, au cours de la Révolution industrielle, par une avancée des techniques viticoles qui ont conduit au paysage viticole actuel. Suite aux recommandations du docteur Jules Guyot (Bourgeon and Jacquet, 2010), le palissage des vignes en rangs a été mis en place et a constitué l'une des avancées les plus remarquables. Il permet d'optimiser l'éclaircissement reçu par la plante et d'améliorer l'aération des grappes, ce qui a pour effet d'offrir une meilleure maturation à la grappe et d'éviter le développement de la pourriture (Bizot *et al.*, 2011). La plantation des vignes en rangs a rendu possible l'introduction du cheval et des premières machines agricoles pour l'entretien du sol.

Dans les années cinquante, l'arrivée du tracteur enjambeur au sein du vignoble a conduit à une nette modification du paysage viticole. Pour faciliter l'utilisation des enjambeurs, de nombreux meurgers, haies, talus ont été détruits. Dans les secteurs les plus touchés par l'érosion, des systèmes de drainage, de collecteurs d'eau ont été construits pour récolter les eaux de ruissellement. De plus, pour limiter les pertes en terre, des murs de soutènement ont été bâtis dans les parties basses des parcelles. Les surfaces de production en AOC ont alors augmenté en Côte-d'Or de l'ordre de 33 % pour la période 1970-2000, atteignant une superficie de 9500 hectares en 2000 (Agreste Bourgogne, 2002), notamment par le déboisement et le défrichement des parties hautes des versants pour la plantation de nouvelles vignes. C'est le cas du versant viticole de Couchey dont la partie amont fut plantée dans les années 1985 (Figure 1.11). Les parcelles viticoles ont alors subi de nombreux remembrements. Les petites parcelles contiguës ont été rassemblées pour former des parcelles de taille plus importante, facilitant ainsi l'entretien mécanique du vignoble. Les nombreux vergers présents au sein du vignoble

ont été arrachés et remplacés par de la vigne. L'utilisation de l'enjambeur a nécessité une plantation des rangs dans le sens de la pente sur les versants et la mise en place de plates-formes de retournement en haut et en bas des parcelles (Brenot, 2007). L'ensemble de ces modifications a abouti à une homogénéisation du paysage viticole, que l'on peut qualifier aujourd'hui de « paysage de monoculture intensive ».

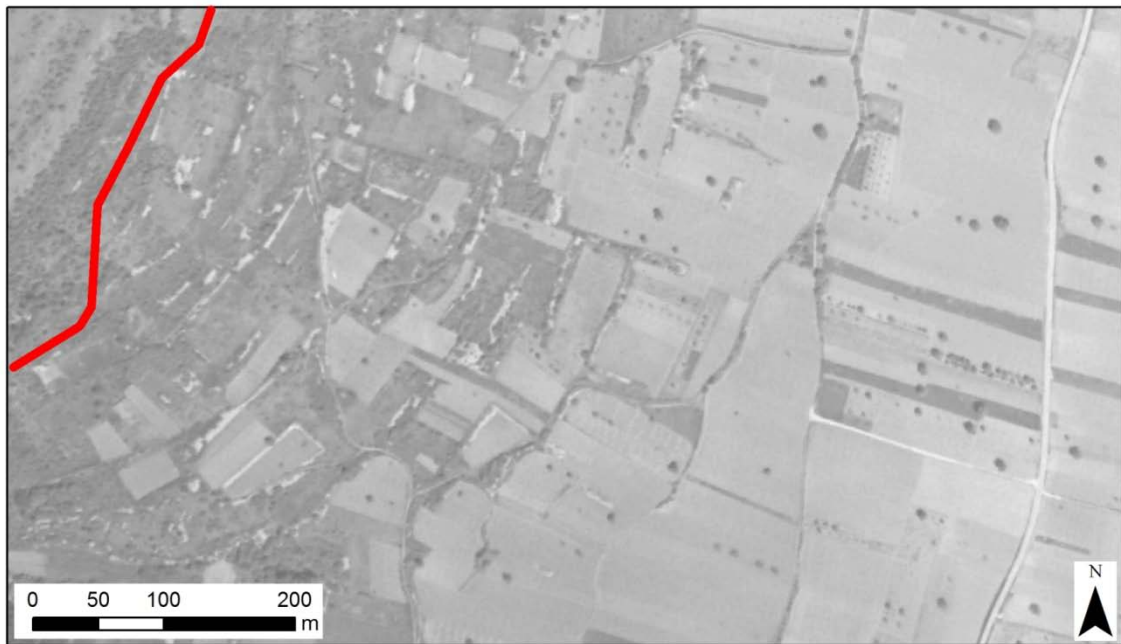


Figure 1.11 Photographie aérienne du versant viticole de Couchey en 1953. La ligne rouge représente la limite occidentale du vignoble actuel (IGN, 1953). Les tons foncés caractérisent des zones de pâtures ou de friches. Les tons clairs mettent en évidence les zones cultivées en vigne.

1.3.2.1 Entretien du vignoble actuel

La vigne nécessite un entretien tout au long de l'année qui est le plus souvent réalisé, actuellement, à l'aide d'un tracteur enjambeur qui va effectuer la quasi-totalité des travaux d'entretien de la vigne (traitements, travail du sol, rognage, vendange). Ces travaux d'entretien sont réalisés sur la Côte suivant un calendrier qui peut évoluer en fonction des conditions météorologiques du millésime (Figure 1.12). Les périodes automnales et hivernales sont propices aux travaux de préparation du sol pour les nouvelles plantations (arrachage, défonçage) et aux travaux de taille (effectués manuellement). Au printemps, les sols sont travaillés (griffage ou débattage) et enrichis par l'apport d'engrais et d'amendements ; les nouvelles pousses de vignes sont mises en place sur les palissages (attachage, relevage), tandis que les premiers traitements ont lieu au mois de mai. Pendant la période estivale, les traitements phytosanitaires se poursuivent ; les vignes sont rognées, et le travail du sol permet également de supprimer les adventices présentes en surface. La fin du cycle se termine par la

vendange le plus souvent réalisée au cours du mois de septembre. L'utilisation de l'enjambeur pour ces divers travaux peut entraîner jusqu'à 15 à 20 passages par an. Le poids important des enjambeurs (plusieurs tonnes), en conduite conventionnelle, entraîne un tassement du sol dans l'inter-rang (Lagacherie *et al.*, 2006). Du fait de la forte densité de plantation du vignoble de la Côte (10 000 pieds/hectare) – une plantation tous les mètres –, on peut estimer que 50 % de la surface plantée présente une compaction de surface ou de subsurface.

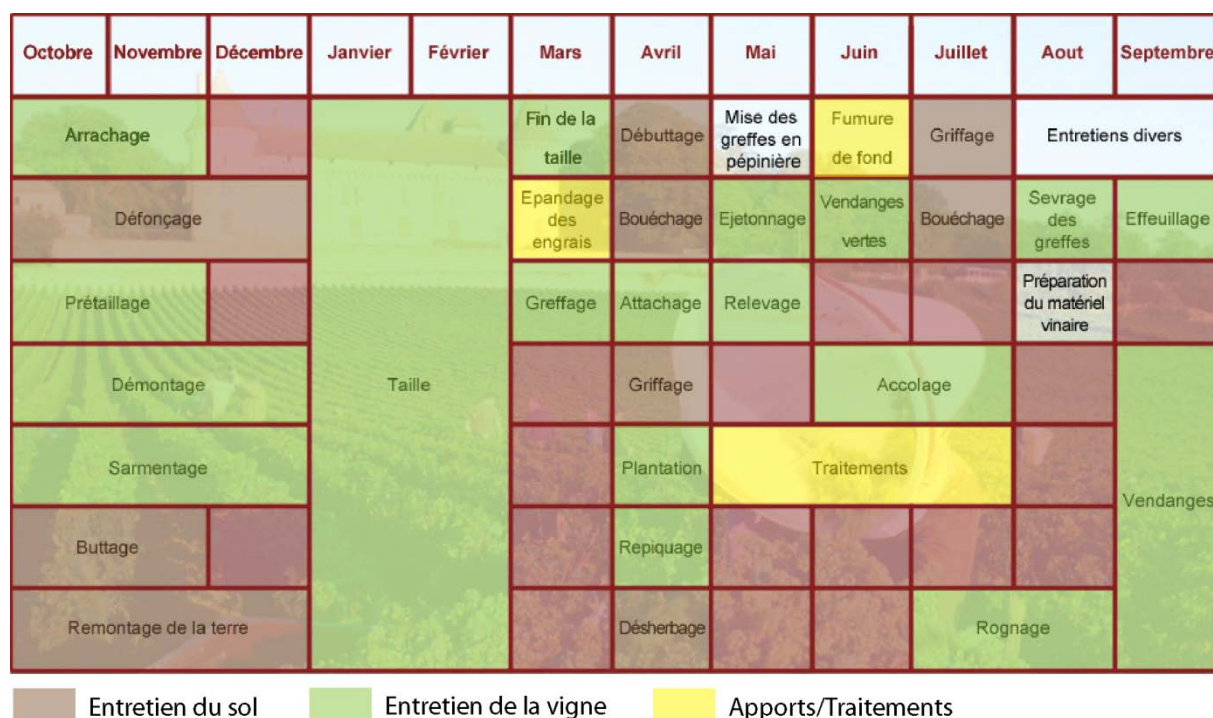


Figure 1.12 Calendrier des différents travaux de la vigne réalisés au cours d'une année en Bourgogne (source : BIVB)

Pour réaliser ces différents travaux, plusieurs pratiques particulières peuvent être employées. Le travail du sol s'effectue selon deux pratiques culturales : le griffage et le buttage. Le griffage consiste à griffer le sol en surface avec un outil à dents, sur une profondeur de 5 à 10 cm, afin de supprimer les adventices, et de casser la couche de surface durcie en améliorant la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol en surface. Cependant, le non-travail du sol en profondeur ne permet pas de détruire les zones de compaction engendrée par le passage des engins agricoles. Le buttage est un labour plus profond réalisé à la fin de l'automne avec un soc : la terre de l'inter-rang est ramenée sur le cep par le soc et forme ainsi une butte de terre. Cette technique permet de protéger le cep contre le gel noir hivernal ($< -9^{\circ}\text{C}$), qui peut conduire à sa mort. L'opération inverse, le débutage, est réalisée au printemps, quand les risques de gel sont plus faibles. Cette pratique est principalement utilisée pour les vignes situées en plaine.

La destruction des adventices peut également être réalisée par désherbage chimique intégral. Ce mode d'entretien, très répandu durant les années 80-90, est de nos jours de moins en moins utilisé, du fait des conséquences qu'il a sur la microflore des sols (diminution de la biomasse et de la diversité microbienne) et sur l'environnement proche du vignoble (pollution des eaux) (GREPPAL, 2005). Cet abandon du désherbage chimique intégral est également observé sur la Côte, comme en témoigne l'appellation Marsannay où seulement 10 % des viticulteurs utilisent encore cette pratique. On revient de plus en plus au travail du sol. Par ailleurs, la viticulture biologique et la biodynamie se développent en Côte-d'Or, et représentent aujourd'hui plus de 10 % de la surface en production (Chambre d'Agriculture de la Côte-d'Or).

La technique de l'enherbement est également utilisée dans certaines parcelles ; elle consiste à maintenir un couvert végétal, naturel ou bien semé, dans le rang et/ou l'inter-rang. Cette technique présente l'intérêt de diminuer les risques d'érosion et également de contrôler la vigueur de la vigne (Lagacherie *et al.*, 2006 ; Tournebize, 2001). Les parcelles enherbées sont généralement localisées dans des zones où la réserve utile en eau des sols est importante, pour limiter les effets de concurrence entre l'herbe et la vigne. Sur la Côte, l'enherbement est principalement pratiqué dans la partie aval des versants. La concurrence va également être observée au niveau des éléments nutritifs (azote, potassium, oligo-éléments), et l'enherbement va donc avoir un impact sur le développement et la production de la vigne (Tournebize, 2001). Cette diminution de la production est observée dans le cas de sols pauvres et superficiels et sera nulle dans le cas de sols fertiles et profonds (GREPPAL, 2005). Pour limiter les effets de l'enherbement sur la vigne, plusieurs dispositifs peuvent être utilisés : enherbement permanent ou temporaire, enherbement d'un rang sur deux, enherbement des rangs de traitement seulement.

L'ensemble de ces caractéristiques naturelles, anthropiques et historiques a conduit, au cours du temps, à délimiter des zones présentant des aptitudes spécifiques, e.g. les terroirs viticoles de la Côte.

1.4 La notion de « terroir »

La Bourgogne est un exemple type de la notion de terroir. À elle seule, elle détient le quart des AOC françaises (100 appellations en Bourgogne), pour seulement un peu plus de 6 % des vignes bénéficiant d'une appellation (Hinnewinkel, 2004). Cette notion de terroir s'est imprimée dans l'espace du vignoble de la Bourgogne lors de la mise en place des appellations d'origine contrôlées (AOC) (Combaud, 2008).

Le terroir viticole résulte d'interactions entre des facteurs naturels du milieu (le sol, le sous-sol, l'altitude, la pente, l'exposition...), des facteurs climatiques, des facteurs biologiques (cépage,

porte-greffe...) et des facteurs anthropiques (pratiques vitivinicoles, paramètres socio-économiques, histoire du vignoble...) (Vaudour, 2003 ; Hinnewinkel, 2004 ; Van Leeuwen et Seguin, 2006 ; Garcia et Labbé, 2012). La notion de terroir n'est pas identique suivant les auteurs : certains privilégient le rôle du sol (Campy et Macaire, 1989), d'autres la géologie (Fanet, 2008 ; Pomerol, 1984) ou encore le climat (Carbonneau *et al.*, 2007). Une définition institutionnelle a été proposée par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) en 1998, qui a été précisée en 2006. Le terroir se définit alors comme :

« un espace géographique délimité dans lequel une communauté humaine construit, au cours de son histoire, un savoir collectif de production fondé sur un système d'interactions entre le milieu physique et biologique, et un ensemble de facteurs humains. Les itinéraires techniques ainsi mis en jeu révèlent une originalité, confèrent une typicité et aboutissent à une réputation pour un bien originaire de cet espace géographique ».

L'Office International de la Vigne et du Vin (OIV) a donné une définition du terroir vitivinicole, adoptée par tous les états membres, selon laquelle :

« Le “terroir” » vitivinicole est un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir-faire collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace. Le “terroir” inclut des caractéristiques spécifiques du sol, de la topographie, du climat, du paysage et de la biodiversité. » (OIV, 2010)

Aujourd'hui, le terroir est étudié par diverses approches, qui dépendent des objectifs scientifiques et/ou techniques des études. Même si la communauté scientifique s'est accordée sur une définition du terroir qui englobe à la fois des facteurs naturels et humains, il est rare de trouver des études qui caractérisent le terroir par une réflexion autour de ces deux facteurs. D'un côté, le terroir est étudié suivant une démarche de déterminisme environnemental, de l'autre le déterminisme peut être aussi social et culturel. C'est pourquoi il est le plus souvent étudié sous différents angles, *i.e.* historico-administratifs, physiques, physiques paysagers, statistiques (Combaud, 2008). Malgré cette réflexion engagée sur la notion de terroir, le plus souvent, le sol domine pour conceptualiser le terroir (Rouvellac, 2013).

1.5 Conclusion

La Côte présente une importante diversité, tant géologique que pédologique, à l'échelle du versant. Cette diversité peut être observée à l'échelle du site d'étude (diversité intra-site) mais également à l'échelle de la Côte, par l'investigation de différents sites (diversité inter-site). Les contextes géologiques spécifiques de ces secteurs, représentatifs de la Côte, peuvent servir de zones de référence pour des cartographies à grande échelle sur des étendues plus vastes. La carte pédologique à haute résolution de ces secteurs permet de déterminer la diversité géopédologique de petites régions naturelles. À cette échelle d'acquisition, les unités fonctionnelles du sol sont caractérisées, ce qui permet ainsi d'utiliser ces cartes pour divers objectifs, tels que les zonages viticoles, la viticulture de précision, ou encore les cartes d'aléas érosifs.

La mise en culture de la vigne sur la Côte depuis plusieurs siècles a contribué à la mise en place du vignoble que l'on connaît aujourd'hui. Cette culture pluriséculaire a engendré des modifications du milieu physique qui sont liées à l'activité humaine sur ces versants. Il est donc nécessaire d'étudier l'impact de l'homme sur les sols viticoles pour comprendre leur mise en place et leur fonctionnement actuel. L'évolution des sols viticoles, qui a conduit à leur diversification, n'est pas uniquement liée aux activités actuelles (pratiques culturelles) mais également aux activités historiques (occupation du milieu, pratiques culturelles passées, remembrement parcellaire) qui, depuis des siècles, ont façonné le paysage viticole. Le sol étant reconnu comme un paramètre important contribuant en partie à définir les terroirs viticoles, son étude à haute résolution permettra une meilleure connaissance des terroirs viticoles. Au-delà des questions scientifiques, les enjeux patrimoniaux et culturels sont également importants pour la connaissance et la valorisation des terroirs viticoles, alors que la Côte demande le classement de ses *climats* au patrimoine mondial de l'UNESCO.

Chapitre 2 - Cartographie du sol et du substrat géologique : outils et méthodes

Chapitre 2. Cartographie des sols et du substrat géologique : outils et méthodes

Introduction

La caractérisation géologique et pédologique peut être réalisée par le biais de diverses méthodes cartographiques. Précédemment, les méthodes de cartographie conventionnelles étaient majoritairement employées, mais depuis une vingtaine d'années, les avancées technologiques ont permis d'introduire de nouvelles techniques de cartographie basées sur l'imagerie. Ces techniques permettent de spatialiser les propriétés physico-chimiques de façon « pseudo-continue », de l'état de surface du sol, du sol et/ou du substrat géologique.

Ce chapitre vise, dans un premier temps, à présenter les différentes méthodes conventionnelles de cartographie géologique et pédologique. Leur utilisation pour la cartographie de la diversité géopédologique en secteur viticole est ensuite discutée. Puis, l'inventaire des données géologiques et pédologiques disponibles sur la Côte viticole est réalisé afin d'évaluer si ces données sont adaptées aux études des terroirs.

Dans un second temps, le potentiel de la télédétection par imagerie et les investigations géophysiques, comme outils d'aide à la cartographie géopédologique est évalué. Le principe de fonctionnement de ces deux techniques, qui permettent d'observer et de caractériser diverses propriétés physico-chimiques du sol et du substrat géologique, est présenté succinctement.

2.1 Les méthodes de cartographie conventionnelles

2.1.1 La carte géologique : objectifs et méthodes de production

Une carte géologique est un document synthétique qui renseigne sur la distribution spatiale des formations lithologiques, sur leur nature et sur le contexte structural de la région cartographiée (Lisle, 2004). Elle est complétée par une notice qui fournit des informations complémentaires permettant d'identifier les différentes formations lithologiques (topographie, datation, contenu faunique, etc.). Elle est utilisée dans de nombreux domaines d'activités (*i.e.* géologie minière, génie civil, hydrogéologie, géologie pétrolière, agronomie) (Sorel et Vergely, 2010).

C'est au cours du XVIII^e s. que la première carte dite « minéralogique » fut établie en France par Guettard en 1780, par ordre du roi Louis XV (Guettard et Monnet, 1780), sous la forme d'un atlas contenant 214 cartes. Cette carte fut établie principalement à des fins minières (pour localiser les gisements de minéraux, minerais et combustibles). La première « carte géologique » de la France fut dessinée en 1813 par d'Omalus d'Halloy, géologue belge, et publiée en 1822 au 1/3 700 000 (Nicklès, 1969). Par la suite, deux ingénieurs des Mines, Dufrenoy et Élie de Beaumont, ont travaillé sur la réalisation de la carte géologique de la France au 1/500 000, publiée en six feuilles en 1841. Depuis, de nouvelles cartes de meilleure résolution ont été réalisées sur l'ensemble du territoire français : au 1/80 000, achevée en 1971, et au 1/50 000 achevée en 2011 par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

En fonction des objectifs de l'étude, l'échelle des cartes géologiques est plus ou moins grande. L'échelle de la carte va rendre compte de la résolution spatiale à laquelle les objets sont observés : plus l'échelle sera grande, plus la résolution le sera également et inversement. Pour les cartes géologiques, les échelles spatiales peuvent être divisées en trois groupes : les grandes échelles spatiales (inférieures au 1/20 000) utilisées pour des études dont l'emprise spatiale est réduite (parcelle, commune, canton), les échelles moyennes (au 1/50 000) et les petites échelles spatiales (supérieures au 1/250 000) où le secteur d'étude est plus vaste (département, région, pays). Le 1/1 000 000 correspond à une échelle de synthèse qui permet d'avoir une vision globale de la géologie de la France. Au 1/250 000, les cartes permettent d'obtenir une reconnaissance générale des principales formations géologiques et structurales d'une région. Leur acquisition rapide et peu onéreuse est généralement réalisée par photo-interprétation avec un minimum de données acquises sur le terrain (Barnes et Baker, 2000). Au 1/50 000, les cartes peuvent être utilisées à des fins hydrogéologiques et en prospection minière (Gaudant, 2009). Elles sont également utilisées pour la prévention des risques naturels, la protection environnementale et la gestion de l'espace (BRGM, 2003). Le 1/50 000 est à ce jour l'échelle de référence des cartes géologiques françaises. Le 1/10 000 est utilisé dans des cas spécifiques, tels que l'exploration minière ou les projets d'ingénierie (construction de barrages...).

La réalisation d'une carte géologique s'effectue en plusieurs étapes qui vont conduire à la carte géologique interprétée (Lisle, 2004). La première étape consiste à planifier la prospection terrain à partir de documents existants (cartes géologiques à plus petite échelle, photographies aériennes, données de sondages géologiques, modèles numériques de terrain, etc.). La deuxième étape se déroule sur le terrain par la localisation et la caractérisation d'affleurements géologiques, annotés sur une carte topographique vierge, sous forme d'une carte minute ou carte d'affleurement. Par la suite, une maquette de la carte géologique est réalisée à partir de la carte minute et des données existantes, puis la carte géologique est dessinée à partir de cette carte minute. On arrive ainsi à un document synthétique interprétatif, susceptible d'être modifié à tout moment par l'acquisition de données complémentaires.

2.1.2 La carte pédologique : objectifs et conception

La carte pédologique est un document plan, présenté sur un support papier ou numérique à une échelle spatiale donnée, qui représente l'agencement spatial des sols dans le milieu naturel (Legros, 1996). La cartographie de la couverture pédologique peut s'effectuer selon deux approches : la cartographie ascendante ou la cartographie descendante. La cartographie ascendante ou cartographie typologique définit, à partir de classifications statistiques, des types de sols qui seront délimités sur une carte topographique. Cette approche est le plus souvent utilisée pour la production des cartes à grandes échelles, à partir de l'échelle au 1/25 000. La cartographie descendante ou cartographie paysagique s'appuie, en premier lieu, sur la délimitation d'unités paysagères ou pédopaysages (versant, terrasse, plateau, vallée) pour lesquelles les sols sont décrits. Cette démarche cartographique est utilisée pour produire des cartes à petites échelles, comme les cartographies régionales au 1/250 000. Elle permet de mettre en œuvre un modèle d'organisation spatiale des sols, caractéristique des unités de paysage (Duchaufour, 1997).

En fonction de l'échelle spatiale utilisée, deux concepts cartographiques peuvent être représentés sur la carte. L'Unité Typologique de Sol (UTS) définit une catégorie de type de sol et est définie selon la morphologie et les propriétés physico-chimiques du solum⁴ (Baize, 2004). Elle n'est généralement pas représentée graphiquement sauf dans le cas de cartographies à grandes échelles (Duchaufour, 1997). L'Unité Cartographique de Sol (UCS) représente l'ensemble des plages cartographiques d'une même carte, ayant le même contenu sémantique, et représenté par une couleur ou un figuré unique (Baize, 2004). Une UCS peut ainsi contenir plusieurs UTS ; dans ce cas, le pourcentage de chaque UTS contenu dans l'UCS est donné dans la notice de la carte. Dans le cas où l'UCS contient une seule UTS, on parle d'UCS « pure » (Duchaufour, 1997).

⁴ Solum : tranche verticale d'une couverture pédologique observable dans une fosse ou une tranchée (Baize, 2004)

La carte pédologique est utilisée dans de nombreux secteurs d'activité. En agriculture, elle permet de déterminer l'aptitude culturale⁵ du milieu, ou bien de définir le type d'aménagement agricole (irrigation, drainage) (Leleux *et al.*, 1988 ; Duchaufour, 1997 ; Walter *et al.*, 1997). Elle est également employée pour des études environnementales de protection des sols, de lutte contre l'érosion, de désalinisation des sols, de lutte contre la pollution chimique (Stengel et Gelin, 1998 ; Le Bissonnais *et al.*, 2004). Elle est utilisée dans le génie civil (Scheurer et Barakat, 2011), ou encore en archéologie où la diversité des sols peut être liée à des occupations anthropiques anciennes (Poupet, 2000).

En 1792, Arthur Young, agriculteur et agronome britannique, publie une carte des terrains et des limites de culture pour le territoire français (Legros, 1996). Au cours du XIX^e s., des tentatives de classification des sols ont été réalisées en France, notamment par la parution des quatre tomes de *Géologie Agricole* de Risler (parution du tome 1 en 1884 et du tome 4 en 1897). Celui-ci, très frappé par les relations étroites existant entre les sols et les roches, s'oppose à la réalisation de cartes de sols (Boulaine et Signeux, 1989). La première carte pédologique de la France, au 1/2 500 000, a été publiée en 1936 par le pédologue russe Agafonoff (Agafonoff, 1936) et rééditée en 1967. À ce jour, le territoire français est couvert entièrement par la carte pédologique au 1/1 000 000. En 2011, 80 % du territoire français était couvert par les Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) (Figure 2.1), présentant pour chaque département une carte des pédopaysages au 1/250 000, piloté par InfoSol à l'INRA d'Orléans dans le cadre du programme « Inventaire, Gestion et Conservation des Sols » (IGCS). Cette échelle spatiale a été choisie comme échelle de référence pour la cartographie systématique des sols en France. Des cartographies plus précises à des échelles moyennes, au 1/100 000, ont été ou sont actuellement produites par le biais du programme « Connaissance Pédologique de France (CPF) », sous la responsabilité de l'INRA.

⁵ Aptitude culturale : potentiel de production d'un sol pour un système cultural donné (COMIFER, 1993)

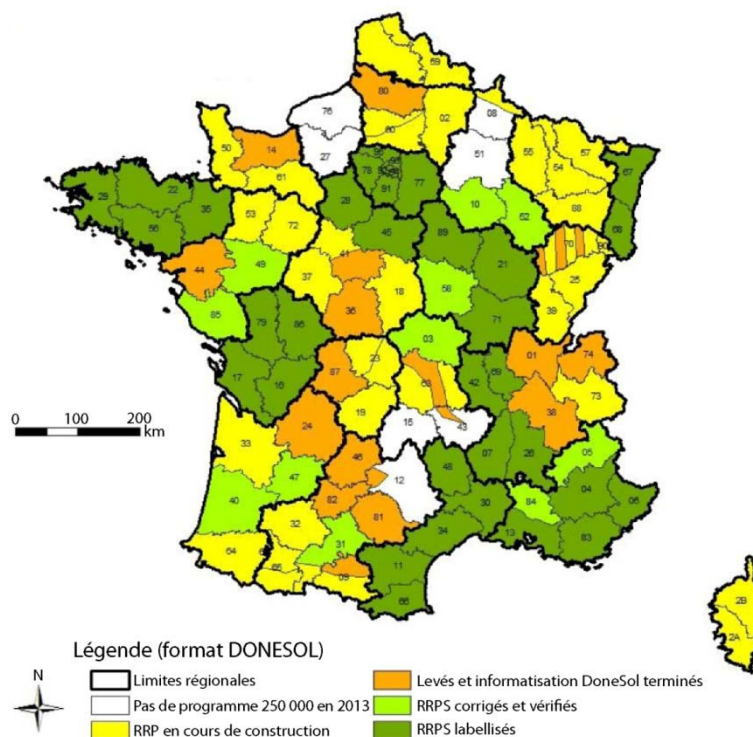


Figure 2.1 État d'avancement de la cartographie des Référentiels Régionaux Pédologiques en France au 1/250 000, en décembre 2013 (Laroche et Richer de Forges, 2013).

Comme pour la carte géologique, l'échelle de la carte pédologique dépend de sa finalité, de son objectif. Trois à quatre échelles spatiales sont reconnues selon les auteurs, les petites échelles, les échelles moyennes, les grandes échelles, voire même les très grandes échelles (Tableau 2-1). Les petites échelles ont un intérêt didactique et renseignent sur l'influence des facteurs fondamentaux du milieu sur la pédogenèse (Duchaufour, 1997). Au 1/250 000, les cartes permettent d'établir un inventaire rapide des ressources en sols d'un pays (Legros, 1996). Les cartographies à moyenne échelle apparaissent comme un maillon intermédiaire entre un niveau « esquisse régionale » et un niveau « secteur de référence » (Jamagne *et al.*, 1989). Au 1/100 000, les cartes sont adaptées à la caractérisation scientifique du milieu naturel et permettent de dégager les lois fondamentales de la répartition écologique des sols (Legros, 1996; Duchaufour, 1997). Les grandes et très grandes échelles concernent davantage les études parcellaires ou lots de parcelles. Les cartes sont généralement utilisées pour les études préalables au drainage, au remembrement ou à l'irrigation.

La cartographie des sols à moyenne et grande échelles requiert des moyens financiers et humains importants pour cartographier de vastes secteurs. Les moyens affectés à la cartographie des sols de la France au 1/100 000 n'ont pas permis d'envisager une couverture complète du territoire à moyen terme (King *et al.*, 1999). La méthode des « secteurs de référence », également dénommée « aires échantillons », a été utilisée pour la cartographie au 1/250 000 du territoire. Cette méthode

consiste à réaliser une cartographie à grande échelle, au 1/10 000, et à effectuer une caractérisation approfondie des sols d'une aire échantillon représentative d'une petite région naturelle (Favrot, 1989). Elle permet également de comprendre les lois de distribution des sols du secteur, et d'en définir les règles pour ensuite les extrapoler sur des surfaces plus étendues à des échelles plus petites (Lagacherie et Favrot, 1987). Sur ces secteurs caractérisés à haute résolution du point de vue pédologique, des suivis fonctionnels sont effectués (drainage, qualité des eaux, érosion, etc.) ; les résultats de ces suivis peuvent être extrapolés à la région qui représente ce secteur de référence, et ainsi préconiser des itinéraires culturels adaptés au sol. Les secteurs de référence visent à déterminer des unités cartographiques qui impliquent un « comportement agronomique » homogène ; ces dernières sont donc des unités « pures » (Favrot, 1989).

		Classification des échelles spatiales			
		Petite échelle	Moyenne échelle	Grande échelle	Très grande échelle
Bornes selon :	Jamagne <i>et al.</i> , 1989	1/1 000 000 à 1/250 000	1/100 000 à 1/25 000	1/10 000 à 1/5 000	
	Legros, 1996	1/5 000 000 à 1/250 000	1/100 000 à 1/50 000	1/25 000	> au 1/10 000
	Duchaufour, 1997	1/1 000 000 à 1/250 000	1/100 000 à 1/50 000	1/25 000 à 1/5 000	
Utilisation		Pédagogique Scientifique (influence facteurs fondamentaux sur la pédogenèse) Inventaire sols d'un pays	Scientifique (caractérisation du milieu naturel, lois fondamentales de la répartition écologique des sols)	Secteurs de référence Étude parcellaire ou groupe de parcelles, drainage, remembrement, irrigation, différence de comportement des sols, Cartes thématiques	

Tableau 2-1 Classification des échelles spatiales pour la cartographie pédologique et objectifs poursuivis. Bornes définies selon Jamagne *et al.*, 1989 ; Legros, 1996 ; Duchaufour, 1997 .

La cartographie pédologique peut être réalisée suivant diverses méthodes cartographiques i.e. la cartographie raisonnée, la cartographie par sections, la cartographie géostatistique (Legros *et al.*, 1996). Ces méthodes se différencient par leur technique de réalisation et par le type d'objets étudié.

La **cartographie raisonnée**, ou *free survey*, se base sur la technique d'extrapolation des données. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation de données complémentaires telles que les photographies aériennes et les modèles numériques de terrain afin de délimiter des ensembles homogènes. La photo-interprétation a été largement utilisée en France pour la cartographie des pédopaysages (Jamagne *et al.*, 1993 ; Robbez-Masson, 1994 ; Girard, 1995), pour des petites et

moyennes échelles (Legros *et al.*, 1996). La cartographie raisonnée – la méthode la plus communément employée en cartographie pédologique – permet au pédologue cartographe de choisir l'emplacement des sondages et fosses pédologiques. En premier lieu, une délimitation des unités cartographiques est réalisée à partir de données complémentaires. Par la suite, une prospection terrain réalisée à partir de sondages à la tarière, d'observation de coupes naturelles ou de surface, permet de caractériser les sols des unités précédemment délimitées. En fonction des résultats obtenus, les limites cartographiques sont ajustées. Une fois les unités cartographiques délimitées, des fosses pédologiques placées au sein des unités sont réalisées pour caractériser leurs sols. Cette méthode laisse une grande souplesse d'action au cartographe. Néanmoins, les points d'observation n'étant pas régulièrement répartis dans l'espace, elle peut présenter des biais de représentation (Legros, 1996).

La **cartographie par sections**, ou *grid mapping*, est basée sur un échantillonnage systématique. Le secteur à cartographier est divisé en unités de surfaces égales, où chaque unité est sondée. Les échantillons étant régulièrement répartis dans l'espace, cette méthode permet d'effectuer des traitements statistiques étayés. Après avoir réalisé les observations sur le terrain pour chaque unité, on effectue une classification qui permet de regrouper les sols qui présentent des traits communs. On part du principe que l'échantillon observé est représentatif de son environnement proche. Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux études à grande échelle spatiale, quand les limites pédologiques ne sont pas forcément bien observables. Cependant, elle n'est pas toujours facilement réalisable, car des éléments naturels (cours d'eau, route goudronnée) conduisent à modifier les positions des points d'échantillonnage, ce qui supprime le caractère régulier de la grille. De plus, le point d'échantillonnage peut ne pas être représentatif du sol alentour. Cette démarche nécessite un échantillonnage important pour la rendre statistiquement valide, la rendant onéreuse et chronophage (Legros, 1996).

La **cartographie géostatistique**, ou *geostatistical mapping*, vise à la quantification et à la modélisation des propriétés du sol. La géostatistique, par la notion de structure spatiale, privilégie l'aspect « continuum » de la couverture pédologique (Gascuel-Oudou *et al.*, 1993). Cette méthode cherche à déterminer les relations spatiales qui peuvent exister pour une ou plusieurs variables données (par exemple l'argile, le sable, le pH, la teneur en fer, l'épaisseur du sol, etc.) à partir d'un échantillonnage réparti dans l'espace, par le biais de méthodes d'interpolation. Trois étapes se succèdent pour produire la carte : la caractérisation de la structure spatiale à l'aide de variogrammes, la modélisation de la variabilité des valeurs et l'estimation des valeurs inconnues par interpolation (Vaudour, 2003). Le variogramme permet d'exprimer la variance d'une propriété du sol entre deux échantillons en fonction de la distance qui les sépare (Gascuel-Oudou *et al.*, 1993). La géostatistique va produire, à partir de méthodes d'interpolation basées sur le calcul de moyennes pondérées des observations avoisinantes, une cartographie en continu des variables du sol. Les méthodes

d'interpolation généralement utilisées sont le krigeage (variable unique) ou ses variantes, le co-krigeage qui permet de chercher les corrélations entre deux variables, ou le krigeage-régression pour estimer la validité des prédictions spatiales locales (McBratney *et al.*, 2000). Les méthodes géostatistiques cartographient donc des variables, une à une ou corrélées entre elles, en « continu ». Elles peuvent également être utilisées pour cartographier les sols de façon numérique comme l'ont démontrés les travaux de Carré et Girard (2002). Dans le cas où les limites entre les propriétés sont nettes, les méthodes d'interpolation vont lisser ces limites. De plus, ces méthodes nécessitent un grand nombre d'observations : pour mesurer l'auto-corrélation spatiale, 150 à 200 points d'observation sont nécessaires (Legros, 1996 ; McBratney *et al.*, 2000).

2.1.3 Quelle échelle spatiale pour les études des terroirs viticoles ?

Les études de terroirs sont réalisées par diverses méthodes d'investigation, *i.e.* les cartographies géopédologiques, les cartes thématiques du sol, les zonages viticoles. Ces derniers peuvent être réalisés pour diverses applications *i.e.* gestion agroviticole, gestion œnologique, gestion patrimoniale et environnementale (Vaudour, 2003). Depuis plusieurs années, de nombreuses études de terroirs ont été réalisées dans divers vignobles français : dans le Bordelais (Van Leeuwen *et al.*, 1989), en Val de Loire (Goulet et Rioux, 2006 ; Morlat et Guilbault, 2001), en Charente (Cam *et al.*, 2003), dans les Côtes-du-Rhône (Vaudour, 2003), en Bourgogne (Coudert, 2009 ; Sigales, 2010), pour la plupart réalisées à grande échelle, au 1/25 000, au 1/10 000 voire au 1/5 000. Ces études à grande échelle ont mis en évidence une importante diversité géopédologique au sein de chaque appellation. Ces échelles permettent de représenter les unités dites « fonctionnelles » du terroir (Vaudour, 2003).

À ce jour, la carte géologique au 1/50 000 est la plus grande échelle qui couvre la totalité du territoire français (BRGM). Pour le secteur de la Côte de Nuits et de la Côte de Beaune, quatre feuilles couvrent le secteur étudié : la feuille n°499 de Gevrey-Chambertin au nord (Rémond, 1972), la feuille n°526 de Beaune (Rémond, 1985), la feuille n°553 de Chagny (Fleury et Gélard, 1982) et la feuille n°552 du Creusot (Courel *et al.*, 1989). À cette échelle, toutes les unités lithologiques observées sur le terrain ne sont pas systématiquement reportées sur la carte mais sont définies dans la notice. De plus, la faible résolution de ces cartes ne permet généralement pas de cartographier toutes les formations superficielles⁶. Les grands épandages situés aux débouchés des combes majeures sont cartographiés (cônes de déjection), alors que les dépôts localement distribués sur les versants ne sont pas systématiquement cartographiés. Ces formations, dont le rôle a souvent été négligé, voire oublié au profit de la géologie, peuvent aussi être régulièrement confondues avec le sol (Marre, 2013). À l'interface entre le sol et le substrat, elles jouent fréquemment le rôle de support de culture pour la

⁶ Formations superficielles : matériau le plus souvent meuble, hérité de la transformation physique de la roche en place, qui peut être transporté ou non (Campy et Macaire, 1989).

vigne (Vaudour, 2003 ; Marre, 2013). Elles sont affectées notamment en secteur cultivé où l'homme contribue à la dégradation des sols en favorisant ainsi l'érosion (Brenot, 2007 ; Quiquerez *et al.*, 2014). Leur nature peut être très diverse pour un même lieu. Certaines formations sont directement produites sur place (formations autochtones), d'autres ont été transportées sur de courtes distances (formations subautochtones), d'autres encore ont été transportées sur de très longues distances (formations allochtones) (Dewolf et Bourrié, 2008). Cette forte diversité produit, pour chaque formation, des conditions agroviticoles particulières conduisant à autant de variétés de terroirs (Marre, 2013). Dans certains secteurs viticoles de la Côte, leur présence a rendu la plantation de vignes possible, là où le substrat géologique sous-jacent n'aurait pu permettre du fait d'une épaisseur de sol trop faible (lieux-dits « Les Vaucrains » à Nuits-Saint-Georges, « Clos du Roy » à Chenôve). Des récentes cartographies géologiques réalisées au 1/10 000, sur les aires d'appellation Marsannay, Gevrey-Chambertin, Pommard, Les Maranges, ont permis d'affiner voire de corriger les cartes existantes (Vannier-Petit *et al.*, 2011, 2012 ; Vannier-Petit, 2013). Les secteurs cartographiés ont mis en évidence une structuration géologique plus complexe que celle observée sur la carte au 1/50 000, avec un nombre plus important de failles d'orientation N10°, des failles antithétiques⁷, mais également des accidents transverses au niveau des vallées sèches.

Le secteur de la Côte est couvert par plusieurs cartes pédologiques réalisées à différentes échelles spatiales. La carte des pédopaysages de la Côte-d'Or, issue du Référentiel Pédologique de Bourgogne, a été réalisée au 1/250 000 (Chrétien, 2000). La carte pédologique de Beaune produite au 1/100 000 couvre la quasi-totalité du vignoble de la Côte (Chrétien, 1996, 2000), à l'exception de sa partie méridionale. Enfin, une étude menée par Mériaux *et al.* (1981) a abouti à la création d'une carte pédologique de la Côte viticole au 1/50 000. La résolution de ces cartes ne permet pas d'observer la diversité pédologique à haute résolution spatiale. Les UCS de ces cartes regroupent plusieurs UTS dont la distribution spatiale à l'intérieur de la plage cartographique n'est pas délimitée.

Quelques études de terroirs ont été réalisées sur le secteur de la Côte de Beaune et de la Côte de Nuits. Une étude globale intégrant les facteurs naturels et historiques a été conduite dans le cadre des travaux de thèse de Gadille (1967). D'autres études abordent la question des terroirs par une approche physique. Bel (1955) a réalisé une carte des sols de l'appellation Nuits-Saint-Georges. Blaquière (1967) a étudié deux toponomies en Côte de Beaune, sur les aires d'appellation Puligny-Montrachet et Aloxe-Corton. Une autre étude a fait l'objet d'analyses de toponomies en Côte de Nuits et Côte de Beaune, pour mettre en relation la diversité des sols avec les niveaux d'appellation (Mériaux *et al.*, 1981). Cette étude a abouti à la production d'une carte pédologique de la Côte au 1/50 000. Une étude réalisée sur le versant viticole de Gevrey-Chambertin a fait l'objet d'une caractérisation de la distribution des sols en fonction du substrat géologique et des formations

⁷ Faille dont le rejet se soustrait à un autre mouvement, par exemple une faille normale contraire (Foucault and Raoult, 2010)

superficielles (Garnier et Mareschal, 1980). Dans son travail de thèse, Combaud (2008) a étudié les relations entre les paramètres physiques du milieu et les limites anciennes ou actuelles des AOC.

Les cartes géologiques et pédologiques du secteur de la Côte viticole ont été réalisées à des petites (au 1/250 000) et moyennes échelles (au 1/100 000, au 1/50 000). Pour ces échelles, la variabilité lithologique et pédologique à haute résolution n'est pas systématiquement cartographiée. Ces échelles ne sont donc pas adaptées à l'étude des terroirs viticoles pour laquelle une meilleure résolution est nécessaire (Combaud, 2008). En contexte viticole, l'application d'une méthode de cartographie géologique conventionnelle pour une cartographie à haute résolution présente quelques inconvénients. Sur les versants viticoles, le nombre d'affleurements est souvent limité, alors que de nombreuses observations sont nécessaires pour produire une carte à haute résolution. À grande échelle, les méthodes de cartographie pédologique sont longues et coûteuses (Tableau 2-2). Le nombre de sondages étant dépendant de l'échelle de production de la carte, plus l'échelle de production va être grande, plus le nombre de sondages va l'être également (Boulaine, 1966). Ainsi, la réalisation d'une carte pédologique au 1/10 000 demanderait une « densité idéale » d'un sondage par demi-hectare. Cette « densité idéale » peut être réduite par l'utilisation de données annexes (photographies aériennes, MNT). Néanmoins, le coût de revient des cartographies à grande échelle reste très important. Ces méthodes de cartographies conventionnelles ont été utilisées jusque dans les années 1990 (Vaudour *et al.*, 2011). Depuis, les avancées technologiques ont permis de diversifier les méthodes cartographiques en utilisant les techniques de télédétection ou bien encore de géophysique.

Échelle	Surface prospectée par jour (ha)	Nombre d'ha par sondage	Nombre d'ha par profil	Prix à l'ha en euros*
1/2 500	nc	0,06-0,13	2-4	nc
1/10 000	40-80	0,5-3	10-50	30-60
1/25 000	100-250	5-20	50-200	15-20
1/100 000	500-1000	50-100	300-1000	1,5-3
1/250 000	3000-9000	200-300	3000-5000	0,2-0,4

Tableau 2-2 Densité d'observations et prix de revient pour l'élaboration d'une carte pédologique à diverses échelles spatiales (données compilées d'après Legros, 1996 ; OIV, 2012). Le prix est modifié et exprimé en euros sur la base 1991 en francs français.

2.2 Apports de la télédétection par imagerie et de la géophysique en cartographie

En complément des méthodes de cartographies conventionnelles, la télédétection et la géophysique peuvent être utilisées à des fins cartographiques. Ces deux techniques permettent d'observer la distribution spatiale des états de surface du sol, du sol et/ou du substrat géologique, et ce de façon « continue » dans l'espace. Ainsi, elles offrent la possibilité de mieux définir les limites cartographiques, souvent subjectives dans les méthodes conventionnelles (Manchanda *et al.*, 2002).

La télédétection par imagerie permet une mesure qualitative et semi-quantitative des constituants de la surface du sol, correspondant à une épaisseur de quelques millimètres (Mulder *et al.*, 2011), par la mesure et l'interprétation du spectre électromagnétique émis par cette surface. Elle peut être utilisée pour cartographier certains paramètres physico-chimiques de la surface du sol. Les éléments qui composent la surface du sol peuvent être identifiés par certaines longueurs d'onde du spectre électromagnétique (Rees, 2012). Cette propriété va alors différencier diverses surfaces naturelles telles que l'eau, la végétation, le sol, etc.

Les techniques géophysiques permettent d'enregistrer et d'interpréter les variations des propriétés physiques et chimiques du sol et/ou du substrat géologique. Ces techniques non destructives sont utilisées soit en contact direct avec le sol, soit sans contact, pour mesurer différentes propriétés physiques (sismiques – propriétés élastiques –, magnétiques – propriétés magnétiques –, électriques – résistivité/conductivité –, etc.). Les données issues des techniques de géophysique permettent de cartographier la distribution spatiale des sols et/ou du substrat géologique.

2.2.1 La télédétection par imagerie

2.2.1.1 Principe

La télédétection désigne « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Journal Officiel, 11 décembre 1980). Les techniques de télédétection par imagerie sont basées sur la mesure des propriétés de réflexion et/ou d'émission d'ondes électromagnétiques dépendantes du milieu observé.

Un système de télédétection est constitué de quatre composantes, *i.e.* une source d'énergie, une cible, un capteur et un vecteur (Figure 2.2).

- La *source d'énergie* peut être naturelle, comme l'énergie solaire, ou générée par le capteur. Cette énergie se décompose en un spectre électromagnétique, défini par des classes de longueur d'onde, en plusieurs domaines spectraux.
- La *cible* reçoit l'énergie naturelle ou générée par le capteur, appelée énergie incidente (E_i). Une partie de l'énergie reçue est absorbée (E_a) par la cible et est transformée en chaleur ; une partie de l'énergie est transmise (E_t) à travers la cible et ensuite, une partie est réfléchie (E_r) par la cible. Le capteur peut enregistrer l'énergie émise par la cible ou l'énergie réfléchie. La cible est caractérisée par trois coefficients qui correspondent aux parts de l'énergie absorbée, réfléchie ou transmise : l'absorbance, la réflectance et la transmittance (Schott, 2007). Selon le principe de conservation de l'énergie, la somme des coefficients est égale à 1.
- Le *capteur* peut être passif ou actif. S'il est passif, il reçoit le rayonnement émis ou réfléchi par la cible (appareil photographique, caméra, radiomètre). S'il est actif, il génère alors une source d'énergie en direction de la cible étudiée et enregistre le rayonnement réfléchi par celle-ci (LiDAR, radar).
- Le capteur est monté sur un *vecteur*, ce dernier étant défini comme un objet mobile pouvant porter un capteur. Différents types de vecteurs sont utilisés, les deux principaux étant les vecteurs aéroportés (drone, avion, ballon) qui volent entre une dizaine de mètres et une dizaine de kilomètres d'altitude, et les vecteurs spatiaux (satellites) qui opèrent entre plusieurs centaines de kilomètres et plusieurs dizaines de milliers de kilomètres.

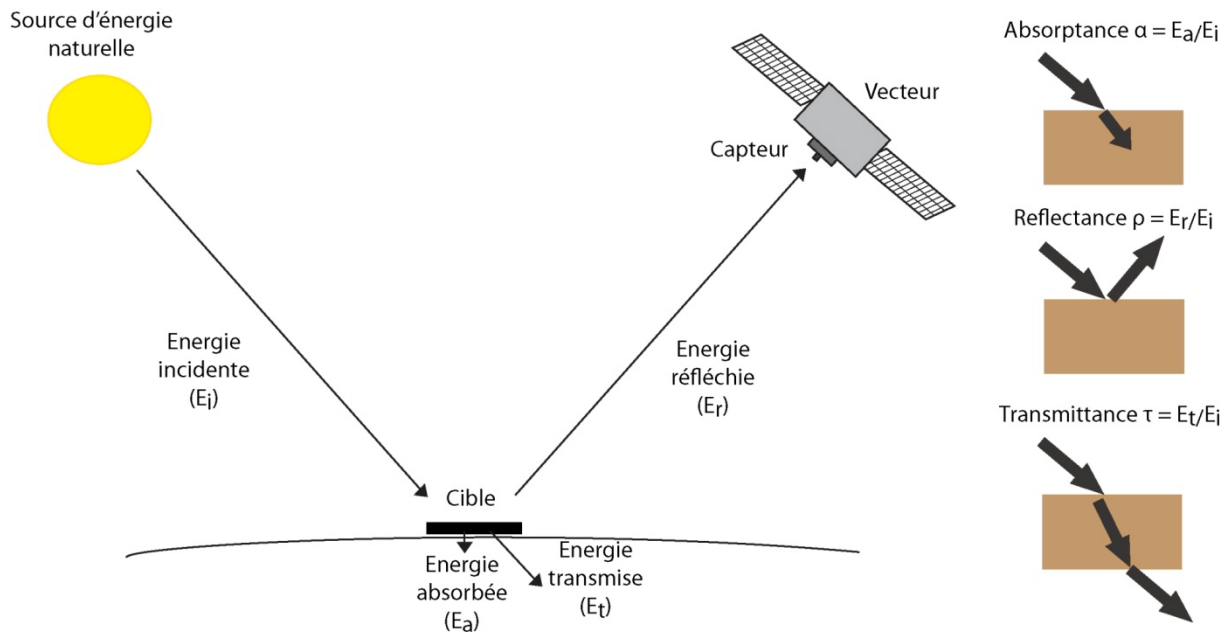


Figure 2.2 Représentation d'un système Source-Cible-Capteur-Vecteur dans le domaine réflectif en télédétection passive.

En télédétection par imagerie, les capteurs enregistrent le flux d'énergie en provenance de la surface du sol, qu'il soit réfléchi ou émis. L'intensité de ce flux est la luminance énergétique (L_e) qui correspond à l'énergie du rayonnement dans une direction donnée, par unité d'angle solide et par unité d'aire de la surface apparente de la source dans cette direction (Girard et Girard, 2010). Elle est exprimée en $W.m^{-2}.sr^{-1}$. Dans le cas de photographies aériennes numériques, le capteur enregistre la lumière visible sous forme numérique. Les comptes numériques, répartis en 256 niveaux, sont proportionnels à l'énergie reçue à travers l'optique de l'appareil. Le capteur va donc enregistrer la réflectance qui permet de caractériser la capacité de l'objet observé à renvoyer l'énergie (E_r) qu'il a reçue initialement (E_i).

Les capteurs se différencient par leur sensibilité spectrale, leur résolution spectrale et leur résolution spatiale. Plusieurs domaines spectraux principaux sont distingués sur le spectre électromagnétique : l'ultraviolet (290-390 nm), le visible (400-750 nm), l'infrarouge proche (780 nm – 3 μm), l'infrarouge moyen (3-50 μm), l'infrarouge lointain (50 μm – 5 mm) et le domaine des hyperfréquences (7,5 mm – 136 cm) (McBratney *et al.*, 2003 ; Figure 2.3). La résolution spectrale détermine la capacité d'un capteur à enregistrer divers intervalles de longueur d'onde plus ou moins petits (Girard et Girard, 2010). La résolution spatiale ou géométrique caractérise la plus petite aire pour laquelle on ne dispose que d'une donnée par variable étudiée. Les résolutions spatiales sont définies selon les catégories suivantes : la très haute résolution spatiale (THRS) inférieure à 3 m, la haute résolution spatiale (HRS) de 10 à 30 m, la moyenne résolution spatiale inférieure à 80 m (MR) et la basse résolution spatiale de l'ordre du kilomètre (BR) (Tableau 2-3) (Puissant, 2003 ;

Lefebvre, 2011). Les propriétés physiques, chimiques et biologiques de la cible conduisent à de fortes variations de réflectance en fonction de la longueur d'onde (Girard et Girard, 2010).

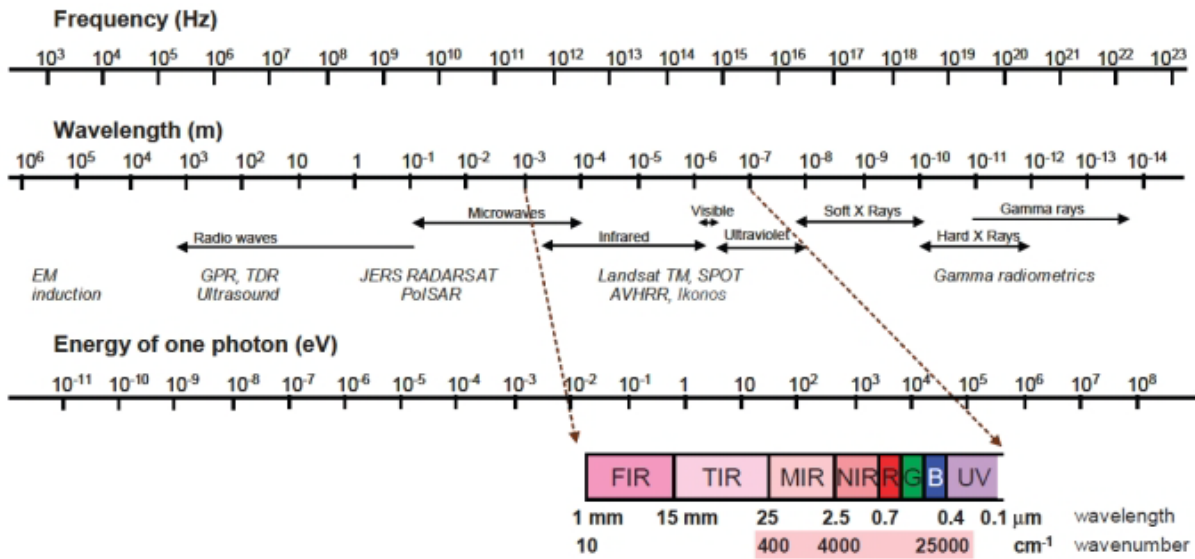


Figure 2.3 Spectre électromagnétique illustrant les principaux domaines spectraux utilisés en télédétection (McBratney et al., 2003).

Les capteurs multispectraux enregistrent le spectre sur plusieurs intervalles de longueur d'onde, ces intervalles étant dénommés « bandes spectrales ». Ils peuvent enregistrer jusqu'à une dizaine de bandes spectrales simultanément. Ces capteurs sont capables d'observer et de caractériser diverses surfaces naturelles telles que l'eau, la neige, le type de végétation, le type de sol, etc. Principalement installés sur des vecteurs aérospatiaux (satellites), ils permettent d'acquérir des données à des résolutions spatiales variables depuis la THR, à HR ou à MR (SPOT, ASTER, LANDSAT, MODIS, Figure 2.4). Les capteurs hyperspectraux peuvent enregistrer des centaines de bandes spectrales sur le spectre EM du visible jusqu'à l'infrarouge moyen, voire l'infrarouge thermique. Ils permettent d'observer les différents types de surfaces naturelles. De plus, leur haute résolution spectrale de l'ordre de 10 nm, offre la possibilité d'estimer quantitativement les éléments chimiques, voire minéralogiques de la surface du sol. Ces capteurs sont installés sur des vecteurs aérospatiaux, où ils enregistrent des données à hautes, moyennes ou basses résolutions spatiales, soit respectivement HR, MR et BR (HYPERION, MODIS sur la Figure 2.4). Ils sont également montés sur des vecteurs aéroportés (avion) offrant une très haute résolution spatiale (HyMap, AVIRIS Figure 2.4).

Dénomination	Résolution spatiale	
	Militaire	Civil
EHR - Extrême Haute Résolution	< 0,25 m	-
THR - Très Haute Résolution	0,25 à 0,60 m	< 3 m
HR - Haute Résolution	0,60 à 3 m	10 à 30 m
MR - Moyenne Résolution	3 m	80 m
BR - Basse Résolution	> 3 m	1000 m

Tableau 2-3 Comparatif des dénominations des résolutions spatiales dans les domaines civil et militaire (d'après Puissant, 2003).

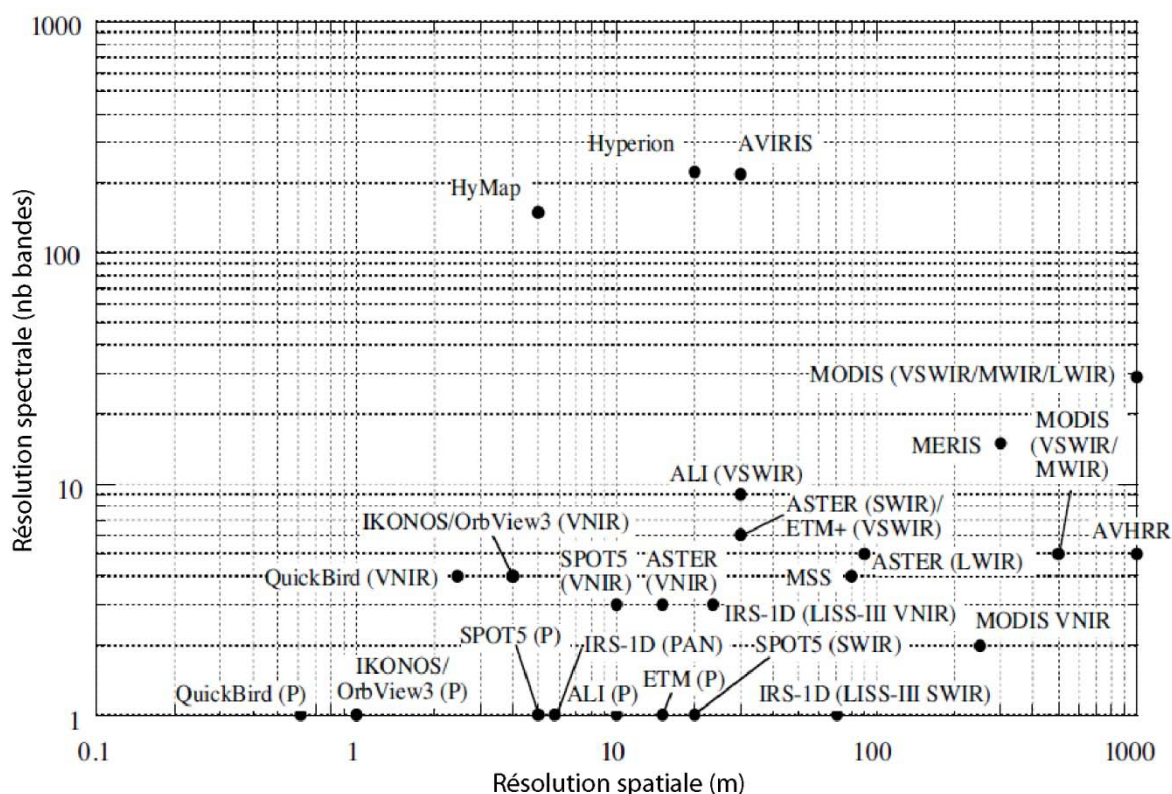


Figure 2.4 Représentation de divers systèmes de télédétection en fonction de leurs résolutions spatiale et spectrale (modifié d'après Schowengerdt, 2006). Les domaines spectraux sont les suivants : V=Visible, NIR=Near InfraRed, LWIR=Long Wave IR, MWIR=Mid Wave IR, SWIR=Short Wave IR et P=Panchromatic.

Ces capteurs permettent de distinguer divers types de surfaces naturelles caractérisées par des courbes de réflectance spectrale qui leur sont propres ; on parle alors de « signature spectrale » (Schowengerdt, 2006). La Figure 2.5 illustre la signature spectrale des principales surfaces naturelles et de quelques sols dans le domaine spectral du visible et du proche infrarouge (VIS-PIR). L'eau présente sur l'ensemble du spectre VIS-PIR une faible réflectance, sa réflectance maximale se situant au niveau des courtes longueurs d'onde (< 500 nm), ce qui lui confère sa couleur bleue. La neige

montre une forte réflectance pour les ondes courtes et la réflectance diminue nettement dans le proche infrarouge. La réflectance de la végétation est faible dans le visible et atteint 15 à 20 % à 550 nm. Cette faible réflectance s'explique par la présence de pigments chlorophylliens qui présentent deux bandes d'absorption dans le bleu et le rouge (Rees, 2012). Les sols humifères riches en matière organique se caractérisent par de très faibles valeurs de réflectance sur l'ensemble du spectre VIS-PIR.

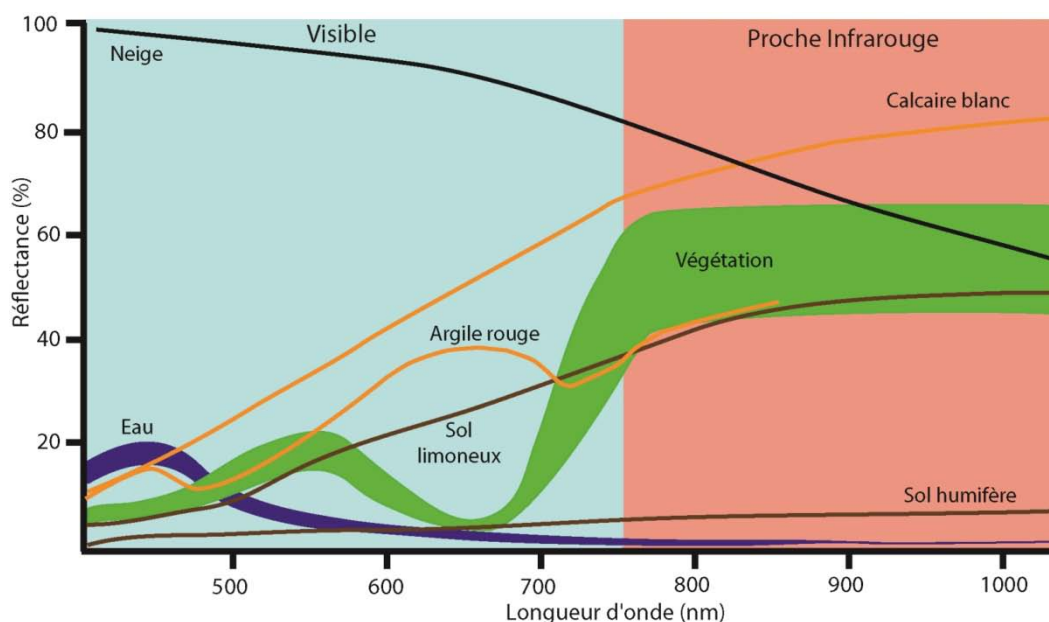


Figure 2.5 Courbes de réflectance pour diverses surfaces naturelles dans le spectre VIS-PIR (modifié d'après, Bonn et Rochon, 1992 ; Rees, 2012).

À ce jour, la diversité des capteurs utilisés en télédétection est grande. Les caractéristiques de chaque capteur leur confèrent des aptitudes à la reconnaissance d'objets spécifiques, à la fois par leurs résolutions spectrale et spatiale. Utilisés pour cartographier l'occupation du sol, ces capteurs multispectraux ont une gamme de résolution spatiale étendue, allant de la THRS à la MR, et sont donc adaptés pour diverses études, de l'échelle nationale (pays) jusqu'à l'échelle locale (commune). Néanmoins, leur faible résolution spectrale ne permet pas une caractérisation fine des objets étudiés. Les capteurs hyperspectraux caractérisés par leur résolution spectrale très fine et une gamme très étendue permettent d'estimer de façon quantitative diverses propriétés physico-chimiques de la surface du sol. Cependant, la majorité de ces capteurs opèrent pour des résolutions spatiales qui ne permettent pas d'observer des objets à très haute résolution spatiale. Il est donc nécessaire de bien définir l'échelle spatiale de l'étude et le type d'objet à étudier afin de déterminer quel capteur répondra au mieux aux attentes spécifiques de l'étude.

2.2.1.2 Télédétection et pédologie

Les capteurs peuvent être utilisés pour une caractérisation quantitative ou qualitative des propriétés de la surface du sol. De ce fait, les études de télédétection appliquées à la pédologie se répartissent selon deux groupes : d'un côté, les études quantitatives pour mesurer les propriétés physico-chimiques de la surface du sol et les cartographier (Mulder *et al.*, 2011), de l'autre, celles pour caractériser les états de surface du sol à des fins cartographiques et/ou pour suivre l'évolution de la surface du sol dans le temps (Escadafal, 1993 ; Corbane *et al.*, 2008, 2012). Dans notre cas, une approche qualitative a été retenue pour cartographier les états de surface du sol afin d'évaluer les liens existants entre la surface du sol et le sol.

a) La reconnaissance des états de surface du sol (EDS) par télédétection

Divers constituants de cette surface peuvent être observés par l'étude des états de surface du sol. La notion d'état de surface du sol, dénommé par la suite par l'acronyme EDS, a été utilisée pour la première fois dans les années 80 (Escadafal, 1981 ; Boiffin, 1984 ; Courault, 1989). Il n'existe pas de définition précise des EDS, car elle varie en fonction de l'étude. L'EDS peut faire référence pour certains à la pierrosité (Poesen *et al.*, 1994 ; Martinez-Zavala *et al.*, 2010 ; Follain *et al.*, 2012), à la texture (Valentin et Bresson, 1992 ; Malet *et al.*, 2003), à la présence de végétation ou de débris végétaux (Le Bissonnais *et al.*, 2005 ; Monteiro et Lopes, 2007), à la rugosité de surface (Malet *et al.*, 2003), aux croûtes structurales ou sédimentaires (Auzet *et al.*, 1986 ; Bresson et Valentin, 1993 ; Le Bissonnais *et al.*, 2005), à l'activité biologique du sol (Albergel *et al.*, 1986), à la combinaison de plusieurs paramètres physiques, chimiques, biologiques, hydrologiques (Corbane, 2006). On retiendra pour notre étude la définition suivante : l'EDS est défini comme la composition physico-chimique de la surface du sol à un instant donné.

Les premiers travaux de reconnaissance des EDS par télédétection ont été menés au début des années 1990. Courault (1989) a cherché à identifier les principaux facteurs intervenant sur la réponse spectrale des sols, et plus particulièrement sur l'influence de la rugosité, à partir d'images satellites SPOT. Dans le même temps, Escadafal (1989) a mis en évidence l'influence de la couleur, de la minéralogie et de la rugosité sur la réflectance en milieu aride à partir d'images Landsat. Les cartes d'état de surface produites ont été utilisées pour la cartographie des ressources en sols. Wassenaar *et al.* (2005) ont démontré qu'il était possible de différencier des classes d'EDS qui présentaient des propriétés hydrologiques différentes à partir des valeurs radiométriques dans le domaine du visible. Corbane *et al.* (2008) ont cartographié les EDS en système viticole par imagerie THRS dans le domaine spectral du visible par une approche de classification multi-échelles. Cette méthode a été utilisée par la suite pour évaluer l'évolution temporelle des classes d'EDS (Corbane *et al.*, 2012).

Les méthodes de télédétection permettent de caractériser la surface du sol, et sont donc adaptées à la reconnaissance des EDS. Les principaux facteurs qui contrôlent le comportement spectral des EDS sont : la couleur, la pierrosité, la texture, le carbonate de calcium, la matière organique, le fer, la rugosité, (Girard et Girard, 2010).

La **couleur** est une variable majeure en science du sol puisqu'elle peut renseigner sur la présence de matière organique, de carbonate de calcium, d'oxydes et d'hydroxydes de fer. La couleur est mesurée sur le terrain par la charte Munsell, et est caractérisée par sa teinte (*hue* en anglais), sa clarté (*value* en anglais) et sa pureté (*chroma* en anglais). Au début des années 1990, des études démontrent que la couleur des sols mesurée à partir de la charte Munsell est corrélée à la réflectance des sols (Escadafal *et al.*, 1989 ; Bhadra et Bhavanarayana, 1996). Les comptes numériques (RVB) sont fortement corrélés à la réflectance mesurée en laboratoire pour les bandes spectrales du visible des images satellites (Escadafal *et al.*, 1989) (Figure 2.6).

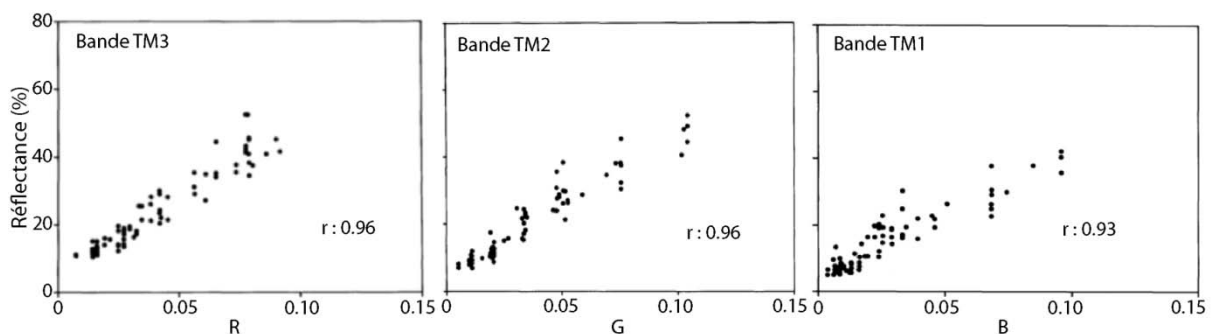


Figure 2.6 Réflectance mesurée en laboratoire sur les 3 bandes visibles du satellite Landsat Thematic Mapper en fonction des coordonnées RGB calculées à partir de l'estimation Munsell (Escadafal *et al.*, 1989, modifié).

La **pierrosité de surface** représente la quantité d'éléments grossiers de nature minérale qui constituent l'EDS. Les classes de pierrosité sont définies de la façon suivante : blocs (plus de 20 cm), pierres (5 – ou 7,5 cm – à 20 cm), cailloux (2 à 5 cm – ou 7,5 cm), graviers (0,2 à 2 cm) (Baize, 2004). Outre son rôle de protection contre l'érosion, de protection contre l'effet splash et de diminution du ruissellement de l'eau en surface (Poesen *et al.*, 1994 ; Martinez-Zavala *et al.*, 2010), les éléments minéraux qui constituent la pierrosité de surface peuvent renseigner sur le type de substrat géologique sous-jacent. Les éléments grossiers, le plus souvent constitués d'éléments de teinte claire, dans nos régions calcaires, ont pour effet d'augmenter la réflectance. La majorité des sols observés sur le territoire français présente des teintes qui permettent de bien individualiser les éléments lithiques de la matrice du sol dans le domaine spectral du visible. La pierrosité de surface peut également être estimée à l'aide d'un radar à synthèse d'ouverture (Synthetic Aperture Radar, « SAR » en anglais) (Menéndez Duarte *et al.*, 2008). L'auteur a démontré qu'il existe une relation entre les données SAR et

le modèle de rugosité pour l'écart-type moyen de la hauteur des clastes ($R^2 = 0,98$). Les classes de pierrosité SAR ont été comparées à une carte des états de surface du sol réalisée par photo-interprétation : 70 % des classes de pierrosité coïncident (Figure 2.7).

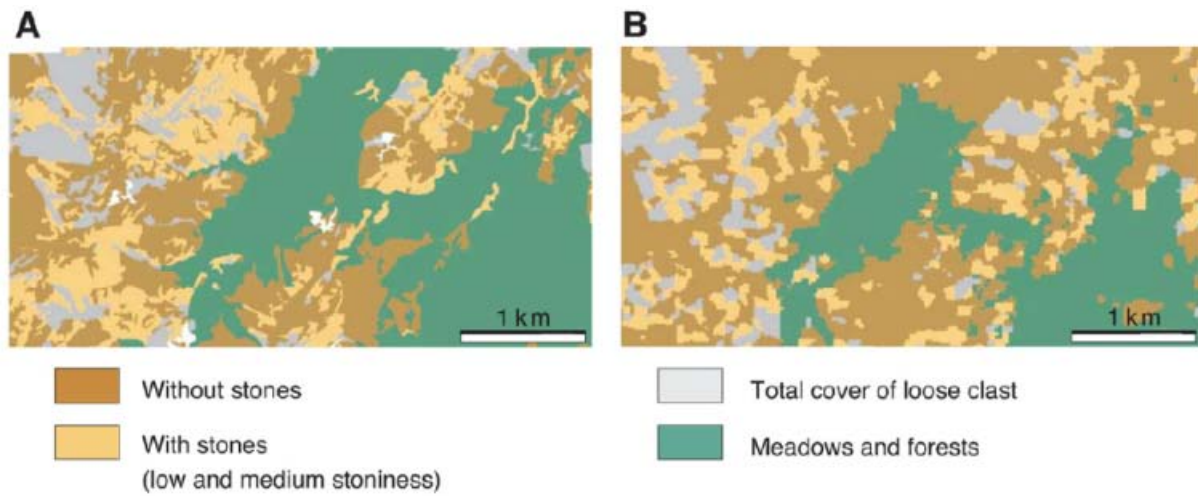


Figure 2.7 Extrait de la carte de pierrosité issue de la photo-interprétation (A) et classification de l'image SAR (Menéndez Duarte *et al.*, 2008).

La **texture** caractérise la distribution en taille des particules de la matrice fine du sol ($\emptyset < 2\text{mm}$). On distingue trois classes principales : les sables ($2\text{mm} > \emptyset > 50\mu\text{m}$), les limons ($50\mu\text{m} > \emptyset > 2\mu\text{m}$) et les argiles ($< 2\mu\text{m}$) (Baize et Girard, 2008).

- Les argiles présentent une faible clarté, qui est corrélée à de fortes teneurs en matière organique et une forte teneur en eau, qui leur confèrent une faible réflectance. Deux types d'investigations peuvent être réalisés : une estimation des argiles « granulométriques » et une estimation des argiles « minéralogiques ». Lagacherie *et al.* (2008) ont montré que la quantification des argiles « granulométriques » pouvait être prédite dans l'infrarouge, les argiles présentant un pic d'absorption à 2206 nm. Ils ont estimé les quantités d'argile contenues dans les sols de la Vallée de Peyne (34) par des mesures en laboratoire et sur le terrain (spectromètre portable ASD), et par le système aéroporté HyMap. La prédiction réalisée en condition de laboratoire est bonne ($R^2 = 0,73$), alors que les prédictions réalisées sur le terrain et à partir des données HyMap sont moins pertinentes (Figure 2.8). La quantification de la minéralogie des argiles peut également être estimée dans le domaine spectral du proche infrarouge et du moyen infrarouge, pour des pics d'absorption spécifiques (Chabrilat *et al.*, 2002). L'estimation de la quantification a été réalisée à partir de deux capteurs hyperspectraux à très haute résolution spatiale (AVIRIS et HyMap). L'étude a démontré que la THRS donne des images plus précises qui permettent de mieux

discriminer les zones hétérogènes. Cependant, la résolution spatiale n'améliore pas la reconnaissance de la minéralogie des argiles.

- Les limons (50 μm à 2 μm) sont difficilement quantifiables par télédétection. Les sols limoneux sont soumis au processus de battance, et la formation de croûte à la surface du sol va diminuer la rugosité. Les états de surface d'apparence lisse vont présenter une forte réflectance dans le visible (Girard et Girard, 2010).
- Les sables, par leur faible teneur en eau et leur forte clarté, présentent une réflectance élevée. Barnes et Baker (2000) ont démontré qu'il existait des corrélations positives significatives entre sables et réflectance, et négatives pour les argiles et les limons pour divers domaines spectraux (VIS-NIR-SWIR). Cependant, la caractérisation de la texture n'est pas aisée, car la réflectance du sol est dépendante de nombreux facteurs tels que les pratiques culturales, la végétation ou encore l'humidité de surface. La caractérisation qualitative de la texture du sol peut être réalisée par le biais d'images hyperspectrales (Casa *et al.*, 2013). La détermination réalisée en laboratoire a montré que le domaine spectral du SWIR (1.9 à 2.5 μm) était bien adapté à la caractérisation de la texture. L'estimation issue de données télédétektées (MIVIS, CHRIS) est également acceptable ; cependant, les résultats varient en fonction des modalités choisies pour la calibration et la validation du modèle de prédiction.

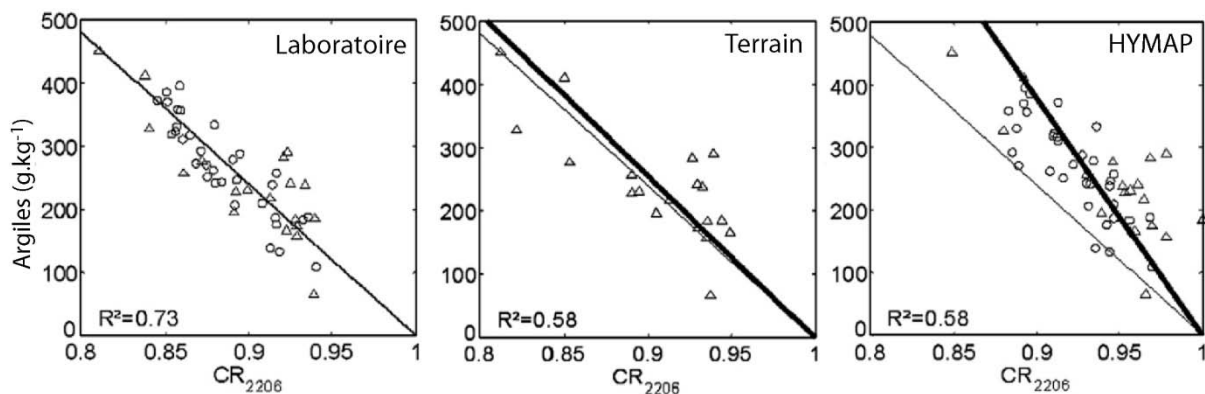


Figure 2.8 Relation entre la quantité d'argiles mesurée et le continuum removal de la bande 2206 nm, pour les différents contextes de mesure : laboratoire, terrain et HYMAP (Lagacherie *et al.*, 2008).

Le **carbonate de calcium** augmente la réflectance des sols. Dans le domaine du visible, il existe une relation linéaire entre la réflectance et la teneur de carbonate de calcium (CaCO_3) sur la bande 400 nm en laboratoire, pour les échantillons contenant plus de 40 % de CaCO_3 (Courault, 1989) (Figure 2.9). Toutefois, la relation peut être biaisée sur le terrain, car les sols battants présentent eux aussi des teintes claires alors qu'ils ne sont pas forcément carbonatés. Dans une étude réalisée sur des sols de la vallée de Payne (34), Lagacherie *et al.* (2008) ont mis en évidence l'importance du SWIR

pour estimer les quantités de carbonate de calcium du sol. Le pic d'absorption situé à 2330 nm permet d'estimer les teneurs en CaCO_3 si celles-ci sont supérieures à $100\text{-}200\text{ g.kg}^{-1}$. Cependant, la qualité de l'estimation se détériore lorsque l'on passe du laboratoire ($R^2 = 0.92$) au terrain ($R^2 = 0.79$) et à la prédiction aéroportée ($R^2 = 0.47$). Cette perte de précision peut s'expliquer par des effets atmosphériques résiduels ou par des incertitudes sur l'étalonnage radiométrique.

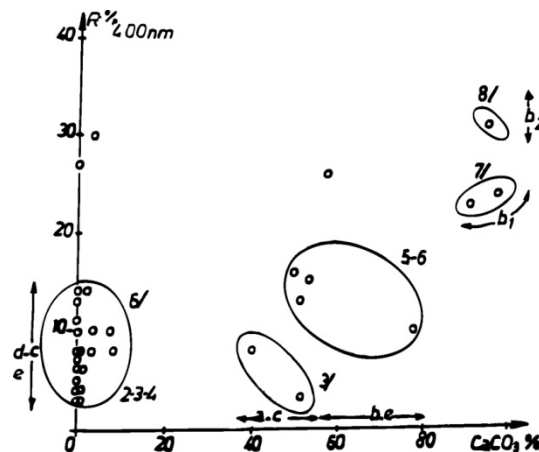


Figure 2.9 Relation entre le calcaire et la réflectance à 400 nm, et regroupement en fonction des formes de courbes dans le visible et les clartés Munsell correspondantes (d'après Courault, 1989).

La **matière organique** est observable en télédétection par imagerie sur l'ensemble du domaine du visible. La matière organique diminue la réflectance de façon très importante. La couleur du sol est un bon indicateur de la teneur en carbone organique dans des conditions de laboratoire (Viscarra Rossel *et al.*, 2006b, 2008). Dans le visible, la teneur en carbone organique est fortement corrélée aux bandes spectrales situées à 410, 570 et 660 nm. Les études de spectroscopie dans le domaine spectral VIS-NIR par proxy-détection permettent une estimation quantitative de la teneur en matière organique (Viscarra Rossel et McBratney, 1998 ; Berthier *et al.*, 2008 ; Viscarra Rossel *et al.*, 2009 ; Stenberg *et al.*, 2010). Ces études ont pour objectif d'estimer les teneurs en carbone organique, à l'aide d'un spectromètre portable de terrain, afin de limiter le nombre d'analyses en laboratoire et de prédire directement les teneurs sur le terrain pour des objectifs cartographiques. Elles ont démontré qu'il était possible d'estimer les teneurs en carbone organique avec une erreur quadratique moyenne de validation croisée faible de l'ordre de $0,53\text{ g.kg}^{-1}$ en laboratoire. La quantification par télédétection hyperspectrale dans le domaine VIS-NIR présente également un fort potentiel pour estimer les teneurs en carbone organique à diverses échelles spatiales (Gomez *et al.*, 2008 ; Hbirkou *et al.*, 2012). Les systèmes aéroportés hyperspectraux (HyMap) permettent d'obtenir une estimation du carbone organique avec une erreur quadratique moyenne de

l'ordre de $0,76 \text{ g.kg}^{-1}$, pour des concentrations variant entre $8,3$ et $18,5 \text{ g.kg}^{-1}$, à l'échelle de la parcelle (Hbirkou *et al.*, 2012) (Figure 2.10).

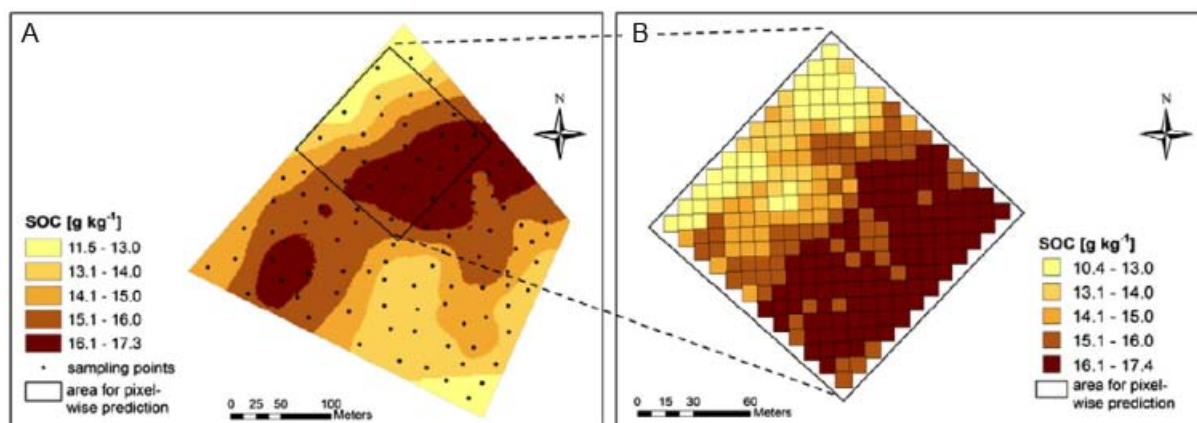


Figure 2.10 Cartographie du taux de carbone organique du sol (SOC) réalisée par krigeage des prélèvements analysés (A) et zoom sur une portion de la carte du SOC prédite à partir du modèle spectral VIS/NIR (Hbirkou *et al.*, 2012).

Les teneurs en **fer** peuvent être estimées dans des conditions de laboratoire à partir d'un simple appareil photographique numérique (Viscarra Rossel *et al.*, 2008). La proxy-détection a démontré également le potentiel du domaine spectral VIR-NIR pour évaluer les concentrations en oxydes et hydroxydes de fer contenues dans les sols (Abrams et Hook, 1995 ; Palacios-Orueta et Ustin, 1998 ; Nanni et Demattê, 2006). Les oxy-hydroxydes de fer, goethite et hématite, que l'on retrouve dans les sols tempérés et tropicaux, présentent deux pics d'absorption respectivement à 960 nm et 892 nm (Viscarra Rossel *et al.*, 2009). Peu d'études ont été menées sur l'estimation du fer par télédétection. Bartholomeus *et al.* (2007) ont démontré qu'il était possible d'évaluer la teneur en fer dans des sols méditerranéens, par télédétection aéroportée hyperspectrale, dans le domaine du VIS-NIR (ROSIS). Néanmoins, la prédiction est nettement dégradée entre les conditions de laboratoire ($R^2 = 0,67$) et les données de télédétection ($R^2 = 0,26$). La zone couverte étant nettement végétalisée, il est possible que les relations soient sensibles à la présence de la couverture végétale.

La **rugosité** de la surface du sol peut être due à plusieurs facteurs tels que la présence de croûtes, la porosité, la pierrosité, les pratiques culturales, etc. La rugosité de surface va conduire à une diminution de la réflectance, du fait de la présence d'ombres créées par les microreliefs. Cette rugosité est un facteur qui varie tout au long de l'année et peut être liée aux conditions météorologiques (croûte de battance) ou aux périodes de travail du sol (Girard et Girard, 2010). Les pratiques culturales vont avoir une forte influence sur la réflectance de l'état de surface. Les sols labourés, rugueux, se caractérisent par une faible réflectance du fait de la présence d'ombres portées, alors que les sols semés ont une réflectance plus forte (Courault, 1989).

Ces diverses études ont démontré l'intérêt d'utiliser la télédétection pour la reconnaissance des propriétés physico-chimiques qui composent les EDS. Cependant, ces recherches ont été réalisées le plus souvent sur des régions spécifiques. Ainsi, les résultats obtenus ne permettent pas une application directe des modèles proposés à d'autres régions. La caractérisation de ces propriétés peut être faite dans de nombreux domaines spectraux spécifiques. Ceci implique l'acquisition de nombreuses images et augmente le temps de traitement des images. Parmi tous les domaines spectraux utilisés, le visible permet d'appréhender de façon qualitative plusieurs propriétés telles que la pierrosité, la matière organique, le fer et le carbonate de calcium. L'acquisition de ces données peut être réalisée à l'aide d'un simple appareil photographique numérique. De plus, l'interprétation des données issues du domaine spectral du visible nécessite peu de traitement et de filtrage, et est peu onéreuse (Manchanda *et al.*, 2002). Ces données permettent un retour direct à l'information qui est visible sur l'image. L'intérêt de ce domaine spectral reste limité pour une caractérisation quantitative des propriétés de la surface du sol par télédétection ; cependant, son utilisation pour une caractérisation qualitative semble justifiée. Nous proposons donc d'utiliser ce domaine spectral pour la caractérisation des états de surface du sol en contexte viticole.

b) Choix du couple vecteur-capteur en secteur viticole

Le choix de la résolution spatiale et spectrale du capteur utilisé dans cette thèse doit être applicable au contexte viticole. Dans ce contexte bien particulier de culture pérenne, e.g la vigne, de nombreux éléments sont présents tout au long de l'année, tels que les ceps de vigne, les piquets, les ombres portées, la végétation, etc. Ces éléments ne caractérisent pas le sol, et seront nommés composantes « hors sol » par la suite. À ce jour, les images satellites THRS offrent une résolution spatiale maximale de l'ordre de 30 à 50 cm en panchromatique, et de l'ordre du mètre en multi-spectral. Les acquisitions aéroportées offrent une meilleure résolution de l'ordre de 50 cm dans le domaine spectral du visible, et plus récemment une résolution spatiale de 20 cm (actuelle acquisition ORTHO HR, IGN), mais présentent un coût important et sont réalisées sur de grandes surfaces (l'acquisition ORTHO HR de l'IGN est réalisée à l'échelle départementale). Pour ces résolutions, les composantes « hors sol » risquent de ne pas être distinguées des composantes « sols ». L'acquisition d'images à plus haute résolution permet de s'affranchir de ces contraintes et peut alors être obtenue par l'utilisation d'un vecteur aéroporté.

En secteur viticole, l'imagerie THRS vise à individualiser différentes composantes qui constituent les EDS, comme la végétation et la pierrosité, variables majeures pour la caractérisation des EDS (Corbane, 2006 ; Corbane *et al.*, 2008). Le faible espace nécessaire pour le décollage-

atterrissage et la maniabilité des drones hélicoptères rendent ce vecteur bien adapté à l'acquisition d'images en secteur viticole. De plus, les technologies embarquées sur les drones, telles que le GPS, les stations inertielles, les systèmes d'auto-pilotage, permettent d'obtenir des données de qualité et reproductibles dans le temps. Les versants viticoles de la Côte se caractérisent par une amplitude topographique de l'ordre de 100 m entre l'amont et l'aval. L'utilisation d'un drone hélicoptère permet de s'affranchir de cet effet topographique sur la qualité des images. Ces vecteurs sont capables de garder une altitude de vol constante au-dessus du sol, celle-ci étant corrigée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) initialement chargé dans l'appareil. Ainsi, les images obtenues présentent une résolution spatiale stable, tout en s'affranchissant des déformations géométriques liées au relief.

Le capteur conditionne la résolution spectrale. Ce dernier doit être choisi pour permettre l'observation des composantes d'EDS spécifiques aux sols viticoles de la Côte. Ceux-ci sont principalement situés sur des formations calcaires et sont souvent caractérisés par une pierrosité de surface importante de teinte claire qui contraste avec la matrice du sol plus foncée. Par ailleurs, les pratiques culturales conduisent dans certains cas à enherber le sol de vigne, qui est alors recouvert par de la végétation. Enfin, les versants peuvent être localement recouverts par des altérites anciennes, d'une couleur rouge-orangé due à leur forte concentration en fer. Ainsi, de par les différentes couleurs des éléments composant les états de surface des sols viticoles de la Côte, le domaine spectral du visible semble pouvoir être capable d'identifier toutes les composantes « sol » des EDS.

Au vu des différents systèmes utilisés en télédétection et du contexte bien particulier de vignoble en pente, notre choix s'est porté sur un vecteur aéroporté de type drone, équipé d'un capteur opérant dans le domaine spectral du visible. Ce système fournit des images THRS dans le domaine spectral du visible (résolution centimétrique) capable d'individualiser les composantes « sol » des composantes « hors sol ». Il sera possible d'évaluer si la très haute résolution spatiale peut compenser la faible résolution spectrale et si la couleur estimée par imagerie peut être utilisée comme un paramètre de caractérisation des EDS. Néanmoins, les données issues des techniques de télédétection renseignent uniquement sur l'état de surface du sol. L'acquisition de données complémentaires est nécessaire pour caractériser le sol et le substrat géologique. Des prospections géophysiques pourraient répondre à ce besoin.

2.2.2 Méthodes d'investigation géophysique du substrat et du sol

Les techniques de géophysique sont basées sur la mesure des propriétés physiques du sol et du substrat géologique telles que la susceptibilité magnétique, la densité, les propriétés élastiques, la résistivité électrique (Keary *et al.*, 2002), qui permettent d'enregistrer les variations des propriétés physiques du milieu de façon « pseudo-continue » et peuvent être utilisées à haute résolution spatiale (Bottraud *et al.*, 1984 ; Dabas *et al.*, 1989 ; Michot, 2003). Parmi ces techniques d'investigation géophysique, les méthodes électriques, basées sur la mesure de la conductivité ou de la résistivité du substrat et/ou du sol, sont utilisées en géologie et en science du sol.

2.2.2.1 La résistivité électrique

a) Principe

La résistivité électrique, notée ρ , représente la capacité d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique (Kearey *et al.*, 2002). Pour un corps simple, par exemple un cylindre de roche, la résistivité est définie par l'équation (2.1) :

$$\rho = \frac{S}{L} \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Elle s'exprime en Ohm.mètre (Ohm.m), avec S la surface de la base du cylindre exprimée en m², L la longueur du cylindre exprimée en m, V la tension du courant électrique exprimée en volt (V) et I l'intensité du courant électrique exprimée en ampère (A).

La résistivité électrique est directement liée aux propriétés intrinsèques du matériau traversé par le courant électrique. Dans la roche, le courant électrique peut se propager selon deux modes distincts : la conductibilité solide et la conductibilité liquide électrolytique. Dans le cas de la conductibilité solide, le passage du courant s'effectue par le déplacement d'électrons (Chapellier, 2000). Ce mode de transfert n'est valable que pour certains minéraux tels que le graphite ou les métaux natifs (Keller, 1988 ; Kearey *et al.*, 2002). La plupart des roches sont des isolants et ne laissent donc pas passer le courant électrique. La conductibilité du courant électrique est donc presque uniquement électrolytique. Pour ce mode de transfert, ce sont les ions qui transportent les charges sous l'effet du champ électrique. Les roches conduisent ainsi le courant électrique par l'eau qu'elles contiennent (Keller, 1988). Il en résulte que la porosité de la roche est le principal facteur qui contrôle la résistivité électrique des roches, et que cette dernière augmente généralement lorsque la porosité diminue. Les types de roches présentant des valeurs de porosité très différentes, la résistivité électrique des roches offre une grande gamme de variations (Figure 2.11) (Palacky, 1988 ; Chapellier, 2000 ; Henry, 2000). Ces propriétés ont conduit Archie (1942) à définir une formule empirique qui permet

d'exprimer la résistivité (ρ) d'une roche non argileuse saturée par rapport à sa porosité et à la résistivité de l'eau qui sature la roche, selon l'équation (2.2) :

$$\rho = a\phi^{-b}f^{-c}\rho_w \quad (2.2)$$

Où ϕ est la porosité, f est la fraction des pores qui contiennent de l'eau de résistivité ρ_w et a , b et c sont des constantes empiriques.

La résistivité de l'eau varie considérablement en fonction de la quantité et de la conductivité électrique du matériau dissous. Une eau saline va être très conductrice par rapport à une eau pauvre en sels minéraux. La résistivité de l'eau « douce » est 100 fois plus importante que celle de l'eau de mer. La perméabilité de la roche, qui représente la capacité de la roche à être traversée par un fluide, va également influencer la résistivité de celle-ci. Une roche à faible perméabilité va présenter une plus forte résistivité qu'une roche très perméable. La température du milieu modifie également les valeurs de résistivité. Quand un fluide chauffe, sa viscosité diminue, et les ions sont plus facilement mobilisables. Une augmentation de température va donc conduire à une diminution de la résistivité (Chapellier, 2000).

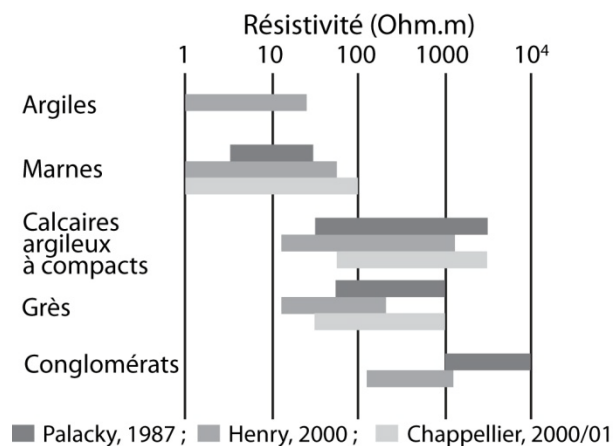


Figure 2.11 Compilation des valeurs de résistivité électrique pour chaque type de roche sédimentaire (d'après Chapellier, 2000 ; Henry, 2000 ; Palacky, 1988).

Dans le cas des sols, le courant électrique se propage selon le modèle de conductibilité liquide électrolytique. Les variables qui influencent la résistivité électrique d'un sol peuvent être séparées en deux groupes : les variables intrinsèques pérennes et les variables d'état diachronique (Michot, 2003).

Parmi les variables intrinsèques, la pierrosité va modifier les valeurs de résistivité. Une augmentation de la pierrosité va avoir comme conséquence une augmentation de la résistivité (Tetegan *et al.*, 2012). La texture du sol va également contrôler la résistivité électrique, car la conductivité électrique est liée à la taille des particules du fait de la densité de charge électrique à la

surface des constituants solides (Samouëlian *et al.*, 2005). Ainsi, les nombreuses charges électriques situées sur la surface des particules argileuses diminuent la résistivité des sols argileux (Abu-Hassanein *et al.*, 1996 ; Giao *et al.*, 2003). La structure du sol, qui représente la façon selon laquelle les particules élémentaires ou les agrégats s'organisent dans le sol, modifie les valeurs de résistivité. La géométrie des pores et leur influence sur l'équilibre air-eau dans les sols sont les paramètres qui expliquent le mieux les différences de résistivité (Robain *et al.*, 1996).

Parmi les variables d'état diachronique, la teneur en eau du sol joue un rôle majeur sur la résistivité électrique (Samouëlian *et al.*, 2005) (Figure 2.12). La résistivité va être dépendante à la fois de la teneur en eau du sol, du taux de saturation en eau et de la concentration ionique de la solution du sol. Une augmentation de saturation en eau conduit à une diminution des valeurs de résistivité électrique (Rhoades *et al.*, 1976). La conductivité électrique de l'eau dépend de sa concentration ionique. Dans des conditions de laboratoire, Kalinski et Kelly (1993) ont démontré que pour une quantité d'eau donnée, la résistivité électrique diminue quand la conductivité hydraulique de l'eau augmente. Il semblerait que la relation entre résistivité électrique et conductivité hydraulique soit inverse dans le cas de sols particuliers. Celle-ci s'explique par la taille des particules, les fractions grossières présentant une forte résistivité et une forte conductivité hydraulique (Mazac *et al.*, 1990). La température modifie également les valeurs de résistivité électrique. Les variations saisonnières et journalières de la température ambiante vont avoir une nette influence sur la température du sol et donc sur la résistivité. La température influence la viscosité des fluides, qui affecte la mobilité des ions dans ce fluide (Michot, 2003). Une augmentation de la température conduit à une augmentation de la conductivité électrique, entraînant une diminution des valeurs de résistivité.

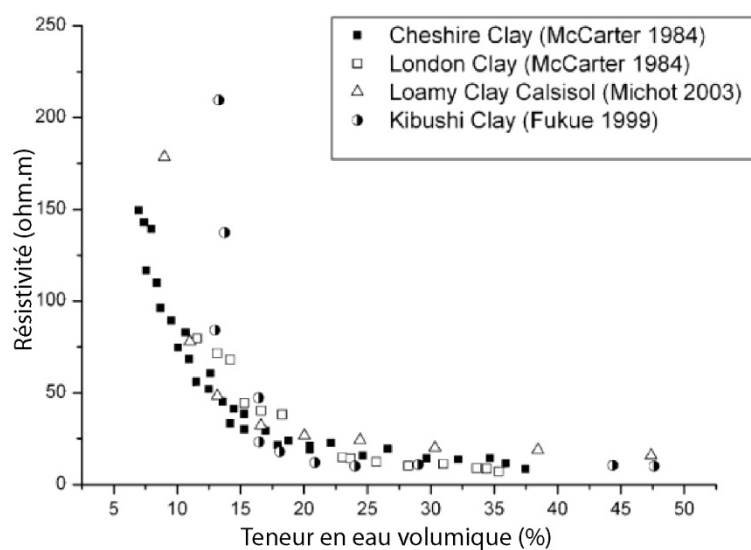


Figure 2.12 Relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau du sol pour différents types de sol (Samouëlian *et al.*, 2005).

b) Mesure de la résistivité

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la résistivité électrique. La plus couramment employée nécessite quatre électrodes métalliques formant un quadripôle avec injection de courant électrique continu dans le sol (Figure 2.13). L'injection du courant continu se fait à partir de deux électrodes A et B, nommées « électrodes de courant ». Deux autres électrodes M et N, nommées « électrodes de potentiel », sont utilisées pour mesurer la différence de potentiel.

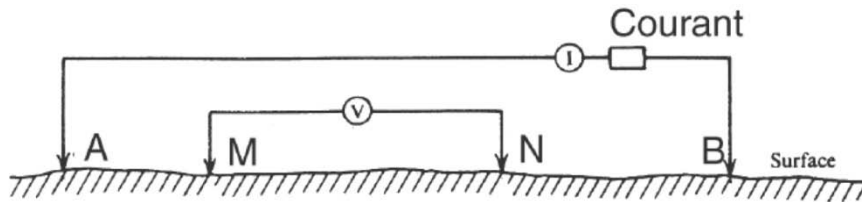


Figure 2.13 Schéma d'un quadripôle : les électrodes A et B injectent le courant, la mesure de potentiel se fait à partir des électrodes M et N.

Dans le cas d'une surface homogène et pour un seul point d'injection, le courant circule de façon radiale depuis la source. Ainsi, le potentiel est inversement proportionnel à la distance à la source. Le potentiel (V) est défini par l'équation 2.3 :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.3)$$

Où r est la distance à la source, ρ la résistivité et I l'intensité du courant injecté.

Ainsi, pour un quadripôle ABMN (Figure 2.13), on mesure la différence de potentiel (ΔV) selon l'équation 2.4 :

$$\Delta V = VM - VN = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right] \quad (2.4)$$

Avec ΔV en mV, ρ en $\Omega.m$ et I en mA.

La différence de potentiel est alors proportionnelle à la résistivité électrique, et est dépendante de la distance qui sépare les électrodes. Le sol étant un milieu hétérogène, les mesures effectuées sur le terrain ne représentent pas la résistivité « vraie », mais la résistivité dite « apparente », notée ρ_a . La résistivité apparente est la moyenne des résistivités « vraies » des divers éléments traversés par le courant. La résistivité apparente mesurée est transformée par des méthodes d'inversion pour obtenir

des valeurs de résistivité vraie (Szaraniec, 1970; Loke, 2013). La résistivité apparente ρ_a s'exprime par l'équation 2.5 :

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (2.5)$$

Où ρ_a s'exprime en $\Omega.m$; ΔV est la différence de potentiel (mV) ; I est l'intensité du courant (mA) ; k est le facteur géométrique qui dépend de l'arrangement des électrodes qui forment le quadripôle, k est défini par l'équation 2.6 :

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB}\right)} \quad (2.6)$$

Où MA, MB, NA et NB représentent la distance géométrique qui sépare les électrodes A et M, B et M, A et N, et B et N (Figure 2.13).

Au vu des différents facteurs qui contrôlent les variations de résistivité électrique, l'étude de ce paramètre est adaptée à la caractérisation du substrat géologique et/ou du sol. Dans le cas des roches, il est possible de discriminer les diverses formations lithologiques selon leur nature, *i.e.* calcaire dur, calcaire bioclastique, marnes et formations superficielles, et d'évaluer leur distribution spatiale. Pour les sols, la résistivité électrique peut être utilisée pour estimer les variations de certaines propriétés telles que la pierrosité, la granulométrie, l'humidité, la profondeur du sol.

2.2.2.2 Technique de caractérisation du substrat : la tomographie électrique

La tomographie électrique (*Electrical Resistivity Tomography* en anglais ou ERT), communément appelée « panneau électrique », se base sur la mesure de la résistivité électrique du milieu. La méthode de tomographie électrique combine les techniques de traîné électrique et de sondage électrique, et permet de visualiser les variations horizontales et verticales du milieu sur une profondeur d'investigation importante (Dahlin and Loke, 1998 ; Dahlin, 2001). Cette méthode est, à ce jour, principalement utilisée en géologie et son usage se développe en science du sol (Kearey *et al.*, 2002 ; Samouëlian *et al.*, 2005 ; Chambers *et al.*, 2006). Les acquisitions peuvent être réalisées en 2D ou en 3D (Loke et Barker, 1996).

L'acquisition de profil 2D s'effectue à l'aide d'un résistivimètre multi-électrodes (Figure 2.14). Un ordinateur est relié au dispositif d'acquisition servant à charger les séquences à acquérir et à télécharger les données acquises, et à suivre les mesures pendant l'acquisition.

Le résistivimètre est relié à un jeu d'électrodes, reliées les unes aux autres, qui seront utilisées pour envoyer le courant et mesurer la différence de potentiel. Les électrodes, implantées en ligne, sont équidistantes, et l'espacement entre les électrodes détermine la profondeur d'investigation du dispositif. Du fait de la géométrie des lignes de courant, le résultat de l'acquisition est de forme trapézoïdale.

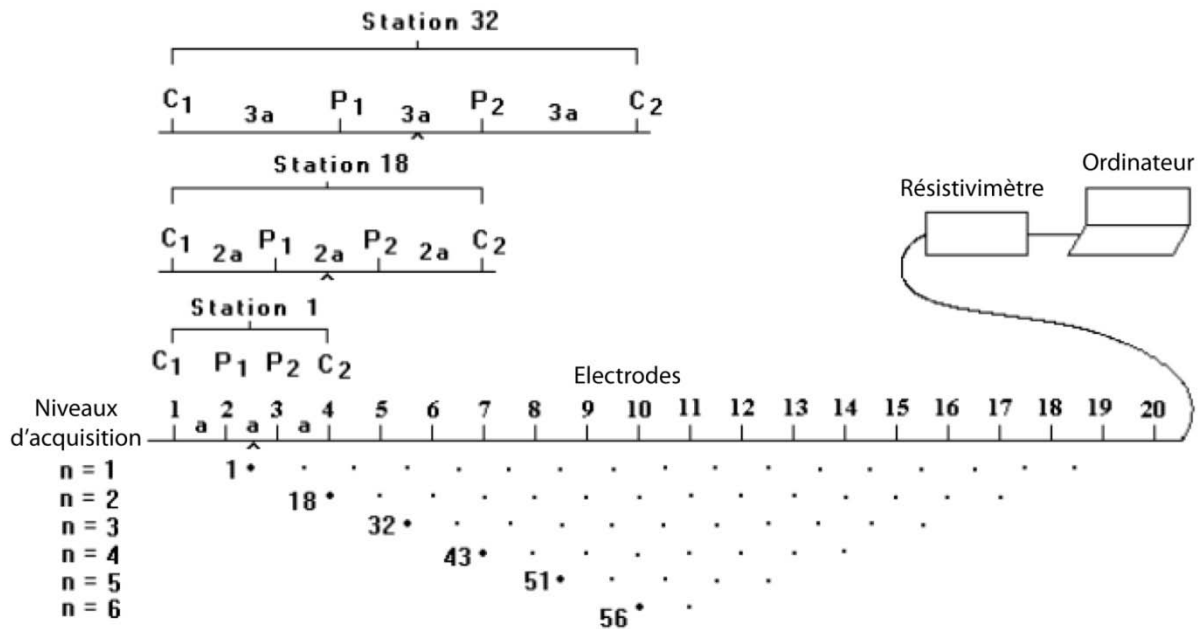


Figure 2.14 Schéma d'une séquence d'acquisition utilisant un dispositif Wenner à 20 électrodes (modifié d'après Loke, 2013).

En tomographie électrique 2D, plusieurs dispositifs d'acquisition sont utilisables qui se différencient par la configuration géométrique des quadripôles. Cinq dispositifs sont utilisés, avec des profondeurs d'investigation différentes et plus ou moins adaptés à la reconnaissance des structures en fonction de leur orientation (Tableau 2-4) (Roy et Apparao, 1971 ; Barker, 1989 ; Loke, 2013). Les dispositifs Wenner, pôle-dipôle et pôle-pôle sont communément utilisés pour reconnaître des structures horizontales. Le dispositif dipôle-dipôle met en évidence les structures verticales. Enfin, le dispositif Wenner-Schlumberger, sensible aux variations horizontales et verticales, est utilisé dans le cas où l'on a aucune connaissance *a priori* sur les structures recherchées, ou inversement quand les structures à relever sont horizontales et verticales. Pour chaque dispositif, le choix de l'espacement, entre les électrodes et le nombre d'électrodes utilisées, va définir la profondeur d'investigation. Plus les électrodes seront resserrées entre elles, plus la profondeur d'investigation sera faible. L'espacement entre les électrodes doit être défini en fonction des objets étudiés ; un espacement faible sera utilisé pour observer les propriétés du sol, alors qu'un grand espacement permettra une reconnaissance des structures géologiques. Pour caractériser le substrat, il est nécessaire d'obtenir une profondeur

d'investigation suffisamment importante pour observer les successions de formations. Toutefois, un espacement trop important va conduire à une diminution de la résolution spatiale, et les formations lithologiques de faible épaisseur ne pourront être discriminées (exemple des formations superficielles).

Dispositif	Profondeur d'investigation		Sensibilité aux structures	
	Roy (1971)	Barker (1989)	Horizontales	Verticales
Wenner	0.110L	0.17L	+	-
Wenner-Schlumberger	0.125L	0.19L	+	+
Dipôle-dipôle	0.195L	0.25L	-	+
Pôle-dipôle	-	-	+	-
Pôle-pôle	0.350L	-	+	-

Tableau 2-4 Profondeurs d'investigation et types de structure reconnus pour les différents dispositifs utilisés en tomographie électrique. L représente la longueur totale du profil, exprimée en m (d'après Roy et Apparao, 1971 ; Barker, 1989).

Pour couvrir des distances importantes de l'ordre du kilomètre, la méthode de « roll-along » peut-être utilisée (Figure 2.15). Après l'acquisition d'un profil complet, le câble situé à l'amont (F1 sur la Figure 2.15) est déplacé à l'extrémité aval du profil, impliquant le déplacement du secteur prospecté. Pour limiter le nombre d'acquisitions, seul le secteur non prospecté auparavant est mesuré (points bleus sur la Figure 2.15) (Loke, 2013). En déplaçant le dispositif de cette façon, on arrive à avoir une information en « continu » sur toute la profondeur d'investigation pour de grandes distances.

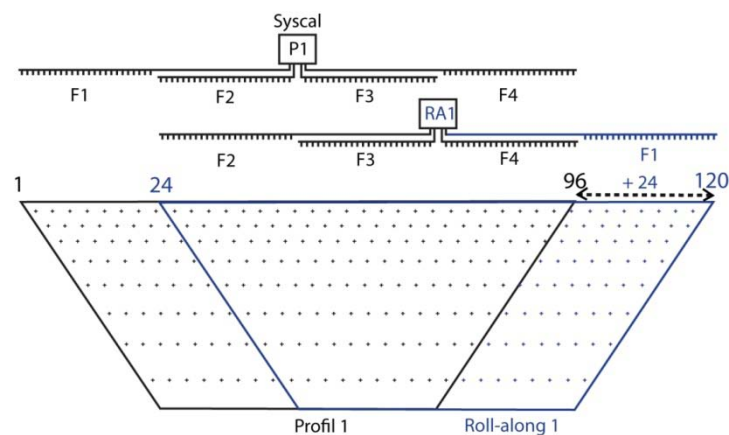


Figure 2.15 Schéma représentant la mise en place d'un roll-along pour une configuration Syscal Pro 96 électrodes.

Les données issues des acquisitions par tomographie électrique renseignent sur la résistivité apparente (ρ_a) du milieu, pour calculer la résistivité « vraie », un modèle d'inversion est utilisé

(Szaraniec, 1970 ; Loke, 2013). Il a pour objectif de transformer les valeurs de résistivité apparente mesurées en valeurs de résistivité « vraie » en chaque point du profil. L'inversion est réalisée selon la méthode des différences finies ou la méthode des éléments finis, basée sur une approche des moindres carrés (Dey et Morrison, 1979 ; Silvester et Ferrari, 1996). À partir des données ponctuelles de résistivité apparente mesurées, on construit une pseudo-section (Figure 2.16). Cette pseudo-section est une carte des valeurs des résistivités apparentes calculées à partir de la différence de potentiel de chaque quadripôle. À partir de la pseudo-section, l'inversion des données produit une carte de résistivité (Étape 1 sur la Figure 2.16). À partir de ce modèle de résistivité, on calcule un modèle de résistivité apparente (Étape 2 sur la Figure 2.16). En comparant la pseudo-section mesurée (A) et la pseudo-section calculée (B), on calcule le pourcentage d'erreurs entre les deux pseudo-sections (Étape 3 sur la Figure 2.16). Le modèle de résistivité est itérativement recalculé jusqu'à convergence du modèle (Loke, 2013). Après convergence, le modèle de résistivité peut alors être interprété.

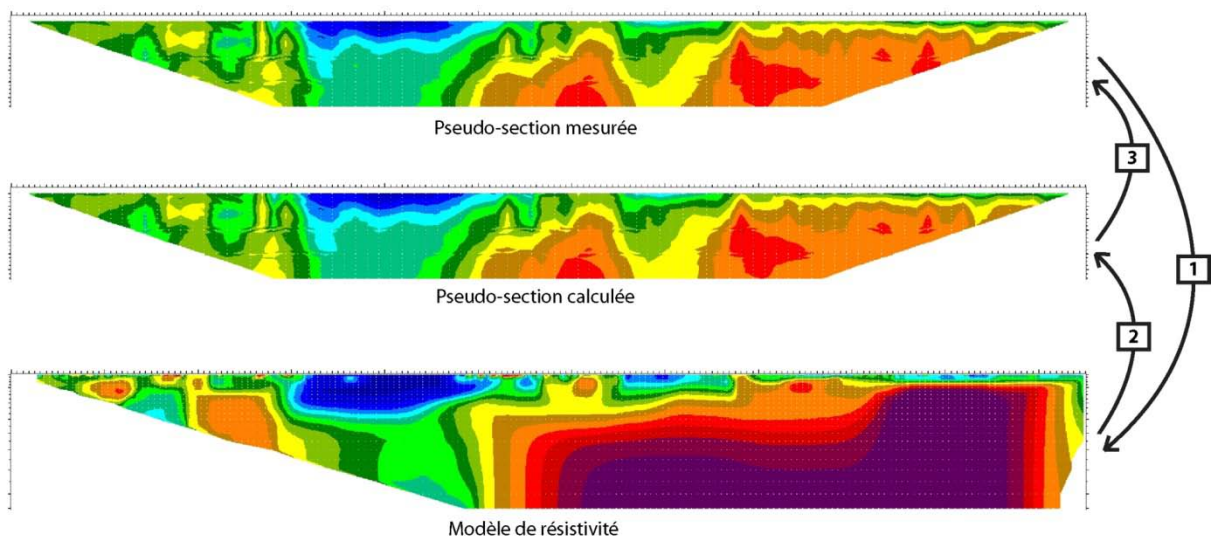


Figure 2.16 Processus d'inversion réalisé sous le logiciel Res2dinv (Geotomo Software©). Les trois étapes sont itérativement réalisées jusqu'à convergence du modèle.

L'interprétation géologique des profils électriques restant cependant ambiguë, elle nécessite d'être combinée avec des observations locales (affleurements géologiques, sondages, fosses pédologiques) (Marescot, 2006). Pour la géologie, l'interprétation est limitée à des configurations structurales simples, de type tabulaires et/ou fracturées ; pour des configurations plus complexes, l'interprétation est impossible (Kearey *et al.*, 2002).

Cette méthode permet d'obtenir une image du substrat à haute résolution spatiale (Dubois *et al.*, 2011), difficilement réalisable par les méthodes de cartographie conventionnelles, du fait du manque d'affleurements, en contexte viticole de versant.

2.2.2.3 Cartographie en continu des propriétés du sol : le système ARP®

Au cours des trente dernières années, les méthodes de mesure en continu des propriétés électriques des sols à des fins cartographiques ont évolué. Le développement d'appareillages mobiles dans les années 1980 a permis la mesure de la résistivité à une vitesse suffisamment grande pour prospecter de grande surface en un temps limité (1 à 10 ha dans la journée selon la résolution attendue) (Dabas *et al.*, 1989 ; Moeys *et al.*, 2006). Le système RATEAU, constitué d'un seul quadripôle monté derrière un tracteur, a été utilisé pour cartographier des variations de résistivité pour une seule profondeur, dépendante de l'écartement entre les électrodes (Dabas *et al.*, 1989). Un nouveau dispositif multi-électrodes, en « vol de canard », utilisant des roues crantées, a été développé à la fin des années 1990 (Panissod *et al.*, 1997, 1998). Ce système nommé MUCEP (MULTipole Continuous Electrical Profiling) a permis une cartographie des variations verticales et latérales de la résistivité électrique du sol. Ce dispositif a été amélioré par la suite par la société Géocarta, et breveté sous le nom de système ARP® (Automatic Resistivity Profiling) (Dabas, 2008). Ces dispositifs multi-électrodes tractés sont de plus en plus employés pour établir des cartographies de la variabilité intra-parcellaire des paramètres physiques et chimiques des sols, notamment en secteur viticole (Goulet et Barbeau, 2004 ; André *et al.*, 2012 ; Priori *et al.*, 2013). Ces méthodes peuvent également être utilisées pour cartographier certains composants du sol comme la pierrosité (Tetegan *et al.*, 2012), la teneur en argile (Andrenelli *et al.*, 2013), l'humidité (Cousin *et al.*, 2009).

Le système ARP®, initialement développé pour des applications agricoles à des fins cartographiques, permet de réduire le nombre d'observations pédologiques pour réaliser des cartes de sols (Johnson *et al.*, 2001 ; Andrenelli *et al.*, 2013). Depuis sa création dans les années 2000, de nombreuses améliorations ont été réalisées. Le dispositif a été adapté au secteur viticole, en étant monté sur un quad (vignes avec inter-rangs larges) ou sur un tracteur enjambeur (vignes avec inter-rangs métriques) (Figure 2.17A), permettant ainsi d'augmenter la vitesse d'acquisition (Dabas, 2008). Le dispositif est composé d'un couple d'électrodes d'injections (I) et de trois couples d'électrodes qui mesurent la différence de potentiel pour chaque couple (V) (Figure 2.17B). Ce dispositif permet une acquisition de la résistivité électrique apparente sur trois profondeurs. La profondeur d'investigation de chaque carte produite est égale à la distance qui sépare les électrodes de chaque couple (Papadopoulos *et al.*, 2009). Ces trois niveaux permettent d'identifier les variations des propriétés du sol en 3D (Panissod *et al.*, 1997). Le positionnement géographique des données se fait à l'aide d'un GPS différentiel ou d'un GPS RTK. Ces outils de référencement permettent de recaler les données

entre elles avec une précision planimétrique de l'ordre du décimètre. De plus, l'ARP® permet d'acquérir en simultané la topographie de la zone prospectée. Les données sont acquises à une vitesse de 6m/s, quand le dispositif est monté sur un quad, offrant une résolution spatiale de 20 cm (Dabas, 2008). Quand le dispositif est monté sur un enjambeur, la vitesse est réduite, la résolution spatiale est donc augmentée. L'ARP® étant un dispositif tracté, il offre de très bons rendements de prospection de l'ordre de 2 ha/jour pour une maille métrique utilisée préférentiellement en archéologie (Panissod *et al.*, 1998), et de 10 ha/heure pour les cartographies de sol en secteur viticole avec une densité de 10 000 mesures à l'hectare (Goulet et Barbeau, 2004).

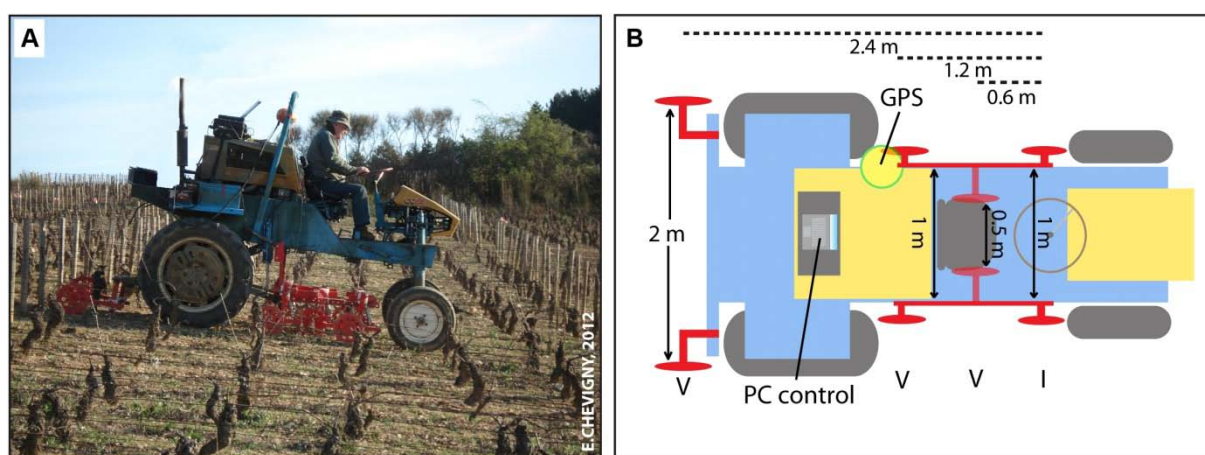


Figure 2.17 Dispositif ARP® monté sur un enjambeur (A). Les trois espacements entre les couples d'électrodes permettent de cartographier la résistivité électrique sur trois profondeurs d'investigation (B).

Les données issues de la prospection sont filtrées pour supprimer les valeurs aberrantes, généralement liées à des problèmes de contact entre les électrodes et le sol. Les valeurs de résistivité apparente sont interpolées pour chaque profondeur d'investigation. Plusieurs méthodes d'interpolation telles que le krigeage et l'interpolation bicubique 2D sont utilisées. Les données des trois profondeurs d'investigation peuvent également être traitées selon un modèle d'inversion 1D pour définir la résistivité « vraie » ou un modèle d'inversion 3D (Papadopoulos *et al.*, 2009). Par rapport aux trois cartes de résistivité apparente ARP®, l'inversion 3D peut fournir une vision plus quantitative des données. Pour supprimer la multicolinéarité qui existe entre les trois cartes de profondeur, une analyse en composante principale (ACP) peut être réalisée (Priori *et al.*, 2013). Cette analyse permet également de réduire le nombre de variables, puisque la quasi-totalité de la variance se trouve sur la première composante de l'ACP.

L'ARP® présente l'intérêt de pouvoir cartographier de façon « pseudo-continue » les variations intrinsèques des propriétés du sol. Cette méthode non invasive peut être utilisée pour suivre l'évolution des propriétés du sol au cours du temps. La flexibilité du dispositif offre la possibilité de choisir la résolution spatiale, du mètre jusqu'à plusieurs mètres. Ainsi, les variations des propriétés du sol à l'échelle intra-parcellaire à haute résolution peuvent être caractérisées tout en gardant une vitesse d'acquisition élevée. Les trois profondeurs d'investigation permettent également d'estimer la profondeur du sol quand celle-ci n'est pas supérieure à 2 m, ce qui est le cas pour les sols de la Côte. Elle peut être estimée en observant les contrastes de résistivité entre le sol et le substrat, si les gammes de résistivité sont différentes. Pour évaluer et prédire la distribution spatiale des propriétés du sol, il est nécessaire d'établir des correspondances entre la structure électrique mise en évidence et celle du sol, telle qu'elle est appréhendée sur le terrain. Ces correspondances sont réalisées par des observations pédologiques (sondages, profils), localisées en fonction de l'organisation spatiale du sol mise en évidence par la carte de résistivité (Bottraud *et al.*, 1984).

2.2.2.4 Application et choix des techniques en contexte viticole

La tomographie électrique est un outil adapté à la reconnaissance des formations lithologiques. Pour caractériser la diversité des formations lithologiques de la Côte et leur géométrie, il est nécessaire de bien définir le type et l'emplacement du dispositif d'acquisition.

- La géologie de la Côte viticole étant caractérisée par des formations tabulaires, ou à faible pendage structural et/ou fracturées, le dispositif Wenner-Schlumberger permettra d'identifier à la fois les variations lithologiques (limites horizontales) et les failles (limites sub-verticales).
- Les épaisseurs des formations géologiques sur la Côte variant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, une profondeur d'investigation de l'ordre de 40 à 50 m semble être un bon compromis pour évaluer au mieux la diversité des formations lithologiques sur la Côte. Un espacement inter-électrodes de 5 m permet d'atteindre cette profondeur avec le dispositif Wenner-Schlumberger.
- La topographie et les hétérogénéités de surface influencent les valeurs de la résistivité en profondeur. C'est pourquoi il faut bien choisir l'emplacement où le dispositif sera installé, afin d'éviter la présence de zones qui pourraient perturber les mesures telles que des falaises, des routes, des chemins, des zones remblayées. Toutefois, il n'est pas facile de trouver un secteur totalement dépourvu de ces éléments sur la Côte, puisque le paysage viticole façonné par l'homme est parcouru par un ensemble de voies de communication formant un réseau dense.

- L'implantation du dispositif devant se faire en ligne droite, il faut s'assurer d'avoir un secteur dégagé pour pouvoir implanter l'ensemble du transect. Là encore, il n'est pas toujours évident de trouver un secteur dégagé, puisque les vignes peuvent être plantées parallèlement aux courbes de niveau. Les vignes en Bourgogne étant toutes palissées, une implantation dans ce contexte (vignes parallèles aux courbes de niveau) n'est guère envisageable.

L'utilisation de l'ARP[®] présente un grand intérêt pour les travaux de cartographie des sols à haute résolution. Ce dispositif initialement utilisé en grande culture est adapté depuis une dizaine d'années à la cartographie des sols viticoles. L'utilisation de l'ARP[®] pour la cartographie des sols viticoles bourguignons semble donc être envisageable. Les conditions de son utilisation dans notre étude seront les suivantes :

- La densité de plantation en Bourgogne étant fixée à 10 000 pieds/ha, le dispositif devra être obligatoirement monté sur un enjambeur. La vitesse d'acquisition sera alors plus faible, tandis qu'une plus grande quantité de données sera acquise.
- Le pas d'acquisition (passage tous les X rangs) définit la résolution de la carte de résistivité. Un passage tous les cinq rangs est communément retenu en secteur viticole (5m). Cette résolution permet d'observer les variations des sols à l'échelle intra-parcellaire à haute résolution, tout en gardant une vitesse d'acquisition élevée.
- Afin d'obtenir un bon contact entre les électrodes et le sol, celui-ci ne doit pas être sec. De ce fait, les acquisitions doivent être réalisées de préférence soit au printemps, soit à l'automne.

L'état de surface est également un élément à prendre en compte, car la présence d'une pierrosité trop importante empêche le contact entre les électrodes et le sol. Si tel est le cas, les données présenteront de nombreuses lacunes.

2.3 Conclusion

En fonction des objectifs de l'étude, il est nécessaire de bien définir la résolution spatiale d'acquisition des données qui permettra la production de cartes à une échelle spatiale adaptée aux objectifs. Les études antérieures de terroirs réalisées en France ont mis en évidence une forte diversité géopédologique observée à l'échelle de la parcelle ou du groupe de parcelles. Pour ces études, les cartes ont été produites à grande échelle, au 1/25 000 jusqu'au 1/5 000, permettant une représentation des unités cartographiques dites « fonctionnelles » du terroir. Cette diversité a également été observée par les différents travaux réalisés sur la Côte. Cependant, les cartes géologiques et pédologiques accessibles à ce jour pour la Côte de Nuits et la Côte de Beaune ne semblent pas être adaptées à l'étude des terroirs viticoles côte-d'oriens.

Les méthodes conventionnelles de cartographie géologique et pédologique montrent que les techniques employées présentent des inconvénients quant à leur utilisation pour produire des cartes à grande échelle. Les méthodes employées sont longues et coûteuses, et ce, quelle que soit leur échelle de production. De plus, ces cartes produites à partir de données ponctuelles interpolées présentent une part de subjectivité, quant à la localisation des limites cartographiques, liée à l'expertise du cartographe. Pour limiter les coûts et améliorer le rendu cartographique à grande échelle en secteur viticole, des méthodes alternatives sont depuis peu utilisées, telles que la télédétection par imagerie ou la géophysique.

Les deux techniques d'imagerie, télédétection et géophysique, présentent de nombreux intérêts pour leur utilisation à des fins cartographiques. Elles permettent d'obtenir une vue synoptique des états de surface du sol, du sol et/ou du substrat. Elles s'affranchissent des méthodes d'interpolation entre les points d'observation, réalisées dans le cas des cartographies conventionnelles. L'acquisition des données de façon « pseudo-continue » offre un rendu cartographique plus précis des limites des plages cartographiques. Le temps nécessaire à l'acquisition des données est relativement rapide par rapport aux méthodes conventionnelles. Ces techniques présentant également l'intérêt d'être non destructives, un suivi temporel des propriétés du sol en un même lieu peut donc être réalisé. Néanmoins, toutes ces techniques ne peuvent être utilisées directement pour caractériser les sols et/ou le substrat géologique. Elles nécessitent d'être calibrées à partir de données complémentaires pour établir des corrélations entre les propriétés du sol et du substrat, et les données issues de l'imagerie.

Chapitre 3 - Approche interdisciplinaire de la cartographie à haute résolution de la diversité des sols viticoles de versant et de ses déterminants

Chapitre 3. Approche interdisciplinaire de la cartographie à haute résolution de la diversité des sols viticoles de versant et de ses déterminants

Introduction

La démarche employée pour cartographier la diversité des sols en contexte viticole de versant est présentée sur la Figure 3.1. Elle combine des techniques d'imagerie aérienne, d'imagerie géophysique de subsurface, de photogrammétrie, des relevés pédologiques et des analyses physico-chimiques en laboratoire. Cette méthode est employée pour répondre à plusieurs objectifs :

- identifier les facteurs qui contrôlent la distribution spatiale des sols viticoles de versant,
- obtenir des informations spatiales « continues » de la couverture géopédologique à une échelle spatiale adaptée à l'étude de terroirs.

Le principe consiste à cartographier les états de surface du sol (EDS) par le biais d'analyses d'images à très haute résolution spatiale (THRS) dans le domaine spectral du visible. Les EDS reconnus par imagerie sont caractérisés par leurs propriétés physico-chimiques et le mode d'entretien du sol. Un modèle numérique de terrain (MNT) à haute résolution de la zone d'étude est produit par des techniques de photogrammétrie. En parallèle, la caractérisation du substrat géologique à haute résolution spatiale est réalisée par tomographie électrique. Les données topographiques, géologiques et la carte des EDS sont utilisées pour localiser le positionnement des sondages pédologiques. Ces sondages permettent de caractériser les sols et de déterminer leur mode d'organisation spatiale sur le versant. La combinaison de l'ensemble des données acquises est utilisée pour produire la carte pédologique au 1/5 000, qui identifiera les facteurs naturels contribuant à diversifier les sols. D'autre part, la caractérisation de l'érosion, à l'échelle métrique, donne des indications sur la dynamique sédimentaire des versants qui joue un rôle majeur sur la diversification des sols. L'étude de l'évolution du parcellaire et des pratiques culturales permet d'identifier en partie les facteurs qui contrôlent l'érosion. La mise en évidence de l'occupation ancienne de l'homme sur les versants permet d'identifier l'impact de celui-ci sur les sols.

Cette démarche interdisciplinaire a été utilisée pour obtenir une cartographie des sols à une échelle spatiale adaptée à la caractérisation des terroirs et d'identifier la diversité des sols viticoles de la Côte et ses déterminants.

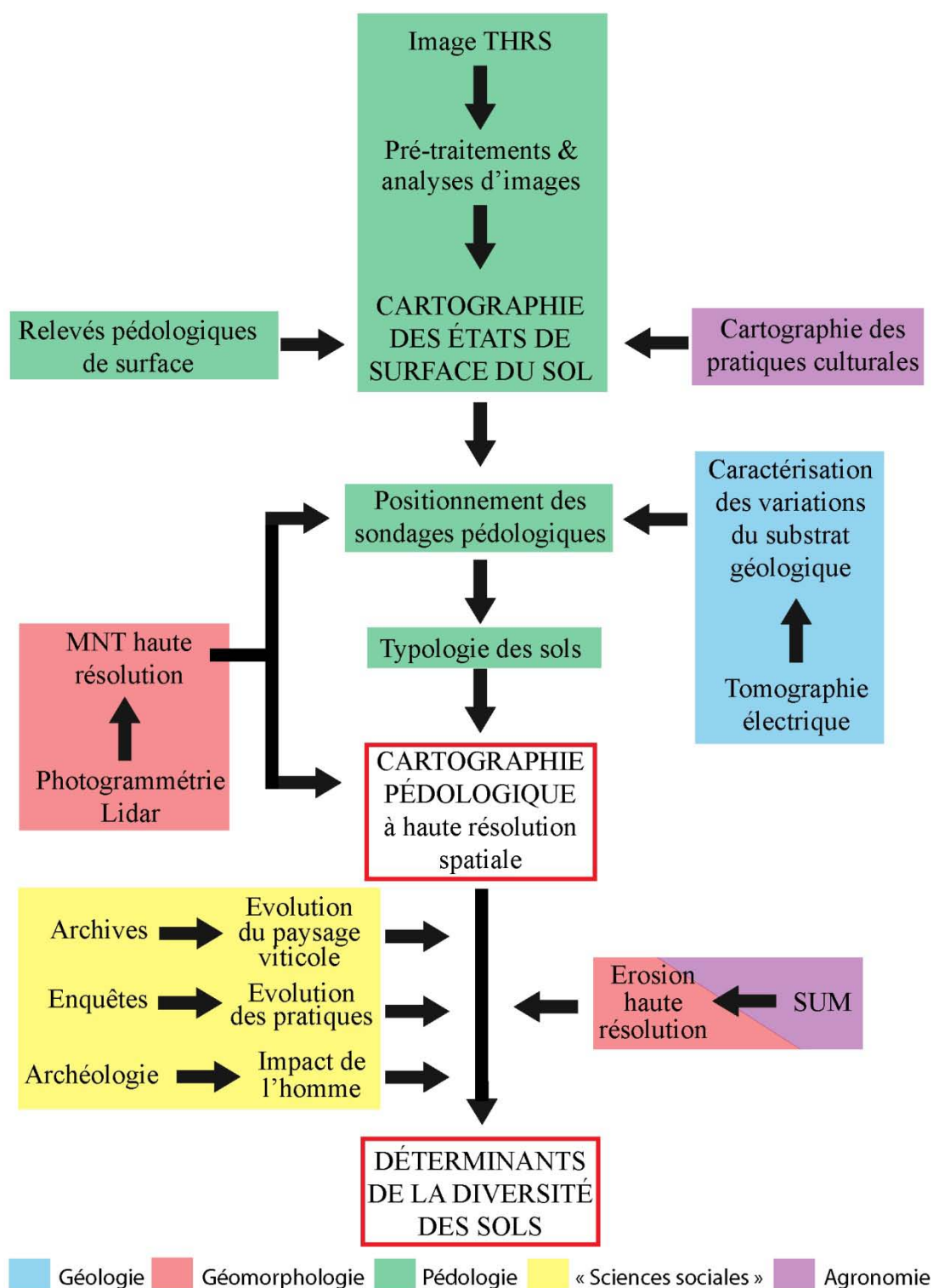


Figure 3.1 Organigramme de la démarche interdisciplinaire employée pour cartographier la diversité des sols viticoles de versant et en comprendre les déterminants.

3.1 Élaboration d'un modèle numérique de terrain à haute résolution spatiale

Pour chaque versant étudié, un modèle numérique de terrain (MNT) à haute résolution spatiale (métrique) a été calculé selon une méthode de photogrammétrie. Ce MNT permet d'observer les fines variations topographiques le long des versants, correspondant généralement à des variations lithologiques qui peuvent conduire à diversifier les sols.

Un modèle numérique d'élévation (MNE⁸) à haute résolution a été calculé par une méthode de photogrammétrie à partir du logiciel MicMac⁹ (open source, IGN). Le calcul du MNE a été réalisé à partir de photographies aériennes de l'IGN, acquises lors des campagnes photographiques pour réaliser la BD Ortho[®] (Mission 2011). La résolution spatiale des images, de l'ordre de 50 cm, a permis de calculer un MNE à une résolution métrique (planimétrique). Pour recaler l'altimétrie du MNE, une vingtaine de points GPS ont été acquis pour chaque secteur d'étude, à partir d'un GPS différentiel GEOXH 3000 (Trimble). Les positions GPS ont été mesurées sur des zones hors végétation. Une dizaine de points a été utilisée pour caler le MNE, et les autres points ont servi à évaluer la précision altimétrique de celui-ci après la calibration. L'utilisation du module « DTM filter », disponible via le logiciel SAGA¹⁰ (logiciel libre), a permis de transformer le MNE en modèle numérique de terrain (MNT). Ce filtre utilise les concepts décrits par Vosselman (2000), et est basé sur l'hypothèse selon laquelle une grande différence de hauteur entre deux pixels voisins ne peut correspondre à une forte pente sur le terrain, mais plutôt à un élément « non sol », de type végétation, ou construction. Ce filtre permet ainsi de classer les éléments « non sol » des éléments « sol » et donc de transformer un MNE en MNT. Pour minimiser les variations très locales, nous avons dégradé ce MNT à une résolution de 5 m par la méthode d'interpolation du plus proche voisin.

Pour le versant de Couchey le modèle numérique de terrain a été réalisé à partir de données LiDAR. Le secteur nord de la Côte de Nuits, de Chenôve à Vougeot, est couvert par une acquisition LiDAR, financée par la Région Bourgogne, dirigée par le pôle géomatique de la MSH de Dijon. La technologie LiDAR 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), afin d'enregistrer les fines variations topographiques. L'acquisition a eu lieu en décembre 2009, par hélicoptère, pour la zone allant de Chenôve à Couchey, et en mars 2010, par avion, pour la zone s'étendant de Fixin à Vougeot. La densité moyenne de points enregistrée au sol est de 5 points/m², permettant la création d'un modèle numérique de terrain à une résolution de 50 cm, dégradé ensuite à une résolution de 5 m comme précédemment.

⁸ Modèle Numérique d'Élévation intégrant les éléments présents à la surface du sol, végétation, habitations...

⁹ Le logiciel MicMac est disponible en téléchargement à l'adresse : <http://logiciels.ign.fr>

¹⁰ Le logiciel SAGA est disponible en téléchargement à l'adresse : <http://www.saga-gis.org>

3.2 Détermination du substrat géologique

La caractérisation du substrat géologique a été réalisée par une méthode de tomographie électrique en deux dimensions. Cette méthode peut être utilisée pour identifier la distribution des diverses formations lithologiques le long des versants. Ces profils de résistivité couplés à des observations ponctuelles sur le terrain ont permis de réaliser des coupes géologiques à haute résolution spatiale (échelle pluri-métrique) qui décrivent le sous-sol des versants.

3.2.1 Acquisition des profils par tomographie électrique

Le dispositif utilisé pour l'acquisition des profils de résistivité est un résistivimètre multi-électrodes, Syscal Pro Switch 96 électrodes, développé par la société IRIS Instruments (UMR 7619, Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie, Paris). Le dispositif d'acquisition est constitué d'un résistivimètre multi-électrodes, d'un jeu de 96 électrodes en métal, de 4 bobines (flûtes) de câble électrique gainé présentant un raccord métallique tous les 5 mètres pour connecter les électrodes, de 2 bobines de câble électrique gainé utilisées comme rallonges pour connecter les deux bobines situées aux extrémités du Syscal, de deux batteries 12V externes pour alimenter le Syscal et d'un ordinateur portable pour effectuer le transfert des données. En complément, un GPS différentiel Trimble® GeoXH 3000 permet de géoréférencer les électrodes avec une précision altitudinale décimétrique.

L'objectif de cette acquisition a été d'obtenir une image en deux dimensions des variations lithologiques en profondeur. Parmi les divers dispositifs d'acquisition utilisables, le dispositif Wenner-Schlumberger correspond bien aux attentes d'une caractérisation des variations lithologiques (structures horizontales) en contexte faillé (structures verticales) comme la Côte viticole (Roy et Apparao, 1971 ; Barker, 1989). Pour obtenir une profondeur d'investigation suffisante pour une interprétation géologique raisonnable, l'espacement entre chaque électrode a été fixé à 4 m ; un profil de 96 électrodes mesurera donc 380 mètres (Tableau 3-1). Pour couvrir les versants sur toute leur longueur, la méthode de « roll-along » a été utilisée. Par souci d'homogénéité, nous avons utilisé la même séquence d'acquisition pour tous les versants. La séquence a été créée sous le logiciel Electre Pro (IRIS Instruments©). Vingt-quatre niveaux de profondeur ont été prospectés, correspondant à 3012 quadripôles pour un profil complet et 996 quadripôles pour chaque roll-along. Dans notre cas d'étude, ce dispositif permet d'obtenir des profils de 40 m de profondeur. Les acquisitions s'effectuent sur une journée avec l'aide de deux opérateurs. Les profils ont été implantés parallèlement aux rangs de vignes tout en évitant les changements brusques de topographie (murs, falaises, etc.) pour limiter les erreurs géométriques. Les acquisitions ont été réalisées au mois d'avril 2012 pour plusieurs raisons : les faibles précipitations, les températures de l'air positives et la durée d'ensoleillement assez longue pour acquérir un profil d'un kilomètre en une seule journée.

	Longueur (m)	Nombre d'électrodes	Espacement inter- électrodes (m)	Nombre de quadripôles
Profil complet	380	96	4	3012
Roll-along	285 + 95	72 + 24	4	996

Tableau 3-1 Caractéristiques techniques des diverses acquisitions

3.2.2 Traitement des données de résistivité apparente

Les données acquises ont été traitées sous le logiciel Prosys II (IRIS Instruments©). Dans un premier temps, les données ont été filtrées pour éliminer les valeurs de résistivité négatives et les valeurs de résistivité mesurées en un même point qui présentent un écart-type supérieur à 1 %. Ces valeurs peuvent être dues à un mauvais contact entre l'électrode et un sol sec, ou bien à des courts-circuits dans les câbles en raison d'un sol trop humide (Geotomo software, 2013). Par la suite, les profils et les roll-along ont été assemblés pour former un unique fichier contenant toutes les valeurs de résistivité mesurées sur le versant. Enfin, les altitudes mesurées par le GPS différentiel ont été renseignées pour chaque électrode du profil.

L'inversion des données a été réalisée avec le logiciel Res2dinv (Geotomo Software©). Ce logiciel étant conçu pour fonctionner de façon automatique tout en présentant des résultats robustes, les paramètres de base sont peu modifiés par l'utilisateur. Le modèle de correction topographique retenu a été le « *S-C transformation with distorted finite-element grid* », car ce modèle d'inversion permet de calculer les distorsions liées aux effets topographiques au niveau de la subsurface, et de les intégrer dans le calcul du profil de résistivité. Parmi les différents modèles de correction topographique, la transformation de Schwarz-Christoffel donne un aspect le plus « naturel » possible au profil (Geotomo software, 2013 ; Loke, 2013). Chaque profil de résistivité obtenu à la suite des différentes itérations a été caractérisé par une erreur quadratique moyenne RMS (Root Mean Square). Après deux itérations successives, si les modèles convergent (faible écart entre les RMS), on choisira le premier profil pour l'interpréter en termes de formations lithologiques (Figure 3.2). L'utilisation d'un nombre important d'itérations conduit à augmenter les erreurs au sein du modèle (Loke, 2013). L'ensemble des profils de résistivité a été exporté dans le logiciel Surfer 8® afin d'homogénéiser les échelles de résistivité pour les profils d'un même secteur d'étude.

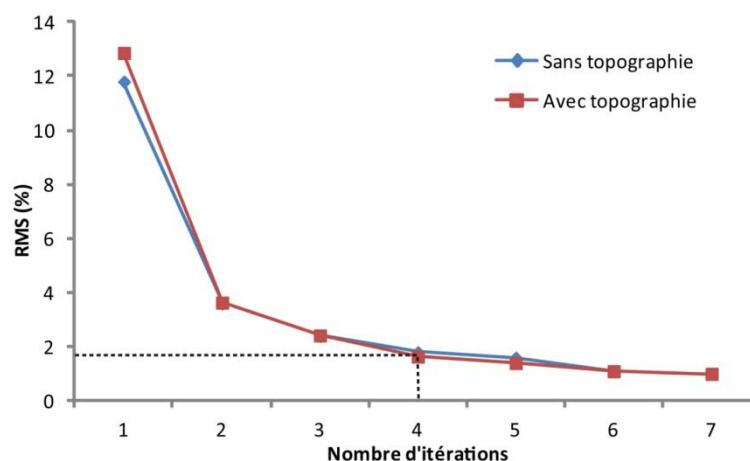


Figure 3.2 Représentation graphique de l'erreur quadratique moyenne (RMS) calculée pour chaque itération. À partir de l'itération n°4, la diminution de la RMS n'est plus significative. On utilisera donc le profil de résistivité issu de cette itération pour interpréter les variations lithologiques du secteur.

3.2.3 Interprétation géologique du profil de résistivité

La caractérisation des lithologies a été effectuée à partir des abaques qui renseignent sur les valeurs de résistivité en fonction des lithologies. Cependant, certaines valeurs de résistivité peuvent correspondre à plusieurs types de matériaux. Pour s'affranchir de ce problème, des affleurements géologiques ont été observés en différents points des profils. Cette étape permet de relier localement les valeurs de résistivité électrique à un type de matériau (Marescot, 2006). De plus, les notices des cartes géologiques au 1/50 000 éditées par le BRGM ont été utilisées pour connaître l'épaisseur de chaque formation et ainsi valider les interprétations proposées.

Pour chaque profil de résistivité, un profil de sensibilité a été calculé, qui permet de spatialiser les erreurs RMS (Figure 3.3). Ce dernier profil est pris en compte lors de l'interprétation du profil de résistivité, car il permet d'identifier les zones présentant de fortes erreurs, principalement liées à la présence de routes, de chemins ou de contours de parcelles remblayés. La présence de ces structures fortement résistives et très locales conduit à un important contraste de résistivité entre la surface et la profondeur qui induit d'importantes erreurs de calcul en profondeur (Ritz *et al.*, 1999).

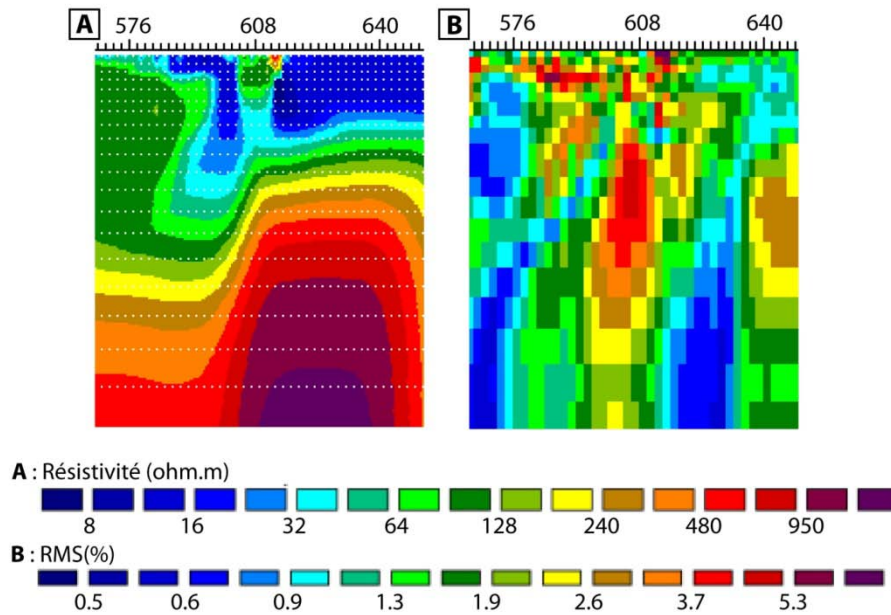


Figure 3.3 Extrait d'un profil de résistivité (A) et d'un profil d'erreur quadratique moyenne (RMS) (B). Les plus fortes valeurs de résistivité situées à 608 m (A) sont très localisées à la surface, elles présentent donc une forte erreur RMS (B) ; cette zone correspond à une route goudronnée.

Les profils de résistivité permettent d'identifier la distribution spatiale des roches constituant le substrat. La haute résolution, de l'ordre de 4 m, offre la possibilité de localiser les fines variations lithologiques et surtout de les spatialiser avec précision. Ces variations lithologiques observées à l'échelle de quelques mètres peuvent alors être reliées aux types de sol observés, permettant d'établir ainsi des relations entre le type de sol et le substrat.

3.3 Cartographie des états de surface du sol par analyse d'images THRS

3.3.1 Acquisition des images THRS

L'acquisition des images à très haute résolution spatiale (THRS) dans le domaine spectral du visible a été réalisée à l'aide du drone hélicoptère DRELIO, développé par les équipes du Pôle Image du laboratoire de géologie de Lyon (Université Claude Bernard Lyon 1) et de l'Institut Universitaire Européen de la Mer (Université de Bretagne Occidentale). L'hélicoptère thermique de marque VARIO est équipé du dispositif suivant (Figure 3.4A et B) (Delacourt *et al.*, 2009) :

- un système d'autopilotage qui permet au drone de suivre le plan de vol initialement chargé,
- un GPS embarqué qui permet au drone d'être localisé et ainsi de stabiliser son altitude de vol par rapport au modèle numérique de terrain initialement chargé,

- un magnétomètre et une centrale inertielle pour enregistrer la position de l'hélicoptère lors de chaque prise de vue (coordonnées 3D),
- un appareil photo numérique Nikon D700 muni d'un objectif de 35 mm fixé sur une platine sous l'hélicoptère,
- une caméra basse résolution fixée sur la platine pour un retour vidéo lors de l'acquisition,
- une station radio pour les liaisons entre le drone et le sol,
- un ordinateur portable afin de suivre l'avancement du drone sur son plan de vol, de visualiser le retour vidéo, d'évaluer différents paramètres tels que l'altitude de vol, la vitesse du drone,
- un joystick pour contrôler le drone, régler sa vitesse, corriger la dérive, et un joypad utilisé uniquement pour le pilotage.

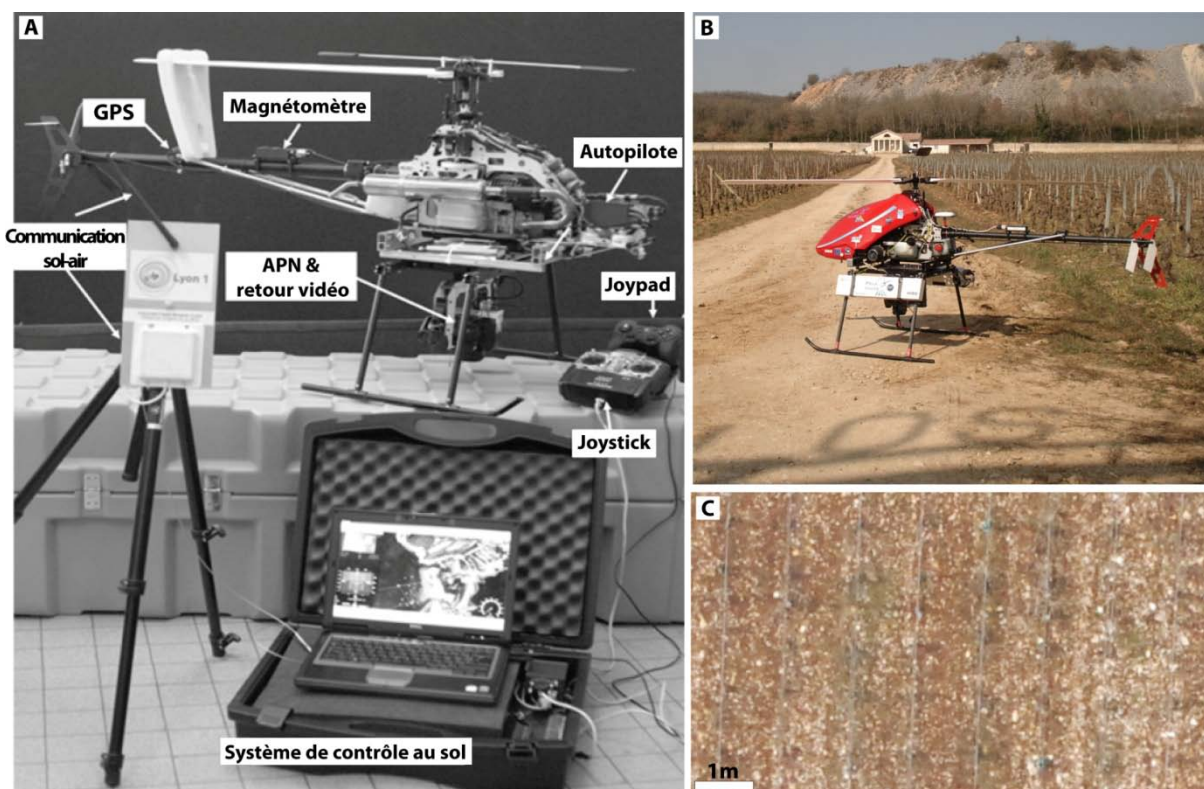


Figure 3.4 Configuration technique de DRELIO (A, modifié d'après Delacourt et al., 2009), dispositif opérationnel (B) et images THRS acquises par DRELIO à une résolution spatiale de 2 cm (C).

Pour reconnaître par imagerie les propriétés physico-chimiques des EDS, le choix de la date d'acquisition des images est primordial (Girard et Girard, 2010). La reconnaissance de ces propriétés est intimement liée aux éléments qui couvrent le sol et à la rugosité de la surface. Pour chaque site étudié, les images THRS ont été acquises au début du printemps, et ce, pour plusieurs raisons. Les feuilles de vigne ne sont pas encore sorties, ce qui permet de limiter la présence de végétation sur les images et de bénéficier d'une bonne « visibilité » de la surface du sol. La présence de végétation sur le sol est minimale, car les feuilles de vigne tombées sur le sol à l'automne ont été évacuées hors des parcelles par les pluies automnales et hivernales, et les adventices sont peu nombreuses. Les principaux travaux du sol n'ont pas encore été effectués puisque les travaux de labour, griffage et débattage commencent généralement au cours du mois d'avril en Bourgogne (BIVB). À cette période printanière, le sol est donc dépourvu, dans la mesure du possible, de tout élément pouvant masquer sa surface. De plus, l'absence de travail du sol dans les parcelles, depuis plusieurs mois, couplée aux précipitations automnales et hivernales, offre une bonne observation des éléments lithiques de surface. Enfin, l'inclinaison des rayons solaires au printemps est satisfaisante dans la mesure où les ombres portées sont réduites par rapport aux acquisitions hivernales (Steinberg, 2002).

L'altitude de vol pour les différents sites a été fixée à 80 m, correspondant à un bon rapport de fauchée/résolution, et à la zone d'autorisation de vol pour les drones. Pendant le vol, le drone stabilise son altitude à partir d'un modèle numérique de terrain initialement chargé dans l'appareil. Un plan de vol est défini à partir des orthophotographies de l'IGN et du modèle numérique de terrain de l'IGN (résolution de 25 m). Les zones présentant de forts gradients topographiques (falaises, excavations,...) sont évitées afin de limiter les changements brusques d'altitude pour le drone, et ainsi limiter les variations de résolution spatiale sur les images. Le plan de vol est chargé sur le drone avant chaque vol, via le logiciel Visionair© (UAV Navigation, 2010).

Le dispositif de prise de vue est un appareil photographique numérique Nikon D700, muni d'un objectif de 35 mm. Le dispositif de prise de vue et l'altitude de vol choisis donnent une fauchée au sol d'environ 50 m. L'ensemble de ces paramètres permet d'obtenir une très haute résolution spatiale des images, de l'ordre de 2 cm (Figure 3.4C). La vitesse de vol, constante de 10 km/h, et la prise de vue automatique toutes les 2 secondes donnent un recouvrement de 50 % entre chaque image. Les photos sont acquises en deux formats : le format jpeg pour visualiser directement les images sans faire de traitement, et le format raw pour garder le maximum d'informations brutes sur l'image.

3.3.2 Prétraitements des images THRS

La première étape de prétraitement consiste à reconstituer une orthophotographie pour chaque parcelle survolée. Les orthophotographies ont été créées à l'aide du logiciel MicMac (Logiciel libre,

IGN) (Figure 3.5). Ce logiciel de photogrammétrie permet de réaliser des orthophotographies, des MNT et/ou des nuages de points à partir de couples de photos stéréoscopiques. La réalisation de celles-ci présente l'intérêt de corriger la distorsion des images et de recalibrer les niveaux radiométriques entre chaque image. Les orthophotographies issues de MicMac ont été projetées dans le système géographique Lambert 93.

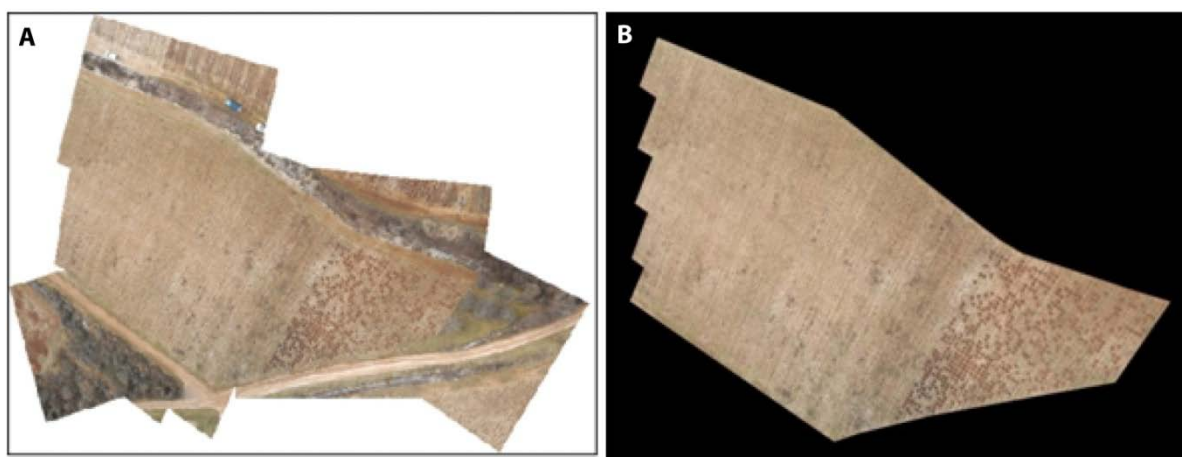


Figure 3.5 Orthophotographie THRS d'une parcelle viticole réalisée à partir du logiciel MicMac (logiciel libre, IGN). Une fois l'orthophotographie créée (A), la parcelle est détournée manuellement (B).

Pour supprimer les composantes « hors-sol », une segmentation d'image a été appliquée sur chaque orthophotographie parcellaire (Figure 3.6). La segmentation permet de choisir, au sein de l'image, les pixels dont les nombres numériques correspondent aux éléments à supprimer. Différents tests ont été entrepris afin de déterminer la bande spectrale à utiliser pour réaliser la segmentation. La bande Rouge (notée R) permet d'individualiser plusieurs éléments tels que les ceps de vigne, leurs ombres portées, les sarments de vigne laissés à la surface du sol comme apport de matière organique, et la végétation de couleur foncée. Après différents tests sur l'ensemble des secteurs étudiés, la segmentation a été réalisée sur la bande Rouge (R) selon l'intervalle 0-130 des nombres numériques. Cet intervalle permet de supprimer toutes les composantes « hors-sol » précédemment citées (Figure 3.6B). Au-delà de cette borne, les éléments sélectionnés par la segmentation correspondent à des constituants de l'état de surface du sol. Un masque a été créé à partir de cette segmentation et appliqué sur chaque orthophotographie (Figure 3.6C).

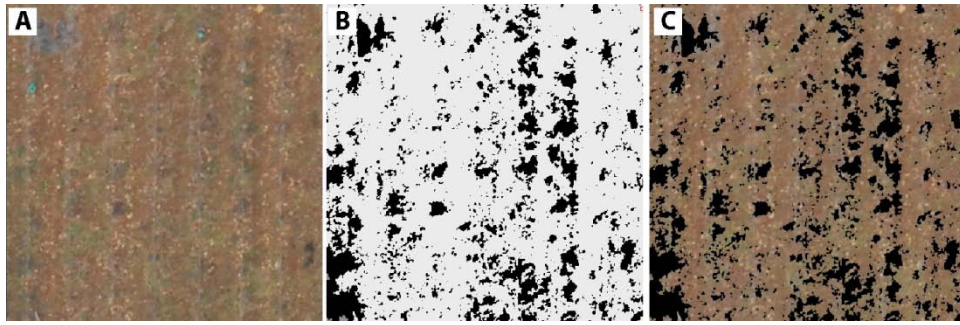


Figure 3.6 Segmentation d'image réalisée sur la bande spectrale Rouge. L'image initiale (A) est segmentée pour produire un masque (B), puis le masque est appliqué sur l'ensemble des bandes de l'image initiale (C).

3.3.3 Méthode de classification des images

Une classification d'images va être mise en œuvre pour spatialiser les états de surface du sol, sans connaissance *a priori* de la distribution spatiale des composantes.

Plusieurs méthodes de traitement d'images sont employées en télédétection pour la reconnaissance automatique de l'occupation du sol. Ces méthodes de classification ont pour but de regrouper des pixels qui présentent des valeurs radiométriques proches au sein d'une même classe (Schowengerdt, 2006 ; Girard et Girard, 2010). On distingue les classifications supervisées et les classifications non supervisées.

Dans une classification **supervisée**, l'opérateur doit fournir au logiciel des zones de reconnaissance. Ces zones correspondent à des classes particulières dont le type d'occupation du sol est connu. Pour réaliser cette classification, il est donc nécessaire d'avoir des connaissances *a priori* du type d'occupation du sol. Plusieurs algorithmes sont utilisés pour cette classification : certains sont basés sur des opérateurs géométriques (Minimal distance, Parallelepiped classifieurs, Spectral Angle Mapper...), d'autres sur des opérateurs statistiques (Maximum Likelihood) (Schowengerdt, 2006 ; Schott, 2007 ; Richards, 2012).

La classification **non supervisée** cherche à regrouper des individus en classe, de telle façon que les individus soient les plus semblables possible au sein d'une même classe tout en ayant des classes bien discriminées. Les deux algorithmes les plus communément utilisés pour ce type de classification sont celui des k-moyennes (k-means en anglais) et celui de l'Isodata (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm). L'algorithme des k-moyennes est un algorithme statistique qui permet de créer des groupes de pixels en k classes homogènes, où le nombre k est défini par l'opérateur. L'algorithme calcule des classes moyennes uniformément réparties dans l'espace de données, puis regroupe de façon itérative les pixels dans la classe la plus proche par la technique de

distance minimale. Chaque itération recalcule les classes moyennes et reclasse les pixels par rapport aux nouvelles classes moyennes. Le processus itératif prend fin quand deux itérations successives convergent. Le nombre d'itérations et son seuil de changement sont renseignés par l'utilisateur (Tou et González, 1974 ; Schowengerdt, 2006 ; Duda *et al.*, 2000). L'algorithme Isodata, qui est une généralisation de l'algorithme des k-moyennes, présente quelques améliorations supplémentaires, dont la séparation et/ou le regroupement de classes (Ball et Hall, 1965 ; Schowengerdt, 2006). Les classes sont fusionnées si le nombre de pixels au sein d'une classe est inférieur au seuil fixé ou si les centres de deux classes sont plus proches que le seuil défini. Une classe est divisée en deux classes distinctes si l'écart-type est supérieur à la valeur initialement fixée, et si le nombre de pixels est deux fois supérieur à la valeur minimale de pixels par classe (Jensen, 1996). Plusieurs paramètres sont à renseigner pour le calcul de la classification Isodata, tels que le nombre de classes minimal et maximal à atteindre, le nombre d'itérations à calculer avec un seuil de changement et le nombre minimal de pixels pour former une classe.

Contrairement aux classifications supervisées, la classification non supervisée utilisant l'algorithme Isodata ne demande aucune connaissance *a priori* sur la distribution spatiale des classes. Cette méthode de classification basée sur le calcul des centres mobiles permet d'individualiser des groupes de radiométrie différente. Le résultat obtenu est donc indépendant des interprétations de l'image faite par l'utilisateur. C'est pourquoi notre choix s'est porté sur la classification non supervisée utilisant l'algorithme Isodata.

Les images THRS ont été acquises à une résolution de 2 cm pour pouvoir analyser la diversité des sols à la fois à l'échelle de la parcelle et à celle du versant. Néanmoins, pour des raisons de taille d'image, de temps de calcul et de stockage, il n'est pas possible d'envisager une classification à l'échelle du versant à une résolution de 2 cm. Il est donc nécessaire de rééchantillonner à une résolution suffisamment haute pour pouvoir observer la diversité des sols, tout en permettant les traitements informatiques. En Bourgogne, le motif élémentaire en contexte viticole est le rang. Les rangs sont espacés d'un mètre du fait de la densité de 10 000 pieds/hectare. Le sol peut être recouvert par la végétation qui ne couvre généralement pas tout le rang et l'inter-rang, sauf dans le cas d'un enherbement total. En effet, la présence de végétation est le plus souvent liée à des pratiques culturales particulières. Il est nécessaire de pouvoir l'identifier afin de la supprimer après classification. De ce fait, les orthophotographies THRS prétraitées ont été rééchantillonnées à une résolution de 10 cm, par la méthode du plus proche voisin. Cette résolution rend possible à la fois l'observation du sol dans l'inter-rang, la suppression des artefacts liés à la présence de végétation et le calcul de classification à l'échelle du versant.

La classification non supervisée Isodata a été réalisée avec le logiciel de traitement d'images ENVI Version 4.3[®]. Le nombre minimal de classes a été fixé à 2, en partant du postulat qu'au

minimum, la radiance des éléments lithiques calcaires est différente de la radiance de la matrice du sol. Pour le nombre maximal fixé, un nombre élevé de classes conduit à caractériser un grand nombre d'objets. Pour déterminer l'influence du nombre de classes maximal sur le résultat final de la classification, plusieurs tests ont été réalisés. Des classifications ont été effectuées pour une valeur maximale de 5, 10, 15 et 20 classes. Ces tests ont été réalisés sur l'orthophotographie masquée du versant d'Aloxe-Corton, à une résolution de 10 cm. Les résultats obtenus montrent que plus le nombre de classes maximal fixé est élevé, plus le nombre de classes obtenues l'est également (Figure 3.7). Seulement 2 classes sont obtenues pour un seuil maximal de 5 classes, alors que 19 classes sont calculées pour un seuil maximal de 20 classes. On observe également que le nombre d'itérations nécessaires pour arriver jusqu'à convergence est plus important quand le nombre de classes maximal fixé est grand. Pour un nombre maximal de 5 classes, 3 itérations suffisent pour arriver à convergence alors que 5 itérations sont nécessaires pour un nombre maximal de 20 classes. Pour les tests de 15 et 20 classes, on observe que 80 % des données se répartissent respectivement en 7 et 10 classes après convergence. Les autres classes sont donc très faiblement représentées, et leur répartition spatiale est très disparate sur l'ensemble de l'image analysée, elles correspondent à des éléments isolés et sont interprétées comme du bruit. Pour limiter le nombre de classes à l'issue de la classification et s'affranchir du bruit, le nombre de classes maximal a été fixé à 10 pour ce cas-là, et justifié par le fait que l'on augmente le bruit pour un nombre de classes plus élevé. Pour ce seuil, chaque classe recouvre au minimum 10 % de la surface étudiée et apparaît regroupée spatialement sur l'image. De plus, le nombre de classes a été limité en imposant au modèle un nombre minimum de 10 000 pixels à atteindre pour chaque nouveau noyau.

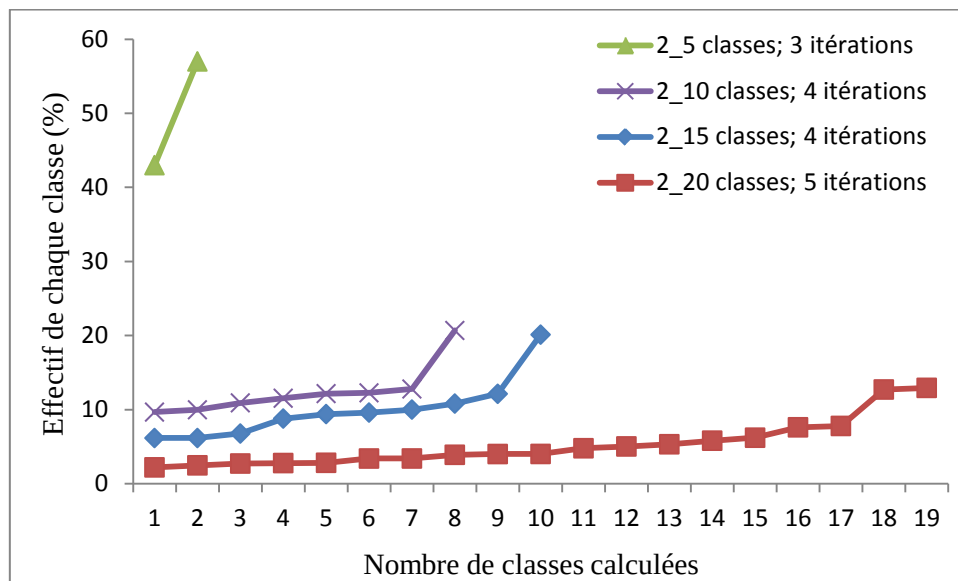


Figure 3.7 Nombre de classes calculées à l'issue de la classification non supervisée pour différentes valeurs du nombre maximal de classes définies par l'opérateur.

À l'issue de la classification, il a été observé que les classes faiblement représentées correspondent à la végétation : elles ont été supprimées. De plus, dans certains cas, la classification a permis de différencier deux classes d'EDS correspondant aux rangs et aux inter-rangs des vignes. Cette distinction est liée soit à un changement de pratiques culturales entre le rang et l'inter-rang –, par exemple un labour dans le rang et un enherbement de l'inter-rang –, soit à une rugosité de surface différente qui peut s'expliquer par un tassement du sol dans l'inter-rang induit par le passage des engins agricoles.

3.4 Caractérisation des états de surface

3.4.1 Analyses des états de surface sur le terrain

Pour caractériser les propriétés physico-chimiques des états de surface reconnus par imagerie, plusieurs prélèvements et observations de surface au sein de chaque classe ont été réalisés. La localisation des prélèvements a été établie selon un plan d'échantillonnage aléatoire-stratifié. Le nombre d'échantillons par classe d'EDS est proportionnel à la surface couverte par cette même classe. Pour s'affranchir des effets de bord de parcelles (empièchement, apports de terre,...), les points situés sur les contours des parcelles ont été supprimés. Le positionnement des prélèvements de surface a été réalisé sur la carte des EDS à une résolution spatiale métrique. Les prélèvements ont été effectués entre 4 ceps de vigne, sur une longueur d'environ 90 cm (rang et inter-rang), sur une largeur d'environ 25-30 cm pour une profondeur d'environ 5 cm. Le volume des prélèvements est de l'ordre de 10 à 15 litres. Plusieurs caractéristiques ont été directement déterminées sur le terrain : la couleur de la matrice renseignée à l'aide de la charte Munsell, la lithologie des éléments qui constituent la pierrosité de surface déterminée, le mode d'entretien du sol renseigné. La pierrosité de surface constitue l'ensemble des éléments lithiques dont la taille est supérieure à 2 mm ; elle est composée de graviers ($2\text{ mm} < \varnothing < 2\text{ cm}$) et de cailloux ($2\text{ cm} < \varnothing < 20\text{ cm}$). La fraction grossière (les cailloux) a été estimée directement sur le terrain par tamisage. L'échantillon est dans un premier temps pesé (P_{TOTAL}), puis un tamisage est réalisé à l'aide d'un tamis à maille carrée de diamètre 20 mm (Norme AFNOR), le refus de tamis est par la suite pesé (P_{REFUS}). La fraction correspondant aux cailloux ($Cx\%$) s'exprime selon l'équation (3.1) :

$$Cx\% = \frac{P_{TOTAL} - P_{REFUS}}{P_{TOTAL}} . 100 \quad (3.1)$$

Pour faciliter l'estimation de la pierrosité, la teneur en eau du prélèvement n'a pas été quantifiée pour chaque prélèvement, ce qui a permis de le faire directement sur le terrain la pierrosité sans avoir à rapporter au laboratoire des quantités de sols importantes. Pour chaque site, l'estimation de la teneur en eau a été réalisée sur trois sous-échantillons d'un litre, par étuvage à 105°C pendant 24 heures. Pour l'ensemble des prélèvements, la teneur en eau était très faible, de l'ordre de $5,8 \pm 1,1$ %. On peut ainsi estimer que la fraction correspondant aux cailloux calculée sur le terrain est sous-estimée d'environ 5 %.

Une fois la fraction correspondant aux cailloux mesurée, un sous-échantillonnage est effectué sur chaque échantillon pour réaliser des analyses physico-chimiques en laboratoire, et mesurer la quantité de graviers. Après une homogénéisation de l'échantillon, un sous-échantillon d'un litre est prélevé de façon systématique par quartage et séché à l'air libre.

3.4.2 Analyses au laboratoire

Pour caractériser les différentes classes d'états de surface, plusieurs paramètres physico-chimiques, ayant tous une influence sur la couleur du sol, ont été mesurés au laboratoire. Parmi ces paramètres, la couleur de la matrice, la teneur en carbonate de calcium, la teneur en carbone organique, la teneur en azote totale et la teneur en fer libre ont été quantifiées selon diverses méthodes :

- les **graviers**, correspondant à la fraction fine de la pierrosité ($2 \text{ mm} < \varnothing < 2 \text{ cm}$), ont été mesurés par tamisage sur voie sèche. La pierrosité ($P_{\%}$) peut alors être déterminée et s'exprime selon l'équation (3.2) :

$$P_{\%} = G_{\%} + Cx_{\%} \cdot 1,05 \quad (3.2)$$

Où $G_{\%}$ est la fraction correspondant aux graviers en %, $Cx_{\%}$ est la fraction correspondant aux cailloux en % et 1,05 représente le facteur correctif lié à la sous-estimation des cailloux.

- la **couleur** de la fraction fine ($< 2 \text{ mm}$) a été quantifiée à l'aide d'un spectrophotomètre de marque Techkon, version *SpectroDens advanced* sur échantillon de sol séché et tamisé à 2 mm. Les résultats sont exprimés dans le système colorimétrique $L^*a^*b^*$ (Viscarra Rossel *et al.*, 2006a). Le paramètre « L^* » représente la clarté ; ses valeurs s'étalent de 0 (noir) à 100 (blanc) (Figure 3.8). Les paramètres « a^* » et « b^* », également dénommés « paramètres de chrominance », expriment la valeur de la couleur selon deux axes : axe rouge-vert ($-a^*$: vert ; $+a^*$: rouge) et axe bleu-jaune ($-b^*$: bleu ; $+b^*$: jaune). L'illuminant D65

utilisé correspond à une lumière moyenne du jour dont la température est proche de 6500 K. Pour ne pas endommager et salir l'appareil, les échantillons ont été recouverts par un film en polyéthylène. La calibration de l'appareil a été effectuée sur un standard en céramique de couleur blanche, lui-même calibré sur un standard BaSO_4 (Balsam *et al.*, 1997). Pour pallier les dérives qui peuvent se produire au cours de l'acquisition, la calibration a été faite tous les dix échantillons. Pour chaque échantillon, trois mesures sont réalisées. L'appareil connecté à un ordinateur permet un transfert direct des résultats sur un tableur Excel.

- la teneur en **carbonate de calcium** (CaCO_3) a été quantifiée par calcimétrie volumétrique (calcimètre Bernard), c'est-à-dire par la mesure du volume de CO_2 dégagé par attaque à l'acide chlorhydrique en excès, pour un échantillon de poids connu (norme NF ISO 10693). Les résultats sont exprimés en g/100 g.

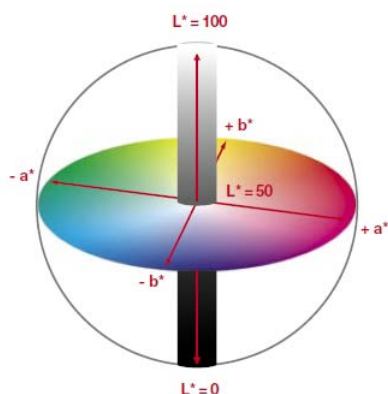


Figure 3.8 Représentation schématique du système colorimétrique CIE $L^*a^*b^*$.

- la teneur en **carbone organique** a été déterminée en deux temps. Le carbone total a tout d'abord été quantifié par combustion sèche (1000°C) en milieu oxydant, puis le produit de combustion réduit à l'état gazeux CO_2 . Après séparation chromatographique, le CO_2 est quantifié à partir d'un détecteur TCD (NF ISO 10694) (VarioMax CNS Elementar, UMR 6249 Chrono-environnement, Université de Franche-Comté, Besançon). Les résultats sont exprimés en g/100 g. Puis, le carbone organique a été estimé selon l'équation (3.3) :

$$C_{\text{ORGANIQUE}} = C_{\text{TOTAL}} - C_{\text{MINERAL}} \quad (3.3)$$

Où C_{MINERAL} est défini selon l'équation (3.4) :

$$C_{\text{MINERAL}} = 0,12 \cdot [\text{CaCO}_3] \quad (3.4)$$

Où $[\text{CaCO}_3]$ représente le teneur en carbonate de calcium.

La teneur en carbone organique s'exprime en g/100 g. Dans le cas où la teneur en carbonate de calcium total est supérieure à 70 g/100 g, la quantification du carbone organique s'effectue après destruction totale des carbonates par voie acide.

- la teneur en **azote total** a été déterminée par combustion sèche (1000°C) en milieu oxydant, puis le produit de combustion est réduit à l'état gazeux N₂. Après séparation chromatographique, le N₂ est quantifié à partir d'un détecteur TCD (NF ISO 13878) (VarioMax CNS Eleментар, UMR 6249 Chrono-environnement, Université de Franche-Comté, Besançon). La teneur en azote total est exprimée en g/100 g.
- la teneur en **fer libre** a été quantifiée par la méthode d'extraction proposée par Mehra et Jackson (1958) ; les résultats sont exprimés en g/100 g. Cette méthode permet de mettre en solution l'ensemble des oxydes de fer libres du fait que le pH reste légèrement alcalin et maintient ainsi un potentiel d'oxydation élevé dans le système.

L'ensemble des analyses effectuées a été géoréférencées dans un SIG afin d'observer la distribution spatiale de chaque paramètre le long des versants étudiés.

3.4.3 *Inventaire des pratiques culturales*

Les pratiques culturales ayant une influence sur les valeurs radiométriques du sol (Courault, 1989), leur prise en compte dans la caractérisation des EDS reconnus par imagerie est donc nécessaire. Les pratiques culturales ont été cartographiées sur les versants étudiés juste après l'acquisition des images THRS pour chaque parcelle du transect. La cartographie des pratiques a été réalisée à partir de l'interprétation des images acquises par le drone et par une prospection sur le terrain. Sur l'ensemble des versants de la Côte, diverses pratiques culturales ont été répertoriées, à savoir (Figure 3.9) :

- griffage,
- griffage dans le rang et enherbement dans l'inter-rang,
- griffage dans le rang et enherbement des rangs de traitements,
- griffage dans le rang et désherbage chimique dans l'inter-rang,
- griffage et enherbement un rang sur deux,
- buttage,
- enherbement intégral,
- désherbage chimique intégral,
- désherbage chimique et enherbement des rangs de traitements.

Cette cartographie des pratiques culturales permet d'expliquer en partie la distribution spatiale de certains EDS. Pour certains secteurs, la délimitation de deux EDS pour des parcelles voisines ne va pas forcément renseigner sur un changement des paramètres physico-chimiques mais plutôt sur un mode particulier d'entretien du sol. Cette cartographie a ainsi permis de reclasser certaines parcelles dans la classe d'EDS qui caractérise les propriétés physico-chimiques du sol plutôt que la pratique culturale.

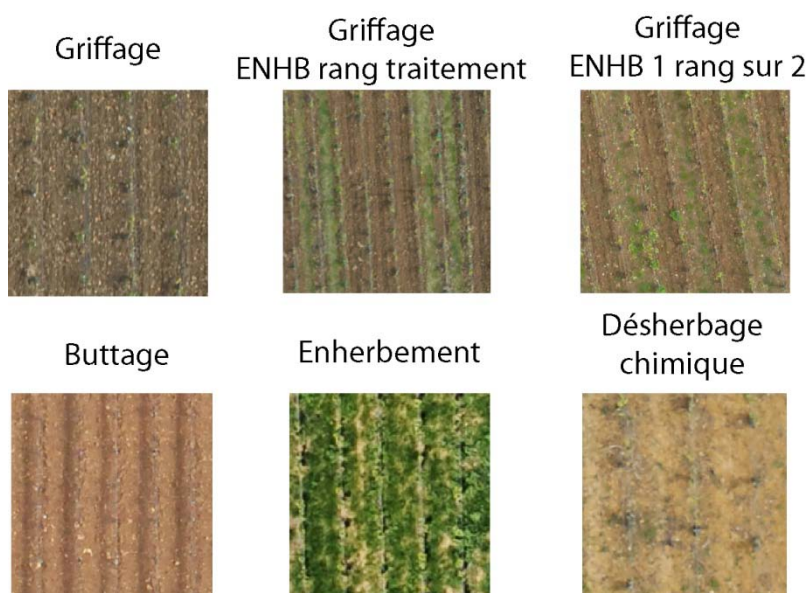


Figure 3.9 Illustration de la diversité des pratiques culturales observées sur le secteur d'étude de la Côte. Les images THRS sont issues de l'acquisition drone sans traitement préalable.

3.4.4 Test de séparabilité des EDS reconnus par imagerie

Afin d'évaluer la séparabilité des EDS sous forme de classe à partir de leurs paramètres physico-chimiques, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur l'ensemble des échantillons de surface. Les paramètres utilisés pour calculer l'ACP sont : la couleur de la matrice (L^* , a^* , b^*), la teneur en carbonate de calcium total ($\text{CaCO}_3_{\text{tot}}$), la teneur en carbone organique (C_{org}), la teneur en azote total (N_{tot}), le rapport carbone/azote (C/N) et la pierrosité, selon deux classes, *i.e.* les graviers et les cailloux. Le nombre d'axes conservés à l'issue de l'ACP pour interpréter les regroupements des EDS en classe présente une valeur propre supérieure à 1, comme le préconise Kaiser (1966). Les tableaux variables-facteurs ont également été créés, car ils permettent de rattacher chaque variable à un axe de l'ACP. Le résultat de l'ACP permet de relier des échantillons qui présentent des caractéristiques physico-chimiques communes.

Pour déterminer le lien potentiel entre les classes d'EDS définies par leurs caractéristiques physico-chimiques et les classes d'EDS définies par imagerie, nous avons réattribué à chaque point (chaque échantillon) la couleur de la classe d'EDS définie par imagerie. Il est alors possible de voir si les classes d'EDS reconnues par imagerie présentent bien des caractéristiques physico-chimiques communes. Dans ce cas, les résultats de la classification non supervisée seront de bonne qualité.

Cette étape de caractérisation des EDS selon leurs paramètres physico-chimiques est primordiale, puisque celle-ci renseigne sur les composantes qui constituent les divers EDS reconnus par imagerie. De plus, la cartographie des pratiques culturales permet de localiser les pratiques culturales particulières qui conduisent à une mauvaise classification des EDS par rapport à leurs paramètres physico-chimiques. La caractérisation des EDS sur le terrain est nécessaire pour évaluer le résultat de la classification et déterminer les facteurs qui contrôlent la distribution spatiale des EDS.

3.5 Caractérisation des types de sol

3.5.1 Sondages à la tarière

Les types de sol présents sur les versants étudiés ont été caractérisés à partir de sondages réalisés à la tarière manuelle à rallonges. La localisation des différents sondages a été déterminée à partir de la cartographie des EDS et des variations topographiques observées sur le MNT HR. Les sondages ont été réalisés aux abords des prélèvements de surface. Ainsi, pour un certain nombre de prélèvements, on a pu caractériser à la fois l'état de surface et le type de sol. Ces observations de surface et de profondeur ont permis de voir si les EDS différenciés sur les versants pouvaient donner des indications sur les types de sol sous-jacents. Pour certains versants, des fosses pédologiques ont pu être étudiées au cours de la thèse¹¹.

Une première description des sols a été effectuée directement sur le terrain. Différents paramètres ont été renseignés pour chaque horizon tels que la couleur (code Munsell), la présence de carbonate de calcium (test d'effervescence à HCl), la texture (appréciation tactile), les traits pédologiques d'oxydo-réduction.

Pour chaque horizon déterminé à partir des sondages, un échantillon représentatif a été collecté afin de déterminer les paramètres physico-chimiques de chaque type de sol.

¹¹ Les transects d'étude étant localisés sur un certain nombre de parcelles appartenant à de nombreux propriétaires, nous n'avons pu ouvrir de fosses sur ceux-ci. Néanmoins, certaines fosses ouvertes dans le voisinage proche des transects ont pu être observées.

3.5.2 *Caractérisation physico-chimique des sols*

Pour limiter le nombre d'analyses, pour les types de sol similaires au sein d'une même plage cartographique, seul un sol a été analysé de façon exhaustive. Pour l'ensemble des échantillons, la couleur de la matrice, la teneur en carbonate de calcium, la teneur en carbone organique, la teneur en azote total ont été quantifiées selon les méthodes précédemment citées (paragraphe 3.4.2). D'autres paramètres physico-chimiques ont été déterminés au laboratoire, tels que la texture, le pH, le fer libre et la minéralogie des argiles, selon diverses méthodes :

- le **pH eau** a été mesuré à l'aide d'un pHmètre après mise en suspension de l'échantillon de sol dans l'eau (NF ISO 10390) ;
- la **minéralogie des argiles** a été estimée selon une méthode de semi-quantification par diffraction aux rayons X (DRX). La préparation de lame orientée a été réalisée après décarbonatation des échantillons de sol séchés et broyés, sur la fraction argileuse extraite par sédimentation (Millot, 1964). L'analyse DRX a été réalisée par un diffractomètre de rayons-X Bruker D4 Endeavor (UMR 6282 Biogéosciences, Université de Bourgogne, Dijon). Les analyses ont été effectuées sur trois traitements *i.e.* traitement au naturel, saturation à l'éthylène-glycol pendant 6 heures, chauffage au four à 490°C pendant 2 heures (Moore et Reynolds, 1997). La semi-quantification des minéraux argileux a été traitée via le logiciel Macdiff. Le calcul de l'aire de chaque pic, par un procédé de déconvolution, a été utilisé pour quantifier la proportion de chaque minéral argileux. Les résultats sont exprimés en pour cent (%) avec une marge d'erreur de ± 5 %. Ainsi, tous les minéraux argileux qui présentent une proportion inférieure à 5% seront marqués comme traces ;
- la **texture** a été quantifiée par une analyse granulométrique de 5 fractions sans décarbonatation préalable selon la norme NF X 31-107. Les résultats de l'analyse granulométrique sont exprimés en %. La texture est exprimée selon le triangle des textures du GEPPA (Baize, 2000) (Figure 3.10).

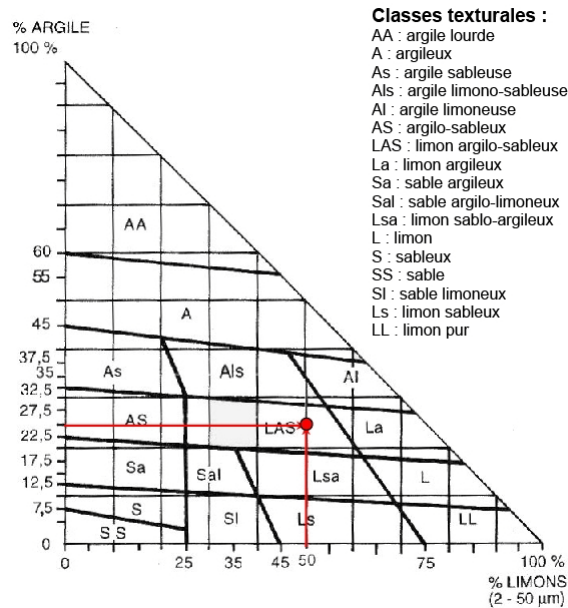


Figure 3.10 Classification des textures du sol selon le Groupe d'Études pour les Problèmes de Pédologie Appliquée (d'après, Baize, 2000)

3.6 Cartographie de l'érosion

Sur plusieurs secteurs d'étude, des cartes d'érosion ont été acquises à partir de la méthode SUM (Stock Unearthing Measurement), mise au point par Brenot (2007) dans ses travaux de thèse sur l'érosion des sols viticoles de la Côte. Le principe est similaire aux méthodes utilisées en dendrogéomorphologie, et est basé sur la mesure du déchaussement des ceps de vigne, considéré comme un marqueur passif des variations topographiques depuis la plantation (Brenot *et al.*, 2008). Les vignes sont greffées en Bourgogne depuis la crise du phylloxéra. Le cep de vigne présente deux parties, *i.e.* le porte greffe et le greffon, la jonction entre ces deux parties se marquant par la présence d'un bourrelet de greffe. La partie végétative du porte-greffe ayant été supprimée, ce dernier s'accroît uniquement de façon horizontale au cours du cycle de vie de la vigne. Sa position topographique depuis la plantation n'évolue donc pas. Lors de la plantation, le bourrelet de greffe doit être situé au-dessus du sol pour empêcher un développement racinaire sur le greffon. De plus, le porte-greffe ne doit pas dépasser du sol pour éviter un dessèchement de celui-ci. Les recommandations agronomiques conseillent de laisser une distance de 1 à 2 cm entre le bourrelet de greffe et le sol (Galet, 2000) ; cette distance marque donc l'état initial de la topographie du sol au moment de la plantation.

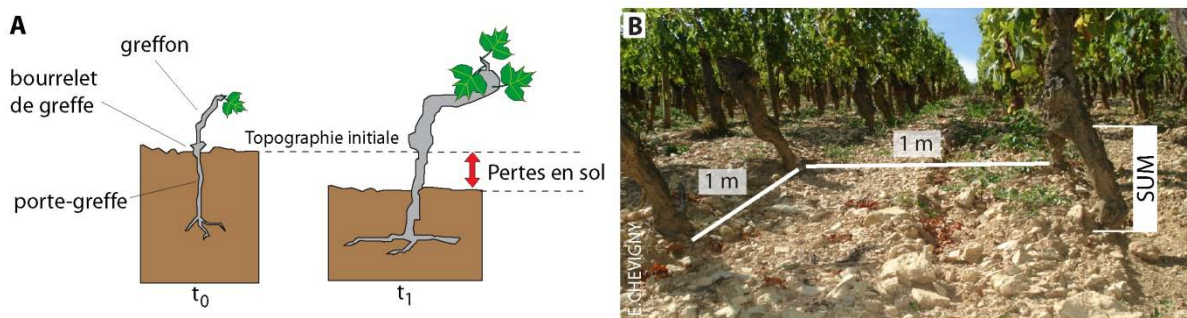


Figure 3.11 Schéma conceptuel de la méthode SUM (A) (modifié d'après Brenot et al., 2008). La densité de plantation de 10 000 pieds/hectare permet d'effectuer une mesure tous les mètres carrés (B).

La mesure du déchaussement des ceps de vigne consiste à mesurer, sur le terrain, la distance entre le bourrelet de greffe et la surface du sol (Figure 3.11). Une distance supérieure à 1-2 cm marque un abaissement de la topographie initiale et donc une érosion du sol ; à l'inverse, si la distance est inférieure, le cep a subi un colluvionnement ou un apport de terre anthropique. En connaissant l'âge de plantation de la vigne, on peut alors estimer des vitesses d'érosion et/ou de sédimentation. Pour le calcul des vitesses d'érosion, la valeur de 1 cm est soustraite aux mesures de terrain, correspondant à la distance initiale entre le bourrelet et le sol lors de la plantation. La mesure systématique de tous les ceps, à l'exception des ceps jeunes et des ceps trop âgés dont le bourrelet de greffe est plus difficilement repérable, permet d'obtenir une carte d'érosion à l'échelle du mètre carré (plantation 10 000 pieds/hectare). Les mesures effectuées sont enregistrées dans un tableur sous forme d'une grille permettant de produire soit une carte des mesures réelles (avec les absents), soit interpolée selon une méthode de krigeage (logiciel Surfer 8) pour obtenir une carte sans données manquantes.

3.7 Détermination de l'évolution de l'occupation du sol

Afin d'évaluer l'impact de l'occupation ancienne du sol sur la diversité de celui-ci, plusieurs approches ont été employées à l'échelle de la parcelle, sur divers secteurs d'étude. Les plans cadastraux anciens ont été utilisés pour déterminer l'évolution du parcellaire viticole. Un recensement de l'occupation du sol a été réalisé à partir de la consultation des matrices cadastrales aux archives communales. Ces deux documents ont permis de retracer l'évolution du parcellaire et de son occupation depuis deux siècles. Ce recensement a été complété par l'interprétation visuelle de photographies aériennes anciennes, depuis 1940 jusqu'à nos jours. Ces interprétations ont été couplées par des enquêtes menées auprès des viticulteurs exploitant les parcelles étudiées, lesquelles ont permis d'obtenir des informations sur les changements des pratiques culturales employées. Une approche « archéologique » a été utilisée pour évaluer l'impact de l'homme sur le sol, sur le temps long.

3.8 Conclusion

L'approche cartographique utilisée est basée sur l'utilisation de diverses techniques qui fournissent chacune des informations nécessaires à l'élaboration de la carte pédologique à haute résolution et de déterminer les facteurs qui contrôlent la diversité des sols :

- L'imagerie THRS dans le domaine spectral du visible est utilisée pour cartographier les états de surface du sol de façon continue, afin de s'affranchir des problèmes de discontinuité rencontrés dans les méthodes de cartographie conventionnelles. De plus, l'utilisation de la THRS, dans ce contexte de culture pérenne, permet de supprimer les composantes de l'image qui ne correspondent pas au sol.
- Les EDS sont caractérisés par leurs paramètres physico-chimiques afin d'évaluer les relations qui peuvent exister entre les EDS reconnus par imagerie et leurs caractéristiques physico-chimiques. La cartographie des EDS est également utilisée pour localiser les sondages pédologiques.
- Le modèle numérique de terrain à haute résolution identifie et localise les fines variations topographiques qui peuvent contribuer à la diversification du sol. Il est également utilisé pour localiser les sondages pédologiques.
- La caractérisation du substrat géologique est réalisée à partir de profil 2D de résistivité électrique. La haute résolution spatiale d'acquisition offre la possibilité d'observer en continu, avec précision, les formations lithologiques du sous-sol. Ce profil est également utilisé pour localiser les sondages pédologiques.
- Les sondages à la tarière sont effectués pour caractériser les divers types de sol et déterminer leur distribution spatiale.
- La cartographie de l'érosion à l'échelle du mètre est utilisée pour mettre en évidence la variabilité intra-parcellaire de la sensibilité à l'érosion du sol.
- La caractérisation de l'occupation ancienne du sol est utilisée pour identifier les facteurs anthropiques qui contrôlent l'érosion, observée à l'échelle de la parcelle.

La combinaison de l'ensemble des données acquises à haute résolution permet de produire une cartographie des sols viticoles de versant à une échelle adaptée à l'étude des terroirs. De plus, elle permet d'identifier les facteurs naturels et anthropiques qui contribuent à diversifier les sols viticoles de versant de la Côte.

**Synthèse de la première partie « Sol et
substrat géologique de la Côte viticole :
cadre général, outils et méthodes »**

Synthèse de la première partie « Sol et substrat géologique de la Côte viticole : cadre général, outils et méthodes »

Cette première partie de la thèse s'est intéressée, dans un premier chapitre, à caractériser le contexte de la zone d'étude pour diverses composantes : la géologie, la pédologie et l'histoire du vignoble. Dans un deuxième temps, les méthodes de cartographie appliquées à la géologie et à la pédologie ont été présentées. L'ensemble a permis de définir les besoins pour une caractérisation fine de la diversité géopédologique des versants viticoles de la Côte. Une démarche interdisciplinaire reliant Sciences de la Terre, Sciences de la Vie et Sciences Sociales est proposée pour élaborer une cartographie à haute résolution de la diversité des sols viticoles de versant et pour en comprendre les déterminants.

Sur la diversité géopédologique de la Côte

Sur la Côte, les variations lithologiques sont faibles, les versants étant principalement constitués de calcaires et de marnes. La diversité géologique s'exprime à travers les différentes formations géologiques qui présentent de nombreux faciès sédimentaires, ces derniers conférant à la roche des caractéristiques pétrographiques particulières. De plus, les nombreuses fracturations du substrat géologique entraînent une distribution spatiale des types de substrat sur de courtes distances, augmentant ainsi la diversité géologique sur de courtes distances, de l'ordre de l'hectomètre. Cette dernière s'exprime également par la présence de formations superficielles qui drapent certaines parties de versant, et se combine à des variations topographiques ayant contribué au cours du temps à la formation de divers types de sol. L'étude de trois sites représentatifs de la diversité géologique de la Côte permet d'avoir une représentation de la diversité géopédologique des versants de la Côte. Au-delà de ces facteurs naturels, les sols viticoles ont connu des transformations liées à l'activité humaine.

Le vignoble de la Côte, mis en culture depuis plusieurs siècles, a été façonné au cours du temps par l'homme, conduisant à des évolutions du paysage naturel. Ce territoire a donc subi de nombreuses modifications du sol par le biais des pratiques culturelles employées.

La diversité géopédologique sur la Côte est donc la résultante de processus naturels qui ont conduit à la formation des sols, et de processus liés à l'activité humaine qui ont contribué à modifier le paysage et les sols par la mise en culture de la vigne. L'ensemble de ces modifications a conduit à diversifier les sols viticoles de versant sur des espaces géographiques restreints, nécessitant une caractérisation à grande échelle de ces sols.

Caractérisation de la diversité des sols et ses déterminants

La caractérisation géopédologique peut être réalisée selon diverses méthodes cartographiques. Les méthodes conventionnelles, majoritairement utilisées jusque dans les années 90, sont basées sur une approche d'observations ponctuelles de terrain destinées à définir et renseigner des plages cartographiques dont les limites présentent une part de subjectivité. Depuis une vingtaine d'années, le développement de nouvelles technologies a permis d'introduire de nouveaux outils pour les travaux de cartographie des sols, la télédétection par imagerie et la géophysique de subsurface. Ces techniques sont utilisées pour spatialiser en continu les propriétés physico-chimiques de la surface du sol, du sol et/ou du substrat. Elles permettent donc de mieux définir les limites des unités cartographiques. Ces techniques ont démontré un intérêt certain pour des travaux cartographiques effectués lors d'études de « terroirs » en contexte viticole. Nous proposons donc d'appliquer ces techniques sur la Côte viticole à des fins cartographiques à haute résolution spatiale.

Pour les versants de la Côte, plusieurs techniques ont été utilisées pour déterminer l'organisation spatiale des sols et caractériser la diversité des sols. Chacune d'elles correspond à un(des) objectif(s) particulier(s) (Tableau S-1) :

- la *tomographie électrique* appliquée à l'échelle du versant pour déterminer la distribution des formations géologiques ;
- la *télédétection* par imagerie dans le domaine spectral du visible à très haute résolution spatiale pour cartographier les propriétés physico-chimiques de la surface du sol, afin de délimiter les plages cartographiques ;
- l'utilisation de *modèles numériques de terrain* à très haute résolution spatiale, pour déterminer les fines variations topographiques qui peuvent contrôler la distribution spatiale des sols ;
- la *méthode ARP* (Automatic Profiling Resistivity) pour cartographier la diversité pédologique et géologique à très haute résolution spatiale ;
- le *SUM* pour mettre en évidence la variabilité intra-parcellaire de la sensibilité à l'érosion du sol ;
- les *documents historiques* et les *enquêtes* pour déterminer les facteurs anthropiques qui contrôlent l'érosion ;
- les approches *archéologiques* pour évaluer l'impact de l'homme sur le sol, sur le temps long.

	Echelle spatiale adaptée	Résolution spatiale	Type d'observation	Objectifs
Tomographie électrique	Transect versant, Parcelle	< 5 m	2D (profondeur)	Caractérisation du substrat géologique
Imagerie THRS	Transect versant, Parcelle	10 cm	2D (planimétrique)	Cartographie des états de surface du sol Délimitation des unités cartographiques
Modèle numérique de terrain	Versant, Parcelle	1 m	3D (surface)	Localisation des variations topographiques Délimitation des unités cartographiques
Méthode ARP [®]	Parcelle, Transect versant	1-5 m	3D (profondeur)	Délimitation des unités cartographiques
SUM	Parcelle	1 m	2D (planimétrique)	Caractérisation de la variabilité intra-parcellaire de la sensibilité à l'érosion du sol
Archives, photos anciennes	Parcelle	-	2D (planimétrique)	Evolution du parcellaire et de l'occupation du sol (facteurs qui contrôlent l'érosion)
Enquêtes	Parcelle	-	-	Evolution pratiques culturelles et de l'occupation du sol (facteurs qui contrôlent l'érosion)
Approche "archéologique"	Parcelle	-	-	Déterminer l'impact de l'homme sur le sol sur le temps long

Tableau S-1 Tableau de synthèse des diverses techniques employées, de leurs caractéristiques et de leurs objectifs.

Les diverses techniques de télédétection par imagerie et d'investigation géophysique peuvent être appliquées à très haute résolution spatiale afin d'observer les fines variations géologiques et pédologiques. Une application à l'échelle du versant sous forme de transect offre la possibilité de produire une cartographie précise des sols à haute résolution spatiale. L'étude de l'impact de l'homme sur le sol, à travers ses activités anciennes et actuelles, peut être réalisée par diverses approches. Cette démarche interdisciplinaire devrait permettre de caractériser avec précision la diversité des sols viticoles de versant et les déterminants de cette diversité.

Partie II - Diversité géopédologique à l'échelle du versant pour divers contextes géologiques

Chapitre 4 - Caractérisation de la diversité géopédologique par imagerie. Application à l'échelle du versant

Chapitre 4 Caractérisation de la diversité géopédologique par imagerie. Application à l'échelle du versant

Introduction

Les précédentes études géologiques et pédologiques réalisées sur la Côte ont démontré que la diversité géopédologique sur les versants viticoles est relativement importante. La résolution spatiale des cartes pédologiques et géologiques disponibles sur la Côte viticole ne semble pas être adaptée à la caractérisation des unités cartographiques « fonctionnelles » des terroirs. Cette caractérisation peut être appréhendée par des méthodes cartographiques conventionnelles à grande échelle, supérieure au 1/25 000. Cependant, ces méthodes nécessitent d'importantes investigations de terrain, qui sont longues et coûteuses. De plus, des observations ponctuelles sont utilisées pour délimiter des unités spatiales, mais l'imprécision de la localisation des limites ainsi définies reste importante. D'autres méthodes permettant une acquisition de données en « continu » sont utilisées depuis une vingtaine d'années à des fins cartographiques.

Nous proposons dans ce chapitre de tester deux de ces méthodes : la télédétection par imagerie et une méthode d'investigation géophysique, toutes deux basées sur l'analyse et l'interprétation d'images, afin de caractériser la diversité géopédologique des versants viticoles à très haute résolution spatiale. Trois versants viticoles de la Côte, situés à Couchey, Aloxe-Corton et Cheilly-lès-Maranges, présentant divers contextes géologiques, ont été étudiés par ces méthodes afin d'évaluer leur robustesse. Les versants de Couchey et d'Aloxe-Corton se caractérisent par une forte variabilité de faciès sédimentaire, alors que le versant de Cheilly-lès-Maranges est constitué principalement de formations marneuses. Le choix de cette répartition spatiale des sites a pour objectif de caractériser les divers sols viticoles et substrats géologiques qui constituent le vignoble côte-d'orien.

4.1 Diversité géopédologique du versant d'Aloxe-Corton à forte variabilité de faciès

4.1.1 Topographie du versant d'Aloxe-Corton

Le modèle numérique de terrain à haute résolution spatiale (5 m) a été calculé par stéréoscopie optique à partir de photographies aériennes prises par l'IGN (mission 2006). Le MNT HR a été utilisé pour calculer la carte des pentes du secteur (Figure 4.1). Le versant présente une morphologie de forme convexo-concave, typique de la Côte de Beaune. Sur celui-ci, l'altitude s'étage de 233 m à 335 m, les pentes varient de 0° à 16°. Les pentes les plus fortes, comprises entre 10° et 16°, sont situées à l'amont du versant, au-dessus de 300 m. Les pentes diminuent de 300 m à 285 m d'altitude, et sont comprises entre 5° et 10°. Elles diminuent de nouveau de 285 à 275 m, et varient de 2,5° à 7,5°. Ce secteur présente des variations locales de pentes qui se marquent par des alternances entre des valeurs de pentes faibles et modérées, qui forment de légers replats. Dans la partie médiane du versant, de 275 à 255 m d'altitude, les pentes augmentent : elles sont homogènes et comprises entre 7,5° et 10°. Elles diminuent de nouveau vers l'aval, de 255 à 240 m, comprises entre 5° et 7,5°. Dans la partie aval du versant, les pentes sont les plus faibles et s'étagent 0° à 5°.

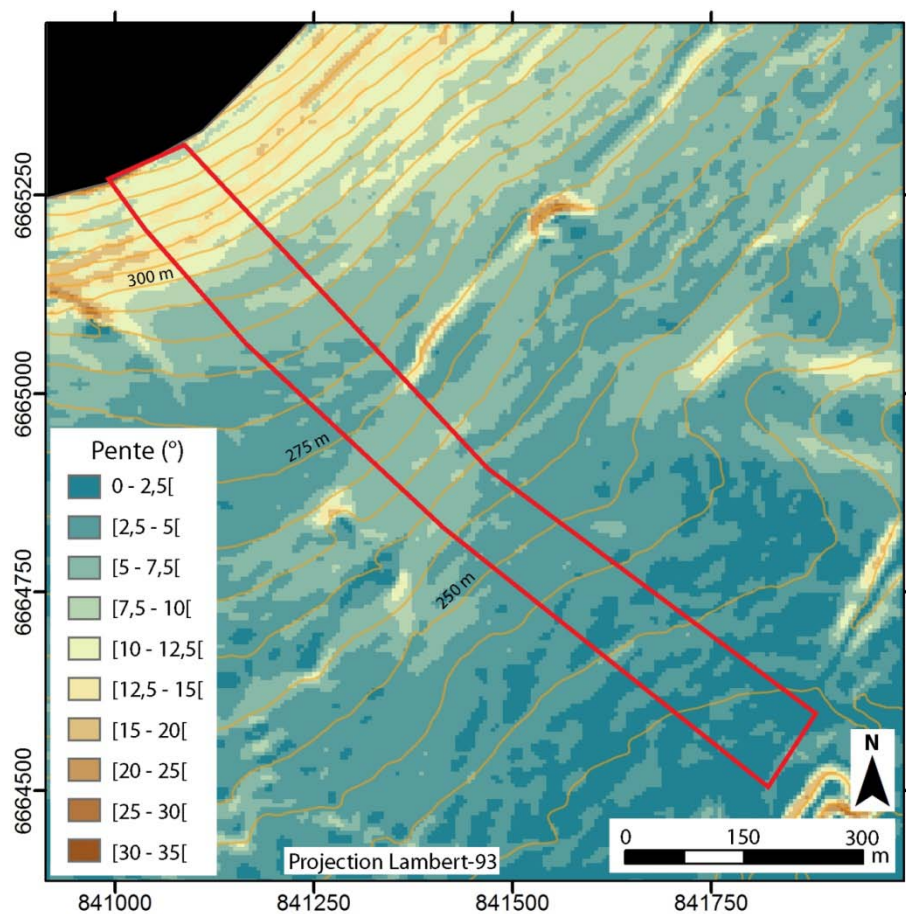


Figure 4.1 Carte des pentes et courbes de niveau (écartement 5 m) du secteur d'étude situé sur le versant d'Aloxe-Corton. L'encadré rouge représente le secteur d'étude. Les courbes de niveau sont matérialisées par des traits orange.

Les variations topographiques observées sur le MNT HR sont cohérentes avec celles observées sur le MNT de la BD Topo de l'IGN, à une résolution de 25 m. Néanmoins, le MNT HR met en évidence des variations topographiques locales, qui pourraient correspondre à la présence de changements lithologiques.

4.1.2 Caractérisation du substrat géologique du versant d'Aloxe-Corton

Les profils 2D de résistivité électrique du sous-sol réalisés sur le versant d'Aloxe-Corton ont été acquis à l'aide d'un Syscal Pro Switch 192 (IRIS Instruments, Université Paris VI Pierre et Marie Curie). L'acquisition a été réalisée au printemps 2012, par temps sec, en laissant un laps de temps d'au moins trois jours après la dernière pluie, permettant un ressuyage du sol. Pour obtenir une profondeur d'investigation de l'ordre de 50 m, la configuration d'électrodes en « Wenner-Schlumberger », avec un espacement inter-électrodes de 4 m, a été employée (Barker, 1989 ; Loke, 2013). Le profil du versant d'Aloxe-Corton s'étend du bois de Corton (25 m dans le bois) à l'amont jusqu'au lieu-dit « Les Chaillots » (Figure 4.2). L'orientation des rangs de vigne a empêché le prolongement du profil jusqu'à la route D974 à l'aval du versant. Les caractéristiques des profils sont présentées dans le Tableau 4-1.

Les divers traitements ont été réalisés avec le logiciel Prosys II[®]. La topographie a été insérée et les valeurs de résistivité apparente aberrantes ont été supprimées par ce logiciel. Le modèle d'inversion des moindres carrés a été calculé par le logiciel Res2dinv[®]. Les résultats issus des différents traitements sont présentés dans le Tableau 4-1. La distribution spatiale des erreurs RMS sous forme de profils 2D a permis de localiser les zones présentant de fortes erreurs (Figure 4.3). Ces erreurs, le plus souvent liées à la présence de routes, de chemins ou de contours remblayés, seront prises en compte lors de l'interprétation des profils.

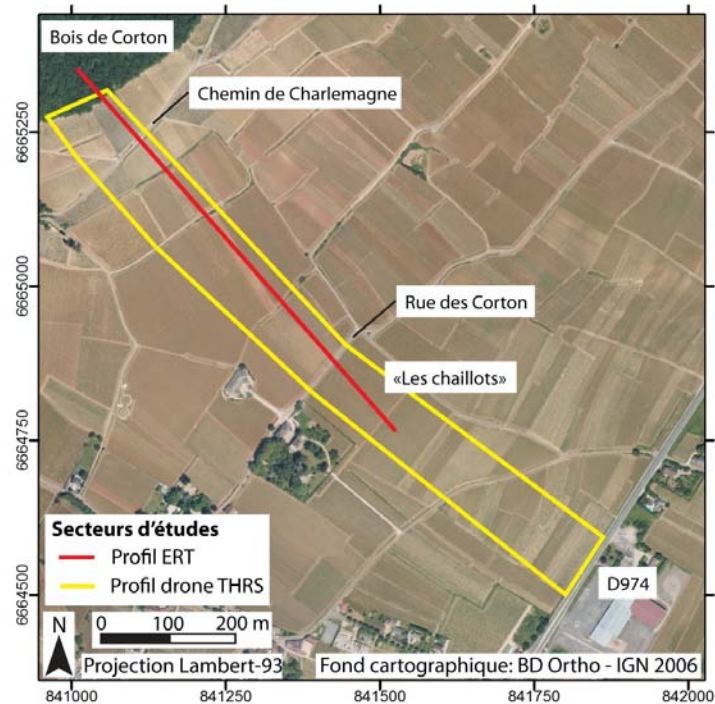


Figure 4.2 Localisation du profil de tomographie électrique (ERT) et de la zone survolée par le drone sur le versant d'Aloxe-Corton.

Profil ERT	Longueur	Nb électrodes	Profil complet	Roll-along
Aloxe-Corton	756 m	192	1	2
Données				
Profil ERT	Mesurées	Doublons	Résistivité négative	Écart-type > 1 %
Aloxe-Corton	7020	2994	0	5
Inversion				
Profil ERT	Itérations calculées	Convergence itération	RMS (%)	
Aloxe-Corton	7	4	1.17	

Tableau 4-1 Caractéristiques techniques du profil de résistivité d'Aloxe-Corton ; résultats issus des filtrages (Prosys II[®]) et de l'inversion des moindres carrés (Res2dinv[®]).

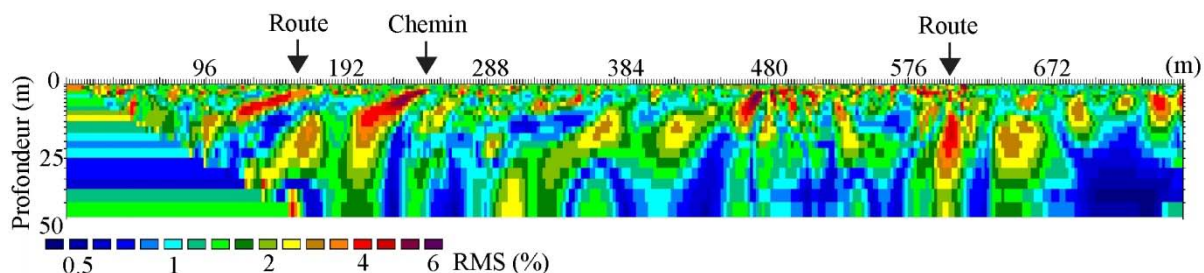


Figure 4.3 Profils 2D représentant les erreurs RMS correspondant à l'itération choisie pour l'interprétation (convergence). Les fortes valeurs de RMS sont principalement corrélées avec la présence de structures anthropiques.

Le profil de résistivité électrique du versant d'Aloxe-Corton présente des valeurs de résistivité qui varient de 0 à 400 Ohm.m (Figure 4.4). À l'échelle du versant, deux compartiments structuraux¹² peuvent être identifiés, nommés CI (0 à 525 m) et CII (525 à 750 m), constitués chacun de plusieurs unités qui correspondent aux différentes formations lithologiques. Au sein du compartiment I, sept unités ont été identifiées :

- l'unité I (UI), située à l'amont du versant, s'étend sur une trentaine de mètres de longueur. Les valeurs de résistivité varient de 150 à 300 Ohm.m et sont interprétées comme une formation de type calcaire. Un affleurement a permis de relier cette unité aux calcaires compacts, grenus et graveleux dits Calcaires de Beaune.
- l'unité II (sous-jacente à UI), épaisse d'une dizaine de mètres, se retrouve en surface de 30 à 90 m à partir de l'amont. Elle présente de faibles valeurs de résistivité, de l'ordre de 60 à 100 Ohm.m. Ces valeurs de résistivité peuvent correspondre à un faciès marneux.
- l'unité III (sous-jacente à UII) présente une épaisseur d'environ 15 m ; on l'observe en surface de 90 à 150 m à partir de l'amont et les valeurs de résistivité varient de 100 à 300 Ohm.m. Ces valeurs sont caractéristiques d'un faciès de type calcaire. Cette unité marque dans le paysage un important ressaut topographique.
- l'unité IV (sous-jacente à UIII) épaisse de 30 m, s'étend à l'affleurement de 150 à 250 m depuis l'amont, les valeurs de résistivité sont faibles et varient de 20 à 100 Ohm.m. Ces valeurs sont caractéristiques des marnes.

¹² Compartiment structural : correspond à chacun des blocs de part et d'autre d'une faille, ou d'un décrochement (Foucault et Raoult, 2010)

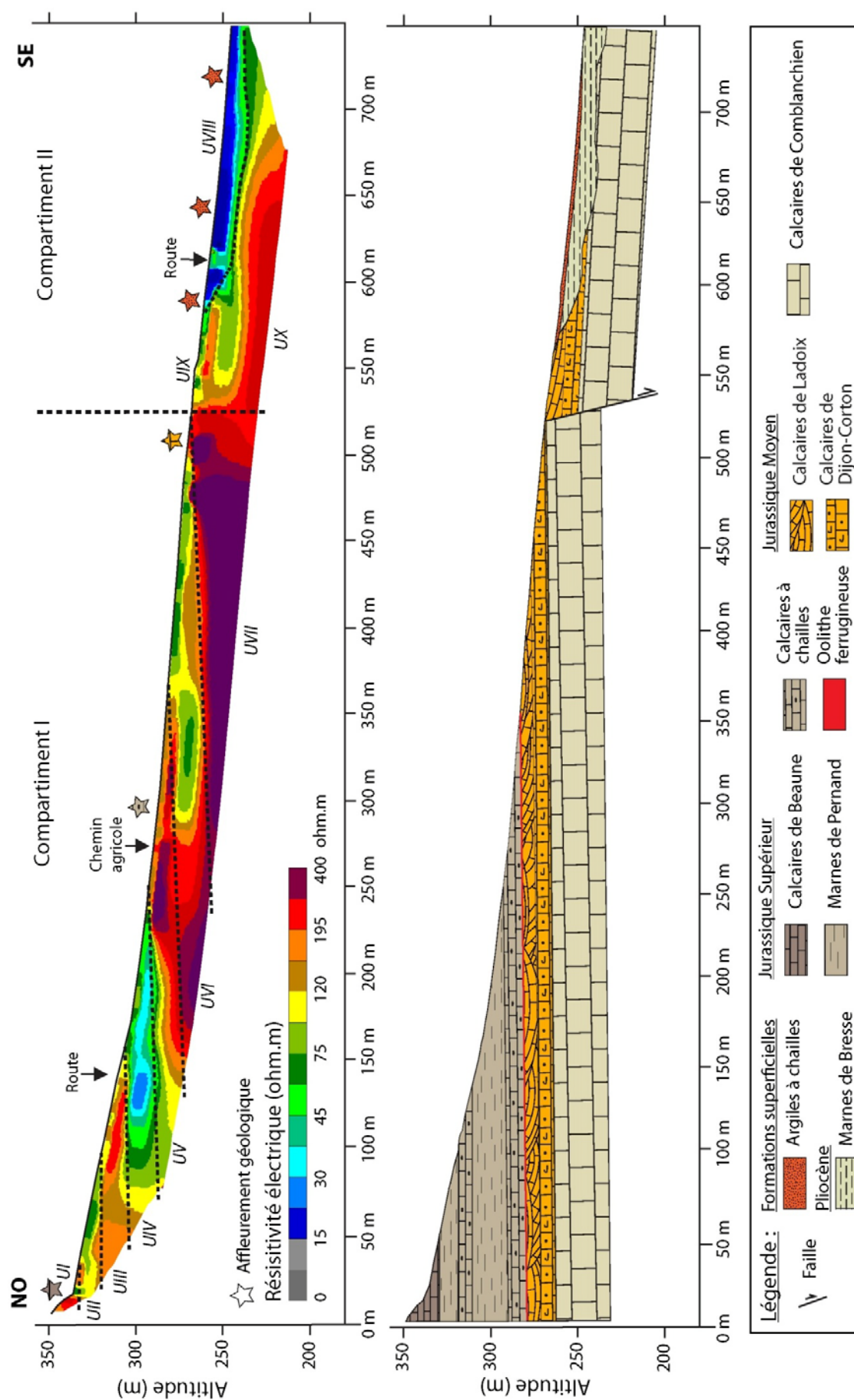


Figure 4.4 Profil de résistivité électrique du sous-sol et coupe géologique interprétative du versant viticole d'Aloxe-Corton. La localisation du profil est renseignée sur la figure 4.1.

- l'unité V (sous-jacente à UIV), d'une épaisseur d'environ 15 m, s'étend en surface de 250 à 360 m à partir du nord du profil. Les valeurs de résistivité varient de 150 à 400 Ohm.m. Cette unité semble être constituée par une lithologie de type calcaire. À l'affleurement, des calcaires argileux à chailles ont pu être identifiés.

La succession verticale des unités II à V correspond à la formation oxfordienne des Marnes de Pernand, constituée de calcaires argileux à chailles dans sa partie médiane et basale en alternance avec des marnes. L'épaisseur de cette succession d'environ 80 m est cohérente avec les épaisseurs énoncées dans la notice de la carte géologique du secteur (Rémond, 1985).

- l'unité VI (sous-jacente à UV), d'une épaisseur d'environ 20 m, est présente en surface de 360 à 520 m depuis l'amont. La résistivité est plus faible que pour l'unité V et varie de 60 à 120 Ohm.m. Ces valeurs sont généralement observées pour des formations marneuses. Cependant, un affleurement observé à 500 m, a permis d'identifier des calcaires bioclastiques, interprétés comme faisant partie de la formation des Calcaires de Dijon-Corton. L'ensemble de l'unité VI correspondrait donc à la Dalle Nacrée, constituée des Calcaires de Ladoix au sommet et des Calcaires de Dijon-Corton à la base. Les faibles valeurs de résistivité de cette formation peuvent s'expliquer par la présence d'intercalations marneuses entre les bancs calcaires de la formation (Rémond, 1985).
- l'unité VII (sous-jacente à UVI), observée en profondeur sur le profil et s'étendant de 200 à 520 m à partir du nord du profil, présente de très fortes valeurs de résistivité de l'ordre de 400 Ohm.m. Cette formation n'affleure pas, mais sa position, juste en dessous des calcaires de la Dalle Nacrée, a conduit à interpréter cette unité comme la formation des Calcaires de Comblanchien.

Le deuxième compartiment structural, situé dans la partie aval du profil de 520 à 750 m depuis l'amont, est constitué de trois unités identifiées sur le profil de résistivité.

- l'unité VIII s'étend sur dans la partie aval du compartiment II. Elle présente de très faibles valeurs de résistivité, comprises entre 5 et 75 Ohm.m. L'épaisseur de cette unité est variable. Ces très faibles valeurs de résistivité peuvent correspondre à une formation marneuse ou argileuse. Une formation argileuse constituée de nombreuses chailles plus ou moins altérées a pu être identifiée par l'observation de divers affleurements. Cette formation correspond à la formation superficielle dite des « argiles à chailles » ou « limons à chailles », que l'on peut observer dans divers secteurs de la Côte (Ciry, 1953) et qui pourraient correspondre à des matériaux résiduels des calcaires à chailles formant la base de la formation marno-calcaire oxfordienne. Selon Ciry (1953), ce dépôt résulterait d'un apport de solifluxion würmien. L'épaisseur de l'unité VIII, supérieure à 10 m, et l'observation des Marnes de Bresse (Plio-

Pléistocène) juste à l'aval de la zone prospectée, nous ont conduits à poser l'hypothèse de la présence, en profondeur, de la formation marneuse des Marnes de Bresse.

- l'unité IX, observée en surface entre 520 m et 580 m depuis l'amont, présente des valeurs de résistivité comprises entre 75 et 195 Ohm.m. L'épaisseur de l'unité est de l'ordre de 20 m. À l'affleurement, des calcaires bioclastiques ont été observés lors du creusement d'une fosse pédologique. Ceux-ci constituent la formation des Calcaires de Ladoix (sommet de la Dalle Nacrée).
- l'unité X, située en profondeur et non affleurante, présente de fortes valeurs de résistivité de l'ordre de 300 Ohm.m. Cette unité s'étend sur toute la largeur du compartiment II. Elle correspondrait à la formation des Calcaires de Comblanchien du fait de la présence de la Dalle Nacrée sus-jacente.

L'absence de la Dalle Nacrée dans la partie est du compartiment II, les variations d'épaisseur de l'unité VIII et la discordance des dépôts plio-quaternaires sur des dépôts jurassiques ont permis de caractériser la limite qui sépare l'unité VIII des unités XI et X. Cette surface « ondulée » correspond à une surface d'érosion anté-pliocène qui a tronqué les gradins de failles, actuellement recouverts en discordance par les Marnes de Bresse (Rémond, 1985).

De plus, le contact latéral, entre la base des Calcaires de Dijon-Corton et le sommet des Calcaires de Ladoix à 520 m de part et d'autre de la faille, donne une indication sur le rejet de la faille qui sépare le compartiment I et II, évalué à 20 mètres environ.

L'acquisition du profil 2D de résistivité électrique du versant d'Aloxe-Corton met en évidence l'importante diversité des formations lithologiques qui composent ce versant. Le bois de Corton est implanté sur les Calcaires de Beaune en haut de versant. Les parcelles de vigne, situées sur le haut du versant viticole, sont plantées sur les Marnes de Pernand (Oxfordien) qui contiennent des bancs de calcaires argileux à chailles. Les calcaires bioclastiques de la Dalle Nacrée affleurent dans la partie médiane (Bathonien-Callovien). À l'aval, les formations superficielles des argiles à chailles (Quaternaire) sont présentes à l'affleurement, et recouvrent probablement la formation palustro-lacustre des Marnes de Bresse (Plio-Pléistocène). Ce versant est composé de deux compartiments tectoniques individualisés par une faille normale dont le rejet atteint une vingtaine de mètres.

La caractérisation des formations lithologiques à très haute résolution spatiale a permis de mettre en évidence les alternances marnes/calcaires à chailles non cartographiées sur la carte géologique du secteur au 1/50 000. La zone d'extension de la formation superficielle des argiles à chailles a également pu être déterminée. De plus, une faille normale, non cartographiée sur la carte géologique, a été localisée dans la partie médiane du versant.

4.1.3 Cartographie des états de surface du sol (EDS)

4.1.3.1 Acquisition des images THRS

Le secteur d'étude du versant d'Aloxe-Corton s'étend du bois de Corton qui coiffe la butte à l'amont jusqu'à la route départementale D974 en bas de versant (Figure 4.5). Les images THRS ont été acquises par le drone DRELIO au printemps afin de limiter la présence de végétation sur le sol et les ceps (Tableau 4-2). Les orthophotographies THRS ont été créées à partir du logiciel MicMac (logiciel libre IGN). Les masques appliqués sur l'orthophotographie THRS ont permis de supprimer une partie de la végétation (teinte foncée), les ceps et leurs ombres portées, afin de préserver uniquement l'état de surface du sol. Sur le versant d'Aloxe-Corton, 12,4 % de l'orthophotographie a ainsi été masquée.

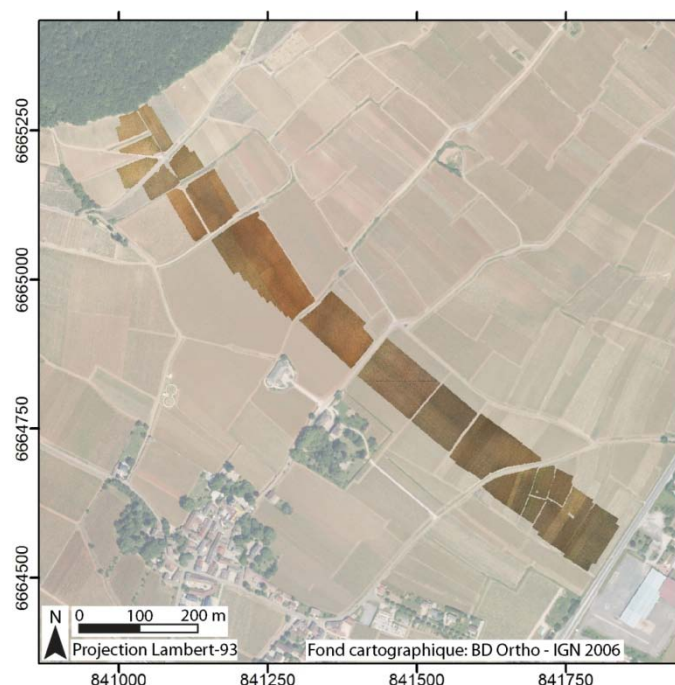


Figure 4.5 Orthophotographie THRS du versant d'Aloxe-Corton ; la résolution spatiale est égale à 10 cm.

Secteur	Date	Heure	APN	Focale	Exposition	Durée vol
Aloxe-Corton	07/03/2010	13:45	Nikon D200, 35mm	F/3.5	1/4000 s	15 min
Secteur	Vitesse moyenne	Nombre de photos	Longueur	Largeur	Superficie	Résolution mosaïque
Aloxe-Corton	9.2 km/h	418	1100 m	80 m	10,5 ha	10 cm

Tableau 4-2 Caractéristiques techniques du vol et des images THRS acquises sur le versant d'Aloxe-Corton.

4.1.3.2 Classification d'images et détermination des classes d'EDS

Le résultat de la classification non supervisée a mis en évidence huit classes de radiance distinctes. Ces classes couvrent une proportion équivalente sur le secteur d'environ 10 %, à l'exception d'une classe qui couvre plus de 21 % (Tableau 4-3). Certaines classes sont présentes uniquement sur une portion du transect, alors que d'autres classes se répartissent sur l'ensemble du transect (Figure 4.6A). Pour certaines zones, la classification différencie les rangs et les inter-rangs, du fait d'une rugosité différente. L'inter-rang tassé par le passage des engins agricoles présente une rugosité plus faible et donc une réflectance plus importante. Pour limiter le nombre de classes, des regroupements ont été réalisés sur les classes différenciant les rangs des inter-rangs. Les classes 4 et 5 ont été regroupées tout comme les classes 6 à 8 qui correspondent à une différence radiométrique entre les rangs et les inter-rangs. Ainsi, les huit classes obtenues ont été regroupées en cinq classes (Tableau 4-3, Figure 4.6B). Ces cinq classes de radiance ont été interprétées comme cinq classes d'état de surface. Pour limiter le bruit présent sur le résultat issu de la classification, un filtre majoritaire de taille 9x9 a été appliqué sur l'orthophotographie, dont la résolution est de 10 cm, permettant d'obtenir une image de la distribution des EDS de résolution métrique (Figure 4.6B). Cette résolution correspond à l'échelle d'échantillonnage des prélèvements de surface collectés pour caractériser les EDS. L'application du filtre majoritaire a conduit à des changements significatifs dans la distribution des trois classes qui caractérisent l'EDS 5 (Tableau 4-3). À l'échelle du versant, ces modifications de la distribution des trois classes n'affectent pas la proportion de l'EDS 5.

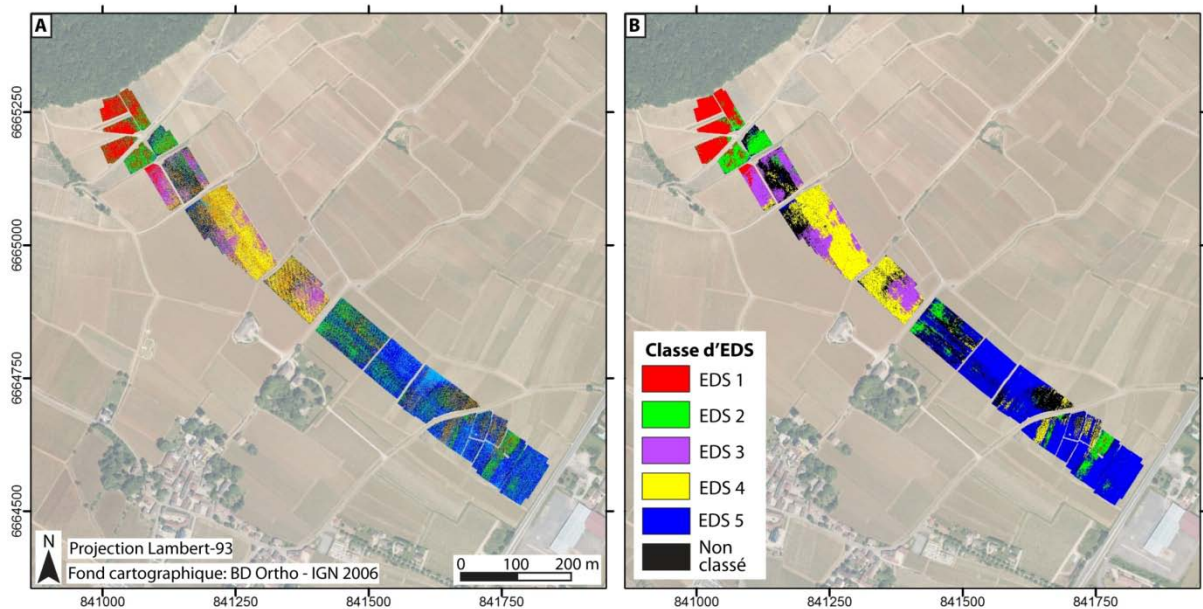


Figure 4.6 Résultats de la classification non supervisée Isodata, réalisée sur l'orthophotographie THRS du versant d'Aloxe-Corton à 10 cm de résolution (A). Après le regroupement en classes et l'application du filtre majoritaire 9x9, la distribution des EDS peut être observée à une résolution spatiale du mètre carré (B).

Nom classe	Distribution classes (Isodata brute) %	Distribution classes (Majority 9x9) %	Nom EDS	Distribution EDS (Isodata brute) %	Distribution EDS (Majority 9x9) %
1	10	10	EDS1	10	10
2	12	10	EDS2	12	10
3	12	13	EDS3	12	13
4	12	12	EDS4	23	25
5	11	12			
6	10	5	EDS5	43	42
7	21	28			
8	12	10			

Tableau 4-3 Distribution des classes de radiance reconnues par imagerie sur le versant d'Aloxe-Corton et attribution des classes d'EDS.

La distribution spatiale des EDS évolue le long du versant (Figure 4.6B, Tableau 4-3). L'EDS 1 (rouge), situé à l'amont du versant, couvre 10 % de la surface étudiée. L'EDS 2 (vert) couvre 12 % de la zone d'étude, et est observé sur deux parcelles de la zone amont, ainsi qu'à l'aval du versant où il couvre deux parcelles. L'EDS 3 (violet), qui couvre 12 % du transect, se situe entre l'amont et le milieu du versant. L'EDS 4 (jaune), couvrant 23 % de la zone d'étude, se situe dans la partie médiane du versant jusqu'à la rue des Corton. Il apparaît localement dans quelques parcelles de la zone aval. L'EDS 5 (bleu) couvre 43 % de la zone d'étude et se situe dans la partie aval du versant.

4.1.3.3 Caractérisation des paramètres physico-chimiques des EDS

Les analyses physico-chimiques obtenues en laboratoire ont été utilisées pour caractériser les différents états de surface du secteur d'étude. L'ensemble des analyses est présenté en Annexe 2. Sur le versant d'Aloxe-Corton, dix-huit prélèvements de surface ont été collectés et décrits (Figure 4.7A). La répartition des prélèvements, en fonction des classes d'EDS définies par imagerie, est la suivante : EDS 1 (rouge) 3 prélèvements, EDS 2 (vert) 2 prélèvements, EDS 3 (violet) 2 prélèvements, EDS 4 (jaune) 5 prélèvements, EDS 5 (bleu) 6 prélèvements.

Les résultats des analyses mettent en évidence une distribution amont-aval des paramètres physico-chimiques.

La pierrosité de surface est importante dans la zone amont (lieu-dit « Les Languettes »), de l'ordre de 40 à 60 % – les graviers sont plus abondants que les cailloux – et est composée de calcaires fins argilo-silteux (Figure 4.7B). Elle diminue légèrement dans la partie médiane (lieux-dits « Les Perrières » et « Les Grèves ») (environ 30 %), où les proportions de graviers et de cailloux sont équivalentes. L'ensemble est formé majoritairement de calcaires bioclastiques et de chailles. Dans la

partie aval, au lieu-dit « Les Chaillots », la pierrosité de surface augmente de l'ordre de 35 à 55 %, et est constituée exclusivement de chailles, principalement de la taille des cailloux. Au lieu-dit « Les Morais », la pierrosité, composée de cailloux, diminue fortement (< 25 %). Cette diversité des éléments grossiers en surface le long du versant est le reflet des roches mères sous-jacentes.

Les valeurs de pH, variant de 7,4 à 8,4, évoluent peu pour les états de surface du versant et correspondent à des sols alcalins.

Les teneurs en fer libre varient de 1 à 5 g/100 g sur le versant. Notons que les valeurs les plus faibles, de 1 à 2 g/100 g, se situent à l'amont au niveau des marnes et calcaires de l'Oxfordien (lieu-dit « Les Languettes ») (Figure 4.7C). Les valeurs les plus fortes, de 2 à 5 g/100 g, se situent dans la partie médiane du versant, sur les calcaires de la Dalle Nacrée (lieux-dits « Les Perrières » et « Les Grèves »). Ces fortes valeurs pourraient s'expliquer par la présence de la formation dite de l'« Oolithe Ferrugineuse », riche en fer, qui marque la transition entre les marnes oxfordiennes et les calcaires de la Dalle Nacrée. Dans le bas du versant (lieux-dits « Les Chaillots » et « Les Morais »), les valeurs sont intermédiaires, de 2 à 3 g/100 g.

Les teneurs en carbonate de calcium les plus importantes, supérieures à 25 g/100 g, se situent à l'amont du versant sur les alternances marno-calcaires (lieu-dit « Les Languettes ») (Figure 4.7D). Elles diminuent dans la partie médiane (lieu-dit « Les Perrières ») pour atteindre des valeurs de 12,5 à 25 g/100 g. Une forte diminution est observée du milieu de versant à l'aval, les valeurs étant comprises entre 0 et 5 g/100 g.

Les teneurs en carbone organique diminuent globalement d'amont en aval. Les plus fortes valeurs, comprises entre 3 à 4 g/100 g, se situent sur les sols calcaires (Figure 4.7E). Les plus faibles et les plus fortes valeurs, observées localement sur les sols calcaires, peuvent s'expliquer par les pratiques culturales employées sur certaines parcelles (désherbage chimique, amendements organiques). À l'aval, les teneurs sont faibles, comprises entre 1 et 2 g/100 g.

Le rapport C/N évolue également de manière générale d'amont en aval. À l'amont, les rapports les plus élevés se situent sur les sols calcaires riches en matière organique, qui mettent en évidence le rôle stabilisateur du carbonate de calcium sur la matière organique du sol (Figure 4.7F). À l'aval, ils sont plus faibles sur les sols décarbonatés, pauvres en matière organique, et pour les parcelles en désherbage chimique.

La distribution de ces constituants sur le versant traduit la signature du substrat géologique, qui subit les effets de l'altération et de la pédogenèse, modulé au second ordre par les pratiques culturales.

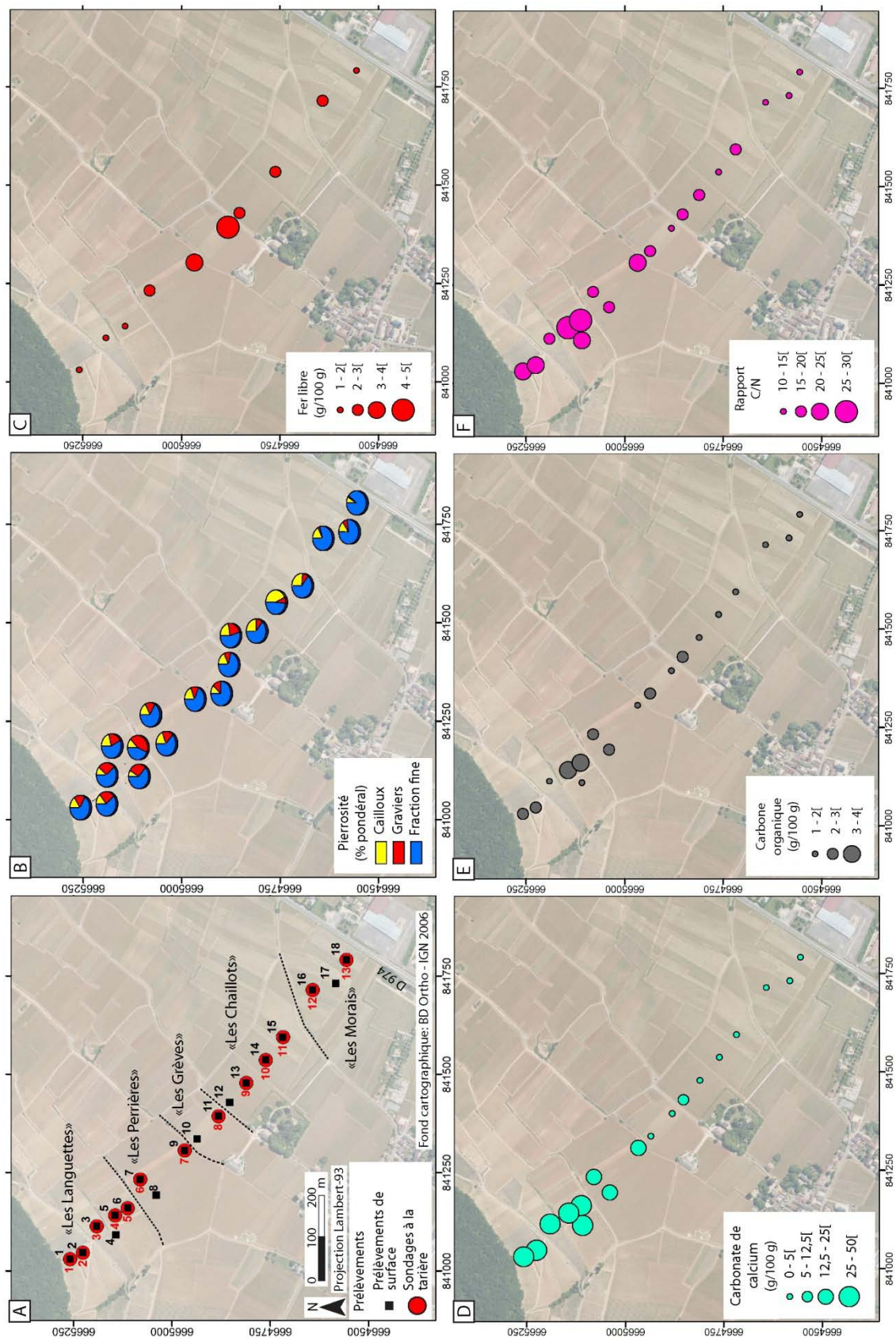


Figure 4.7 Localisation des prélèvements pédologiques (A) et distribution spatiale des caractéristiques physico-chimiques des EDS du versant d'Aloxe-Corton : pierrosité (B), fer libre (C), teneur en carbonate de calcium total (D), carbone organique (E) et rapport C/N (F).

4.1.3.4 Séparabilité des EDS reconnus par imagerie selon leurs paramètres physico-chimiques

Pour déterminer la séparabilité des classes d'EDS à partir de leurs paramètres physico-chimiques, une analyse en composantes principales (ACP) a été calculée sur les différents paramètres étudiés, à l'exception du fer libre et du pH, dont les analyses n'ont pas été réalisées pour l'ensemble des prélèvements. Les trois premiers axes de l'ACP ont été conservés pour l'interprétation des données (valeurs propres supérieures à 1, Kaiser, 1966). Les trois premiers axes représentent plus de 83 % de l'inertie totale du système (Figure 4.8). L'axe 1 est corrélé aux taux de graviers, à la teneur en carbone organique, en carbonate de calcium (CaCO_3), au rapport C/N et au paramètre colorimétrique de clarté (L^*) (Tableau 4-4). L'axe 2 est corrélé aux teneurs en azote total, à la proportion de cailloux et de fraction fine. L'axe 3 renseigne sur les paramètres colorimétriques de chrominance (a^* et b^*) et sur la teneur en azote total. La couleur des classes d'EDS, reconnues par analyse d'images, a été attribuée à chaque prélèvement pour évaluer le lien potentiel entre les classes d'EDS reconnues par imagerie et leurs paramètres physico-chimiques.

	Axe 1	Axe 2	Axe 3		Axe 1	Axe 2	Axe 3
Cailloux	-0.27	-0.75	0.09	Corg/N	0.83	-0.03	-0.30
Graviers	0.82	-0.28	-0.37	CaCO_3	0.91	0.26	-0.23
Fines	-0.42	0.78	0.22	L^*	0.68	0.49	-0.18
C org	0.82	-0.37	0.05	a^*	-0.54	-0.24	-0.76
N	0.20	-0.66	0.49	b^*	-0.74	-0.15	-0.62

Tableau 4-4 Matrice de corrélation variables-facteurs pour l'ACP calculée sur les prélèvements de surface.

Les prélèvements de l'EDS 1 (rouge) se regroupent sur le plan axe1-axe2. Ils se caractérisent par leur forte teneur en CaCO_3 , leur forte clarté et un rapport C/N élevé (Figure 4.8 A, B).

Pour l'EDS 2 (vert), les deux prélèvements se regroupent uniquement sur le plan axe2-axe3 ; ils ont en commun une forte teneur en fraction fine (Figure 4.8 E, F). Selon les plans axe1-axe2 et axe1-axe3, le prélèvement n°3 présente les mêmes caractéristiques que l'EDS 1, alors que le prélèvement n°17 se rattache à l'EDS 4 (Figure 4.8 A, B, C, D). Ces deux prélèvements reconnus au sein de l'EDS 2 ne présentent aucune relation spatiale. L'un est situé à l'amont du versant et l'autre à l'aval.

Les prélèvements effectués sur l'EDS 3 (violet) (prélèvements n°5 et 6) présentent de fortes teneurs en carbone organique, en carbonate de calcium et en graviers (Figure 4.8 A, B, E, F).

Les prélèvements réalisés au niveau de l'EDS 4 (jaune) se répartissent selon les plans axe1-axe2 et axe1-axe3 en un groupe. Les prélèvements sont riches en fraction fine, faiblement carbonatés et se caractérisent par une matrice rouge-orangé.

Les prélèvements des EDS 3 et 4 présentent des caractéristiques physico-chimiques proches, et sont, de plus, tous les deux répartis dans la partie médiane du versant.

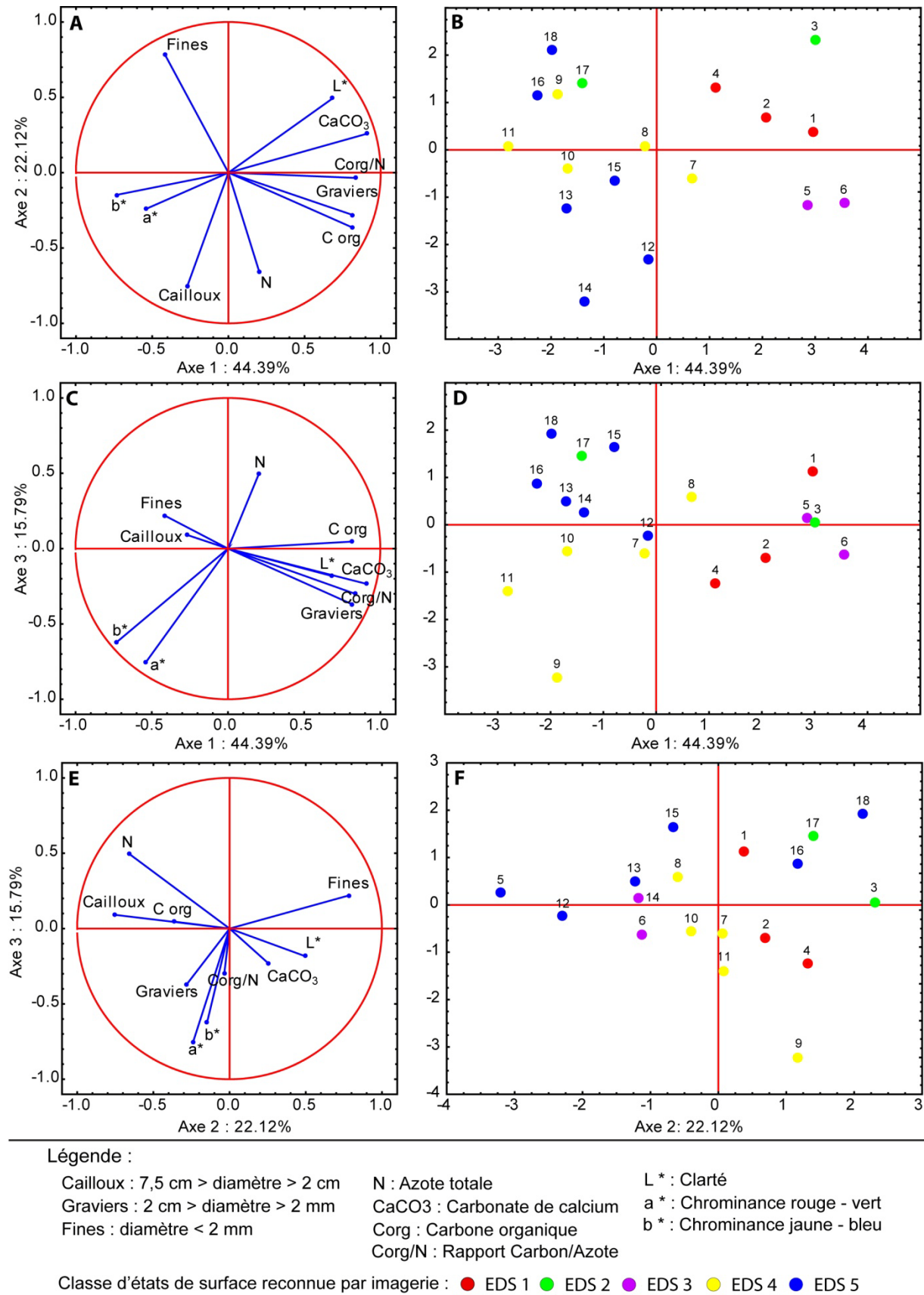


Figure 4.8 Analyse en Composantes Principales réalisée sur les paramètres physico-chimiques des EDS du versant d'Aloxe-Corton. Projections des variables (A, C, E) et des individus (B, D, F) sur les trois plans factoriels couvrant plus de 83 % de l'inertie totale du système.

Pour les prélèvements de l'EDS 5, deux groupes sont identifiables selon les plans axe1-axe2 et axe2-axe3 (Figure 4.8 A, B, E, F). Les prélèvements n°16 et 18 se caractérisent par leur forte teneur en fraction fine alors que les prélèvements n°12 à 15 sont riches en cailloux. Ces deux groupes, qui s'opposent en fonction de leur charge en éléments grossiers, marquent le changement lithologique des argiles à chailles (prélèvements n°12 à 15) aux Marnes de Bresse (prélèvements n°16 et 18). La non-reconnaissance de ces deux groupes par la classification peut s'expliquer par le fait que les éléments grossiers, principalement constitués de chailles, présentent une couleur qui est proche de celle de la matrice du sol. Dans ce cas, l'imagerie dans le visible n'est pas capable de différencier les zones à forte pierrosité des zones à faible pierrosité et les regroupe au sein d'une même classe. L'ensemble des prélèvements s'organise selon le plan axe1-axe3. Ils présentent tous des faibles teneurs en CaCO_3 , une faible charge en graviers, un faible rapport C/N et une faible clarté (Figure 4.8 C, D).

4.1.3.5 Influence des pratiques culturales sur la reconnaissance des EDS

Certains EDS présentent des paramètres physico-chimiques différents alors qu'ils sont regroupés au sein d'une même classe d'EDS reconnue par imagerie. La rugosité de la surface du sol ayant une influence sur la radiométrie des EDS (Courault, 1989), nous avons cherché à voir si ces différences de paramètres physico-chimiques pouvaient s'expliquer par des pratiques culturales particulières. La cartographie des pratiques culturales a été réalisée à partir de l'interprétation des orthophotographies THRS et de relevés effectués sur le terrain au moment de l'acquisition (Figure 4.9A). Les pratiques sont homogènes sur les deux tiers amont du versant : les sols sont griffés, à l'exception de deux parcelles entretenues en désherbage chimique. À l'aval, la diversité des pratiques est plus marquée : griffage, enherbement et désherbage chimique. Cette cartographie des pratiques a permis d'identifier les parcelles présentant des pratiques culturales particulières sur le versant d'Aloxe-Corton (Figure 4.9B) et de mettre en évidence l'influence des pratiques culturales sur la caractérisation des EDS. L'EDS 2 (vert) a pu être relié au désherbage chimique du sol (parcelles nommées « C » sur la Figure 4.9B). Les parcelles reconnues dans cette classe d'EDS présentent une clarté très prononcée indépendamment des paramètres physico-chimiques de l'EDS. La totalité des parcelles situées sur le transect et entretenues en désherbage chimique a été reconnue et classée au sein de l'EDS 2. Cette cartographie des pratiques culturales a également permis d'identifier des parcelles présentant des pratiques culturales similaires, mais dont les états de surface du sol étaient différents au moment de l'acquisition. Cette différenciation s'explique par la date du dernier travail du sol. Ainsi, une parcelle fraîchement labourée ne présentera pas les mêmes caractéristiques spectrales qu'une parcelle labourée antérieurement (parcelles nommées « FL » sur la Figure 4.9B). Ces observations nous ont conduits à prendre en compte les pratiques culturales qui peuvent expliquer la différenciation de deux classes d'EDS présentant des caractéristiques physico-chimiques proches, voire communes.

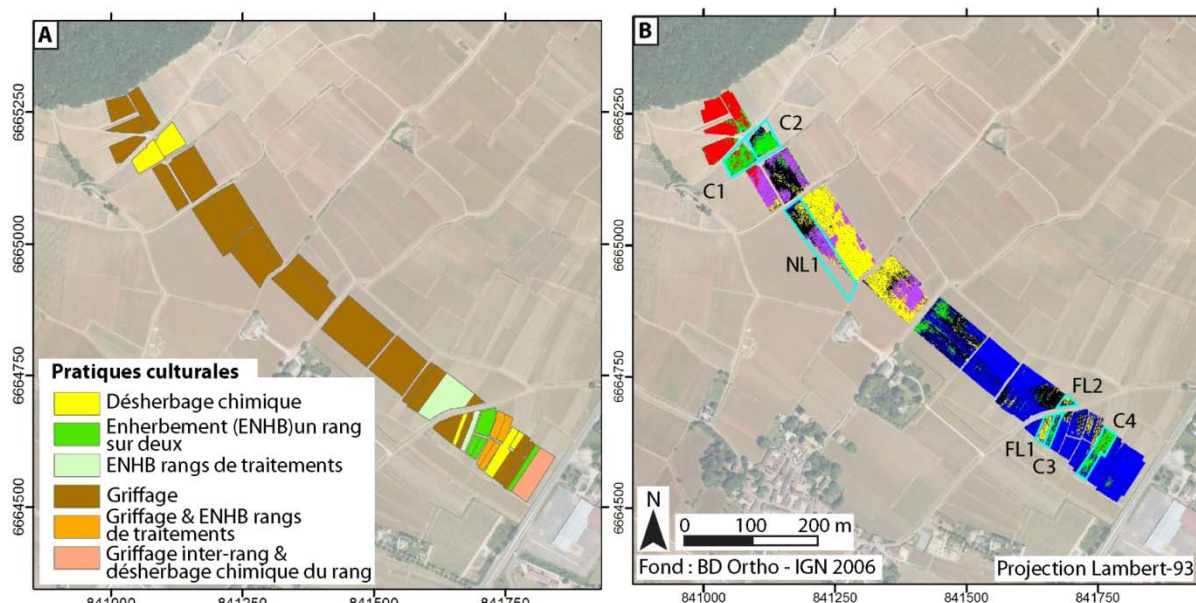


Figure 4.9 Cartographie des pratiques culturales au moment de l'acquisition des images THRS (A). Les parcelles nommées « C, NL et FL » correspondent respectivement aux parcelles en désherbage chimique, non labourées et fraîchement labourées (B). La cartographie des pratiques culturales utilisées sur le transect met en évidence une forte diversité des pratiques dans la partie aval du versant.

L'analyse en composantes principales réalisée sur les paramètres physico-chimiques des prélèvements de surface démontre que :

- il est possible de grouper les EDS à partir de leurs paramètres physico-chimiques ;
- les groupes formés par l'ACP, calculée sur les paramètres physico-chimiques, correspondent en partie aux classes d'EDS reconnus par l'analyse d'images THRS. Il est alors possible de rattacher aux diverses classes d'EDS reconnues par imagerie une composition physique et chimique particulière ;
- les pratiques culturales ont une influence sur la reconnaissance des EDS et peuvent, dans certains cas, masquer les paramètres physico-chimiques de l'EDS normalement reconnu par imagerie ;
- la caractérisation de la pierrosité des EDS est réalisable uniquement dans le cas où il existe un contraste important entre la couleur des éléments lithiques et la couleur de la matrice de l'EDS.

4.1.4 Description et typologie des sols du versant d'Aloxe-Corton

Treize sondages, réalisés à la tarière manuelle à rallonges et répartis sur l'ensemble du versant, ont permis de caractériser les sols et leur distribution sur le versant. La localisation des sondages, illustrée sur la Figure 4.7A, est fonction de la distribution des EDS (Figure 4.6B), du substrat géologique identifié par l'ERT (Figure 4.4) et de la morphologie du versant (Figure 4.1). Leur description a permis d'établir un schéma conceptuel montrant la distribution des horizons pédologiques et du substrat, le long du transect topographique (Figure 4.10). Les analyses physico-chimiques de chaque type de sol rencontré sur le versant sont présentées dans le Tableau 4-5. L'ensemble des observations et analyses est regroupé en Annexe 2.

À l'amont du versant, sur les pentes fortes (10 à 16°), les sols présentent d'importantes variations d'épaisseur, de 30 à 135 cm (sondages n° 01 à 04). Ces variations d'épaisseur s'expliquent par les différentes natures lithologiques du substrat marno-calcaire. Ces deux types de substrats géologiques conduisent à une différenciation des types de sol. Sur les calcaires, les sols sont minces (30 à 50 cm) (sondages n° 01 et 03), la texture est limono-argilo-sableuse à argilo-limoneuse. Ces sols fortement carbonatés sont des Calcosols à Calcosols leptiques sur calcaires argilo-silteux à chailles. Sur les marnes (sondages n° 02 et 04), les sols sont épais (50 à 100 cm), fortement carbonatés, de texture limono-argileuse : ce sont des Calcosols sur marnes. Ils présentent les plus faibles valeurs de fer libre sur le versant, inférieures à 1,5 g/100 g. La couleur de la matrice est principalement brune (7,5YR ; 10YR). Les argiles sont majoritairement constituées d'inter-stratifiés illite-smectite (IS) (40-50 %), d'inter-stratifiés chlorite-vermiculite (20-25 %), d'illite (20 %) et de vermiculite (10 %). La distribution des minéraux argileux de ces sols est proche de la distribution minéralogique de la roche mère, à l'exception de la vermiculite et des inter-stratifiés chlorite-vermiculite qui ne sont pas présent dans la roche (Drouet, 1979).

Dans la partie médiane du versant, où la pente s'adoucit (5 à 10 °), l'épaisseur des sols varie peu, de l'ordre de 50 cm (sondages n° 05 à 07). La texture est argilo-sableuse. Les sols modérément carbonatés sont brun à brun-rougeâtre (5YR ; 7,5YR) et présentent de plus fortes teneurs en fer libre (2 à 3 %). Ce sont des Calcosols sur calcaires à chailles et calcaires bioclastiques. Sur les calcaires à chailles, le cortège minéralogique des argiles est constitué d'inter-stratifiés illite-smectite (40 %), d'illite (20-35 %), d'inter-stratifiés chlorite-vermiculite (15 %) et de vermiculite (10 à 20 %). Sur les calcaires bioclastiques, le cortège est principalement constitué d'inter-stratifiés illite-smectite (50-70 %), d'illite (25-35 %) et d'inter-stratifiés chlorite-vermiculite en plus faible quantité (10%). Les proportions entre l'illite-smectite et l'illite sont inversées par rapport au cortège de la roche-mère, témoignant d'une altération de l'illite en illite-smectite dans le sol (Javaux, 1992).

Numéro de sondage	Profondeur horizons cm	Type d'horizon	Granulométrie (%)					C _{org} g/100 g	C/N eau	pH	CaCO ₃ tot g/100 g	Fer libre g/100 g	Minéralogie des argiles (%)						
			A	LF	LG	SF	SG						C	CV	V	IS	I	K	
n°1	Calcosol argilo-limoneux sur alternances marno-calcaires																		
	0-5	LA ₁ ca						2.69	15.4	8.01	39	1.35	T	23	T	42	28	T	
	5-30	LA ₂ ca	21	23	17	16	24	0.28	3.0	8.36	57	1.37	T	27	9	41	21	T	
n°6	30-65	Sca	19	30	15	15	21	1.19	24.9	8.38	59	1.07	0	21	10	49	20	T	
	Calcosol argilo-sableux sur calcaires à chailles																		
	0-40	A	32	17	20	18	14	0.91	10.0	8.06	20	2.55	0	13	12	40	35	0	
n°7	40-65	S	32	19	21	17	11	0.77	11.0	8.12	18	2.12	T	17	19	38	22	T	
	Calcosol argilo-sableux sur calcaires bioclastiques																		
	0-45	A	38	17	19	17	10	0.80	10.1	8.07	16	3.35	0	11	0	52	35	T	
n°8	45-60	Sca	32	16	19	19	14	-	-	8.00	49	2.01	0	0	0	73	26	T	
	Calcosol argileux sur argiles à chailles																		
	0-10	LAci	41	20	18	15	6	1.65	13.5	7.97	3	4.31	T	0	12	47	35	T	
n°10	10-60	Sci	45	25	18	10	3	0.69	13.1	7.91	0	3.70	T	0	30	46	19	T	
	Calcosol argileux, rédoxique, pachique sur argiles à chailles																		
	0-35	Aci	35	23	23	13	5	1.26	14.1	7.66	0	2.63	T	0	0	58	36	T	
	35-60	S ₁ ci	56	15	17	9	3	0.44	10.7	7.55	0	3.60	T	0	0	79	17	T	
	60-120	S ₂ ci	45	14	23	16	3	0.13	8.5	7.51	0	2.57	T	0	0	83	13	T	
	120-180	Sci g	47	16	21	15	2	0.07	4.6	7.23	0	3.54	T	0	0	78	16	T	
n°13	180-205	Sci g/C	45	16	22	15	2	0.07	4.7	6.41	0	3.18	T	0	0	70	24	T	
	Calcosol argileux, rédoxique, pachique, décarbonaté en surface sur Marnes de Bresse																		
	0-30	LAci	36	19	25	14	5	0.81	11.0	8.04	2	1.99	T	0	0	75	19	T	
	30-70	Sca	49	19	15	7	10	0.00	-	8.23	23	5.82	T	0	0	92	T	T	
	70-110	S/C g k	48	18	14	6	14	0.00	-	8.29	24	4.29	T	0	0	85	10	T	
	110-155	Cca g	46	21	13	6	15	0.00	-	8.29	29	1.78	T	0	0	88	7	T	

Tableau 4-5 Caractéristiques physico-chimiques des différents types de sol rencontrés sur le versant d'Aloxe-Corton.

Dans la partie aval, marquée par un replat topographique (sondages n° 08 et 09), les sols sont moyennement épais (> 50 cm). La matrice à texture argileuse est de couleur brun-rougeâtre (5YR). Les sols sont décarbonatés et présentent les teneurs en fer libre les plus importantes du versant, de l'ordre de 4 %. Ce sont des Calcisols sur argiles à chailles. Les minéraux argileux sont représentés par les inter-stratifiés illite-smectite (50 %), l'illite (20-35 %), la vermiculite (10-30 %).

En contrebas, sur la zone de faible pente (de l'ordre de 5°) (sondages n° 10 et 11), les sols sont très épais (> 170 cm). La texture est argileuse, de couleur brun à brun foncé (7,5YR). Les sols sont décarbonatés sur l'ensemble des profils. L'horizon de surface (0-35 cm) est plus pauvre en argile et en fer libre que les horizons sous-jacents. Le pH basique étant constant sur l'ensemble du profil, ces différences ne peuvent résulter d'un processus de lessivage, nécessitant un milieu faiblement acide pour disperser les argiles et permettre leur migration dans le sol. Cet horizon de surface semble résulter d'un processus de colluvionnement. Ces sols présentent des taches d'oxydoréduction à partir d'un mètre de profondeur et des pellicules ferro-manganiques sur la face des agrégats dans les horizons les plus profonds. On les qualifiera de Calcisols pachiques, rédoxiques en profondeur, sur argiles à chailles. Le cortège minéralogique des argiles est principalement composé d'inter-stratifiés illite-smectite (60-80 %) et d'illite (15-35 %).

À l'aval, les pentes sont les plus faibles (0 à 5 °), les sols ont une texture argilo-sableuse en surface et argileuse en profondeur (sondages n° 12 et 13). L'horizon de surface présente un appauvrissement en argile et est décarbonaté. Cet horizon est probablement colluvial. La teneur en illite est nettement supérieure dans cet horizon (36 %) par rapport à ceux sous-jacents (13 à 17 %). Les sols sont modérément carbonatés en profondeur. La couleur de la matrice évolue du brun (7,5YR) en surface, au gris verdâtre et brun-jaunâtre (5Y, 10YR) en profondeur, marquée par des niveaux d'oxydoréduction. Ces sols présentent également de nombreuses précipitations de carbonates de calcium sous forme de nodules pulvérulents, dont la présence augmente vers l'aval du versant. Ces sols sont des Calcosols rédoxiques, pachiques, décarbonatés en surface, sur Marnes de Bresse. Le cortège argileux des sols est composé d'inter-stratifiés illite-smectite (75-90 %) et d'illite (10-20 %). Ces quantifications sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) dans le cadre d'études sur la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux du département du Jura (Le Roy et Méjean, 2009).

La distribution spatiale des sols sur le versant d'Aloxe-Corton est contrôlée par la lithologie et par la topographie, correspondant à un modèle de topolithoséquence.

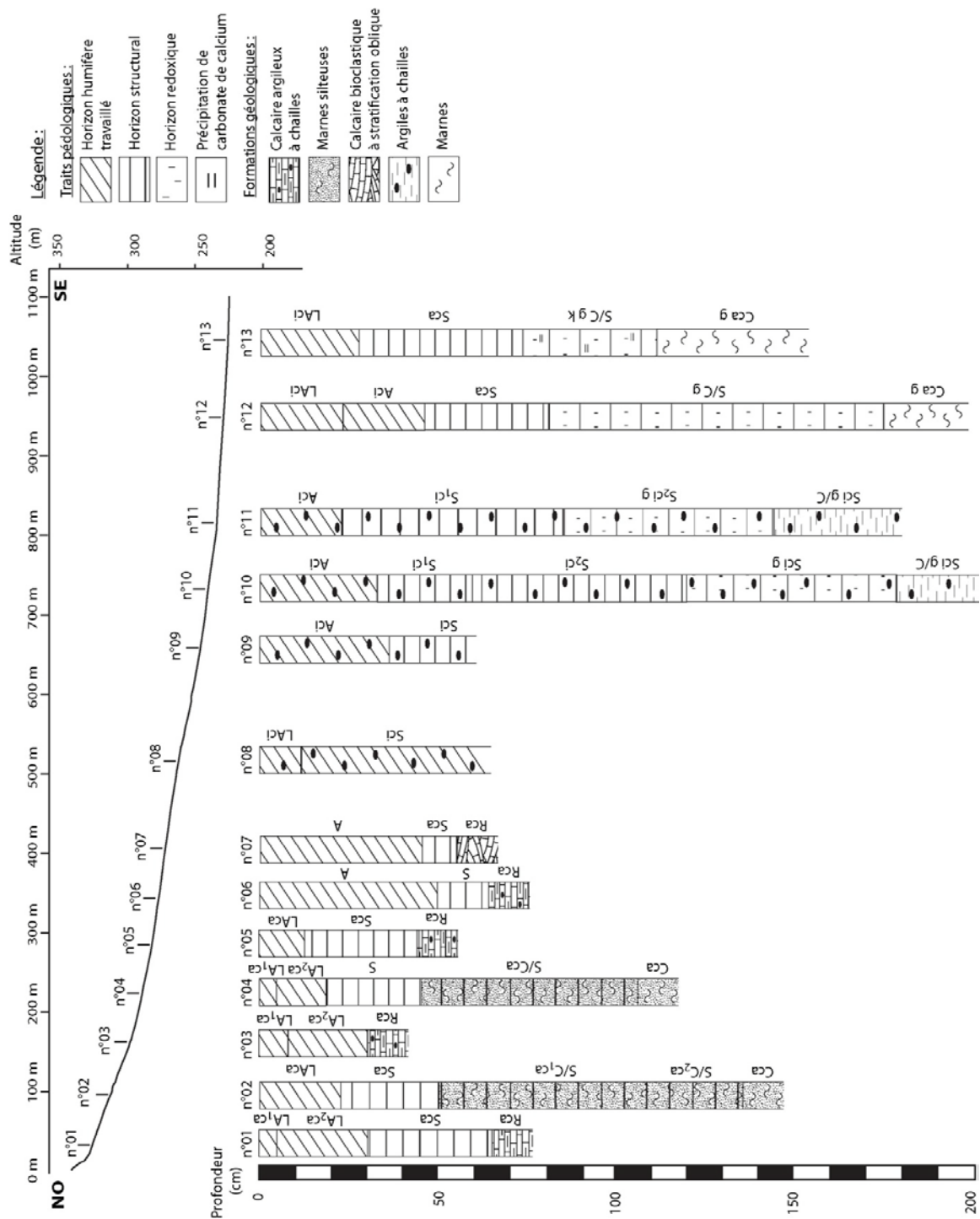


Figure 4.10 Schémas interprétatifs des sondages réalisés sur le versant d'Aloxe-Corton et localisation des sondages le long du profil topographique.

4.1.5 Cartographie des sols du versant d'Aloxe-Corton par la démarche interdisciplinaire

La mise en commun de l'ensemble des données acquises sur le versant d'Aloxe-Corton a conduit à la production d'une carte des sols du versant (Figure 4.11).

L'analyse d'images THRS a permis la création d'une carte des états de surface du sol du versant qui ont pu être caractérisés par rapport à leurs propriétés physico-chimiques et culturelles. La distribution spatiale des types de sols, réalisée par prospection pédestre, a été comparée à la distribution spatiale des EDS reconnus par imagerie afin d'établir des relations entre les EDS et les sols. Il a été observé que les Calcosols et les Calcosols leptiques argilo-limoneux formés sur substrat marno-calcaire, situés à l'amont du versant, sont localisés au niveau des EDS 1 et 2. Les Calcosols argilo-sableux formés sur substrat calcaire sont localisés au niveau des EDS 3 et 4. Les Calcisols argileux développés sur les argiles à chailles sont localisés au niveau des EDS 3 et 5 dans la partie médiane du versant. Enfin, les Calcisols rédoxiques pachiques et les Calcosols rédoxiques, pachiques, décarbonatés en surface, sont localisés au sein de l'EDS 5, dans la partie aval du versant.

La cartographie des EDS dans la partie aval du versant n'a pu différencier les deux types de sol. Les calcosols rédoxiques du bas de versant présentent un horizon de surface colluvial qui possède les mêmes caractéristiques radiométriques que les horizons de surface des Calcisols rédoxiques. Les variations de pierrosité entre ces deux types de sol n'ont pu être distinguées par imagerie THRS, car la couleur des chailles qui composent la pierrosité de surface est très proche de celle de la matrice. De même, la limite entre les Calcosols argilo-sableux et les Calcisols argileux, dans la partie médiane du versant, n'a pu être déterminée par imagerie THRS. Cette limite étant localisée au sein d'une même parcelle, il est possible que les pratiques culturales aient homogénéisé l'horizon de surface. La cartographie des EDS peut donc renseigner, en partie seulement, sur la distribution des types de sol.

La distribution spatiale des formations lithologiques sur le versant a été obtenue par tomographie électrique à haute résolution, couplée à des observations locales sur le terrain. La diversité des sols, observée à partir de sondages à la tarière sur le versant d'Aloxe-Corton, est contrôlée par les variations du substrat géologique. Ainsi, les différentes unités géologiques, reconnues à partir de l'ERT, ont été utilisées pour définir les limites des unités cartographiques de sols. De plus, le modèle numérique de terrain à haute résolution a permis de mettre en évidence les fines variations topographiques, correspondant à des variations lithologiques. Ces données ont pu être utilisées pour affiner la délimitation des sols.

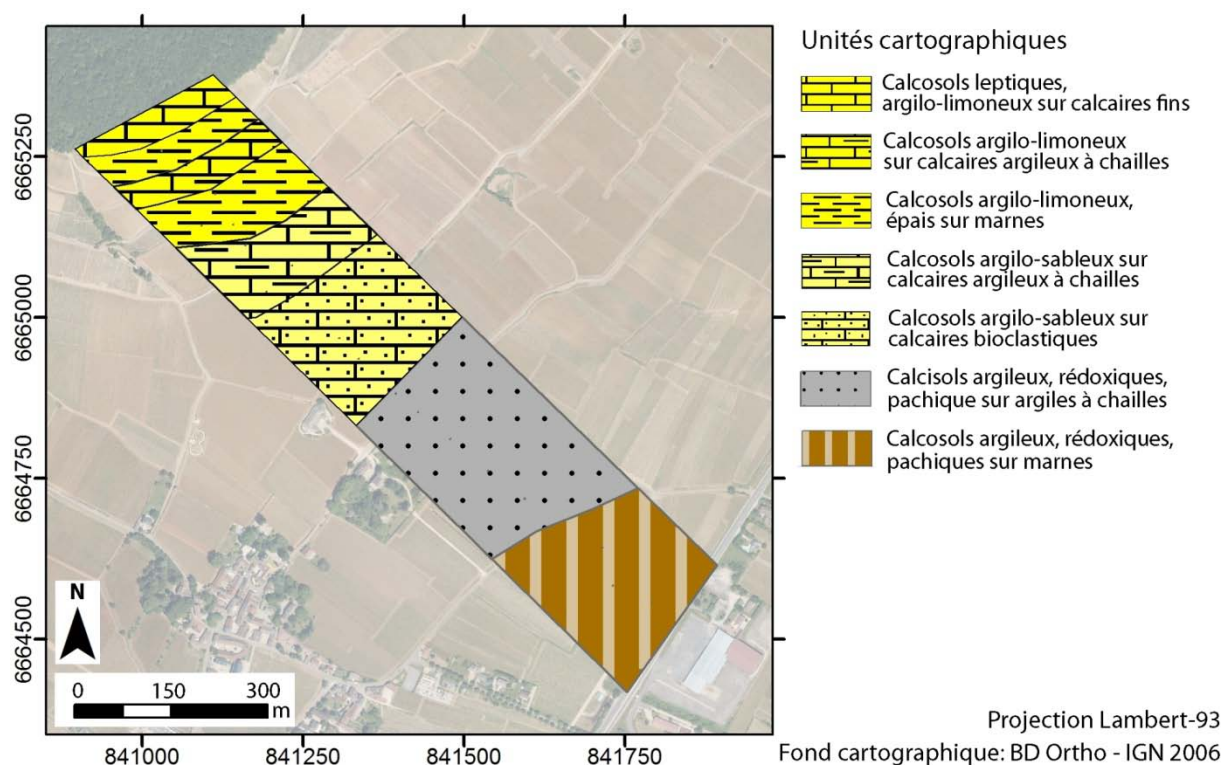


Figure 4.11. Carte pédologique du versant viticole d'Aloxe-Corton au 1/5 000, réalisée à partir de la démarche interdisciplinaire.

4.1.6 Cartographie des sols du versant d'Aloxe-Corton par la méthode ARP®

Contrairement à l'organigramme « idéal » de la démarche interdisciplinaire présentée dans le chapitre 3, nous n'avons pas pu réaliser la cartographie géophysique ARP® avant la campagne de sondages pédologiques pour délimiter les Unités Cartographiques de Sols. Nous pouvons alors utiliser cette cartographie géophysique pour valider les limites de nos unités cartographiques.

4.1.6.1 Acquisition des cartes de résistivité électrique

L'acquisition de cartes de résistivité électrique du sol a été réalisée au printemps 2012 sur plusieurs parcelles du versant viticole d'Aloxe-Corton, localisées sur le transect d'étude (Figure 4.12). La partie amont n'a pu être prospectée pour deux raisons : une absence d'autorisation du propriétaire et un problème technique lors de l'acquisition sur deux parcelles. Dans la partie aval, les vignes étant plantées parallèlement aux courbes de niveau, nous avons choisi de décaler l'acquisition dans une parcelle située à seulement 20 m du transect étudié (parcelle P5). Au total, cinq parcelles ont été cartographiées, représentant une superficie totale de 2,5 ha. Ces acquisitions ont été réalisées sur un total de 6 rangs pour chaque parcelle, avec un passage tous les 5 rangs, permettant d'obtenir une cartographie de la résistivité sur une largeur de 30 m. Elles ont été conduites le même jour pour

respecter des conditions climatiques identiques. Lors de l'acquisition, les sols étaient frais, la dernière précipitation ayant eu lieu une semaine auparavant. Les données ont été traitées parcelle par parcelle, les échelles de couleur des cartes de résistivité ont été harmonisées pour toutes les parcelles (Figure 4.13). Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour chaque parcelle à partir des trois cartes de résistivité, correspondant aux trois profondeurs d'investigation *i.e.* 0-50 cm, 0-100 cm et 0-200 cm. L'ACP permet de réduire les effets de multi-colinéarité (Priori *et al.*, 2013) et d'observer les variations intra-parcellaires qui ne sont pas forcément visibles sur les cartes, du fait de l'harmonisation des échelles de couleur pour l'ensemble des parcelles. Les sols ont été caractérisés par les sondages à la tarière, effectués lors de l'étude à l'échelle du versant et par des fosses pédologiques creusées au voisinage des parcelles.

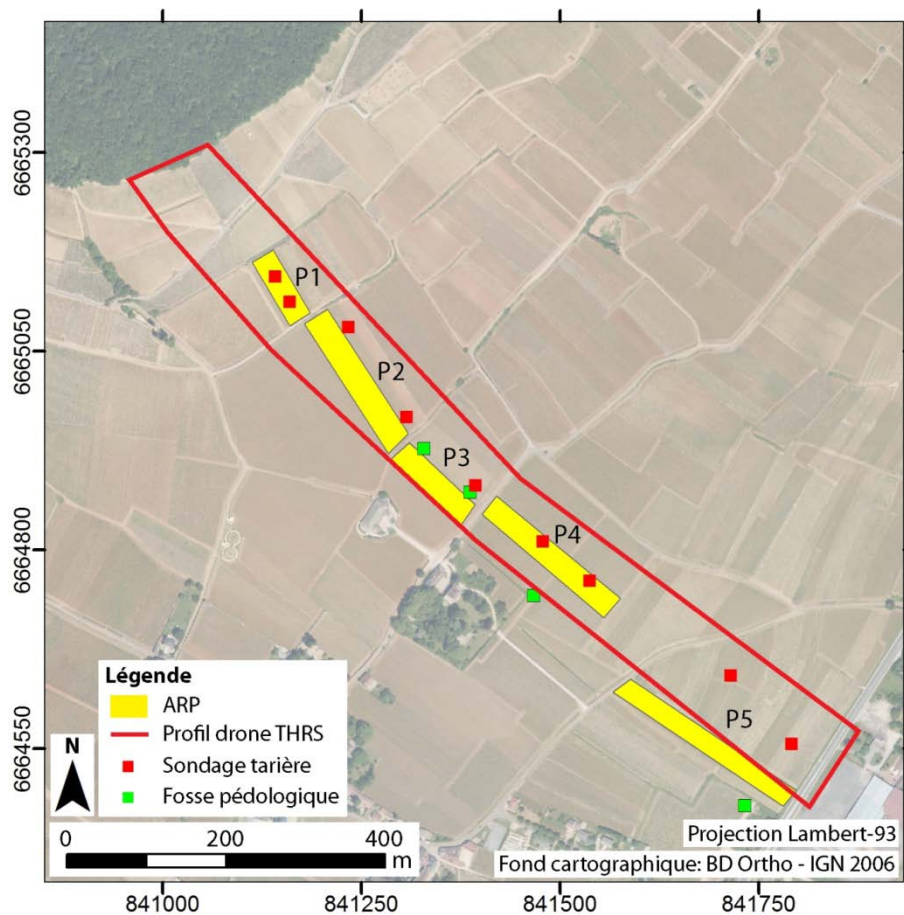


Figure 4.12 Localisation des cartes de résistivité électrique acquises par le système ARP sur le versant d'Aloxe-Corton.

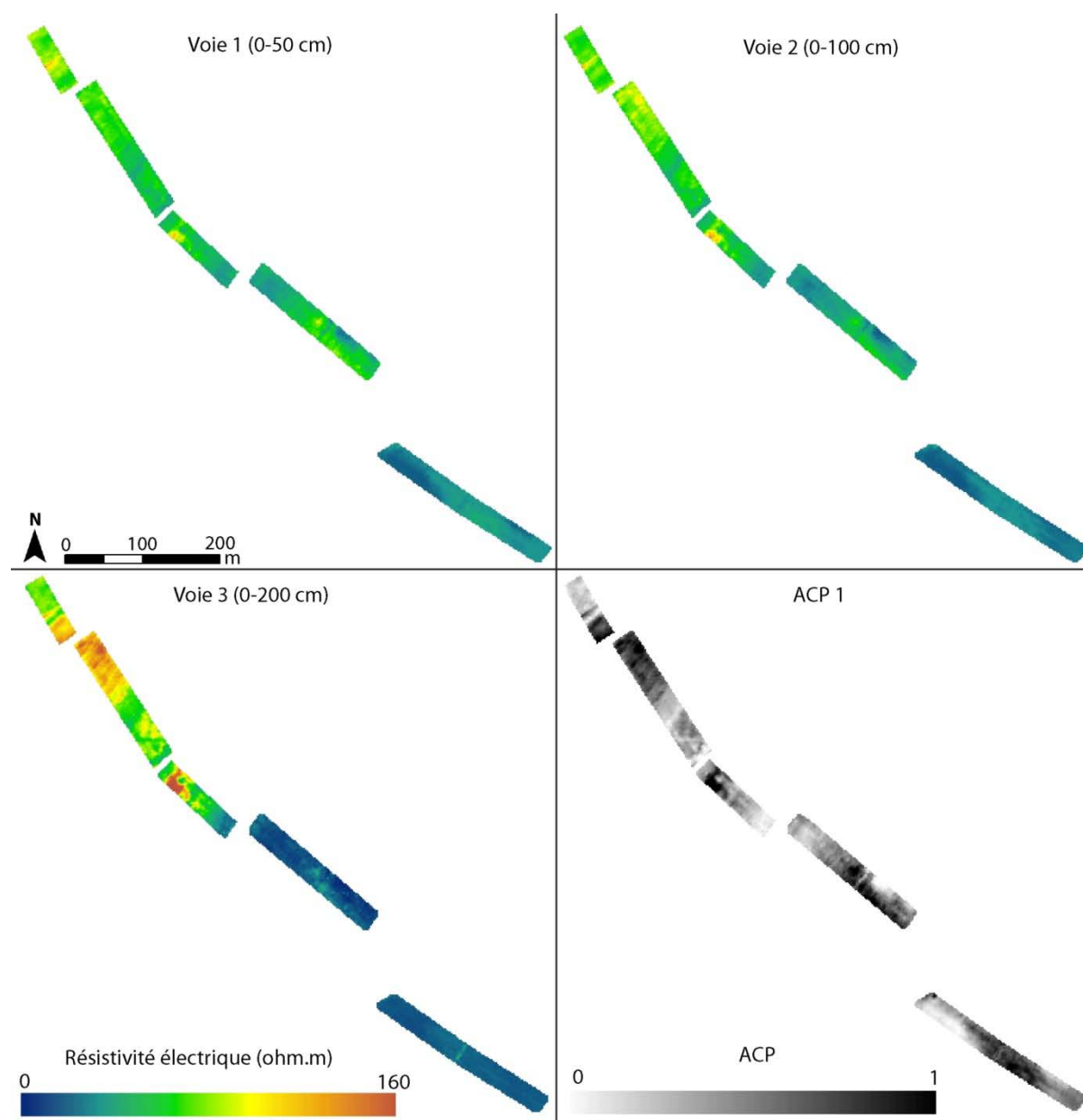


Figure 4.13 Cartes de résistivité électrique acquises sur le versant d'Aloxé-Corton. Les trois voies correspondent aux trois profondeurs d'investigation. La première composante de l'ACP est présentée pour chaque parcelle.

4.1.6.2 Variabilité lithologique et pédologique

Les parcelles P1 et P2, situées à l'amont du versant, présentent de fortes valeurs de résistivité sur les trois voies (Tableau 4-6). Pour la parcelle P1, les valeurs de résistivité augmentent sensiblement entre la voie 1 et la voie 2, ce qui peut s'expliquer par une charge en éléments grossiers importante en surface, de l'ordre de 40 à 60 %. Pour les deux parcelles, les valeurs de résistivité augmentent avec la profondeur et atteignent en moyenne 90 Ohm.m.

Parcelle	Résistivité (Ohm.m)											
	Voie 1 (0-50 cm)				Voie 2 (0-100 cm)				Voie 3 (0-200 cm)			
	min	max	moy	SD	min	max	moy	SD	min	max	moy	SD
P1	54	151	78	11	48	145	72	9	61	140	89	21
P2	31	90	60	11	36	104	68	14	41	161	94	26
P3	26	124	52	15	23	138	54	19	12	226	71	43
P4	17	107	50	14	14	71	38	11	9	45	19	5
P5	12	45	27	8	11	44	21	5	7	57	14	3

Tableau 4-6 Valeurs de résistivité minimales, maximales, moyennes et écart-type (SD) pour les cinq parcelles étudiées.

Sur la parcelle P1, la zone amont se caractérise par des valeurs de résistivité modérées, de l'ordre de 60 à 70 Ohm.m, alors que la partie aval se caractérise par de plus fortes valeurs, de l'ordre de 100 à 120 Ohm.m (Figure 4.14). La limite entre les deux zones est franche et parallèle aux courbes de niveau. Cette limite met en évidence un changement lithologique, correspondant à la formation des Marnes de Pernand à l'amont et à la formation des calcaires argileux à chailles à l'aval de la parcelle. Les sondages pédologiques réalisés au sein de ces deux zones mettent en évidence deux types de sol distincts. À l'amont, les sols sont des Calcosols épais, développés sur substrat marneux, alors qu'à l'aval de la parcelle, les sols sont des Calcosols leptiques, développés sur calcaires argileux à chailles.

Pour la parcelle P2, une distribution inverse est observée : la partie amont présente de fortes valeurs de résistivité, de l'ordre de 110 à 160 Ohm.m. Dans la partie aval de la parcelle, les valeurs sont plus faibles, de l'ordre de 50 à 100 Ohm.m (Figure 4.14). La limite entre ces deux zones est bien marquée et est située dans la partie médiane de la parcelle. Cette limite correspond à un changement lithologique, passant de calcaires argileux à chailles à l'amont à des calcaires bioclastiques à l'aval. Les deux sondages réalisés au sein de ces zones (sondages n°06 et 07) ont permis d'identifier une évolution du type de sol pour ces deux zones. Ces dernières présentent des Calcosols argilo-sableux épais (60 à 70 cm). Ces sols se différencient par leur teneur en carbonate de calcium, qui diminue d'amont en aval, pour les horizons structuraux. L'altération des calcaires argileux à chailles libère plus de carbonate de calcium que les calcaires bioclastiques.

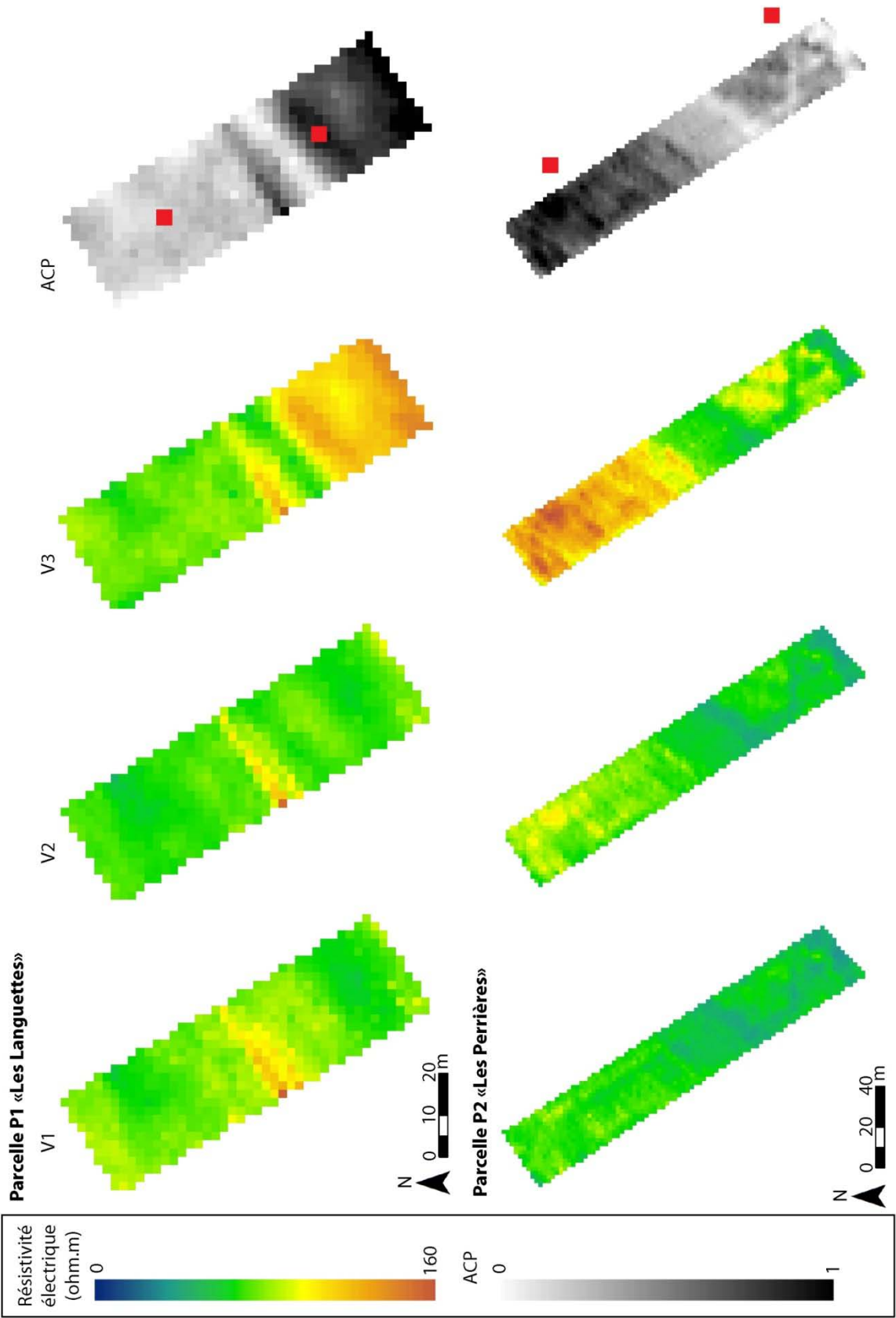


Figure 4.14 Cartes de résistivité électrique pour les parcelles situées aux lieux-dits « Les Languettes » et « Les Perrières ».

La parcelle P3, située dans la partie médiane du versant, présente des valeurs de résistivité moyenne plus faibles que les parcelles P1 et P2, de l'ordre de 50 Ohm.m pour les voies 1 (0-50 cm) et 2 (0-100 cm), et de l'ordre de 70 Ohm.m pour la voie la plus profonde (Tableau 4-6). À l'amont, les valeurs de résistivité sont modérées, de l'ordre de 50 à 70 Ohm.m ; une limite franche marquée par des fortes valeurs de résistivité, de l'ordre de 130 à 200 Ohm.m, met en évidence un changement lithologique (Figure 4.16). Dans la partie médiane de la parcelle, les valeurs diminuent et atteignent 50 à 80 Ohm.m. Enfin, dans la partie aval, les valeurs sont très faibles et ne dépassent pas 25 Ohm.m. Ces fortes variations de résistivité au sein de la parcelle mettent de nouveau en évidence plusieurs changements lithologiques. Au vu des observations faites sur le terrain et des informations fournies par le profil de résistivité électrique acquis sur le versant, une interprétation géologique de la parcelle peut être proposée. Les fortes valeurs de résistivité à l'amont correspondent à la formation des Calcaires de Dijon-Corton. La diminution des valeurs de résistivité dans la partie médiane de la parcelle serait corrélée avec la présence de la formation des Calcaires de Ladoix. Les deux secteurs sont probablement individualisés par un contact par faille, qui a été localisé sur le profil Syscal du versant. Enfin, le secteur présentant de faibles valeurs de résistivité à l'aval correspondrait à la formation des argiles à chailles qui se sont déposées sur la formation des Calcaires de Ladoix. Le sondage réalisé et les deux fosses pédologiques creusées en 2013 dans la parcelle voisine ont permis d'identifier des Calcosols sur calcaires bioclastiques à l'amont et des Calcisols sur argiles à chailles à l'aval (Figure 4.15).

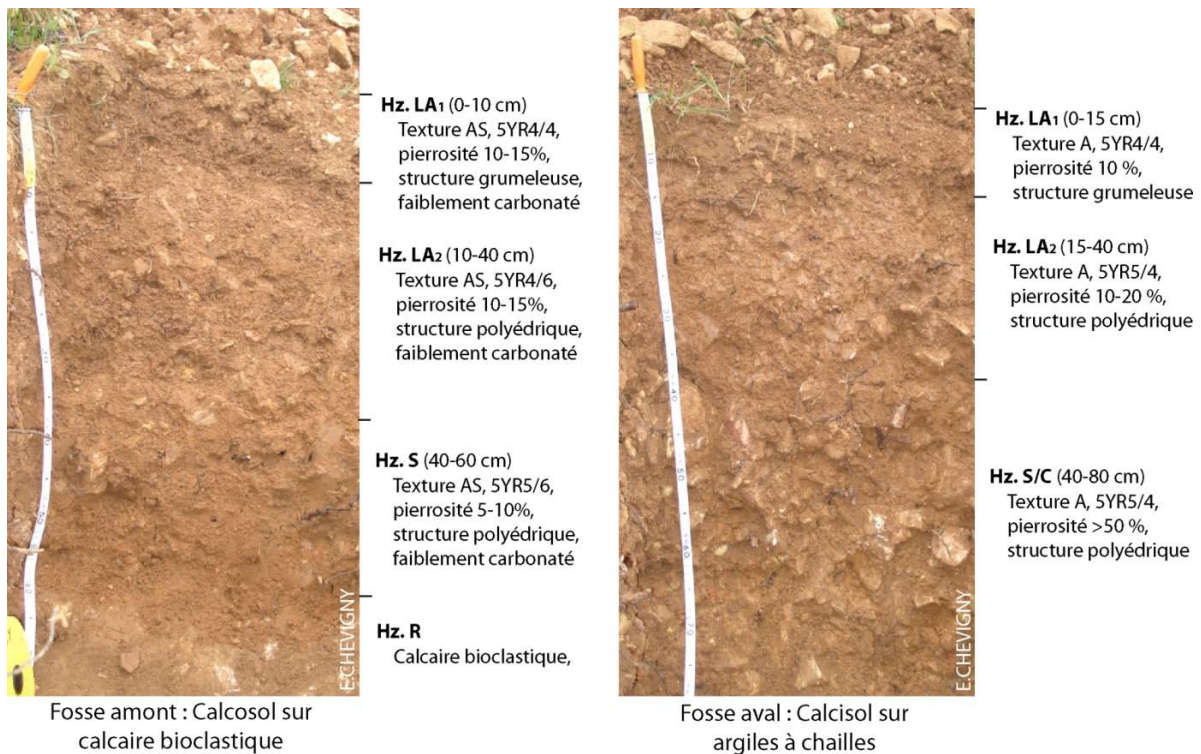


Figure 4.15 Fosses pédologiques situées au voisinage de la parcelle P3, au lieu-dit « Les Grèves ».

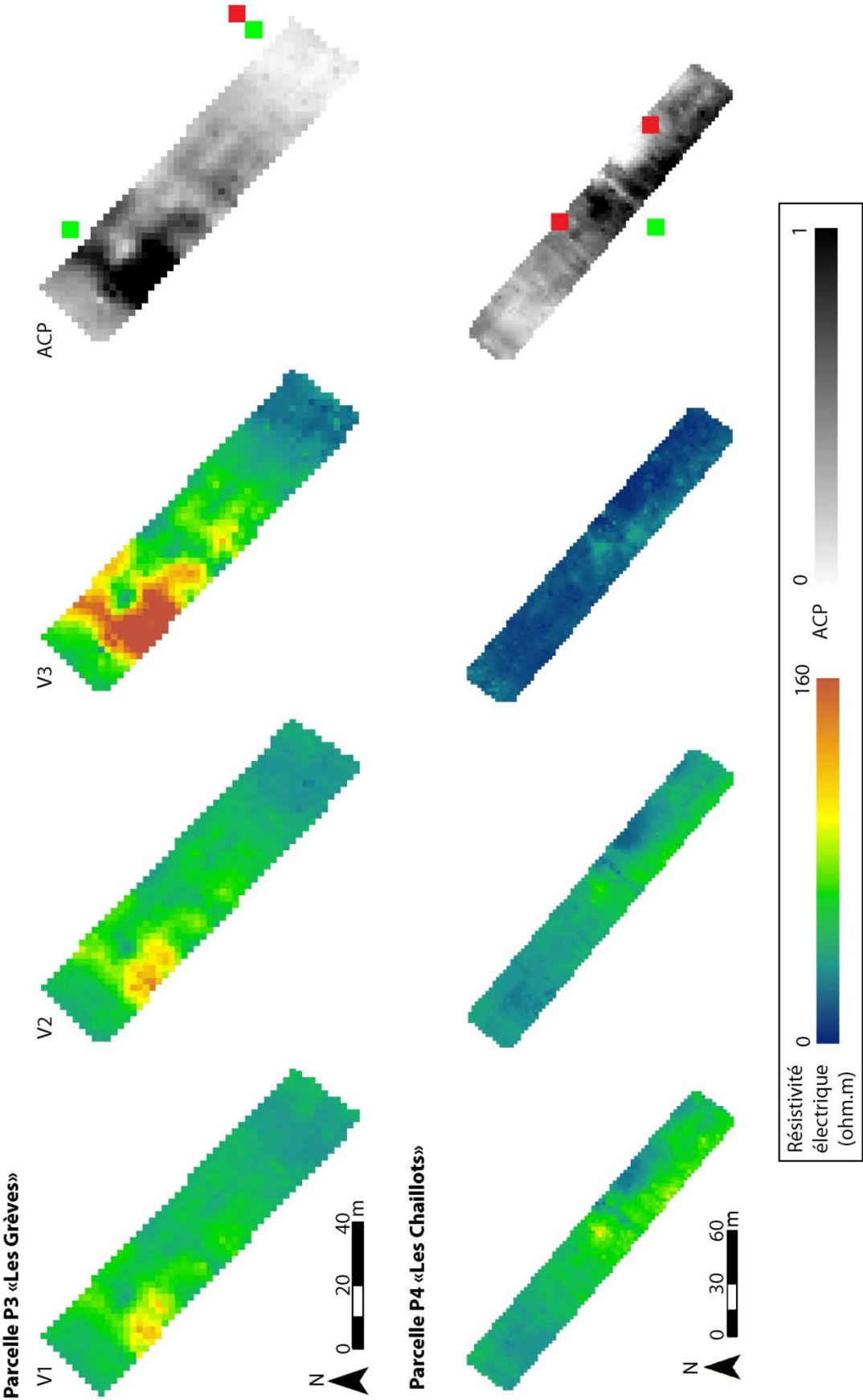


Figure 4.16 Cartes de résistivité électrique pour les parcelles situées aux lieux-dits « Les Grèves » et « Les Chaillots ».

Les parcelles P4 et P5, situées à l'aval du versant, présentent les valeurs de résistivité moyenne les plus faibles du versant, de l'ordre de 10 à 50 Ohm.m, pour toutes les profondeurs investiguées (Tableau 4-6). Ces valeurs diminuent de la surface vers la profondeur. Aucun motif particulier n'est observé sur les cartes de résistivité (Figure 4.16 ; Figure 4.17). Les plus fortes valeurs de résistivité, observées sur la voie 1 (0-50 cm) de la parcelle P4, peuvent s'expliquer par la présence d'un important pavage de surface constitué de chailles. Pour la parcelle P5, dont la pierrosité est nulle, les plus fortes valeurs de résistivité observées à la surface peuvent s'expliquer, soit par une humidité plus faible des horizons de surface, soit par une saturation en eau plus forte des horizons de profondeur hydromorphes. Les sols semblent donc être homogènes à l'échelle parcellaire. La parcelle P4 présente des Calcisols pachiques sur argiles à chailles, et la parcelle P5 des Calcosols pachiques, décarbonatés en surface, sur Marnes de Bresse.

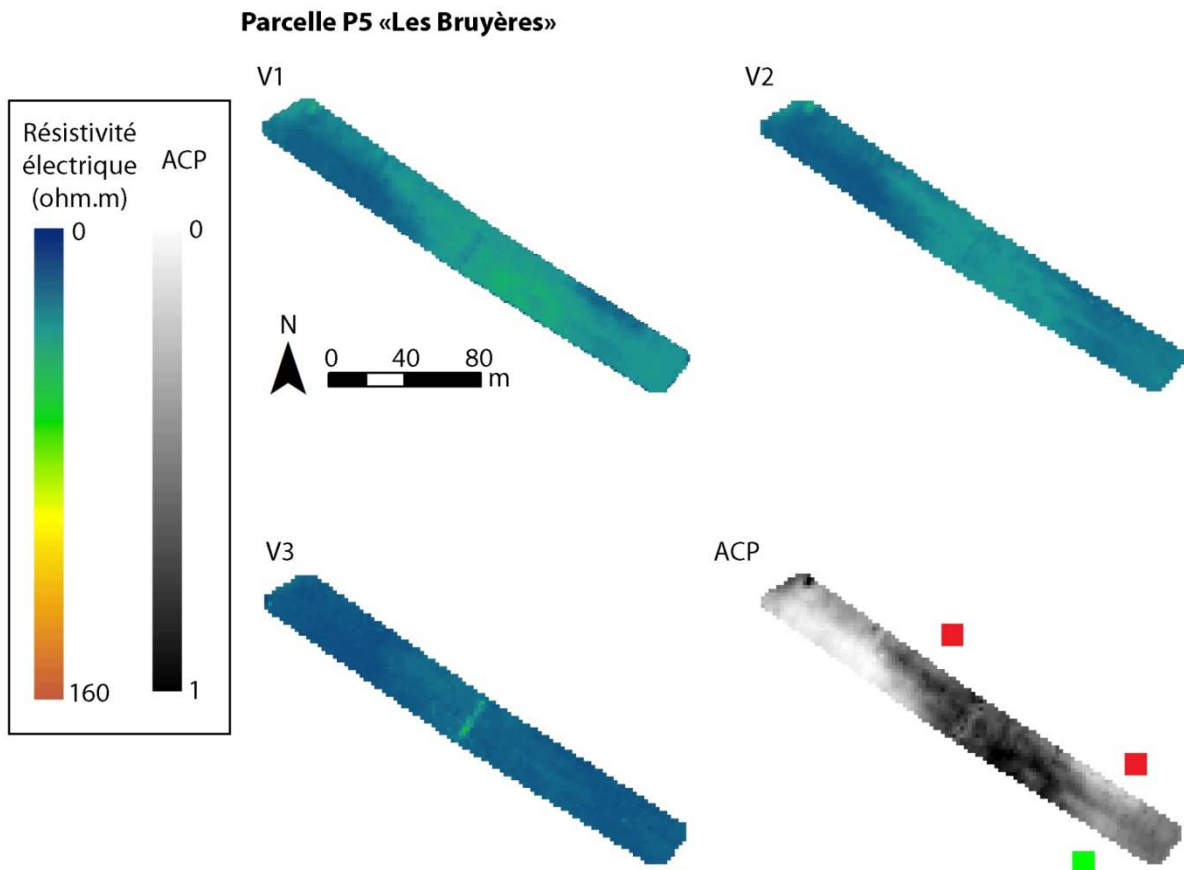


Figure 4.17 Cartes de résistivité électrique pour la parcelle située au lieu-dit « Les Bruyères ». Les valeurs de faible résistivité, homogènes sur l'ensemble de la parcelle, mettent en évidence une homogénéité du sol.

Ces prospections géophysiques illustrent l'influence de la lithologie sur la distribution spatiale des sols. Les variations lithologiques, et plus particulièrement les variations calcaires/marnes, jouent un rôle sur l'épaisseur du sol. Sur les calcaires, les sols vont être peu épais alors qu'ils vont être épais à très épais sur les marnes. Ces propriétés vont avoir une influence sur la réserve utile en eau des sols qui pourrait se répercuter sur la vigne. Les propriétés physico-chimiques du sol évoluent également en fonction du type de substrat sous-jacent. Par exemple, l'évolution des Calcosols en Calcisols se marque par le changement lithologique des calcaires bioclastiques en argiles à chailles. Ces propriétés particulières, observées à l'échelle locale, pourraient également avoir une influence sur le développement de la vigne.

Les cartes de résistivité, acquises sur le secteur d'Aloxe-Corton, ont été comparées à la carte pédologique au 1/5 000 obtenue en couplant la délimitation des unités géologiques par ERT, la cartographie des EDS, le MNT HR et les sondages pédologiques (Figure 4.18). Les limites de la carte de résistivité, pour la voie 3 (0-200 cm), qui permettent d'évaluer la profondeur des sols et de déterminer le type de substrat, sont bien corrélées avec les limites de la carte pédologique.

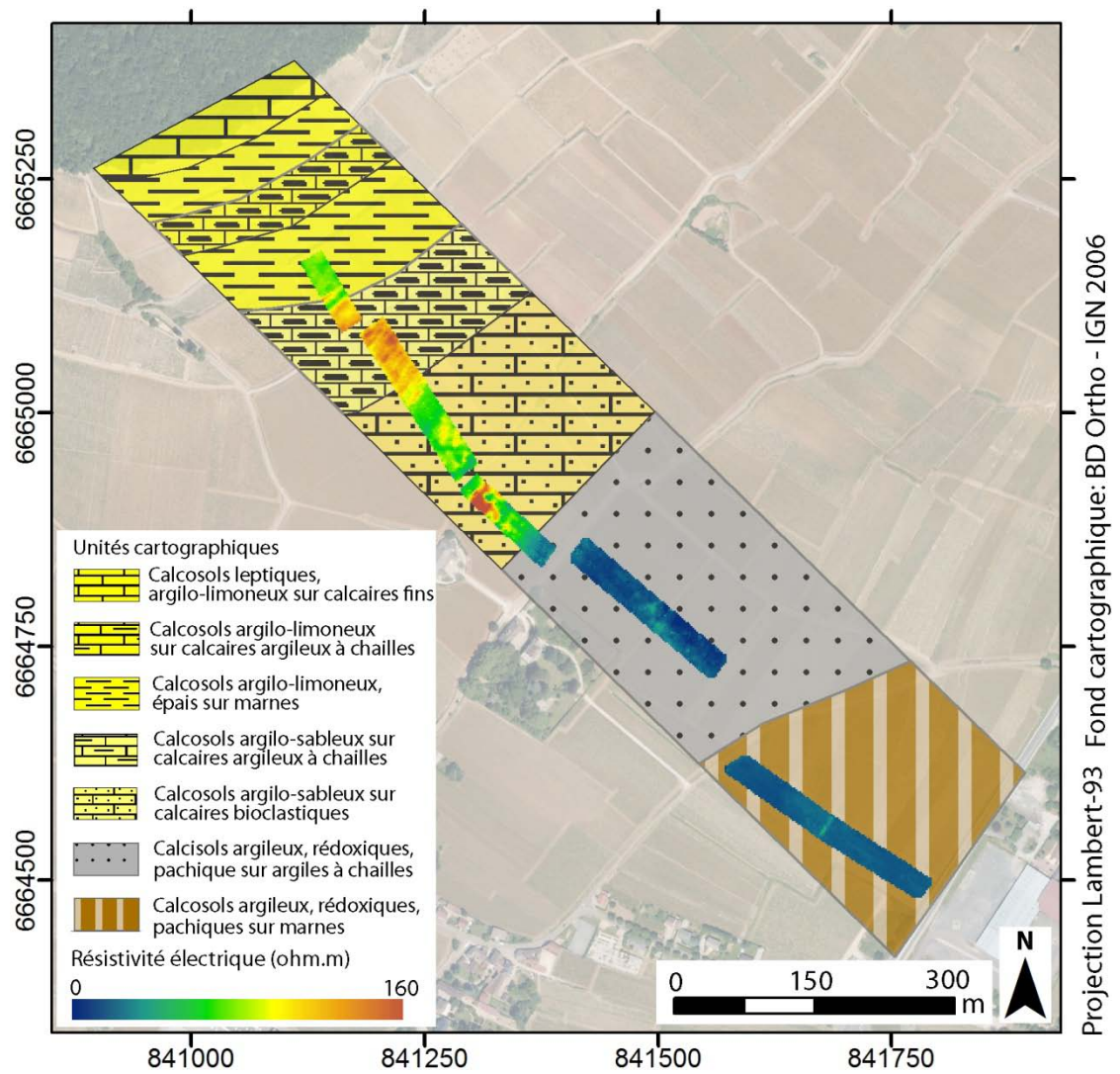


Figure 4.18 Carte de résistivité de la voie 3 (0-200 cm) drapée sur la carte pédologique du transect d'étude d'Aloxe, réalisée à partir de la démarche interdisciplinaire.

4.2 Article 1: (En préparation) Imagery data as a tool for soil mapping in vineyard hillslopes (Burgundy, France)

L'imagerie, un outil d'aide à la cartographie du sol en contexte viticole de versant (Bourgogne, France)

Résumé : La diversité des sols viticoles résulte des effets combinés de facteurs naturels et anthropiques. Le sol est un paramètre essentiel en viticulture. Sa diversité confère des aptitudes agronomiques particulières, qui influencent la production de la vigne et la qualité du raisin. De plus, les variations des propriétés physico-chimiques du sol contrôlent, en partie, la dégradation des sols causée par l'érosion. Cette étude évalue le potentiel de l'imagerie à haute résolution spatiale, pour déterminer la diversité et la distribution spatiale des sols, en contexte viticole de versant. Le site d'étude est localisé sur la commune de Couchey (nord de la Côte de Nuits, Bourgogne, France), où la diversité des formations géologiques est importante. Le substrat géologique a été caractérisé par tomographie électrique, à une résolution pluri-métrique. Des images à très haute résolution spatiale (THRS) ont été acquises pour déterminer et évaluer la distribution spatiale des états de surface du sol. Les fines variations topographiques ont été mises en évidence à partir de données LiDAR à une résolution spatiale de 50 cm. La combinaison de l'ensemble des données a permis de délimiter les unités cartographiques de sols et de produire la carte des sols du secteur au 1/5 000. Des relevés pédologiques ont été effectués pour caractériser les sols de chaque unité cartographique. Les résultats montrent que la diversité des sols sur le versant de Couchey est contrôlée par les variations du substrat géologique et de la topographie, selon le modèle de topolithoséquence. La tomographie électrique a permis d'identifier toutes les formations géologiques qui conduisent à diversifier les sols ; elle a également mis en évidence l'importante fracturation du substrat géologique sur ce versant. Les caractéristiques des états de surface renseignent sur le type de substrat géologique et peuvent être utilisées pour prédire la distribution spatiale des sols. La reconnaissance des types de sol par imagerie THRS est contrainte par la présence de pratiques culturelles particulières. Cette approche cartographique permet de définir les unités cartographiques de sols de façon plus précise que les méthodes conventionnelles.

Imagery data as a tool for soil mapping in vineyard hillslopes (Burgundy, France)

Abstract: Vineyard soils diversity results from the combined effects of natural and anthropogenic factors. The soil is an essential component in viticulture. Its diversity confers particular agronomic skills that influence directly the vine production and grape quality. In addition, changes in physico-chemical properties of soil partially control the degradation caused by erosion. The present study evaluates the ability of imagery data acquired at a high spatial resolution, to determine the soil diversity and the spatial distribution of soils in a vineyard hillslope context. The study area is located in Couchey (North of the Côte de Nuits, Burgundy, France), where geological formations present a high variability. The geological substratum has been characterised from electrical resistivity tomography (ERT) technique at a resolution of few metres. Very High Spatial Resolution (VHSR) images have been acquired to determine and evaluate the spatial distribution of the topsoil. The topographical variations have been calculated from LiDAR data at a 50 cm spatial resolution. All these data have been combined to delineate soil units and produce soil map at a 1:5 000 scale. Some soil sampling has been performed to characterise the soil parameters for each soil map unit. The results show that the soil diversity in the vineyard hillslope of Couchey is mainly controlled by the lithology and the topography, and responds to topolithosequence model. The ERT investigation allows identifying all the geological formations that lead to the soil diversification, and highlights a highly faulted area. The topsoil depends tightly to the substratum type and can be used to predict the spatial distribution of the soil units. The recognition of the soil type using VHSR image analysis is restricted by specific vineyard management practices. This approach permits to define soil units more precisely than other conventional methods.

Keywords: aerial images, topsoil, soil, lithology, electrical resistivity, topolithosequence.

1. Introduction

The soils in the vineyard present a high diversity due to the combination of several physical factors (climate, lithology, topography), biological factors (living organisms) and anthropogenic factors (vineyard management practices...), determining pedogenesis processes that lead to the soil differentiation throughout the time (Delmas, 1971). The soil diversity results in specific agronomic skills, which influence the wine growing and allows the production of wines of exquisite quality (Van Leeuwen et al., 1989; Morlat and Guilbault, 2001). This interaction between soil, vine and grape quality is mainly explained by both the water-storage capacity of the soil (Van Leeuwen and Vivin, 2008), which depends partially on the soil properties. Thus, analyses of the physico-chemical properties soil are fundamental to evaluate the wine growing potential of each terroir (White, 2003). It is necessary to define precisely soil type, at a high resolution, allowing to be determined. This precision level corresponds to the American Soil Series level of classification in the USDA soil taxonomy classification system hierarchy (National Cooperative Soil Survey, 1999). Soil series consist to group pedons presenting similar pedogenesis and physico-chemical properties. Thus, each soil map units, present specific agronomic skills due to physico-chemical variations. In addition, these physico-chemical properties could partially control the degradation caused by erosion.

Most of the high quality vineyards are located on hillslope areas, allowing favourable climatic conditions for wine growing. This specific morphological location causes high soil degradation which is mainly controlled in this context by combined effects of hydric erosion and anthropogenic factors (agricultural practices, earth supply) (Poesen and Lavee, 1994; Fox and Bryan, 2000; García-Ruiz, 2010; Chartin et al., 2013). Such vineyards are known to undergo substantial soil losses of several tons per hectare per year due to the hydric erosion occurring during intense rainfall events (Kosmas et al., 1997; Brenot et al., 2008; Novara et al., 2011). Hydric erosion modifies soil physical-chemical properties which reduces long-term soil productivity (Schumacher et al., 1999) and is responsible for a decreasing soil quality (Boardman, 2006), which can have economic impacts for the wine industry (Martínez-Casasnovas and Ramos, 2006). In a context of global climate change, where high rainfall events should be more frequent, it is necessary to better understand the soil to preserve from its degradation. The vineyard management practices evolved towards precision viticulture for a few years to optimize the wine growing while preserving the environment and decreasing the soil degradation risk (Boulanger-Fassier, 2008). However, precision viticulture, to be helpful, needs suitable knowledge of the soil diversity at a high spatial resolution. Many methods have been developed for mapping soil (Legros, 1996; McBratney et al., 2003). Among them, conventional soil mapping are based on field observations and laboratory analyses. Such mapping methods have been widely used until the 1990s. However, they are subjective, time consuming and expensive, especially for high scale mapping (Manchanda et al., 2002; Hengl et al., 2003). On the other hand, digital soil mapping (DSM), also referred to predictive soil mapping, involves the construction of spatial soil information from

using field and laboratory data that are coupled with spatial and non-spatial soil inference systems (Lagacherie, 2008). DSM tries to overcome some of the drawbacks of the conventional soil maps that are often only focused on delineating soil-classes e.g. soil types. These methods are using auxiliary data and are employed to predict the spatial distribution of the soil properties. They are increasingly used in viticulture because they permit to define precisely terroir units (Vaudour, 2003). Data could be derived from digital terrain analysis (McKenzie et al., 2000), or aerial remote sensing (Mulder et al., 2011) and/or geophysical prospection (Keary et al., 2002; Samouëlian et al., 2005). All these data are processed to furnish high spatial resolution maps of the topsoil, of the soil or of the geological substratum which can be used to delineate precise soil map units. The high spatial resolution of these data leads to well define the limits of map units. Moreover, data acquisition is performed in a very short time for a reasonable cost and is not destructive, allowing temporal monitoring of soil properties.

The aim of this paper is to show how the use of imagery data can be helpful for mapping soils in vineyard hillslope and to discuss the soil diversity in such context. For this purpose, we studied an area of 11 ha, 750 m long and 150 m wide, planted in vines, that is located in the Burgundian hillslope vineyard of Couchey (France). Three kinds of data have been acquired and used at a high spatial resolution to define soil map units. A geological cross-section has been realised from the interpretation of electrical resistivity tomography (ERT) acquired at a few metres scale resolution. Digital Terrain Model (DTM), acquired from LiDAR technology at a spatial resolution of 50 cm is available on this hillslope. Very High Spatial Resolution (VHSR) images, in the visible domain spectrum, have been used to map the topsoil surface characteristics, and to evaluate the potential link between the topsoil surface and the soil distribution. In complement to these data, auger holes have been dug to characterise the soil and its distribution. All these data, acquired at a very high spatial resolution, permitted to propose a model of the spatial organisation of the soil of the Couchey hillslope, and have been used to produce a soil map at a 1:5 000 scale.

2. Material and methods

2.1. Study area

The study area is located on the Couchey vineyard hillslope, in the northern part of the Côte de Nuits (Burgundy, France), where vines are planted in Marsannay AOC (Appellation d'Origine Contrôlée) (Fig. 1A). Study has been performed over an area covering the whole vineyard hillslope, with a length of 750 m and a width of 150 m (Fig. 1B). The study area extends from the surrounding wood (436 m m.s.l elevation) downslope to the "Grands Crus road" (341 m m.s.l elevation). The hillslope is characterised by a concave morphology, where slopes values vary from 1° downslope to 32° upslope (Fig. 1C). The landscape is characterised by a monoculture of the vine where the plot limits, *i.e.* paths, roads and walls form the only discontinuities and are highlighted by local variations in elevation and slope values.

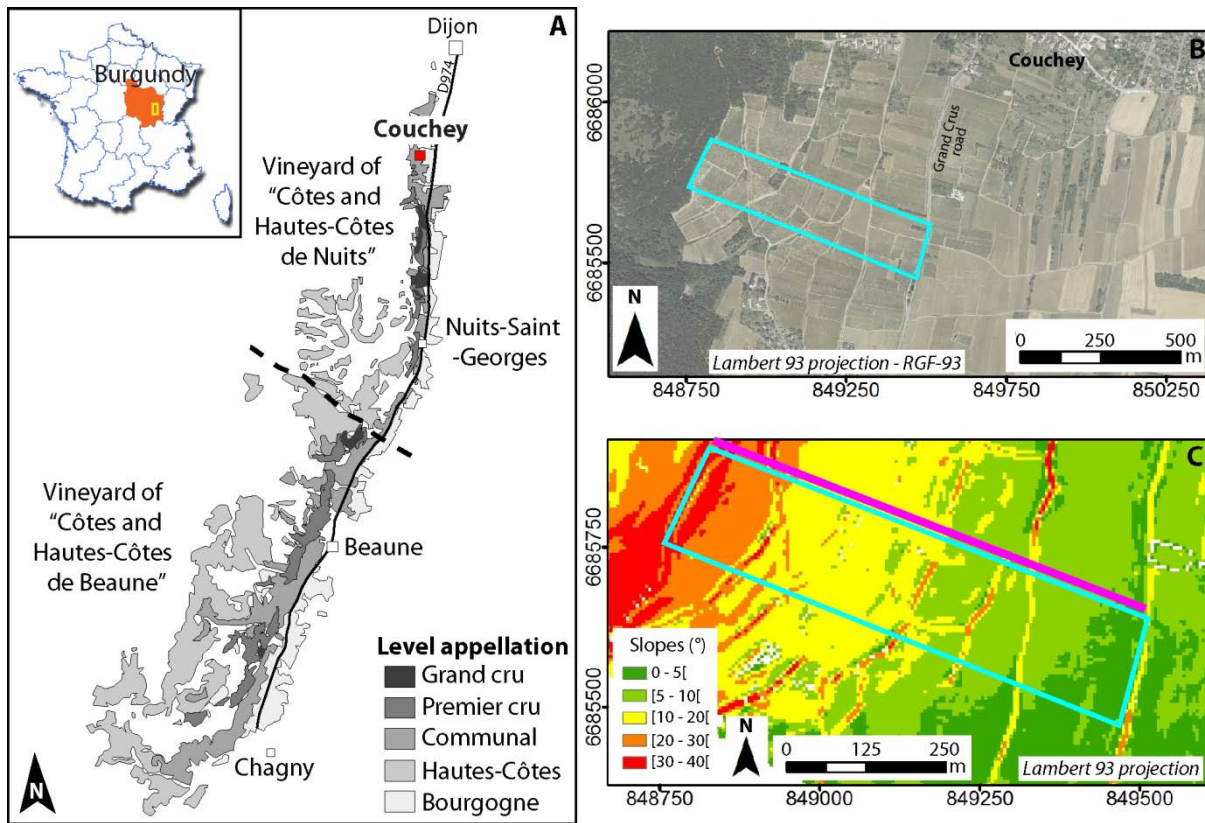


Fig. 1 Location maps of the Couchey hillslope (A) and of the study area, materialised by the blue rectangle (B). The map of the slopes for the study area has been calculated from the 5m resolution LiDAR DTM (C) (LiDAR data has been acquired by the pôle géomatique of Dijon MSH, 2009). The location of the ERT profile corresponds to the pink line.

The hillslope, shaped by the Bressan rifting, form the eastern border of the Burgundian plateau (Rémond, 1985). The vineyard is planted over limestone and marl formations deposited during the Early and Middle Jurassic times. Because Shale and limestone are predominant in the Burgundian vineyard, the geological diversity of the Côte de Nuits is less controlled by lithology, than the various sedimentary facies within the lithological formations. In this area we can observe different kinds of limestones (muddy limestone, oolitic, bioclastic, shaly) and marls (clayey marls, silty and sandy marls) and several surface deposits ("grèzes litées", alluvial fans, alluvial deposits). These geological formations present specific physico-chemical properties and several alteration levels which influence the soil formation. The spatial distribution of these formations can be observed at a scale of a few decametres to hectometres, resulting from a very dense network of faults in the study area, as shown in the works performed by Vannier-Petit et al. (2011).

2.2. Geophysical substratum characterisation

The characterisation of the substratum distribution along the hillslope has been performed from the unpublished results of a geophysical investigation realised in 2004 by C.Camerlynck and

F.Rémond (Sisyphé 7619 Unit Research, University Pierre et Marie Curie, Paris 1). The acquisition was based on the measurement of the electrical resistivity of the substratum using electrical resistivity tomography technology (ERT). ERT allows to determine the spatial distribution of the lithological formations (horizontal structure) in a faulted context (vertical structure) (Barker, 1989). The resistivity values depend on the nature of the substratum, allowing the discrimination of geological formations (Palacky, 1988). Data have been acquired with a resistivimetre Syscal Pro (Iris Instruments©), using 96 electrodes, in a pole-dipole array, with a spacing of 4m between two electrodes. Three profiles have been performed, using the roll-along technique, so that the entire hillslope is covered (Loke, 2013). The merged profile presents a length of 756m and an investigation depth of 60m. To avoid the dissymmetry of the pole-dipole array, inverse pole-dipole arrays have been acquired for each profile. The pole-dipole array and its inverse have been merged and averaged in order to produce a "Schlumberger" array. The elevation of each electrode has been measured with a differential GPS to take into account topographical data during the inversion model calculation. Prosys II software (IRIS Instruments©) has been used to filter raw data (delete bad values), to merge profiles, to insert topography and to export the data. Apparent resistivity data have been inverted with the Res2dinv software (IRIS Instruments©), based on the smoothness-constrained least-squares method inversion: inversion model follows iteration process until the model converges. The 2D profile has been exported to Surfer software (Golden Software) to define the resistivity scale colour and to homogenise vertical and horizontal scales. After the electrical lithology formations calibration with the help of the outcrops locally distributed along the profile, the 2D profile has been interpreted.

2.3. Remote sensing of the topsoil characteristics

2.3.1. VHRS images acquisition

The topsoil mapping has been performed from Very High Spatial Resolution (VHRS) images acquisition in the visible spectrum domain. The VHRS resolution has been chosen to delete the elements of the image which do not characterised the soil, and to determine the different elements that make up the topsoil surface. The VHRS images have been acquired with the unmanned helicopter DRELIO (Universities of Lyon 1 and Western Brittany, France) (Delacourt et al., 2009), in spring 2009, to avoid as much as possible the leaf and plant cover. During this period, solar inclination is acceptable because the shadows are reduced compared to the winter acquisitions (Steinberg, 2002). The thermal unmanned helicopter DRELIO was equipped with a reflex digital camera, Nikon D700, with a 35 mm equivalent focal lens, an automatic piloting system and an onboard GPS giving the geographic location during the flight. The constant flight altitude was fixed at 80m, and is stabilised by DRELIO during the flight from a DEM initially loaded, at a 25 m resolution. A fly plan is initially loaded in DRELIO, from the Visionair© software, allowing an automatic acquisition, that has been performed at a 10 km.h⁻¹ constant rate, with an automatic shooting every two seconds, giving a recovery of 50% between two photos.

2.3.2. VHSR images pre-treatment and classification

The images have been saved in a 12-bit raw mode to preserve the maximum of radiance information. Images acquired have been mosaicked for each plot, with the MicMac software (open source software IGN), to produce orthophotograph. These one have been projected in the Lambert 93 geographical system (NGF-93 France). For each plot, orthophotograph, image segmentation processing has been performed on the red band to delete the elements which do not characterise the soil surface, as vine stocks, their shadows, and a part of the vegetation (dark vegetation). The mask performed in the 0-130 DN (Digital Numbers) red band interval has been applied on all the bands of the orthophotograph. Road and paths have been deleted manually. VHSR orthophotographs present a resolution of 10cm all over the study area.

Different image classifications have been used in a remote sensing study, e.g. supervised and unsupervised classification, with specific algorithms (Schowengerdt, 2006). Our choice has been focused on unsupervised classification using the Isodata algorithm. This algorithm uses an iterative statistical approach to cluster pixels into homogeneous areas of similar characteristics (e.g. into classes), without any *a priori* knowledge of their spatial distribution (Ball and Hall, 1965). The user defines a minimum and a maximum number of possible classes. The pixels are affected to a given class using a minimum Euclidian distance technique by an iterative computation. The result is independent of the interpretation of the image by the user. In the study site, we merely set between two and ten the number of the soil classes. This implies that more than two different radiance values should be identified, which is justified by the presence of light-colored limestone and dark soil matrix. An important number of classes leads to high heterogeneity at a very local scale, thus only ten classes have been used. The very high spatial resolution allows distinguishing the presence of vegetation over the topsoil. Some classes defined by image analysis correspond especially to dark vegetation and have been deleted (Fig. 2A, B). For several plots, two classes were distributed in alternation parallel to row direction. This spatial distribution highlights row and inter-row locations. In this case, the two classes are merged into one single class (Fig. 2C, D). Finally, a majority filter, with kernel size of 9x9 (around one square-metre) has been applied on the classification, reducing the topsoil variability, observed at an infra-metric scale to row scale.

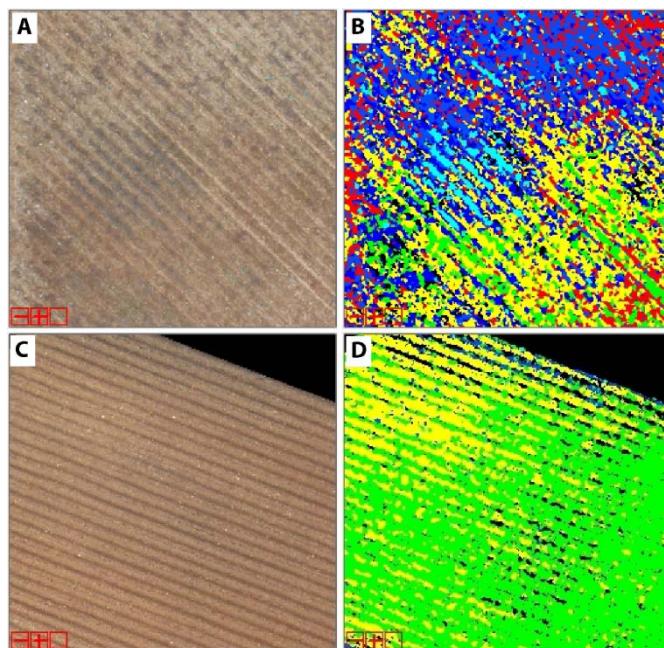


Fig. 2 VHSR images (A) highlighting area with bushy vegetation around vine stock, this vegetation is classified in cyan colour (B). The topsoil of the plot managed by hilling practices (C) is classified into two classes (D) corresponding of the location of row and inter-row.

2.4. Topsoil and soil characterisation

To characterise the topsoil classes, defined from imagery, topsoil sampling was performed over the study area. The topsoil sampling locations have been chosen within the spatial distribution of classes. The number of samples for each class is proportional to the surface covered by the class. Samples have been collected in the 0-5 cm soil layer, in vine inter-row to row, over a surface of 0.25 m². Several properties have been characterised on the field: stoniness has been estimated by weighing and sieving on undispersed material using dryness agitation, soil matrix colour has been determined with Munsell soil colour chart, and vineyard management practices have been defined for each plot. A sub-sampling of one litre has been performed on the < 2 cm fraction to analyse the physico-chemical properties in laboratory. After a 2 mm sieving, allowing the gravel content quantification, several properties have been analysed, as the total calcium carbonate content (NF ISO 10693), the organic carbon content (NF ISO 10694), the total nitrogen content (NF ISO 13878), and the soil colour (spectrophotometre Techkon, SpectroDens advanced) (Torrent and Barrón, 1993).

According to the topsoil classes, the geological substratum distribution and the morphological parameters, the soil description has been performed from auger holes characterisation, according to the French Referential (Baize and Girard, 2008). Some properties were described on the field, and samples were collected to characterized physico-chemical properties for each type of recognised soil. Topsoil samples analyses were performed on auger holes samples, and completed with pH determination (NF ISO 10390) and free iron content quantification (Mehra and Jackson, 1958).

3. Results

3.1. *Geological distribution*

The ERT profile acquired on the Couchey hillslope allows distinguishing the geological formations distribution and the location of faults at a spatial resolution of only few metres (Fig. 3). Along the hillslope, four main compartments have been identified. Upslope, the compartment I (C I) exhibits low resistivity values (lower than 50 Ohm.m) and was characterised by the presence of surface deposits, made up of numerous calcareous clasts (gravel size), called “Grèzes litées”. The compartment II (C II) located just downslope is characterised by moderate to very high resistivity values, ranging from 100 to 1000 Ohm.m. These values are consistent with limestone resistivity values according to Palacky (1988) observation. The high amplitude in resistivity values in this compartment implies that it is made up of several types of limestones. In this area, the “Calcaires de Comblanchien” formation is locally outcropping, and led to identify the underlying formations. The “Calcaires de Comblanchien” is a muddy limestone, with a light-grey to white colour, highly resistant to weathering. Midslope, the compartment III (C III) shows the lowest resistivity values, ranging from 50 to 400 Ohm.m. These values are respectively consistent with marl and limestone. For the highest resistivity values, an outcrop of bioclastic limestone has been observed, corresponding to the formation. The “Calcaires à Entroques” is a grainstone containing numerous crinoidal debris, with an ocre colour. Formations of this compartment present huge thickness variations, highlighting the presence of several faults. Downslope, the compartment IV (C IV) exhibits very low resistivity values (lower than 25 Ohm.m) that are homogenous all along the depth of the profile. An outcrop let to identify a silty marl formation, with a yellow to grey colour. The ERT acquisition allows evidencing several kind of geological formations that are also constrained by their sedimentary facies.

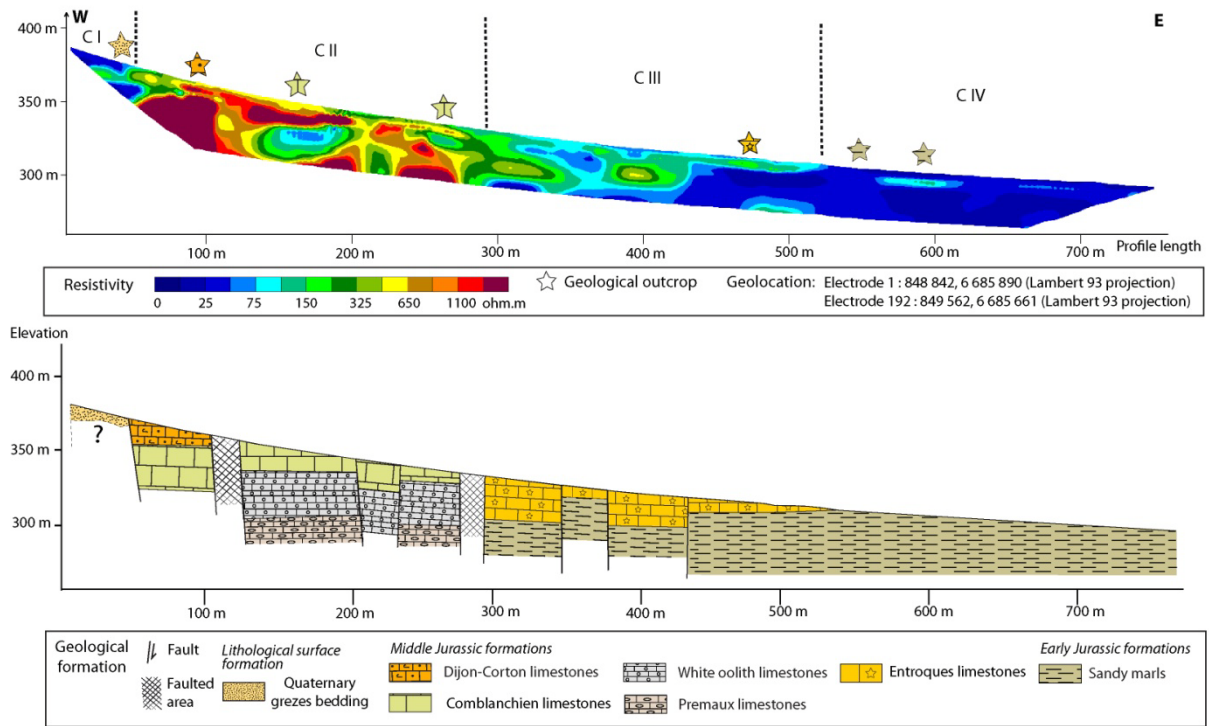


Fig. 3 ERT profile acquired along the hillslope (A) and geological cross-section interpretation (B).

3.2. Topsoil mapping

The Isodata classification performed on the VSHR orthophotograph of the Couchey hillslope (Fig. 4A & B), characterises the area with 10 classes, after four iterations. Three of them that highlighted the presence of vegetation and covered 5% of the study area have been deleted. Some classes show a specific spatial distribution into the plots, corresponding to the row and inter-row location. The distinction between the two areas is linked to differential roughness of the topsoil, due to agricultural engine compaction in the inter-row. The influence on reflectance of row inter-row in the vineyard has already been already observed in other studies (Corbane, 2006). To reduce the topsoil heterogeneity, these classes were merged; the 7 classes were reduced to 4 classes, presenting a specific spatial distribution along the hillslope.

The spatial distribution of the classes determined by image analyses evolves along the hillslope (Fig. 4B). The red class is only located upslope and covers 26% of the study area. The green class is located midslope and is observed in some plots upslope, covering 25% of the surface. Downslope, two classes have been observed, the yellow corresponding to 17% of the area and the blue class covering 32% of the study area. The blue one is also observed in the upslope plot.

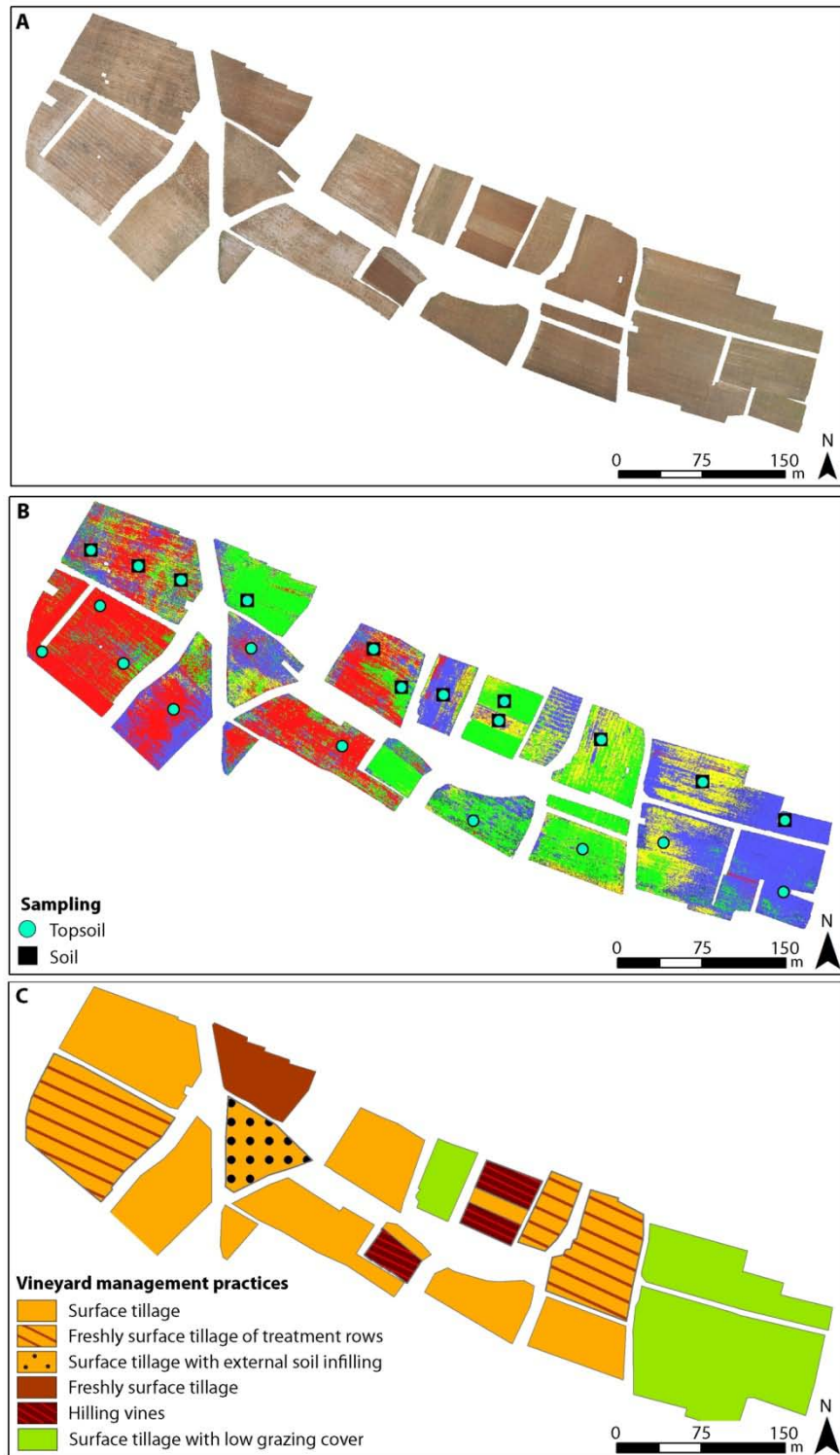


Fig. 4 VHSR orthophograph (A) used to perform the Isodata classification (B). Topsoil and soil samples are presented as cyan round and black square. The map of vineyard management practices has been recorded just after the VHSR images acquisition (C).

Some topsoil samples have been collected for each class to characterise its physico-chemical properties (Fig. 4B). A principal component analysis (PCA) was performed over all data, to evaluate if topsoil samples could be grouped from their physico-chemical properties (Fig 5.). So the class colour

corresponding to an image classification has been added for each sample in the PCA illustration. The two first axes represent more than 65% of the total inertia of the system. Axe 1 is well correlated to the stoniness, the organic carbon content, the total nitrogen content, the total carbonate content and the lightness (L^*) (Table 1). Axe 2 is correlated to the C/N ratio and to the colour opponent dimensions (a^* and b^*). Samples corresponding to the image classification occupy different spaces on the F1-F2 factorial plan, several groups can be observed (Fig 5.B). This highlights that the topsoil classes defined by imagery analyses present their own physico-chemical characteristics. The red class is characterised by the highest stoniness, total carbonate, total nitrogen content and carbon organic content. The green class exhibits the lowest values of previously mentioned characteristics. The blue and yellow classes are located on the same space of the factorial plan. Samples of these classes show a very low stoniness content and a high lightness (L^*). The yellow class is spatially distributed along the hillslope between the green and the blue classes, and have got the same characteristics than the blue one.

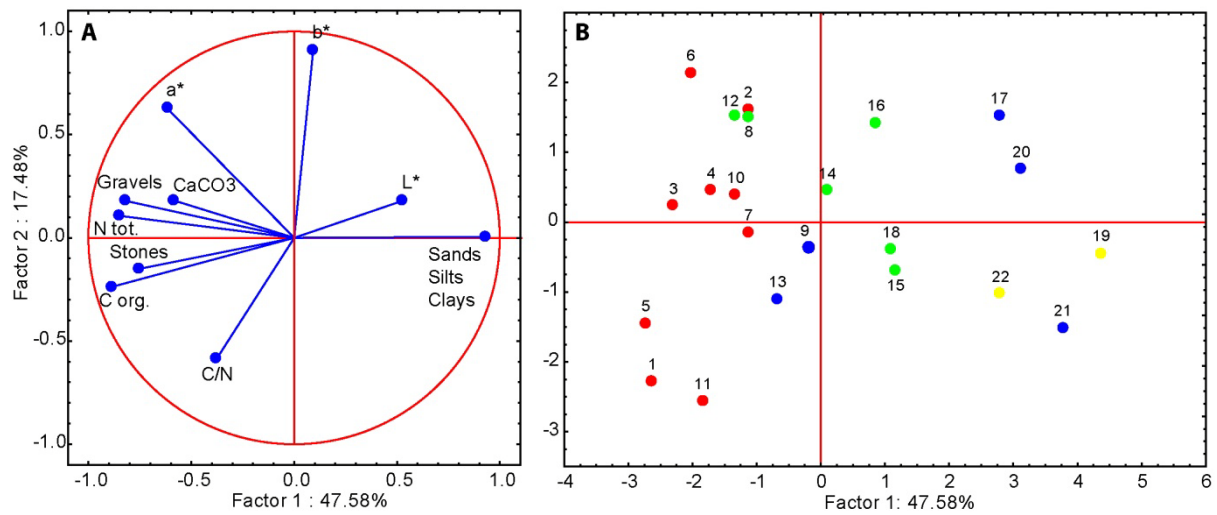


Fig. 5 Projection of variables (A) and samples (B) on the factor plan F1-F2 of the PCA performed over physico-chemical characteristics for each soil sample.

	Gravels	Stones	Sands silts clays	Organic carbon	Total Nitrogen	C/N ratio	Total carbonate	L^*	a^*	b^*
Factor 1	-0.82	-0.75	0.93	-0.89	-0.85	-0.38	-0.58	0.53	-0.62	0.09
Factor 2	0.18	-0.15	0.00	-0.24	0.11	-0.59	0.18	0.18	0.63	0.91

Table 1 Correlation matrix between PCA factors and physico-chemical characteristics

Some samples occupied the same space in the factorial plan, while they belong to different classes from image classification. These samples highlight specific vineyard management practices (Fig. 4C). These practices modify the topsoil in several ways. Sample n°8 (green class) is located in a

freshly ploughed plot, just before acquisition; thereby stoniness is partly hidden by the soil matrix. Sample n°13 (blue colour) has been collected in a grazing plot, where the grass cover prevents the stoniness and the matrix colour determination by image analyses. Sample n°9 (blue colour) highlights the soil infilling performed for the plot with earth brings coming from the plain, and that developed over an alluvial formation (rounded pebbles). These observations show that the vineyard management practices influence clearly the topsoil recognition, and that the physico-chemical properties can be masked by specific vineyard management practices. These observations are consistent with other study, which show that in a ploughed soil, the roughness is higher than for a no tillage soil, leading to decrease the reflectance, due to furrow shadows (Courault, 1989).

All these data led to characterise the main properties of each topsoil class defined by imagery. The red class highlights the high topsoil stoniness cover. The green class characterises the reddish topsoil matrix. The yellow class indentified brownish topsoil matrix. And the blue colour corresponds to some vegetation covering the topsoil and to a brownish topsoil matrix with a low vegetation cover. Moreover, independently of management practices, all these data highlight a spatial distribution of physico-chemical properties of the topsoil along the hillslope. Upslope, high stoniness cover with high calcareous reddish soil matrix characterises the topsoil. Midslope, stone cover decreases for calcareous reddish soil matrix which predominates. Downslope, stoniness is quite null and the brownish soil matrix exhibits low to null total calcium carbonate content. The spatial organisation of the topsoil characteristics highlights the geological substratum variations along the hillslope.

3.3. Link between topsoil and soil

The soil distribution is determined from twelve auger holes dug along the hillslope (Fig. 4B). The soil description is presented as a conceptual diagram, showing soil horizon distribution and substratum according to the topographic location along the hillslope (Fig. 6). Physico-chemical properties of each soil type are synthesised in the Table 2. As for topsoil surface, spatial soil distribution evolves along the hillslope. Upslope, over lithological surface deposits ("Grèzes litées"), the Leptic Calcosols show a sandy-loamy clayey texture (GEPPA texture determination), a high organic carbon content ($> 2\text{g}/100\text{ g}$). Upslope, the soils lying over fine limestones, are Rendosols with clayey texture and weakest total carbonate content than the Leptic Calcosols. Midslope, vines are planted over thick Calcosols presenting a clayey texture for surface horizons and a clayey-sandy loamy for deeper horizons, with a high free iron content, that developed over bioclastic limestones. Downslope, the soils are thicker and qualified as Pachic Calcisols, characterised by a clayey-sandy loamy texture, very low free iron content, with redoxic horizons.

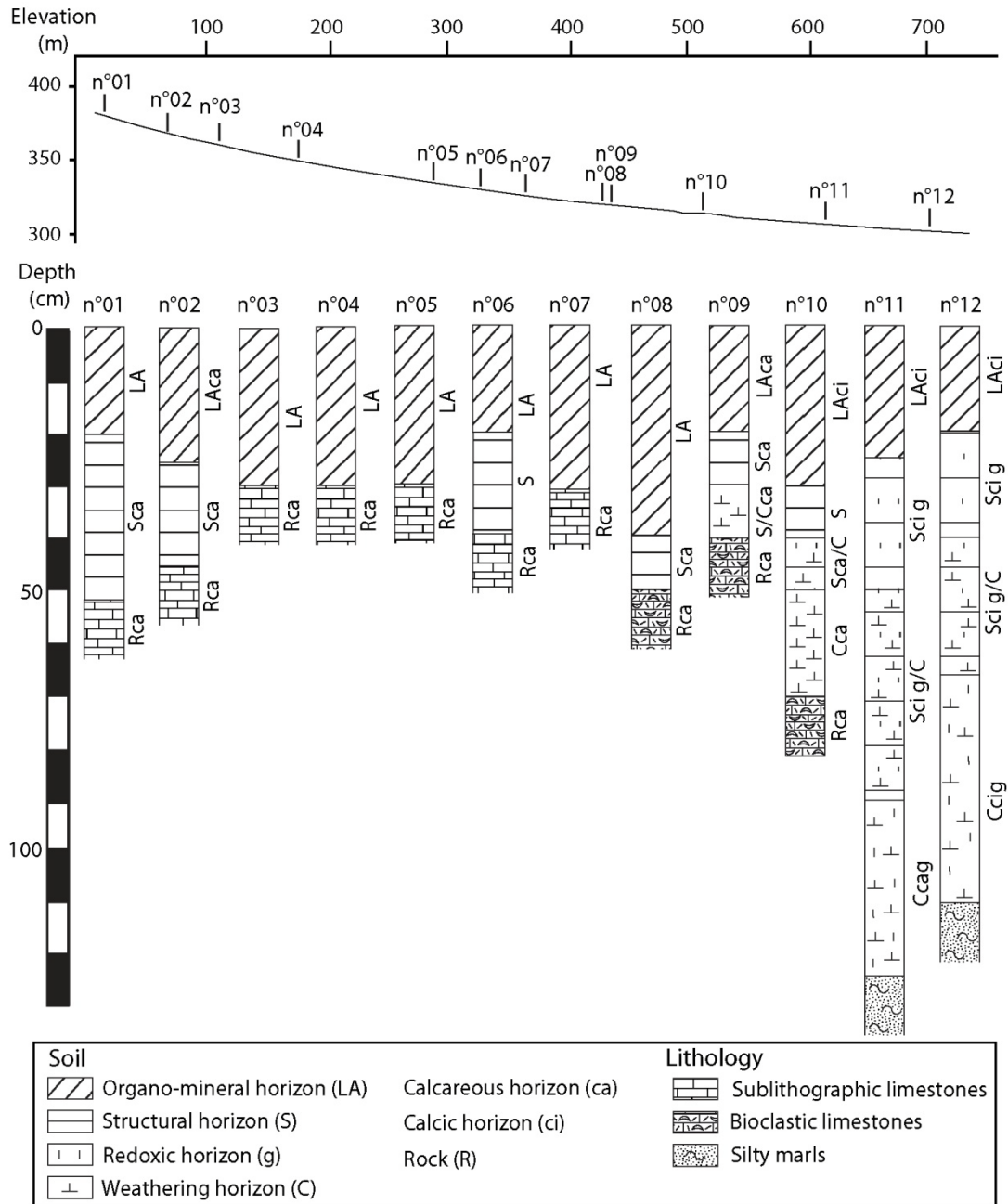


Fig. 6 Location of auger holes along the hillslope and synthetic description of each soil sample. Soils were described using the French Referential (RP 2008) (Baize and Girard, 2008).

The soil distribution along the hillslope and the physico-chemical properties are compared to the topsoil mapping performed by image analysis. The red class observed upslope covers the Leptic Calcosols and Rendosols. The discrimination of these two soil types by image analyses is not possible, because physico-chemical properties of these two soils are homogeneous, apart from their thickness. Midslope, the green class covers the Calcosols. Downslope, the topsoil corresponding to the yellow and blue classes covers the Pachic Calcisols. After identifying specific vineyard management practices

which could impact the recognition of physico-chemical topsoil properties, it is possible to evaluate the soil distribution from the topsoil map.

Auger hole	Horizon depth (cm)	Horizon type RP 2008	Grain-size distribution			pH H ₂ O	C _{org} g/100g	C/N	CaCO ₃ g/100g	Free iron g/100g
			%Sand	%Silt	%Clay					
n°1	Leptic Calcosols									
	0-20	LA	17.8	46.5	35.7	8.1	2.6	17.3	18	1.69
	20-50	Sca	26.1	43.4	30.5	8.2	2.2	21.3	34	1.36
n°5	Rendosols									
	0-30	LA	15.5	39.3	45.2	8.1	2.2	15.0	10	2.55
n°10	Calcosols									
	0-30	LAc	14.0	38.7	47.3	8.1	1.1	13.8	5	2.79
	30-40	S	20.8	36.4	42.8	8.1	0.9	17.1	16	2.79
	40-50	Sca/C	37.1	32.4	30.5	8.4	0.9	25.2	43	2.52
	50-70	Cca	53.6	27.8	18.6	8.6	1.2	-	59	1.90
n°12	Pachic Calcisols									
	0-20	LAc	25.0	47.0	28.0	7.5	1.2	13.3	0	0.10
	20-40	Sci g	20.3	47.2	32.5	7.7	0.8	15.4	0	0.11
	40-65	Sci g/C	17.9	43.1	39.0	7.7	0.4	13.9	0	0.11
	65-110	Cci g	19.8	38.7	41.5	7.5	0.3	10.3	0	0.12

Table 2 Physico-chemical properties for each type of soil observed along the Couchey hillslope.

3.4. Soil distribution model

All the data acquired along the hillslope led to determine factors affecting the soil diversity and its spatial distribution along the Couchey hillslope. A high scale soil map has been established, allowing evaluating the spatial distribution of specific agronomical properties (Fig.7). The soil diversity evolves from the topographical variations and the sedimentary facies of the geological formations. Upslope, Leptic Calcosols characterised by a sandy-loamy clayey texture are located over grezes bedding, with high slope values (Table 3). Further down along the slope, Clayey Rendosols are distributed over muddy limestones with high to moderate slope values. Midslope, Calcosols, presenting a clayey to clayey-sandy loamy texture, cover moderate slope values area over bioclastic limestones. Downslope, over gentle slopes, Pachic Calcisols, presenting clayey-sandy loam texture, develop over a silty marl formation. Along the Couchey hillslope, the soil organisation follows a topolithosequence model, which is consistent to the studies performed by Mériaux et al. (1981) for several hillslopes of the vineyard of the Côte.

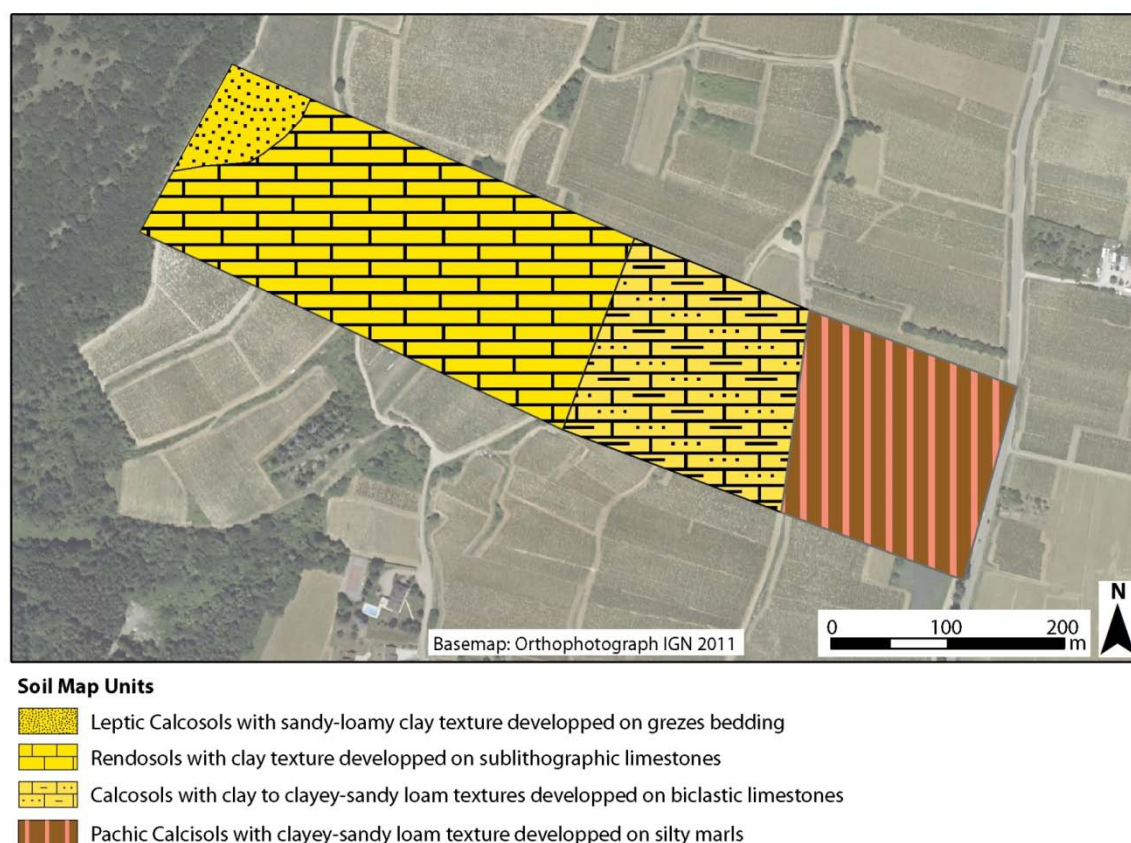


Fig. 7 High scale soil map realized with all the data acquired along the hillslope.

Soil type	Topsoil	Soil depth	Slope	Lithology
Leptic Calcosols	High stoniness Reddish matrix colour	35 to 50 cm	20 to 32°	Grezes bedding
Rendosols	High stoniness Reddish matrix colour	< 35 cm	10 to 30°	Muddy limestones
Calcosols	Low stoniness Reddish matrix Colour	50 to 70 cm	7 to 11°	Bioclastic limestones
Pachic Calcisols	Null stoniness Brownish matrix colour	> 100 cm	7 to 1°	Silty marls

Table 3 Synthesis of characteristics and factors affecting the soil distribution along the hillslope.

4. Discussion

4.1. Imagery data as a tool for soil mapping

The use of VHSR images in this context of perennial cultivation, where the vegetation (vine stocks) is always present, permits the recognition of the various topsoils distributed along the hillslope. The VHSR data allow avoiding the Mixed Pixel effect, whose spectral behaviour is derived

from the spectral composition of various objects (Girard and Girard, 2010). The three major topsoil components that are essential to define the soil type or substratum are the stoniness, the topsoil matrix colour and the vegetation. The importance of such components have also been described in other vineyard contexts, where the VHRS images have been used to characterise the hydrologic properties of the topsoil (Corbane et al., 2008; Wassenaar et al., 2005). Our results show that vineyard management practices strongly disturb the identification of topsoil from image processing. In the case where the soil is covered by vegetation, the accurate estimation of soil attributes is hampered if the pixels have a vegetation cover of more than 20% (Bartholomeus, 2009). Nonetheless, VHRS images allow identifying the most common management practices that could influence the soil diversity such as earth supply within plots. One other limit of the use of these data for soil mapping is that the method is not able to give information on the soil depth but can only provide information about soil surface layer (Mulder et al., 2011). For instance, Leptic Calcosols observed in the upslope are not differentiated from Rendosols from the VHRS image processing, while the soils display similar physico-chemical properties but have different thicknesses. Nevertheless, the combination of VHRS images analyses, high resolution DTM and ERT tomography allow delineating accurate limits for each soil map unit. The use of “pseudo-continuous” data enables to have a synoptic view of the soil diversity while decreasing significantly the field work necessary to locate soil types and boundaries (Manchanda et al., 2002). The high precision of soil map units coupled with local soil sampling may help to estimate quantitatively the spatial distribution of soil properties.

4.2. Soil diversity

Along the Couchey hillslope, the soil spatial distribution follows a toplotithosequence model, which is consistent with previous studies performed by Mériaux et al. (1981) for Burgundian vineyard hillslopes. Our results show that the type of substratum affects the spatial distribution of the soil type. The thinner soils are observed over the muddy limestone, the intermediate thickness is located over the bioclastic limestone, and the thickest soils are correlated to marl layers. The presence of such soil diversity defined is not obvious at a regional scale since all the soils could be qualified as calcimagnesian soil. The low diversity could be explained by the low lithological formation variability, composed of limestones and marls. In other wine region, soil diversity is more pronounced but still limited, as for example the French Pouilly-Fuissé terroirs exhibiting 5 soil types (Sigales, 2010), and the Swiss Genève terroirs (8 soil types) (Dakhel et al., 2007). However, at a high scale, corresponding to the American Soil Series level, the higher soil diversity influences agronomic skills. In the Couchey hillslope, calcimagnesian soils have been classified into 4 soil map units presenting different agronomical skills defined from their depth, texture, calcium carbonate content, etc. At this scale, soil diversity is also higher in other terroir studies: the 5 soil types observed in the Pouilly-Fuissé terroirs has been mapped as 15 soil map units. The knowledge of soil properties is important because they influence water-capacity storage, which partly determine wine quality (Van Leeuwen,

2009). It is recognized that high quality potential viticulture soils are either stony or shallow (Van Leeuwen and Seguin, 2006). Thus characterising soil properties at a high resolution allow evaluating the wine growing potential of each terroir. Moreover, these properties influence hydric erosion that leads to the soil degradation and reduces the soil productivity (Schumacher et al., 1999).

5. Conclusion

Our approach is based on the use of high spatial resolution data acquired with imagery techniques that lead to characterise the soil diversity and to determine the spatial distribution of the soils along the vineyard hillslope. VHSR images in the visible spectrum domain are adapted to determine the topsoil components providing information on substratum and soil type. ERT technique is well adapted to evaluate the substratum diversity and its organisation at a few metre-scale. The combination of substratum data, topographical data, VHSR mapping allows to produce a high spatial resolution soil map.

The soil map performed with high resolution data acquired in pseudo-continuous allows to identify the soil type from their physico-chemical properties and led to obtain soil map units presenting specific agronomical aptitudes. Moreover, this approach allows to recognise factors controlling the soil formation that could be used to determine the soil-landscape rules. The map performed over a small area may be used as a reference sector method to produce soil maps over an extended area.

Acknowledgements

This work has been made possible by the financial support of Burgundy Regional Council (CRB) and the Inter-Professional Bureau of Burgundy Wines (BIVB). We offer special thanks to pole géomatique team for the provision of LiDAR data.

References

- Baize, D., Girard, M.C., 2008. Référentiel pédologique 2008. Savoir-faire, Quae éditions, 480 p.
- Ball, G.H., Hall, D.J., 1965. Isodata, a Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification. Stanford Research Institute, 61 p.
- Barker, R., 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics* 54, 1031–1037.
- Bartholomeus, H., 2009. The influence of vegetation on the spectroscopic estimation of soil properties. Wageningen UR, Wageningen, 144 p.
- Boardman, J., 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Soil Eros. Res. Eur.* 68, 73–86.
- Boulanger-Fassier, S., 2008. La viticulture durable, une démarche en faveur de la pérennisation des territoires français ? *Géocarrefour* 83, 181–190.
- Brenot, J., Quiquerez, A., Petit, C., Garcia, J.-P., 2008. Erosion rates and sediment budgets in vineyards at 1-m resolution based on stock unearthing (Burgundy, France). *Geomorphology* 100, 345–355.
- Chartin, C., Evrard, O., Salvador-Blanes, S., Hinschberger, F., Van Oost, K., Lefèvre, I., Daroussin, J., Macaire, J.-J., 2013. Quantifying and modeling the impact of land consolidation and field borders on soil redistribution in agricultural landscapes (1954–2009). *Catena* 110, 184–195.
- Corbane, C., 2006. Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale. Université Montpellier II, 252 p.
- Corbane, C., Raclot, D., Jacob, F., Albergel, J., Andrieux, P., 2008. Remote sensing of soil surface characteristics from a multiscale classification approach. *Catena* 75, 308–318.
- Courault, D., 1989. Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection: analyses spectrales, spatiales et diachroniques. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Grignon, 239 p.
- Dakhel, S., Docourt, M., Schwarz, J.-J., Burgos, S., 2007. Étude des terroirs viticoles de Genève, 156 p.
- Delacourt, C., Allemand, P., Jaud, M., Grandjean, P., Deschamps, A., Ammann, J., Cuq, V., Suanez, S., 2009. DRELIO: An Unmanned Helicopter for Imaging Coastal Areas. *J. Coast. Res.* 1489–1493.
- Delmas, J., 1971. Les sols de vignoble. In: *Sciences et Techniques de La Vigne*, Paris, 549–616.
- Fox, D.M., Bryan, R.B., 2000. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena* 38, 211–222.
- García-Ruiz, J.M., 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena* 81, 1–11.
- Girard, M.C., Girard, C.M., 2010. Traitement des données de télédétection - Environnement et ressources naturelles. Dunod, 2ème édition, 553 p.
- Hengl, T., Rossiter, D.G., Stein, A., 2003. Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps. *Soil Res.* 41, 1403–1422.
- Keary, P., Brooks, M., Hill, I., 2002. An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science, 3rd ed., 262 p.
- Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L.H., Chabart, M., Diamantopoulos, J., Farand, R., Gutierrez, L., Jacob, A., Marques, H., Martinez-Fernandez, J., Mizara, A., Moustakas, N., Nicolau, J.M., Oliveros, C., Pinna, G., Puddu, R., Puigdefabregas, J., Roxo, M., Simao, A., Stamou, G., Tomasi, N., Usai, D., Vacca, A.,

1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena* 29, 45–59.
- Lagacherie, P., 2008. Digital Soil Mapping: A State of the Art. In: *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer Netherlands, 3–14.
- Legros, J.P., 1996. *Cartographie des sols: de l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 321 p.
- Loke, M.H., 2013. Tutorial: 2-D and 3-D electrical resistivity surveys. 173 p. <http://www.geotomosoft.com/downloads.php>.
- Manchanda, M.L., Kudrat, M., Tiwari, A.K., 2002. Soil survey and mapping using remote sensing. *Trop. Ecol.* 43, 62–74.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C., 2006. The cost of soil erosion in vineyard fields in the Penedès–Anoia Region (NE Spain). *Soil Eros. Res. Eur.* 68, 194–199.
- McBratney, A., Mendonça Santos, M., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- McKenzie, N.J., Gessler, P.E., Ryan, P.J., O'Connell, D.A., 2000. The role of terrain analysis in soil mapping. In: *Terrain Analysis: Principles and Applications*. 245–266.
- Mehra, O.P., Jackson, M.L., 1958. Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. *Clays Clay Miner.* 7, 317–327.
- Mériaux, S., Chrétien, J., Vermi, P., Leneuf, N., 1981. La Côte viticole. Ses sols et ses crus. *Bull. Sci. Bourgogne* 34, 17–40.
- Morlat, R., Guilbault, P., 2001. *Terroirs viticoles: étude et valorisation*. Oenoplurimédia Sarl, 118 p.
- Mulder, V.L., de Bruin, S., Schaepman, M.E., Mayr, T.R., 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma* 162, 1–19.
- National Cooperative Soil Survey, 1999. *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. United States Department of Agriculture & Natural Resources Conservation Service, 2nd edition, 871 p.
- Novara, A., Gristina, L., Saladino, S.S., Santoro, A., Cerdà, A., 2011. Soil erosion assessment on tillage and alternative soil managements in a Sicilian vineyard. *Soil Tillage Res.* 117, 140–147.
- Palacky, G., 1988. 3. Resistivity Characteristics of Geologic Targets. In: *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, 52–129.
- Poesen, J., Lavee, H., 1994. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Rock Fragm. Soil Surf. Dyn.* 23, 1–28.
- Rat, P., 1986. *Bourgogne Morvan. Guides géologiques régionaux*. Dunod, 2^e édition, 215 p.
- Rémond, C., 1985. Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000 - Beaune - n°526. BRGM éditions, 52 p.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res.* 83, 173–193.
- Schowengerdt, R.A., 2006. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Elsevier Science, 560 p.
- Schumacher, T., Lindstrom, M., Schumacher, J., Lemme, G., 1999. Modeling spatial variation in productivity due to tillage and water erosion. *Soil Tillage Res.* 51, 331–339.

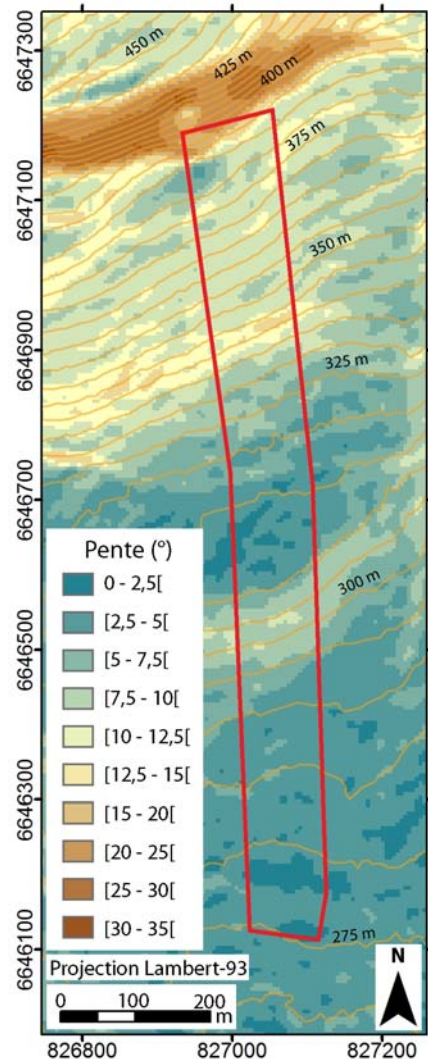
- Sigales, 2010. Carte pédologique de l'appellation Pouilly-Fuissé. (available online <http://terroirs-des-cotes-maconnaises.vins-macon.com>)
- Steinberg, J., 2002. Cartographie: Systèmes d'information géographique et télédétection. Armand Colin, 159 p.
- Torrent, J., Barrón, V., 1993. Laboratory Measurement of Soil Color: Theory and Practice. *Soil Color*, 21–33.
- Van Leeuwen, C., 2009. Soils and Terroir Expression in Wines. In: *Soil and Culture*. Springer Netherlands, 453–465.
- Van Leeuwen, C., Baudet, D., Duteau, J., Seguin, G., Wilbert, J., 1989. Les sols viticoles et leur répartition à Saint-Emilion, Pomerol et quelques autres communes du Libournois. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 23, 131–150.
- Van Leeuwen, C., Seguin, G., 2006. The concept of terroir in viticulture. *J. Wine Res.* 17, 1–10.
- Van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Jaeck, M.-E., Rabusseau, S., Gaudillière, J.-P., 2003. Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bull. Organ. Int. Vigne Vin* 76, 367–379.
- Van Leeuwen, C., Vivin, P., 2008. Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins. *Innov. Agron.* 159–167.
- Vannier-Petit, F., Quiquerez, A., Petit, C., Chevigny, E., 2011. Le sol et sous-sol des versants viticoles de la Côte de Nuits: nouvelles cartographies géologiques, investigations géophysiques et pédologiques à haute résolution spatiale, *Association des Sédimentologues Français* 70, 60 p.
- Vaudour, E., 2003. Les terroirs viticoles: Définitions, caractérisation et protection. Dunod, 293 p.
- Wassenaar, T., Andrieux, P., Baret, F., Robbez-Masson, J.M., 2005. Soil surface infiltration capacity classification based on the bi-directional reflectance distribution function sampled by aerial photographs. The case of vineyards in a Mediterranean area. *Surf. Characterisation Soil Eros. Forecast.* 62, 94–110.
- White, R.E., 2003. *Soils for Fine Wines*. Oxford University Press, USA, 279 p.

4.3 Caractérisation géopédologique du versant de Cheilly-lès-Maranges à faible variabilité de faciès

4.3.1 Topographie du versant de Cheilly-lès-Maranges

Le modèle numérique de terrain à haute résolution spatiale (5 m) a été calculé par stéréoscopie optique à partir de photographies aériennes prises par l'IGN (mission 2011). Les caractéristiques de la calibration du MNT sont présentées en Annexe 1. Le versant présente une morphologie convexo-concave avec un replat dans la partie médiane. L'altitude varie de 255 m à 383 m et les pentes de 0° à 27° (Figure 4.19). Les pentes les plus fortes, comprises entre 15° et 30°, sont localisées à l'extrémité amont du transect, juste au pied de la falaise de Calcaires à Entroques, entre 365 et 380 m. Elles diminuent pour atteindre 10° entre 325 et 265 m d'altitude. Localement, entre 315 et 325 m d'altitude, les pentes augmentent et varient de 12° à 20°. Une diminution progressive est observée entre 290 et 315 m d'altitude, les pentes variant de 0° à 10°, avec une zone de replat bien marquée entre 285 et 290 m d'altitude. Elles augmentent de nouveau entre 275 et 290 m d'altitude et sont comprises entre 10° et 15°. Sur toute la partie aval, de 255 à 275 m d'altitude, elles sont inférieures à 7,5°.

Figure 4.19 Cartes des pentes et courbes de niveau du secteur de Cheilly-lès-Maranges.



4.3.2 Détermination du substrat géologique du versant de Cheilly-lès-Maranges

Les profils 2D de résistivité électrique du sous-sol, réalisés sur le versant de Cheilly-lès-Maranges, ont été acquis par le même dispositif que pour le versant d'Aloxe-Corton. Les acquisitions ont été réalisées au printemps 2012, par temps sec en laissant un intervalle d'au moins trois jours après la dernière pluie, permettant un ressuyage du sol. Sur le versant de Cheilly-lès-Maranges, deux profils ont été réalisés pour couvrir l'ensemble du versant (Figure 4.20). Le profil nord part du haut du versant et s'étend jusqu'à la route départementale D136. Le profil sud s'étend de la D136 jusqu'à la rue des Maranges, située dans le bas de versant. Les caractéristiques des profils de résistivité sont présentées dans le Tableau 4-7.

Figure 4.20 Localisation du profil de tomographie électrique (ERT) et de la zone survolée par le drone, sur le versant de Cheilly-lès-Maranges.

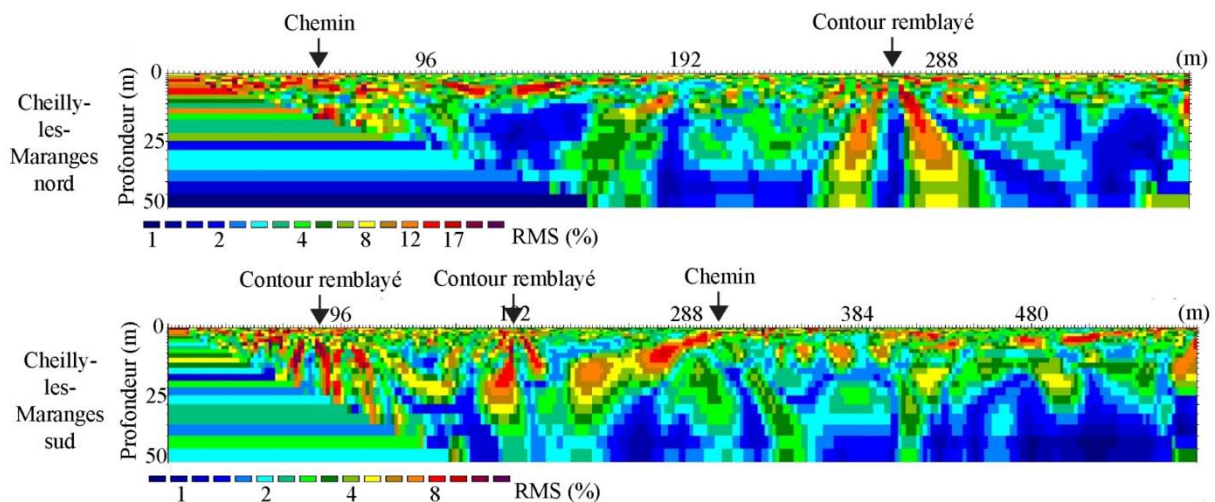
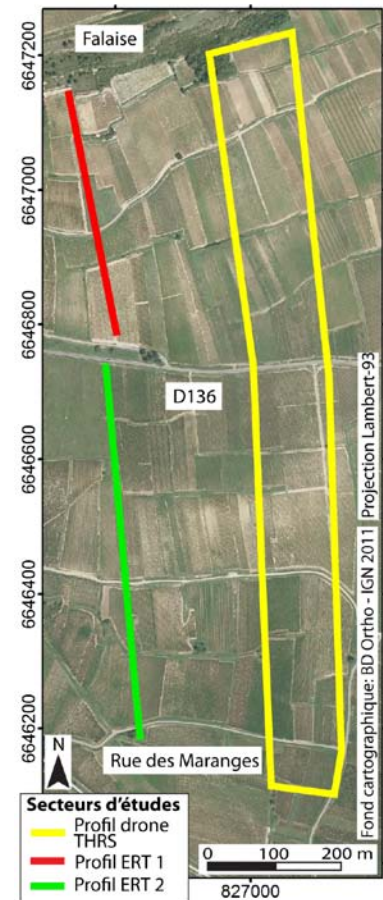


Figure 4.21 Profils 2D représentant les erreurs RMS correspondant à l'itération choisie pour l'interprétation (convergence). Les fortes valeurs de RMS sont principalement corrélées avec la présence de structures anthropiques.

Profil ERT	Longueur	Nb électrodes	Profil complet	Roll-along
Cheilly Nord	360 m	96	1	0
Cheilly Sud	572 m	144	1	1
Données				
Profil ERT	Mesurées	Doublons	Résistivité négative	Écart-type > 1 %
Cheilly Nord	3012	1290	33	73
Cheilly Sud	5016	2142	45	11
Inversion				
Profil ERT	Itérations calculées	Convergence itération	RMS (%)	
Cheilly Nord	7	4	3.68	
Cheilly Sud	7	4	2.82	

Tableau 4-7 Caractéristiques techniques du profil de résistivité de Cheilly-lès-Maranges ; résultats issus des filtrages (Proslys II[®]) et de l'inversion des moindres carrés (Res2dinv[®]).

Les résultats issus des différents traitements sont présentés dans le Tableau 4-7. La distribution spatiale des erreurs RMS, sous forme de profils 2D, a permis de localiser les zones présentant de fortes erreurs (Figure 4.21). Celles-ci, le plus souvent liées à la présence de routes, de chemins ou de contours remblayés, seront prises en compte lors de l'interprétation des profils.

Sur le profil ERT du versant de Cheilly-lès-Maranges, deux compartiments structuraux ont été identifiés (Figure 4.22) ; les valeurs de résistivité y varient de 5 à 800 Ohm.m.

Le compartiment I est localisé dans la partie amont et médiane du versant, de 0 à 720 m, à partir du nord du profil. Celui-ci est observé sur les deux profils, où trois unités ont pu être identifiées.

- L'unité I, située à l'amont du versant, présente les plus fortes valeurs de résistivité, variant de 150 Ohm.m à 600 Ohm.m. Cette unité de faible épaisseur, de l'ordre d'une dizaine de mètres, s'amincit en direction de l'aval. Les valeurs de résistivité sont discontinues dans l'espace ; des zones présentent des plus fortes valeurs de résistivité que celles qui les entourent. Les localisations des plus fortes valeurs de résistivité sont corrélées avec des ressauts topographiques de plusieurs mètres de hauteur (localisés à 25 m, 50 m, 110 m et 140 m). Ces derniers présentent, à l'affleurement, un calcaire bioclastique constitué de nombreuses entroques¹³, issu de la formation des Calcaires à Entroques (Bajocien). Cette unité présente la particularité d'être parallèle à la topographie. Ces blocs de calcaires, distribués de façon éparse sur un faciès marneux, sont interprétés comme des systèmes de base de corniche (Joly, 1968). Cette hypothèse est étayée par le fait que les blocs de calcaires présentent de forts pendages

¹³ Fragments de tiges de crinoïdes fossilisées

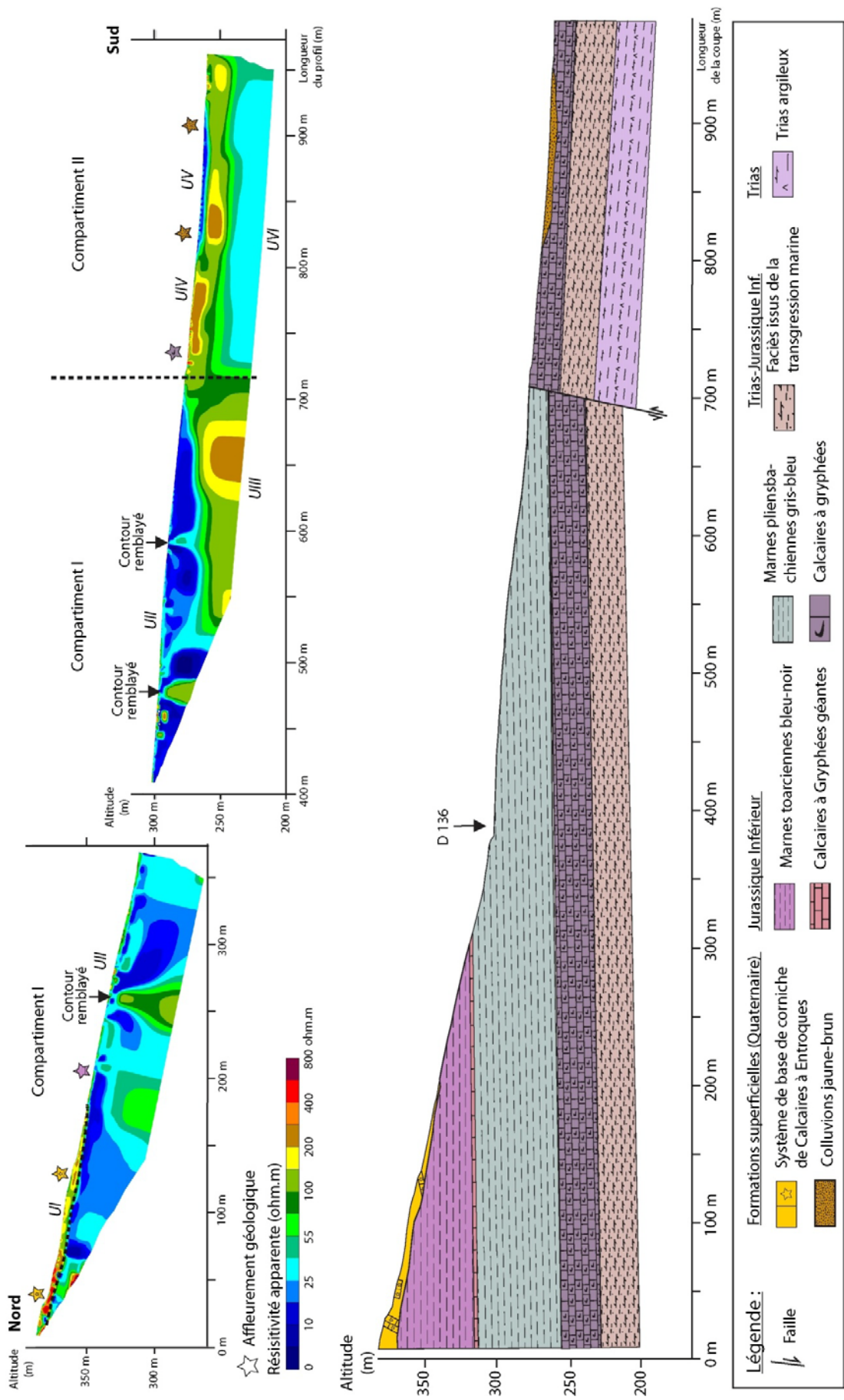


Figure 4.22 Profils de résistivité électrique du sous-sol et coupe géologique interprétative du versant viticole de Cheilly-lès-Maranges. La localisation du profil est renseignée sur la figure 4.20. Le remplissage des étoiles correspond à la formation géologique observée à l'affleurement.

différents les uns des autres, et de ceux observés sur la falaise sus-jacente.

- L'unité II (sous-jacente à UI) présente de faibles valeurs de résistivité, inférieures à 50 Ohm.m. Cette unité est observée depuis l'amont jusqu'à 720 m, sur toute la profondeur du profil nord, et s'amincit sur le profil sud jusqu'à 720 m. Ainsi, la formation qui constitue cette unité présenterait une épaisseur minimale de 100 m. Un seul affleurement a pu être observé pour cette unité, à 210 m : la roche affleurante correspond à des marnes sableuses, appartenant à la formation des marnes toarciennes. L'épaisseur de ces marnes, sur la notice de la carte géologique du Creusot (Courel *et al.*, 1989), ne dépasse pas 50 à 60 m. Or, l'unité mesure plus de 100 m. Il est donc probable que celle-ci corresponde à deux formations lithologiques : les marnes toarciennes et les marnes pliënsbachiennes sous-jacentes aux premières. Les zones de plus forte résistivité localement distribuées dans cette unité, depuis la surface jusqu'en profondeur, correspondent à des zones remblayées pour le retournement des tracteurs enjambeurs en bout de rang. Le profil en 2D des valeurs d'incertitude (erreur RMS) confirme que ces zones présentent de fortes valeurs d'incertitude, supérieures à 10 % (Figure 4.21).
- L'unité III (sous-jacente à UII), localisée dans la partie aval du compartiment I, est visible de 500 à 720 m depuis l'amont, en surface et en profondeur, sur le profil sud (Figure 4.22). Les valeurs de résistivité s'étagent de 100 à 300 Ohm.m. Aucun affleurement n'a pu être observé pour cette unité. Cependant les marnes pliënsbachiennes sus-jacentes permettent de déduire la nature de l'unité III : il s'agirait de la formation des Calcaires à Gryphées (Sinémurien).

Le compartiment II s'étend sur le profil sud. Les valeurs de résistivité varient de 10 à 300 Ohm.m, et trois unités ont pu être individualisées.

- L'unité IV, observée en surface dans la partie amont, et à l'aval du compartiment II, s'étend sur toute la longueur de celui-ci. Les valeurs de résistivité varient de 100 à 300 Ohm.m. Cette unité présente une épaisseur d'environ 25 m. Les valeurs de résistivité sont du même ordre de grandeur que celles de l'unité III. Un affleurement, observé à 740 m, a permis d'identifier la formation des Calcaires à Gryphées (Sinémurien). Ces observations confirment l'hypothèse précédemment posée concernant la présence des Calcaires à Gryphées, en profondeur, au sein du compartiment I.
- L'unité V, localisée en surface, dans la partie médiane du compartiment II, présente de faibles valeurs de résistivité, inférieures à 30 Ohm.m. L'épaisseur de cette unité est très faible, de l'ordre de quelques mètres. À l'affleurement, on observe un matériau colluvial de couleur jaune-brun, riche en chailles, très sensible à l'érosion. Cette formation est localisée dans une petite dépression topographique.

- L'unité VI, observée en profondeur sur le profil sud, présente de faibles valeurs de résistivité, de l'ordre de 30 Ohm.m. Aucun affleurement n'a pu être observé pour cette unité. La présence de Calcaires à Gryphées sus-jacents a permis d'identifier cette formation : il s'agit de dépôts datés de la fin du Trias au début du Jurassique (Rhétien-Hettangien), déposés lors de la dernière transgression marine du Paléozoïque. Cette formation peut s'observer sous différents faciès : argiles noires silteuses et micacées, calcaires dolomitiques gréseux et argiles bariolées dolomitiques (Courel *et al.*, 1989). Les faibles valeurs de résistivité observées sont bien caractéristiques de ces divers faciès lithologiques.

La limite entre le compartiment I et le compartiment II est un contact par faille antithétique. La caractérisation des diverses formations lithologiques a permis d'estimer un rejet d'environ 10 m.

Il n'a pas été possible d'identifier, par prospection géophysique, le banc de Calcaires à Gryphées géantes qui marque la limite entre les marnes pliënsbachiennes et les marnes toarciennes. Cette formation lithologique est peu épaisse (3 à 10 m) et à dominante argileuse (alternance de bancs de calcaires argileux et de marnes). Son faible contraste de résistivité, par rapport aux faciès marneux qui l'encadrent, ne permet pas son identification.

Sur le versant de Cheilly-lès-Maranges, la diversité des formations géologiques a pu être caractérisée par l'acquisition du profil 2D de résistivité électrique. À l'amont, les systèmes de base de corniche, constitués de blocs de Calcaires à Entroques et d'éboulis plus fins, recouvrent les marnes toarciennes qui affleurent plus en aval. La partie médiane du versant est constituée de marnes pliënsbachiennes qui sont, à l'aval, en contact par faille avec la formation de Calcaires à Gryphées, partiellement recouverte par une formation colluviale observée au sein d'une dépression topographique.

Des formations superficielles (système de base de corniche, colluvion marneux), non cartographiées sur la carte géologique du secteur au 1/50 000, ont pu être identifiées à haute résolution spatiale. De plus, une faille antithétique a été localisée dans la partie aval du versant.

4.3.3 Cartographie des états de surface par imagerie THRS

4.3.3.1 Acquisition des images THRS

Sur le versant de Cheilly-lès-Maranges, le secteur d'étude est limité à l'amont par la falaise de Calcaires à Entroques au pied de la Montagne des Trois Croix, et à l'aval par l'ancienne ligne de chemin de fer, transformée en voie verte (Figure 4.23). Les images THRS ont été acquises par le drone DRELIO au printemps (mars 2011) afin de limiter la présence de végétation sur le sol et les ceps. Les orthophotographies THRS ont été créées à partir du logiciel MicMac. Les masques, appliqués sur l'orthophotographie THRS, ont permis de supprimer les composantes « hors sol » couvrant 10,1 % du transect d'étude (Tableau 4-8).

Figure 4.23 Orthophotographie THRS du versant de Cheilly-lès-Maranges (résolution spatiale égale à 10 cm).



Secteur	Date	Heure	APN	Focale	Exposition	Durée vol
Cheilly-lès-Maranges	09/03/2011	13:30	Nikon D700, 35mm	F/3.5	1/3200 s	18 min
Secteur	Vitesse moyenne	Nombre de photos	Longueur	Largeur	Superficie	Résolution mosaïque
Cheilly-lès-Maranges	9.0 km/h	547	1100 m	100 m	11 ha	10 cm

Tableau 4-8 Caractéristiques techniques du vol et des images THRS acquises.

4.3.3.2 Classification d'images et classes d'EDS

La classification non supervisée réalisée sur le versant de Cheilly-lès-Maranges définit sept classes de radiance (Tableau 4-9, Figure 4.24). Comme pour la classification d'Aloxe-Corton, une distinction du rang et de l'inter-rang a pu être observée, pouvant s'expliquer par des différences de rugosité liées au tassement du sol de l'inter-rang par les engins agricoles. Pour limiter le nombre d'EDS, des regroupements de classes ont été effectués. Les sept classes initiales ont été regroupées en quatre classes qui correspondent à quatre états de surface. Afin d'obtenir une cartographie des EDS à

l'échelle du mètre, un filtre majoritaire a été appliqué sur le résultat de la classification. Ce filtrage a conduit à des modifications dans la distribution des EDS, notamment pour l'EDS 2 qui passe de 26 % sur la classification brute à 36 % après l'application du filtre majoritaire. Ces changements mettent en évidence une hétérogénéité très locale qui est lissée par le filtre majoritaire. Les distributions des EDS 3 et 4 ont été également modifiées de l'ordre de 5 % en moins après l'application du filtre. La distribution de l'EDS 1 n'est pas affectée.

Nom classe	Distribution classes (Isodata brute) %	Distribution classes (Majority 9x9) %	Nom EDS	Distribution EDS (Isodata brute) %	Distribution EDS (Majority 9x9) %
1	21	23	EDS1	21	23
2	26	36	EDS2	26	36
3	4	1	EDS3	33	27
4	20	19			
5	9	7			
6	6	3	EDS4	20	14
7	14	11			

Tableau 4-9 Distribution des classes reconnues par imagerie sur le versant de Cheilly-lès-Maranges et attribution des classes d'EDS.

Sur le versant de Cheilly-lès-Maranges, la distribution spatiale des EDS évolue le long du versant mais également au sein des parcelles (Figure 4.24, Tableau 4-9). L'EDS 1 (vert), situé principalement à l'amont et dans la partie médiane du versant, couvre 21 % de la surface étudiée. L'EDS 2 (jaune) couvre 26 % de la zone d'étude, et est observé préférentiellement dans la partie médiane du versant. L'EDS 3 (rouge) est présent dans la partie aval du versant et couvre 33 % du secteur d'étude. L'EDS 4 (bleu) couvre 20 % de la zone d'étude ; il marque la jonction entre la partie aval et médiane du versant, et on l'observe également dans la partie aval.

Les pratiques culturales du versant de Cheilly-lès-Maranges ont été déterminées et cartographiées à partir des images THRS et des observations sur le terrain (Figure 4.24C). Sur le versant, les deux pratiques les plus couramment utilisées sont le désherbage chimique et le griffage du sol. Dans la partie amont du versant, le désherbage chimique est le plus pratiqué, tandis que dans la médiane et aval, le griffage est principalement employé, mais le désherbage chimique l'est également. Sur ce versant à faible contraste lithologique, les pratiques culturales ne semblent pas influencer la reconnaissance des EDS, à l'exception des parcelles en enherbement total que l'on retrouve au sein de l'EDS 4.

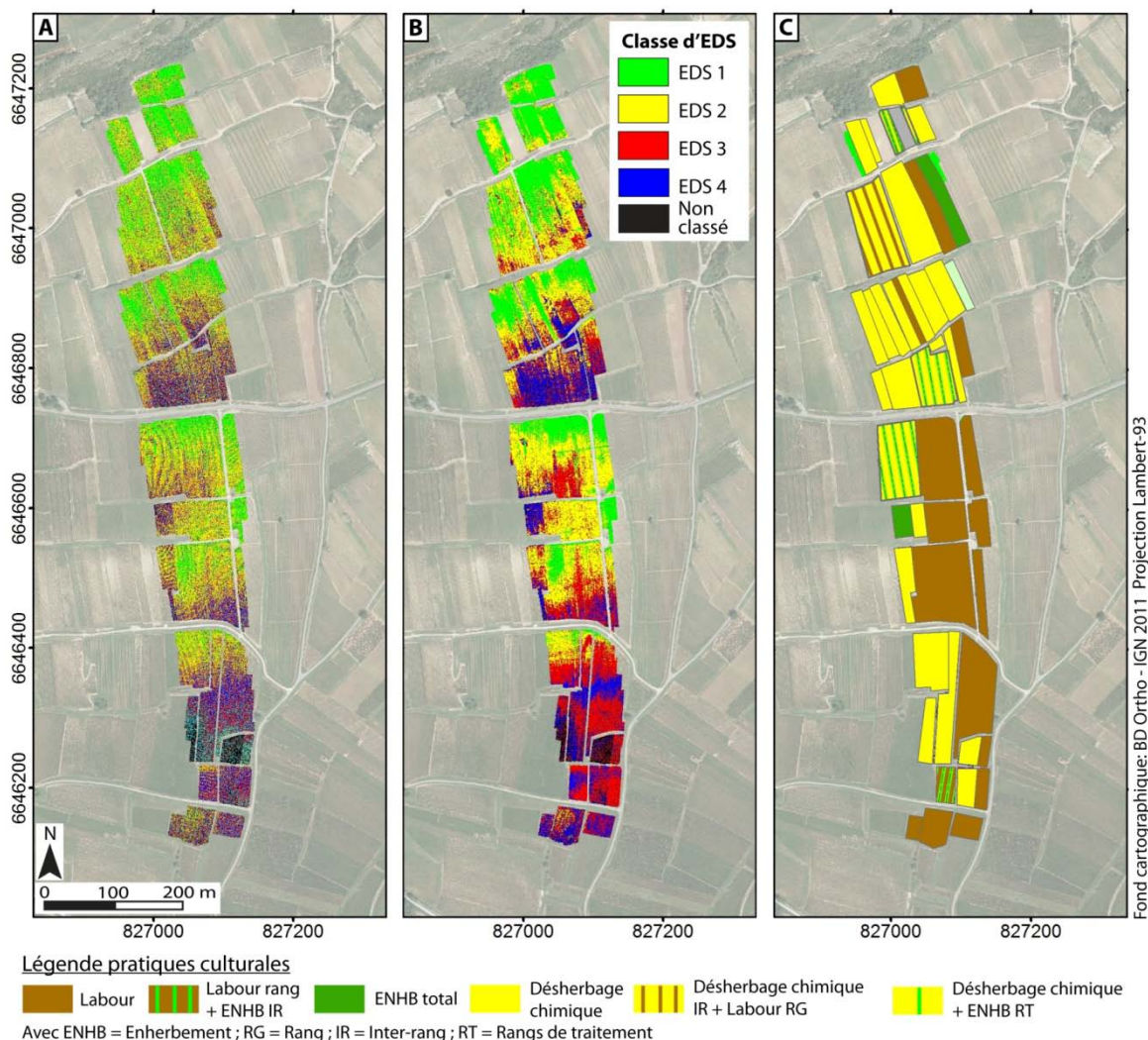


Figure 4.24 Résultats de la classification non supervisée, réalisée sur l'orthophotographie THRS du versant de Cheilly-lès-Maranges à 10 cm de résolution (A) et à 1 m de résolution (issue du filtre majoritaire) (B). Cartographie des pratiques culturales au moment de l'acquisition des photos (C).

4.3.3.3 Paramètres physico-chimiques et séparabilité des classes d'EDS

La caractérisation des états de surface du sol (EDS) du versant de Cheilly-lès-Maranges a été réalisée à partir de vingt-deux prélèvements de surface (Figure 4.25A). La répartition des prélèvements en fonction des classes d'EDS définies par imagerie est la suivante : EDS 1 (vert) 7 prélèvements, EDS 2 (jaune) 4 prélèvements, EDS 3 (rouge) 5 prélèvements, EDS 4 (bleu) 5 prélèvements.

Les paramètres physico-chimiques des EDS évoluent en fonction de leur position sur le versant. Dans la partie amont du versant jusqu'à la route départementale D136, la pierrosité de surface est importante, comprise entre 39 et 50 %, et constituée de cailloux et de graviers en proportion équivalente. Les éléments lithiques sont principalement des fragments de Calcaires à Entroques anguleux et de chailles (Figure 4.25B). À l'aval de la D136, sur le replat topographique, la pierrosité

de surface diminue et ne dépasse pas 20 %. Dans la partie aval du versant, la pierrosité augmente légèrement pour atteindre des valeurs de 25 %, avec des cailloux et des graviers en proportion équivalente ; elle est constituée de calcaires argileux et de chailles.

Les teneurs en fer libre sont les plus faibles dans la partie amont et médiane du versant, comprises entre 2 et 3 g/100 g (Figure 4.25C). Dans la partie aval, les teneurs sont plus importantes, de l'ordre de 3 à 5 g/100 g.

Le pH évolue peu sur l'ensemble du versant, et varie de 7,8 à 8,2.

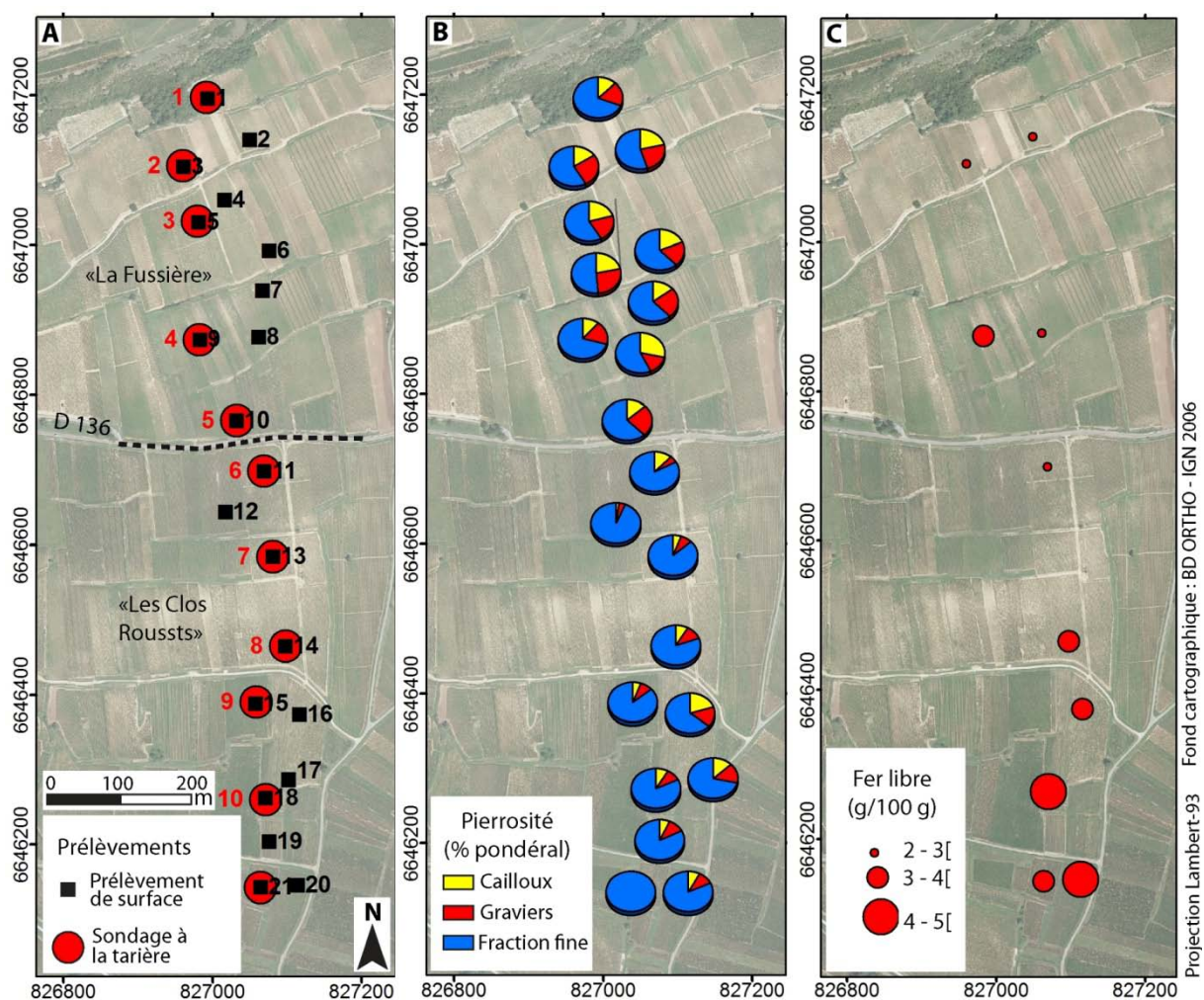


Figure 4.25 Localisation des prélèvements (A) et distribution spatiale des caractéristiques physico-chimiques des EDS sur le versant de Cheilly-lès-Maranges : pierrosité de surface (B), teneur en fer libre (C).

Les teneurs en carbonate de calcium total sur le versant évoluent de l'amont vers l'aval (Figure 4.26A). Les EDS, situés dans les parties les plus hautes topographiquement, sont riches en

CaCO₃, dépassant 25 g/100 g. Les valeurs diminuent en direction de l'aval, et sont comprises entre 12,5 et 25 g/100 g de la zone amont à la route D136. Dans la partie médiane et aval du versant, les EDS sont pauvres en carbonate de calcium. Les teneurs sont comprises entre 0 et 5 g/100 g.

Le carbone organique est réparti en plusieurs secteurs sur le versant (Figure 4.26B). Les teneurs les plus importantes, 4 à 6 g/100 g, se situent dans la partie médiane du versant, au niveau de la route D136. À l'amont, elles sont plus faibles, comprises entre 2 et 4 g/100 g. Les teneurs les plus faibles, inférieures à 2 g/100 g, sont localisées en contrebas du replat topographique observé à l'aval de la route D136. Dans la zone aval, elles sont faibles et varient entre 2 et 3 g/100 g.

Les rapports C/N sont compris entre 15 et 20 sur le versant (Figure 4.26C). On observe toutefois deux valeurs plus importantes dans la partie amont (rapport de 20 à 25), probablement dues à un apport de matière organique. La partie aval présente les rapports les plus faibles, compris entre 10 et 15.

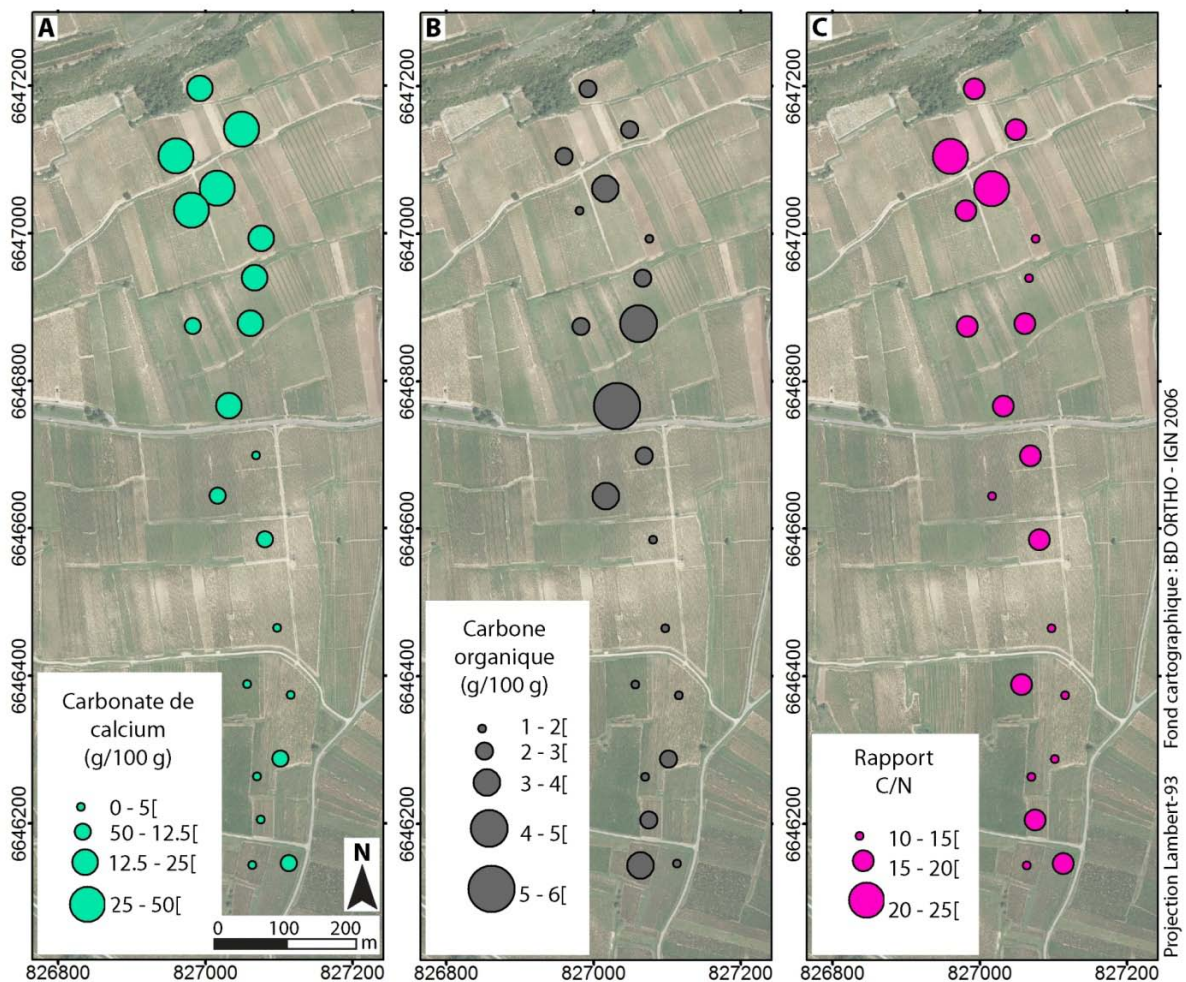


Figure 4.26 Distribution spatiale des caractéristiques physico-chimiques des EDS sur le versant de Cheilly-lès-Maranges : teneur en carbonate de calcium (A), carbone organique (B), et rapport C/N (C).

La séparabilité des classes d'EDS a été déterminée à partir du calcul d'une analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur les divers paramètres physico-chimiques. Les trois premiers axes de l'ACP ont été conservés pour l'interprétation des données ; ils représentent plus de 85 % de l'inertie totale du système (Figure 4.27). L'axe 1 est corrélé à la charge en cailloux, en graviers et en fraction fine. Il caractérise également la teneur en carbonate de calcium total et le paramètre chrominance b^* (Tableau 4-10). L'axe 2 caractérise les teneurs en carbone organique, la teneur en azote total, le paramètre colorimétrique de clarté L^* et les deux paramètres de chrominance a^* et b^* . L'axe 3 est corrélé au rapport C/N. La couleur des classes d'EDS reconnues par analyse d'images a été attribuée à chaque prélèvement pour évaluer le lien potentiel entre les EDS reconnus par imagerie et les EDS caractérisés par leurs paramètres physico-chimiques (Figure 4.27).

Pour l'EDS 1 (vert), les prélèvements se regroupent sur les plans axe1-axe2 et axe1-axe3. Ils se caractérisent par leur forte charge en éléments grossiers (cailloux et graviers) et leur forte teneur en carbonate de calcium total. Ils présentent également un rapport C/N élevé (Figure 4.27 A à D).

Pour l'EDS 2 (jaune), les prélèvements se regroupent sur le plan axe1-axe3, ils ont en commun une forte teneur en fraction fine et présentent une forte clarté (L^*) (Figure 4.27 C et D). Sur le plan axe2-axe3, les prélèvements sont caractérisés par leur rapport C/N élevé (Figure 4.27 E et F). Selon l'axe 1, le prélèvement n°12 ne se regroupe pas avec les autres prélèvements du fait de sa forte teneur en carbone organique.

Les prélèvements réalisés au niveau de l'EDS 3 (rouge) se répartissent selon les plans axe1-axe2 et axe1-axe3 (Figure 4.27 A à D). Les prélèvements sont riches en fraction fine et présentent une forte clarté. Ils sont pauvres en carbone organique et en azote total. Bien que les prélèvements de cet EDS soient regroupés, on observe tout de même une tendance qui exprime une évolution de la couleur de la matrice selon un gradient L^* vers a^* .

Les prélèvements effectués sur l'EDS 4 (bleu) semblent se répartir en deux groupes (Figure 4.27 A à F). Les prélèvements n°18, 19 et 21 sont riches en fractions fines (axe1), à l'opposé des prélèvements n° 8 et 10 qui présentent une forte pierrosité et sont riches en carbone organique et azote total. Bien que ces deux groupes soient reconnus au sein d'un même EDS, ils ne présentent pas de relation spatiale puisqu'ils sont situés dans deux zones distinctes sur le transect. L'échantillon n°21 semble n'appartenir à aucun des deux groupes, et se caractérise par une forte teneur en fraction fine et une forte concentration en azote et carbone organique. Il ne présente pas de caractéristiques communes aux prélèvements alentour. On peut supposer que la parcelle a pu faire l'objet d'un apport de terre exogène.

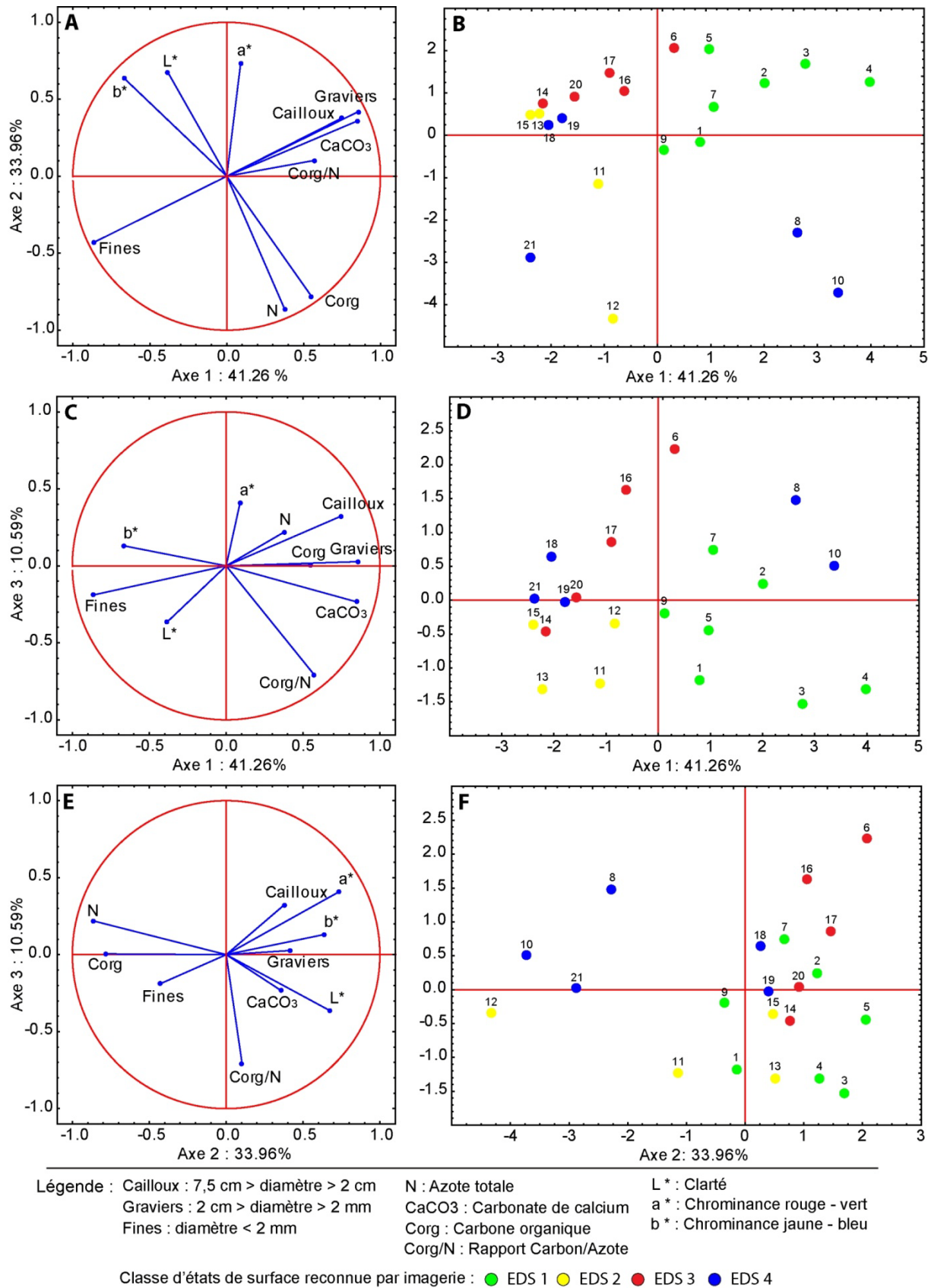


Figure 4.27 ACP réalisée sur les paramètres physico-chimiques des EDS du versant de Cheilly-lès-Maranges. Projections des variables (A, C, E) et des individus (B, D, F) sur les trois plans factoriels couvrant plus de 85 % de l'inertie totale du système.

Sur l'ACP, deux groupes sont toujours clairement individualisés : il s'agit de l'EDS 1 (vert) et des prélèvements n° 8 et 10 appartenant à l'EDS 4 (bleu). Les prélèvements qui constituent ces deux classes sont tous situés dans la partie amont du versant. Les autres prélèvements sont plus dispersés sur l'ensemble des plans factoriels. De plus, des prélèvements appartenant à différentes classes d'EDS reconnues par imagerie partagent des espaces communs sur les plans factoriels. Il semble donc que la relation entre les EDS reconnus par imagerie et leurs paramètres physico-chimiques ne soit pas fondée pour la partie médiane et aval du versant. Lors de l'acquisition des images, les travaux d'entretien du sol ou de désherbage n'avaient pas encore été réalisés. La surface du sol était partiellement recouverte par la végétation sur les parcelles des zones médiane et aval, ce qui explique les nombreuses variations de classes d'EDS à l'échelle parcellaire. De plus, la couleur de la matrice des EDS est relativement homogène dans la partie médiane et aval du fait de la faible diversité géologique (marnes et colluvions de marnes). Cette couleur, proche de la couleur des éléments lithiques de surface, ne permet pas de distinguer ces deux composantes.

Les classes d'EDS reconnues par imagerie dans cette zone sont très fortement corrélées à la présence de la végétation. C'est pourquoi elles ne présentent pas de relation directe avec les paramètres physico-chimiques qui les composent.

	Axe 1	Axe 2	Axe 3		Axe 1	Axe 2	Axe 3
Cailloux	0.75	0.38	0.32	Corg/N	0.57	0.10	-0.71
Graviers	0.86	0.42	0.03	CaCO ₃	0.85	0.36	-0.23
Fines	-0.86	-0.43	-0.19	L*	-0.38	0.68	-0.36
C org	0.55	-0.78	0.01	a*	0.09	0.73	0.41
N	0.38	-0.86	0.22	b*	-0.67	0.64	0.13

Tableau 4-10 Matrice des corrélations variables-facteurs issues de l'ACP du versant de Cheilly-lès-Maranges.

La reconnaissance des EDS par imagerie, couplée aux analyses physico-chimiques de surface de surface, démontre que :

- il est possible d'individualiser des groupes d'EDS à partir de leurs caractéristiques physico-chimiques (uniquement à l'amont) ;
- les classes d'EDS reconnues par imagerie présentent des caractéristiques physico-chimiques qui leur sont propres (uniquement à l'amont) ;
- la présence de végétation et la faible diversité géologique ne permettent pas d'établir des relations entre les EDS reconnus par imagerie et leurs propriétés physico-chimiques (zone médiane et aval) ;
- l'influence des pratiques culturales sur la reconnaissance des EDS est peu marquée, ce qui est probablement dû à l'omniprésence de la végétation.

4.3.4 Description des sols et typologie

Onze sondages, localisés sur le versant de Cheilly-lès-Maranges, ont permis de caractériser les sols et leur distribution spatiale (Figure 4.25A). La description des sondages est représentée sur un schéma conceptuel montrant la distribution des horizons pédologiques et des substrats le long du transect topographique (Figure 4.28). Les analyses physico-chimiques de chaque type de sol rencontré sur le versant sont présentées dans le Tableau 4-11. L'ensemble des analyses réalisées sur ces sondages est présenté en Annexe 2.

À l'amont du versant, sur les pentes modérées à fortes, variant de 10° à 27° (sondages n°01 à 03), les sols sont épais à très épais, de l'ordre de 80 à 150 cm. La présence de blocs éboulés de Calcaires à Entroques (système de base de corniche) au sein des marnes toarciennes confère une disparité de substrat géologique à l'échelle locale, induisant ces variations d'épaisseur de sol. Les sols les moins profonds se développent sur les blocs éboulés de calcaires, alors que les sols les plus profonds se situent au niveau des éboulis et marnes. La texture est limono-sablo-argileuse. Les sols sont fortement carbonatés. Ils présentent les plus faibles quantités de fer à l'échelle du versant (2 g/100 g) et sont appauvris en carbone organique dont les teneurs sont inférieures à 1 g/100 g. La couleur de la matrice est brun-jaunâtre foncé à brun-olive (10 YR, 2,5Y). Ce sont des Calcosols sur formations colluviales issues du démantèlement des falaises de Calcaires à Entroques. Le cortège argileux est constitué en majeure partie d'inter-stratifiés illite-smectite (45 %), d'illite (30 %) de vermiculite et de très faibles quantités de kaolinite et de chlorite (de l'ordre de 5 %).

Dans la partie amont de la route D136, les sols sont très épais (> 110 cm) (sondages n°4 et 5), et présentent une texture d'argile lourde. Les horizons de surface sont appauvris en carbonate de calcium (10 à 20 g/100 g). Ils se caractérisent par une forte teneur en fer libre, supérieure à 3,5 g/100 g. La couleur de la matrice est brun-jaunâtre (10 YR) pour les horizons de surface et brun-olive pour les horizons de profondeur (2,5Y). Ces sols sont des Calcosols argileux décarbonatés en surface sur formations marneuses pliënsbachiennes. Le cortège est composé d'inter-stratifiés illite-smectite (40 %), d'illite (20 %), de vermiculite, d'inter-stratifiés chlorite-vermiculite, de kaolinite (10 %) et de chlorite. Les minéraux argileux des marnes pliënsbachiennes présentent un cortège similaire à celui des sols observés, à l'exception de la vermiculite et des inter-stratifiés chlorite-vermiculite absents de ce cortège (Drouet, 1979 ; Le Roy, 2008).

Dans la partie médiane du versant, au niveau du replat topographique, les sols sont très minces, de l'ordre de 40 cm (sondage n°6). Ils présentent une texture d'argile lourde et une faible teneur en matière organique (1,5 g/100 g). Ils sont décarbonatés, et la teneur en fer libre est égale à 3 g/100 g. La matrice est de couleur brun-olive (2,5Y). Ces sols sont des Calcosols leptiques sur calcaires indifférenciés. La minéralogie des argiles est similaire à celle des Calcosols, précédemment décrite.

Numéro de sondage	Profondeur de horizons cm	Type horizon	Granulométrie (%)					C _{org} g/100 g	C/N	pH eau	CaCO ₃ tot g/100 g	Fer libre g/100 g	Minéralogie des argiles (%)						
			A	LF	LG	SF	SG						C	CV	V	IS	I	K	
n°2	Calcosol calcaire, limono-sablo-argileux, épais à très épais, sur formation colluviale de Calcaires à Entroques																		
	0-20	LAc	29	20	13	14	24	0.66	3.2	8.05	41	2.12	5	0	16	45	29	5	
	20-50	Sca	26	19	11	13	31	0.00	-	8.17	55	2.00	6	0	14	48	28	T	
	50-80	S/Cca	15	20	11	14	40	0.00	-	8.49	80	0.94	T	0	19	43	35	T	
n°4	Calcosol argileux, très épais, décarbonaté en surface, sur marnes																		
	0-40	LAc	47	23	10	9	11	1.35	8.5	8.05	9	3.53	8	17	12	38	14	10	
	40-85	Sci	56	23	9	7	6	1.29	10.1	7.82	5	3.80	7	13	12	38	19	11	
	85-105	Cca	40	22	9	7	21	0.00	-	8.15	31	3.38	8	11	13	35	21	12	
	105-165	Cca g	49	30	9	5	8	0.00	-	8.23	19	3.82	7	8	13	39	19	14	
n°6	Calcosol leptique, argileux, sur calcaires indifférenciés																		
	0-40	LA	50	25	11	10	5	1.58	10.2	8.02	6	2.79	7	16	15	33	20	10	
n°10	Calcosol redoxique, argileux, épais, sur calcaires argileux																		
	0-30	LAc	49	24	11	9	8	1.83	9.8	7.99	0	4.11	9	16	14	37	13	12	
	30-65	Sci g	52	22	10	8	7	1.12	8.9	8.13	6	4.45	9	8	15	38	18	13	

Tableau 4-11 Caractéristiques physico-chimiques des différents types de sol rencontrés sur le versant de Cheilly-lès-Maranges.

Les sols de la partie aval du versant sont moyennement épais, de l'ordre de 60 cm (sondages n°7 à 10), à épais, supérieurs à 1 mètre (sondages n°11). Ils sont décarbonatés sur l'ensemble du profil, à l'exception du sondage n° 7 qui présente de nombreuses précipitations de carbonate de calcium dans l'horizon structural en profondeur. Ils présentent une texture d'argile lourde. Les horizons organo-minéraux présentent des teneurs en matière organique égales à 2 g/100 g. Les teneurs en fer libre, supérieures à 4 g/100 g, sont les plus fortes du versant. L'ensemble des horizons structuraux en profondeur est rédoxique. La couleur de la matrice est brun-jaunâtre foncé à brun-olive (10 YR, 2,5Y). Ces sols sont qualifiés de Calcisols argileux rédoxiques épais. Le cortège des minéraux argileux est constitué d'inter-stratifiés illite-smectite (40 %), d'illite (15 %), de vermiculite (15 %), d'inter-stratifiés chlorite-vermiculite, de kaolinite (12 %) et de chlorite (10%). Cette distribution des minéraux argileux est cohérente avec les données obtenues pour les Calcaires à Gryphées (Drouet, 1979). Les minéraux argileux gonflants, riches en vermiculite et illite-smectite, et pauvres en illite, mettent en évidence une évolution minéralogique importante (Chrétien, 1996).

La distribution spatiale des types de sol sur le versant de Cheilly-lès-Maranges suit le modèle de topolithoséquence.

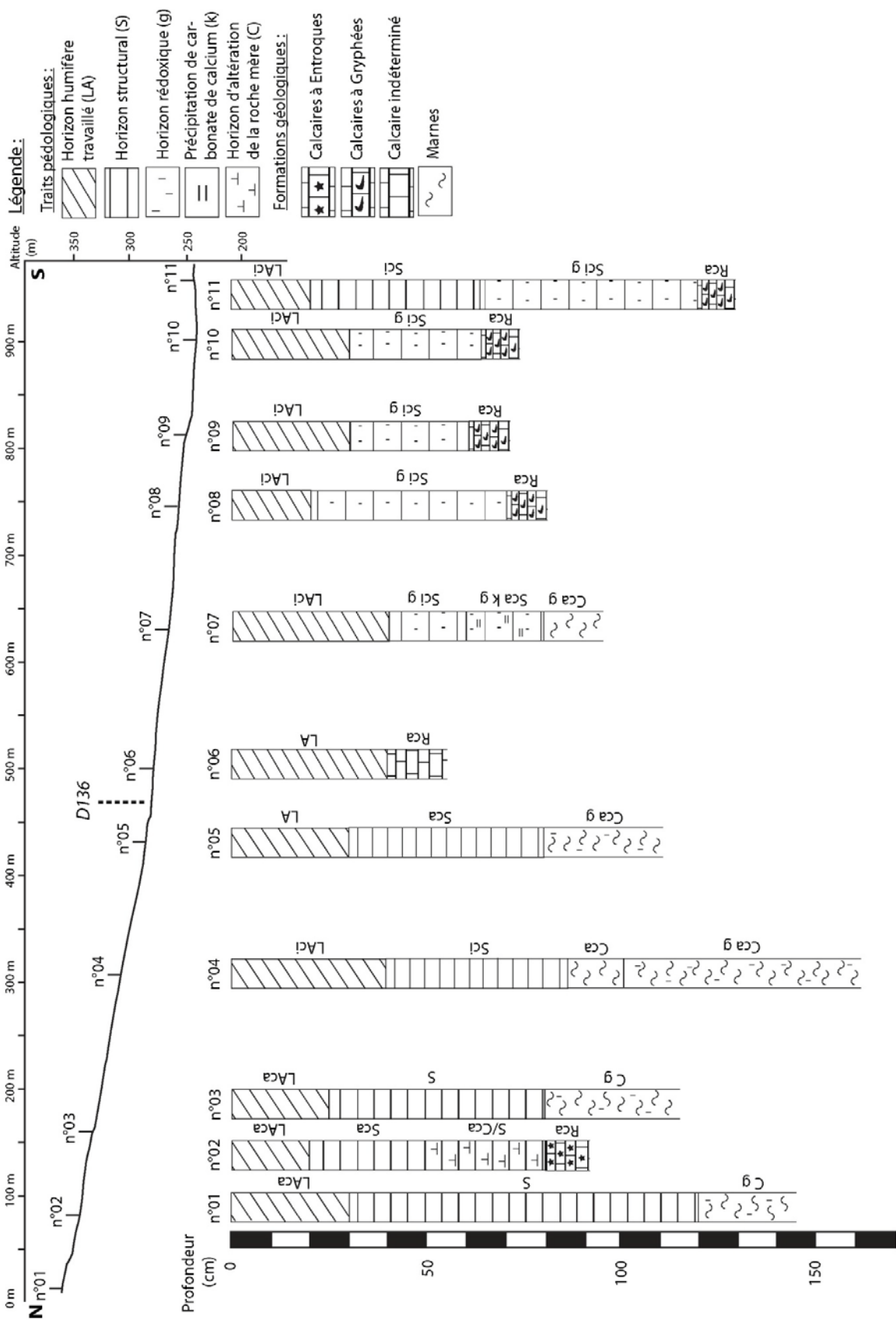


Figure 4.28 Schéma interprétatif des sondages réalisés sur le versant de Cheilly-lès-Maranges et distribution des sondages le long du profil topographique.

4.3.5 Cartographie des sols du versant de Cheilly-lès-Maranges

La démarche interdisciplinaire réalisée sur le versant de Cheilly-lès-Maranges a été utilisée pour produire la carte pédologique au 1/5 000 du secteur d'étude (Figure 4.29).

Sur ce versant à faible contraste lithologique, l'analyse d'images THRS n'a pas été aussi performante que sur les sites à forte variabilité de faciès. Nous avons pu établir des relations entre les états de surface et les sols uniquement dans la partie amont du versant. De ce fait, la cartographie des EDS pour la partie médiane et aval n'a pas été utilisée pour définir les limites cartographiques de la carte pédologique du versant. Il a été observé que les Calcosols, localisés dans la partie amont du versant, sont situés au sein de l'EDS 1. En contrebas de la zone amont, où la pente diminue, les Calcosols décarbonatés en surface ont été identifiés au sein de l'EDS 4.

Dans la partie médiane et aval du versant, la distribution des sols n'est pas corrélée aux EDS reconnus par imagerie. La présence de végétation sur l'ensemble de la zone conduit à des variations radiométriques intra-parcellaires qui ne permettent pas d'observer les caractéristiques physico-chimiques des états de surface. Dans cette zone, les Calcisols leptiques, localisés sur la zone de replat topographique, évoluent vers l'aval en Calcisols argileux rédoxiques épais, sur les pentes faibles. Dans cette zone, les sols sont homogènes ; ils n'évoluent pas en fonction du substrat géologique, mais plutôt en fonction des variations topographiques. De ce fait, le MNT à très haute résolution a été préférentiellement utilisé pour définir les limites des unités cartographiques.

La distribution spatiale des formations lithologiques sur le versant a été déterminée par l'acquisition du profil de résistivité à haute résolution couplée à des observations locales sur le terrain. La diversité des sols, observée à partir des sondages à la tarière, est contrôlée par la lithologie dans la partie amont. Ainsi, les différentes unités lithologiques, reconnues à partir de l'ERT, ont été utilisées pour définir les limites des unités cartographiques de sols pour ce secteur.

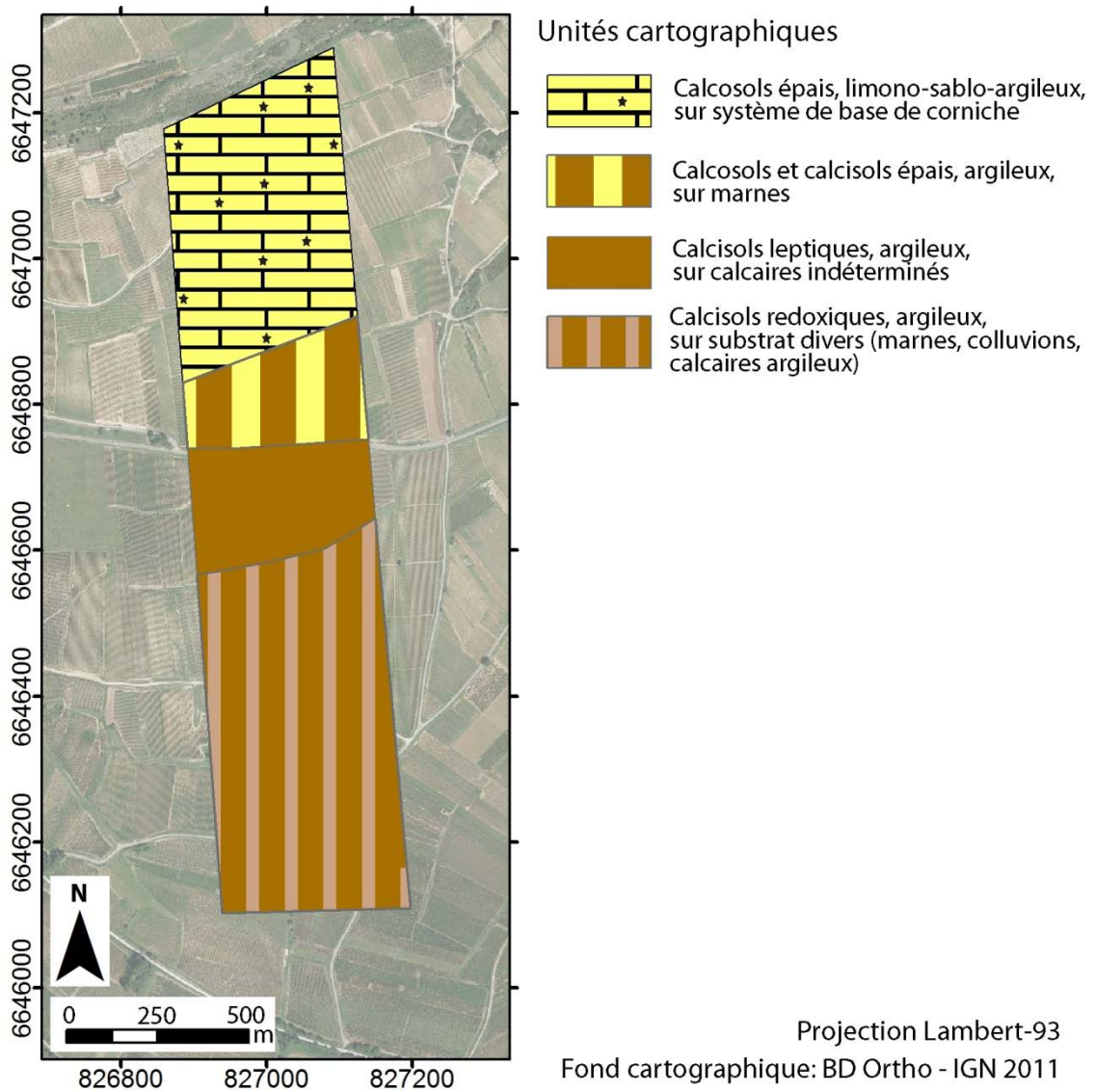


Figure 4.29 Carte pédologique du versant de Cheilly-lès-Maranges au 1/5 000.

4.4 Ouverture vers une cartographie sur une surface plus étendue

La démarche interdisciplinaire appliquée à plusieurs secteurs a pu être utilisée pour déterminer la diversité pédologique des sols viticoles de versant de la Côte, à grande échelle. Ces petits secteurs cartographiés à haute résolution pourraient être utilisés comme des secteurs de référence pour une cartographie sur une plus vaste étendue.

4.4.1 Classification des EDS à partir de l'orthophotographie IGN

En utilisant les mêmes procédés que pour les images THRS, nous avons testé la méthode de cartographie des EDS sur une étendue plus vaste¹⁴. Le secteur testé englobe le transect étudié sur le versant d'Aloxe-Corton. La classification non supervisée réalisée sur l'orthophotographie de l'IGN de juin 2006, à une résolution spatiale de 50 cm, permet de discriminer trois secteurs principaux. Ceux-ci présentent une distribution spatiale proche de celle observée sur le transect d'étude. On observe également l'influence des pratiques culturales qui conduit, dans certaines zones, à la non-reconnaissance des EDS. Cette diversité des pratiques culturales observée peut s'expliquer par le fait que l'orthophotographie a été prise au cours du mois de juin, où l'influence de ces pratiques sur la reconnaissance des EDS est plus marquée. L'utilisation d'images aériennes dans le domaine spectral du visible, à plus faible résolution spatiale, présente donc un intérêt pour des travaux de cartographie de grande envergure (Figure 4.30).

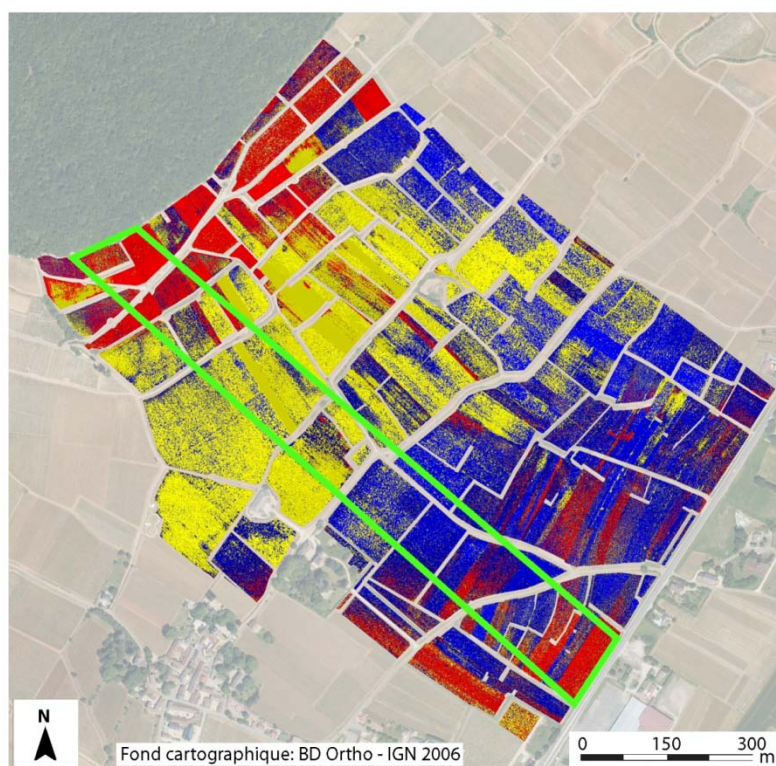


Figure 4.30 Classification non supervisée Isodata réalisée sur l'orthophotographie de l'IGN de juin 2006. Le transect d'étude est matérialisé par l'encadré vert.

¹⁴ La validation de la cartographie des EDS devra être effectuée par un retour terrain.

4.4.2 Caractérisation du substrat géologique à haute résolution sur de vastes espaces

De la même manière, l'ERT permet de caractériser la distribution des formations géologiques à haute résolution sous forme de profils 2D à l'échelle locale (d'un transect). Son utilisation à des fins cartographiques peut être adaptée par l'acquisition de plusieurs profils spatialement répartis le long des versants. Dans ce cas, l'ERT permet de définir des zones présentant des terrains homogènes et de déterminer leur géométrie dans l'espace en trois dimensions. Cette caractérisation 3D peut être réalisée par des corrélations entre les profils 2D (pseudo 3D) ou par l'interpolation de l'ensemble des données acquises en 3D (Chambers *et al.*, 2006). Cette approche a déjà été testée sur un petit secteur de la Côte, sur une partie du versant de l'appellation Marsannay, sur la commune de Chenôve, au lieu-dit « Clos du Roy » (Rémond, 2005). Cette reconstitution 3D du secteur a permis de proposer une nouvelle interprétation de la carte géologique au 1/50 000 (Figure 4.31).

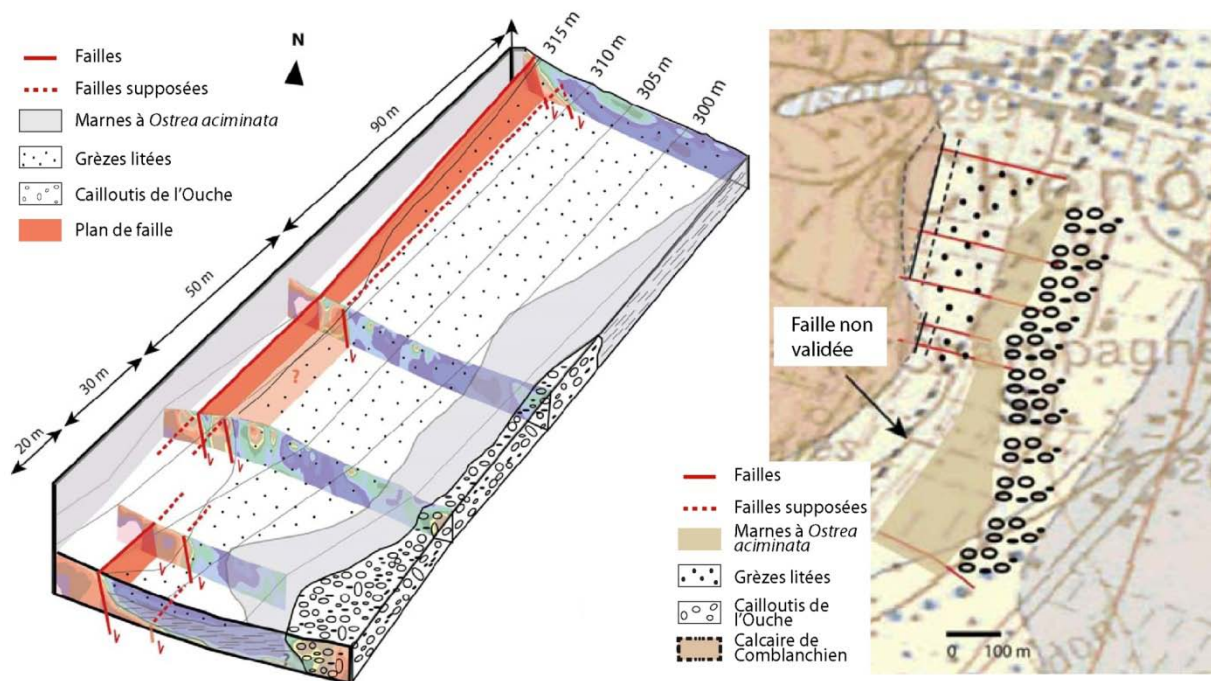


Figure 4.31 Bloc diagramme en 3D de la géologie du versant du « Clos du Roy » (à gauche) et nouvelle interprétation géologique du secteur (à droite)(d'après Rémond, 2005).

4.4.3 La spectroscopie proche infrarouge comme outil de détermination des sols

Pour toutes les méthodes cartographiques, un retour terrain est nécessaire afin de caractériser les sols des unités cartographiques définies. Ces observations sont généralement complétées par des analyses de sol au laboratoire. Ces dernières présentant un coût important, elles ne peuvent être réalisées sur de nombreux prélèvements. Une alternative pourrait être employée pour limiter le nombre d'échantillons et d'analyses. La Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR) permet de quantifier différents constituants du sol en utilisant des bases de données importantes et certaines régions du

spectre (Stenberg *et al.*, 2010). Cette technique présente un intérêt pour les travaux de cartographie des sols. Dans le cadre d'une mise en situation professionnelle, un groupe d'étudiants de troisième année de l'école d'ingénieur Agrosup Dijon a testé la possibilité d'identifier différents types de sol viticole à partir de leur signature spectrale dans le VIS-PIR (Chevigny *et al.*, 2014a). Les spectres ont été acquis à l'aide du spectromètre FieldSpec 3 (ASD Inc.) sur les échantillons prélevés dans le cadre de cette thèse, en condition de laboratoire. L'information globale des spectres a été traitée par des outils de réduction de dimension (ISOMAP¹⁵, t-SNE¹⁶). L'objectif de l'ISOMAP est de préserver la géométrie globale du jeu de données à travers l'utilisation d'une métrique géodésique (Tenenbaum *et al.*, 2000). La t-SNE permet d'extraire l'information du spectre en se basant sur l'analyse statistique de la similarité, avec pour effet de regrouper les spectres dont les propriétés sont les plus proches (Van Der Maaten et Hinton, 2008). Une technique d'apprentissage supervisée, la SVM¹⁷, a été utilisée pour classer les spectres et évaluer l'erreur de reconnaissance automatique.

Les premiers résultats obtenus ont montré que les quatre sites d'études peuvent être individualisés par spectrométrie proche infrarouge (Figure 4.32A). Certains sites présentent un étalement des données qui pourrait correspondre à des variations progressives des caractéristiques physico-chimiques sur le versant. Pour d'autres sites, les données se répartissent sous forme de groupes qui se superposent d'un versant à l'autre. Cette répartition peut traduire la présence de types de sol distincts au sein d'un même versant, qui peuvent être observés sur d'autres versants. De plus, plusieurs tendances permettent d'individualiser les types de sol. Les sols décarbonatés ou décarbonatés en surface (ellipse jaune), les sols carbonatés (ellipse bleue) et les sols rédoxiques (ellipse rouge) semblent former des groupes à l'issue de la t-SNE (Figure 4.32B). Ces premiers résultats encourageants sont en cours de validation par un échantillonnage externe à ces secteurs d'apprentissage. Cette étude, réalisée en condition de laboratoire, pourrait être adaptée à une utilisation au champ, en prenant compte des paramètres qui vont influencer le signal, tels que l'humidité et le rayonnement lumineux. La rapidité et le faible coût de cette méthode présentent un intérêt certain pour les travaux de cartographie des sols à grande échelle, permettant ainsi de réduire le nombre d'échantillons et d'analyses. Elle pourrait également être utilisée pour caractériser les EDS et valider leur distribution spatiale définie par imagerie.

¹⁵ ISOMAP : Isometric Feature Mapping (cartographie d'identité isométrique)

¹⁶ t-SNE : t-Distributed Stochastic Neighbor

¹⁷ SVM : Support Vector Machine

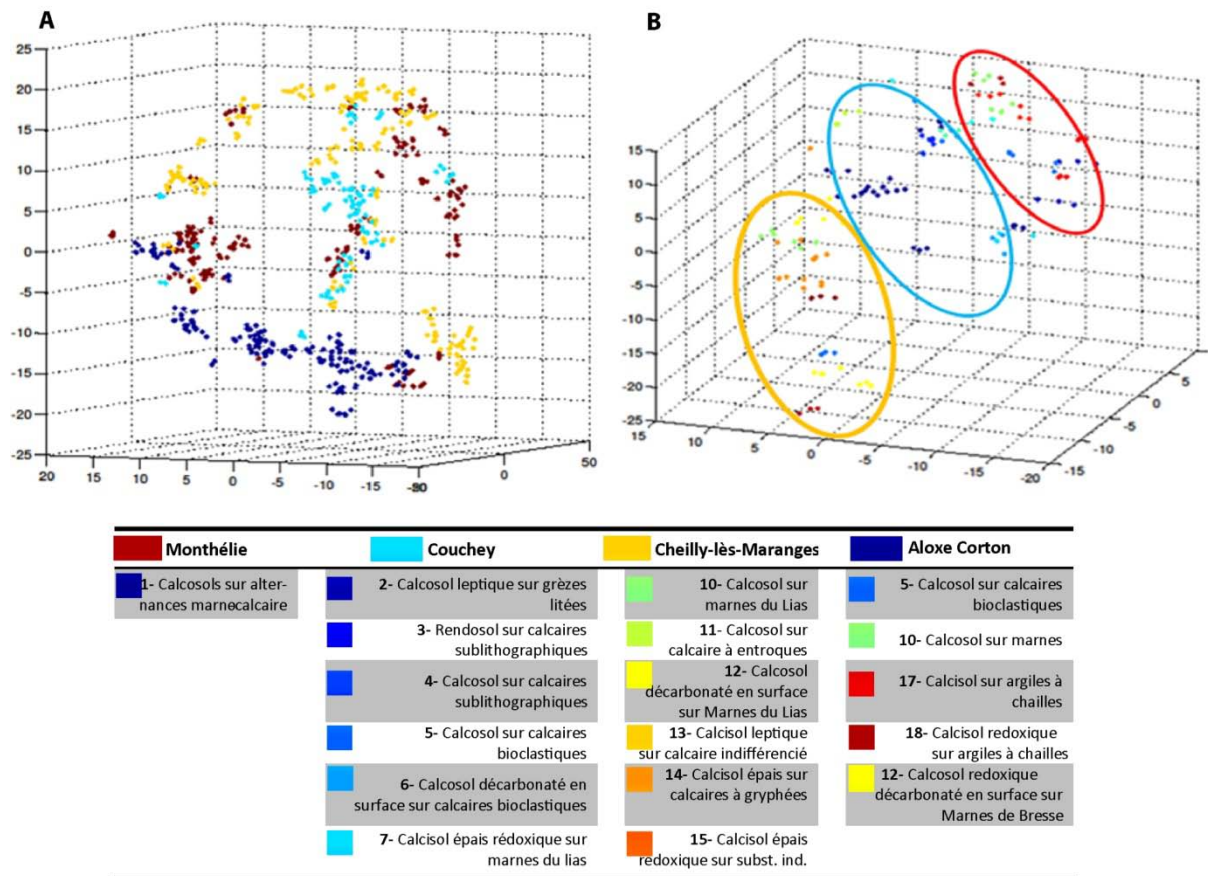


Figure 4.32 Représentation 3D de la classification issue de la t-SNE en fonction des quatre secteurs d'étude (A) et des différents types de sol (B). Des tendances sont observables sur la représentation graphique en 3D alors que la dimension intrinsèque des données est de 5 (d'après Chevigny et al., 2014a).

L'ensemble de ces techniques utilisées conjointement pourrait être employé pour produire des cartes de sols et/ou du substrat géologique, sur de vastes étendues à haute résolution spatiale.

**Synthèse de la deuxième partie « Diversité
géopédologique à l'échelle du versant pour
divers contextes géologiques »**

Synthèse de la deuxième partie « Diversité géopédologique à l'échelle du versant pour divers contextes géologiques »

Du point de vue méthodologique, l'objectif principal est d'évaluer le potentiel de diverses techniques d'imagerie utilisées conjointement, afin de cartographier la diversité pédologique et géologique des versants viticoles à haute résolution spatiale. La méthode a été réalisée sur trois versants viticoles de la Côte, présentant des contextes géologiques différents, afin d'évaluer la robustesse de cette approche. Dans une première partie, la synthèse répond à ces attentes méthodologiques en évaluant l'intérêt des diverses techniques utilisées et de leur mise en commun. La seconde partie de la synthèse est de caractériser la diversité pédologique des sols viticoles de versant et d'identifier les facteurs qui la contrôlent.

Synthèse méthodologique

En secteur viticole, le sol est souvent recouvert par diverses composantes « hors sol » qui ne caractérisent pas ses états de surface. Dans ce contexte de culture pérenne, ces composantes sont omniprésentes et discontinues. Les images à moyenne résolution spatiale intègrent à la fois les composantes « sol » et les composantes « hors sol ». *A priori*, la résolution spatiale THRS permet de localiser et de s'affranchir de ces composantes « hors sol » pour ne garder, finalement, que les composantes « sol » qui constituent la surface du sol. Ces dernières ont pu être discriminées à partir des images THRS acquises par un vecteur aéroporté, de type drone hélicoptère. Ce choix résulte des performances proposées par ce vecteur, *i.e.* flexibilité d'acquisition, stabilité, faible coût d'acquisition. Le choix de l'utilisation d'un domaine spectral réduit au domaine du visible s'explique par les capacités d'embarquement limitées au moment de l'acquisition. Pour ce travail, la faible résolution spectrale a été compensée par la très haute résolution spatiale.

L'analyse des images THRS a été réalisée à partir d'une classification d'images non supervisée, utilisant l'algorithme Isodata. Ce type de classification a été choisi, car il ne nécessite pas de connaissance *a priori* de la distribution spatiale des classes. Le résultat obtenu est donc indépendant des interprétations de l'image faite par l'utilisateur, comme c'est le cas dans les classifications supervisées.

Les principales composantes de la surface du sol, qui constituent les EDS et permettent de les caractériser, ont pu être cartographiées à partir de l'analyse d'images THRS. Sur les versants de la Côte, trois composantes principales ont été observées par l'imagerie THRS dans le domaine spectral du visible :

⇒ La **pierrosité de surface**, majoritairement composée d'éléments lithiques de couleur blanche, présente un contraste important avec la matrice du sol. Sur ces versants viticoles, la distribution de la pierrosité est contrôlée par le type de substrat géologique, et plus particulièrement pour les versants où les variations de faciès pour les calcaires sont importantes (Figure S.1A). Pour ce type de versant, la pierrosité de surface est la plus élevée pour les calcaires sublithographiques, *i.e.* Calcaires de Comblanchien et Calcaires de Prémieux (médiane égale à 44 %). Elle est de 33 % pour les calcaires argileux, tels que les calcaires argileux des Marnes de Pernand, de 23 % pour les calcaires bioclastiques, tels que les Calcaires à Entroques et les Calcaires de la Dalle Nacrée. Elle présente les valeurs les plus faibles sur les marnes, comme, par exemple, des Marnes du Lias et des Marnes de Bresse (médiane égale à 10 %). Les formations superficielles présentent également une pierrosité de surface importante de l'ordre de 30 à 40 %, telles que les argiles à chailles ou les Grèzes litées. Ces variations de pierrosité peuvent renseigner indirectement sur le type de substrat sous-jacent. Dans le cas des versants à faible variation de faciès (e.g. Cheilly-lès-Maranges), la pierrosité de surface n'est pas corrélée au type de substrat (Figure S.1B). Les zones, localisées sur des substrats de type calcaires argileux, marnes ou colluvions issus de formations marneuses, présentent toutes une pierrosité de surface de l'ordre de 20 %. Dans ce contexte, seules les formations superficielles issues de formations de calcaires bioclastiques peuvent être caractérisées par leur pierrosité de surface importante (médiane égale à 40 %).

La pierrosité de surface observée par imagerie THRS a pu être utilisée pour évaluer la distribution des sols sur les versants, du fait que la diversité des sols viticoles de la Côte est en partie contrôlée par la nature lithologique du substrat. Les Rendosols et Calcosols, observés sur les versants, présentent une forte pierrosité de surface (médianes égales à 30 %) (Figure S.1C et D). Les Calcosols rédoxiques et les Calcisols rédoxiques sont caractérisés par une faible pierrosité de surface (médianes respectivement égales à 15 % et 4 %). Cette relation n'est pas toujours valable, des divergences existant entre les sites à forte et faible variabilités de faciès. Par exemple, pour les Calcisols, la pierrosité de surface est forte pour les versants à forte variabilité de faciès (médiane égale à 30 %) et plus faible pour les autres types de versant (médiane égale à 19 %). De plus, pour les versants à forte variabilité de faciès, la pierrosité de surface des Calcisols est égale à celle des Calcosols et des Rendosols (Figure S.1C). En outre, la présence de formations superficielles localement distribuées sur le versant influence la distribution des sols. Les Calcisols rédoxiques sur les argiles à chailles présentent une très forte pierrosité de surface (médiane égale à 40 %). Celle-ci ne permet pas d'évaluer la profondeur des sols, les Rendosols et les Calcosols présentant la même pierrosité de surface. Néanmoins, elle donne des informations sur le type de sol sous-jacent, plus particulièrement sur les versants à forte variabilité de faciès.

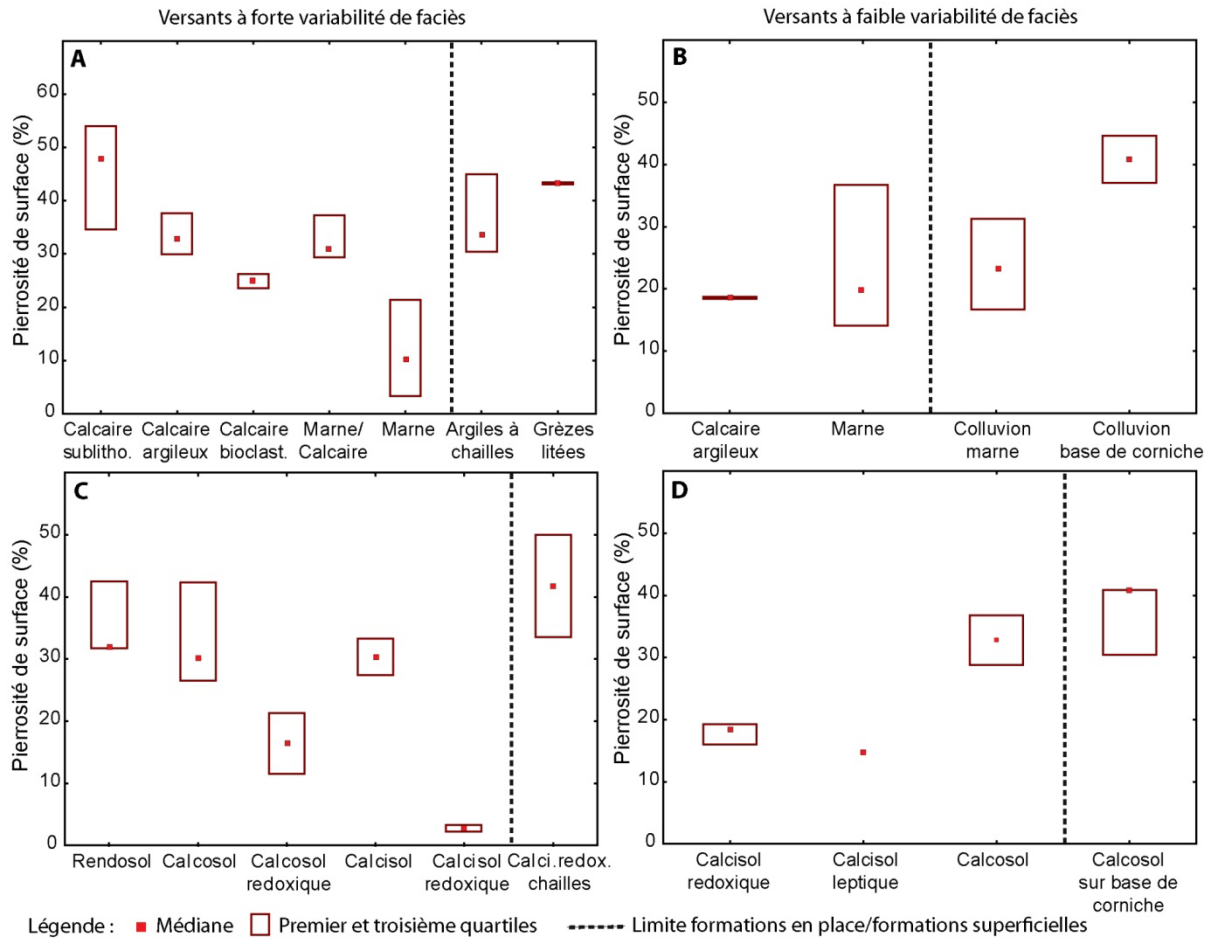


Figure S.1 Distribution de la pierrosité de surface en fonction du type de substrat (A) et du type de sol pour les deux contextes géologiques étudiés (B). Données issues des versants d'Aloxe-Corton et de Couchey pour les versants à forte variabilité de faciès, et de Cheilly-lès-Maranges pour les versants à faible variabilité de faciès.

⇒ Sur les versants de la Côte, les variations de **couleur de la matrice** des EDS permettent d'obtenir des indications sur la distribution spatiale des propriétés chimiques des EDS. Les paramètres chimiques des EDS, caractérisés sur les trois secteurs d'études, présentent des caractéristiques colorimétriques particulières (Figure S.2). Le taux de carbonate de calcium total (CaCO_3) est corrélé avec le paramètre de clarté (L^*) de la matrice du sol, et plus particulièrement pour les teneurs supérieures à 40 g/100 g de CaCO_3 ($R^2 = 0,78$). Ces caractéristiques sont conformes aux observations faites par Courault (1989) lors de ses travaux sur la dégradation des états de surface du sol par télédétection. La teneur en carbone organique est corrélée avec le paramètre de chrominance (a^*), tout comme la teneur en fer libre est corrélée à la clarté (L^*). Ces variations des propriétés chimiques des EDS donnent des indications sur la distribution spatiale des sols, dans le cas où les propriétés de surface présentent des traits communs avec les sols sous-jacents.

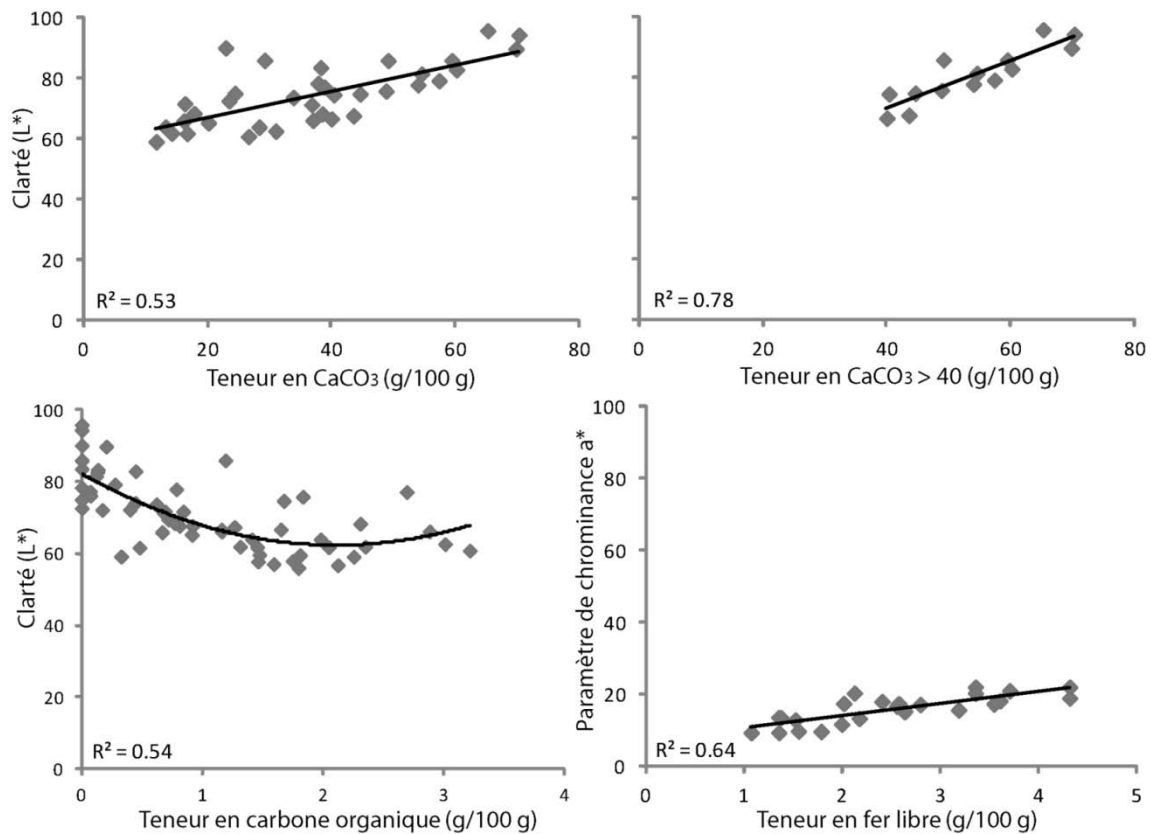


Figure S.2 Relation entre les propriétés chimiques et les paramètres colorimétriques de la matrice des sols, exemple du versant viticole d'Aloxe-Corton.

Des groupes d'EDS, présentant des caractéristiques chimiques spécifiques, ont pu être identifiés par l'analyse colorimétrique de la matrice des EDS des divers versants. Pour les sols de la Côte, la couleur de la matrice des EDS peut être utilisée pour discriminer les types de sol sous-jacents. Pour tous les versants étudiés, les EDS des Calcosols et des Rendosols présentent des caractéristiques colorimétriques particulières, différentes de celles des Calcosols rédoxiques, des Calcisols et des Calcisols rédoxiques (Figure S.3). Certains types de sol peuvent être discriminés par la couleur de la matrice enregistrée sur les images THRS dans le domaine spectral du visible.

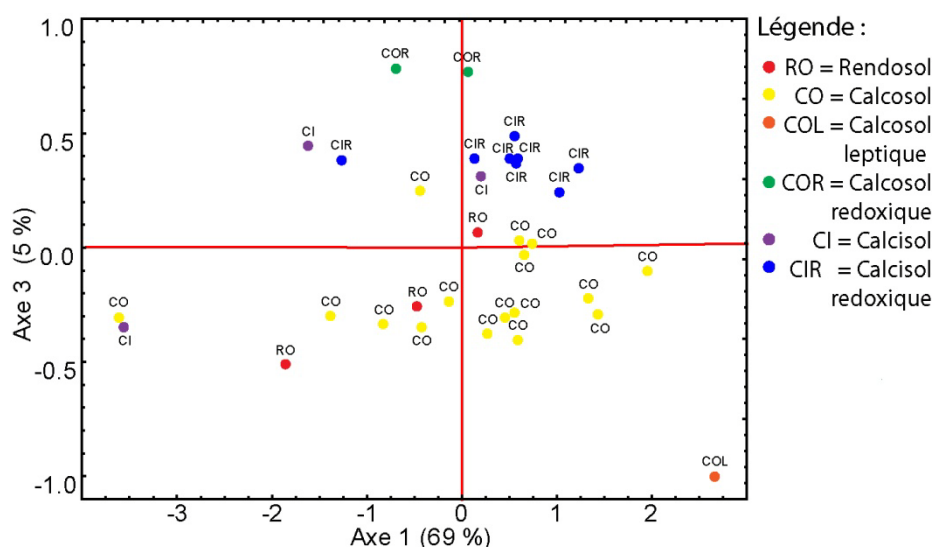


Figure S.3 Analyse en Composantes Principales calculée sur les paramètres colorimétriques (L^* , a^* et b^*) des EDS de chaque sondage pédologique pour l'ensemble des secteurs étudiés. La projection des variables sur le plan factoriel F1-F3 permet de discriminer certains types de sol.

⇒ La diversité des **pratiques culturelles** sur la Côte influence la reconnaissance des propriétés physico-chimiques des EDS par imagerie. Sur les secteurs d'études, nous avons pu mettre en évidence que la rugosité de surface contrôlait en partie la reconnaissance des EDS. Certains EDS, présentant des caractéristiques physico-chimiques communes, ont été reconnus différemment par l'analyse d'images du fait de la rugosité de surface. Les variations de rugosité ont permis de discriminer la localisation des rangs de vigne et des inter-rangs. De plus, des parcelles présentant des pratiques culturelles particulières, *i.e.* le buttage et le désherbage chimique intégral, ont pu être identifiées. Pour les parcelles enherbées, la caractérisation des propriétés physico-chimiques de la surface du sol n'a pu être réalisée quand la couverture végétale était trop importante. Il a également été observé que la date du dernier travail du sol avait une influence sur la discrimination des EDS.

Sur les versants de la Côte, la caractérisation des **formations géologiques** a été réalisée par tomographie électrique (ERT). L'acquisition de données de façon « pseudo-continue », à une résolution pluri-métrique, a permis de discriminer et de localiser les variations lithologiques non cartographiées au 1/50 000. Les alternances marno-calcaires, les différents types de calcaires, les formations superficielles ont pu être observés et identifiés, malgré le faible nombre d'affleurements présents sur les versants. Des failles ont également été localisées sur les trois versants prospectés ; elles mettent en contact des formations de natures variées, ou des faciès différents, contribuant à une diversification du substrat à l'échelle locale. La localisation des failles depuis la surface est très

difficile à effectuer dans le cas où aucune variation topographique ne met en évidence la présence de ces failles. C'est pourquoi il n'est pas aisé de les localiser par des méthodes cartographiques conventionnelles.

Cette technique de caractérisation du substrat géologique présente tout de même quelques inconvénients en contexte viticole de versant, d'où l'importance du positionnement du profil sur le versant. L'implantation du dispositif devant être faite de façon rectiligne, la localisation du profil est contrainte par la géométrie du parcellaire viticole. De plus, l'anthropisation du milieu par la présence de contours remblayés, de murs, de chemins et de routes conduit à dégrader la qualité des données acquises. Sur la Côte, la caractérisation des formations lithologiques est communément réalisable dans le cas de versants qui présentent une forte variabilité de faciès. Pour les versants à faible variabilité, la reconnaissance des diverses formations par l'ERT est plus difficilement réalisable. Il est donc nécessaire de combiner des affleurements avec les profils.

L'ensemble des données acquises pour chaque versant, traité par une **approche interdisciplinaire**, a conduit à la réalisation de cartes pédologiques à haute résolution pour chaque secteur étudié, au 1/5 000. Les limites cartographiques dessinées ont été définies à partir de déterminants pédologiques, géologiques et topographiques à une résolution spatiale de l'ordre du mètre, acquis en « continu ». L'utilisation croisée des diverses techniques offre la possibilité d'affiner, voire de corriger les « défauts » de chaque technique. L'application de cette approche sur trois versants présentant des contextes géologiques différents a permis de déterminer le potentiel de chaque technique en fonction de ces contextes (Tableau S-2).

	Variabilité de faciès	Imagerie THRS	ERT	ARP	MNT HR	Prospection pédologique
Substrat	Forte	++	+++	+++	+/-	+/-
	Faible	+/-	+/-	NR	+/-	+/-
Sol	Fort	++	+/-	+++	+/-	+++
	Faible	+/-	+/-	NR	+/-	+++
Topographie	Fort	-	-	-	+++	-
	Faible	-	-	-	+++	-
Résolution spatiale		THR	HR	THR	THR	Fonction de l'échelle
Échelle d'étude		Parcelle/ Transect versant	Transect versant	Parcelle/ Transect versant	Versant	Toutes

Tableau S-2 Tableau de synthèse illustrant l'aptitude des diverses techniques à reconnaître les paramètres qui contribuent à la diversité géopédologique des versants viticoles de la Côte.

- ⇒ Les variations spatiales de ***lithologie*** et les ***faciès*** associés peuvent être caractérisés par les techniques géophysiques (ERT, ARP[®]) et indirectement par l'imagerie THRS dans les longueurs d'onde du spectre du visible, quand la variabilité de faciès est importante. Les MNT HR peuvent localiser les fines variations topographiques qui correspondent généralement à des contrastes lithologiques.
- ⇒ Les ***sols*** sont renseignés par des sondages à la tarière et des fosses pédologiques, de façon ponctuelle. Leur spatialisation peut être appréhendée grâce à l'imagerie THRS dans le visible, par la caractérisation des EDS pour les versants à forte variabilité de faciès. Néanmoins, les limites des unités cartographiques de sols, définies à partir de la cartographie des EDS, ne sont pas toujours corrélées avec les sondages pédologiques ou les changements lithologiques, ce qui pourrait s'expliquer par l'influence des pratiques culturales qui tendent à homogénéiser les EDS à l'échelle de la parcelle, ou bien par l'influence des processus de colluvionnement qui homogénéisent également l'état de surface, masquant ainsi les caractéristiques physico-chimiques des sols sous-jacents. L'ARP[®] permet d'observer les variations des propriétés du sol sur plusieurs profondeurs d'investigation. De plus, les données sont acquises à l'échelle du mètre. Cette technique est donc adaptée à la cartographie des sols, cependant elle reste généralement employée à l'échelle de la parcelle. L'imagerie THRS dans le visible, pour les versants à faible variabilité de faciès, n'a pas permis d'établir de relation entre la surface du sol et les sols. Sur les versants à forte variabilité de faciès, le type de sol est principalement lié à la lithologie. Dans ce cas, l'ERT est adaptée à la délimitation précise des unités cartographiques de sol, sans pour autant pouvoir les caractériser.
- ⇒ La ***topographie*** peut être caractérisée à partir de modèles numériques de terrain à haute résolution. Cette technique, peu coûteuse, peut être utilisée à grande échelle et sur des surfaces importantes, telle que les aires d'appellation.

Cette démarche interdisciplinaire a permis de déterminer les facteurs qui contrôlent la diversité des sols viticoles de versant sur la Côte.

Diversité des sols viticoles de versant sur la Côte

Les investigations menées sur les trois versants ont démontré que les sols, sur les versants viticoles de la Côte, présentent une distribution spatiale particulière, dépendante du substrat géologique et de la topographie ; ils se répartissent selon le modèle de topolithoséquence. Ce modèle a été observé sur l'ensemble des sites étudiés, indépendamment du contexte géologique ; néanmoins, quelques divergences ont été observées. Sur les versants où les variations de faciès sont importantes,

les changements lithologiques conduisent systématiquement à un changement de type de sol, alors que sur les versants où la variabilité de faciès est moins marquée, les variations topographiques conduisent à une diversification des sols. De manière générale, la partie amont des versants, où les pentes sont les plus fortes (10 à 20°), présente des formations jurassiques calcaires ou marneuses ; les sols sont des Rendosols et des Calcosols peu profonds. Quand la pente s'adoucit (inférieure à 5°), sur diverses formations géologiques en place ou formations superficielles, l'épaisseur des sols augmente ; les sols sont des Calcisols rédoxiques et des Calcosols rédoxiques. Cette distribution est cohérente avec les observations d'études antérieures réalisées sur la Côte (Blaquière, 1967 ; Leneuf, 1988 ; Mériaux *et al.*, 1981). Cependant, ces travaux, qui ont abouti à la production d'une carte pédologique de la Côte au 1/50 000, ne caractérisent pas la distribution spatiale des sols à grande échelle. La démarche interdisciplinaire utilisée dans le cadre de cette thèse a permis d'affiner cette cartographie par la production de cartes pédologiques au 1/5 000, où la précision des limites cartographiques est d'ordre pluri-métrique. Cette approche combinant des données acquises de façon « pseudo-continue » à très haute résolution spatiale a conduit à affiner la délimitation des unités cartographiques de sols. Elle permet de caractériser les sols au niveau de la série de sols américaine « Soil Series ». À ce niveau d'observation, les unités cartographiques de sols peuvent être qualifiées d'unités « fonctionnelles ».

Pour les deux versants présentant une variabilité de faciès importante (Couchey et Aloxe-Corton), la distribution des niveaux d'AOC est étroitement liée à la distribution spatiale des types de sol (Figure S.4). Cette relation n'a pas été observée pour le versant de Cheilly-lès-Maranges, où le secteur d'étude est uniquement en appellation Premier Cru. Les vignobles de haut niveau qualitatif sont localisés à l'amont et dans la partie médiane des versants, sur des Rendosols et des Calcosols calcaires peu épais, alors que les AOC communales sont situées en bas de versant sur les sols rédoxiques profonds. Ces observations soulignent l'influence du sol et de la géologie sur la qualité de la production viticole. Cette relation entre les AOC et les types de sol a déjà été observée sur la Côte par les travaux de Leneuf (1988).

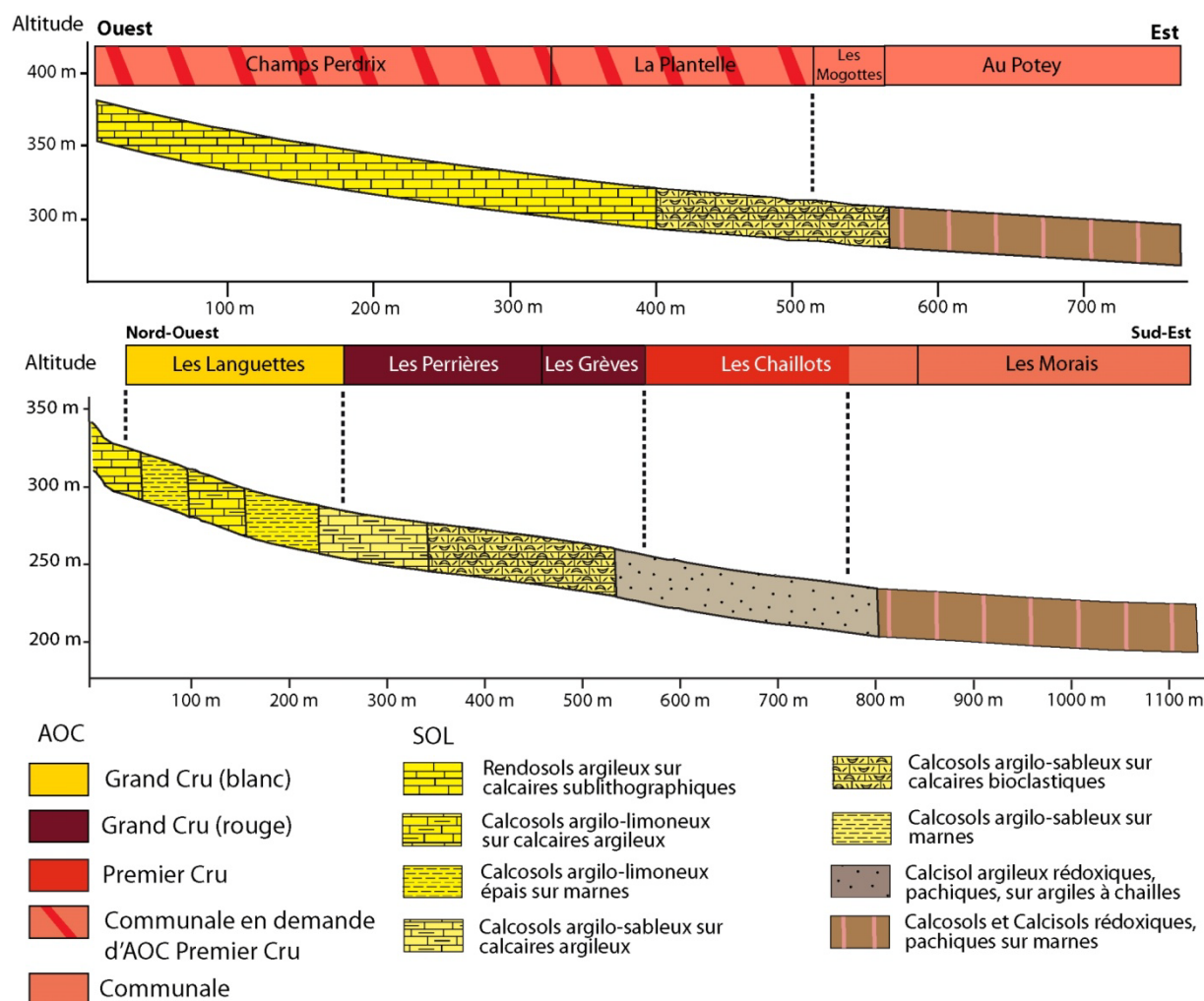


Figure S.4 Distribution des sols des versants de Couchey et d'Aloxe-Corton, en fonction des limites d'AOC. L'appellation Marsannay, située en partie sur le versant de Couchey, fait actuellement l'objet d'une demande de reclassement des AOC de l'appellation. Les « futurs Premiers Crus » sont localisés sur des Rendosols et Calcosols issus de l'altération de formations calcaires.

Partie III - Diversité des sols à l'échelle parcellaire : Facteurs naturels et anthropiques

Chapitre 5 - Diversité des sols viticoles à l'échelle parcellaire : influence des facteurs naturels sur l'érosion

Chapitre 5 Diversité des sols viticoles à l'échelle parcellaire : influence des facteurs naturels sur l'érosion

Introduction

Sur la Côte, les variations lithologiques peuvent évoluer à l'échelle de quelques décamètres, et peuvent donc être observées à l'échelle de la parcelle. Elles conduisent à une diversification intra-parcellaire des propriétés physico-chimiques du sol et des états de surface. Il est reconnu que l'érosion hydrique des sols est influencée par ces propriétés, telles que la texture, la structure, la pierrosité, etc. (Le Bissonnais *et al.*, 2002 ; Toy *et al.*, 2002). La pierrosité et plus particulièrement la pierrosité de surface va diminuer l'effet splash lié à l'impact des gouttes d'eau de pluie (Poesen et Lavee, 1994). Elle va également contribuer à augmenter la rugosité de surface et réduire ainsi l'intensité du ruissellement hydrique.

Nous proposons, dans ce chapitre, d'évaluer l'influence de la pierrosité de surface et/ou de subsurface sur l'érosion hydrique des sols à l'échelle parcellaire. Cette approche a été réalisée d'une part, par la caractérisation des états de surface du sol par imagerie à très haute résolution spatiale, présentée sous la forme d'un article publié dans la revue *Catena* (Quiquerez *et al.*, 2014), et d'autre part, par la mesure de la résistivité électrique de l'horizon superficiel du sol couplée à une carte d'érosion réalisée à partir de la méthode SUM (Brenot *et al.*, 2008).

5.1 Article 2 : Assessing the impact of soil surface characteristics on vineyard erosion from very high spatial resolution aerial images.

Impact des états de surface du sol caractérisés par imagerie aérienne à très haute résolution spatiale sur l'érosion des sols viticoles.

Catena 116 (2014) 163-172

Received 21 March 2013

Received in revision from 28 Novembre 2013

Accepted 2 December 2013

Résumé : La méthode présentée dans cet article propose une cartographie de la diversité intra-parcellaire des états de surface du sol à très haute résolution spatiale (5cm). Cette approche combine une technique de classification d'images acquises à très haute résolution spatiale (THRS) avec des observations ponctuelles de terrain. La classification non supervisée ISODATA a permis d'obtenir une cartographie des états de surface du sol (EDS) ; les relevés effectués sur le terrain ont permis de caractériser les propriétés physico-chimiques de ces EDS (pierrosité, teneur en carbonate de calcium, teneur en carbone organique, teneur en azote total). Cette méthode a été appliquée sur une parcelle du versant viticole de Monthelie (Côte de Beaune). La carte d'érosion de la parcelle, obtenue par une méthode de dendrogéomorphologie, a permis de discuter de l'impact des EDS et de la pente sur la localisation de l'érosion et sur son intensité à l'échelle du mètre carré. Cette méthode a conduit à l'identification de quatre classes d'EDS par analyse d'images, présentant une distribution spatiale spécifique au sein de la parcelle.

La cartographie des EDS à très haute résolution et leur caractérisation physico-chimique ont été comparées à la distribution spatiale de l'érosion et à son intensité. Il en ressort que la distribution spatiale de l'érosion des sols viticoles est contrôlée par la topographie et par la distribution spatiale de la pierrosité.

Assessing the impact of soil surface characteristics on vineyard erosion from very high spatial resolution images (Côte de Beaune, Burgundy, France)

Amélie Quiquerez ^{a,*}, Emmanuel Chevigny ^a, Pascal Allemand ^b, Pierre Curmi ^c, Christophe Petit ^d,
Philippe Grandjean ^b

^a UMR CNRS 6298, ARTeHIS, Université de Bourgogne, 6, Boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

^b UMR CNRS 5276, LGL TPE, Université Claude Bernard Lyon 1 – ENS Lyon, 69622, Villeurbanne
Cedex, France

^c Agrosup, UMR1347 Agroécologie, BP 86510, F-21000 Dijon, France

^d UMR CNRS 7041 ARSCAN, Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 3 rue Michelet, 75005 Paris

* *Corresponding author:* amelie.quiquerez@u-bourgogne.fr

Abstract: We describe a new method to map intra-plot soil surface heterogeneities at a 5 cm spatial resolution. Our approach unites aerial image classification acquired at very high spatial resolution (VHSR) with local soil sampling. VHSR aerial image processing, based on image classification, allows precise mapping of the spatial distribution of soil surfaces; soil sampling defines soil typology by physical and chemical characteristics. This method has been applied to a plot area located on the hillslopes of Burgundy vineyards (Monthelie, France), where decennial erosion data were already available, in order to assess the effect of soil surface characteristics and slope angle on erosion intensity and localisation. From this method, four classes of radiance were distinguished and interpreted as four soil surface state classes (SSC), defining specific areas within the studied plot. These SSCs have been characterized by their grain-size distribution, their organic carbon, calcium carbonate, and total nitrogen contents.

By allowing soil surface states to be mapped at five centimetre resolution, this approach provides novel insights into the characterization of soil patterns and into erosion analysis on cultivated hillslopes. Our work shows that the spatial distribution of soil erosion is related to the local slope steepness but also to the spatial distribution of stoniness that results from water and tillage erosion processes.

Keywords: topsoil mapping; erosion; remote sensing; very high spatial resolution; unmanned aerial vehicle; vineyards; soil degradation

1. Introduction

Although vineyards cover an only small portion of the Earth's surface, they provide an excellent example of an erosive land-use context. Vineyards undergo substantial soil loss, ten to thousand tonnes per hectare per year, in comparison with other types of agricultural land (Boardman and Poesen, 2006; Brenot et al., 2008; Cerdan et al., 2010; Hooke, 2006; Krause et al., 2003; Le Bissonnais et al., 2002; Paroissien et al., 2010). They epitomise a situation where soil sustainability is threatened, leading in some cases to major economic and social problems (Le Bissonnais et al., 2002; Martinez-Casasnovas et al., 2005; Martinez-Casasnovas and Ramos, 2006).

Several studies have already shown the importance of relief (slope length and mean slope angle) both in the morphology of initiated erosive structures and in the volumes involved in soil erosion (Fox and Bryan, 2000; Hooke, 2006; Martinez-Casasnovas et al., 2005; Montgomery and Dietrich, 1994; Quiquerez et al., 2008; Wischmeier and Smith, 1978). At metre scale, however, the erosion rate sometimes exhibits intra-plot heterogeneity, which cannot be explained by mean slope angle and slope length of the plot (Brenot et al., 2008; Cerdan et al., 2010). As soil surface characteristics (soil cover, grain size, texture etc ...) evolve spatially at the metre scale (Corbane et al., 2008), they too can influence hydric properties and erosion rates (Arnaez et al., 2007; Auzet et al., 1995, 2004, 2005). Agricultural practices may also affect soil variability and erosion rates. For example, tillage may induce some translocation and dispersion of the plough layer (Armand et al., 2009; Blavet et al., 2009; Govers et al., 1994; Govers et al., 1999; Poesen et al., 1994; Schumacher, 1999).

Intra-plot soil surface variability may be investigated from soil surface mapping (Mulder et al., 2011). Soil surface mapping often uses conventional soil surveys and laboratory analyses that are precise but time-consuming and extremely costly because of the number of measurements needed for soil surface mapping at a high spatial resolution (Mulder et al., 2011; Webster and Oliver, 1990). Conversely, other methods, using remote sensing techniques that have emerged over the last decades, are recognised as efficient methods to examine soil and landform relationships (Martin and Timmer, 2006; Mulder et al., 2011). Remote sensing techniques have successfully been employed for soil and terrain mapping at a global or catchment scale (Irvin et al., 1997; Martin and Timmer, 2006) and are expected to contribute to Digital Soil Mapping as an auxiliary data source (McBratney et al., 2003; Lagacherie et al., 2007) (see Mulder et al., 2011 for a review). Aerial or satellite imagery have also demonstrated their usefulness when studying the relationships between hydrological runoff, sediment erosion and soil surface characteristics (King et al., 2005), evaluating surface roughness (Baghdadi et al., 2002), or assessing intra-plot soil surface variability by estimating soil surface reflectance (Corbane, 2006; Touriño Soto, 2005; Wassenaar et al., 2005; Corbane et al., 2008).

Our approach combines sampling and remote-sensing techniques at Very High Spatial Resolution (VHSR), i.e. at a five-centimetre spatial scale, to highlight fine spatial distribution of soil

surface heterogeneities. This is an intermediate scale, between the regional scale of Digital Soil Mapping and limited local observations. The capacity and efficiency of remote sensing techniques to derive soil information have been proven at the regional scale, and are now applied in this study at plot scale.

Our approach is applied in Burgundy vineyards where decennial erosion data are already available at a square-metre scale (Brenot, 2007; Brenot et al., 2008), to assess the influence of soil surface heterogeneity and slope angle on erosion intensity in the Monthelie vineyards.

In the following sections, the plot characteristics (soil surface topography and soil erosion data) and aerial image classification will be presented. The results of soil mapping will be combined with an intra-plot soil description allowing soil types to be defined by physical and chemical characteristics (stoniness, grain-size distribution, organic carbon, calcium carbonate, and total nitrogen content). Finally, soil surface topography, topsoil types and soil erosion data will be compared to assess their effects on erosion.

2. Material and Methods

2.1. The study area

2.1.1 Description of the study site and plot characteristics

The study site is located on the hillslopes of the Monthelie vineyards, in the “Côte de Beaune” area (Burgundy, France) (Fig. 1A). The hillslopes, shaped by the Bressan rifting, form the eastern border of the Burgundy plateau. Vine-growing are attested on this fault-scarp relief since the Middle Ages (Garcia et al., 2010). The hillslopes are overlain by a silty-clayey calcosol (French classification, Baize and Girard, 2008) that develops on Jurassic marls, where white limestones contrast with the dark matrix of soil (Fig. 1B, Fig. 2A). The plot is bordered upslope by the limestone plateau. Downslope, the plot is bounded by a rill collecting water and sediment. Augers holes performed on the plot reveal that the soils are superficial and range in thickness from 30 cm upslope to 50 cm downslope. The landscape is characterised by a vine monoculture where the plot limits, i.e. paths and walls, form the only discontinuities on the hillslopes (Garrier, 1989). Vine stocks are planted 1 m apart, in rows 1 m apart; chemical weeding produces non-grassed rows; tillage in the inter-row is performed once or twice a year. The tillage is superficial and the inter-row roughness induced by the straddle-tractor traffic is minimal. These soil management practices and the slope-oriented vine rows are all factors which greatly increase erosion.

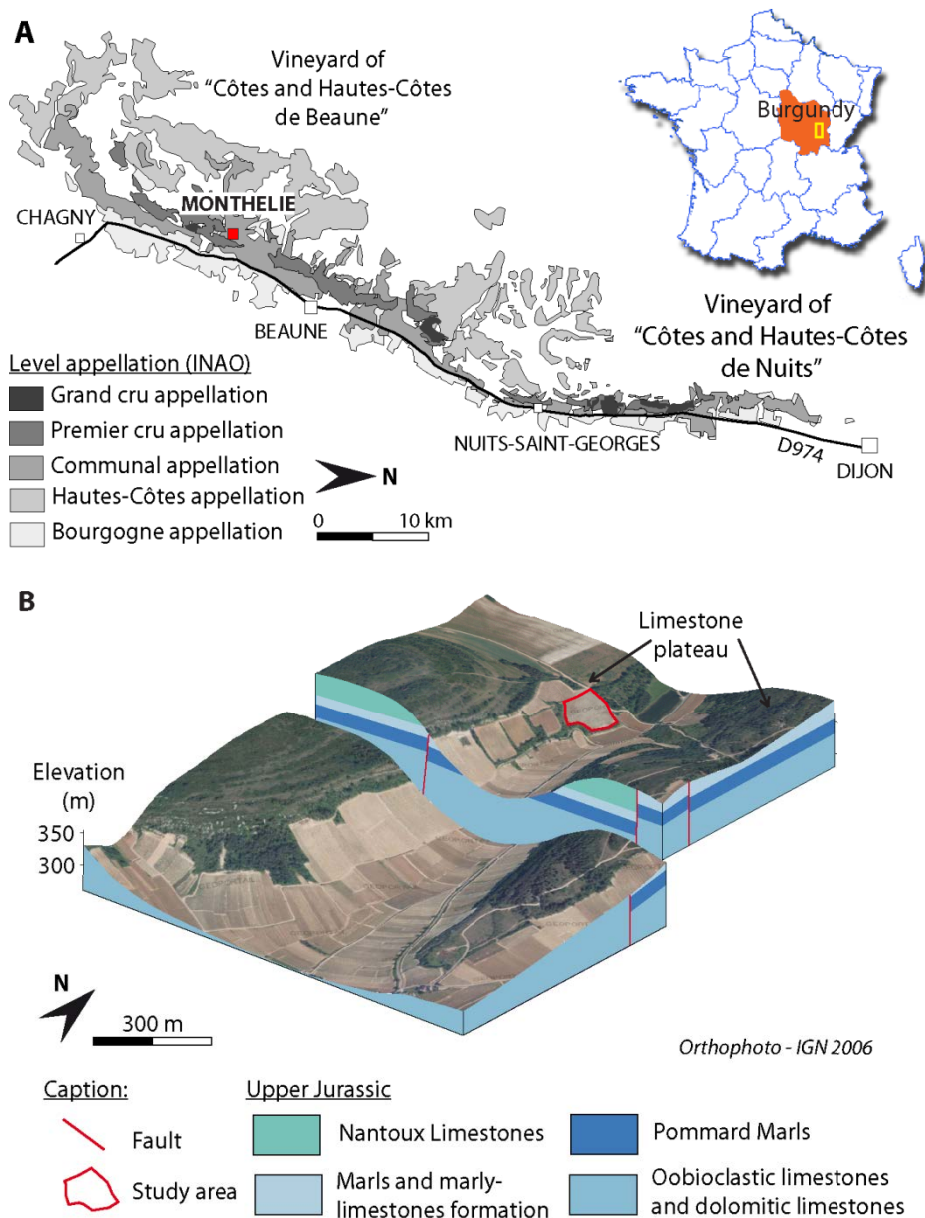


Fig. 1: (A) Location of the study area in the Monthelie vineyard, in the Côte de Beaune area (Burgundy, France) and (B) Geology of the study area.

2.1.2. Topographic data

The studied plot (833.880 m, 6.657.500 m; Lambert 93 projection) is located on the northern part of the Combe Danay valley, on the upper part of the hillslope. The plot, corresponds to a total area of 9,500 m² (Fig. 2A). A digital elevation model (DEM) was obtained from a topographic survey with a laser theodolite (resolution of 15 m, horizontal and vertical precision < 1cm). Slopes vary regularly from 1° to 13° from a planar to concave morphology (Fig. 2B). Three main slope classes were distinguished: the steepest slopes (> 9°) are located in the south-western part of the plot (covering 24% of the plot), the central part is characterized by moderate slopes (5 to 9°, covering 67% of the plot),

while gentle slopes (less than 5°) are found in the upper part of the plot (covering 9% of the plot). In this plot, vines were planted in 1982 with the rows in the steepest slope direction.

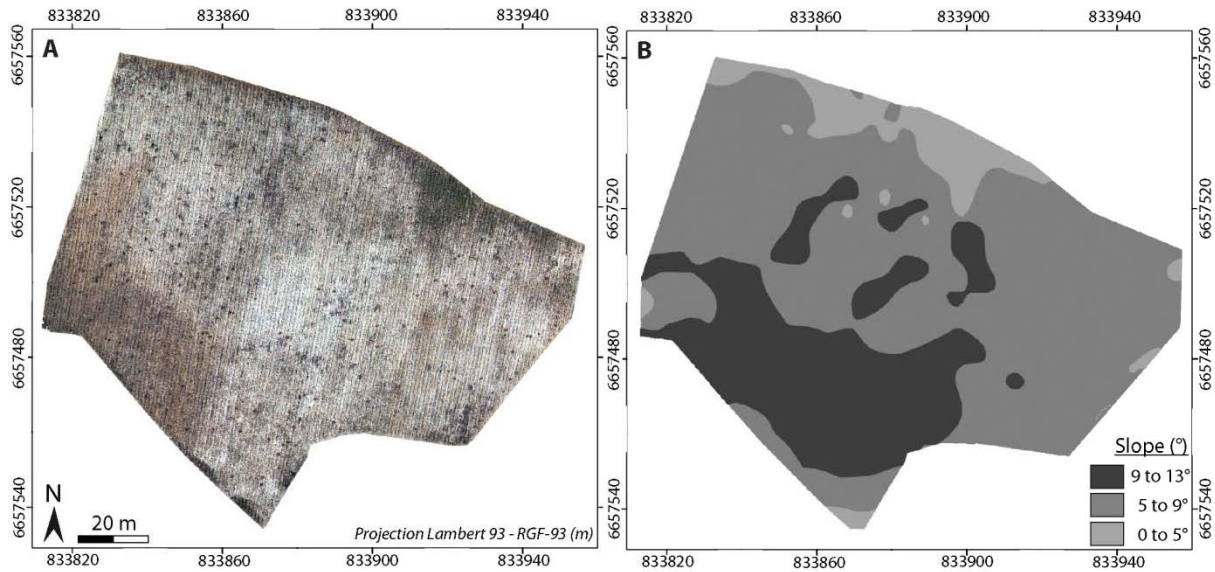


Fig. 2: (A) VHSR mosaic of the plot obtained from the unmanned DRELIO helicopter at a 5 cm spatial resolution. (B) Slope map illustrating three slope classes: gentle (< 5°), moderate (5 to 9°) and steep slopes (> 9°).

2.1.3. Erosion data

A 30-year average erosion map was performed at a square-metre scale, from more than 9000 stock unearthing measurements (SUM method, see Brenot, 2007; Brenot et al., 2008) (Fig. 3A). The principle of soil loss measurement is based on considering the unearthing of the stock located on the vine plants as a passive marker of soil-surface vertical displacement since the year of plantation. Plantation practice, regimented by regional by-laws demands that the scion-graft union be located 1 cm above soil surface when vines are planted (Galet, 2000), in order to prevent contact between the scion and the soil. During vine's growth, the stock develops its own roots that are concentrated at the lower part of the stock while vine shoots develop from the scion (Brenot et al., 2008). The stock exposure is interpreted as reflecting the dynamics of soil aggradation/ablation, considering the scion-graft limit to be a marker of the initial topography. Plantation legislation imposes a density of 10,000 vines per hectare which allows the quantification of soil erosion at 1 metre resolution (Fig. 3B). Errors in unearthing measurements are related essentially to the vine plantation and to the downward shifting of the graft limit, which may underestimate the true soil lowering (Brenot et al., 2008). An error margin of ± 1 cm was added to the SUM to take into account the measurement error at the date of plantation (Brenot et al., 2008). The erosion class distribution is presented in Figure 3C. Each pixel represents a measurement value, which is given in centimetre (Fig. 3D). The analysis of value distribution shows that all data are negative. This means that the entire plot is affected by erosion on a 30 year period. The mean erosion is about -2.7 cm (± 1 cm) with values ranging from -1 (± 1 cm) to -

14 cm (± 1 cm). Null erosion values (erosion value ≤ 1 cm) represent 30% of total measurements. Forty per cent of the values of the dataset are associated with low erosion (1 cm $<$ erosion value ≤ 3 cm). Moderate (3 cm $<$ erosion value ≤ 5 cm) and high erosion values (erosion value > 5 cm) are obtained for about 19% and 9% of the measurements, respectively.

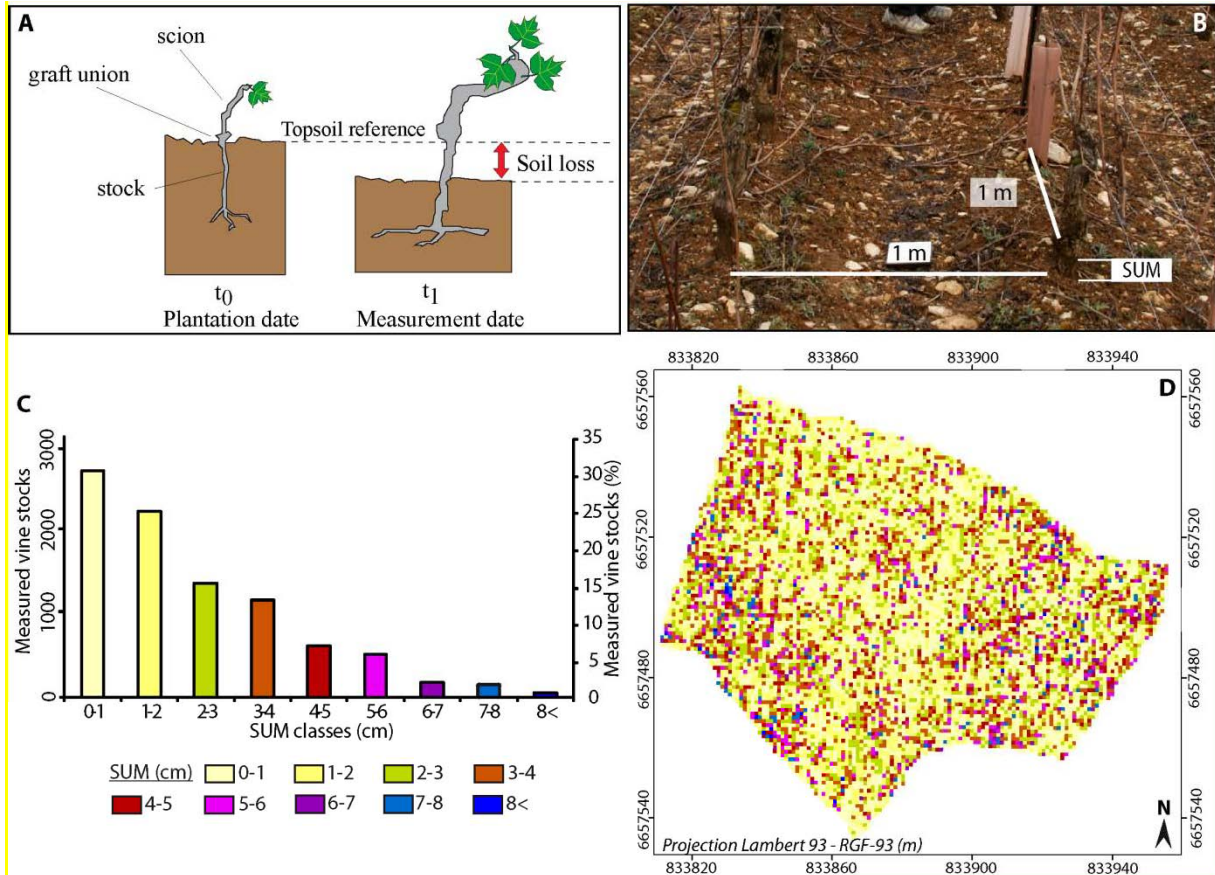


Fig. 3: (A) SUM method for calculation of erosion rate at a square metre scale (Brenot et al., 2008 modified). Graft union limit shows initial topography and stock unearthing indicates soil level changes. (B) Rows and vines spaced one metre allow measuring erosion at a square metre scale. (C) Histogram representing SUM data distribution. (D) Unearthing erosion map of the plot. Yellow indicates null to very low erosion (≤ 1 cm) whereas blue indicates very high erosion (≥ 8 cm).

2.2. Topsoil mapping from Very High Spatial Resolution (VHSR) image processing

The VHSR images were acquired in April 2010 by the unmanned helicopter DRELIO (Université Lyon 1– Université de Bretagne Occidentale, France) (Delacourt et al., 2009) at 5 cm spatial resolution (Fig. 2A). The helicopter is equipped with a reflex digital camera (Nikon D200, 10 MegaPixels) with a 35 mm equivalent focal length (chip size 24 mm), an automatic piloting system and an onboard GPS giving the geographic position during the flight. Images were acquired at a constant 70 m flying altitude to avoid geometrical deformation and during early spring, to avoid leaf and plant cover. The camera was set to "manual" with a velocity acquisition of 1/4000s and a constant opening (f/4.5). The images were saved in 12-bit raw mode to preserve the maximum of radiance information. The duration of a flight was less than 30 minutes and the flight took place near solar

midday. Illumination conditions were thus nearly constant and no substantial radiance differences have been observed from one image to the next.

Image pre-processing consists in the construction of a mosaic from 30 selected images. The images were first georeferenced using control points from a differential GPS, and then pseudo-orthorectified. The artefacts obstructing soil information (roads, agricultural paths, vinestocks and their shadows) were masked by segmentation before image analysis. Images of the soil surface were classified using an unsupervised ISODATA method (i.e. "Iterative Self Organizing Data Analysis Technique") (Hall and Khanna, 1977) that is frequently applied to map landform or to examine soil-landform relationships in various land uses (Adediran et al., 2004; Burrough et al., 2000; Irvin et al., 1997). The algorithm uses an iterative statistical approach to cluster pixels into homogeneous areas of similar characteristics (i.e. into classes), without any a priori knowledge of their spatial distribution. The user defines a minimum and a maximum number of possible classes. The pixels are affected to a given class using a minimum Euclidian distance technique by an iterative computation. The result is independent of the interpretation of the image by the user.

In the study site, we merely set between two and eight the number of soil classes in the plots. This range of values implies that more than two different radiance values should be identified, which is justified by the presence of white limestones and dark soil matrix. This also signifies that fewer than eight soil classes may be defined. This value was never reached after iterative processing, validating a posteriori this choice. Finally, to allow the comparison between soil surface distribution and erosion measurements, a low-pass filter (Gaussian blurring) on a 5*5 kernel grid (25 cm*25 cm) has been applied on the classified images to smooth any local superficial heterogeneity present at a scale less than 1 m². The obtained images and have then been resampled at a 1-m resolution using a median filter.

2.3 Topsoil characteristics from laboratory analyses

Local observations and analyses were performed to describe the soil surface states defined by image processing (Fig. 4). Soil sampling sites were selected within the spatial distribution of the classes described above. For each class, five random samples were collected in order to characterise the physical and chemical properties of the soil surface state classes defined by image processing. For each sample, we performed field observations and laboratory analyses to define stoniness and grain-size distribution according to the techniques of the French Association for Normalisation (AFNOR). These samples were used to quantify the total organic carbon, calcium carbonate, and total nitrogen contents. All results are presented in Figure 6 and in Table 1.

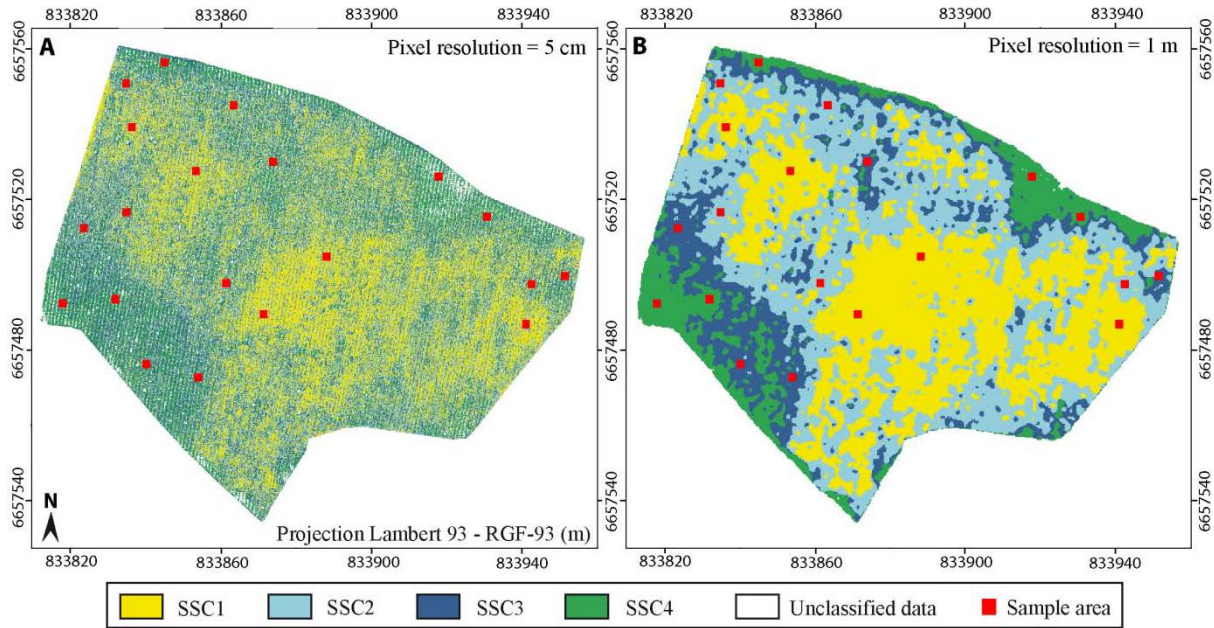


Fig. 4: (A) Classification from aerial image at 5 cm resolution, (B) Median filter was applied to allow comparison between the classification map and the erosion map performed at 1-m resolution. On each map, four classes have been determined on the basis on radiance values. The soil sampling locations are defined by the spatial distribution of these classes.

2.3.1 Stoniness and grain-size distribution analysis

Samples were collected in the 0-10 cm soil layer in the inter-row over a 0.25 m² surface to determine soil stoniness and grain-size distribution. Stoniness (>2 mm fraction) is obtained by weighing and sieving on undispersed material using dryness agitation. The moist soil residue was weighed and oven-dried for 24 hours (40°C) to determine the dry weight. A grain-size distribution was obtained using sieve sizes for the 250 µm – 2 mm fraction (coarse sand), the 63 µm – 250 µm (medium and fine sand), and the fraction lower than 63 µm (silts and clays) (French norm NF P18-560).

Table 1 Mean and standard deviation (between brackets) values for each SSC.

	Stoniness	Sands	Silts and clays	Total carbonate content	Organic carbon content	Total nitrogen content	C/N ratio
	%	%	%	‰	%	%	
SSC1	77 (5)	5 (1)	18 (4)	128 (17)	4.1 (0.3)	0.25 (0.02)	21.3 (2.5)
SSC2	70 (5)	6 (3)	24 (3)	129 (30)	4.7 (0.4)	0.30 (0.02)	22.0 (2.8)
SSC3	58 (10)	7 (3)	34 (9)	144 (62)	3.5 (1.1)	0.20 (0.07)	26.2 (5.6)
SSC4	56 (7)	8 (1)	35 (7)	131 (35)	4.1 (0.6)	0.27 (0.07)	22.8 (6.4)

2.3.2. Total carbon, calcium carbonate, nitrogen and organic carbon contents

The total calcium carbonate content was estimated using the Bernard calcimeter (international norm NF ISO 10693). Total carbon and nitrogen contents were determined by pyrolysis (980°C) under oxidizing conditions and dosage of CO₂ and N₂ released by gas chromatography, following the standard norm NF ISO 10694. The organic carbon content was obtained from this value by correcting from the total carbonate carbon (NF ISO 10963).

3. Results

3.1. Soil surface classification from VHRS

Figs. 4A and B illustrate respectively the soil surface classification at 5 cm and 1 m resolution. The image classification accentuates soil radiance differences detectable in the natural mosaic between bright surfaces covered by stones and dark surface dominated by the silty-clayey matrix (Fig. 2A).

Four classes of radiance were distinguished and interpreted as four soil surface state classes (SSC), defining specific areas within the studied plots (Fig. 4 and Fig. 5). The SSC1 (35% of the total surface) and the SSC2 (38% of the surface) are essentially located in the central part of the plot and are defined by bright soil surface states with high radiance values. The SSC3 (16% of the surface) and SSC4 classes (11% of the surface) are observed in the upper eastern part and in the lower part of the plot. They correspond to darker soil surfaces, defined by lower radiance values.

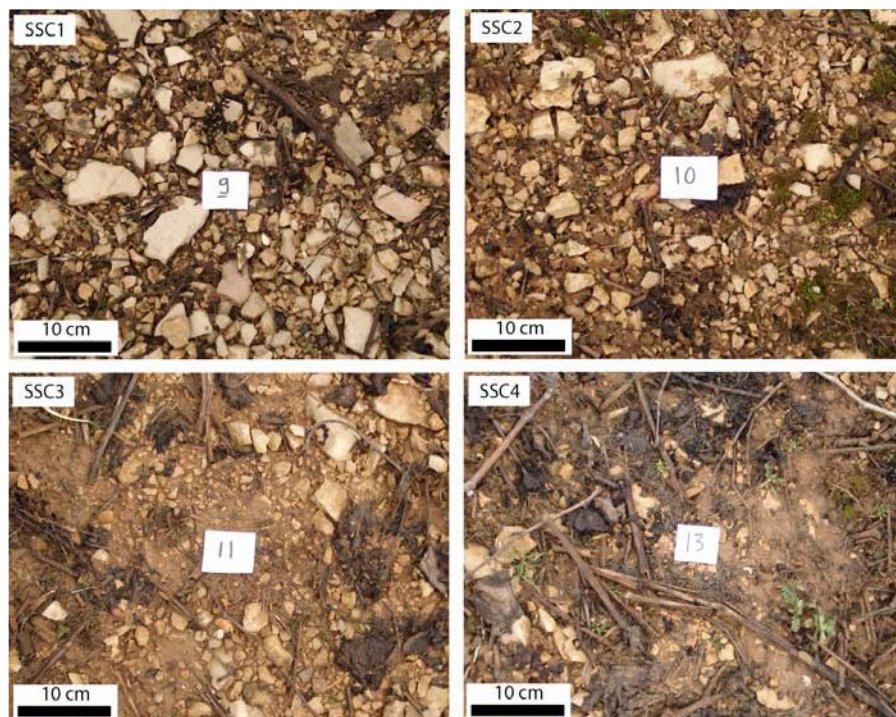


Fig. 5: Photographs of the four SSC recognised by image analyses. Stoniness decreases from SSC1 to SSC4.

3.2. Soil surface characteristics

Physico-chemical characteristics of Soil Surface Classes (SSCs) are presented in Table 1. Total carbonate content ranging between 128‰ to 144‰ was not a discriminating factor between SSCs. Organic carbon and nitrogen contents varied from 3.5% to 4.7%, and 0.20% to 0.30% respectively. SSC3 and SSC4 displayed a high variability in organic carbon and nitrogen contents, while the range of variations remained limited for SSC1 and SSC2. Stoniness was high and decreased from SSC1 (77%) to SSC4 (56%). This trend was anti-correlated to the sand and fine silty-clayey fractions. SSCs displayed low intra-class variability in the stoniness, but also in the silty-clayey fraction, with the exception of SSC3.

The SSC1 showed a very high stoniness (77%), a very low silty-clayey fraction (18%), and a total organic carbon content of 4.1%. The range of variation was limited both in the physical and chemical properties. The SSC2 was similar to SSC1 but displayed a lower stoniness (70%), a higher silty-clayey fraction (24%), a higher organic carbon and total nitrogen contents (4.7% and 0.30% respectively). The SSC3 showed the highest values of calcium carbonate (144‰), displaying moderate stoniness, high silty-clayey fraction, lower organic carbon and nitrogen contents, and a higher C/N ratio (26.2), in comparison to those of the SSC1 and SSC2. The SSC4 was similar to SSC3 but contains lower carbonate content (131‰), higher organic carbon content (4.1%) and a lower variability than that of SSC3.

Box plot (Fig. 6) highlighted some differences between SSCs in stoniness, silty-clayey fraction, organic carbon and total nitrogen contents. Therefore, these analyses showed that each soil surface class identified from image processing was representative of soil surface characteristics defined by specific chemical and physical properties.

This new approach makes possible to assess the spatial relation between soil surface characteristics (Fig. 4), slopes (Fig. 2B) and erosion (Fig. 3). All the data were collected in a GIS database. The comparisons between slope, soil and erosion maps have been synthesized on Figures 7 and 8.

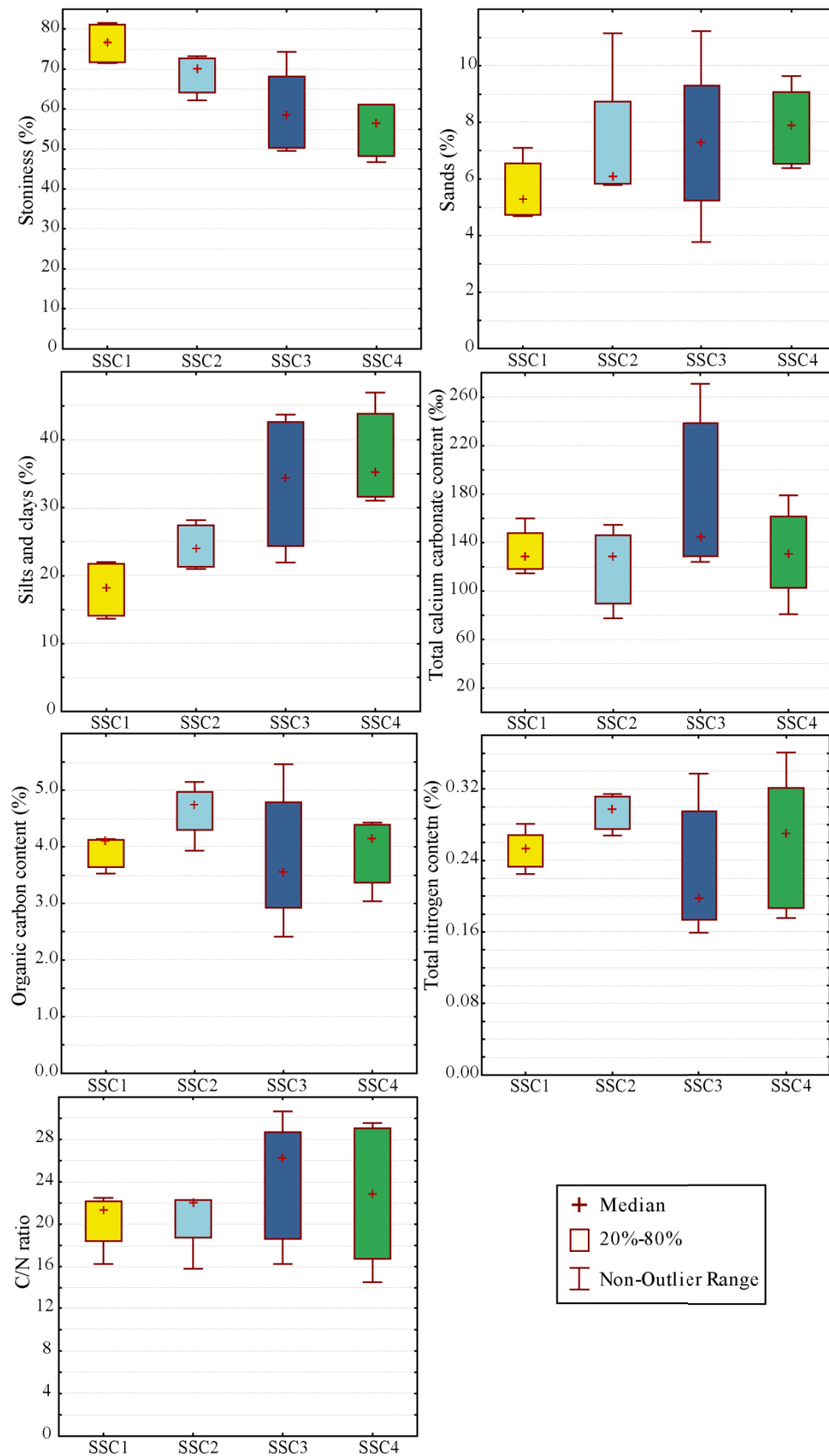


Fig. 6: Stoniness, sand and silty-clayey fractions, organic matter content, total nitrogen content and C/N content for each of the SSC classes defined by image analysis.

3.3. Soil surface characteristics, slope and erosion

3.3.1 Slope and erosion

At the plot scale, spatial and statistical analysis of slope and erosion data (Fig. 2B and Fig. 3D) showed that the erosion values were higher in the south-western part of the plot, located on steep slopes (mean value of $2.8 \text{ cm} \pm 1.7$) than in the upper part, located on gentle slopes (mean value of $2.2 \text{ cm} \pm 1.5$) ($p < 0.0001$ Mann-Whitney test).

Figure 7A illustrates the distribution of erosion for each slope class. The surfaces covering the same slope values were not identical. Therefore, the erosion data distribution had been normalized over the surface according the moderate slope class that is the most representative, in order to evaluate the importance of the slope effect on erosion (Fig. 7B). Null to very low erosion values ($\text{SUM} \leq 1 \text{ cm}$) were found dominantly in the gentler slopes (slopes $< 5^\circ$) while low erosion values ($1 < \text{SUM} \leq 3 \text{ cm}$) are almost slope-independent. Conversely, moderate to high unearthing values ($\text{SUM} \geq 4 \text{ cm}$) are dominantly found on moderate and steep slopes. More than 85% very high values ($\text{SUM} \geq 8 \text{ cm}$) are located on moderate and steep slopes (slopes $> 9^\circ$). This suggests a global control of the topography over the localisation and intensity of the erosion operating over the plot.

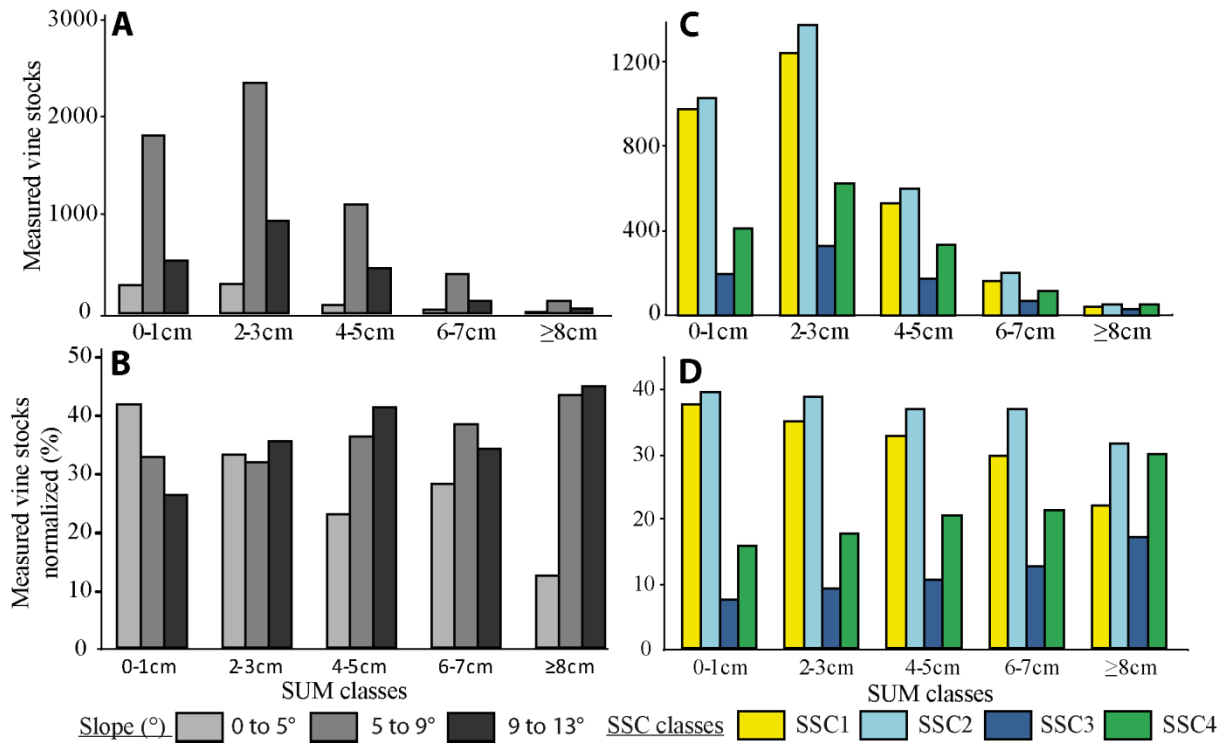


Fig. 7: (A) Distribution of SUM classes as a function of slope classes; (B) Distribution of SUM classes normalized over the surface covered; (C) Distribution of SUM classes as a function of SSC; (D) Distribution of SUM classes normalized over the surface covered.

3.3.2 Spatial relation between SSC and erosion

The soil surface distribution (Fig. 4) has been compared to the erosion map (Fig. 3) to study the spatial relationships between the intensity and localisation of erosion and the topsoil characteristics. Table 2 showed that SSC1 and SSC2, that contains a high stoniness, are associated to lower mean values (mean SUM of 2.5 cm and 2.6 cm respectively) than those for SSC3 and SSC4 (2.9 cm and 3 cm respectively) ($p < 0.0001$, Mann-Whitney test). Figure 7C presented the distribution of SSC classes for each SUM class. Values have been normalized over the surface covered by each SSC to allow comparison between data (Fig. 7D). Very low values ($SUM \leq 1$ cm) are more commonly found in SSC1 and SSC2 (stony soil surface) located in the central part of the plot, than in SSC3 and SSC4 (more silty-clayey soils). Low erosion classes ($1 < SUM \leq 3$ cm), which are slope-independent, are also uniformly distributed across the plot, independently to the SSCs (approximately 40% for each SSC). Figure 8 showed that very high erosion values ($SUM > 5$ cm) were preferentially associated with low stoniness surface states encountered in SSC3, SSC4 located in the south-western part and on the northern border of the plot. In this plot, the pattern of erosion seemed to be related to the spatial distribution of soil surface states, and specifically to the stoniness. Figure 9 shows that low to moderate erosion ($SUM \leq 5$ cm) are associated to high radiance values induced by a white stone surface cover. Conversely, in the south-western part of the plot, soils that are rich in fine fraction are more easily eroded, and display a lower radiance (Fig. 9 for $SUM \geq 8$ cm). Our work shows that the pattern of erosion of this plot is inversely correlated to the spatial distribution of the stone percentage at the metre scale. The paved soil surface, rich in stones, protects from the splash effect, delays runoff processes and thus reduces soil erosion (Martinez-Martínez-Zavala and Jordan, 2008; Martínez-Zavala et al., 2010; Poesen and Lavee, 1994; Puigdefabregas et al., 1996).

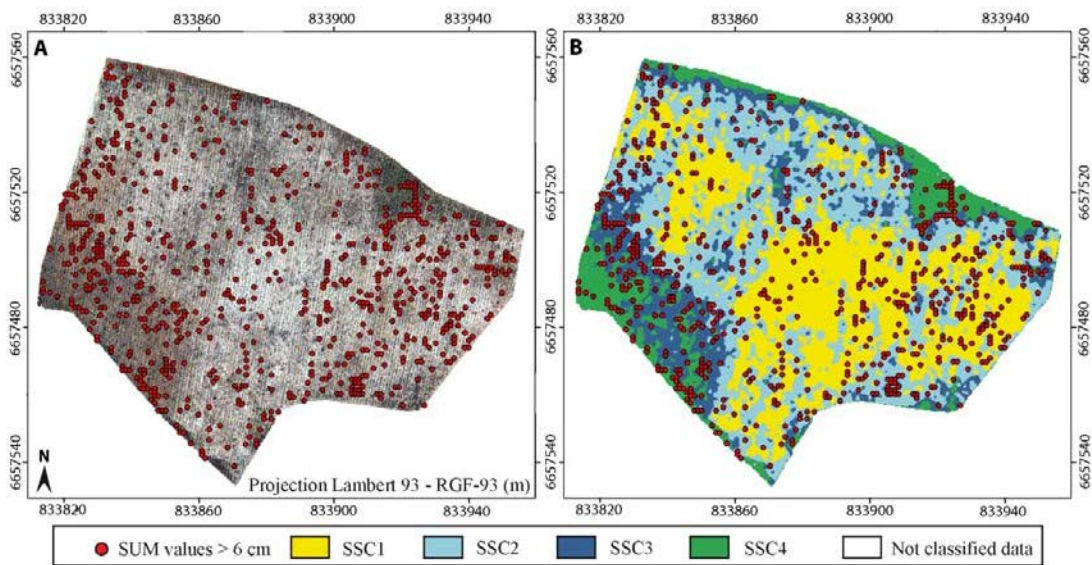


Fig. 8: Spatial distribution of very high erosion values ($SUM \geq 6$ cm) (A) over the VHSR aerial image, (B) over the topsoil classification map.

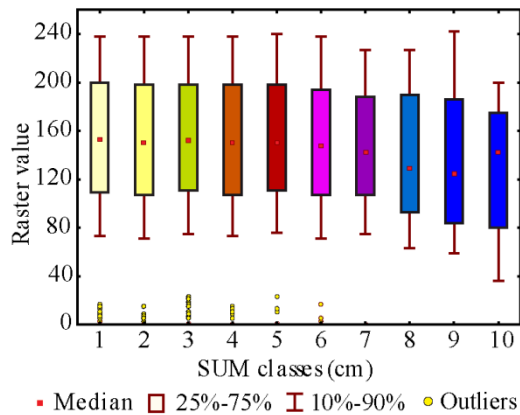


Fig. 9: Distribution of SUM classes as a function of raster value. Very high erosion values ($SUM \geq 8\text{cm}$) are related to lower raster values than low to moderate erosion values ($SUM \leq 5\text{ cm}$).

Table 2 Mean SUM and standard deviation values for each SSCs.

	SUM (cm)	
	Mean	Standard deviation
SSC1	2.5	1.7
SSC2	2.6	1.7
SSC3	2.9	1.8
SSC4	3.0	1.9

4. Discussion

In vineyard contexts, erosion is controlled by interactions and feedback between natural and anthropogenic processes (Boardman and Poesen, 2006). Several studies have demonstrated the importance of water-induced erosion in contributing to sediment transfer at the hillslope scale (Hooke, 2006; Martinez-Casasnovas et al., 2005; Quiquerez et al., 2008). Other studies have highlighted the role of anthropogenic factors, i.e. tillage and agricultural management, on the spatial distribution of erosion (Armand et al., 2009; Blavet et al., 2009; Chartin et al., 2011; Kosmas et al., 1997; Paroissien et al., 2010; Schumacher et al., 1999). Others have shown that sediment dynamics on hillslope may also be related to former plot boundaries in agricultural landscapes at catchment scale (Hooke, 2006; Jordan et al., 2005; Szilassi et al., 2006).

In the Monthelie vineyard plot, comparisons between soil surface distribution and erosion maps show that low and moderate erosion areas are preferentially located in the central part of the plot, where stony SSC1 and SSC2 prevail. Conversely, high erosion values are located in the southwestern part of the plot, which is less stony, and where there is a break in slope. We suggest that these SSCs reflect the action of hydric erosion, present-day management practices and, possibly a land use evolution over time.

In the central part of the plot, where erosion is limited, the high stoniness and the superficial pavement observed in SSC1 and SSC2 may have resulted from the selective and progressive removal of fine particles by overland flows during repeated high intensity rainfall events (Poesen et al., 1990; Poesen and Lavee, 1994). Indeed, in Burgundian vineyards, intense rainfall events are known to mobilise and transport particles. Conversely, repeated tillage operations may cause the enrichment of

the rock-fragment fraction in the topsoil (Follain et al., 2012; Govers et al., 1994; Govers et al., 1999; Poesen et al., 1997). Here, SSC1 can hardly be attributed to water erosion alone, since slope gradient is minimal in the upper part of the plot, suggesting a medium to long-term combined water and tillage-controlled erosion. Identical surface soil degradation in upper slope positions has been observed in various parts of the European Mediterranean belt in cultivated areas (Poesen and Lavee, 1994; Schumacher et al. 1999; Cerdan et al. 2010). This degradation is however complete, since the observed pavement suggests that SSC1 will evolve no further, unless superficial tillage is performed once or twice a year.

In the south-western part of the plot, where a break in slope is observable, the erosion rates are high and the SSCs are characterised by low stoniness. Auger holes performed in the steep slope area show that no rock fragments have been found deeper in the soil profile. The soils remain superficial since they range in thickness from 30 cm upslope to 50 cm downslope. The steep slope suggests water-dominated erosion in this area, illustrating the superficial dynamics currently operating on these hillslopes. Fine-grained particles are easily mobilised during each high-intensity rainfall event. They are gradually transferred downslope and may be temporarily stored, even on these steep slopes. The evolution from upslope topsoils that are depleted in fine particles to enriched downslope soils may reflect these short-term hillslope dynamics. In the medium to long term, such soil erosion can lead to a modification of these SSCs, in quantitative and qualitative ways, since upslope fine particles are exported out of the plot. Evidence of such hillslope dynamics can be illustrated by the soil characteristics in the SSC2 and SSC3 classes, which present intermediate values between those of SSC1 and SSC4, in terms of stoniness, sand and silty-clayey fractions. Fig. 4B shows that the soil surface grades more or less gradually from one soil class to another.

If sediment dynamics may contribute to the enrichment of soils in fine particles in the south-western part of the plot, the examination of 1953 aerial photograph (Fig. 10) suggests that the current pattern of soil distribution may have been also influenced by a land-use change in the medium term. The 1953 aerial photograph shows that the upslope part of the plot was occupied by a wasteland, while the downslope area was covered by forest. The limit between the wasteland and the forest matches the break in slope, between the moderate and steep slope areas (Fig. 10). Therefore, it is possible that the forest cover before 1982 had played a role on the location and preservation of the enriched soils observed in the southern-part of the slope.

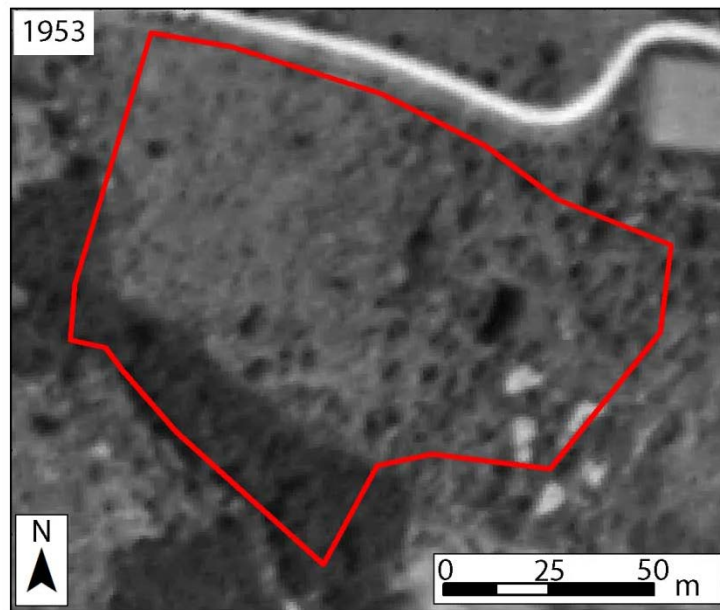


Fig. 10: The 1953 aerial photography highlights the presence of a forest in the downslope part of the plot whereas the upslope part was occupied by a wasteland. The limit matches the break in slope, between the moderate and steep slope areas.

Finally, our study shows that analysis of VHRS aerial images is a non-intrusive, quickly-performed method that it makes possible to generate full, detailed views of the soil surface. The classification map created from VHRS aerial images can be considered as an efficient qualitative indicator of soil surface distribution if it is combined with on-site quantitative soil analysis to define soil surface characteristics. Our combined observations based on very high spatial resolution suggest that the current pattern of soil distribution and erosion reflect the effects of geomorphological processes but also of present-day tillage and probably of a land-use change in the medium term.

These high-resolution observations provide new insights to explain intra-plot spatial variability by integrating spatial, temporal, local and continuous data. Such maps can be helpful to assess the role of soil distribution in soil degradation processes and forecasting. Such an approach could be also very useful for precision viticulture.

5. Conclusions

This paper presents a simple, highly efficient approach to map soil surface heterogeneities at a five centimetre resolution in Burgundy vineyards. This approach relies on the combination between very high resolution aerial data at the plot/hillslope scale and local soil observations. VHRS aerial image processing allows precise mapping of the spatial distribution of soil surfaces; soil sampling defines soil typology by physical and chemical characteristics. The combination of on-site soil data and VHRS aerial photos permits to produce continuous and accurate spatial distribution maps at a very fine spatial resolution. By allowing the visualisation of soil distribution at very high spatial resolution,

this approach offers new insights and possibilities for documenting soil patterns and for exploring and predicting soil evolution through space and time on hillslopes, which can be important for agricultural planning.

Acknowledgements

This work was financially supported by the Burgundy regional council (CRB) and the inter-professional bureau of Burgundy vines (BIVB). Thanks to C. Chateau-Smith for proof-reading the English text.

References

- Adediran, A., Parchartidis, I., Poscolieri, M., Pavlopoulos, K., 2004. Computer-assisted discrimination of morphological units on north-central Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients. *Geomorphology* 58, 357-370.
- Armand, R., Bockstaller, C., Auzet, A-V, Van Dijk, P, 2009, Runoff generation related to intra-field soil surface characteristics variability, Application to conservation tillage context, *Soil and Tillage Research* 102, 27-37.
- Arnaez, J., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., Ortigosa, L., 2007. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research* 93, 324–334.
- Auzet, A.V., Boiffin, J., Ludwig, B., 1995. Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms* 20, 759–767.
- Auzet, A.V., Poesen, J., Valentin, C., 2004. Soil surface characteristics: dynamics and impact on soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 9, 1063– 1064.
- Auzet, A.V., van Dijk, P., Kirkby, M.J., 2005. Surface characterisation for soil erosion forecasting. *Catena* 62, 77–78.
- Baghdadi, N., Gaultier, S., King, C., 2002. Retrieving surface roughness and soil moisture from synthetic aperture radar (SAR) data using neural networks. *Canadian Journal of Remote Sensing* 28, 701-711.
- Baize, D., Girard, M.C., 2008. *Référentiel pédologique 2008. Savoir-faire*. Quae éditions, 480 pp.
- Blavet, D., De Noni, G., Le Bissonnais, Y., Leonard, M., Maillo, L., Laurent, J.Y., Asseline, J., Leprun, J.C., Arshad, M.A., Roose, E., 2009. Effect of land use and management on the early stages of soil water erosion in French Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research* 106, 124–136.
- Boardman, J., Poesen, J., 2006. Soil erosion in Europe: major processes, causes and consequences. In: Boardman, J., Poesen, J. (Eds), *Soil Erosion in Europe*, Wiley, Chichester, 479-487.
- Brenot, J., 2007. Quantification de la dynamique sédimentaire en contexte anthropisé. Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne, Centre des Sciences de la Terre, 262 pp.
- Brenot, J., Quiquerez, A., Petit, C., Garcia, J.P., 2008. Erosion rates and sediment budgets in vineyards at 1-m resolution based on stock unearthing (Burgundy, France). *Geomorphology* 100, 345 – 355.
- Burrough, P.A., van Gaans, P.F.M, MacMillan, R.A., 2000. High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy Sets and Systems* 113, 37 -52.
- Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., Gobin, A., Vacca, A., Quinton, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F.J.P.M., Raclot, D., Ionita, I., Rejman, J., Rousseva, S., Muxart, T., Roxo, M.J., Dostal, T., 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology* 122, 167-177.

- Chartin, C., Bourennane, H., Salvador-Blanes, S., Hinschberger, 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, 8–20.
- Corbane, C., 2006. Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, 252 pp.
- Corbane, C., Raclot, D., Jacob, F., Albergel, J., Andrieux, P., 2008. Remote sensing of soil surface characteristics from a multiscale classification approach. *Catena* 75, 308 – 318.
- Delacourt, C., Allemand, P., Jaud, M., Grandjean, P., Deschamps, A., Ammann, J., Cuq, V., Suanez, S., 2009. DRELIO : An Unmanned Helicopter for Imaging Coastal Areas. *Journal of Coastal Research*, special issue 56, 1489 – 1493.
- Follain, S., Ciampilini, R., Coulouma, G., Crabit, A., Garnier, F., 2012. The effects of redistribution processes on rock fragment variability within a vineyard topsoil in Mediterranean France. *Geomorphology* 175–176, 45–53.
- Fox, D.M., Bryan, R.B., 2000. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena* 38, 211–222.
- Galet, P., 2000. Précis de viticulture, 7ème édition. Ed. Pierre GALET, 602 pp.
- Garcia, J.-P., Chevrier, S., Dufraisse, A., Foucher, M., Steinmann, R., 2010. Le vignoble gallo-romain de Gevrey-Chambertin « Au-dessus-de Bergis », Côte-d'Or (Ier-Ile s. apr. J.-C.) : modes de plantation et de conduite de vignes antiques en Bourgogne. *Revue archéologique de l'Est* 59, 505 – 537.
- Garrier, G., 1989. Le phylloxéra. Une guerre de trente ans, 1870-1900, Albin Michel. Ed. Paris, 194 pp.
- Govers, G., Vandaele, K., Desmet, P., Poesen, J., Bunte, K., 1994. The role of tillage in soil redistribution on hillslopes. *European Journal of Soil Science* 45, 469-478.
- Govers, G., Lobb, D.A., Quine, T.A., 1999. Tillage erosion and translocation: emergence of a new paradigm in soil erosion research 51, 167-174.
- Irvin, B., Ventura, S., Slater, B. 1997. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. *Geoderma* 77, 137-154.
- Hall, J., Khanna, D., 1977. Statistical methods for digital computers, Wiley, New-York.
- Hooke, J.M., 2006. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology* 79, 311 – 335.
- Jordan, G., Rompaey, A. van, Szilassi, P., Csillag, G., Mannaerts, C., Woldai, T., 2005. Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton basin (Hungary). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 108, 119–133.
- Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L.H., Chabart, M., Diamantopoulos, J., Farand, R., Gutierrez, L., Jacob, A., Marques, H., Martinez-Fernandez, J., Mizara, A., Moustakas, N., Nicolau, J.M., Oliveros, C., Pinna, G., Puddu, R., Puigdefabregas, J., Roxo, M., Simao, A., Stamou, G., Tomasi, N., Usai, D., Vacca, A., 1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena* 29, 45–59.
- King, C., Baghdadi N., Lecomte V., Cerdan O., 2005. The application of remote sensing data to monitoring and modelling of soil erosion. *Catena* 62, 79-93.
- Krause, A.K., Franks, S.W., Kalma, J.D., Loughran, R.J., Rowan, J.S., 2003. Multi-parameter finger printing of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia. *Catena* 53, 327 – 348.
- Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M., 2007. Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective. *Developments in Soil Science*, 31. Elsevier, Amsterdam.

- Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., Daroussin, J., 2002. L'érosion hydrique des sols en France. Technical Report INRA et IFEN, 63pp.
- McBratney, A.B., Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- Martin, W.K.E, Timmer, V.R., 2006. Capturing spatial variability of soil and litter properties in a forest stand by landform segmentation procedures. *Geoderma* 132, 169–181.
- Martínez-Casanovas, J.A., Ramos, M.C., Ribes-Dasi, M., 2005. On-site effects of concentrated flow erosion in vineyard fields: some economic implications. *Catena* 60, 129 – 146.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C., 2006. The cost of soil erosion in vineyard fields in the Penedès–Anoia Region (NE Spain). *Catena* 68, 194–199.
- Martínez-Zavala, L., Jordán, A., 2008. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain. *Soil Use and Management* 24, 108–117.
- Martinez-Zavala, L., Jordán, A., Bellinfante, N., Gil, J., 2010. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment. *Soil Science and Plant Nutrition* 56, 95–104.
- Montgomery, D.R. and W.E. Dietrich. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* 30, 1153 – 1171.
- Mulder, V.L., Bruin, S; Schaepman, M.E., Mayr, T.R., 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping – A review. *Geoderma* 162, 1–19.
- Paroissien, J.-B., Lagacherie, P., Le Bissonnais, Y., 2010. A regional-scale study of multi-decennial erosion of vineyard fields using vine-stock unearthing–burying measurements. *Catena* 82, 159–168.
- Poesen, J., Ingelmo-Sanchez, F., Mucher, H., 1990. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes and Landforms* 15, p 653–671.
- Poesen, J., Lavee, H., 1994. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena* 23, 1–28.
- Poesen, J., Torri, D., Bunte, K., 1994. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *Catena* 23, 141–166.
- Poesen, J., Van Wesemael, B., Govers, G., Martinez-Fernandez, J., Desmet, P., Vandaele, K., Quine, T., Degraer, G., 1997. Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion. *Geomorphology* 18, 183–197.
- Puigdefabregas, J., Alonso, J.M., Delgado, L., Domingo, F., Cueto, M., Gutierrez, L., Lazaro, R., Nicolau, J.M., Sanchez, G., Sole, A., Vidal, S., 1996. The Rambla Honda field site : interactions of soil land vegetation along a catena in semi-arid Southeast Spain. In: Brandt, C.J., Thornes, J.B. (Eds), *Mediterranean Desertification and Land Use*. Wiley, Chichester, pp. 137–168.
- Quiquerez, A., Brenot, J., Garcia, J.P., Petit, C., 2008. Soil degradation caused by a high-intensity rainfall event: Implications for medium-term soil sustainability in Burgundian vineyards. *Catena* 73, 89 – 97.
- Schumacher, T.E., Lindstrom, M.J., Schumacher, J.A., Lemme, G.D., 1999. Modeling spatial variation in productivity due to tillage and water erosion. *Soil and Tillage Research* 51, 331–339.
- Szilassi, P., Jordan, G., Van Rompaey, A., Csillag, G., 2006. Impacts of historical land use changes on erosion and agricultural soil properties in the Kali Basin at Lake Balaton, Hungary. *Catena* 68, 96–108.
- Touriño Soto, I., 2005. Mise en relation de la cartographie du rendement avec la distribution spatiale de l'état de surface du sol observée par télédétection. Thèse de doctorat de l'Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 250pp.

- Wassenaar, T., Andrieux, P., Baret, F., Robbez-Masson, J.M., 2005. Soil surface infiltration capacity classification based on the bi-directional reflectance distribution function sampled by aerial photographs. The case of vineyards in a Mediterranean area. *Catena* 62, 94 – 110.
- Webster, R., Oliver, M.A., 1990. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford, Oxford University Press.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting Rainfall-Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Agricultural Handbook 537, US Department of Agriculture, Washington, DC.

5.2 Influence de la pierrosité sur l'érosion des sols viticoles à l'échelle parcellaire

5.2.1 Contexte et acquisition des données

L'influence de la pierrosité de surface sur l'érosion a été étudiée sur une parcelle du versant viticole de Monthelie (Côte de Beaune), au lieu-dit « Les Mandènes » (Figure 5.1). De morphologie convexo-concave, elle se situe en rebord de plateau. L'altitude varie entre 350 à 374 m et les pentes de 3 à 21°. Les Calcosols argilo-limono-sableux se développent sur une formation marno-calcaire de l'Oxfordien : la formation des Marnes de Pommard (Rémond, 1985). Pour évaluer la distribution spatiale de la pierrosité de surface, une cartographie de la résistivité électrique du sol, par la méthode ARP[®], a été réalisée au printemps 2012. L'acquisition effectuée à une résolution spatiale métrique (passage tous les rangs) correspond à la résolution de la carte d'érosion produite. Trois profondeurs d'investigation ont été cartographiées. Notre problématique étant la pierrosité de surface, nous utiliserons seulement la voie 1 correspondant à la profondeur d'investigation 0-50 cm. La carte d'érosion a été produite à partir de la méthode SUM (Brenot *et al.*, 2008). Sur cette parcelle de 0,4 ha, dont la densité de plantation est égale à 10 000 pieds/ha, le déchaussement de 3795 ceps a été mesuré : il correspond à un taux de ceps absents ou jeunes égal à 5 %. La date de plantation de la parcelle n'étant pas connue, les vitesses d'érosion n'ont pu être calculées.

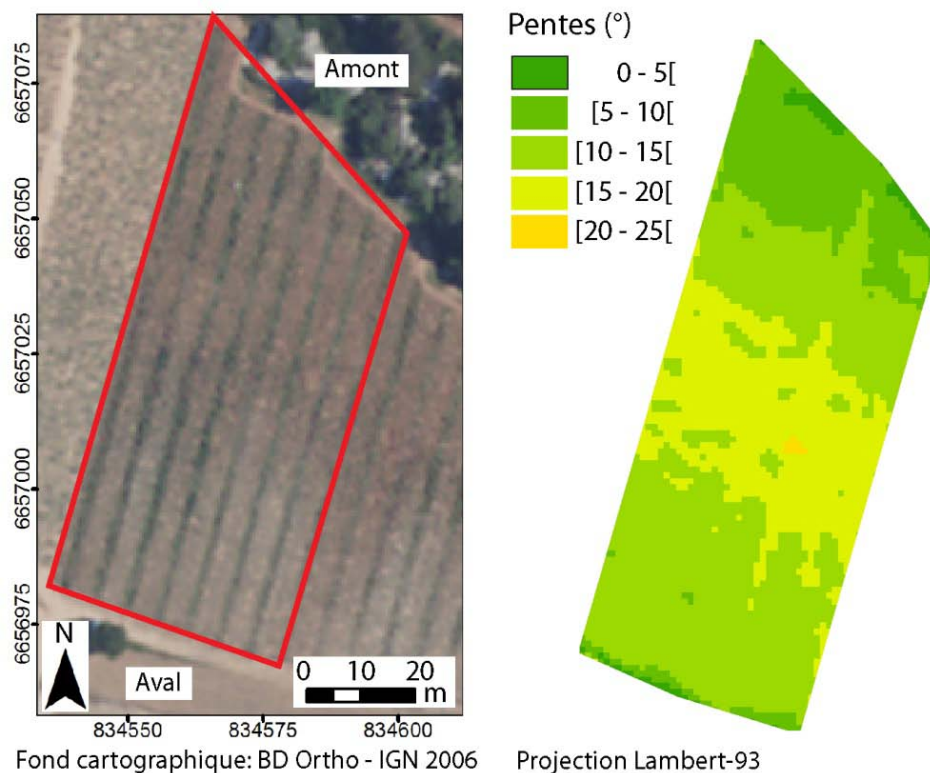


Figure 5.1 Localisation de la parcelle sur le versant de Monthelie et carte des pentes du secteur d'étude. L'encadré rouge correspond à la zone d'étude.

5.2.2 Distribution de la pierrosité de surface et de l'érosion

Sur la parcelle étudiée, les valeurs de résistivité varient de 38 à 138 Ohm.m (Figure 5.2A). La résistivité se répartit selon plusieurs motifs spatiaux. À l'amont, les valeurs de résistivité sont fortes et supérieures à 90 Ohm.m (zone a). En direction de l'aval, une limite nette se marque par la diminution des valeurs de résistivité qui atteignent 60 à 70 Ohm.m (zone b). Un second niveau résistant est observé plus à l'aval, où les valeurs de résistivité sont comprises entre 100 et 120 Ohm.m (zone c). Ce niveau s'interrompt dans sa partie centrale (zone d), où les valeurs de résistivité y sont plus faibles. Dans la partie aval de la parcelle (zone f), les valeurs sont homogènes, ne présentent pas de distribution particulière, et la résistivité varie de 70 à 90 Ohm.m. Enfin, à l'aval, les valeurs de résistivité sont très faibles et inférieures à 50 Ohm.m (zone g).

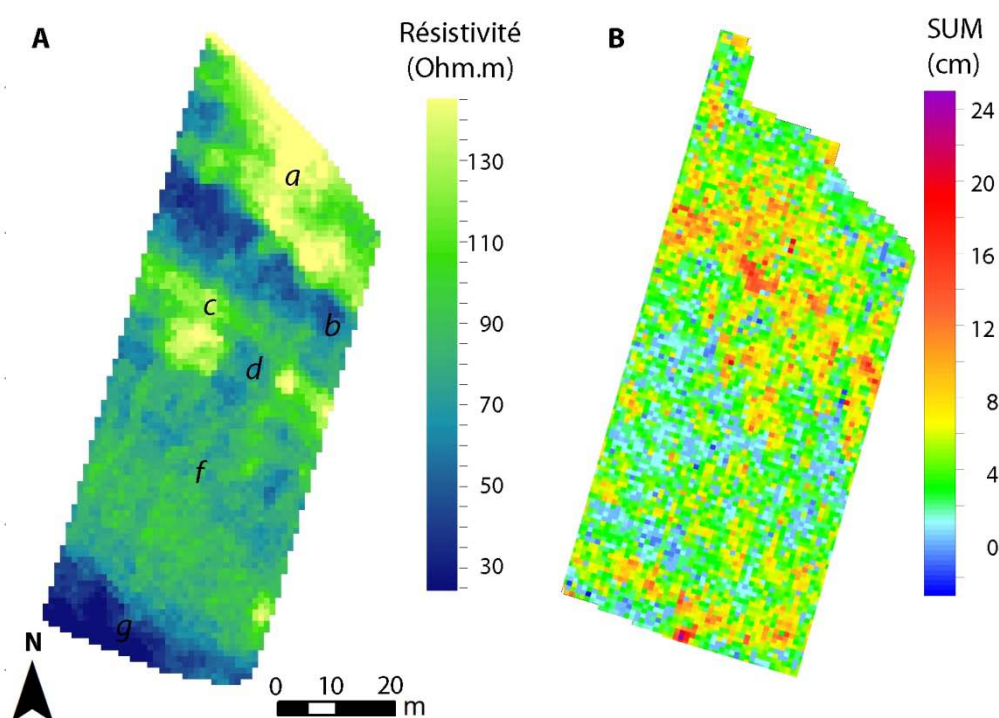


Figure 5.2 Carte de résistivité électrique du niveau superficiel du sol (0-50 cm) (A) et carte de déchaussement de la parcelle réalisée à partir de la méthode SUM (B).

La carte d'érosion, produite à partir des mesures de déchaussement des ceps de vignes à une résolution métrique, présente également divers motifs répartis spatialement sur la parcelle (Figure 5.2B). Les valeurs du SUM (déchaussement) varient de -2 cm (sédimentation) à 25 cm (ablation), le SUM moyen étant égal à 4 cm. Les fortes valeurs de déchaussement, supérieures à 10 cm, sont majoritairement situées à l'amont et à l'aval de la parcelle ; leur localisation correspond principalement à des zones où la résistivité électrique est faible à modérée (zone b et zone g). Ces fortes valeurs de SUM ne sont pas observées dans la zone de forte résistivité, localisée dans la partie

médiane de la parcelle (zone c), à l'exception du secteur où la résistivité est plus faible (zone d). La comparaison de la carte des pentes et de la carte de déchaussement montre que l'érosion la plus forte n'est pas localisée dans la zone de forte pente.

Il semble exister une relation entre la résistivité électrique de l'horizon superficiel du sol et les valeurs de déchaussement. Pour mettre en évidence cette relation, les valeurs de SUM élevées (> 10 cm) ont été extraites pour diverses plages de résistivité (Tableau 5-1 ; Figure 5.3). Le regroupement en classes de résistivité de 20 Ohm.m a permis de limiter les hétérogénéités des valeurs de résistivité observées à l'échelle du mètre. On remarque une diminution des valeurs de déchaussement avec l'augmentation de la résistivité électrique. La classe de plus faible résistivité, de l'ordre de 40 à 60 Ohm.m, présente le plus fort SUM moyen égal à 12,3 cm, alors que la classe de plus forte résistivité présente le plus faible SUM moyen égal à 10 cm.

Classe de Résistivité	Ceps mesurés	SUM moyen	Écart-type
Ohm.m		cm	cm
[40-60[	14	12.3	4.6
[60-80[	123	11.8	2.1
[80-100[	59	10.9	1.6
[100-120[	26	10.8	1.2
[120-140[	1	10.0	-

Tableau 5-1 Évolution des valeurs de SUM élevées (> 10cm) en fonction de la résistivité électrique du sol.

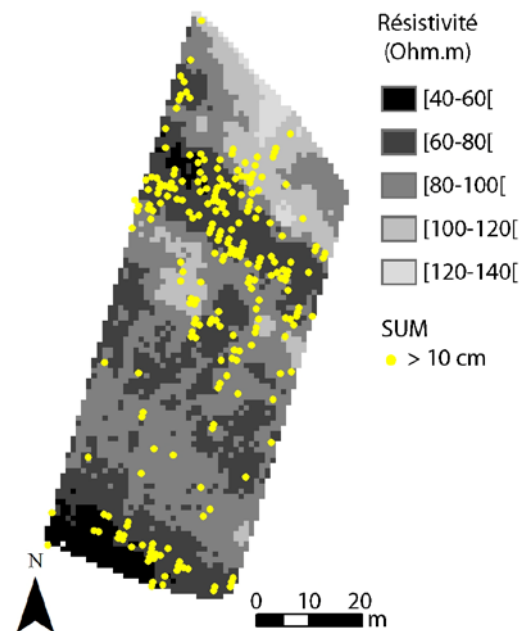


Figure 5.3 Localisation des valeurs de SUM supérieures à 10 cm en fonction des classes de résistivité.

Il est reconnu que la pierrosité du sol influence la résistivité électrique du sol : plus la pierrosité est importante, plus la résistivité l'est également (Rey *et al.*, 2006 ; Tetegan *et al.*, 2012). Il semblerait donc que les fortes valeurs de résistivité observées dans l'horizon superficiel du sol soient corrélées à des valeurs de forte pierrosité. Pour valider cette hypothèse, la pierrosité de surface a été mesurée sur divers secteurs de la parcelle. La localisation des mesures a été déterminée à partir de la carte de résistivité regroupée en classes. Sur la parcelle, 23 mesures ont été effectuées selon la méthode présentée dans le chapitre 3. Les résultats obtenus montrent que les valeurs de résistivité

augmentent en fonction des valeurs de pierrosité de surface (Figure 5.4). Les plus faibles valeurs de résistivité, de l'ordre de 40 à 60 Ohm.m, présentent une valeur de pierrosité médiane égale à 11,0 %. À l'inverse, les plus fortes valeurs de résistivité, de l'ordre de 120 à 140 Ohm.m, présentent une valeur de pierrosité médiane égale à 17,5 %. Cependant, pour la classe de résistivité 60 à 80 Ohm.m, la pierrosité est plus élevée (médiane égale à 15,7 %) par rapport aux classes de plus forte résistivité (médianes égales à 12,6 % et 13,9 %). Cette forte valeur de pierrosité peut s'expliquer soit par un défaut de mesure de la pierrosité sur le terrain, soit par la présence d'une zone plus pierreuse très localement, qui a été lissée lors de l'interpolation réalisée sur les valeurs de résistivité pour produire la carte.

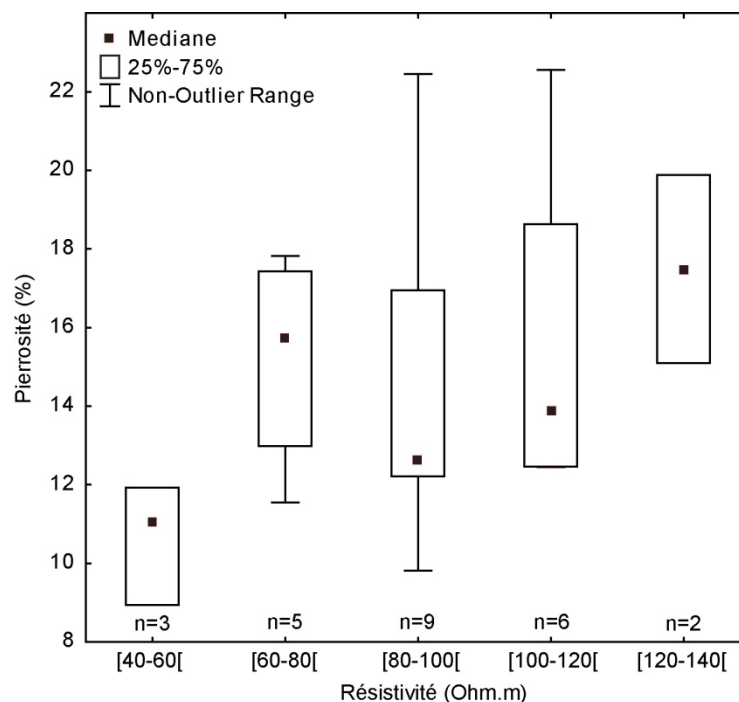


Figure 5.4 Distribution de la pierrosité de surface, mesurée sur le terrain, en fonction des classes de résistivité.

Pour cette parcelle, la pierrosité de l'horizon superficiel du sol contrôle en partie la distribution et l'intensité de l'érosion observée à l'échelle du mètre. Ces observations sont cohérentes avec les travaux réalisés par d'autres auteurs, comme Poesen et Lavee (1994) et sur d'autres secteurs de la Côte (Chevigny et *al.*, 2014b ; Quiquerez et *al.*, 2014).

5.3 Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé à évaluer le rôle de la pierrosité de surface sur l'érosion des sols à l'échelle de la parcelle. Deux investigations, basées sur l'analyse d'images THRS et sur la mesure de la résistivité électrique du sol, ont été menées pour évaluer la distribution de la pierrosité de surface. Les résultats obtenus montrent que ces deux techniques sont adaptées à la reconnaissance de la pierrosité de surface. Les classes d'EDS, définies par l'analyse d'images THRS, présentent bien des classes de pierrosité spécifiques. Les investigations géophysiques présentent également un fort potentiel pour la caractérisation de la pierrosité de surface.

La pierrosité de surface évolue à l'échelle de quelques mètres et contribue en partie à contrôler l'érosion sur les parcelles situées en contexte de versant. Ce contrôle a été observé sur des parcelles où le substrat géologique alterne entre des calcaires argileux et des marnes. La présence des bancs calcaires en profondeur conduit à une augmentation de la pierrosité à la surface du sol. Cette distribution, localement répartie sur la parcelle, contrôle l'intensité et la distribution de l'érosion. Les secteurs riches en éléments lithiques sont moins érodés que les secteurs où la pierrosité est plus faible. Bien que la distribution spatiale de la pierrosité soit corrélée avec la présence de bancs calcaires sous-jacents, il faut également prendre en considération l'impact de l'homme qui, par les travaux de défonçage et de griffage, contribue à la remontée et à la dispersion de ces éléments lithiques à la surface du sol (Follain *et al.*, 2012).

Chapitre 6 - L'homme, acteur de la construction des sols viticoles : une histoire plurimillénaire

Chapitre 6 L'homme, acteur de la construction des sols viticoles : une histoire plurimillénaire

Introduction

La mise en culture de la vigne sur les versants de la Côte depuis plusieurs siècles a conduit à des modifications du paysage viticole, tout en transformant les propriétés des sols. Ces activités anthropiques peuvent être observées à différentes échelles spatio-temporelles.

À l'échelle spatiale du versant, les principaux changements sont liés à des modifications majeures du paysage viticole (remembrement parcellaire, anciennes exploitations de la pierre, etc.) ; à l'échelle de la parcelle, les transformations sont locales et affectent soit la parcelle soit une partie de celle-ci (pratiques culturales, apports de terre, etc.)

Ces activités anthropiques peuvent également être observées au cours du temps, de l'échelle millénaire (occupation du versant), séculaire (pratiques culturales anciennes, apports de terre), voire décennale à pluri-décennale (pratiques culturales, remembrement parcellaire). L'observation de ces perturbations humaines peut être directe (fosse pédologique, MNT haute résolution) ou indirecte (cartographie de l'érosion).

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact de certaines activités anthropiques au cours du temps et à différentes échelles spatiales. La mise en évidence de l'influence de l'homme sur les sols est déduite par des observations de terrain, par l'analyse de MNT à haute résolution et par l'analyse d'archives. Ces observations ont été complétées par l'analyse de cartes d'érosion à haute résolution qui permettent d'identifier les facteurs naturels et anthropiques qui contrôlent la dynamique sédimentaire des sols à l'échelle de la parcelle et/ou du groupe de parcelles. L'ensemble de ces observations a permis de mettre en évidence l'influence des activités humaines sur la diversité de sols viticoles de versant.

6.1 Impacts de l'homme sur le temps long

6.1.1 Exemple de l'occupation des versants durant l'Antiquité

Lors de travaux culturaux, à la suite de l'arrachage d'une parcelle sur le versant viticole de Pernand-Vergelesses, en 2011, le propriétaire de celle-ci a observé la présence de nombreux blocs et pierres dans sa parcelle, dont un type de roche qu'il ne connaissait pas. Ces éléments, étudiés par Christophe Petit, ont mis en évidence l'existence de probables structures anthropiques gallo-romaines enfouies dans la parcelle, du fait de la présence de blocs de mortier de tuileau¹⁸.

Une campagne de prospection géophysique du sol sur un ensemble de parcelles situé sur la commune de Pernand-Vergelesses a permis de mettre en évidence la présence de ces structures anthropiques gallo-romaines sur un secteur actuellement occupé par la vigne. Ces prospections géophysiques ont été complétées par des données supplémentaires (fosses pédologiques, sondages à la tarière, etc.) afin d'évaluer l'impact de l'occupation du site, datant d'il y a 2000 ans, sur la diversité des sols actuelle à l'échelle parcellaire.

La variabilité spatiale des propriétés physiques des sols à une résolution métrique peut être caractérisée à partir de prospections géophysiques (Dabas, 2006; Samouëlian *et al.*, 2005). Ainsi, une cartographie de la résistivité électrique du sol a été effectuée au printemps 2012 sur une surface d'environ 1 ha, au lieu-dit « L'Île des Hautes Vergelesses », par la méthode ARP[®] (en rouge sur la Figure 6.1). Les investigations géophysiques ont été réalisées sur trois profondeurs, *i.e.* 0-50 cm, 0-100 cm et 0-200 cm, à une résolution métrique. Les conditions d'acquisition n'ont pas permis de cartographier l'ensemble du secteur préalablement planifié (plantation de graminées dans une parcelle arrachée). De ce fait, une seconde prospection de résistivité électrique a été réalisée en avril 2013. Trois rectangles de 30 x 23 m ont été acquis à l'aide d'un résistivimètre RM15 (dispositif non tracté, Geoscan Research), en mode pôle-pôle (en jaune sur la Figure 6.1). L'acquisition a été effectuée à une résolution spatiale d'un mètre. La résolution spatiale selon l'axe de prospection est réduite par rapport au système ARP[®], et les structures sont plus difficilement identifiables. L'écartement d'un mètre entre les électrodes du portique (dispositif pôle-pôle RM15) permet d'atteindre une profondeur d'investigation du même ordre. Les conditions d'humidité du sol, entre 2012 et 2013, étaient différentes ; le sol, plus sec en 2013, se traduit par des valeurs de résistivité plus importantes cette année-là. Pour bien observer la continuité des structures anthropiques entre les cartes de 2012 et 2013, les échelles de couleur ont été harmonisées. Au vu des résultats obtenus avec le RM15, une investigation complémentaire, par prospection magnétique non tractée (magnétomètre à vapeur de Césium G-858, Geometrics) au niveau de la partie amont de la parcelle AN0002 arrachée, a été réalisée (en vert sur la Figure 6.1) afin d'affiner la reconnaissance des structures anthropiques.

¹⁸ Mortier de tuileau : mélange de chaux et de fragments de terre cuite de construction (briques, tuiles) (Adam, 2011)

L'ensemble des données traitées sous SIG a conduit à une cartographie des vestiges archéologiques au sein des parcelles. Par la suite, les sols des parcelles ont été caractérisés en fonction de la présence ou de l'absence de structures anthropiques, que ce soit par le creusement de sondages à la tarière, de fosses pédologiques et d'investigations au pénétromètre. Il a ainsi été possible d'évaluer la diversité des sols sur les parcelles, et d'estimer leur profondeur. Ces prospections ont fait l'objet d'un rapport détaillé au Service Régional d'Archéologie de Bourgogne (SRA), du fait de la présence de vestiges archéologiques enfouis.

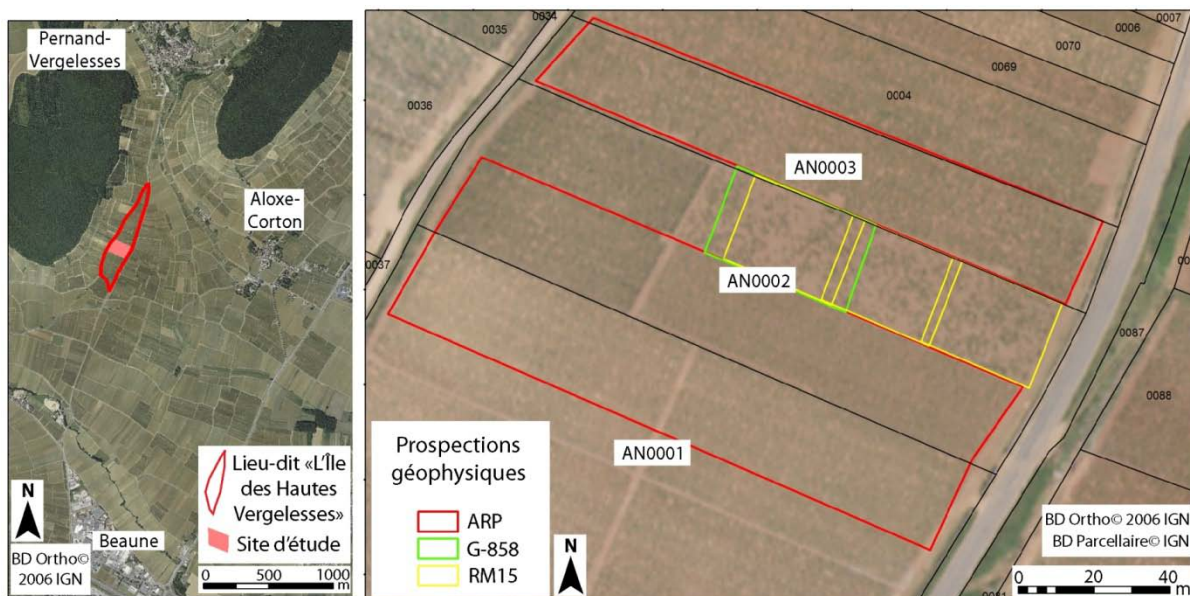


Figure 6.1 Localisation du site d'étude et des différentes prospections géophysiques réalisées au lieu-dit « L'Île des Hautes Vergelles ».

6.1.1.1 Prospections géophysiques

Les trois cartes de résistivité obtenues pour les trois profondeurs d'investigation ont été utilisées pour identifier les nombreuses structures anthropiques (Figure 6.2). Ces dernières étant observées sur la voie 1 (0-50 cm), elles sont donc proches de la surface du sol. Sur cette voie, les valeurs de résistivité varient de 35 à 187 Ohm.m, pour une valeur moyenne de 81 Ohm.m (RMSE = 3,4 Ohm.m).

À l'ouest, les valeurs de résistivité alternent entre des valeurs modérées (70 Ohm.m) et des valeurs de forte résistivité (100 à 170 Ohm.m). Ces zones de largeur pluri-métriques sont parallèles aux courbes de niveau, et sont interprétées comme étant liées au substrat marno-calcaire de l'Oxfordien moyen (Rémond, 1985). Les calcaires sont associés aux fortes valeurs de résistivité et les marnes silteuses sont caractérisées par des valeurs modérées.

Dans le secteur NNE, les valeurs de résistivité sont homogènes, de l'ordre de 70 Ohm.m, à l'exception d'une bande de quelques mètres de largeur située dans le bas de la parcelle AN0003 (notée L1b). Dans le secteur SSE, de nombreuses zones présentent de fortes valeurs de résistivité (> 100 Ohm.m), ainsi que des formes géométriques linéaires (notées L). Trois structures de formes quadrangulaires sont observées dans les parcelles AN0001 et AN0002 (notées Q1, Q2 et Q3). On peut également voir des alignements de structures ponctuelles de forte résistivité (notées AL). Les fortes valeurs de résistivité (> 100 Ohm.m) attestent de la présence d'un matériau résistant, probablement du calcaire.

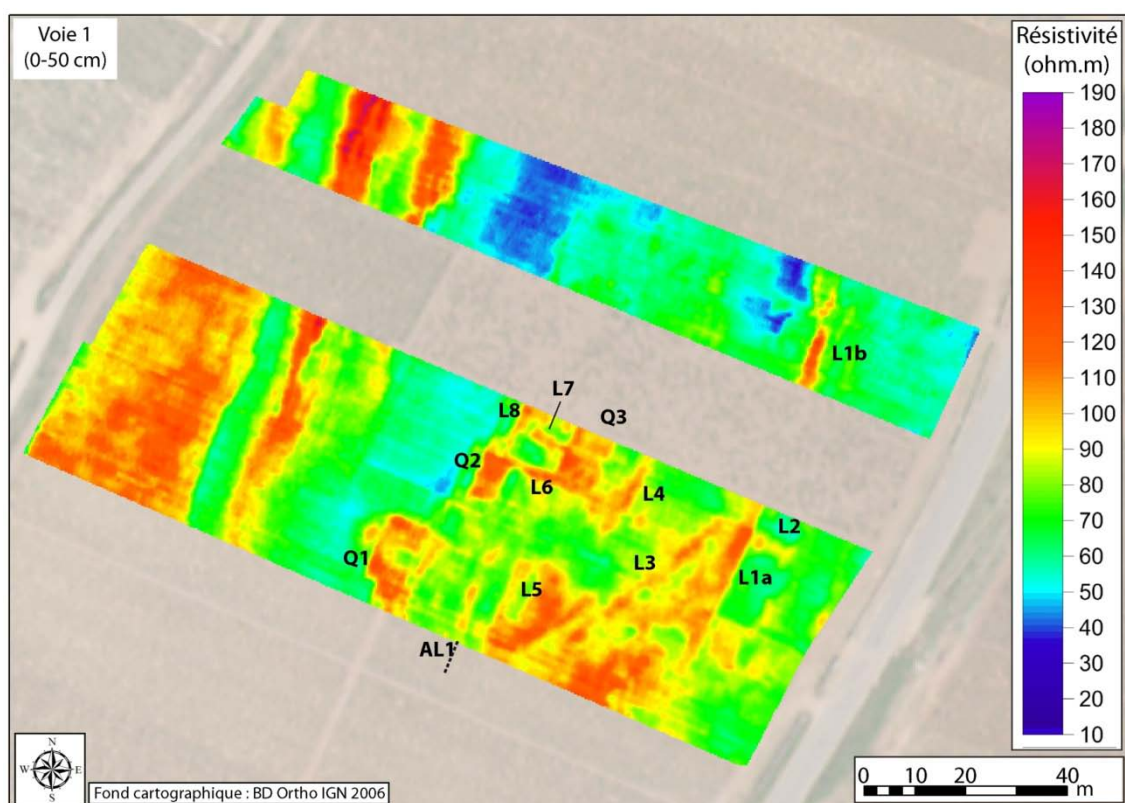


Figure 6.2 Carte de résistivité électrique du sol (0-50 cm), acquise par le système ARP[®]. Les annotations font référence aux structures archéologiques identifiées.

Sur la voie 2 (0-100 cm), les valeurs de résistivité varient de 31 à 189 Ohm.m (ARP[®]) (RMSE = 2,9 Ohm.m) et de 87 à 192 Ohm.m (RM15) (RMSE = 6,6 Ohm.m). Les principales structures relevées sur la voie 1 (ARP[®]) sont observables sur la voie 2 et présentent des plus faibles valeurs de résistivité. Ces dernières peuvent s'expliquer par une humidité plus faible en surface, qui induit une augmentation des valeurs de résistivité sur la voie 1, ou bien par la présence d'un matériau plus conducteur sous les structures anthropiques. Sur la carte de résistivité issue du résistivimètre

RM15¹⁹ (Geoscan Research), des structures linéaires de forte résistivité peuvent également être observées (160 à 180 Ohm.m) (Figure 6.3). Les structures linéaires L4b et L8b correspondent au prolongement des structures L8 et L4 observées sur la voie 1 de la parcelle voisine (Figure 6.3 et Figure 6.2). La structure linéaire L11 se situe dans le prolongement de la forme quadrangulaire Q3. De même, la structure linéaire L1c prolonge la structure L1b. Deux autres structures linéaires d'orientation NO-SE sont observées dans la partie médiane de la parcelle arrachée (Notées L9 et L10 sur la Figure 6.3). L'ensemble peut être interprété comme la base ou la fondation de murs. Un alignement de données ponctuelles de plus faible résistance (150 Ohm.m) est présent à l'amont de la parcelle, parallèle à la structure linéaire L8 et L8b. Ces structures délimitent, par leur géométrie et leurs connexions, des zones présentant de plus faibles valeurs de résistivité, de l'ordre de 130 Ohm.m (notées S sur la Figure 6.3). La fosse pédologique F2, creusée en 2011 par le viticulteur pour caractériser les sols de sa parcelle, se situait au sein de la zone S1 (Figure 6.3). Le fond de la fosse a mis au jour un sol bétonné constitué de mortier de tuileau²⁰. Les zones S1 à S4 peuvent donc être interprétées comme des sols bétonnés. Une structure isolée de petite taille est localisée dans la partie médiane de la parcelle (notée P1 sur la Figure 6.3). Elle pourrait correspondre à un bloc de calcaire isolé, du fait de sa forte valeur de résistivité (160 Ohm.m). Les fortes valeurs de résistivité (140 à 169 Ohm.m) observées dans le bas de la parcelle ne présentent pas de forme particulière. Il s'agit sans doute du substrat géologique de type calcaire.

Sur la voie 3 (0-200 cm), les valeurs de résistivité varient de 25 à 283 Ohm.m, pour une valeur moyenne de 92 Ohm.m (RMSE = 3,7 Ohm.m) (Figure 6.3). Cette nette augmentation des valeurs de résistivité est corrélée avec la mise en évidence du substrat calcaire au niveau de la zone aval des parcelles. Les structures anthropiques sont moins visibles sur cette voie, car elles sont masquées par les fortes valeurs du substrat calcaire sous-jacent. À l'est de la parcelle AN0002, les valeurs de résistivité sont très faibles (< 40 Ohm.m). La limite entre les faibles et les fortes valeurs de résistivité est nette et linéaire. Cette voie pourrait correspondre à une probable zone d'extraction de calcaire (notée EX1 sur la Figure 6.3).

¹⁹ Le résistivimètre RM-15 mesure la résistivité électrique entre un jeu d'électrodes d'injection et un jeu d'électrodes de mesure. Le portique, sur lequel est installé un jeu d'électrodes émettrice-réceptrice, est relié à un jeu d'électrodes émettrice-réceptrice situé à l'infini (dispositif pole-pole). Les mesures se font en déplaçant le portique pour un pas donné. L'espacement d'un mètre entre l'électrode émettrice et réceptrice situées sous le portique permet d'obtenir une profondeur d'investigation de l'ordre du mètre. Pour ce dispositif la mise en place d'un carroyage est nécessaire pour obtenir une prospection régulière. Le déplacement du dispositif, d'un carroyage à l'autre, oblige à déplacer les électrodes situées à l'infini. Ainsi, pour calibrer l'ensemble des données entre elles, les carroyages doivent se chevaucher.

²⁰ Mortier de tuileau : mélange de chaux et de fragments de terres cuites de construction (briques, tuiles) (Adam, 2011)

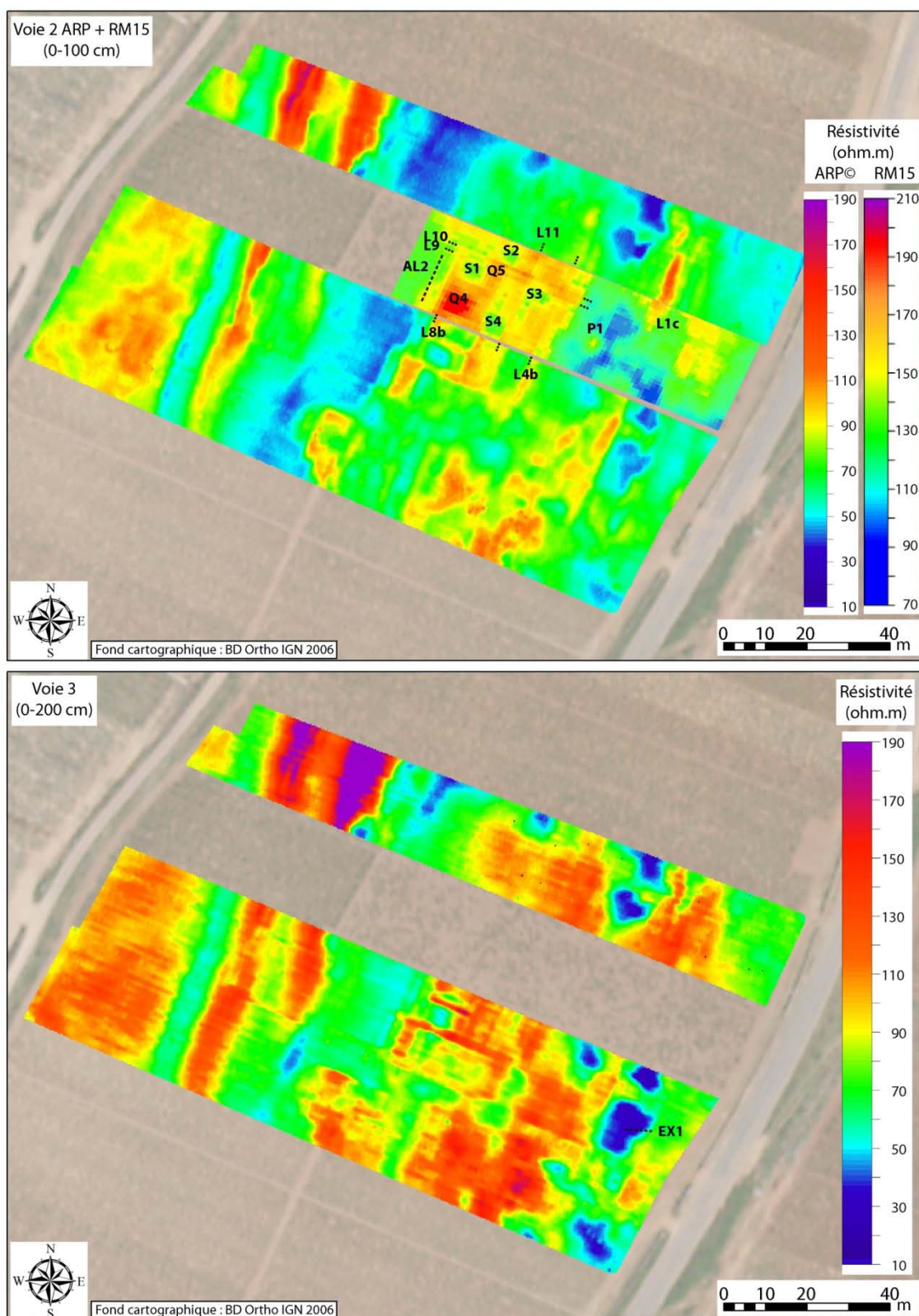


Figure 6.3 Cartes de résistivité électrique du sol pour les deux niveaux les plus profonds (0-100 cm et 0-200 cm). La résistivité de la parcelle arrachée a été caractérisée par le résistivimètre RM15.

Pour compléter et affiner la prospection électrique effectuée sur la parcelle AN0002 arrachée, une prospection magnétique a été réalisée en avril 2013 sur la partie amont de la parcelle (rectangle vert sur la Figure 6.1) à l'aide d'un gradiomètre G-858²¹ à vapeur de césium en mode vertical. La partie aval n'a pu être prospectée car le temps imparti au prêt du matériel était trop court, à l'exception d'un rectangle de 40 x 23 m. Pour obtenir une cartographie précise et régulière, les données ont été acquises parallèlement aux courbes de niveau pour s'assurer d'une vitesse de déplacement constante. La présence de fils de fer du palissage des rangs des parcelles voisines a perturbé le signal enregistré, sur une distance d'environ 2 m. De ce fait, les bordures nord et sud ne seront pas interprétées.

La carte représentant le gradient du champ magnétique local met en évidence deux types de structure matérialisés sur la carte par deux anomalies d'intensité négative (rouge) et positive (bleu) (Figure 6.4). Les observations effectuées par la prospection électrique ont pu être comparées à celles de la prospection magnétique. Ainsi, les valeurs positives mettent en évidence la présence de murs ou de fondations de mur (calcaire riche en minéraux antiferromagnétiques), alors que les valeurs négatives semblent caractériser les sols bétonnés constitués de mortier de tuileau (riche en minéraux ferrimagnétiques et/ou ferromagnétiques).

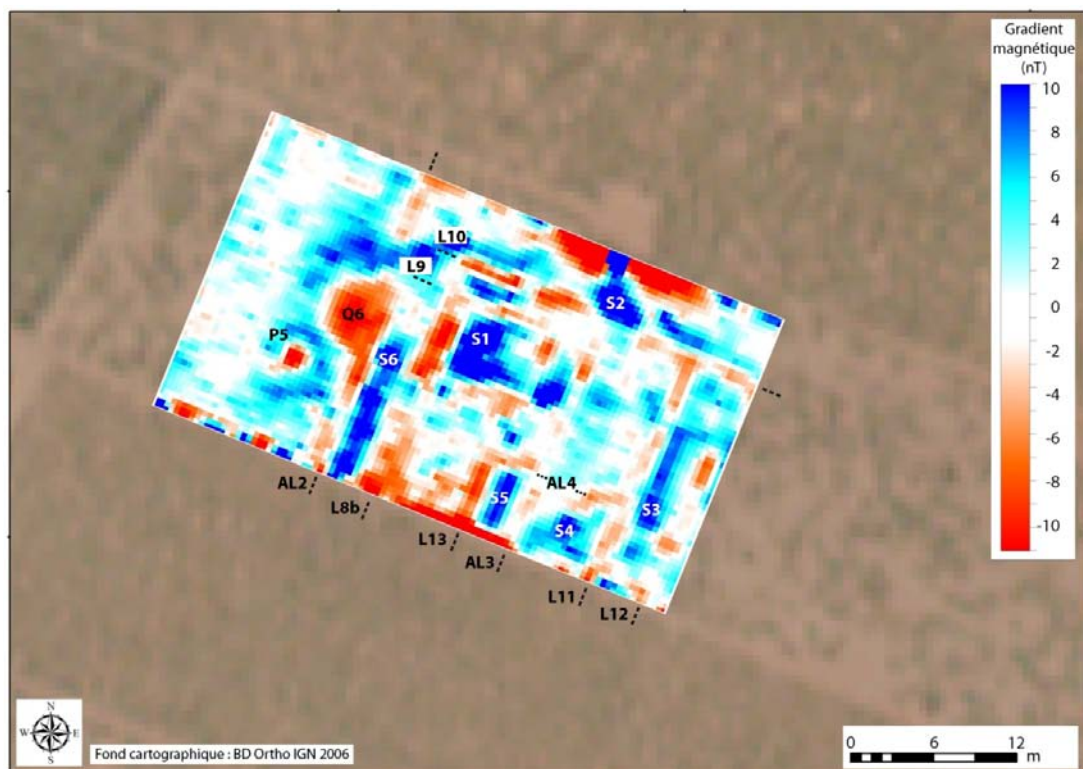


Figure 6.4 Cartographie du gradient du champ magnétique local (parcelle AN0002 arrachée).

²¹ Le magnétomètre G-858 permet de mesurer les fines variations du champ magnétique généré par le centre de la Terre, de l'ordre du nanoTesla. Les matériaux constituant le sol et le sous-sol présentent leur propre aimantation. Les fines variations entre le champ magnétique terrestre et le champ magnétique des objets peuvent être enregistrées par cette méthode (Demoule *et al.*, 2009).

Les structures linéaires observées sur la carte de résistivité de la parcelle AN0002 arrachée sont également visibles sur la carte du gradient magnétique (Figure 6.4), correspondant aux structures linéaires L8b, L9, L10 et L11. L'alignement AL2 est également reconnu par la prospection magnétique. D'autres structures linéaires ont pu être observées : les structures L12 et L13. Ces dernières n'ont pu être identifiées par la résistivité électrique, car le contraste entre le calcaire du substrat et le calcaire des murs ou fondations n'est pas assez fort. Les alignements AL3 et AL4, observables sur la carte du gradient magnétique, ne sont pas visibles sur la carte de résistivité pour les mêmes raisons. Une structure ponctuelle a également été mise en évidence dans la partie amont de la parcelle (structure P5 sur la Figure 6.4). La valeur du gradient magnétique positif laisse à penser qu'il s'agirait d'un bloc de calcaire isolé. Une structure en forme de demi-cercle, caractérisée par un gradient magnétique positif, est observée dans la partie ouest de la parcelle (notée Q6 sur la Figure 6.4). Elle est accolée à la structure AL2 et répond au signal magnétique du calcaire. Enfin, des structures de formes plus ou moins géométriques à gradient magnétique négatif sont identifiables. Quatre de ces zones correspondent aux structures notées S1 à S4 (Figure 6.3). Elles ont été identifiées comme des sols bétonnés constitués de mortier de tuileau. Les structures S5 et S6, reconnues sur la carte du gradient magnétique, possèdent les mêmes caractéristiques magnétiques que les structures S1 à S4 (Figure 6.4). Cependant, ces zones présentent de fortes valeurs de résistivité (Figure 6.3), ce qui ne permet pas de certifier qu'elles soient composées de mortiers de tuileau (Figure 6.4).

L'ensemble des prospections géophysiques a permis l'identification de vestiges archéologiques. Ceux-ci présentent trois formes principales, *i.e.* des lignes, des points et des surfaces géométriques. Ces formes géométriques particulières mettent en évidence la présence de fondations d'un édifice maçonné. De plus, le mobilier observé à la surface de la parcelle a été utilisé pour caractériser et dater les structures observées par prospections géophysiques (Figure 6.5A, B et C). La datation au carbone 14, réalisée sur un charbon de bois collé sur un fragment de *tegula*²² retrouvé au fond de la fosse pédologique F2, a validé les hypothèses de datation. L'édifice est daté du II^es apr. J.-C. (Poz-51653, 1930 ± 30 cal BP, Annexe 3). L'ensemble des données a été utilisé pour produire l'esquisse d'un plan interprétatif de la construction (Figure 6.5D). La présence de mortier de tuileau démontre que certaines pièces présentaient des sols bétonnés, probablement sur hypocaustes²³. On peut ainsi supposer que ces vestiges archéologiques appartenaient en partie à la partie résidentielle (*pars urbana*²⁴) d'une villa gallo-romaine. Les fondations observées sur la voie 1 (0-50 cm) montrent que les structures sont proches de la surface du sol. En dehors de la zone qui présente ces structures, les valeurs de résistivité sont nettement plus faibles. Il est donc possible que ces vestiges aient une influence sur les caractéristiques physiques du sol et notamment sur l'épaisseur de celui-ci.

²² *Tegula* : tuile plate utilisée durant l'Antiquité.

²³ Hypocauste : système de chauffage par le sol utilisé aux époques romaines et gallo-romaines (Adam, 2011).

²⁴ *Pars urbana* : partie de la villa réservée à la résidence du maître des lieux.

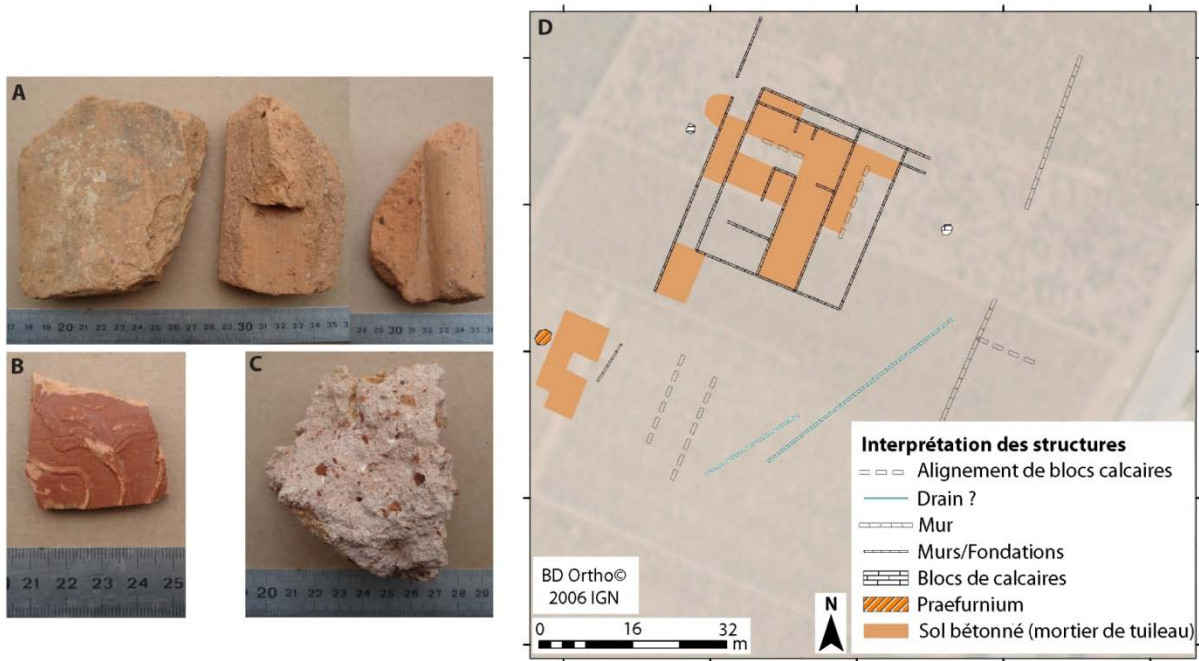


Figure 6.5 Mobilier observé à la surface du sol lors de la prospection géophysique. De nombreux fragments de tegulae (A, tuiles romaines) couvrent la surface, et quelques rares fragments de céramique sigillée (B, poterie utilisée pour le service à table) ont été observés. Des blocs épars de mortier de tuileau ont été localisés au niveau des structures (C). Plan interprétatif des structures observées sur les cartes géophysiques (D).

6.1.1.2 Caractérisation des sols et de leur profondeur

Pour évaluer l'impact des structures anthropiques sur la diversité des sols à l'échelle intra-parcellaire, plusieurs techniques d'investigation ont été utilisées, *i.e.* sondages à la tarière manuelle, fosses pédologiques et profils au pénétromètre. Les données recueillies ont été utilisées pour caractériser les propriétés physiques des sols et estimer leur profondeur. La localisation des observations a été choisie à partir des cartes géophysiques, afin de caractériser les sols sur structures et hors structures archéologiques.

Trois fosses pédologiques ont été creusées au sein de la parcelle AN0002 arrachée (Figure 6.6). Elles ont mis en évidence une forte variabilité de l'épaisseur du sol entre les zones hors structures et sur structures. Les sols des fosses F1 et F3, situées respectivement à l'aval et à l'amont de la parcelle, sont des Calcosols argileux épais (respectivement 60 et 75 cm de profondeur). Pour la fosse F2, située sur les structures anthropiques, le sol de 30 à 40 cm d'épaisseur est argileux (Figure 6.7). Le fond de la fosse présente, à l'affleurement, un sol bétonné de mortier de tuileau. Aucune variation notable de pierrosité, de couleur et de texture n'a été observée sur les sols des trois fosses.

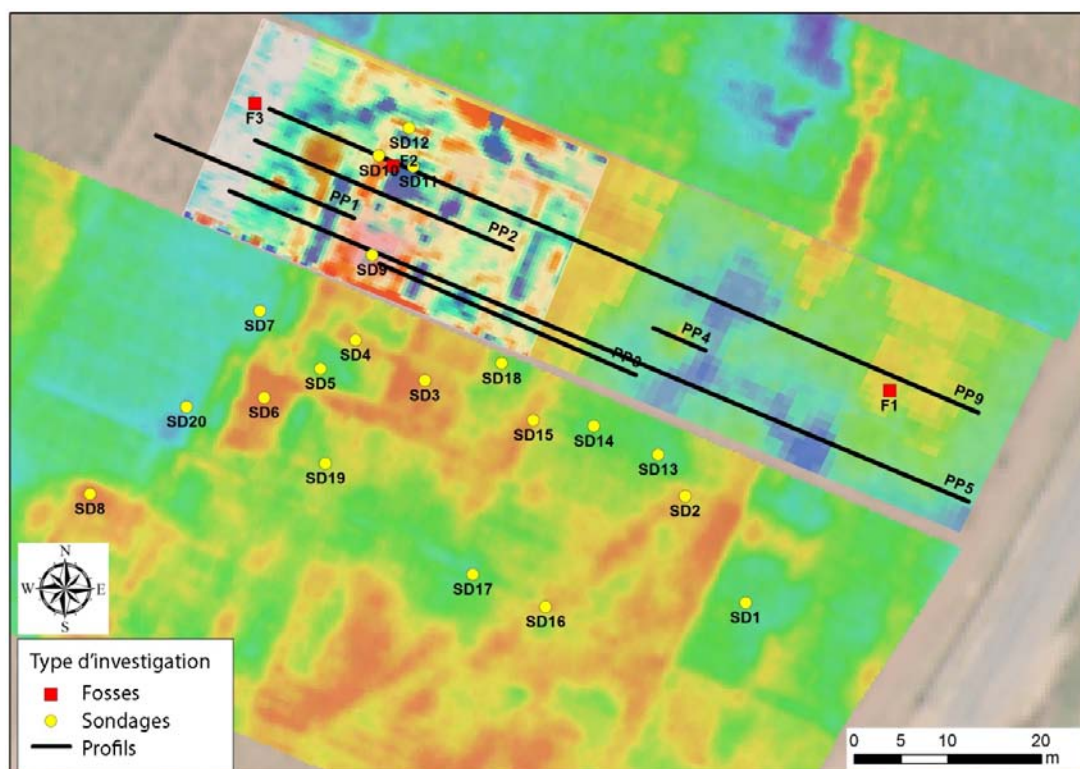


Figure 6.6 Localisation des diverses méthodes d'investigation pédologique, déterminée à partir des cartes issues des prospections géophysiques.

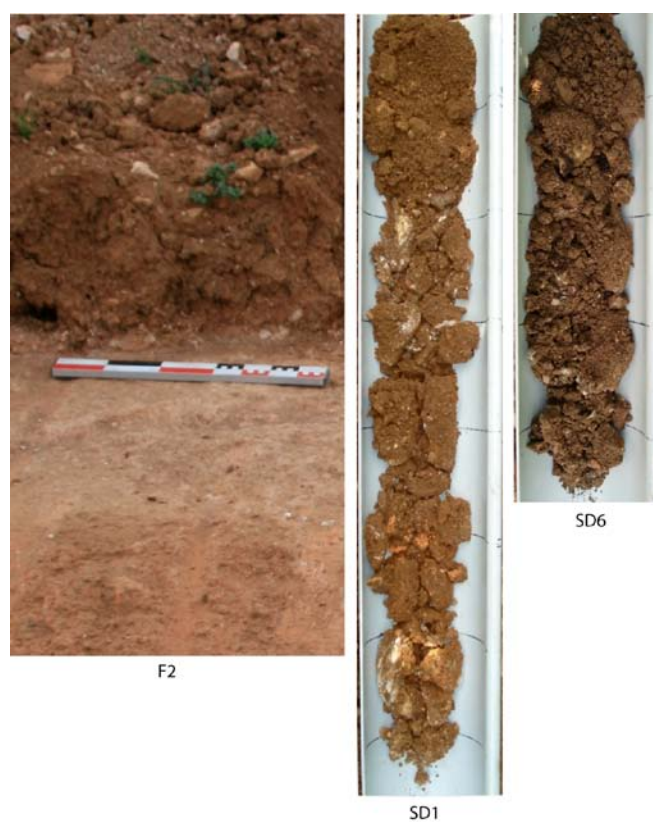


Figure 6.7 Photographies de quelques relevés pédologiques effectués sur le secteur d'étude. Le sol peu épais de la fosse F2 se situe sur un sol bétonné constitué de mortier de tuileau.

Sur le secteur d'étude, 20 sondages à la tarière manuelle ont été réalisés : 6 ont été creusés dans des zones hors structures archéologiques et 14 dans des zones supposées présenter des structures (Figure 6.6). Les sondages ont été complétés par 6 profils, réalisés au pénétromètre. Quatre profils ont été acquis à une résolution métrique (PP1 à PP4) et deux à une résolution pluri-métriques (8 m). Au total, 134 profondeurs de sol ont été estimées, dont 65 situées à l'aplomb de structures et 55 hors structures (14 positions n'ont pas pu être identifiées précisément). Les différents sondages réalisés ont montré que les caractéristiques pédologiques des sols n'étaient pas contrôlées par la présence de structures sous-jacentes, à l'exception de l'épaisseur des sols. Les sols qui caractérisent l'ensemble des parcelles sont des Calcosols argileux anthropisés. Sur la quasi-totalité des sondages, des fragments de céramique ont été observés, et ce, jusqu'à des profondeurs importantes (60-70 cm pour le sondage SD1, Figure 6.7). De plus, l'ensemble des sondages et profils a permis d'évaluer la profondeur du sol pour chaque zone. Concernant les sondages, les estimations montrent que la profondeur des sols, situés à l'aplomb des structures et hors structures, est très significativement différente (Mann-Whitney test, $p\text{-value} = 0.008$, $\alpha = 0.01$). Les sols situés à l'aplomb des structures présentent une médiane de 40 cm alors que les sols situés en dehors des structures sont plus épais, soit 69 cm (Figure 6.8). Pour les profils réalisés au pénétromètre, les profondeurs des sols situés sur des structures et hors structures sont très significativement différentes (Mann-Whitney test, $p\text{-value} < 0.0001$, $\alpha = 0.01$). Les sols situés à l'aplomb des structures présentent une épaisseur moyenne de 45 cm alors que les sols situés en dehors des structures sont plus épais, soit 54 cm (Figure 6.8). Il apparaît donc que les structures anthropiques, identifiées par le biais des cartes de résistivité électrique, expliquent la plus faible épaisseur du sol.

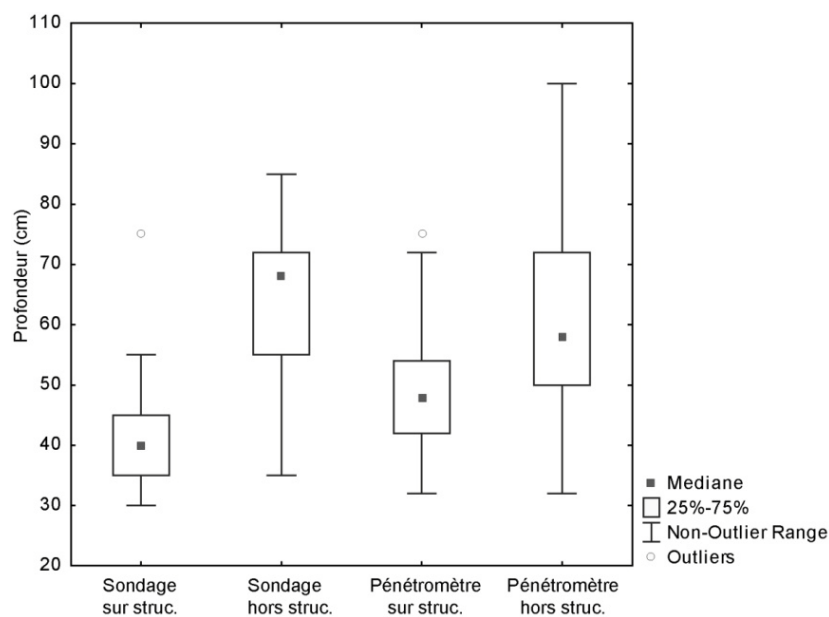


Figure 6.8 Distribution des épaisseurs des sols estimées en fonction de la présence ou non de structures archéologiques, pour deux types de prospection pédologique (sondage et pénétromètre).

6.1.1.3 Influence des structures anthropiques sur la vigne

Les différentes études de terroirs, réalisées ces vingt dernières années, montrent que l'alimentation en eau de la vigne est, dans de très nombreux cas, le facteur de qualité gustative le plus important (Morlat, 1989 ; Van Leeuwen *et al.*, 2003). Divers facteurs contrôlent la réserve utile en eau du sol, tels que la texture, la quantité de matière organique, la pierrosité et l'épaisseur du sol. Sur le secteur d'étude, la caractérisation des sols a démontré que la variabilité des propriétés physiques des sols était faible, voire nulle. Cette faible variabilité peut s'expliquer par l'anthropisation des sols très marquée sur toute leur profondeur. Le seul paramètre qui semble varier de façon significative est l'épaisseur du sol. Nous avons démontré que celle-ci était contrôlée, en partie, par la présence de structures anthropiques. Elle va donc jouer un rôle primordial sur le contrôle de la réserve utile en eau du sol, et pourrait avoir une incidence sur la production viticole. Une cartographie de la variabilité spatiale de l'épaisseur du sol pourrait donner des indications sur la distribution spatiale de la réserve utile en eau du sol de la parcelle à haute résolution.

Les cartes de résistivité électrique et les sondages réalisés à la tarière ont été utilisés pour réaliser une carte de la répartition spatiale de l'épaisseur du sol dans la parcelle AN0002 plantée. Les trois cartes présentent des motifs similaires qui sont nettement corrélés entre eux ($V1-V2 R^2 = 0,93$; $V1-V3 R^2 = 0,66$; $V2-V3 R^2 = 0,84$). Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée sur les trois cartes de profondeur. L'ACP permet de supprimer les effets de colinéarité entre les trois cartes (Priori *et al.*, 2013). La première composante principale renseigne sur plus de 86,5 % de la variance totale et sera utilisée pour cartographier les variations de l'épaisseur du sol. Les profondeurs estimées à l'aide de 16 sondages (parcelle AN0002 plantée) ont été confrontées aux valeurs de la composante 1 de l'ACP pour déterminer les relations potentielles entre la résistivité électrique et l'épaisseur du sol. Plusieurs modèles de régression ont été testés, *i.e.* linéaires, logarithmiques, polynomiaux. Les meilleurs résultats ont été obtenus à partir du modèle linéaire avec un coefficient de corrélation R^2 de 0.71 (Figure 6.9). L'erreur quadratique moyenne du modèle (RMSE) est de 10,8 cm pour une valeur moyenne de 52,8 cm.

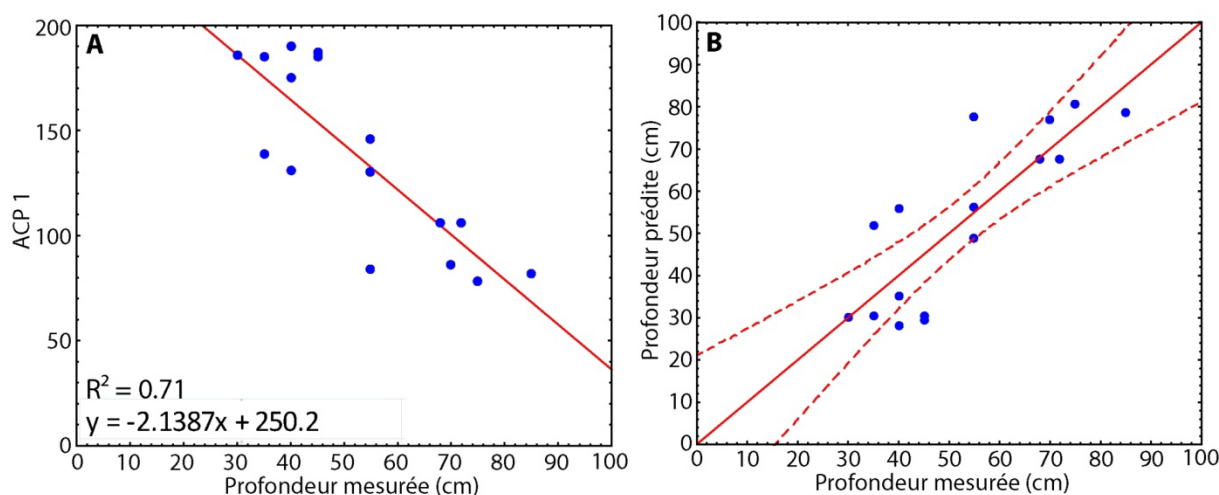


Figure 6.9 Représentation graphique des valeurs issues de la composante 1 de l'ACP, en fonction de la profondeur du sol estimée par sondages à la tarière (A). Nuage de points représentant la profondeur estimée par le modèle de corrélation, en fonction de la profondeur estimée par sondages à la tarière, avec la droite de corrélation et l'intervalle de confiance à 95% (B).

La carte de profondeur pour la parcelle AN0002 plantée a été obtenue en appliquant l'équation du modèle de régression linéaire (Figure 6.9, Figure 6.10) sur l'ensemble des valeurs de la composante 1 de l'ACP. Cette carte permet de localiser les variations d'épaisseur du sol à l'échelle du mètre et pourrait être utilisée pour quantifier la réserve utile en eau des sols de la parcelle.

La discrimination isotopique du carbone 13, nommée $\delta^{13}\text{C}$, réalisée sur les baies de raisin à maturité constitue un indicateur global de la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la phase de maturation (Van Leeuwen et Vivin, 2008 ; Van Leeuwen *et al.*, 2001). Cette méthode a été envisagée pour évaluer l'impact des structures anthropiques sur la production viticole, lié à l'épaisseur du sol. Des mesures du $\delta^{13}\text{C}$ auraient permis d'évaluer le stress hydrique de la vigne en fonction de l'épaisseur du sol. Cependant, l'orage de grêle du 23 juillet 2013 a détruit la quasi-totalité du raisin de la parcelle. Les grappes restantes présentaient au moins 80 % de baies détruites et/ou pourries. Cet événement météorologique a donc compromis la réalisation des mesures. Bien que celles-ci n'aient pu aboutir, on peut estimer que les structures anthropiques semblent influencer la vigueur de la vigne. Les viticulteurs qui exploitent les parcelles étudiées observent des hétérogénéités de vigueur au sein des parcelles ; ces zones ne semblent pas être liées à des secteurs topographiques particuliers, ni à des porte-greffes spécifiques, mais bien à la présence des structures anthropiques. De plus, lors de l'arrachage de la parcelle AN0002, le viticulteur a remarqué, au niveau des sols en mortier de tuileau, des racines centimétriques horizontales de plusieurs mètres de longueur. Ces observations montrent que la vigne développe son système racinaire horizontalement, car les structures anthropiques non fissurées ne permettent pas un développement en profondeur.

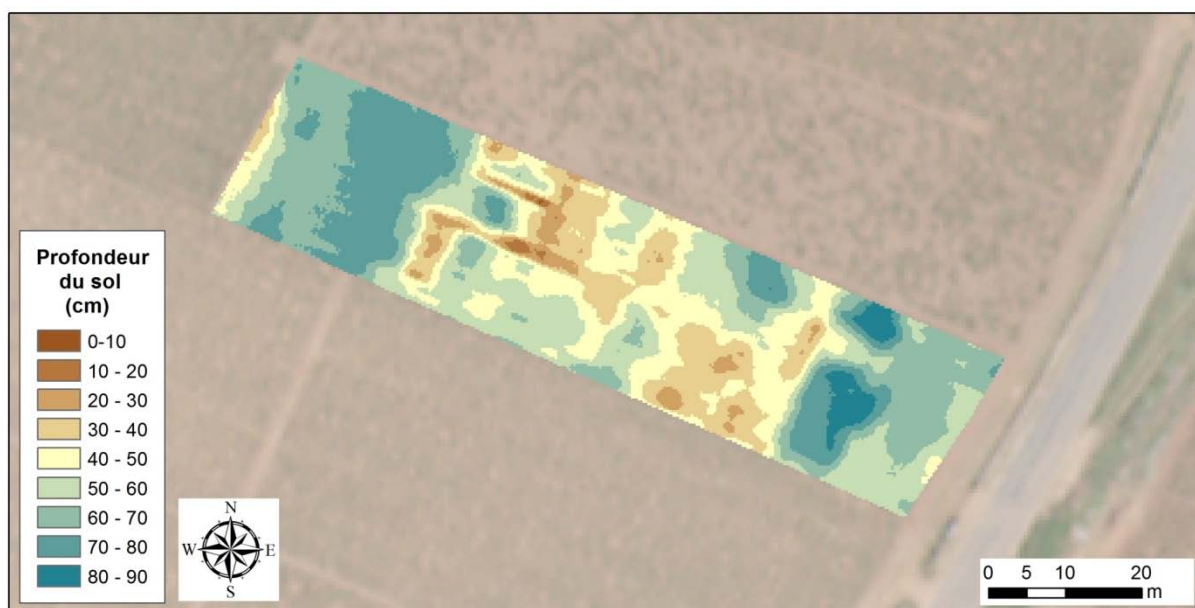


Figure 6.10 Carte de la profondeur du sol de la parcelle AN0002 plantée, réalisée à partir du modèle de régression linéaire.

L'occupation gallo-romaine de ce versant, actuellement planté en vignes, a pu être identifiée à partir de prospections géophysiques. Ces dernières, réalisées à une résolution métrique, ont permis de cartographier avec précision les structures anthropiques et de caractériser leur nature. Ces prospections, couplées à la caractérisation des sols, ont mis en évidence l'impact des structures sur l'épaisseur des sols. Cependant, il n'a pas été possible d'évaluer l'influence de ces structures sur la vigne. Il convient d'admettre que la présence d'un tel édifice en position de versant est un cas isolé et qu'elle ne peut être généralisée à l'ensemble de la Côte. Néanmoins, cette étude laisse apparaître que les sols viticoles sont depuis fort longtemps sujets à des transformations liées à l'activité humaine passée. De plus, après plus d'un millénaire de mise en culture probable de vignes, cette activité anthropique est encore visible de nos jours et semble avoir une incidence sur le développement de la vigne.

6.1.2 Mise en culture sur d'anciennes carrières et gravières

De très nombreuses carrières à ciel ouvert sont repérables sur la Côte. Les diverses formations calcaires, qui constituent le sous-sol de la Côte, ont été utilisées principalement comme pierre de construction. Ces extractions ont été amplifiées au cours du Moyen-Âge par la construction des habitats des villages et des clos viticoles, délimités par des murs en pierre. Ces carrières ont également été utilisées pour la construction d'édifices plus somptueux comme le château du Clos de Vougeot ou l'abbaye cistercienne Notre-Dame de Cîteaux (Foucher, 2010). La construction du Château du Clos de

Vougeot et de ses annexes a été réalisée principalement à partir des deux formations géologiques qui affleurent localement, *i.e.* l'Oolithe Blanche et le Calcaire de Comblanchien, que l'on peut observer dans la Perrière (carrière) du Clos (Foucher et Garcia, 2009). Certaines formations géologiques se délitent en dalles minces appelées laves en Bourgogne (littéralement « pierre qu'on lève ») ; c'est le cas des Calcaires de Ladoix qui étaient utilisés pour couvrir les toits des habitations et pour la construction de murs en pierres sèches.

Ces activités d'extraction ont laissé de nombreuses traces dans le paysage viticole actuel. Certaines carrières abandonnées montrent les stigmates de ces anciennes exploitations ; d'autres ont été réaménagées et replantées en vigne. Ces lieux d'exploitation, à ce jour plus ou moins visibles dans le paysage viticole, peuvent en partie être localisés à partir de la toponymie du vignoble bourguignon. Les toponymes « *la(les) perrière(s)* » (Meursault, Beaune, Aloxe-Corton, Vougeot, Fixin) et « *les lavières* » (Saint-Romain, Savigny-les-Beaune) renseignent sur la présence d'anciennes carrières d'exploitation de pierres et/ ou de laves (Landrieu et Pitiot, 2012). Cependant, ces toponymes peuvent avoir plusieurs sens et ne sont pas forcément liés à une activité d'extraction, comme pour le cas des « *Perrières* » qui peut faire référence à la présence d'une voie de communication empierrée. Ces anciennes zones d'exploitation peuvent également être mises en évidence pour certaines zones à partir d'archives. Les carrières d'exploitation du Calcaire de Dijon-Corton et du Calcaire de Ladoix, situées sur les communes d'Aloxe-Corton et de Ladoix-Serrigny, sont localisées sur l'*Atlas général des routes de la Province de Bourgogne* (Figure 6.11) (ADCO, C 3882-3883) datant de 1759.



Figure 6.11 Extrait du plan ancien, issu de l'*Atlas général des routes de la Province de Bourgogne*, entre Ladoix-Serrigny et Aloxe-Corton, mettant en évidence les zones d'extraction de la Dalle Nacrée en contrebas de la Butte de Corton, actuellement plantées en vignes (ADCO, C 3882-3883).

Ces structures anthropiques anciennes, partiellement replantées en vignes, vont présenter des caractéristiques physiographiques et pédologiques spécifiques au regard des parcelles voisines. Une ancienne carrière d'exploitation de la Pierre de Dijon-Corton à Aloxe-Corton, au lieu-dit « Les Bressandes », en est un bon exemple (Figure 6.12A). Le MNT à haute résolution spatiale du secteur (résolution égale à 5 m) met en évidence une modification locale du relief sur le lieu-dit (Figure 6.12B). Cette dernière contribue à une nette diminution des valeurs de pentes, inférieures à 5° au niveau de la carrière, avec une rupture nette correspondant à l'ancien front de taille (Figure 6.12C), alors que la partie du lieu-dit, qui n'a pas fait l'objet d'extraction, présente des pentes plus fortes, comprises entre 15 et 20°. De plus, l'exposition au sein de la zone remblayée varie entre l'est, le sud-est et le sud-ouest, alors que le lieu-dit est principalement exposé à l'est (Figure 6.12D). Ces modifications locales des paramètres physiographiques peuvent ainsi influencer la culture de la vigne, en créant des microclimats. Ces influences peuvent être bénéfiques pour la vigne, *i.e.* expositions favorables, pentes plus faibles limitant l'érosion, protection contre les courants d'air froid et les brouillards givrants glissant le long de la pente. Elles peuvent également être néfastes, *i.e.* expositions défavorables limitant l'ensoleillement, expositions différentielles au sein d'une même parcelle qui pourraient conduire à des maturités décalées.

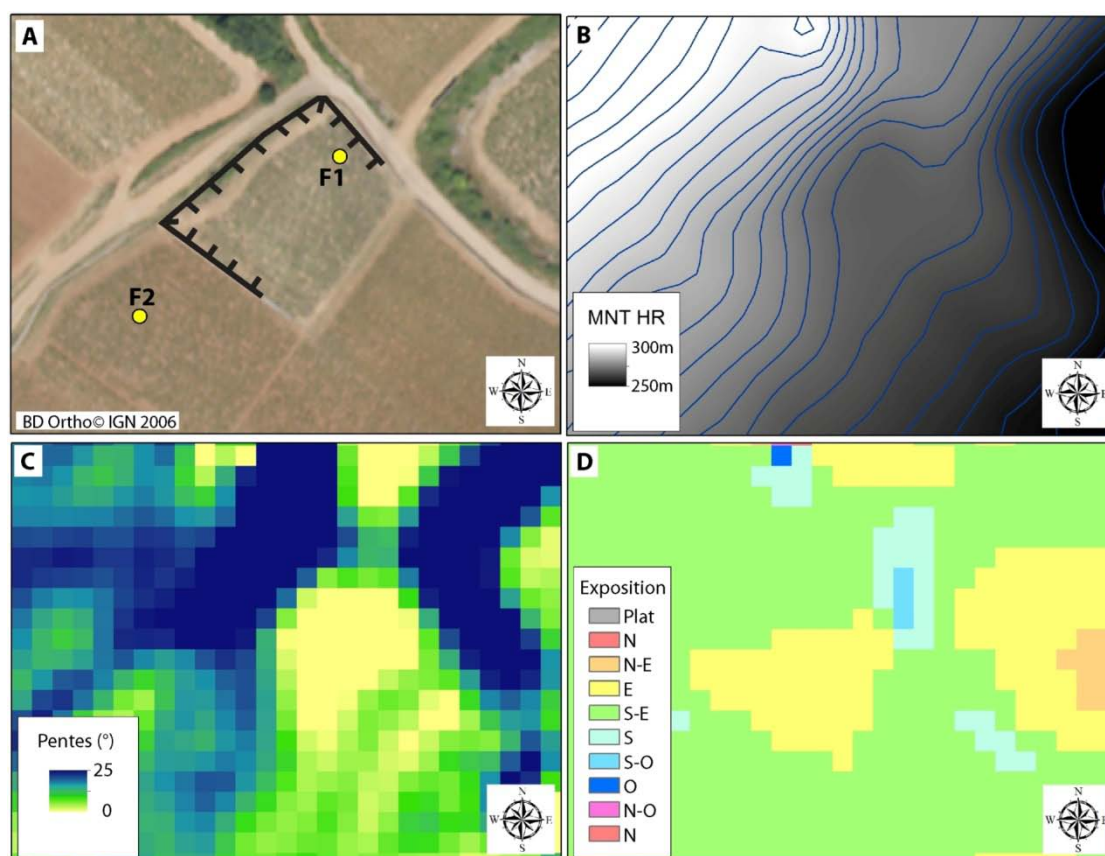


Figure 6.12 Ancienne carrière d'exploitation de la pierre de Dijon-Corton à Aloxe-Corton au lieu-dit « Les Bressandes » (A). Les courbes de niveau plaquées sur le MNT à haute résolution, 5m (B), la carte des pentes (C) et la carte des expositions (D) mettent en évidence une modification locale des paramètres physiographiques du lieu-dit au niveau de l'ancienne carrière.

Ces structures anthropiques ont également un impact évident sur les sols, puisque la terre utilisée pour remblayer ces carrières a été ramenée par l'homme avant la remise en culture de la vigne. Elles conduisent donc à diversifier les sols à l'échelle du lieu-dit, voire à l'échelle de la parcelle. La roche mère qui supporte actuellement le sol – généralement du remblai issu de l'extraction – présente une porosité importante. Sur ces zones de remblai, des apports de terre ont été effectués pour reconstituer un sol. Des fosses pédologiques ont permis de caractériser la variabilité des sols du lieu-dit « Les Bressandes ». Sur l'ancienne carrière, les sols actuellement cultivés en vigne sont des Anthrosoles (Fosse F1 sur la Figure 6.12A), très profonds (de l'ordre de 2 m), du fait de la zone de remblai qui permet aux racines d'exploiter le sol sur toute sa profondeur (Figure 6.13). La matrice limono-argileuse est bien structurée et très calcaire sur l'ensemble du profil (teneur en $\text{CaCO}_3 > 50$ g/100 g). En dehors de l'ancienne carrière, les sols sont moins épais (70 cm) et issus de l'altération de calcaires bioclastiques peu fracturés. La matrice est légèrement plus argileuse en surface, et moins calcaire (teneur en CaCO_3 total égale à 20 g/100 g) par rapport aux sols sur remblai. Ces deux sols présentent des caractéristiques physiques et chimiques qui sont proches, même si l'on observe de légères variations des teneurs en argile et des teneurs en carbonate de calcium total. En revanche, les substrats sur lesquels ils se développent présentent des caractéristiques physiques très différentes. Pour la fosse 1 (F1), le remblai permet un développement racinaire en profondeur très important pour la vigne, tandis que pour la fosse 2 (F2), le substrat calcaire, très peu fracturé, rencontré à 70 cm de profondeur, limite fortement l'enracinement en profondeur. Bien que ces sols présentent des caractéristiques physiques et chimiques proches, leur variation d'épaisseur a une influence sur leur réserve en eau utile.

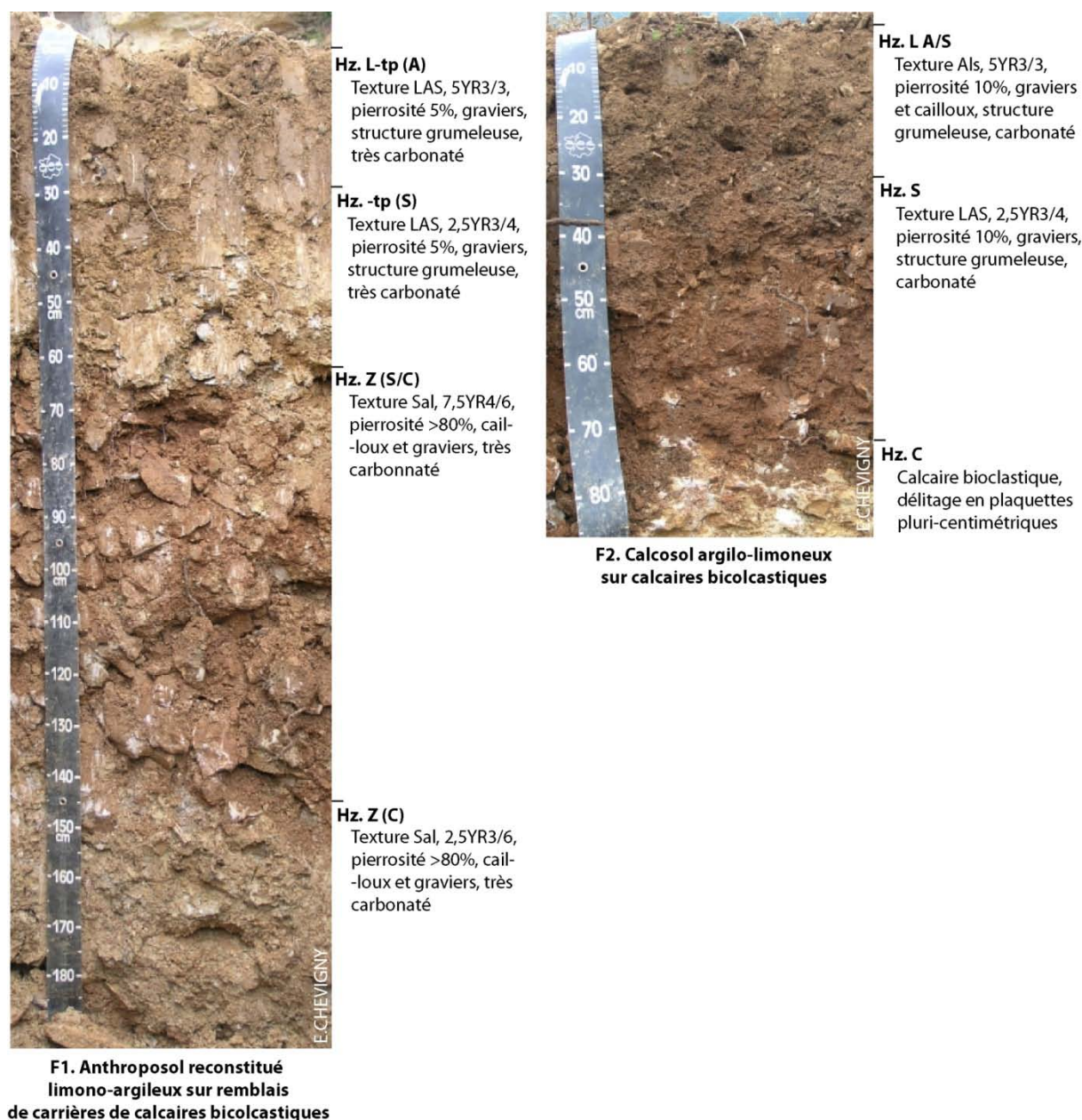


Figure 6.13 Fosses pédologiques creusées au lieu-dit « Les Bressandes », Aloxe-Corton. La fosse F1, située sur l'emplacement de l'ancienne carrière, met en évidence un Anthroposol calcaire très épais, alors que la fosse F2, située hors de la zone d'extraction, présente un Calcosol argilo-limoneux.

Ces modifications peuvent ainsi avoir une incidence sur le développement de la vigne. La prise en compte de ces anciennes exploitations pour des études cartographiques des sols à haute résolution est donc primordiale. Celles-ci conduisant à de nettes modifications du relief, une reconnaissance à partir d'un MNT à haute résolution semble être appropriée. Cette hypothèse a pu être vérifiée par l'utilisation d'un MNT à haute résolution (50 cm), calculé à partir d'une acquisition LiDAR sur le secteur nord de la Côte de Nuits, de Chenôve à Vougeot (pôle géomatique de la MSH de Dijon, 2009). Ce MNT HR a permis de mettre en évidence d'anciennes carrières au sein du vignoble

de Gevrey-Chambertin et également d'anciennes gravières (Figure 6.14). Ces MNT HR peuvent être utilisés pour cartographier d'anciennes zones d'exploitation et ainsi localiser la présence de sols fortement anthropisés.

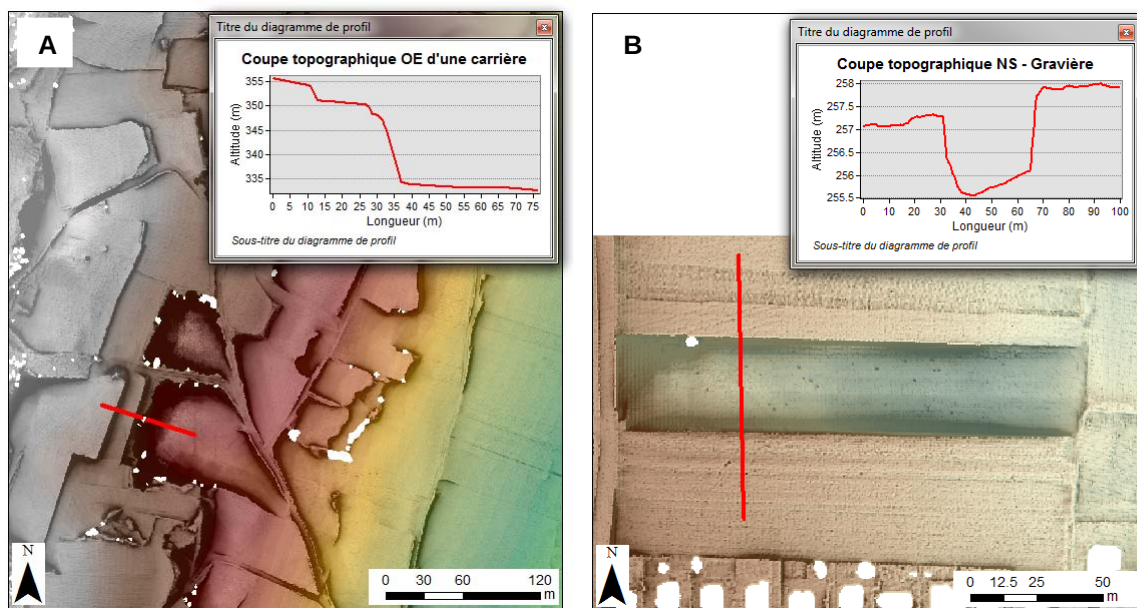


Figure 6.14. Localisation d'anciennes carrières aux lieux-dits « Les Goulots » et « La Combe aux Moines » (A) ainsi que de gravières au lieu-dit « La Justice » (B), actuellement plantées en vignes sur la commune de Gevrey-Chambertin. La résolution spatiale du MNT est de 50 cm (acquisition LiDAR, pôle géomatique de la MSH de Dijon, 2009).

Bien que ces structures anthropiques ne soient pas liées directement à une activité viticole passée, elles jouent un rôle important sur la diversité des sols viticoles actuels. Les modifications morphologiques liées à ces activités définissent des microclimats. Ceux-ci peuvent aujourd'hui avoir un impact sur la culture de la vigne, qu'il soit positif ou négatif. De même, les activités d'extraction, (pierres ou graviers) à ciel ouvert, ont forcément obligé les hommes à détruire le sol initialement présent. La mise en culture de la vigne pour ces secteurs a donc demandé des travaux de remise en état, et notamment des apports de terre conséquents pour reconstituer le sol, que l'on peut qualifier aujourd'hui d'Anthroposol.

6.1.3 Les apports de terre

Les apports de terre sont des pratiques culturelles communes en secteur viticole, effectués dans plusieurs cas, *i.e.* pour combler un appauvrissement du sol suite à un orage qui a causé d'importantes pertes de sol, pour renouveler le stock de terre dans une parcelle lors de nouvelles plantations, ou bien encore pour mettre en culture la vigne au sein d'anciennes zones d'extraction de pierres. Les origines

de ces apports de terre sont diverses (Brenot, 2007). La terre peut être récupérée en bas de parcelle où elle s'est stockée suite à l'érosion liée aux orages. Les apports peuvent également être constitués par les sédiments accumulés dans les bacs de décantation, quand les versants sont équipés de ces dispositifs. Enfin, les apports peuvent être exogènes : la terre peut provenir du plateau, dans la plaine ou dans un autre secteur de vignes. Comme le souligne Gadille (1967), ces pratiques ne sont pas systématiques et dépendent du bon vouloir de chaque viticulteur. C'est ainsi qu'en 1971, le syndicat viticole de Monthelie a bloqué l'apport de 2500 m³ de terre en provenance du lieu-dit « Les Clous » à destination de Puligny (Garcia et Labbé, 2011). Les vignerons de Monthelie « *ne voulaient pas voir dénaturer le vignoble et voir exportée une terre sur laquelle a poussé une appellation déterminée et où sera plantée une autre appellation* » (Bien Public, non signé, 1971).

Les archives montrent que ces apports de terre ont été réalisés depuis plusieurs siècles en Bourgogne. Lavalley (1855) a publié dans son ouvrage, « Histoire et statistique de la vigne et des grands vins de la Côte d'Or », un document relatant les apports de terre effectués sur la parcelle de la Romanée-Conti au cours du XVIII^e s.

« La bonne culture et les bons soins qu'il y donnait firent que ce cultivateur fut continué par le nouvel acquéreur. La vigne était revenue en meilleur état. D'ailleurs, ce qui y contribua encore davantage, ce fut le transport de cent cinquante voitures de terre neuve en gazon, prise sur la montagne, que Croonembourg fit amener et répandre sur cette vigne en 1749, et alors, comme depuis, le produit de cette vigne a été, année commune, d'une pièce de vin par journal.
« En 1785 et 1786, Grimelin, régisseur du prince de Conti, fit creuser près du bas de cette vigne et fit enlever environ huit cents tombereaux de terre, qu'il fit répandre dans les endroits dénués de terrain et dans les parties faibles et stériles de cette pièce de vigne. Il fit remplir le creux de pierrailles, remettre dessus du terrain neuf de bonne qualité, et repeupler cet endroit. Cette amélioration lui causa une dépense de 1,000 livres pour le moins.

(ADCO, cité par Lavalley, 1855, p.177)

De la même façon, à Chenôve, en 1383, « de la terre est prise au lieu-dit *La Chaume de Marsannay* et portée dans le clos des Ducs (actuel « Clos du Roy ») : 691 journées d'ouvriers furent nécessaires » (Beck *et al.*, 1999). Ces apports étaient principalement effectués pour remonter la terre érodée par la pluie et également pour protéger les ceps du gel en complément des travaux de buttage.

Ces apports anthropiques allochtones ou autochtones conduisent à diversifier les types de sol. Ils vont en modifier l'épaisseur, ce qui pourra avoir une répercussion sur le régime hydrique du sol. Ces apports peuvent représenter un volume important et ainsi augmenter considérablement l'épaisseur du sol. Ainsi, sur la commune d'Aloxe-Corton, au lieu-dit « Les Languettes », l'horizon de surface d'une épaisseur de 40 cm correspond à un apport de terre réalisé avant la plantation (Figure 6.15A). Cet horizon est plus argileux (28 %) que celui sous-jacent (19 %). Si les matériaux sont exogènes, ils vont modifier les caractéristiques physiques et chimiques des sols à l'échelle de la parcelle. La

cartographie des états de surface du sol réalisée sur le versant de Couchey a mis évidence une parcelle « reterrée » en galets et graviers en provenance de gravières de la plaine de Saône, sur un Calcosol leptique issu de l'altération des Calcaires de Comblanchien (Figure 6.15B). Les apports de terre historiques ne sont pas facilement quantifiables, mais il est cependant fréquent de les observer lors du creusement de fosses pédologiques. Ces apports peuvent être identifiés par la présence de fragments de tuiles ou autres tessons, d'objets divers, d'éléments lithiques allochtones à des profondeurs importantes. La fosse pédologique creusée sur la commune de Chenôve, au lieu-dit « Le Clos du Roy », présente un empierrement de cailloux calcaires à une profondeur de 90 cm, celui-ci étant recouvert par un matériel argileux riche en grèzes litées (colluvions cryoclastiques) incluant de nombreux débris de briques jusqu'à une profondeur de 80 cm (Figure 6.15C).

En théorie, depuis la mise en place des AOC, la provenance de ces apports est réglementée et ne peut être que d'un lieu appartenant à la même AOC. Historiquement, les origines des apports de terre n'étaient pas contrôlées et pouvaient être très diverses. En 1974, une directive de l'INAO, abrogée en 2000, limitait la possibilité d'apports de terre, sous peine de déclassement de parcelles en appellation, car cela conduisait à dégrader le sol de façon irréversible (Garcia et Labbé, 2011). Il était déjà noté au XV^e s. que ces apports ne devaient pas provenir de la plaine de la Saône.

Cette pratique culturelle, utilisée depuis des siècles en Bourgogne, a contribué et contribue toujours à diversifier les sols des versants viticoles. Quand les apports sont autochtones (terre récupérée en bas de parcelle suite à l'érosion provoquée par un orage), les modifications physico-chimiques du sol sont peu marquées. Cependant, lors d'événements météorologiques intenses qui dégradent le sol par érosion, une partie des sédiments transportés, les plus fins, c'est-à-dire les argiles, est exportée hors de la parcelle. Les apports réalisés sont donc moins riches en argiles, et l'on observe ainsi un appauvrissement en argiles du sol. Or, cette fraction granulométrique joue un rôle primordial. Le complexe argilo-humique, formé entre les argiles et la matière organique, constitue le réservoir de fertilité du sol et intervient dans la structuration du sol (Duchaufour, 1997). Quand les apports sont allochtones, leurs constituants physico-chimiques peuvent être complètement différents de ceux du sol en place. Ces modifications peuvent avoir un impact direct sur la vigne. Par exemple, un apport de terre riche en calcaire actif effectué sur un porte-greffe *Riparia* augmentera le risque de chlorose (Reynier, 2011). Il est donc nécessaire de bien connaître la provenance des terres, voire leur composition physico-chimique.

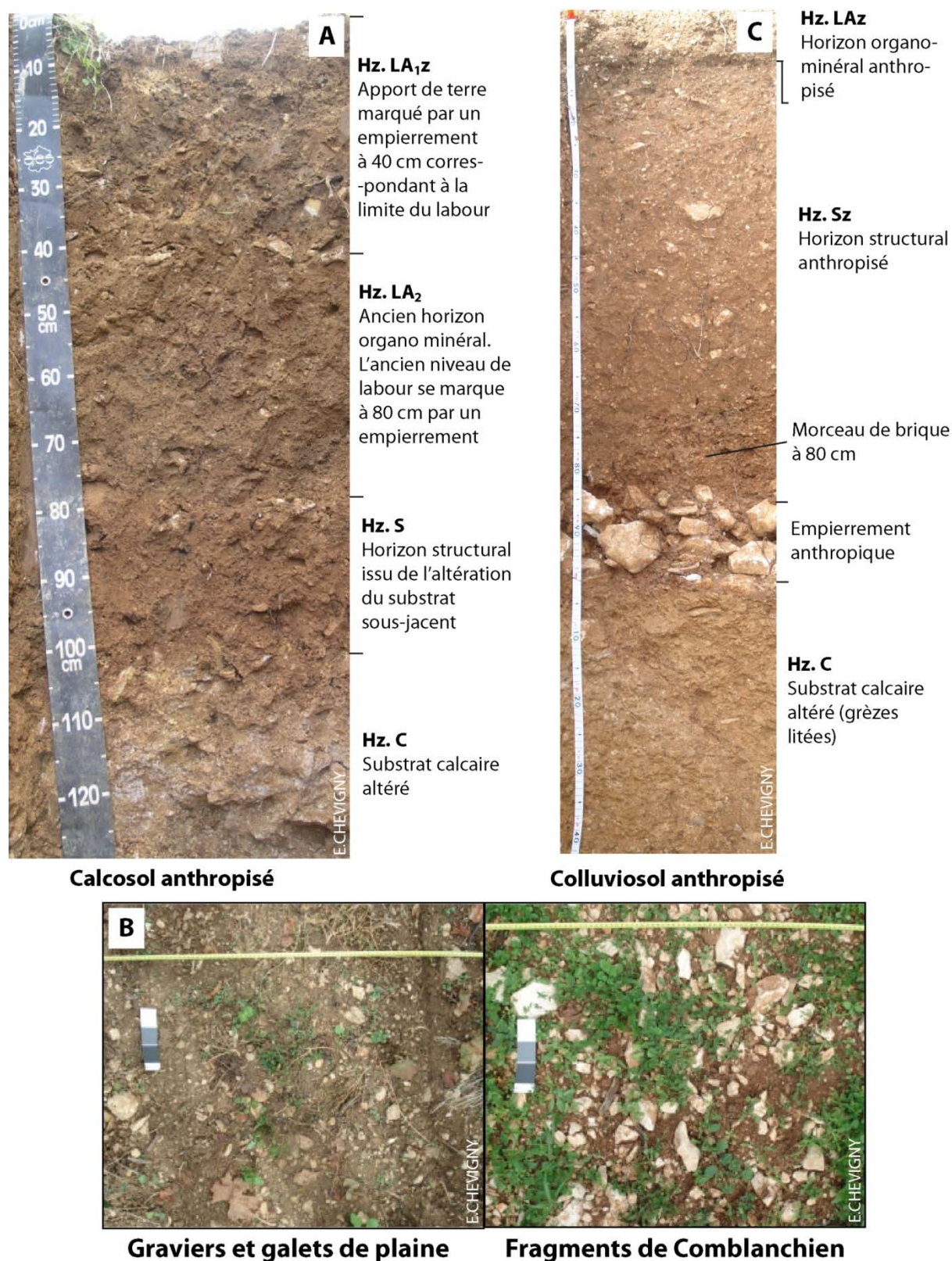


Figure 6.15 Fosse pédologique illustrant un apport de terre d'environ 40 cm d'épaisseur au lieu-dit « Les Languettes » (A). L'état de surface du sol, d'une parcelle de Couchey, au lieu-dit « Champs Perdrix », permet de mettre en évidence un apport de terre anthropique (B). Les apports peuvent être identifiés, dans certains cas, par la présence d'objets anthropiques, comme le montre la fosse située au lieu-dit « Clos du Roy », en appellation Marsannay (C).

6.2 Impacts de l'homme à moyen terme

La mise en culture de la vigne sur le versant semble être contemporaine de l'époque carolingienne et plus généralement du Moyen-Âge (Garcia *et al.*, 2008). Cependant, le paysage viticole que l'on connaît aujourd'hui sur la Côte n'est pas resté figé depuis son occupation par la vigne. De nombreux événements ont contribué à diminuer ou à augmenter les surfaces de production. La crise du phylloxera et, par ailleurs, la Première Guerre mondiale ont eu un net impact sur la production viticole côte-d'orienne. L'appellation Monthelie illustre bien cette modification du paysage viticole. En 1860, le vignoble monthelien couvrait 96 hectares. Touché par la crise du phylloxera dans la deuxième moitié du XIX^e s. (Garrier, 1989), le vignoble fut complètement détruit et reconstruit rapidement. Ensuite, la Première Guerre mondiale a conduit à la disparition quasi complète du vignoble monthelien, au profit de friches, pâtures et vergers (Brenot, 2007). Au cours des années 1970, ces espaces abandonnés ont été replantés, d'autres espaces ont été mis en culture, comme les versants marneux (Figure 6.16). Aujourd'hui, la surface de production atteint les 140 ha (98 ha en appellation communale, et 42 ha en appellation premier cru).

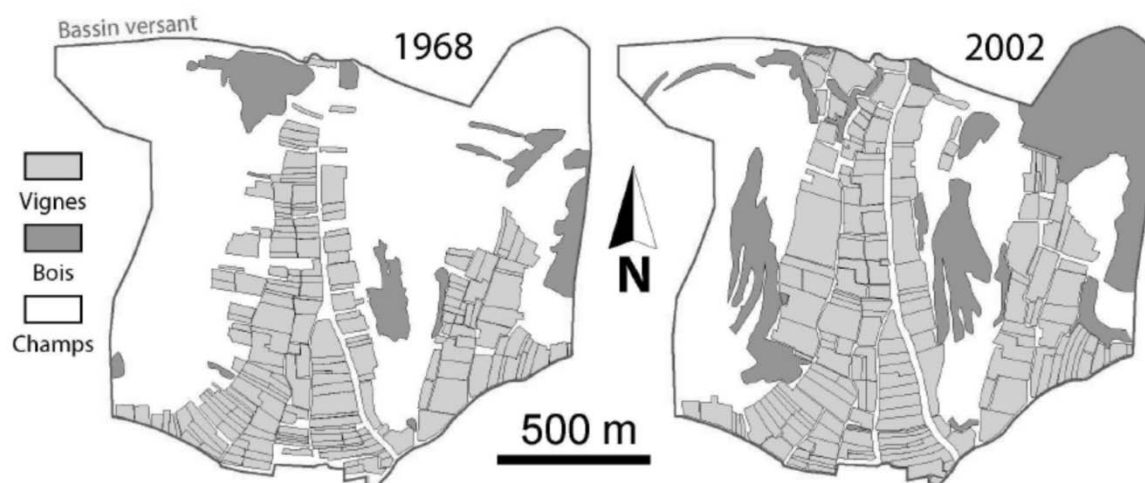


Figure 6.16 Évolution du paysage viticole à Monthelie sur la période 1968-2002 (photo-interprétation, Brenot, 2007)

Les versants viticoles de la Côte ont donc connu de multiples changements d'occupation du sol depuis la mise en culture de la vigne. De plus, la mécanisation de l'entretien du vignoble dans les années 1950 a contribué à une nette modification du paysage viticole. De nombreux remembrements parcellaires ont eu lieu à cette époque pour faciliter l'utilisation des tracteurs enjambeurs. Ces remembrements ont conduit à la destruction des arbres, des haies et des meurgers qui séparaient les parcelles. Les surfaces des parcelles ont considérablement augmenté, notamment en s'allongeant dans

le sens de la pente, la plupart du temps. Ce remembrement parcellaire a amplifié les processus de dégradation des sols et plus particulièrement l'érosion.

Les versants viticoles sont perpétuellement soumis à des processus d'érosion qui modifient les sols en transportant les matériaux les plus fins en dehors de la parcelle, ou bien en les stockant dans les parties aval. L'érosion hydrique sur les versants est contrôlée par des interactions complexes entre des facteurs naturels (pente, géologie) et anthropiques (pratiques culturales, structuration du paysage, occupation du sol). Ces facteurs influencent l'érosion à l'échelle du mètre, conduisant à une diversification des sols à l'échelle intra-parcellaire. La quantification de l'érosion à une résolution métrique permet d'identifier les facteurs qui contrôlent l'érosion à cette même échelle.

L'étude de l'influence des facteurs, qui contrôlent l'érosion sur une parcelle viticole de Monthelie, a fait l'objet d'une publication dans le journal *Catena*, présentée ci-après.

6.2.1 Article 3: *Lithology, landscape structure and management practice changes: key factors patterning vineyard soil erosion at metre-scale spatial resolution*

Lithologie, parcellaire et pratiques culturelles : des facteurs clés qui contrôlent l'érosion des sols viticoles à l'échelle spatiale du mètre.

Catena 121 (2014) 354-364

Received 2 July 2013

Received in revision from 15 April 2014

Accepted 20 May 2014

Résumé : En contexte viticole, l'érosion des sols est contrôlée par des interactions complexes entre des facteurs géomorphologiques et anthropiques, conduisant à des hétérogénéités de la surface du sol observées à l'échelle du mètre. Cette étude s'intéresse aux impacts de la pente, de la lithologie, de l'évolution du parcellaire et des pratiques culturelles actuelles sur l'érosion des versants viticoles. Le site d'étude se situe dans la commune de Monthelie, en Côte de Beaune, où l'érosion est particulièrement marquée lors de précipitations intenses. La quantification de l'érosion a été obtenue à une résolution métrique par une méthode de dendrogéomorphologie. Pour la même parcelle, plantée en 1972, deux cartes d'érosion ont été créées à partir des données acquises en 2004 et en 2012. Ces deux cartes, combinées avec une carte lithologique, une carte de pentes, l'évolution du parcellaire historique et l'évolution des pratiques culturelles de la parcelle, ont permis d'estimer les facteurs qui contrôlent l'érosion. La carte d'érosion de 2004 montre que la distribution spatiale et l'intensité de l'érosion sont contrôlées par la lithologie et le parcellaire historique, indépendamment de la pente. En soustrayant les données de 2004 aux données de 2012, et ainsi en évaluant l'érosion pour la dernière décennie, nous avons découvert que les vitesses d'érosion ont considérablement augmenté. La distribution spatiale et l'intensité de l'érosion ont changé, et sont maintenant contrôlées par les fortes pentes et les pratiques culturelles actuelles. Les motifs d'érosion pour la dernière décennie montrent que l'impact du parcellaire historique s'efface graduellement. Cette étude illustre qu'il est important de prendre en considération l'histoire de l'occupation du sol de la parcelle avant plantation et les pratiques culturelles des parcelles pour accroître notre compréhension de la distribution spatiale de l'érosion en contexte viticole de versant.

Lithology, landscape structure and management practice changes: key factors patterning vineyard soil erosion at metre-scale spatial resolution.

Emmanuel Chevigny ^{a,*}, Amélie Quiquerez ^a, Christophe Petit ^b, Pierre Curmi ^c

^a UMR CNRS 6298 ARTeHIS, University of Burgundy, 6 Bd Gabriel, F-21000 Dijon, France

^b UMR 7041 ArScAn, University of Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 3 rue Michelet, F-75006 Paris, France

^c Agrosup, UMR 1347 Agroécologie, BP 86510, F-21000 Dijon, France

* Corresponding author at: UMR CNRS 6298 ARTeHIS, University of Burgundy, 6 Bd Gabriel, F-21000 Dijon, France. Tel.: +33 3 80395791; fax: +33 3 80395787.

E-mail address: emmanuel.chevigny@u-bourgogne.fr

Abstract: In vineyards, soil erosion is controlled by complex interactions between geomorphological and anthropogenic factors, leading to intra-plot spatial topsoil heterogeneities that are observed at a 1-m scale. This study explores the relative impacts of slope, lithology, historical landscape structure and present-day management practices on soil erosion on vineyard hillslopes. The selected plot is located in the Monthelie vineyard hillslopes (Côte de Beaune, France), where intensive erosion occurs during high-intensity rainfall events. Soil erosion quantification was performed at a square metre scale using dendrogeomorphology. For the same plot, planted in 1972, an initial erosion map was drawn in 2004, with a second map being produced in 2012. These two maps, combined with lithology and slope data, the evolution of landscape structure and the evolution of management practices allow the driving factors of water erosion to be assessed. From the 2004 erosion map, we observed that the spatial distribution of erosion, for the thirty-year period after planting, was mainly controlled by lithology and historical landscape structure, whatever the slope. By subtracting 2004 data from the 2012 data, and thus evaluating erosion over the last decade, we discovered that the erosion rate had increased significantly, that spatial distribution of erosion had changed and is now basically controlled by slope steepness and present-day vineyard management practices. Erosion patterns for the last decade show that the impact of historical landscape structure is gradually declining. This study shows that it is crucial to take into account the pre-plantation history of vineyard plots and management practices to further increase our understanding of the spatial distribution of erosion on vineyard hillslopes.

Key words: erosion pattern, 1-m scale resolution, historical landscape structure, land use changes, vineyards, dendrogeomorphology

1. Introduction

Cultivated hillslopes undergo substantial soil loss, specifically in vineyards where erosion rates range from 10 to 1000 t ha⁻¹ year⁻¹, and where soil thickness decreases considerably (Kosmas et al., 1997; Martínez-Casasnovas et al., 2002; Cerdan et al., 2010; Novara et al., 2011). In this context, soil loss has a major economic impact for wine-growers, since gullies must be filled, uprooted vine stocks must be replanted, and soil deposited at the bottom of the plot must be moved back up to the top (Martínez-Casasnovas et al., 2005; Martínez-Casasnovas and Ramos, 2006; Brenot, 2007).

On sloping surfaces, soil loss is associated to a net redistribution of soil within the plot, controlled by the interaction of factors such as topography, climate, land use and soil management practices (Fox and Bryan, 2000; Lagacherie et al., 2006; García-Ruiz, 2010; Chartin et al., 2013). Erosion preferentially affects the fine soil fraction, leaving behind rock fragments and thus proportionately increasing topsoil stoniness (Poesen et al., 1994). Climate and relief (lithology, slope length and slope steepness) are the main factors involved in soil erosion, which plays an important role in topsoil redistribution down the hillslope (Fox and Bryan, 2000). These factors influence both soil volume and the morphology of water-erosive structures, such as linear rill and gully networks (Quiquerez et al., 2008). As a result, the formation of rill systems through which sediment is exported plays a decisive role in conditioning sediment availability and the spatial distribution of eroded soil at the slope scale.

Past and present-day anthropogenic factors (landscape structure and management practices) may also affect topsoil variability and erosion rates (Blavet et al., 2009; Garcia Ruiz, 2010). In the vineyard context, the influence of present-day weed management practices on topsoil erosion is recognized. Among them, the effects of the most usual practices *i.e.* no-tillage with chemical weeding (NT) and surface tillage (ST) are still debated. These contradictory results may be explained by the differences existing between the erosion measurement techniques, soil surface condition, climate or topography. Some studies suggest that NT accelerates erosion rate (Raclot et al., 2009) while, others studies propose that ST management increases erosion rate (Le Bissonnais and Andrieux, 2006; Gomez et al., 2008). The use of mechanisation may locally influence the soil compaction, by decreasing infiltrability which may lead to the formation of rills (Lagacherie et al., 2006). Tillage erosion contributes to net topsoil redistribution across the landscape, by eroding the upper slope and causing soil accumulation downslope (Van Oost et al., 2000). Historical landscape structure may also affect the spatial distribution and erosion rate (Chartin et al., 2011). Soil redistribution is greatly affected by the presence of existing but also historical landscape structure, where hotspot areas of erosion (on undulations) and deposition (on lynchets) have been identified.

Therefore, it is important not only to estimate sediment budgets, but also to perform detailed analyses of erosion patterns at a high spatial resolution of a few metres to better constrain the factors controlling soil degradation. In the short term, these factors modify soil characteristics (stoniness and available water) which could influence vine vegetative growth, while in the long term, they may affect soil sustainability.

Intra-plot soil erosion at a high spatial resolution can be derived from “surface elevation change-based” methods, but only for very specific temporal scales, e.g. for a single rainstorm event within experimental plots (Martinez-Casanovas et al., 2005), or for an annual time scale over hillslopes (Sirvent et al., 1997). Spatially distributed soil erosion can also be estimated using geochemical methods, such as radio-nuclide measurements ^{137}Cs which are used to trace sediment movement along cross-sections at a decennial time scale (Walling and Quine, 1991; Krause et al., 2003). Temporally and spatially distributed data can be inferred from the identification of bio-markers, using dendrogeomorphology methods, which have proven very useful to estimate erosion rates (Carrara and Carroll, 1979; Bodoque et al., 2005; Casali et al., 2009; Vanwalleghe et al., 2010). Aggradation or degradation processes are directly inferred from the position of the root collar, considered as a fixed spatial reference, relatively to the current ground surface. These methods were adapted by Brenot et al. (2008) for vineyard contexts, and have since been used to quantify erosion in a Spanish vineyard (Casali et al., 2009), in a southern French vineyard (Paroissien et al., 2010) and in a Burgundian vineyard (Quiquerez et al., 2014).

Our work investigates the impact of geomorphological (lithology and slope) and anthropogenic (historical landscape structure and management practices) factors controlling topsoil erosion at metre-scale in a vineyard plot. For this purpose, we studied a one-hectare hillslope vineyard plot planted in 1972, and still cultivated by the same wine-grower, for which historical land use data were available for the last two centuries. Lithology, slope, and erosion were mapped at a metre-scale to assess the influence of geomorphological factors on erosion. Two erosion maps were measured in 2004 and in 2012, allowing spatial quantification of erosion over two periods, *i.e.* respectively period. The 1972-2004 and 2004-2012 periods differ by their weed control management practices. These maps were compared to historical landscape structure to analyse erosion patterns and rates over time. This study reveals the complex and changing interactions between geology, slope, present-day vineyard management practices and the remaining effects of historical landscape structure.

2. Material and methods

2.1. Study area

The study area is located on the hillslopes of Monthelie (Fig.1A), in the Côte de Beaune area (Burgundy, France). This 1.1 ha vineyard plot lies on the western side of a north-oriented valley,

cross-cutting the Jurassic formations of the Burgundian plateau (Rémond, 1985) (Fig. 1B and C). According to the WRB classification (IUSS Working Group WRB, 2006), the soil is a stony silty clay Calcaric Cambisol which developed on Jurassic marls. Topsoil contents 35% calcareous gravel and stones, 7.1% mean organic matter, 48% calcium carbonate content, and pH is 8.1. Topsoil bulk density ranges from 1.25 to 1.5 g cm⁻³ depending on row or inter-row position (Brenot et al., 2008). Since the last plantation in 1972, the plot has always been cultivated by the same wine-grower. Before plantation, the plot was ploughed to a depth of 40 cm. Soil management practices vary from no-tillage and chemical weeding (NT) till the nineties and surface tillage (ST), without grass cover throughout the year.

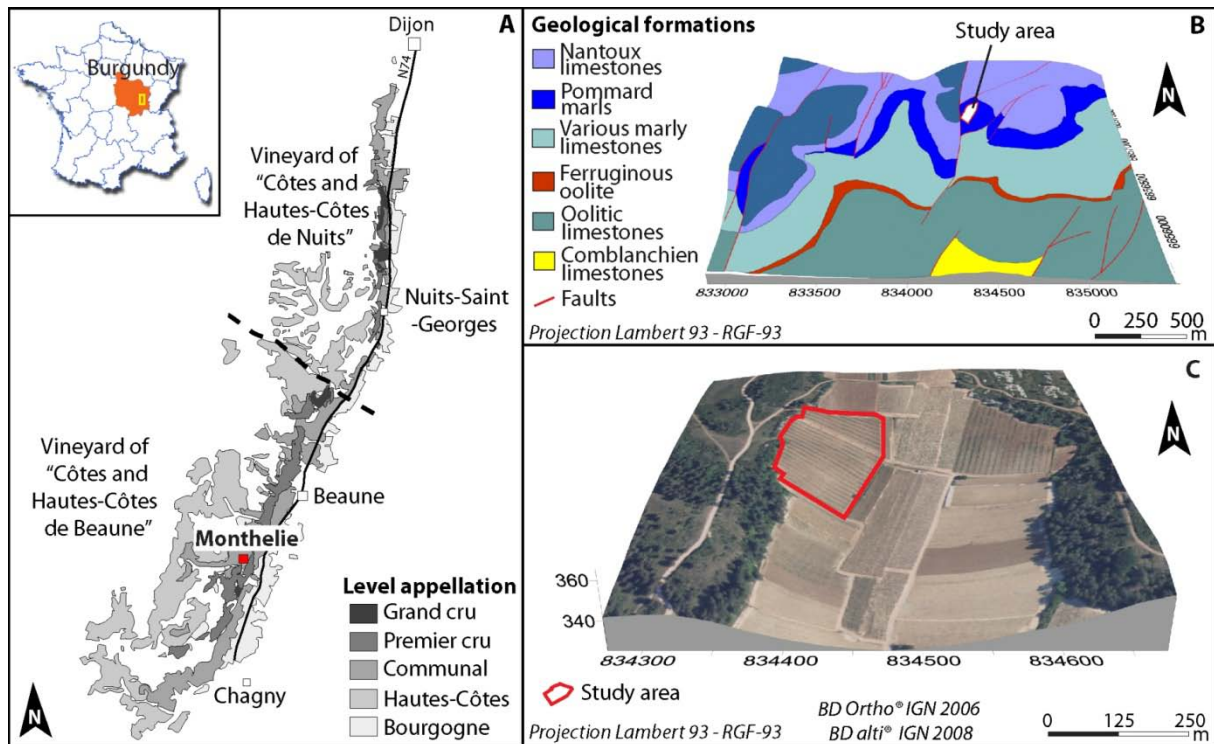


Fig.1 Location map (A) and geological map (B) of the study area. Ortho-photograph overlain on the 25-m DEM (IGN, 2006) highlighting the study area (C).

2.1.1. Mapping lithology and estimating topsoil stoniness

Lithology was mapped by processing the geophysical data acquired on 29th March 2012 using the Automatic Resistivity Profiling method (ARP®, Dabas, 2008). To measure apparent electrical resistivity, the acquisition device was installed on a straddle tractor coupled with a dGPS providing spatial position data (Panissod et al., 1998). All rows were prospected to produce very high spatial resolution maps (37 points/ m²). Raw data were filtered and then interpolated (2D bicubic spline interpolation) to map of soil apparent resistivity at a resolution of 1-m². Apparent resistivity was measured for two investigation depths, *i.e.* 0-50 cm (pseudo-depth 1) and 0-180 cm (pseudo-depth 2), to assess changes in soil or lithology (Fig. 2).

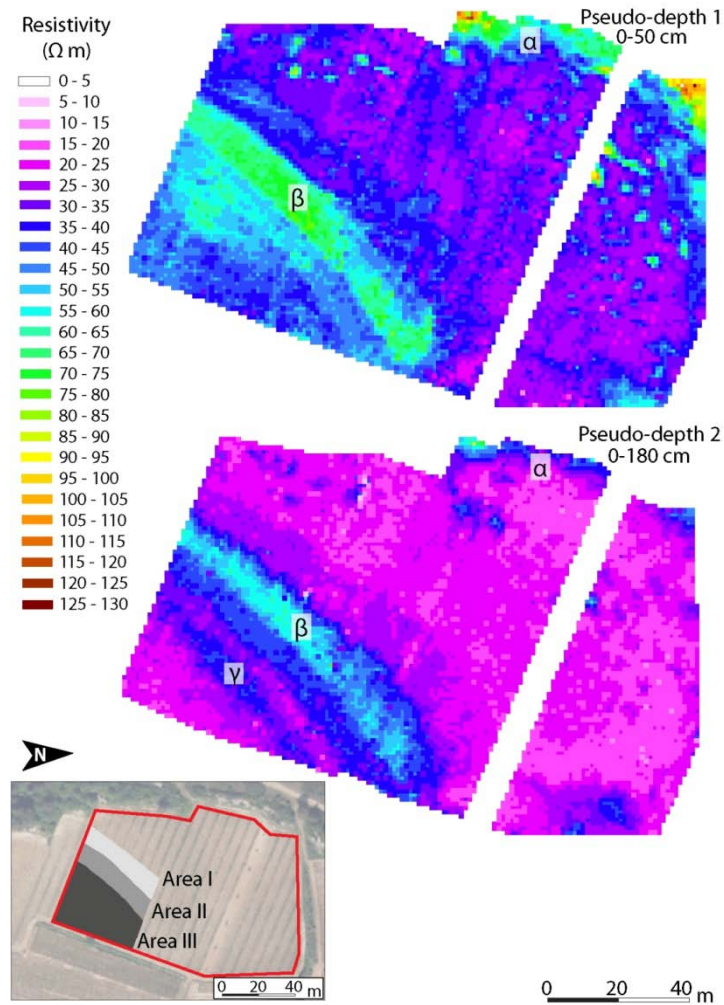


Fig. 2. Soil apparent resistivity maps for pseudo-depth 1 (0-50 cm) and pseudo-depth 2 (0-180 cm). Areas I to III, in shades of grey quantify erosion in relation to variations in lithology.

Topsoil stoniness was estimated by dry sieving on undispersed material. Samples were collected in the 0-5 cm soil layer in the inter-row, over a 0.25 m^2 surface, corresponding to a volume of 10 l. Ten samples were collected from all over the plot: five in low erosion areas and five in high erosion areas.

2.1.2. Slope and water flow directions

A digital elevation model (DEM) was constructed using dGPS with decimetric altitudinal precision at a 10 m spatial resolution. This DEM was used to map the slope and the direction of water flow (Fig. 3). Elevation decreases from 369 m at the edge of the plateau, to 340 m downslope. From the plateau border at the north-western part of the plot slopes range from 2° to 15° , while steep slopes occupy the south-eastern part of the plot and may reach up to 21° (Fig. 3A). Water flow directions, determined from the DEM, are oriented respectively towards the SE in the northern part of the plot and towards ESE in the southern part of the plot (Fig. 3B). Everywhere in the plot, the directions of

water flow differ from those of the vine rows (e.g. WE direction). Since the last plantation in 1972, the plot has been cultivated by the same wine-grower since this date (Fig. 3B). Before the plantation, the wine-grower has performed a deep ploughing (40 cm deep) all over the plot.

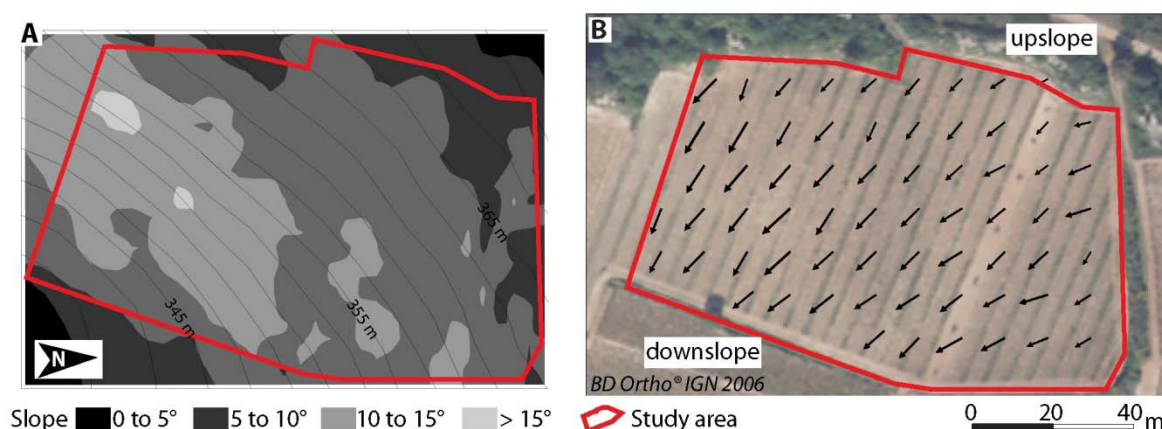


Fig. 3. Slope map (A) and water flow direction (B) maps. The length of black arrows indicates slope steepness. Green bands observed on the ortho-photograph indicate grass cover in 2006 on treatment rows. Seven brown points located in the northern part of the plot correspond to piles of vine stocks coming from 5 uprooted rows.

2.2. Mapping erosion

The principle of soil loss measurement is similar to that used in dendrogeomorphology methods, and is based on the unearthing of the stock located on the vine plants (Stock Unearthing Measurement, or SUM), considered as a passive marker of soil surface vertical displacement since the year of plantation (Brenot et al., 2008). Grafting vines has been compulsory since the Phylloxera crisis at the end of the 19th century. Vine anatomy divided in two components: the “American” rootstock and the aerial scion. Removing the germination from the rootstocks prevents any vertical stock growth, while the scion will grow in all directions (Brenot et al., 2008). At plantation, the graft-union is planted at 1 cm above the soil level, in order to prevent contact between the scion and the soil. Brenot et al. (2008) verified that the vertical growth of the graft after plantation is minimal and therefore that the distance between the soil and the graft-union is representative of soil loss. The plantation legislation in Burgundian vineyards imposes a density of 10 000 vine stocks per hectare which allows the quantification of erosion at a 1-m scale over pluri-decennial periods with an error margin of 1 cm related to the plantation method (Brenot et al., 2008). Erosion rate can be calculated at a 1-m scale by dividing the SUM by the age of the vines.

Two SUM campaigns were conducted in winter 2004 and in spring 2012. Each vine stock was measured twice, allowing erosion rate and spatial distribution variation to be detected. Only the SUMs of vine stocks initially planted in 1972 were taken into account to ensure data reliability; stocks absent or replaced after 1972 were simply located on the plot (Fig. 4). In winter 2004, 9384 SUMs were

performed by Brenot (2007) and 1925 vine stocks were absent or too young to be measured (Table 1). In spring 2012, only 7336 vine SUMs were performed, since 421 vine stocks on five rows were uprooted in 2006 and the others were young or absent; as soil infilling was performed on 135 vine stocks in the eastern part of the plot in 2008, these vine stocks were also excluded. Most of the vine stocks with SUMs higher than 15 cm in 2004 were either absent or replaced by young vines in 2012, corresponding to the loss of 1324 vine stocks in 8 years, caused by erosion or disease. The loss of vine stocks with high SUMs leads to an underestimation of erosion.

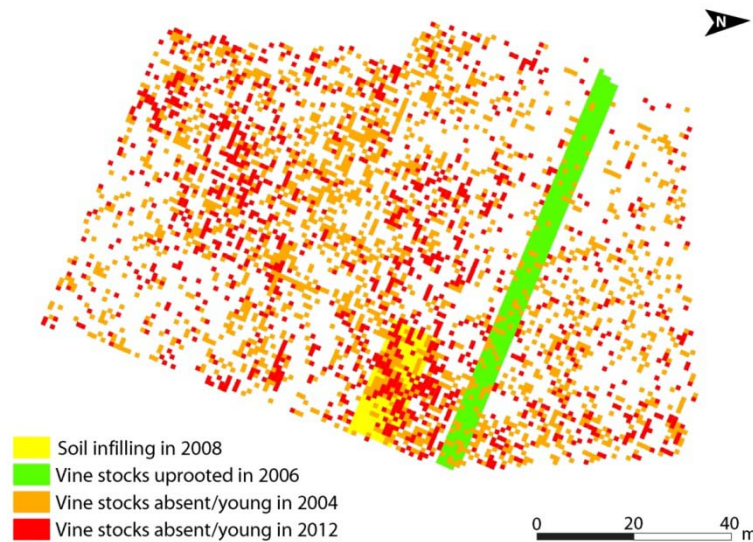


Fig. 4. Map locating data not available for SUM quantification: absent or young vine stocks, uprooted area and anthropogenic soil infilling area.

Date	Number of vine stocks			
	measured	not measured		
		young or absent	uprooted	anthropogenic soil infilling
2004	9384	1925		
2006			421	
2008				135
2012	7336	2108		

Table 1. Number of stock unearthing measurements (SUMs) collected during the 2004 and 2012 campaigns.

2.3. Historical land use datasets

The landscape structure is characterised by a vine monoculture where plot limits, i.e. walls and paths, have formed the discontinuities along the hillslopes for the last two centuries. These plot limits have been partly deleted with the advent of mechanisation in the 20th century. Therefore, we used two cadastral maps to characterise landscape structure evolution over the last two centuries (Fig. 5): the

1825 “Napoleonic cadastre”, “Section A1 1st sheet” (AD21, 2006) (Fig. 5A) and the 1932 “BD Parcellaire”, “Sheet 000 A1” (IGN, 2008a) (Fig. 5B), both drawn at a 1/2500 scale. Cadastral matrices were consulted to the Montheleie town hall archives. The archive documents contain all the information relative to the owners, the type of land use and the evolution of plot areas. In addition, we used historical and recent aerial photographs, to define the types of plot limits and their spatio-temporal evolution (Fig. 6). We used historical aerial photographs for 1940, 1953 and 1968 (IGN, 2006); and the 2006 ortho-photograph (IGN, 2008b).

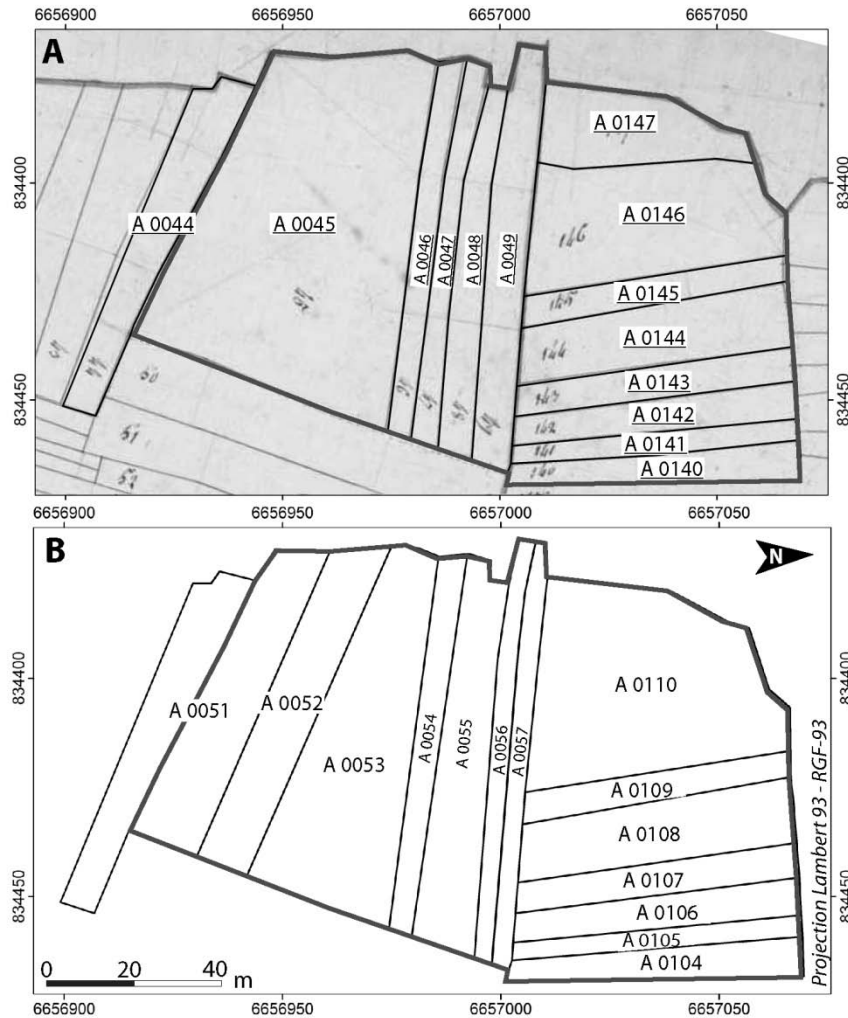


Fig. 5. Cadastral maps of study area, dating from 1825 (A) (Napoleonic cadastre, AD21) and 1932 (B) (BD Parcellaire, IGN). Thick black line represents present-day cadastral limits. According to cadastral matrix, plot A 0045 was divided into three plots in 1834 and 1863; the southern plot was merged with plot A 0044 to form plot A 0051 in 1932. Plots A 0047 and A 0048 were merged to form plot A 0055 in 1932. In 1869, plot A 0049 was divided into two plots: A 0056 and A 0057. In the northern part, plots A 0146 and A 0147 were merged to form plot A 110.

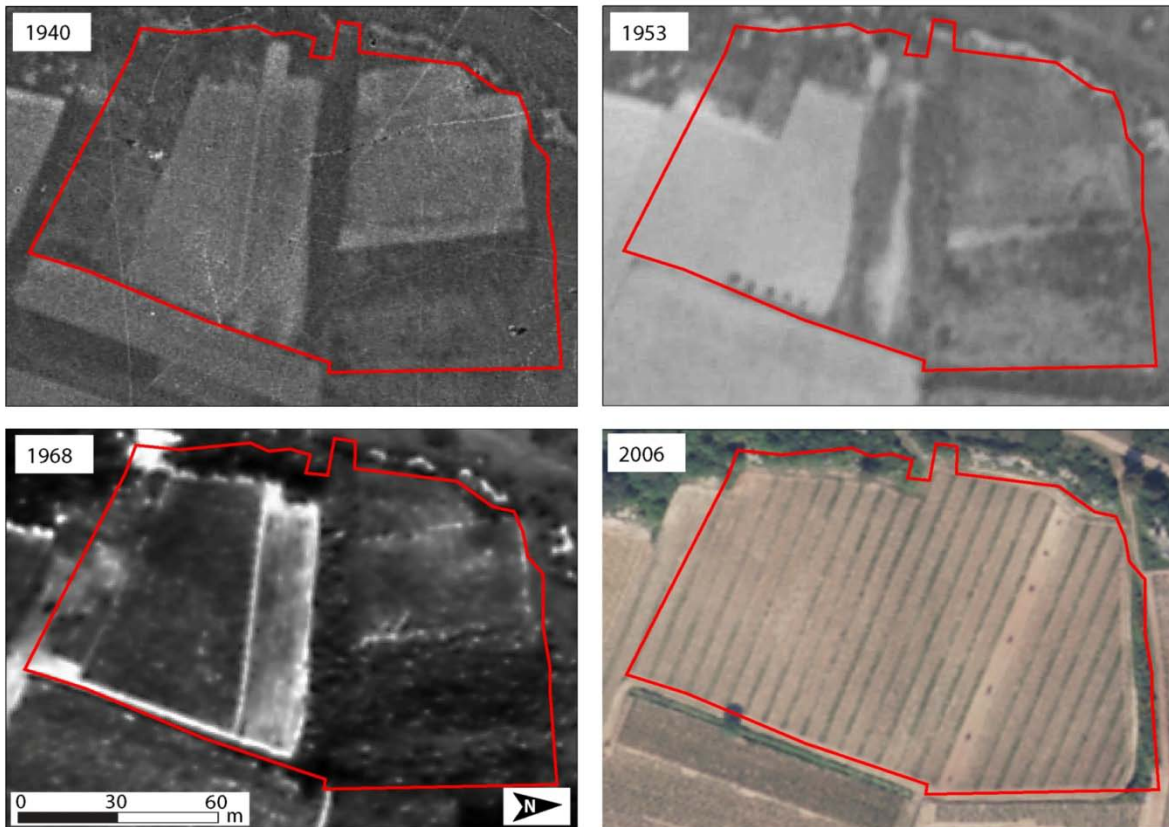


Fig. 6. Aerial photographs of the study area, from 1940, 1953, 1968 and 2006. On the older photographs, the red line represents present-day cadastral limits. On the western border, the cadastral limits are different from the vineyard plot planted in 1972.

The “BD Parcellaire” was georeferenced by the IGN, and the “Napoleonic cadastre” was georeferenced according to common limits with the “BD Parcellaire” map. Historical photographs were georeferenced using anchor points recognisable in the 2006 ortho-photograph (IGN, 2008b).

3. Results

3.1. Lithology

On the apparent resistivity map of pseudo-depth 1, two areas α and β were characterised by high values (Fig. 2). Area α , extending over the north-western edge of the plot, presented the highest apparent resistivity values, 125 Ω m for pseudo-depth 1 and 92 Ω m for pseudo-depth 2. Area β , a band 9 m wide, located in the south-eastern part of the plot, was characterised by a linear pattern of high apparent resistivity values, from 70 Ω m for pseudo-depth 1 to 55 Ω m for pseudo-depth 2. In pseudo-depth 1, scattered points of high apparent resistivity indicate the presence of dense gravel and stone cover on the topsoil. In pseudo-depth 2, another linear pattern γ was observed, which presented higher apparent resistivity values (mean of 35 Ω m) than the surrounding area. Auger holes in these areas highlighted a change in lithology: a marly-limestone band was present at 20/30 cm depth, while

outside these areas the plot was characterised by lower values, most of them ranging from 28 to 42 Ω m, which were interpreted as a marly formation.

3.2. Historical evolution of landscape structure

The cadastral maps show the spatial evolution of plot limits (Fig. 5). On the 1825 “Napoleonic cadastre”, the study area was divided into fourteen plots (Fig. 5A). The 1825 limits were underlined, to differentiate them from those of 1932. The southern part was composed of six plots, with an east-west orientation, referenced A 0044 to A 0049. The northern part included eight plots with a north-south orientation, referenced A 0140 to A 0147. On the 1932 “BD Parcellaire”, the study area was also composed of fourteen plots, which differed from those of 1825 (Fig. 5B). Most limits have not changed during this period in the northern part of the study area, even though some changes can be observed in the southern part. Plot division was generally due to an inheritance concerning several heirs (e.g. plots A 0045 and A 0049). The merging of several plots occurred when neighbouring plots were acquired by the same owner (e.g. plots A 0051 and A 0055).

Historical photographs reveal the use of several types of plot limits over time (Fig. 6). Interpretations of aerial photographs were confirmed by the testimony of the wine-grower. The limit between plots A 0053 and A 0054 matched an agricultural path from 2 to 3 m wide (Fig. 6, 1968). In plot A 0110, the plot limit appears in the form of an alignment of dry stones on the east, west and north boundaries of the plot (Fig. 6, 1968). These alignments, called “meurgers” in Burgundy, were dry-stone walls built as the wine-growers removed stones from the plot. The upslope part of plots A 0051 and A 0052 were not cultivated from 1940 to 1953. The limit between uncultivated and cultivated land is marked by an embankment of 1 m high, which interrupted the slope (Fig. 6, 1953). Before replanting in 1972, this break-in-slope was filled in, with soil brought from further down the slope. The north-eastern plot limits, which cannot be observed on aerial photographs, were formed by small furrows dug out by wine-growers when they pickaxed their vines, before mechanisation in the middle of the 20th century. To keep the maximum amount of soil in their plots, they pulled soil in their plot direction, thus creating small depressions between two plots. Others limits were just administrative limits; they indicated a change of ownership or a change in land use.

3.3. Erosion quantification

For the period from 1972 to 2004, the mean SUM was 3.5 cm $\pm$ 1 cm (Table 2). The mean erosion rate at the plot scale was estimated to be 1.1 $\pm$ 0.3 mm year⁻¹. For the 2004-2012 period, obtained by subtracting the 2004 SUM to the 2012 SUM, the mean SUM was 2.3 $\pm$ 1 cm and the erosion rate was estimated to be 2.8 $\pm$ 1.3 mm year⁻¹. Our measurements showed that erosion increased significantly for the 2004-2012 period compared the 1972-2004 period (Mann-Whitney U-test,

p-value < 0.0001). Erosion rates calculated for the two periods are consistent with estimations in similar vineyard contexts (Casalí et al., 2009; Cerdan et al., 2010; Paroissien et al., 2010).

Periods	Mean SUM	Erosion rate
	cm	mm year ⁻¹
1972-2004	3.5 ± 0.08	1.1 ± 0.03
2004-2012	2.3 ± 0.06	2.8 ± 0.08

SUM and erosion values are given with their confidence interval

Table 2. Mean SUM and erosion rates calculated for the two periods studied.

The datasets for 2004 and 2012 showed that SUM values varied from 0 cm to 26 cm (Fig. 7). For the 2004 data, 33 % of SUM values showed no erosion. The SUM distribution was centred on the SUM value of 5 cm. For the 2012 data, only 14 % of SUM showed no erosion and the SUM distribution showed greater dispersion. The evolution of SUM distributions between these two dates shows: (i) an increase of erosion in areas without erosion in 2004 and (ii) a greater number of high erosion values.

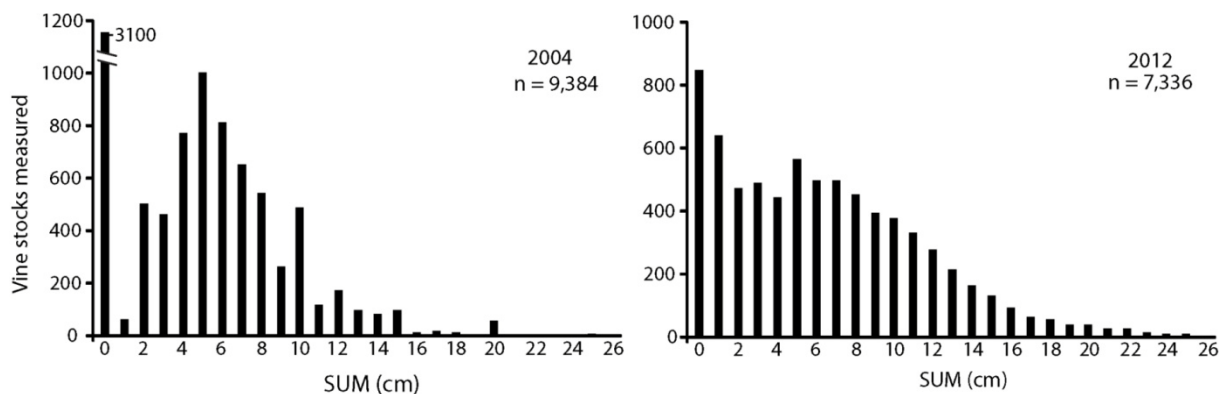


Fig. 7. Histograms of SUMs for the 2004 and 2012 datasets. SUM distribution has evolved over the last decade.

Fig. 8 shows the two erosion maps 2004 and 2012. Both maps display similar erosion patterns. They differ essentially in erosion intensity. For both maps, it is possible to identify three areas by their erosion patterns (A, B and C). We shall therefore only discuss the results for the 2004 erosion maps.

Area A, located in the southern part of the plot, is characterised by low erosion values downslope and by high erosion values upslope. The limits between low and high erosion values were well defined and were oriented along a SSW-NNE and a WNW-ESE directions (reported as limits a1 and a2 in Fig. 8C). Upslope from limits a1 and a2, the mean SUMs were respectively 4.7 and 5.7 cm ± 1 cm (see areas ha1 and ha2 in Fig 8C). Downslope from the limits, the mean SUMs were respectively 0.8 and 1.1 ± 1 cm (see areas la1 and la2 in Fig 8C; Table 3). A third limit, less well defined, with a NW-SE orientation, separated two areas of low/high erosion (limit a3 in Fig. 8C). Mean SUM was 1.8

cm $\pm$ 1 cm south of the limit (area la3 in Fig 8C) and 7.0 cm $\pm$ 1 cm north of the limit (area ha3 in Fig 8C; Table 3).

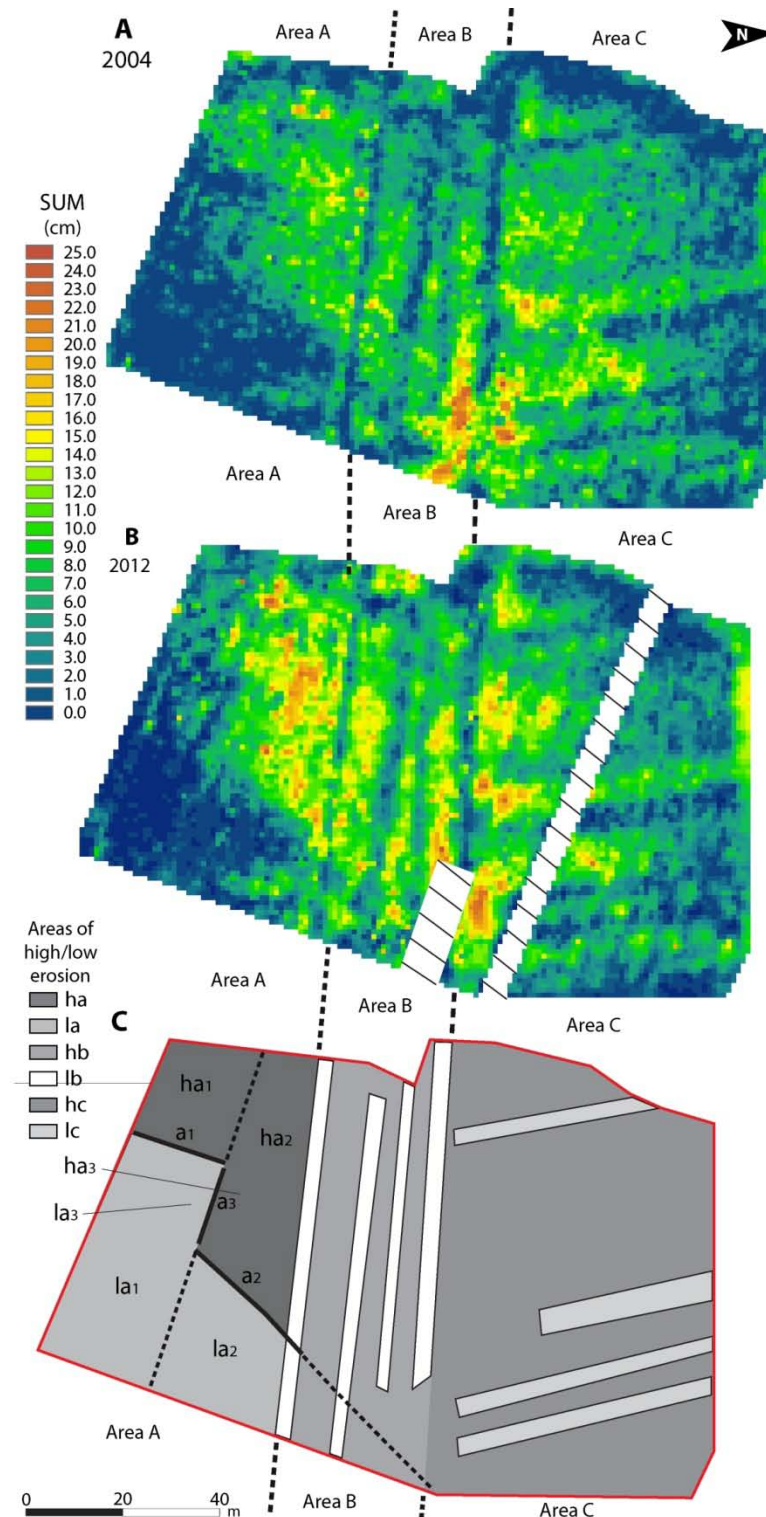


Fig. 8. Erosion maps with the 2004 (A) and 2012 (B) datasets interpolated from measured vine stocks. Hatched areas on the 2012 map represents five rows uprooted in 2006 and a 2008 soil anthropogenic infilling area. Delimitation of erosion patterns observed on both erosion maps (C); the delimitation of areas la3 and ha3 matches the 349 to 354 m contour lines.

Area B, in the central part of the plot, displayed linear patterns of erosion with a WE orientation (areas lb and hb in Fig. 8C). By “linear patterns”, we mean an alignment of high or low SUM data on the erosion map. Alternating low and high SUM values generated linear patterns observed from south to north. Low value patterns were narrower than high value patterns. From the north-eastern part, the SUM increased downslope and reached $24 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$. In this area, it was possible to identify the spatial continuity of the pronounced SSW-NNE limit observed in Area A (limit a2 in Fig. 8C). Mean SUM was $3.4 \pm 1 \text{ cm}$ for low erosion values (areas lb in Fig. 8C) and $6.2 \pm 1 \text{ cm}$ for high erosion values (areas hb in Fig. 8C; Table 3).

Area	Area (m ²)	Number of vine stocks measured		Mean SUM (cm)	
		2004	2012	Periods	
				1972-2004	1972-2012
la1	890	865	695	0.8 ± 0.19	1.4 ± 0.20
ha1	489	409	263	4.7 ± 0.37	6.7 ± 0.60
la2	667	623	499	1.1 ± 0.17	2.4 ± 0.30
ha2	879	810	539	5.7 ± 0.25	9.3 ± 0.40
la3	458	454	363	1.8 ± 0.17	2.8 ± 0.21
ha3	470	439	288	7.0 ± 0.28	12 ± 0.54
lb	507	561	364	3.4 ± 0.26	6.5 ± 0.36
hb	1566	1307	877	6.2 ± 0.24	9.3 ± 0.30
lc	1080	1071	752	2.4 ± 0.22	3.9 ± 0.23
hc	4199	3738	3347	5.9 ± 0.13	8.6 ± 0.16
Area A	2970	2735	2225	6.3 ± 0.16	10.3 ± 0.24
Area B	2173	1802	1361	4.8 ± 0.22	8.3 ± 0.26
Area C	5223	4847	3750	1.0 ± 0.10	2.1 ± 0.14

SUM values are given with their confidence interval.

For area denomination, “l” represents low erosion and “h” represents high erosion.

Areas with high and low SUM are significantly different (Mann-Whitney test, p-value < 0.05).

Table 3. Mean SUM calculated from the 2004 and 2012 datasets for each erosion pattern.

Area C, situated in the northern part of the plot, was defined by the alternation of low and high erosion values, which formed linear patterns with NNW-SSE orientation (areas lc and hc in Fig. 8C). Mean SUM was $2.4 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ for low erosion values (areas lc in Fig. 8C) and $5.9 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ for high erosion values (areas hc in Fig. 8C; Table 3).

None of the linear erosion patterns observed in these three areas corresponded to water flow directions determined from the DEM (Fig. 3B).

4. Discussion

4.1. Lithology and erosion patterns

The comparison of apparent resistivity maps (Fig. 2) and erosion maps (Fig. 8) highlighted the impact of lithology on erosion. The change in soil apparent resistivity from 30 to 70 Ω m (Area β in pseudo-depth 2, Fig. 2B) showed a change in lithology that matched a limestone bed in the Oxfordian marl formation (Fig. 1B). This limestone bed was also correlated to a change from high to low erosion values, with a SW-NE oriented limit on the erosion map, observed in Area A (limit a2 in Fig. 8C). In the limestone bed area (area II in Fig. 2, Table 3), the mean SUM for 2004 was 4.8 cm $\pm$ 1 cm and the topsoil stoniness was 62%. Upslope from the limestone bed area (area I in Fig. 2, Table 3), mean SUM for 2004 was 6.3 cm $\pm$ 1 cm, and topsoil stoniness was lower (30%). Downslope from the limestone bed (area III in Fig. 2, Table 5), the mean SUM for 2004 was only 1.0 cm $\pm$ 1 cm and topsoil stoniness was equal to 42%. Since slope angle values remained more or less constant throughout Area A (from 15° to 20°; Fig. 3A), we suggest that changes in erosion intensity are mainly controlled by changes in lithology. High topsoil stoniness above the limestone bed may locally increase water infiltration, leading to a lower runoff volume, and therefore reducing topsoil erodability (Poesen et al., 1994; Martínez-Zavala and Jordán, 2008; Quiquerez et al., 2014).

4.2. Historical landscape structure and linear erosion patterns

The plot limits identified on cadastral plans were overlain on the 2004 erosion map to evaluate their impact on erosion patterns. Fig. 9 shows that most of the cadastral limits were correlated to linear patterns of low or high erosion values.

Low erosion patterns were characterised by 2 to 3 m wide bands. For example, the limit between Area A and Area B in figure 9 matched both the administrative limit between A 0045 and A 0046 in the “Napoleonic cadastre” (Fig. 5A), the limit between A 0053 and A 0054 in the 1932 map (Fig. 5B), and an agricultural path in 1968 (Fig. 6). The limit between A 0048 and A 0056 (Fig. 9) was superimposed on a linear band of low erosion and a natural ditch which acted as a gully in 1953 (Fig. 6). On the north-western part of the study area, a low erosion linear pattern (white line in Fig. 9) was correlated to the presence of a “meurger” (dry-stone wall) identified on the 1968 aerial photograph (Fig. 6). On plots A 0051 and A 0052, SUM evolved sharply from 4.7 to 0.8 cm $\pm$ 1 cm on the 2004 map (Limit a1 in Fig. 8C and red line in Fig. 9, Table 3). This limit between the two areas coincided with the position of a break-in-slope observed in the 1953 aerial photograph (Fig. 6).

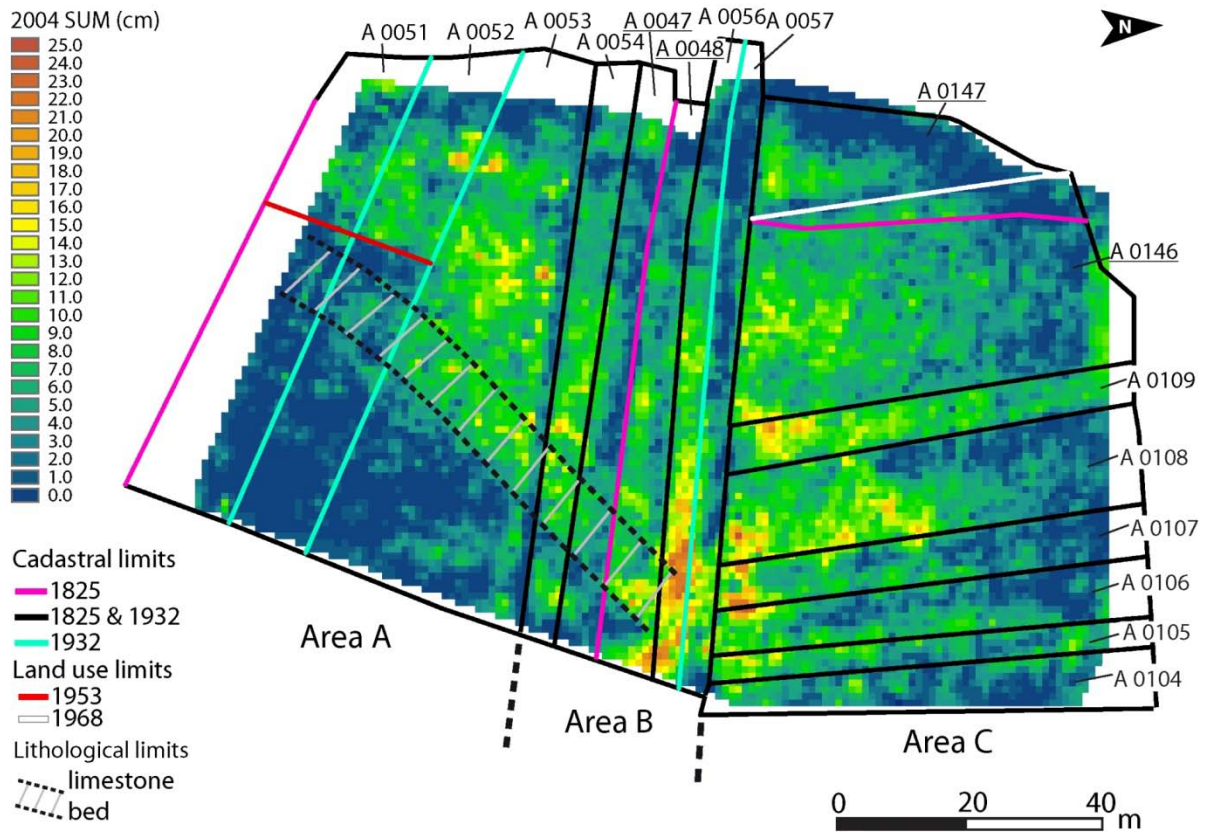


Fig. 9. Cadastral limits overlain on the 2004 erosion map.

Some alternations between bands of low and high erosion can also be observed. On the north-eastern part of Area C, figure 9 shows a WNW cyclic erosion pattern (plots A 104 to A 108). The transition from one plot to another matched a change from high to low SUM values. We suggest that this pattern could be explained by the presence of historical shallow furrows (about 10 cm in depth). The furrows, located at the plot limits, concentrate water from upslope. Erosion is thus highest at the furrow position. Water collected by furrows does not flow in plots surrounding the furrow, so those plots present low erosion values. Although furrows were blurred by deep ploughing before plantation in 1972, erosion is controlled by these historical anthropogenic structures. Historical land-use patterns seem to be important in soil erosion and degradation processes and for landscape development (Szilassi et al., 2006).

Linear bands of high erosion, a few metres wide, are also observed in figure 9. For example, plots A 0056 and A 0109 displayed the highest erosion values of the study area, with a mean SUM for 2012 greater than $8.4 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ (Table 4). These two plots overlaid two gullies observed on the 1953 aerial photograph (Fig. 6). Once formed, gullies can continue to generate sediment long after the triggering causes have ceased (Valentin et al., 2005). They are interpreted as preferential paths for runoff and erosion.

The confrontation of historical data and erosion maps shows the resilience of historical landscape structure in the erosion patterns identified. Historical landscape structure still influences the distribution and intensity of erosion, although deep ploughing was performed throughout the area before plantation. Soil redistribution is greatly affected by the presence of present-day and also historical landscape structure (Chartin et al., 2011). Among the factors controlling erosion patterns and intensity of erosion, we show that: (i) rock fragments contained in topsoil play a crucial role (Quiquerez et al., 2014), the low erosion observed where historical “meurgers” and historical paths were situated can be explained by topsoil stoniness which increased water infiltrability, and reduced splash effect (Poesen et al., 1994; Martinez-Zavala et al., 2010); and (ii) preferential paths of erosion influence the distribution and intensity of erosion, historical paths are still active even today, highlighting the resilience of erosion over time. In the studied plot, this work shows that erosion depends not only on slope values but also on historical landscape structures and lithology.

4.3. Evolution of erosion patterns and intensity over the last decade

In the Monthelie vineyard, historical landscape structure more than two centuries old influences the spatial distribution and intensity of erosion. In this anthropogenic context, where soils are continually perturbed by vineyard management practices, we evaluate the evolution of erosion patterns and intensity over the last decade (2004 to 2012).

The map of differential SUM, presented in Fig. 10, was calculated by subtracting for each vine stocks the 2004 SUM to the 2012 SUM. Differential SUM ranges from 0 to 10 cm and the map highlights three areas with specific patterns of erosion, Areas 1, 2 and 3.

In Area 1, a relative increase in erosion rate of 236% can be observed (Table 4). The limits controlled by geology and topsoil stoniness (hatched area in Fig. 9) or by the historical embankment (red line in Fig.9) are preserved. Conversely, linear patterns of low erosion values have been deleted. This area has the steepest slopes in the study area, ranging from 15 to 21° (Fig. 3A). Erosion patterns that were controlled by historical anthropogenic factors are declining, as the impact of topography and lithology increases.

In Area 2, a relative increase in erosion rate of 121% can be observed. An alternation of linear erosion patterns parallel to rows appears (see black arrows in Fig. 10; and ellipses in Fig. 11). These linear erosion patterns are present every 6 rows (rows 49, 55, 61, 67, 73 and 79) and were grassed in 2006 (Fig. 6). These treatment rows undergo 5 to 10 additional passages per year, leading to an increase in topsoil compaction and an increase in rill erosion processes (Ferrero et al., 2005; Lagacherie et al., 2006). In this area, linear erosion patterns correlated to historical landscape structure have completely disappeared. As in Area 1, erosion is no longer controlled by historical landscape structure and now seems to be governed by present-day vineyard management practices.

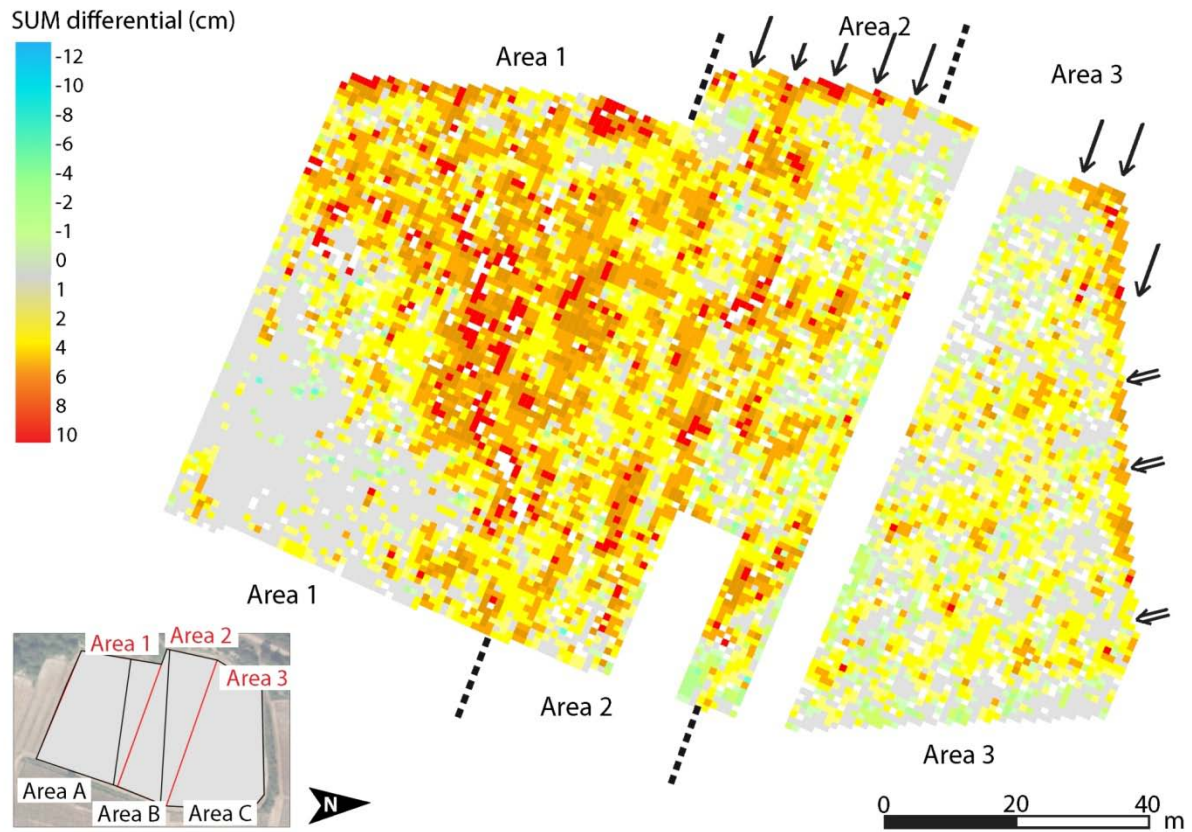


Fig. 10. SUM differential values from 2004 to 2012. For each vine stock, the 2004 SUM data were subtracted from the 2012 data to produce a differential erosion map.

In Area 3, the increase in erosion rate was $+0.2 \text{ mm year}^{-1}$ (Table 4) and the relative increase in erosion rate is slight (only 15%) highlighting erosional stability. In this area, two patterns can be observed: linear patterns parallel to rows every six rows (rows 109, 115 and 121 in Fig. 10; and ellipses in Fig. 11) and linear patterns with a NS orientation (Fig. 8 and Fig. 9). These patterns highlight a combination of two factors of erosion control, *i.e.* historical landscape structure (NS orientation) and present-day vineyard management practices (WNW orientation). In this area, characterised by gentle slopes, the impact of historical anthropogenic factors has not completely disappeared.

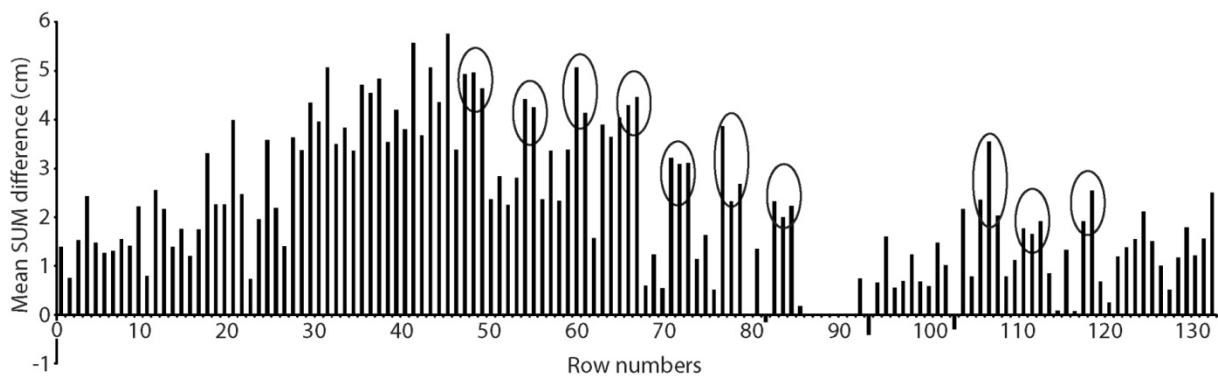


Fig. 11. Distribution of mean SUM differential values for all rows. Areas with high erosion values correspond to treatment rows (black ellipse).

Plot reference	Area (m²)	Number of vine stocks measured		Mean SUM		Erosion rate		
						Period 1	Period 2	Relative increase from period 1 to 2
		cm		(mm year ⁻¹)		%		
2004	2012	2004	2012	72/04	04/12			
A 0051	520	490	404	0.8 ± 0.26	1.4 ± 0.33	0.2 ± 0.08	0.7 ± 0.37	250
A 0052	950	814	679	1.5 ± 0.23	3.0 ± 0.37	0.5 ± 0.07	1.8 ± 0.32	260
A 0053	1970	1637	1304	3.2 ± 0.20	7.0 ± 0.32	1.0 ± 0.06	4.8 ± 0.25	380
A 0054	500	392	349	4.8 ± 0.36	9.3 ± 0.47	1.5 ± 0.11	5.6 ± 0.39	273
<u>A 0047</u>	490	351	311	2.8 ± 0.35	6.7 ± 0.35	0.9 ± 0.11	4.9 ± 0.48	444
<u>A 0048</u>	610	461	327	4.0 ± 0.36	7.7 ± 0.45	1.3 ± 0.11	4.3 ± 0.41	231
A 0056	470	305	185	7.6 ± 0.67	10.1 ± 0.75	2.4 ± 0.21	5.5 ± 0.57	129
A 0057	470	376	221	3.2 ± 0.52	5.4 ± 0.67	1.0 ± 0.16	2.5 ± 0.72	150
A 0104	450	214	167	2.0 ± 0.45	1.6 ± 0.41	0.6 ± 0.14	-0.5 ± 0.36	-183
A 0105	330	226	152	4.4 ± 0.52	5.2 ± 0.57	1.4 ± 0.16	1.0 ± 0.54	-29
A 0106	480	426	329	3.4 ± 0.39	4.5 ± 0.46	1.1 ± 0.12	1.4 ± 0.32	27
A 0107	520	405	291	4.0 ± 0.47	5.1 ± 0.52	1.2 ± 0.15	1.4 ± 0.36	17
A 0108	860	770	599	4.5 ± 0.33	6.3 ± 0.37	1.4 ± 0.10	2.1 ± 0.25	50
A 0109	410	370	283	6.5 ± 0.40	8.4 ± 0.49	2.0 ± 0.12	2.4 ± 0.36	20
<u>A 0146</u>	1460	1440	1138	4.1 ± 0.18	6.1 ± 0.25	1.3 ± 0.05	2.4 ± 0.19	85
<u>A 0147</u>	720	707	597	1.7 ± 0.24	3.9 ± 0.32	0.5 ± 0.07	2.7 ± 0.26	440
Area 1	3790	3347	2816	3.6 ± 0.13	6.5 ± 0.22	1.1 ± 0.04	3.7 ± 0.13	236
Area 2	2880	2712	1882	6.1 ± 0.18	8.0 ± 0.22	1.9 ± 0.06	4.2 ± 0.06	121
Area 3	3660	3325	2638	4.2 ± 0.12	5.4 ± 0.15	1.3 ± 0.04	1.5 ± 0.07	15

Sum and erosion values are given with their confidence interval

Table 4. Mean SUM and erosion rates calculated for each historical plot from the 2004 and 2012 datasets.

The comparison between the 2004 and 2012 erosion maps shows that the impacts of historical landscape structure on present-day erosion patterns are not erased at the same rate all over the study area. It seems that the lessening impact of historical structures is controlled by slope intensity. For gentle slopes, erosion patterns controlled by historical landscape structure are partially preserved. For moderate to steep slopes, erosion is controlled by present-day vineyard management practices, and historical structures have disappeared. For the steepest slopes, present-day and historical anthropogenic factors have no impact; erosion seems to be controlled only by topography and lithology.

We propose that the increase of erosion rate between the two periods could be related to the change in weed management practices from chemical weeding and no tillage (NT) to surface tillage (ST) in 1992. This hypothesis is consistent with the study performed by Le Bissonnais and Andrieux (2006) who demonstrated that erosion rate increased with the change from NT to ST. We assume that erosion increase can be explained by a change of the wheel compaction occurring on inter-rows in vineyard context (Curmi et al., 2006). In NT plots the superficial layer remains compact, which reduces the soil particle detachability and limits erosion. Conversely, in ST plots, the soil tillage

modifies the superficial soil structure, composed of a loosened soil surface overlying a low permeability compact layer, which favours soil erosion during intense rainfall events (Curmi *et al.*, 2010).

5. Conclusion

This study shows that erosion in a vineyard context is controlled by complex interactions between geomorphological processes and historical and present-day anthropogenic factors. More specifically, this work highlights the role of historical anthropogenic structures, such as landscape structure, with regard to erosion in a vineyard context. Historical landscape structure has an impact on erosion intensity and spatial distribution. Some historical structures, such as dry-stone walls, decrease erosion, whereas historical gullies increase erosion. Our study also shows that the impact of historical landscape structure generally declines over time. However, in a steep slope context, erosion deletes the effects of both historical and present-day anthropogenic factors. Conversely, the effects of historical landscape structure are partially preserved when the slope is moderate.

This study demonstrates that it is crucial to take into account the pre-plantation history of plots in order to assess the spatial distribution of erosion, especially on vineyard hillslopes where soil losses have major economic and environmental consequences. The SUM appears to be a useful method to quantify the effects of management practice changes on soil erosion on the long term.

Acknowledgements

This work was made possible by the financial support of Burgundy Regional Council (CRB) and the Inter-Professional Bureau of Burgundy Wines (BIVB). We offer special thanks to Michel and Sébastien Deschamps, the wine-growers, for their material assistance and for all the background information they have provided. We also thank the mayor and the secretary of Monthelie town council for allowing us access to the town archives. And finally, we thank Dr. Carmela Chateau-Smith for her help with the English manuscript.

References

- AD21, 2006. Archives Départementales de la Côte d'Or, Monhelie « Napoleonic cadastre” plan, Section A nammed « du village », sheet n°1, finished on the 25th april 1825. Reference 3P PLAN 427/2. Available on <http://www.archives.cotedor.fr> (accessed 01.11.11).
- Blavet, D., De Noni, G., Le Bissonnais, Y., Leonard, M., Maillo, L., Laurent, J.Y., Asseline, J., Leprun, J.C., Arshad, M.A., Roose, E., 2009. Effect of land use and management on the early stages of soil water erosion in French Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research* 106, 124–136.
- Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Martín-Duque, J.F., Rubiales, J.M., Godfrey, A., Pedraza, J., Carrasco, R.M., Sanz, M.A., 2005. Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. *CATENA* 64, 81–102.
- Brenot, J., 2007. Quantification de la dynamique sédimentaire en contexte anthropisé. L'érosion des versants viticoles de Côte d'Or. Université de Bourgogne, Dijon, 262 pp.
- Brenot, J., Quiquerez, A., Petit, C., Garcia, J.-P., 2008. Erosion rates and sediment budgets in vineyards at 1-m resolution based on stock unearthing (Burgundy, France). *Geomorphology* 100, 345–355.
- Carrara, P.E., Carroll, T.R., 1979. The determination of erosion rates from exposed tree roots in the piceance basin, colorado. *Earth Surf. Process.* 4, 307–317.
- Casalí, J., Giménez, R., De Santisteban, L., Álvarez-Mozos, J., Mena, J., Del Valle de Lersundi, J., 2009. Determination of long-term erosion rates in vineyards of Navarre (Spain) using botanical benchmarks. *CATENA* 78, 12–19.
- Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., Gobin, A., Vacca, A., Quinton, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F.J.P.M., Raclot, D., Ionita, I., Rejman, J., Rousseva, S., Muxart, T., Roxo, M.J., Dostal, T., 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology* 122, 167–177.
- Chartin, C., Bourennane, H., Salvador-Blanes, S., Hinschberger, 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, 8–20.
- Curmi, P., Chatelier, M. & Trouche, G., 2006 - Characterization and modelling of water flow on vineyard soils. Effect of compaction and grass cover. VIth International Terroir Congress, Bordeaux-Montpellier, 2-7 July 2006, ©enitac, 145-150.
- Curmi, P., Chomette, O., Carraretto, A., Ubertosi, M., Crozier, P., 2010 – Incidence du mode d'entretien des sols viticoles sur leurs propriétés physiques et l'enracinement de la vigne. AFPP – 21e conférence du COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, 8 & 9 décembre 2010, 374-381.
- Dabas, M., 2008. Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP? *Geophysics and Landscape Archaeology*. Taylor & Francis, 105–126.
- Dabas, M., 2008. Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP©. In: *Seeing the Unseen Geophysics and Landscape Archaeology*. CRC Press, London, 105–126.
- Ferrero, A., Usowicz, B., Lipiec, J., 2005. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. *Soil and Tillage Research* 84, 127–138.

- Fox, D.M., Bryan, R.B., 2000. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *CATENA* 38, 211–222.
- García-Ruiz, J.M., 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *CATENA* 81, 1–11.
- Gómez, J.A., Giráldez, J.V., Vanwalleghe, T., 2008. Comments on “Is soil erosion in olive groves as bad as often claimed?” by L. Fleskens and L. Stroosnijder. *Geoderma* 147, 93–95.
- IUSS Working Group WRB, 2006. World reference base for soil resource 2006. World Soil Resources Reports No. 103 (2nd ed.), FAO, Rome.
- IGN, 2006. Institut National de l'information Géographique et forestière. Black and white aerial photographs from 1940 to 1968. Available from <http://www.geoportail.gouv.fr/donnee/81/photographies-aeriennes> (accessed 01.14.11)
- IGN, 2008a. Institut National de l'information Géographique et forestière. BD PARCELLAIRE® image, composante parcellaire du RGE. Available from <http://professionnels.ign.fr/bdparcellaire> (accessed 01.14.11).
- IGN, 2008b. Institut National de l'information Géographique et forestière. BD ORTHO® V1, Ortho-photograph in colour. Available from <http://professionnels.ign.fr/bdortho-au-detail> (accessed 01.11.11).
- Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L.H., Chabart, M., Diamantopoulos, J., Farand, R., Gutierrez, L., Jacob, A., Marques, H., Martinez-Fernandez, J., Mizara, A., Moustakas, N., Nicolau, J.M., Oliveros, C., Pinna, G., Puddu, R., Puigdefabregas, J., Roxo, M., Simao, A., Stamou, G., Tomasi, N., Usai, D., Vacca, A., 1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *CATENA* 29, 45–59.
- Krause, A.K., Loughran, R.J., Kalma, J.D., 2003. The use of Caesium-137 to Assess Surface Soil Erosion Status in a Water-Supply Catchment in the Hunter Valley, New South Wales, Australia. *Aust. Geogr. Stud.* 41, 73–84.
- Lagacherie, P., Coulouma, G., Ariagno, P., Virat, P., Boizard, H., Richard, G., 2006. Spatial variability of soil compaction over a vineyard region in relation with soils and cultivation operations. *Geoderma* 134, 207–216.
- Le Bissonnais, Y., Andrieux, P., 2006. Impact des modes d'entretien de la vigne sur le ruissellement, l'érosion et la structure des sols. *Prog. Agric. Vitic.* 124, 191–196.
- Martínez-Casasnovas, J., Ramos, M., Ribes-Dasi, M., 2002. Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. *Geoderma* 105, 125–140.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C., 2006. The cost of soil erosion in vineyard fields in the Penedès–Anoia Region (NE Spain). *CATENA* 68, 194–199.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C., Ribes-Dasi, M., 2005. On-site effects of concentrated flow erosion in vineyard fields: some economic implications. *CATENA* 60, 129–146.
- Martínez-Zavala, L., Jordán, A., 2008. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain. *Soil Use and Management* 24, 108–117.

- Martinez-Zavala, L., Jordán, A., Bellinfante, N., Gil, J., 2010. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment. *Soil Science and Plant Nutrition* 56, 95–104.
- Novara, A., Gristina, L., Saladino, S.S., Santoro, A., Cerdà, A., 2011. Soil erosion assessment on tillage and alternative soil managements in a Sicilian vineyard. *Soil and Tillage Research* 117, 140–147.
- Panissod, C., Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, J., Tabbagh, A., 1998. Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics* 63, 1542–1550.
- Paroissien, J.-B., Lagacherie, P., Le Bissonnais, Y., 2010. A regional-scale study of multi-decennial erosion of vineyard fields using vine-stock unearthing–burying measurements. *CATENA* 82, 159–168.
- Poesen, J.W., Torri, D., Bunte, K., 1994. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *CATENA* 23, 141–166.
- Quiquerez, A., Brenot, J., Garcia, J.-P., Petit, C., 2008. Soil degradation caused by a high-intensity rainfall event: Implications for medium-term soil sustainability in Burgundian vineyards. *CATENA* 73, 89–97.
- Quiquerez, A., Chevigny, E., Allemand, P., Curmi, P., Petit, C., Grandjean, P., 2014. Assessing the impact of soil surface characteristics on vineyard erosion from very high spatial resolution aerial images (Côte de Beaune, Burgundy, France). *CATENA* 116, 163–172.
- Raclot, D., Le Bissonnais, Y., Louchart, X., Andrieux, P., Moussa, R., Voltz, M., 2009. Soil tillage and scale effects on erosion from fields to catchment in a Mediterranean vineyard area. *Agric. Ecosyst. Environ.* 134, 201–210.
- Rémond, C., 1985. Carte géologique de la France au 1/50 000 – Beaune – n°526, BRGM éditions.
- Sirvent, J., Desir, G., Gutiérrez, M., Sancho, C., Benito, G. (1997) – Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE-Spain). *Geomorphology* 18, p. 61-75.
- Szilassi, P., Jordan, G., Van Rompaey, A., Csillag, G., 2006. Impacts of historical land use changes on erosion and agricultural soil properties in the Kali Basin at Lake Balaton, Hungary. *CATENA* 68, 96–108.
- Valentin, C., Poesen, J., Li, Y., 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Gully Eros. Glob. Issue* 63, 132–153.
- Van Oost, K., Govers, G., Van Muysen, W., Quine, T.A., 2000. Modeling translocation and dispersion of soil constituents by tillage on sloping land. *Soil Science Society of America Journal* 64 (5), 1733–1739.
- Vanwalleghe, T., Laguna, A., Giráldez, J.V., Jiménez-Hornero, F.J., 2010. Applying a simple methodology to assess historical soil erosion in olive orchards. *Geomorphology* 114, 294–302.
- Walling, D.E., Quine, T.A., 1991. Use of ¹³⁷Cs measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations. *J. Soil Sci.* 42, 147–165.

Pour compléter l'approche de l'influence de l'homme sur l'érosion des sols viticoles à l'échelle parcellaire, la méthode présentée dans l'article a été complétée par l'analyse de l'occupation du sol au cours des deux derniers siècles, à partir des matrices cadastrales. Sur cette parcelle, initialement constituée de nombreuses petites parcelles, le type d'occupation a évolué, selon trois types d'occupation, *i.e.* vigne, terre nue, friche. Cette évolution est présentée dans le Tableau 6-1. Les données obtenues par l'analyse des matrices cadastrales renseignent sur l'occupation du sol de la parcelle à un instant « t », correspondant à une année. Pour évaluer le temps de résidence de chaque occupation, plusieurs hypothèses ont été avancées. Nous partons du principe que les vignes pré-phyloxériques étant multipliées par provignage, les parcelles viticoles étaient constamment plantées. Si aucun changement de l'occupation du sol n'a été observé entre deux dates, nous posons l'hypothèse que cette occupation est restée la même au cours du temps. Quand un changement est observé entre deux dates, cette période est classifiée en « non déterminé », car on ne peut connaître la date exacte du changement. Ces hypothèses ont permis de réaliser la synthèse de l'occupation du sol pour les deux derniers siècles illustrée sur la Figure 6.17. Durant ces deux derniers siècles, l'occupation du sol sur le secteur d'étude a peu évolué. Le secteur était principalement occupé par la vigne, en moyenne à 75 %. Certaines parcelles, A 0046, A 0047 et A 0048, ont quasiment été occupées uniquement par la vigne (temps d'occupation > à 90 %). D'autres parcelles n'ont pas été cultivées et laissées à l'état de friche, pendant une durée d'environ 40 ans (parcelles A 0056, A0057, A 0140 à A 0144). Ces différences d'occupation du sol, sur de courtes durées, ne semblent pas avoir un impact sur les vitesses d'érosion pour chaque parcelle.

		Référence parcellaire													
Année de changement d'occupation du sol ou de changement de propriétaire	plan1825	A 0044	A 0045	A 0046	A 0047	A 0048	A 0049	A 0140	A 0141	A 0142	A 0143	A 0144	A 0145	A 0146	A 0147
	plan 1932	A 0051	A 0052	A 0053	A 0054	A 0055	A 0056	A 0057	A 0104	A 0105	A 0106	A 0107	A 0108	A 0109	A 0110
1827	V	V	V	V	V	V	V	V	V		V		V		
1829								V			V				
1834		V													
1841									V						
1842						V									
1846										V		V			
1849							V	V							
1860							V				V				
1862													V		
1863		V	V												
1867		V													
1869				V			V	V							
1873													V		
1877			V												
1883								V							
1889		V													
1893						V						V	V		
1895										V					
1896				V											
1900		V		V	V			V	V	V					
1901					V					V					
1904			V		V	V									
1909							V				V				
1910				V			V								
1911												V	V		
1913	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
1932	S	S	S	V	V	S	S	S	S	S	S	S	S	V	V
1940	F	F	S	V	V	F	F	F	F	F	F	FA	V	V	V
1942		S		V											
1948								S							
1951	S	S	V	F	V	F	F	S	S	S	S	S	F	F	F
1952			V												
1953	V	V	V	FA	FA	FA	FA	F	F	F	FA	FA	F	F	F
1954			V												
1955	V										F				
1957												S			
1958								S		S					
1961					V										
1962	V	V	V	V	V	FA	FA	F	F	F	FA	FA	FA	V	V
1963	V								S		F				
1967	V												F		
1968	F	V	V	V	V	FA	FA	F	F	F	F	F	F	V	V
1969									S		F		F		
1970										S		S		F	F
1971								S							
1972	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
1989	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
1991	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
2012	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V

Evénements : Acquisition actuel propriétaire Plantation vigne (actuel propriétaire)
 Remembrement parcellaire Phylloxera

Tableau 6-1 Évolution de l'occupation du sol du secteur d'étude pour la période 1827 à 2012. Les différentes occupations sont : la culture de la vigne (V), la terre nue (S), la friche (F) et la friche arbustive (FA). Les occupations soulignées sont renseignées à partir des photo-interprétations historiques.

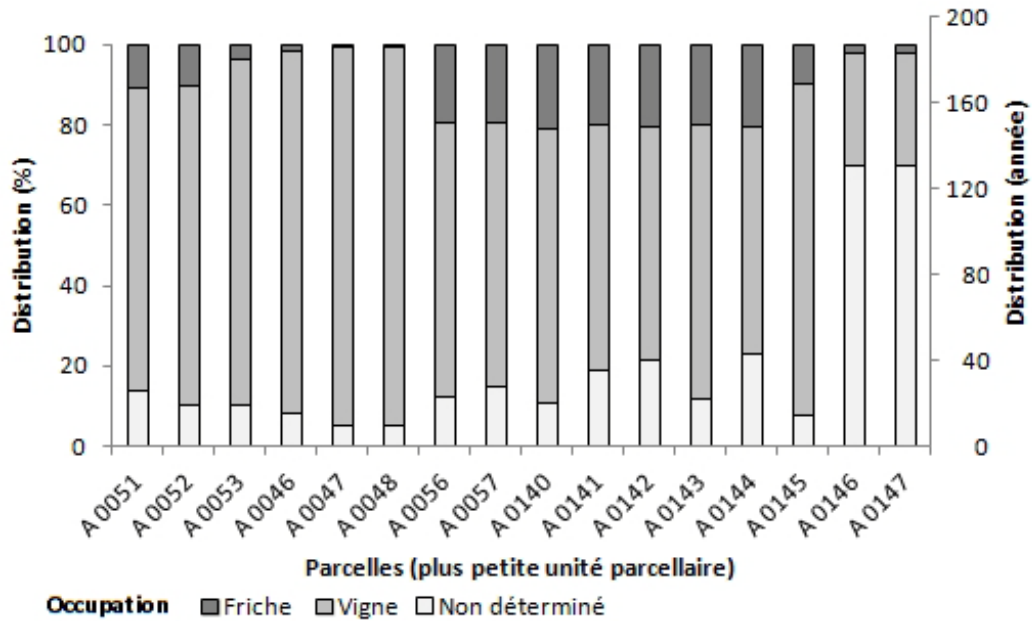


Figure 6.17 Distribution des divers types d'occupation du sol pour chaque parcelle, pour la période 1827 et 2013.

6.2.2 Influence de l'occupation ancienne du sol sur l'érosion actuelle

L'influence de l'occupation ancienne du sol sur l'érosion actuelle a été mise en évidence sur un deuxième site de la Côte. Le secteur étudié se situe sur la commune de Pernand-Vergelesses, au lieu-dit « En Charlemagne ». Cette zone couvre une superficie de 2,5 ha entièrement plantée en vignes, appartenant à un unique propriétaire exploitant. Les sols qui composent l'ensemble des parcelles sont des Rendosols et des Calcosols leptiques qui se développent sur la formation des Marnes de Pernand (Blaquière, 1967). D'après la carte des pentes, la forme du versant est convexo-concave et la parcelle occupe la partie amont, convexe du versant (Figure 6.18). L'altitude du secteur varie entre 305 et 345 m et la pente de 10° à 15°. Le secteur est divisé en six parcelles, une à l'amont, trois dans la partie médiane et deux à l'aval. Les parcelles sont séparées par des collecteurs d'eau, dans le sens de la pente, utilisés pour récolter les eaux de ruissellement, et par des chemins parallèles aux courbes de niveau, qui guident les eaux en direction des collecteurs. Les pratiques culturales employées au sein des parcelles sont identiques : l'exploitant travaille ses sols par griffage avec des enjambeurs ultralégers pour éviter le tassement du sol.

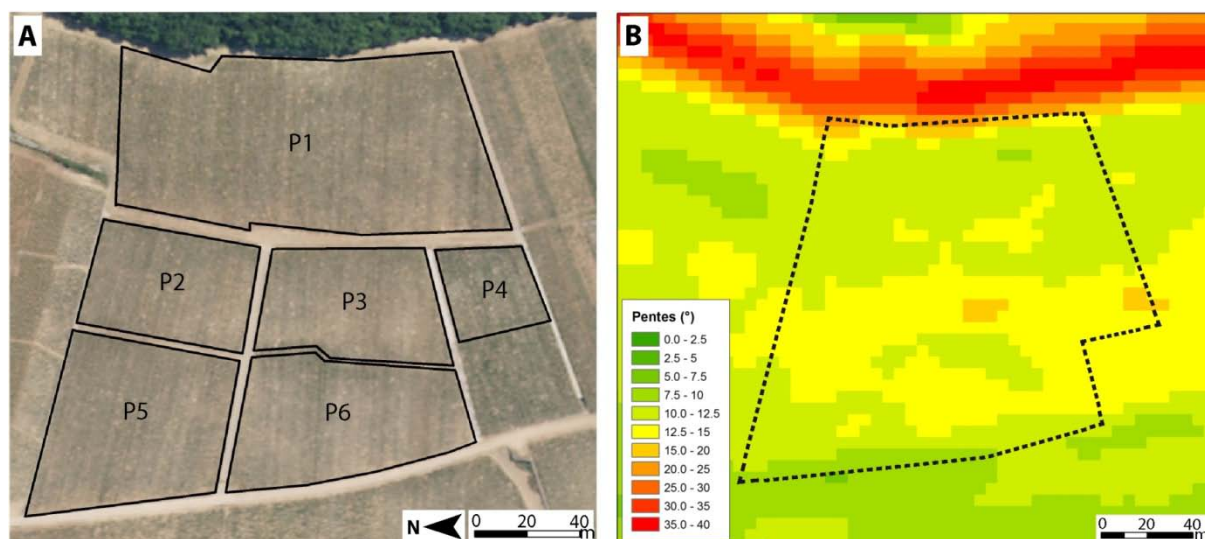


Figure 6.18 Secteur d'étude caractérisé par un ensemble de 6 parcelles contigües (A) et carte des pentes du secteur (B).

La démarche adoptée est la même que celle employée pour la parcelle de Monthelie. Les cartes d'érosion du secteur ont été acquises par la méthode SUM dans le cadre de la thèse de Brenot (2007). Les parcelles ont toutes été plantées en 1955 par l'unique propriétaire exploitant. Deux plans cadastraux ont été utilisés : le plan cadastral napoléonien datant de 1825 (ADCO²⁵) et le plan cadastral vectorisé et géoréférencé (BD PARCELLAIRE[®], IGN, 2002), qui n'a pas évolué pour le secteur depuis le dernier remembrement parcellaire de 1970. Le plan cadastral napoléonien a été géoréférencé à partir des limites communes qu'il présente avec le plan de 1970. Trois matrices cadastrales ont été consultées en mairie de Pernand-Vergelesses : la matrice de 1825, la matrice de 1913 (état de section) et la matrice de 1970 correspondant à la mise à jour du plan cadastral (Archives communales de Pernand-Vergelesses). Un lot de photographies aériennes anciennes a été utilisé pour caractériser l'occupation du sol pour la période 1940 à nos jours. Les clichés de 1940, 1953, 1962, 1968 (IGN) ont été géoréférencés à partir de points d'amer commun à l'orthophotographie de la BD ORTHO[®] de 2006 (IGN, 2006).

6.2.2.1 Cartographie de l'érosion

La quantification de l'érosion à une résolution métrique a été réalisée par Brenot (2007) au cours de sa thèse. Les vitesses d'érosion pour chaque parcelle sont présentées dans le Tableau 6-2 ; elles varient entre 0,65 et 1,12 mm/an, correspondant à des taux de 8,83 à 15,09 t/ha/an (Brenot, 2007). Les cartes d'érosion pour les six parcelles sont présentées sur la Figure 6.19. L'érosion

²⁵ Archives départementales de la Côte-d'Or

sur les parcelles présente une forte variabilité latérale et également d'amont en aval. Deux motifs d'érosion principaux peuvent être observés, *i.e.* des zones de faible érosion, parallèles aux courbes de niveau, situées sur le pourtour des parcelles, et des motifs perpendiculaires aux courbes de niveau, où les vitesses d'érosion diffèrent localement.

Parcelle	Nb ceps mesurés	SUM (cm)	Vitesse d'érosion (mm/an)	Vitesse d'érosion (t/ha/an)
P1	7740	3.51	0.70	9.48
P2	2323	4.82	0.96	13.01
P3	2591	3.85	0.77	10.42
P4	1122	5.59	1.12	15.09
P5	3733	3.27	0.65	8.83
P6	3334	5.01	1.00	10.42

Tableau 6-2 Vitesses d'érosion moyenne des parcelles du lieu-dit « En Charlemagne » (d'après Brenot, 2007).

Sur la parcelle P1, la vitesse d'érosion moyenne est égale à 0,70 mm/an (Tableau 6-2). Cette parcelle située à l'amont présente plusieurs motifs d'érosion (Figure 6.19). Dans sa partie nord, aucun motif particulier n'est observable à l'exception de la partie aval (à l'ouest) marquée par de fortes valeurs d'érosion. Une seconde zone, située dans la partie médiane de la parcelle, présente de plus faibles valeurs d'érosion que la zone située au nord. La limite entre les deux zones est parallèle à l'orientation actuelle des rangs (orientation OE). La zone médiane présente une limite méridionale, parallèle aux rangs, qui délimite une nouvelle zone, au sud. Elle présente de fortes valeurs d'érosion, et se subdivise en deux zones selon une limite linéaire d'orientation OSO-ENE. Les valeurs d'érosion semblent être plus fortes dans la zone située au nord par rapport à celles situées au sud.

La parcelle P2 ne présente pas de motif d'érosion particulier ; l'érosion moyenne est égale à 0,96 mm/an (Tableau 6-2, Figure 6.19). Néanmoins, on peut observer de plus faibles valeurs d'érosion à l'amont.

Sur la parcelle P3, l'érosion moyenne est égale à 0,77 mm/an, avec de très faibles valeurs d'érosion observées sur l'ensemble des contours de la parcelle (SUM < 2 cm). De plus, une zone présentant de très faibles valeurs d'érosion est localisée dans la partie médiane de la parcelle. Cette zone est marquée par deux limites linéaires, perpendiculaires aux courbes de niveau.

La parcelle P4 présente de faibles valeurs de déchaussement à l'amont (Figure 6.19). Une limite linéaire d'orientation OSO-ENE délimite deux zones au sein de la parcelle. La zone située au nord

présente de fortes valeurs d'érosion ($SUM > 20$ cm), alors que la zone située au sud est moins érodée. Cette parcelle présente la plus forte vitesse d'érosion du secteur, égale à 1,12 mm/an (Tableau 6-2).

La parcelle P5 ne présente pas de motif d'érosion particulier : la vitesse d'érosion de la parcelle est la plus faible de la zone d'étude, et atteint 0,65 mm/an (Tableau 6-2).

Sur la parcelle P6, l'érosion moyenne est égale à 1,00 mm/an. Cette parcelle présente de très faibles valeurs d'érosion à l'amont ($SUM < 2$ cm), ainsi que de nombreuses zones identifiées par des limites linéaires, d'orientation OE, qui se caractérisent par une forte variabilité des vitesses d'érosion (Figure 6.19).

Sur la zone d'étude, les vitesses d'érosion varient du simple au double, alors que les valeurs de pente restent assez stables sur le secteur (10 à 15°). On observe un léger accroissement des valeurs de pente dans la partie médiane du bloc de parcelles. De plus, la mise en culture des parcelles depuis 1955 par un unique viticulteur, utilisant des modes d'entretien du sol similaires, permet de réfuter un contrôle dû à des pratiques culturelles différentes. Les zones présentant de faibles valeurs d'érosion ($SUM < 2$ cm), parallèles aux courbes de niveau, ont fait l'objet de remontées de terre par le viticulteur. Cependant, la nature des apports ne permet pas de différencier le sol préexistant des remontées de terre. Les motifs d'érosion présentant des orientations OE et OSO-ENE ne peuvent s'expliquer par un contrôle lithologique et/ou topographique puisque les motifs sont perpendiculaires à la pente. Il semblerait donc que ces zones d'érosion différentielle soient contrôlées par des facteurs anthropiques.

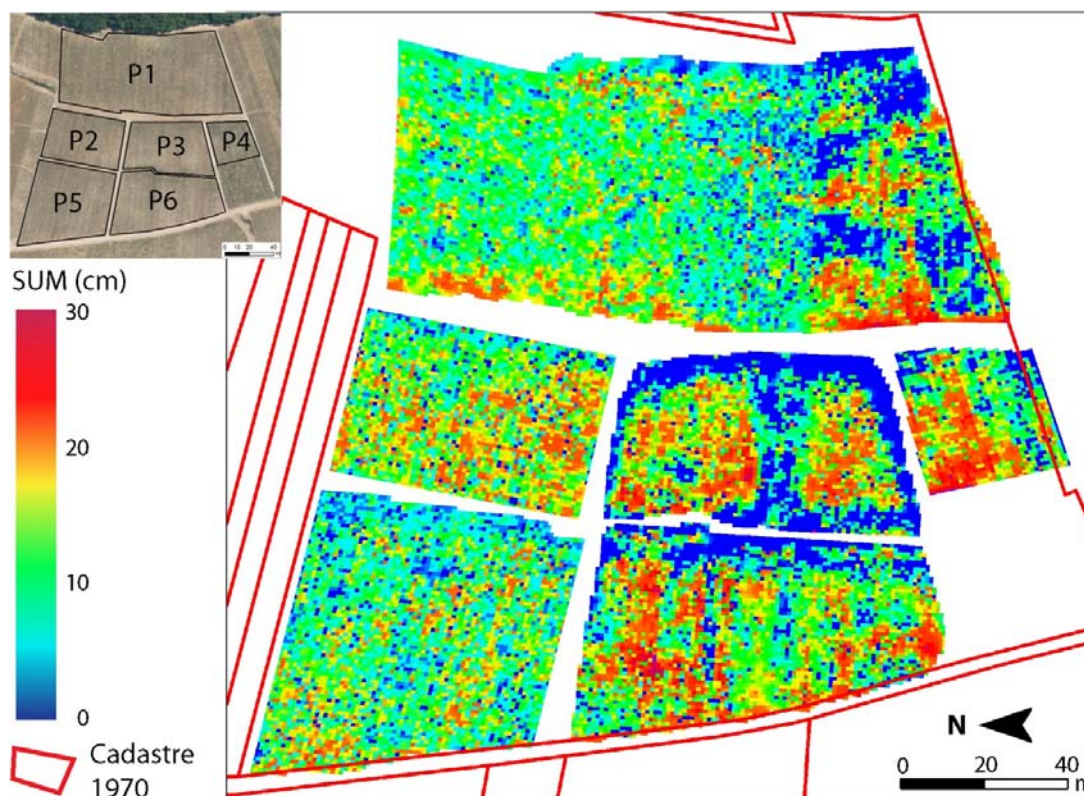


Figure 6.19 Carte de déchaussement de ceps dans une partie du lieu-dit « En Charlemagne ». Les limites cadastrales actuelles sont représentées en rouge (BD PARCELLAIRE® IGN) (SUM d'après Brenot, 2007).

6.2.2.2 Influence de l'occupation ancienne du sol sur l'érosion

Afin d'évaluer l'influence de l'homme sur la distribution spatiale des motifs d'érosion, les limites parcellaires du cadastre napoléonien de 1825 (ADCO) ont été plaquées sur les cartes de déchaussement. La Figure 6.20 illustre l'impact du parcellaire ancien sur l'érosion actuelle. Les motifs d'érosion, d'orientation OSO-ENE, observés au sein de P1 et P4, sont délimités par l'ancien parcellaire (parcelles cadastrales n°485 et 483). Les vitesses d'érosion pour ces deux parcelles sont très significativement différentes (Tableau 6-3). La parcelle cadastrale n°485 présente une vitesse d'érosion importante (2,63 mm/an), mais nettement plus faible pour la parcelle n°483 (1,64 mm/an). Les motifs d'érosion linéaires d'orientation OE, observés dans la parcelle P6, semblent également être contrôlés par le parcellaire historique (Figure 6.20). Pour cet ensemble d'anciennes parcelles, les vitesses d'érosion calculées sont très significativement différentes pour les parcelles situées dans la partie nord de P6 (parcelles cadastrales n°502, 501, 499, 494 et 493) (Tableau 6-3). Pour ces parcelles, les vitesses d'érosion varient entre 2,30 et 3,91 mm/an. Dans la partie sud de P6, les vitesses d'érosion ne présentent pas de différence pour les parcelles cadastrales n°493, 492 et 490. Les vitesses d'érosion varient peu, entre 2,33 et 2,78 mm/an. Pour le secteur d'étude, le parcellaire ancien semble expliquer en partie la distribution spatiale de l'érosion. Néanmoins, les motifs d'érosion linéaires d'orientation

OE, observés au sein de P1, P3 et quelques motifs de P6, ne peuvent être expliqués par les limites cadastrales napoléoniennes (Figure 6.20).

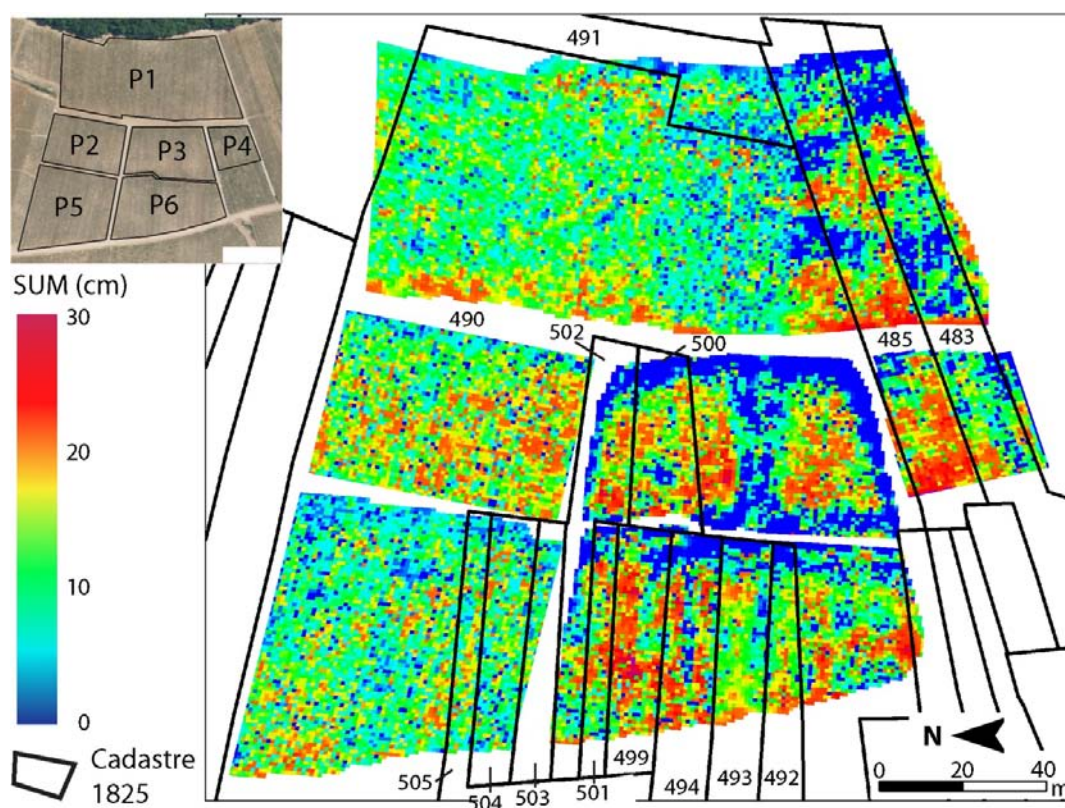


Figure 6.20 Carte de déchaussement des ceps d'une partie du lieu-dit « En Charlemagne ». Les limites du cadastre napoléonien sont corrélées à certains motifs d'érosion (données de déchaussement d'après Brenot, 2007, plan du cadastre napoléonien, ADCO, cote 3 P PLAN 479/5).

Pour déterminer les facteurs influençant les autres motifs d'érosion linéaires observés, un recensement de l'occupation du sol a été réalisé à partir de l'analyse des matrices cadastrales, qui permettent de connaître la nature de l'occupation du sol depuis 1827 (Figure 6.21, Tableau 6-5). Cette analyse a été complétée par une méthode de photo-interprétation sur les images aériennes historiques du secteur (Figure 6.22, Figure 6.23).

Parcelle	Parcelle historique	Nb ceps mesurés	SUM (cm)	Vitesse d'érosion (mm/an)	Comparaison des vitesses moyennes (p-value)	
P1	483	891	3.27	1.64	K-W	< 0.0001**
	485	967	5.26	2.63		
P4	483	455	4.61	2.31	K-W	< 0.0001**
	485	527	9.10	4.55		
P6	502	254	4.59	2.30		0.0002**
	501	308	6.00	3.00		
	499	591	7.81	3.91		
	494	560	6.59	3.30	M-W	0.0004**
	493	368	4.66	2.33		
	492	276	5.55	2.78		
	490	927	5.52	2.76		

K-W : Test de Kruskal-Wallis ; M-W : Test de Mann-Whitney

Pour les résultats soulignés, les moyennes ne présentent pas de différence.

Tableau 6-3 Vitesses d'érosion calculées pour les motifs d'érosion délimités par le parcellaire historique. Les tests statistiques ont été calculés pour un seuil de signification α égal à 0,01.

Depuis 1827, le secteur d'étude, morcelé en de nombreuses parcelles, a connu des changements d'occupation du sol. Soit les parcelles étaient plantées en vignes, soit elles étaient non cultivées et laissées à l'état de friche (Figure 6.21, Tableau 6-4). La distribution des diverses occupations, entre les parcelles, a peu varié au cours du temps. Trois parcelles ont connu une période de sol en friche plus longue que les autres (parcelles cadastrales n°483, 485 et 491), de l'ordre de 60 à 70 % du temps depuis 1827. Ces trois parcelles présentent des vitesses d'érosion très hétérogènes. Les parcelles cadastrales n°483 et 491 présentent les valeurs d'érosion les plus faibles du secteur d'étude (respectivement 1,86 et 1,75 mm/an), alors que la parcelle cadastrale n°485 présente la vitesse d'érosion la plus importante du secteur (3,24 mm/an) (Tableau 6-5). De la même façon, pour une même période d'occupation du sol par la vigne, certaines parcelles présentent des vitesses d'érosion très hétérogènes. Par exemple, les parcelles cadastrales n°492, 494, 499 à 505, cultivées en vignes pendant environ 100 ans (53 % de la période étudiée), présentent des vitesses d'érosion très variables, comprises entre 2,02 et 3,90 mm/an. Enfin, une occupation plus longue par la vigne ne semble pas influencer les vitesses d'érosion. Par exemple, la parcelle cadastrale n°493, cultivée en vigne pendant plus de 128 ans, enregistre une vitesse d'érosion moyenne de 2,33 mm/an. L'ensemble de ces observations ne permet donc pas de conclure quant à un potentiel effet du type d'occupation du sol sur l'érosion. Mais, il est possible que des occupations plus anciennes soient à l'origine de cette hétérogénéité des vitesses d'érosion. La vigne a occupé le secteur pendant 46 % de la période étudiée

(60 années). L'acquisition des parcelles par un unique propriétaire s'est faite entre 1845 et 1870. Suite à cette acquisition, il semblerait que les parcelles aient été laissées à l'état de friche, jusqu'à la replantation en 1955.

		Référence parcellaire																	
Plan 1825		483		485		490		491	492	493	494	499	500	501	502	503	504	505	
Photo 1953		483 W	483 E	485 W	485 E	490 NW	490 SE												
Plan 1970		217																	
Années de changement d'occupation du sol ou de propriétaire	1827	F		F		V	F	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	
	1832									V									
	1843			F															
	1844											V	V			V			
	1845	F		F		V	F												
	1848							V			V								
	1852								V									V	
	1861							V	V					V					
	1866							V	V										
	1868											V	V	V	V	V			
	1870									V	V						V	V	
	1913	S		S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
	1924								V										
	1927								V										
	1940	F		F		F	F	F	V	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
	1951					S			V										
	1953	V	F	V	F	V	F	F	F	V	F	F	F	F	F	F	V	V	V
	1955	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
	1962	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
1968	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	
1970																			
2013																			

Evénements : Acquisition actuel propriétaire — Plantation vigne (actuel propriétaire)
 Remembrement parcellaire - - - Phylloxera

Tableau 6-4 Évolution de l'occupation du sol des parcelles du lieu-dit « En Charlemagne », pour la période 1827 à nos jours. Les différentes occupations sont : la culture de la vigne (V), la terre nue (S) et la friche (F).

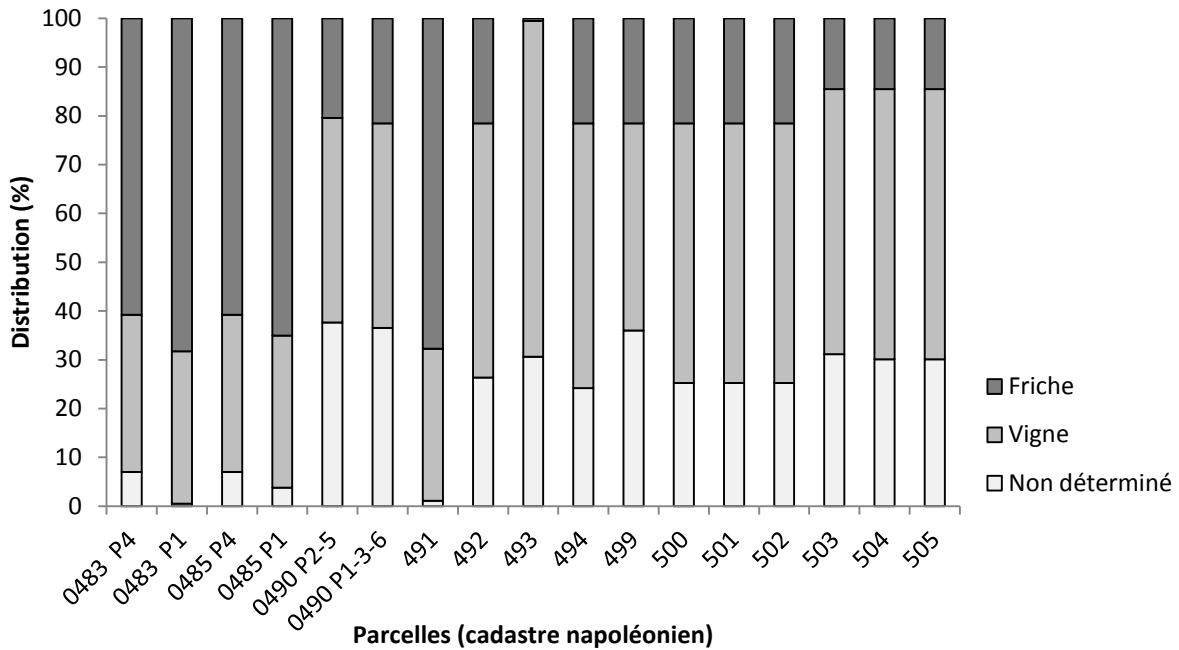


Figure 6.21 Évolution de l'occupation du sol pour chaque parcelle entre 1827 et 2013. Les données issues des matrices cadastrales n'étant pas continues, l'occupation du sol pour certaines périodes n'a pu être déterminée.

Parcelle historique	Nb ceps mesurés	SUM (cm)	Vitesse d'érosion (mm/an)	Parcelle historique	Nb ceps mesurés	SUM (cm)	Vitesse d'érosion (mm/an)
483	1346	3.7	1.86	494	560	6.6	3.29
485	1580	6.5	3.24	499	591	7.8	3.90
486	165	3.9	1.94	500	559	5.7	2.85
490	12881	4.7	2.37	501	308	6.0	3.00
491	610	3.5	1.75	502	565	5.2	2.58
492	276	5.6	2.78	504	526	4.0	2.02
493	368	4.7	2.33	505	307	4.5	2.23

Tableau 6-5 Vitesses d'érosion calculées pour chaque parcelle historique.

Les photo-interprétations des photographies aériennes historiques permettent de mettre en évidence la mise en plantation de vignes dans les années 1955 sur l'ensemble du secteur (Figure 6.22, Figure 6.23). En 1940, le secteur d'étude était à l'état de friche, à l'exception de la parcelle n°493 située à l'aval (Figure 6.22). Deux zones se caractérisent par une végétation plus importante, interprétée comme étant des haies éparées, parallèles aux courbes de niveau, correspondant aux actuels chemins. En 1953, les premières parcelles de vignes sont plantées dans la partie NO, correspondant aux actuelles parcelles P2 et P5. Le secteur, planté en vignes, se divise en trois parcelles. Les deux parcelles les plus au sud présentent une section implantée au niveau des haies éparées. Une autre

parcelle – l'actuelle parcelle P4 – est également plantée dans la partie sud. Les deux haies éparses sont encore visibles dans le secteur non planté en vignes. Un chemin sinueux relie le bas du secteur et l'amont des parcelles plantées.

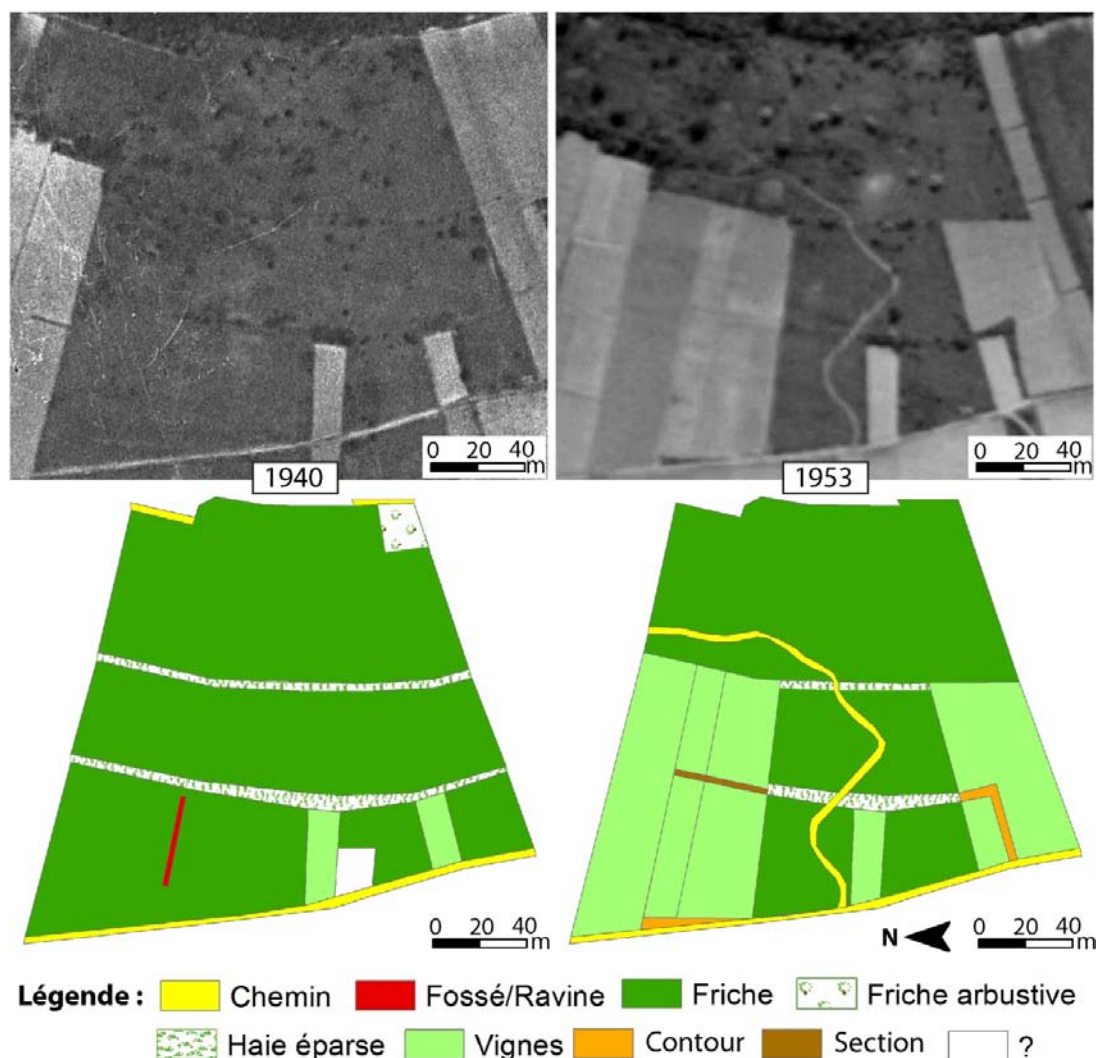


Figure 6.22 Photographies aériennes et photo-interprétations de l'occupation du sol des parcelles de Pernand-Vergelesses, en 1940 et 1953 (photographie aérienne IGN).

En 1962, le secteur est entièrement recouvert par la vigne (Figure 6.23). L'actuelle parcelle P1 se subdivise en trois parcelles. Les parcelles plantées en 1953 dans le secteur NO apparaissent comme une seule unité sur la photographie aérienne, une section divise la parcelle d'amont en aval. Les actuelles parcelles P3 et P6 sont divisées en trois parcelles, plus une quatrième (n°493) n'appartenant pas encore, à l'époque, à l'actuel propriétaire (acquisition faite dans les années 1970). Les parcelles de la zone aval sont séparées par deux collecteurs d'eau encore utilisés de nos jours. La haie éparses située à l'amont du secteur est transformée en chemin. Depuis 1968, l'occupation du sol a peu évolué. On observe la présence d'un fossé/ravine parallèle au collecteur d'eau situé dans P2 et P5. Le collecteur

d'eau situé au nord semble avoir été bétonné (état actuel). Une section est visible dans la partie sud, et correspond à l'actuelle séparation de P3 et P6.

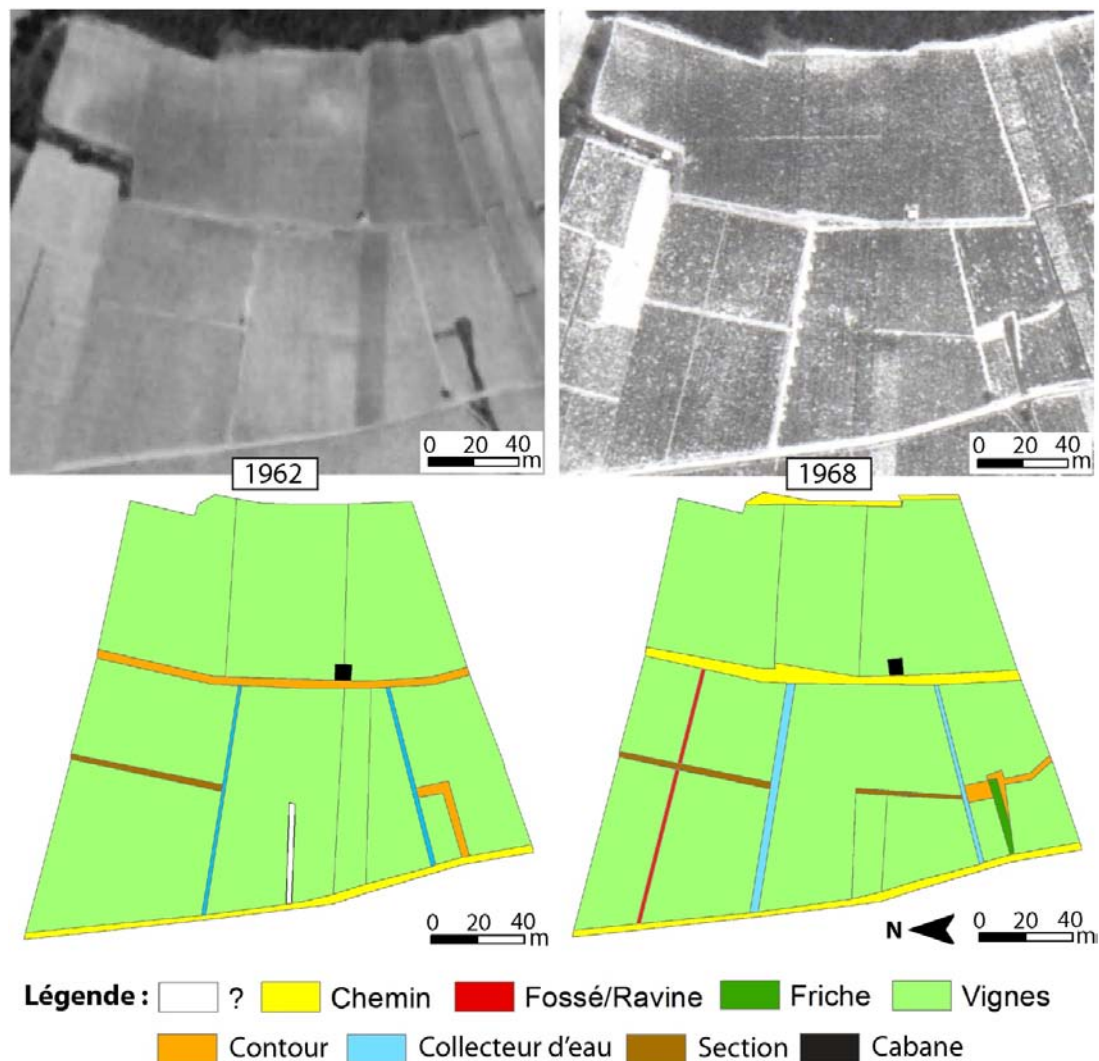


Figure 6.23 Photographies aériennes et photo-interprétations de l'occupation du sol des parcelles de Pernand-Vergelesses, en 1962 et 1968 (Photographie aérienne IGN).

Les limites parcellaires de ces évolutions de l'occupation du sol ont été synthétisées et plaquées sur les cartes d'érosion afin d'évaluer l'influence de l'occupation du sol sur l'érosion actuelle (Figure 6.24). Sur le secteur d'étude, plusieurs motifs d'érosion sont corrélés aux limites parcellaires liées à l'occupation historique du sol.

Dans la parcelle P1, au sud, la limite correspondant au parcellaire de 1962 délimite un motif d'érosion ; celle-ci semble être plus marquée au sud de cette limite. Cependant, les vitesses d'érosion des deux zones ne présentent pas de différence significative (Tableau 6-6). Le chemin sinueux observé en 1953 semble délimiter un motif d'érosion (Figure 6.24) ; à l'aval du chemin, l'érosion est plus forte qu'à l'amont (Tableau 6-6).

Pour la parcelle P2, les limites parcellaires ne semblent pas avoir d'impact sur la distribution spatiale de l'érosion, alors que dans P5, dont la culture en vigne est contemporaine de P2, les limites parcellaires de 1953 semblent influencer les vitesses d'érosion (Figure 6.24). La vitesse de la parcelle médiane, égale à 1,84 mm/an, est très significativement inférieure aux vitesses des parcelles qui l'entourent (Tableau 6-6).

La parcelle P3 semble également être influencée par une limite parcellaire observée en 1962 (Figure 6.24). Cette limite sépare une zone fortement érodée au sud, d'une zone faiblement érodée au Nord. Bien que cette limite soit nettement marquée, les vitesses d'érosion pour les deux zones ne sont pas statistiquement différentes (Tableau 6-6). Au vu des valeurs de déchaussement de la zone faiblement érodée, celle-ci a probablement dû faire l'objet d'un apport de terre.

Au sein de P6, la structure linéaire, dont la nature n'a pu être déterminée, influence la distribution spatiale de l'érosion (Figure 6.24). Les vitesses d'érosion au sein de la zone sont nettement plus faibles que les vitesses des parcelles voisines (Tableau 6-6). La faible largeur de la structure, son alignement dans le sens de la pente et la faible vitesse d'érosion qu'elle présente permettent de poser l'hypothèse d'une probable ravine comblée. Enfin, la limite parcellaire de 1953, située au sud, met en évidence une zone d'érosion préférentielle (Figure 6.24). Cependant, les vitesses d'érosion pour les deux parcelles qui encadrent la limite ne sont pas statistiquement différentes (Tableau 6-6).

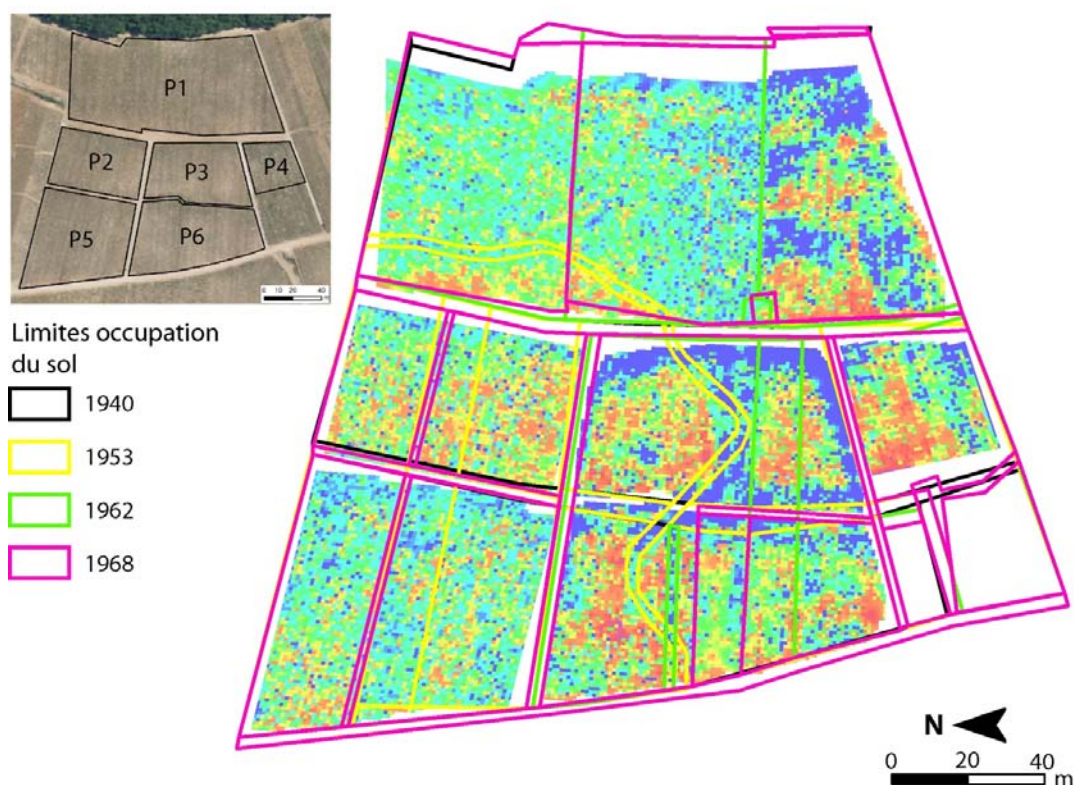


Figure 6.24 Limites parcellaires dessinées à partir de l'évolution de l'occupation du sol plaquées sur les cartes d'érosion du secteur d'étude.

Parcelle	Limite Occ. sol	Localisation	Nb ceps mesurés	SUM (cm)	Vitesse d'érosion (mm/an)	Comparaison des vitesses moyennes (p-value)	
P1	1962	Sud	2327	4.5	2.27	K-W	<u>0.9782</u> **
	1962	Nord	2987	4.0	1.98		
	1953	Amont chemin	6886	4.2	2.08	K-W	< 0.0001**
	1953	Aval chemin	621	6.3	3.17		
	1953	Chemin	174	4.8	2.41		
P5	1953	Nord	1582	4.3	2.16	M-W	< 0.0001** < 0.0001**
	1953	Médiane	765	3.7	1.84		
	1953	Sud	1346	4.4	2.19		
P3	1962	Sud	945	4.5	2.25	K-W	<u>0.2058</u> **
	1962	Nord	1646	4.9	2.43		
P6	1962	Struc linéaire	99	3.1	1.56	K-W	< 0.0001**
	1962	Nord	2096	6.2	3.12		
	1962	Sud	693	5.5	2.75	K-W	<u>0.3704</u> **
	1962	Médiane	535	5.6	2.79		

K-W : Test de Kruskal-Wallis, M-W : Test de Mann-Whitney

Pour les résultats soulignés, les moyennes ne présentent pas de différence.

Tableau 6-6 Vitesses d'érosion calculées pour les motifs d'érosion délimités par le parcellaire historique lié à l'occupation du sol. Les tests statistiques ont été calculés pour un seuil de signification α égal à 0,01.

Il apparaît donc que les motifs d'érosion au sein de l'ensemble des parcelles sont contrôlés par des facteurs anthropiques. L'acquisition de l'ensemble des parcelles par un unique propriétaire date de 1870. Depuis la replantation, autour de 1955, les pratiques culturales utilisées sur le secteur sont homogènes, à l'exception des apports de terre. Il semblerait donc que les motifs d'érosion observés sur le secteur d'étude soient uniquement liés aux pratiques culturales passées, antérieures à 1870. De plus, les parcelles situées dans la partie centrale du secteur d'étude (parcelles P2, P3 et P4) enregistrent les vitesses d'érosion les plus importantes, comprises entre 3,85 et 5,59 mm/an (Tableau 6-2). Cette zone présente les pentes les plus fortes du secteur d'étude, toutes supérieures à 12,5° (Figure 6.18B). La plus forte érosion du secteur médian explique donc les apports de terre effectués au sein de ces parcelles. Par ailleurs, l'érosion sur le secteur d'étude est contrôlée par deux facteurs principaux, *i.e.* la topographie et l'activité humaine passée.

L'étude de l'érosion des deux secteurs, Monthelie et Pernand-Vergelesses, a démontré que l'évolution de l'occupation du sol, sur plusieurs siècles ou plusieurs dizaines d'années, avait une influence sur la distribution spatiale et sur l'intensité de l'érosion récente. Il a été observé que les limites parcellaires anciennes influencent l'intensité de l'érosion. Certaines limites favorisent l'érosion (ancienne ravine), d'autres semblent l'atténuer (ancien mur démantelé, chemin). Pour la période

étudiée, s'écoulant des environs de 1825 à nos jours, le type et la durée d'occupation du sol ne semblent pas avoir d'impact significatif sur les vitesses d'érosion au sein des parcelles. Mais, pour les deux sites, l'étude de la distribution spatiale de l'érosion et de son intensité a permis de mettre en évidence un contrôle multifactoriel de l'érosion des sols viticoles, à la fois par des facteurs naturels (topographie, géologie) et par des facteurs anthropiques (parcellaires historiques, pratiques culturelles actuelles). De plus, nous avons pu observer que le contrôle de l'érosion par les facteurs anthropiques historiques tend à s'effacer sous l'influence des pratiques culturelles actuelles.

6.3 Impacts de la mécanisation sur les sols viticoles

6.3.1 La compaction du sol

La culture de la vigne demande un entretien tout au long de l'année. Pour faciliter ces travaux, l'utilisation de machines mécaniques motorisées est largement répandue depuis les années 1950. Les tracteurs enjambeurs utilisés dans les vignes présentent un poids relativement élevé, de l'ordre de plusieurs tonnes, entraînant, par leur passage, un tassement du sol dans les parcelles. On peut distinguer deux types de compaction. Un premier type résulte du labour profond avant plantation, et conduit à un tassement en profondeur du sol, sous le niveau de labour : on parle de semelle de labour. Des techniques alternatives (sous-solage) permettent de limiter cette compaction en profondeur en augmentant la macroporosité (Coulouma *et al.*, 2006 ; Pagliai *et al.*, 2004). Le second type de compaction résulte des passages successifs des tracteurs enjambeurs pour entretenir la vigne au cours de son cycle végétatif. Le tassement va conduire à des modifications physiques du sol. Le sol compacté va présenter une structure massive, une plus forte densité apparente, avec absence de macroporosité et de porosité structurale (Lagacherie *et al.*, 2006). Le tassement lié au labour profond avant plantation va être observé sur l'ensemble de la parcelle, alors que le tassement du sol résultant du passage des tracteurs enjambeurs va être présent uniquement dans l'inter-rang. Le tassement peut être superficiel ou sub-superficiel en cas de binage superficiel. De plus, ce tassement va présenter une distribution spatiale au sein de la parcelle qui va être dépendante des pratiques culturelles, et donc du nombre de passages (Tableau 6-7) (Lagacherie *et al.*, 2006). Les rangs de traitement étant les rangs les plus utilisés sur une parcelle, les inter-rangs qui les encadrent vont donc présenter une compaction plus forte au regard des autres inter-rangs. Cette compaction entraîne une absence de porosité, rend le sol imperméable et favorise l'érosion hydrique.

Type d'entretien du sol	Surface des zones compactées observées sur fosse (cm ²)		
	Peu de passages	Passages modérés	Passages importants
Désherbage chimique	412 (3)	1498 (1)	1953 (4)
Désherbage mécanique		1545 (12)	1723 (2)
Enherbement		921 (5)	1877 (1)

Tableau 6-7 Surfaces moyennes des zones de compaction en fonction du nombre de passages des engins agricoles et du type d'entretien du sol (modifié d'après Lagacherie et al., 2006). Les surfaces de compaction ont été observées sur des profils pédologiques (nombres entre parenthèses) pour 28 sites viticoles situés dans la plaine languedocienne.

La cartographie de l'érosion d'une parcelle, située sur le versant viticole de Couchey, au lieu-dit « Champs Perdrix », a permis de mettre en évidence l'impact du passage du tracteur enjambeur sur l'érosion. La parcelle étudiée se situe à l'amont du versant viticole de Couchey. Les pentes sont fortes à l'amont (15 à 20°) et modérées en direction de l'aval (10 à 15°). Les sols sont des Calcosols typiques et des Calcosols leptiques (30 à 50 cm), à texture argilo-limono-sableuse, présentant une forte pierrosité (30 %), exclusivement constitués de graviers anguleux pluri-millimétriques (grèzes litées). La parcelle plantée en 1982 est entretenue par un griffage mécanique du sol en surface. Sur cette parcelle de 0,8 ha, la cartographie de l'érosion a été réalisée en 2012, sur une surface 0,7 ha (correspondant aux rangs les plus longs). La méthode SUM a été utilisée pour mesurer l'érosion (Brenot et al., 2008). Sur le secteur, 6960 ceps ont été mesurés, répartis sur 66 rangs. Le déchaussement minimal atteint -5 cm (sédimentation) et le déchaussement maximal atteint 25 cm (ablation). Le déchaussement moyen sur la parcelle est égal à 9 cm, correspondant à une vitesse d'érosion de 2,67 mm/an.

Sur la carte, plusieurs motifs d'érosion ont été observés (Figure 6.25), dont des motifs linéaires présentant de fortes valeurs de déchaussement, parallèles aux rangs (orientation ONO-ESE). Ceux-ci apparaissent après une distance depuis l'amont d'environ 30 à 40 m, et se répètent sur l'ensemble de la parcelle selon un cycle régulier. Cette cyclicité est également mise en évidence par la courbe représentative du déchaussement moyen en fonction du rang (Figure 6.26A). Tous les cinq rangs, les valeurs de déchaussement sont plus fortes que les valeurs des rangs voisins. Ces rangs qui présentent de plus fortes valeurs d'érosion correspondent aux rangs de traitement de la parcelle. Sur la parcelle, la faible cohésion de ce sol (texture Als) et l'absence de pavage entraînent des pertes en terre considérables.

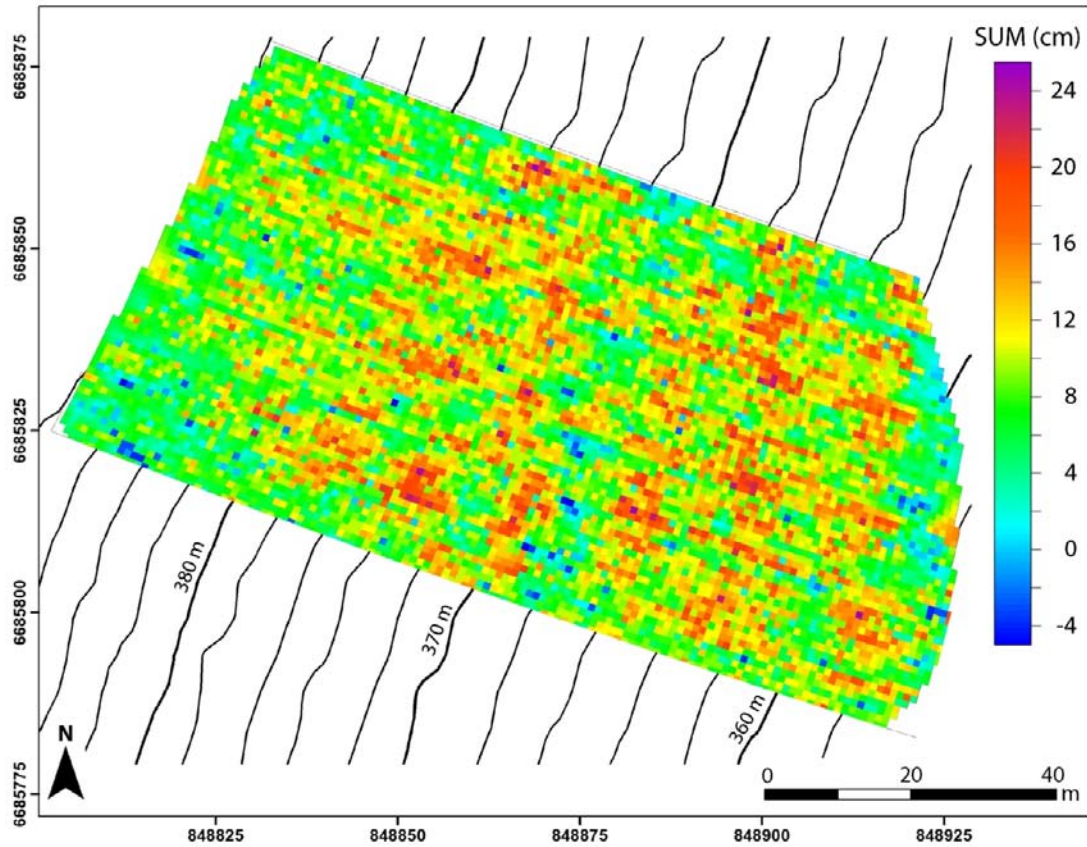


Figure 6.25. Carte d'érosion de la parcelle et courbes de niveau calculées à partir du MNT haute résolution LiDAR (Acquisition par le pôle géomatique de la MSH de Dijon, 2009).

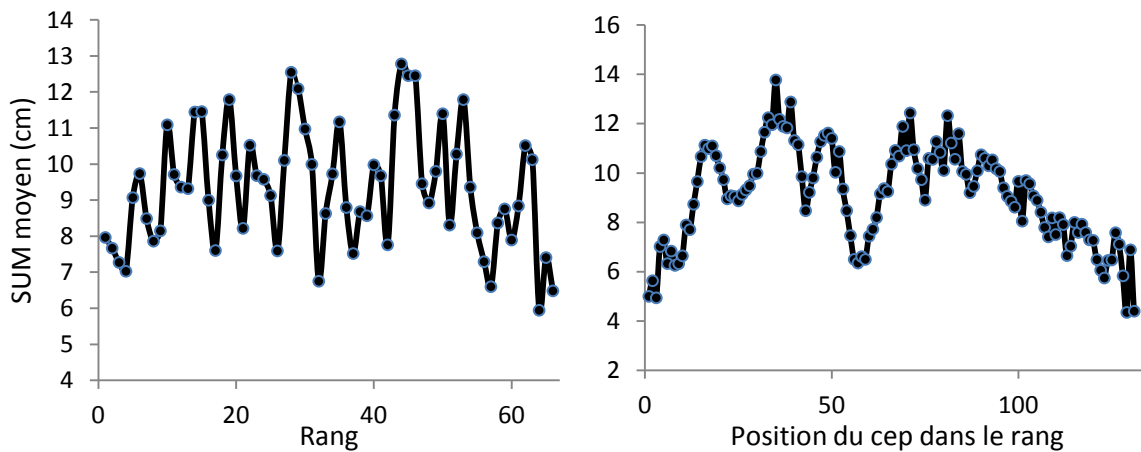


Figure 6.26 Distribution des valeurs moyennes du SUM en fonction des rangs (A) et en fonction de la position du cep (B).

L'analyse du MNT à haute résolution (50 cm), acquis par LiDAR, a permis d'observer des structures érosives linéaires, e.g. des ravines. La mise en évidence de ces ravines a été réalisée à partir du calcul de l'indice topographique d'humidité (Figure 6.27A), qui permet d'estimer la tendance d'un élément ou d'une maille du bassin versant à se saturer (Musy et Higy, 2004). La localisation des ravines est corrélée avec les motifs d'érosion linéaires présentant de fortes valeurs. Des motifs

d'érosion parallèles aux courbes de niveau sont également observables (Figure 6.25), mais ils ne montrent pas de formes particulières. Néanmoins, on observe, d'amont en aval, des alternances de fortes et de faibles valeurs d'érosion (Figure 6.26B). La cartographie des pentes réalisée à partir du MNT à haute résolution a permis de mettre en évidence un contrôle de la topographie sur ces motifs d'érosion (Figure 6.27B). La diminution des valeurs d'érosion est corrélée avec la diminution des valeurs de pentes. Ces variations locales des pentes s'expliquent par des ressauts topographiques qui mettent en évidence la présence de bancs calcaires. Dans les parties les plus érodées de la parcelle, ces bancs calcaires étaient visibles à l'affleurement.

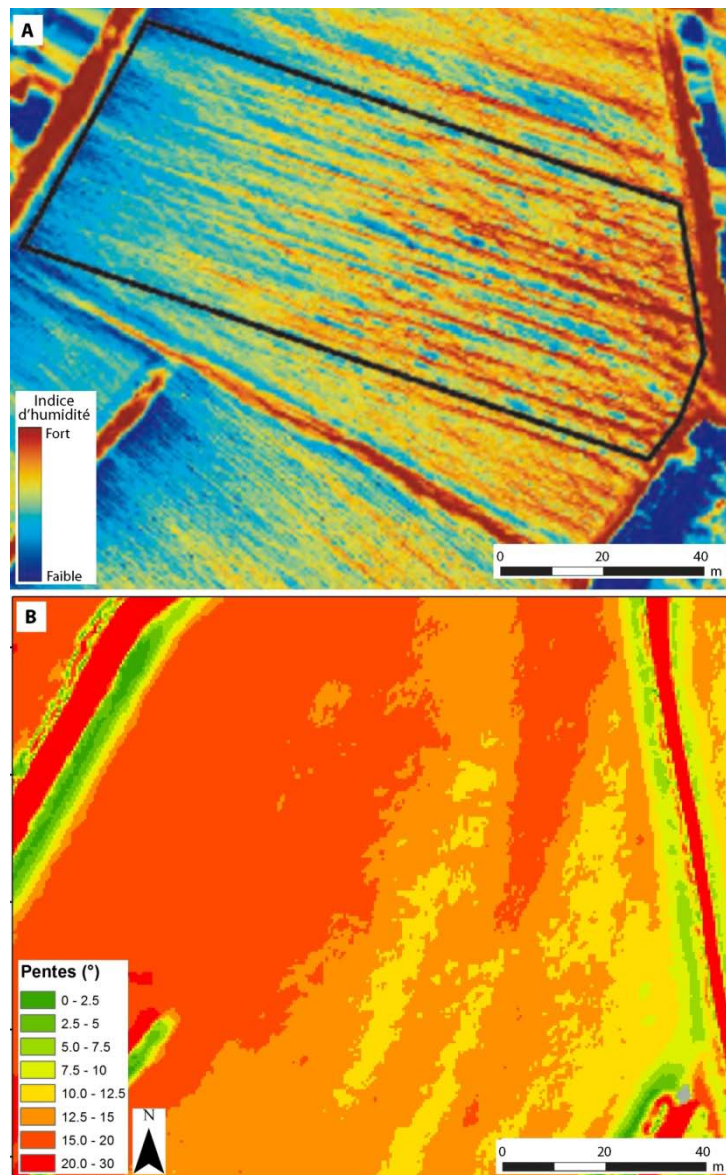


Figure 6.27 Indice topographique d'humidité (A) et carte des pentes (B), calculés à partir du MNT haute résolution (50 cm) acquis par LiDAR sur une parcelle du versant de Couchey (acquisition LiDAR, pôle géomatique de la MSH de Dijon, 2009).

Cette compaction des sols a également une influence sur l'activité biologique des sols, car ces zones compactes vont limiter la propagation des vers de terre dans le sol. Ces derniers ayant un rôle majeur sur la formation d'agrégats et la circulation des fluides, une diminution des lombrics conduit à une dégradation de la structure du sol. Les travaux de thèse de Coll (2011) ont démontré que les pratiques culturales avaient une influence sur la population lombricienne des sols. Les diminutions de population de lombrics s'expliquent par les labours profonds, le tassement résultant des passages des engins agricoles. De plus, cette compaction pose de sérieux problèmes d'enracinement et d'alternance d'asphyxie ou de sécheresse (Carbonneau *et al.*, 2007). Ces caractéristiques conduisent, dans certains cas, à la mise en place de formes d'hydromorphie dans les sols dès la surface (Figure 6.28). Celles-ci, observées dans l'horizon de surface où se développe le système racinaire de la vigne, peuvent entraîner le pourrissement des racines et entraver le développement racinaire. De plus, les conditions d'anaérobie présentes au sein de ces zones réduites conduisent à diminuer l'activité biologique du sol.



Figure 6.28 Calcosol leptique situé sur la partie amont du versant d'Aloxe-Corton. La parcelle est non travaillée et présente en surface un paillage d'écorces de pin. L'horizon de subsurface compacté (3-15cm) présente de nombreuses zones de réduction.

6.3.2 Travaux de préparation avant plantation

La mécanisation de l'entretien du vignoble a conduit certains viticulteurs à effectuer des travaux de préparation de sol avant plantation, qui amènent à une destruction irréversible de la roche mère et à une déstructuration totale du sol. Ces travaux sont principalement effectués sur des sols peu épais, issus de l'altération de substrat calcaire peu fracturé. L'opération consiste à enlever la terre végétale de la parcelle afin d'atteindre le substrat calcaire. Celui-ci, dégagé, est concassé pour être, par

la suite, broyé. Une fois cette opération réalisée, la terre végétale stockée est redistribuée sur l'ensemble de la parcelle. Ces travaux sont généralement réalisés à l'échelle de la parcelle, voire sur une partie entière de versant (Figure 6.29). Ces pratiques destructrices modifient complètement les propriétés du sol. En effet, celui-ci est complètement déstructuré, les horizons pédologiques sont mélangés, et les concentrations en calcaires actifs sont augmentées du fait que la roche ait été broyée. Ces pratiques, qui ne sont pas généralisées à l'ensemble du vignoble, sont pourtant réglementées par les décrets relatifs aux appellations d'origine contrôlée. Ces derniers stipulent que « *Seuls sont autorisés les aménagements ou travaux avant plantation de vignes qui n'entraînent pas de modification substantielle de la topographie, du sous-sol, de la couche arable ou des éléments structurant le paysage d'une parcelle de l'aire délimitée* » (Extrait du décret 2009-1270 relatif aux AOC, Chapitre I, VI, 2°, c). Ces pratiques sont préjudiciables et peuvent entraîner pour la parcelle un possible déclassement de l'AOC.

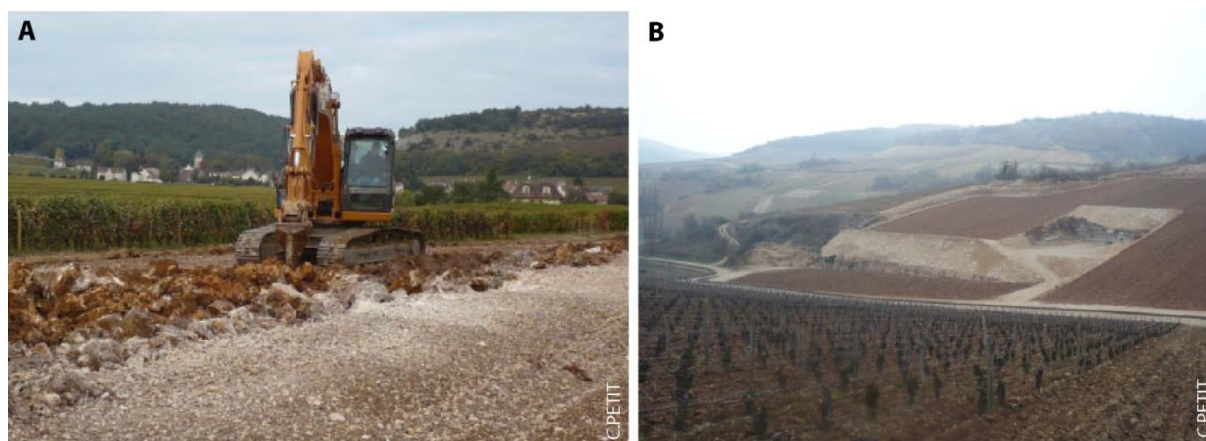


Figure 6.29 Sous-solage et broyage du substrat en Côte de Nuits (A) et remodelage drastique d'un versant situé en Côte de Beaune (B) (Photo d'après Petit et al., 2012).

La mécanisation du vignoble, depuis les années 1950, a conduit à une dégradation des sols viticoles. Le poids des machines entraîne un tassement du sol qui va influencer les propriétés physico-chimiques des sols. La fermeture de la porosité, liée au tassement, rend les sols plus sensibles à l'érosion, car les propriétés d'infiltration diminuent. L'activité biologique qui joue un rôle majeur sur la structuration des sols, et donc sur leur stabilité, est également affectée, car elle diminue avec le tassement du sol. Enfin, la compaction des sols peut entraîner, dans certains cas, des phénomènes d'hydromorphie qui vont être néfastes pour le développement racinaire et pour l'activité biologique des sols. Les travaux de préparation de parcelle déstructurent donc de façon irréversible le sol et le substrat géologique ; ils contribuent à modifier les propriétés physico-chimiques des sols, qui peuvent être néfastes pour la culture de la vigne.

6.4 Conclusion

Les sols viticoles de versant sont soumis depuis plus de deux millénaires à des activités anthropiques. Ces dernières, de natures variées, *i.e.* occupations du sol diverses, extraction de matériaux, culture de la vigne, ont conduit à des modifications des caractéristiques physico-chimiques des sols. Ces activités peuvent être observées à différentes échelles spatiales et temporelles, de l'échelle du versant à l'échelle intra-parcellaire, et de l'échelle du millénaire jusqu'à l'échelle pluri-décennale voire annuelle.

Ces activités anthropiques peuvent avoir des effets bénéfiques pour la vigne (micro-climat, porosité plus importante du sol), ou néfastes (compaction, érosion). Elles peuvent présenter un impact modéré sur les sols, mais aussi un fort impact qui va complètement dénaturer le sol. Certaines de ces activités, comme les apports de terre, le remblaiement de carrières ou de gravières, auront un effet peu marqué sur le sol, si elles sont réalisées avec des matériaux autochtones. À l'inverse, si les apports sont exogènes, les propriétés du sol pourront être, dans certains cas, très différentes de celles des parcelles voisines. Certaines de ces activités ont conduit à des modifications irréversibles du sol, comme la présence d'anciennes carrières. D'autres peuvent être contrôlées (choix de pratiques culturales adaptées pour limiter la compaction du sol), voire effacées (extraction des apports de terre exogènes).

Ces nombreuses activités anthropiques anciennes ou récentes montrent que l'homme a depuis toujours contribué à modifier les sols viticoles de versant. L'homme, depuis plus de deux mille ans, contribue à la construction des sols des terroirs de la Côte.

**Synthèse de la troisième partie « Diversité des
sols à l'échelle de la parcelle : facteurs
naturels et anthropiques »**

Synthèse de la troisième partie « Diversité des sols à l'échelle parcellaire : facteurs naturels et anthropiques »

À l'échelle parcellaire, les diverses investigations menées ont mis en évidence un contrôle multifactoriel de la diversité des sols viticoles. En effet, celle-ci se trouve à la fois sous l'influence de facteurs naturels (le substrat géologique et la topographie) et de facteurs anthropiques (occupation du sol, pratiques culturales). Cette diversité des propriétés physico-chimiques à l'échelle locale aura également un impact sur la dégradation des sols causée par l'érosion hydrique.

Facteurs contrôlant la diversité des sols à l'échelle de la parcelle

Les variations lithologiques, observées à l'échelle du versant, peuvent se produire au sein même d'une parcelle. Nous montrons que ces variations intra-parcellaires du substrat géologique conduisent à diversifier les sols à l'échelle locale. Cette diversité s'exprime par des variations d'épaisseur des sols et de leurs propriétés physico-chimiques. Les sols formés sur substrat marneux sont généralement pachiques alors qu'ils présentent des épaisseurs plus faibles sur les formations calcaires. Nous observons également que les variations des faciès des formations calcaires sur la Côte, présentant des aptitudes à l'altération différentes, conduisent aussi à une diversification des types de sol. La nature chimique et minéralogique de la roche confère aux sols des propriétés spécifiques. Cette diversité s'exprime également par l'influence de formations superficielles. Celles-ci, localement distribuées dans l'espace, ne sont généralement pas cartographiées sur les cartes à moyennes et petites échelles, alors que la nature de ces formations allochtones ou autochtones, et leur épaisseur conduisent à la formation de types de sol particuliers (exemple des Calcisols pachiques rédoxiques sur argiles à chailles). Comme le souligne Marre (2013), ces caractéristiques créent des conditions agroviticoles particulières, d'où la nécessité d'étudier les sols et le substrat à haute résolution spatiale. Ces formations superficielles peuvent être bénéfiques pour les sols. Ainsi, la présence d'éléments lithiques confère au sol un bon drainage par la fissuration créée entre les éléments grossiers et la matrice fine, notamment dans les parties aval des versants où le régime hydrique est excédentaire (exemple des cônes de déjection). Ces sols viticoles formés par des facteurs naturels au cours du temps ont également été façonnés par l'homme depuis plus de 2000 ans.

Les activités anthropiques passées et actuelles ont contribué et contribuent toujours à diversifier les sols viticoles (Tableau S-3), mais l'impact de ces activités humaines n'est pas homogène sur toute la Côte. Certaines ont été observées très localement (occupation de site d'habitation, anciennes carrières d'exploitation de pierres ou de graviers), alors que d'autres l'ont été sur la quasi-totalité des sols de la Côte (apports de terre, tassement du sol). De même, leur impact sur le sol sera plus ou moins important. Certaines contribuent juste à des variations d'épaisseur du sol

(apports de terre), d'autres vont complètement modifier les propriétés physico-chimiques des sols (extraction de matériau, préparation de parcelle par broyage de la roche mère). Enfin, certaines activités vont avoir un impact indirect sur la diversité des sols, en influençant la dégradation des sols à l'échelle de la Côte (mécanisation de l'entretien du vignoble, remembrement parcellaire, structuration du vignoble).

Facteurs anthropiques	Échelle spatiale	Réurrence sur la Côte	Impact sur le sol
Occupation habitat	Intraparcellaire	Très faible	Anthroposol, épaisseur réduite
Exploitation matériaux	Intra et interparcellaire	Faible	Anthroposol
Structuration du vignoble	Interparcellaire	Forte	Contrôle l'érosion hydrique, variation d'épaisseur amont/aval
Remembrement parcellaire	Intraparcellaire	Modérée (pentes)	Contrôle en partie l'érosion hydrique
Apports de terre	Intraparcellaire	-	Propriétés physico-chimiques
Mécanisation	Intraparcellaire	Très Forte	Contrôle l'érosion hydrique, dégradation structurale
Préparation de parcelle	Intraparcellaire	Faible	Anthroposol, destruction du substrat géologique

Tableau S-3 Tableau de synthèse illustrant les divers facteurs anthropiques observés et leurs impacts sur la diversité des sols viticoles de versant.

Cette diversité pédologique intra-parcellaire conduit à des caractéristiques spécifiques locales qui ont une influence sur le développement de la vigne. La caractérisation de la variabilité intra-parcellaire du sol pourrait être utilisée pour attribuer, à chaque zone, un itinéraire cultural spécifique, dans le cadre d'une viticulture de précision. Comme le souligne Milhade *et al.* (2013) une bonne gestion de la variabilité parcellaire contribue à améliorer la qualité finale du vin. Bien que le sol soit initialement formé par des processus naturels, l'impact de l'homme contribue fortement à la diversification des sols viticoles de la Côte. Ces derniers participant, en partie, à définir les différents terroirs de la Côte, l'expression de leur diversité ne peut être réduite à la seule influence de facteurs naturels. Les sols viticoles de la Côte peuvent être alors perçus comme « *la résultante de la modification par les racines et par les techniques culturales les mieux appropriées à la croissance optimale de la vigne et à la qualité optimale du produit, d'un sol naturel choisi en fonction de critères écologiques, géographiques et économiques* » (Delmas, 1971).

La dégradation des sols à l'échelle parcellaire

Les sols viticoles de la Côte, principalement localisés en contexte de versant, sont soumis à d'importantes dégradations, causées par l'érosion hydrique. Cette dégradation se marque par un transport d'éléments arrachés du sol de la partie amont vers l'aval de la parcelle, voire en dehors de la parcelle. Les investigations menées montrent que l'érosion hydrique sur la Côte est contrôlée par des interactions complexes entre des facteurs naturels et des facteurs anthropiques, liées aux activités humaines actuelles et passées.

La caractérisation de l'érosion hydrique sur diverses parcelles de la Côte a mis en évidence l'impact des facteurs naturels sur la distribution spatiale et sur l'intensité de l'érosion. En premier lieu, la topographie joue un rôle majeur sur les processus de dégradation physique des sols, comme favoriser l'érosion dans le cas des pentes fortes. Néanmoins, les fines variations topographiques observées à l'échelle de quelques mètres peuvent contribuer à diminuer l'érosion, à l'échelle locale (Exemples des parcelles de Monthelie « Les Mandènes », ou de Couchey « Champs-Perdrix »). Ces fines variations topographiques sont liées aux variations lithologiques, telles que les bancs calcaires. Ces observations sont cohérentes avec les études réalisées sur l'érosion hydrique des sols viticoles (Brenot, 2007 ; Fox and Bryan, 2000). Nous avons observé que l'influence du substrat s'exprime également sur l'érosion des sols par la présence d'éléments lithiques en surface, qui contribue à diminuer l'érosion. Les secteurs présentant une pierrosité de surface importante sont moins érodés que les secteurs où le pavage de surface est moindre. Ces caractéristiques sont conformes aux observations faites par Poesen et Lavee (1994) & Martínez-Zavala et Jordán (2008), qui ont démontré que la pierrosité de surface améliore l'infiltration de l'eau dans le sol, protège les sols de l'effet splash et diminue l'intensité du ruissellement du fait d'une rugosité plus importante. De plus, nous avons observé que cette protection du sol par la pierrosité de surface est effective uniquement pour des clastes de tailles importantes, *i.e.* les cailloux, les blocs. Pour la formation superficielle dite des grèzes litées, dont la pierrosité est importante mais constituée principalement de graviers, la faible cohésion des éléments lithiques rend ces sols très vulnérables aux dégradations causées par l'érosion (Exemple de la parcelle de Couchey « Champs-Perdrix »).

Ces facteurs naturels sont combinés avec des facteurs anthropiques résultant des activités humaines actuelles et passées. L'étude de diverses parcelles a permis de mettre en évidence l'impact des pratiques culturales actuelles sur l'érosion des sols. L'entretien motorisé de la vigne par des tracteurs enjambeurs depuis les années 1950 sur la Côte contribue à un tassement des inter-rangs, qui provoque une diminution de la porosité, de l'infiltration de l'eau et favorise ainsi le ruissellement pour ces zones spécifiques (Exemples des parcelles de Monthelie « Les Hauts-Bruns », ou de Couchey « Champs-Perdrix »). Ces impacts, de la mécanisation du vignoble sur l'érosion des sols, ont été abordés dans diverses études qui confirment nos observations (Lagacherie *et al.*, 2006 ;

Blavet *et al.*, 2009 ; García-Ruiz, 2010). Nous avons également pu mettre en évidence que le changement des pratiques culturales peut avoir une influence significative sur l'intensité de l'érosion ; le passage d'un entretien du sol, par désherbage chimique intégral à un griffage superficiel du sol, conduit à une nette augmentation de l'érosion (Exemples de la parcelle de Monthelie « Les Hauts-Bruns »). De plus, l'impact des anciennes occupations du sol sur l'érosion actuelle a pu être mis en évidence. La structuration du parcellaire, au cours des deux derniers siècles, contrôle en partie la distribution et l'intensité de l'érosion actuelle des sols viticoles (Exemples des parcelles de Monthelie « Les Hauts-Bruns », ou de Pernand-Vergelesses « En Charlemagne »). L'impact de ces pratiques anciennes sur l'érosion actuelle est jusqu'à ce jour peu documenté à l'échelle parcellaire (Chartin *et al.*, 2013). Ces observations, bien que locales, ont pu être menées sur quatre secteurs de la Côte pour lesquels nous disposons de cartes d'érosion, mettant ainsi en évidence l'importance de l'occupation ancienne du sol sur le contrôle de l'érosion (Couchey, Vosne-Romanée, Pernand-Vergelesses, Monthelie).

L'érosion ayant des répercussions économiques (« reterrage » des parcelles, apports de nutriments), environnementales (pollution des eaux par l'entraînement et la concentration des produits phytosanitaires dans les parties aval) et sur la qualité des sols (diminution de l'épaisseur du sol, épuisement des particules fines), celle-ci peut avoir sur le long terme un impact sur la production viticole et la qualité du raisin., et ce, d'autant que dans un contexte de réchauffement climatique, où les événements météorologiques intenses (fortes pluies, orages) sont de plus en plus fréquents, l'identification des facteurs qui contrôlent l'érosion sur les versants est primordiale pour pouvoir proposer des solutions adaptées à la préservation des sols viticoles.

Discussion générale et conclusions

Discussion générale et conclusions

L'objectif principal de ce travail a été d'évaluer le potentiel de l'imagerie comme outil d'aide à la cartographie pédologique à haute résolution sur la Côte viticole bourguignonne. Cette donnée cartographique a été utilisée pour mener une réflexion sur le modèle spatial d'organisation des sols viticoles de versant et pour identifier les facteurs qui contrôlent la diversité de ceux-ci.

La méthode cartographique

La méthode cartographique, utilisée dans ce travail, est basée sur une approche interdisciplinaire afin d'identifier l'ensemble des facteurs qui contrôle la diversité des sols viticoles de versant. Les cartographies ont été réalisées par une caractérisation à haute résolution spatiale du milieu où l'acquisition des données s'est faite de façon « pseudo-continue » dans l'espace.

Les données de télédétection par imagerie ont été acquises à très haute résolution spatiale (THRS), de l'ordre du centimètre, permettant ainsi d'identifier les variations des propriétés physico-chimiques du sol et du substrat. Ce choix de la THRS est cohérent avec le contexte de la Côte, car les facteurs qui contrôlent les sols évoluent sur de courtes distances comme l'ont démontré les travaux de Mériaux *et al.* (1981). De plus, dans ce contexte de culture pérenne, où la végétation (ceps de vigne) est omniprésente, la THRS permet de s'affranchir des composantes « hors sol ». Les données post-traitement caractérisent uniquement les états de surface du sol. Ainsi, la THRS permet de s'affranchir de l'effet « mixel », dont le comportement spectral est issu de la composition spectrale de divers objets (Girard et Girard, 2010). Enfin, à cette résolution spatiale, peuvent être déterminées les composantes qui constituent les états de surface, telles que la pierrosité de surface et la couleur de la matrice. Ces dernières donnent des informations sur le type de sol et/ou de substrat sous-jacent. Ces caractéristiques sont conformes aux études antérieures réalisées en contexte viticole, où la THRS, dans le domaine spectral du visible, a été utilisée pour reconnaître les états de surface du sol à intérêt hydrologique (Corbane *et al.*, 2008 ; Wassenaar *et al.*, 2005).

Ces données THRS ont été acquises de façon « pseudo-continue » dans l'espace afin d'évaluer la distribution spatiale des propriétés du sol et/ou du substrat. Nous avons pu définir avec précision les limites des unités cartographiques de sols (UCS), car les variations des propriétés du sol et/ou du substrat sont rapides, et peuvent être observées à l'échelle de quelques mètres. Les techniques de télédétection acquièrent des données capables de segmenter le paysage en unités homogènes, ces dernières étant dépendantes de la résolution spatiale d'acquisition des données (Mulder *et al.*, 2011). Cependant, les observations faites sur les versants de la Côte ont montré que les limites des UCS

définies par télédétection ne correspondent pas systématiquement à un changement de type de sol. Il est donc nécessaire d'intégrer d'autres variables comme les variations topographiques et géologiques. Les diverses formations géologiques, identifiées à partir de la tomographie électrique et des modèles numériques de terrain, ont permis de préciser les limites des UCS observées par télédétection. Cette nécessité s'explique par le fait que le substrat et la topographie jouent un rôle majeur dans la formation des sols de la Côte (Mériaux *et al.*, 1981). Le croisement de l'ensemble des données a abouti à une délimitation précise des UCS. Cette spatialisation de la donnée « pseudo-continue » confère une vue synoptique et améliore ainsi la précision des limites des UCS (Manchanda *et al.*, 2002). Cette démarche cartographique, basée sur une approche qualitative du sol et du substrat par imagerie, se situe à la frontière entre les méthodes cartographiques conventionnelles où les limites des UCS sont définies empiriquement par le pédologue, et la méthode de cartographie numérique des sols (Digital Soil Mapping) où les limites le sont à partir de données quantitatives par des méthodes géostatistiques et des algorithmes d'inférence (Lagacherie et McBratney, 2006). Les UCS, précisément délimitées, couplées avec des observations locales du sol, permettent d'évaluer la distribution spatiale de ces propriétés de façon quantitative. Ainsi, cette méthode permet d'obtenir une caractérisation des sols au niveau de la « série de sol » (National Cooperative Soil Survey, 1999). Il en résulte que chaque UCS peut être caractérisée par des propriétés agroviticoles particulières, qui peuvent être définies comme des unités fonctionnelles du sol.

Ces cartes répondent donc de manière satisfaisante aux besoins d'une viticulture de précision, pour laquelle la caractérisation des propriétés qui composent le milieu doit être effectuée à grande échelle. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'organisation spatiale des sols sur les versants de la Côte, e.g. le modèle de topolithoséquence. Les cartes produites peuvent être qualifiées de secteurs de référence, puisqu'elles correspondent aux méthodes décrites par Favrot (1989), e.g. une cartographie à haute résolution spatiale d'une aire échantillon représentative d'une petite région. Ces secteurs de référence, cartographiés sur de petits espaces géographiques, pourraient alors être utilisés pour réaliser une cartographie sur une étendue plus vaste. L'utilisation de la méthode des secteurs de référence en contexte viticole a déjà été réalisée sur les vignobles de Cognac (Cam *et al.*, 2003), où les résultats ont été positifs et où la méthode a fait preuve de son efficacité. De plus, des investigations menées à l'échelle parcellaire sur ce secteur de référence pourraient être réalisées afin de caractériser diverses aptitudes du sol (aléas à l'érosion, estimation de la réserve utile en eau, etc.) pour chaque UCS et pourraient alors être généralisées aux UCS sur des zones plus vastes, au niveau de la « série de sol ». Cette démarche appliquée sur la Côte pourrait alors aboutir à une cartographie à grande échelle d'aires d'appellation. La mise à disposition aux viticulteurs de ces cartes leur permettrait d'appliquer des

itinéraires culturels adaptés aux propriétés du sol, comme le proposent les travaux réalisés sur les terroirs du Val de Loire, par l'application web « e-terroir²⁶ » (Goulet et Rioux, 2006).

Diversité des sols de la Côte

L'ensemble des investigations menées dans cette étude a mis en évidence la faible diversité des sols de la Côte, si l'on caractérise ceux-ci par leurs « références²⁷ », issues du Référentiel Pédologique français (Baize et Girard, 2008). Sur les secteurs investigués, les sols sont tous qualifiés de « sols calcimagnésiens » (Rendosols, Calcosols, Calcisols). Pour d'autres régions viticoles, cette diversité est plus marquée mais reste limitée, comme sur les terroirs de Pouilly-Fuissé (5 références de sol) (Sigales, 2010), sur les terroirs de Genève (8 références de sol) (Dakhel *et al.*, 2007) ou encore sur les terroirs de Saint-Émilion (7 références de sol) (Van Leeuwen *et al.*, 1989). Néanmoins, cette observation pour la Côte reste discutable, puisque les secteurs d'étude sont situés sur de petites portions de versant qui ne prennent pas en compte la variabilité pédologique au débouché des combes, qui est plus importante, comme l'ont démontré les travaux de Chrétien (1996). Cette plus faible diversité pédologique peut également s'expliquer par les faibles variations lithologiques observées sur la Côte, composées uniquement de calcaires et de marnes. Au niveau de la « série de sol », la diversité des sols de la Côte s'exprime davantage. Les trois références de sol observées ont été cartographiées en 15 UCS, en prenant en compte les variations d'épaisseur, de texture, de substrat et la présence d'hydromorphie, lesquelles sont systématiquement retenues dans les études de terroir, induisant un plus grand nombre d'UCS déterminé. Pour l'étude des terroirs de Saint-Émilion, les 7 références de sol identifiées ont été cartographiées en 14 UCS ; pour la carte de l'appellation Pouilly-Fuissé, les 5 références de sol ont été cartographiées en 15 UCS (Van Leeuwen *et al.*, 1989 ; Sigales, 2010). Il est important de caractériser ces propriétés, car elles jouent un rôle majeur sur la réserve utile en eau du sol. Cette dernière a, en effet, été reconnue comme la variable édaphique la plus importante influençant la production de la vigne et la qualité du raisin (Van Leeuwen et Vivin, 2008). Cette diversité des sols viticoles sur la Côte résulte de l'interaction de divers facteurs naturels et anthropiques au cours du temps.

Aujourd'hui, on peut donc se demander quelle est la part respective de chaque facteur sur la diversité des sols que l'on observe actuellement. Les diverses investigations menées dans le cadre de cette thèse ont démontré que la diversité des sols viticoles de la Côte est dépendante de l'*échelle*

²⁶ Application accessible à l'adresse suivante : <http://www.carto-techniloire.com/>

²⁷ Références : Catégories typologiques de plus haut niveau, définies, le plus souvent, par des solums diagnostiques, c'est-à-dire par des séquences verticales d'horizons replacées dans leur pédopaysage (Baize, 2004).

spatiale à laquelle ceux-ci sont observés, et que les facteurs qui contrôlent cette diversité ont eu, ou ont, une action pour diverses **échelles temporelles**.

Sur les trois transects étudiés à l'**échelle du versant**, la diversité des sols est contrôlée par le substrat géologique et par les variations topographiques, suivant un modèle de topolithoséquence. Ce modèle observé sur les sites étudiés est conforme aux observations faites dans les travaux de Blaquièrre (1967) et de Mériaux *et al.* (1981), sur divers secteurs de la Côte. Cette diversification des sols s'est effectuée sur le **temps long**, à l'échelle de plusieurs milliers à dizaines de milliers d'années. À **moyen terme**, à l'échelle du millier d'années, la mise en culture de la vigne a conduit à une dégradation physique du sol sous l'action de l'érosion hydrique, qui a conduit l'homme, depuis des siècles, à pratiquer des apports de terre. Cette action de l'homme, pratiquée depuis le Moyen-Âge (Garcia, 2010), a été nécessaire pour préserver le sol viticole, étant donné que l'écart entre les vitesses de formation du sol et les vitesses d'érosion est d'un facteur 10 (Montgomery, 2007). L'érosion redistribue les fractions fines, e.g. les argiles, des parties amont pour les déposer dans les parties aval, ou en dehors des parcelles, contribuant à diversifier les propriétés du sol. Cette dégradation des sols s'effectuant sur les zones de fort relief, on peut poser l'hypothèse que la diversité des sols de ces zones est plus marquée par les facteurs anthropiques que celle des sols situés dans les zones non exposées à l'érosion. L'impact de l'homme, à l'échelle du versant, reste toutefois très difficilement perceptible, puisque les pratiques culturelles réalisées depuis plusieurs siècles tendent à effacer ces actions humaines anciennes.

À l'**échelle de la parcelle** et au niveau de la « série de sol », la diversité des sols est plus importante, et est contrôlée à la fois par des facteurs naturels, précédemment cités, et par des facteurs anthropiques. À **moyen terme**, les pratiques culturelles historiques ont contribué à diversifier les sols des parcelles, par les apports de terre exogènes, et par la structuration du parcellaire qui contrôle en partie la distribution spatiale et l'intensité de l'érosion hydrique. Le sol présente donc une certaine résilience des pratiques culturelles historiques. Celle-ci a également été observée dans d'autres systèmes culturels (Chartin *et al.*, 2013), mais jamais en contexte viticole. À **court terme**, à l'échelle de plusieurs dizaines d'années, l'introduction de la mécanisation pour l'entretien du vignoble a provoqué une dégradation des sols, par l'érosion hydrique, contribuant à modifier les propriétés physico-chimiques à l'échelle locale. Cette caractéristique a déjà été mise en évidence par diverses études conduites en secteur viticole (Le Bissonnais et Andrieux, 2006 ; Quiquerez *et al.*, 2008). Il est également reconnu que ces pratiques ont une influence sur la dégradation chimique et biologique des sols (Gaviglio, 2013). Cette diversification des sols se marque également lors d'événements météorologiques extrêmes, à l'**échelle de quelques minutes à quelques heures**, où des pertes considérables de terre sont observées, liées à l'érosion hydrique. Ces modifications des propriétés physico-chimiques du sol conduisent à diminuer la productivité des sols sur le long terme (Schumacher *et al.*, 1999). La diversité des sols viticoles de la Côte est donc la résultante de divers facteurs naturels et anthropiques qui ont conduit à modifier les sols au cours du temps.

Il apparaît que la diversité des sols viticoles de la Côte résulte en partie de l'héritage des pratiques culturelles passées. L'homme a participé, et participe encore à ce jour, à la construction des terroirs de la Côte, à travers son action sur la diversité des sols. La dégradation du sol, liée à l'entretien mécanique du sol, s'accroît aujourd'hui du fait de changements climatiques qui contribuent à augmenter l'érosion sur les versants viticoles. Dans ce contexte, il est donc nécessaire de préserver ce patrimoine sol qui représente un paramètre important pour caractériser les terroirs viticoles de la Côte.

Bibliographie

Bibliographie

- Abrams, M., Hook, S.J., 1995. Simulated Aster data for geologic studies. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans. On* 33, 692–699.
- Abu-Hassanein, Z., Benson, C., Blotz, L., 1996. Electrical Resistivity of Compacted Clays. *J. Geotech. Eng.* 122, 397–406.
- Adam, J.P., 2011. *La construction romaine – Matériaux et techniques*. Editions A&J Picard, 367 p.
- Agafonoff, V.K., 1936. Les sols de France au point de vue pédologique : avec la carte schématique pédologique de France à l'échelle 1:2 500 000. Dunod, 154 p.
- Agreste Bourgogne, 2002. *La viticulture en Bourgogne : Progression des surfaces en vigne et mécanisation (No. 43)*. Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt de Bourgogne, 4 p.
- Albergel, J., Ribstein, P., Valentin, C., 1986. L'infiltration, quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. In: *Journées Hydrologiques de l'ORSTOM*. ORSTOM ed., Montpellier, 25–28.
- André, F., van Leeuwen, C., Saussez, S., Van Durmen, R., Bogaert, P., Moghadas, D., de Rességuier, L., Delvaux, B., Vereecken, H., Lambot, S., 2012. High-resolution imaging of a vineyard in south of France using ground-penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography. *J. Appl. Geophys.* 78, 113–122.
- Andrenelli, M.C., Magini, S., Pellegrini, S., Perria, R., Vignozzi, N., Costantini, E.A.C., 2013. The use of the ARP© system to reduce the costs of soil survey for precision viticulture. *J. Appl. Geophys.* 99, 24–34.
- Archie, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics (Technical report). *Trans. AM. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.* 146, 54-62.
- Arnoux, C., 1728, réed. 1978. *Dissertation sur la situation de la Bourgogne : sur les vins qu'elle produit, sur la manière de cultiver les vignes, de faire le vin et de l'éprouver...* Impr. réunies de Senlis, 55 p.
- Baize, D., 2000. *Guide des analyses en pédologie. Choix, expression, présentation, interprétation*. INRA, 257 p.
- Baize, D., 2004. *Petit lexique de pédologie*. INRA, 271 p.
- Baize, D., Girard, M.C., 2008. *Référentiel pédologique 2008, Savoir-faire*. Quae éd., 480 p.
- Ball, G.H., Hall, D.J., 1965. *Isodata, a Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification*. Stanford Research Institute, 61 p.
- Balsam, W.L., Damuth, J.E., Schneider, R.R., 1997. Comparison of shipboard vs. shore-based spectral data from amazon fan cores: implications for interpreting sediment composition. *Ocean Drill. Program Sci.* 155, 193–215.
- Barker, R., 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four electrode arrays. *GEOPHYSICS* 54, 1031–1037.

- Barnes, E.M., Baker, M.G., 2000. Multispectral data for mapping soil texture: possibilities and limitations. *Appl. Eng. Agric.* 16, 731–741.
- Bartholomeus, H., Epema, G., Schaepman, M., 2007. Determining iron content in Mediterranean soils in partly vegetated areas, using spectral reflectance and imaging spectroscopy. *Adv. Airborne Electromagn. Remote Sens. Agro-Ecosyst.* 9, 194–203.
- Beck, P., Duthu, J.L., 1999. Le clos de Chenôve : la cuverie et les pressoirs des ducs de Bourgogne histoire, archéologie, ethnologie (XIIIe-XXe siècle). *Faton éd.*, 62 p.
- Bel, B., 1955. Les sols de Nuits-Saint-Georges. *Ann. Agron. INRA* 6° année, 385–421.
- Berthier, L., Pitres, J.-C., Vaudour, E., 2008. Prédiction spatiale des teneurs en carbone organique des sols par spectroscopie de terrain visible-proche infrarouge et imagerie satellitale SPOT. Exemple au niveau d'un périmètre d'alimentation en eau potable en Beauce. *Etude Gest. Sols* 15, 213–224.
- Bhadra, S.K., Bhavanarayana, M., 1996. Estimation of soil colour through spectral reflectance characteristics. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 24, 1–10.
- Bizot, J.Y., Campy, M., Vincent, E., 2011. Le vignoble bourguignon, son terroir et ses appellations. *Géologues*, 59–70.
- Blaquière, C., 1967. Contribution à la connaissance des sols et appellations d'origine de deux vignobles blancs de la Côte de Beaune. *Université de Bourgogne, Dijon*, 150 p + Fig.
- Blavet, D., De Noni, G., Le Bissonais, Y., Leonard, M., Maillo, L., Laurent, J.Y., Asseline, J., Leprun, J.C., Arshad, M.A., Roose, E., 2009. Effect of land use and management on the early stages of soil water erosion in French Mediterranean vineyards. *Soil Tillage Res.* 106, 124–136.
- Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Martín-Duque, J.F., Rubiales, J.M., Godfrey, A., Pedraza, J., Carrasco, R.M., Sanz, M.A., 2005. Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. *Catena* 64, 81–102.
- Boiffin, J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. *Institut National Agronomique Paris-Grignon*, 423 p.
- Bonn, F., Rochon, G., 1992. Précis de télédétection. Principes et méthodes. *Presses de l'Université du Québec et l'AUPELF*, 485 p.
- Bottraud, J.C., Bornand, M., Servat, E., 1984. Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. *Sci. Sol* 22, 279–294.
- Boulaine, J., 1966. Sur la précision des cartes pédologiques. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* 4, 3–7.
- Boulaine, J., Signeux, G., 1989. Histoire des pédologues et de la science des sols, *Editions Quae*, 285 p.
- Boulanger-Fassier, S., 2008. La viticulture durable, une démarche en faveur de la pérennisation des territoires français ? *Géocarrefour* 83, 181–190.

- Bourgeon, J.M., 2001. La crise du phylloxéra en Côte-d'Or au travers de la maison Bouchard père et fils. *Cah. d'Histoire de la Vigne et du Vin* 2, 153–170.
- Bourgeon, J.M., Jacquet, O., 2010. Crise du phylloxéra et mutations du paysage. *In* : *Paysages et Patrimoines Viticoles. Rencontres du Clos-Vougeot 2009*. Dijon, 151–162.
- Brenot, J., 2007. Quantification de la dynamique sédimentaire en contexte anthropisé. L'érosion des versants viticoles de Côte d'Or. Université de Bourgogne, Dijon, 318 p.
- Brenot, J., Quiquerez, A., Petit, C., Garcia, J.-P., 2008. Erosion rates and sediment budgets in vineyards at 1-m resolution based on stock unearthing (Burgundy, France). *Geomorphology* 100, 345–355.
- Bresson, L.-M., Valentin, C., 1993. Soil surface crust formation: contribution of micromorphology. *In*: A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys Ed., *Developments in Soil Science* 22. Elsevier, 737–762.
- BRGM, 2003. Cartographie et informations géologiques. Paris, 17 p.
- Brun, J.P., 2005. Archéologie du vin et de l'huile en Gaule romaine. Errance, 268 p.
- Buvat, S., Thiesson, J., Michelin, J., Nicoullaud, B., Bourennane, H., Coquet, Y., Tabbagh, A., 2014. Multi-depth electrical resistivity survey for mapping soil units within two 3 ha plots. *Geoderma* 232–234, 317–327.
- Cam, C., Vital, P., Fort, J.-L., Lagacherie, P., Morlat, R., 2003. Un zonage viticole appliqué, basé sur la méthode des secteurs de référence, en vignoble de Cognac (France). *Etude Gest. Sols* 10, 35–42.
- Campy, M., Macaire, J.J., 1989. Géologie des formations superficielles : géodynamique-faciès-utilisation. Masson, 433 p.
- Carbonneau, A., Deloire, A., Jaillard, B., 2007. La vigne : Physiologie, terroir, culture. Dunod, 441 p.
- Carrara, P.E., Carroll, T.R., 1979. The determination of erosion rates from exposed tree roots in the piceance basin, colorado. *Earth Surf. Process.* 4, 307–317.
- Carre, F., Girard, M.C., 2002. Quantitative mapping of soil types based on regression-kriging of taxonomic distances with landform and land cover attributes. *Geoderma* 110, 241–263.
- Casa, R., Castaldi, F., Pascucci, S., Palombo, A., Pignatti, S., 2013. A comparison of sensor resolution and calibration strategies for soil texture estimation from hyperspectral remote sensing. *Geoderma* 197–198, 17–26.
- Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., Gobin, A., Vacca, A., Quinton, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F.J.P.M., Raclot, D., Ionita, I., Rejman, J., Rousseva, S., Muxart, T., Roxo, M.J., Dostal, T., 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology* 122, 167–177.
- Chabrillat, S., Goetz, A.F., Krosley, L., Olsen, H.W., 2002. Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution. *Remote Sens. Environ.* 82, 431–445.

- Chambers, J., Kuras, O., Meldrum, P., Ogilvy, R., Hollands, J., 2006. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics* 71, B231–B239.
- Chapellier, D., 2000. Prospection électrique de surface. Université de Lausanne, 99 p.
- Chartin, C., Evrard, O., Salvador-Blanes, S., Hinschberger, F., Van Oost, K., Lefèvre, I., Daroussin, J., Macaire, J.-J., 2013. Quantifying and modelling the impact of land consolidation and field borders on soil redistribution in agricultural landscapes (1954–2009). *Catena* 110, 184–195.
- Chevigny, E., Kersaudy, L., Macera, A., Meyer, L., Schoving, C., Quiquerez, A., Journaux, L., Curmi, P., 2014a. Identification des types de sols viticoles par leurs signatures spectrales proche infrarouge traitées par des méthodes non linéaires. 12^e Journées d'Études des Sols. Université de Savoie, Le Bourget-du-Lac, 1-3 juillet 2014, communication poster.
- Chevigny, E., Quiquerez, A., Petit, C., Curmi, P., 2014b. Lithology, landscape structure and management practice changes: key factors patterning vineyard soil erosion at metre-scale spatial resolution. *Catena* 121, 354–364.
- Chevrier, S., Garcia, J.P., 2011. Aux origines de la vigne à Gevrey-Chambertin (Côte-d'Or). *Archéologie en Bourgogne* 23. DRAC Bourgogne, Service régional de l'archéologie, 18 p.
- Chrétien, J., 1996. Carte pédologique de France à 1/100 000. INRA éd., feuille de Beaune n°12.
- Chrétien, J., 2000. Référentiel pédologique de Bourgogne à 1/250 000 : régions naturelles, pédopaysages et sols de la Côte-d'or. INRA éd., 194 p.
- Christen, M., 2004. Gérer durablement ses sols viticoles : enjeux et perspectives. *Vinopôle Bordeaux-Aquitaine*, 8 p.
- Ciry, R., 1953. À propos des limons à chailles de la région de Nuits-Saint-Georges. Présentation au 24^e Congrès de l'association bourguignonne des Sociétés savantes, Dijon, 6 p.
- Coll, P., 2011. Qualité des sols viticoles en Languedoc-Rousillon. Effets des pratiques agricoles. Centre International d'Études Supérieures en Sciences Agronomiques de Montpellier, 270 p.
- Combaud, A., 2008. Terroirs viticoles de la Côte d'Or – Caractérisation physique et historique par un système d'information géographique. Université de Bourgogne, Dijon, 318 p.
- COMIFER, 1993. Glossaire de la fertilisation N-P-K, 18 p.
- Corbane, C., 2006. Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale. Université Montpellier II, 252 p.
- Corbane, C., Jacob, F., Raclot, D., Albergel, J., Andrieux, P., 2012. Multitemporal analysis of hydrological soil surface characteristics using aerial photos: A case study on a Mediterranean vineyard. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 18, 356–367.
- Corbane, C., Raclot, D., Jacob, F., Albergel, J., Andrieux, P., 2008. Remote sensing of soil surface characteristics from a multiscale classification approach. *Catena* 75, 308–318.
- Coudert, O., 2009. Le vignoble de Mercurey : quelle incroyable diversité ! *Rev. Vin de France* 528, 46–49.

- Coulouma, G., Boizard, H., Trotoux, G., Lagacherie, P., Richard, G., 2006. Effect of deep tillage for vineyard establishment on soil structure: A case study in Southern France. *Soil Tillage Res.* 88, 132–143.
- Courault, D., 1989. Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection: analyses spectrales, spatiales et diachroniques. Institut National Agronomique Paris-Grignon, 239 p.
- Courel, L., Arène, J., Feys, R., Gand, G., Menot, J.C., Cornet, J., Guillaumet, J.P., 1989. Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000 - Le Creusot - n°552, BRGM éd., 54 p.
- Cousin, I., Besson, A., Bourennane, H., Pasquier, C., Nicoullaud, B., King, D., Richard, G., 2009. From spatial-continuous electrical resistivity measurements to the soil hydraulic functioning at the field scale. *Hydrogeophysics* 341, 859–867.
- Dabas, M., 2006. La prospection géophysique. In : *La Prospection*. Coll. Archéologiques, éd. Errance, 248 p.
- Dabas, M., 2008. Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP©. In: *Seeing the Unseen : Geophysics and Landscape Archaeology*. CRC Press, London, 105–126.
- Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, A., Ducomet, G., 1989. Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Sci. Sol* 27, 65–68.
- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Geol. Appl. Digit. Imaging* 27, 1019–1029.
- Dahlin, T., Loke, M., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *J. Appl. Geophys.* 38, 237–249.
- Dakhel, S., Docourt, M., Schwarz, J.-J., Burgos, S., 2007. Étude des terroirs viticoles de Genève, 156 p.
- Delacourt, C., Allemand, P., Jaud, M., Grandjean, P., Deschamps, A., Ammann, J., Cuq, V., Suanez, S., 2009. DRELIO: An Unmanned Helicopter for Imaging Coastal Areas. *J. Coast. Res.* 1489–1493.
- Delmas, J., 1971. Les sols de vignoble. In: *Sciences et Techniques de La Vigne* 1. Paris, 549–616.
- Demoule, J.P., Giligny, F., Lehoërff, A., Schnapp, A., 2009. Guide des méthodes de l'archéologie. Ed. La Découverte, 336 p.
- Dewolf, Y., Bourrié, G., 2008. Les formations superficielles. Genèse – Typologie – Classification – Paysages et environnements – Ressources et risques., Ellipses. éd., Paris, 896 p.
- Dey, A., Morrison, H.F., 1979. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics* 44, 753.
- Dion, R., 1950. Les origines du vignoble bourguignon. *Ann. Économies Sociétés Civilis.* 433–439.
- Dion, R., 1959. Histoire de la vigne et du vin en France des origines au XIXe siècle. Clavreuil, 768 p.
- Drouet, J.-J., 1979. Les séries et les milieux sédimentaires de l'Oxfordien au sud de Dijon : stratigraphie, sédimentologie, géochimie. Université de Bourgogne, Dijon, 116 p.

- Dubois, J., Diament, M., Cogné, J.P., 2011. Géophysique, 4^e éd., Dunod, 272 p.
- Duchaufour, P., 1997. Abrégé de pédologie : sol, végétation, environnement. Masson, 291 p.
- Duda, R.O., Hart, P.E., Stork, D.G., 2000. Pattern Classification. Wiley, 2^{de} éd., 680 p.
- Dumas, F., 2007. Les potentialités viticoles à la lumière des dénominations toponymiques. Cah. d'Histoire de la Vigne et du Vin 7, 9–27.
- Escadafal, R., 1981. Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides. Informatique et traitement des données de sols, Paris, 21–27.
- Escadafal, R., 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Université Paris VI, Etudes et thèses, ORSTOM, Paris.
- Escadafal, R., 1993. Remote sensing of soil color: principles and applications. Remote Sens. Rev. 7, 261–279.
- Escadafal, R., Girard, M.-C., Courault, D., 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of landsat MSS and TM data. Remote Sens. Environ. 27, 37–46.
- Fanet, J., 2008. Les Terroirs du vin. Hachette, 239 p.
- Favrot, J.-C., 1989. Une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle et méthode des secteurs de référence. Science du sol 27, 351–368.
- Fleury, R., Gélard, J.-P., 1982. Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000 - Chagny - n°553. BRGM Editions, 81 p.
- Follain, S., Ciampalini, R., Crabit, A., Coulouma, G., Garnier, F., 2012. Effects of redistribution processes on rock fragment variability within a vineyard topsoil in Mediterranean France. Geomorphology 175–176, 45–53.
- Foucault, A., Raoult, J.F., 2010. Dictionnaire de Géologie, 7^e éd., Dunod, 416 p.
- Foucher, M., 2010. Le Clos de Vougeot ou la notion de limite dans le patrimoine viticole monastique. Revue électronique ED LISIT 491, 5, Thème : Limite/Limites.
- Foucher, M., Garcia, J.-P., 2009. La vigne et la pierre comme matières du paysage viticole de la Côte bourguignonne. In : Rencontres du Clos-Vougeot 2009 - Paysages et patrimoines viticoles, Chaire UNESCO Culture et Tradition du Vin, Ahuy, 219–238.
- Fox, D.M., Bryan, R.B., 2000. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. Catena 38, 211–222.
- Gadille, R., 1967. Le Vignoble de la côte bourguignonne, fondements physiques et humains d'une viticulture de haute qualité. Les Belles Lettres éd., 688 p.
- Galet, P., 2000. Précis de viticulture. 7^e éd., Pierre GALET, 602 p.
- Galletier, E., 1952. Panégyriques latins. Les Belles Lettres éd., Paris, 304 p.

- Garcia, J.-P., 2010. Données nouvelles pour l'histoire de la construction des terroirs viticoles de Bourgogne, cinquante ans après l'oeuvre de Roger Dion. *In: Le Bon Vin Entre Terroir, Savoir-Faire et Savoir-Boire : Actualité de La Pensée de Roger Dion*. 287–303.
- Garcia, J.-P., 2011a. Les *climats* du vignoble de Bourgogne comme patrimoine mondial de l'humanité. Éd. Universitaires de Dijon, 357 p.
- Garcia, J.-P., 2011b. Une vigne gallo-romaine de plaine à Gevrey-Chambertin (Côte-d'Or), I^{er}-II^e s. apr. J.-C.. *Gallia* 68, 93–110.
- Garcia, J.-P., Chevrier, S., Dufraisse, A., Foucher, M., Steinmann, R., 2010. Le vignoble gallo-romain de Gevrey-Chambertin « Au-dessus de Bergis », Côte-d'Or (I^{er}-II^e s. apr. J.-C.) : modes de plantation et de conduite de vignes antiques en Bourgogne. *Rev. Archéologique Est* 59, 505 – 537.
- Garcia, J.-P., Labbé, T., 2012. Diversité naturelle ou diversité culturelle des terroirs viticoles en Bourgogne. *In : Rencontres du Clos Vougeot 2011. Vignes, vins : jeux et enjeux de la diversité*. Centre Georges Chevrier, 107–118.
- Garcia, J.-P., Labbé, T., 2011. Le goût du lieu la mise en place du discours sur la nature des sols comme référence au goût des vins en Bourgogne. *Cah. d'Histoire de la Vigne et du Vin* 11, 146–157.
- Garcia, J.-P., Petit, C., 2005. Terroirs bourguignons 50 millions d'années d'histoire - dossier spécial. *Bourgogne Aujourd'hui* 62, 50–70.
- Garcia, J.-P., Petit, C., Quiquerez, A., 2008. Données nouvelles de datation des substrats du vignoble en Côte de Beaune et en Côte de Nuits : contribution à l'histoire longue des terroirs viticoles. *Cah. d'Histoire de la Vigne et du Vin* 8, 5-11.
- García-Ruiz, J.M., 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena* 81, 1–11.
- Garnier, G., Mareschal, L.-P., 1980. Constitution et origine des formations superficielles du vignoble de Gevrey-Chambertin (Côte-d'Or). Université de Dijon - Institut des Sciences de la Terre, Dijon, 143 p.
- Garrier, G., 1989. Le phylloxéra. Une guerre de trente ans, 1870-1900, Albin Michel éd., Paris, 194 p.
- Gascuel-Oudou, G., Walter, C., Voltz, M., 1993. Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de la cartographie des sols pour l'estimation spatiale. *Sci. Sol* 31, 193–213.
- Gaudant, J., 2009. L'essor de la géologie française : essais. Mines ParisTech, Presses des Mines, 380 p.
- Gauthier, E., Joly, M., 2003. Vignoble et viticulture dans le Centre-Est de la Gaule au I^{er} siècle apr. J.-C. *In: Actualités de La Recherche En Histoire et Archéologie Agraires. Colloque international AGER, Presse universitaires franc-comtoises, Besançon*, 191–208.
- Gaviglio, C., 2013. Gestion des sols viticoles. Éd. France Agricole, 242 p.
- Geotomo software, 2013. User guide of RES2DINV x32 ver.3.71 software with multi-core support. 161 p.

- Giao, P., Chung, S., Kim, D., Tanaka, H., 2003. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *J. Appl. Geophys.* 52, 157–175.
- Girard, M.C., 1995. Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols. Un exemple dans la région de Lodève. *Étude Gest. Sols* 2, 7–24.
- Girard, M.C., Girard, C.M., 2010. Traitement des données de télédétection. Environnement et ressources naturelles. 2^e éd. Dunod, 553 p.
- Goguey, R., 1970. La villa gallo-romaine de Rouvres-en-Plaine : découverte aérienne et fouilles de contrôle, 1966-1967. *Mém. Comm. Antiq. Dép. Côte d'Or* 26, 219–259.
- Gomez, C., Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B., 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma* 146, 403–411.
- Goulet, E., Barbeau, G., 2004. Apports des mesures de résistivité électrique du sol dans les études sur le fonctionnement de la vigne et dans la spatialisation parcellaire. Congrès « Viticultural Terroir Zoning », Cape Town (Afrique du Sud), 176-184.
- Goulet, E., Rioux, D., 2006. Les terroirs viticoles en val de Loire : Cartographie et valorisation. Euroviti, Angers, 45–53.
- GREPPAL, 2005. Entretien des sols viticoles en Alsace et respect de l'environnement. Enjeux et stratégies. Centre Technique Interprofessionnel de la Vigne et du Vin, 46 p.
- Guettard, J.E., Monnet, A.G., 1780. Atlas et description minéralogiques de la France. éd. Didot, Desnos, A. Jombert, 212 p.
- Hall, A., Lamb, D.W., Holzappel, B., Louis, J., 2002. Optical remote sensing applications in viticulture - a review. *Aust. J. Grape Wine Res.* 8, 36–47.
- Hbirkou, C., Pätzold, S., Mahlein, A.-K., Welp, G., 2012. Airborne hyperspectral imaging of spatial soil organic carbon heterogeneity at the field-scale. *Geoderma* 175–176, 21–28.
- Henry, G., 2000. Géophysique des bassins sédimentaires. Technip, 464 p.
- Hinnewinkel, J.C., 2004. Les terroirs viticoles. Origines et Devenirs. Feret éd, 228 p.
- Huygen, M., 1988. Villas gallo-romaines au lieu-dit “La Rente de Mars” à Brognon (Côte d’Or). *Bull. Liaison Dir. Antiq. Hist. Bourgogne* 4, 8 p.
- IUSS Working Group WRB, 2006. World reference base for soil resource 2006. World Soil Resources Reports, 103, 2^{de} éd., FAO, Rome, 128 p.
- Jamagne, M., Bornand, M., Hardy, R., 1989. La carte pédologique de France à 1/100 000. *Sci. Sol* 27, 21–24.
- Jamagne, M., King, D., Girard, M.C., Hardy, R., 1993. Quelques conceptions actuelles sur l'analyse spatiale en pédologie. *Sci. Sol* 31, 141–169.
- Javaux, C., 1992. La plate-forme parisienne et bourguignonne au bathonien terminal et au callovien. Dynamique sédimentaire, séquentielle et diagénétique : place et création des réservoirs potentiels. *EDU : Centre des sciences de la terre, Dijon*, 342 p.

- Jensen, J.R., 1996. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Prentice Hall, 316 p.
- Johnson, C.K., Doran, J.W., Duke, H.R., Wienhold, B.J., Eskridge, K.M., Shanahan, J.F., 2001. Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for Delineating Soil. *Soil Sci Soc Am J* 65, 1829–1837.
- Joly, J., 1968. Une formation quaternaire mal connue : les systèmes de base de corniche. *C R Acad Sc Paris* 266, 559–562.
- Journaux, A., 1976. Les grèzes litées du Châtillonnais. *Bull. Assoc. Fr. Pour l'étude Quat.* 123–138.
- Kalinski, R., Kelly, W., 1993. Estimating Water Content of Soils from Electrical Resistivity. *Geotech. Test. J.* 16, 323–329.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002. Electrical surveying. In: *An Introduction to Geophysical Exploration*. Willey-Blackwell, 183–207.
- Keary, P., Brooks, M., Hill, I., 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3rd éd. Blackwell Science, 262 p.
- Keller, G.V., 1988. Rock and Minearal Properties. In: *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Theory*. SEG Books, 13–52.
- King, D., Jamagne, M., Arrouays, D., Bornand, M., Favrot, J.-C., Hardy, R., Le Bas, C., Stengel, P., 1999. Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. *Etude Gest. Sols* 6, 215–228.
- Krause, A.K., Loughran, R.J., Kalma, J.D., 2003. The use of Caesium-137 to Assess Surface Soil Erosion Status in a Water-Supply Catchment in the Hunter Valley, New South Wales, Australia. *Aust. Geogr. Stud.* 41, 73–84.
- Labbé, T., Garcia, J.P., 2012. Vers la géographie des *climats* actuels : processus de différenciation des crus viticoles dans le baillage de Dijon du XVI^e au XVIII^e siècle. In : *Les climats du vignoble de Bourgogne comme patrimoine mondial de l'humanité*. Éd. Universitaires de Dijon, 159–176.
- Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J.-B., Madeira Netto, J., Robbez-Masson, J.M., 2008. Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements. *Remote Sens. Environ.* 112, 825–835.
- Lagacherie, P., Coulouma, G., Ariagno, P., Virat, P., Boizard, H., Richard, G., 2006. Spatial variability of soil compaction over a vineyard region in relation with soils and cultivation operations. *Geoderma* 134, 207–216.
- Lagacherie, P., Favrot, J.C., 1987. Synthèse générale sur les études de secteurs de référence drainage. *Compagnie Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône Languedoc*. INRA, 146 p.
- Lagacherie, P., McBratney, A.B., 2006. Chapter 1 Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. In: *Developments in Soil Science*. Elsevier, 3–22.
- Landrieu, M.H., Pitiot, S., 2012. *Climats et lieux-dits des grands vignobles de Bourgogne : Atlas et Histoire des Noms de Lieux*. Éd. Jean-Pierre de Monza, 418 p.

- Langandré, A., 2001. Les vigneron de Citeaux dans la Côte de Beaune au Moyen Âge. *Ann. Bourgogne*, 95–101.
- Laroche, B., Richer de Forges, A., 2013. Le programme IGCS. Séminaire IGCS, Rennes.
- Lavalle, J., 1855. Histoire et statistique de la vigne et des grands vins de la Côte-d'Or, par M. J. Lavalle,... avec le concours de MM. Joseph Garnier,... Delarue,... et d'un grand nombre de propriétaires et vigneron... Dusacq, 244 p.
- Le Bissonnais, Y., Andrieux, P., 2006. Impact des modes d'entretien de la vigne sur le ruissellement, l'érosion et la structure des sols. *Prog. Agric. Vitic.* 124, 191–196.
- Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V., Martin, P., 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Surf. Characterisation Soil Eros. Forecast.* 62, 111–124.
- Le Bissonnais, Y., Dubreuil, N., Daroussin, J., Gorce, M., 2004. Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. *Étude Gest. Sols* 11, 307–321.
- Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., Daroussin, J., Institut Français de l'Environnement, 2002. L'érosion hydrique des sols en France. 106 p.
- Le Roy, S., 2008. Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Saône-et-Loire. BRGM/RP-56635-FR, 192 p.
- Le Roy, S., Méjean, A., 2009. Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Jura. BRGM/RP-57419-FR, 163 p.
- Lefebvre, A., 2011. Contribution de la texture pour l'analyse d'images à très haute résolution spatiale. Application à la détection de changement en milieu périurbain. Université Rennes 2 Haute-Bretagne, 284 p.
- Legros, J.P., 1996. Cartographies des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Coll. Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes, 321 p.
- Legros, J.P., Kolbl, O., Falipou, P., 1996. Délimitation d'unités de paysages sur des photographies aériennes. Éléments de réflexion pour la définition d'une méthode de tracé. *Étude Gest. Sols* 3, 113–124.
- Leleux, A., Aurousseau, P., Roudaut, A., 1988. Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre. *Sci. Sol* 26, 29–40.
- Leneuf, N., 1988. Terroirs viticoles en Bourgogne. *Cah. Cent. Études Régionales Bourgogne*, 27–52.
- Lisle, R.J., 2004. Geological Structures and Maps: A Practical Guide. Elsevier Butterworth Heinemann, 106 p.
- Loke, M.H., 2013. Tutorial: 2-D and 3-D electrical resistivity surveys. 173 p.
<http://www.geotomosoft.com>
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion1. *Geophys. Prospect.* 44, 499–523.
- Malet, J.-P., Auzet, A.-V., Maquaire, O., Ambroise, B., Descroix, L., Esteves, M., Vandervaere, J.-P., Truchet, E., 2003. Soil surface characteristics influence on infiltration in black marls:

- application to the Super-Sauze earthflow (southern Alps, France). *Earth Surf. Process. Landf.* 28, 547–564.
- Manchanda, M.L., Kudrat, M., Tiwari, A.K., 2002. Soil survey and mapping using remote sensing. *Trop. Ecol.* 43, 62–74.
- Marescot, L., 2006. Introduction à l'imagerie électrique du sous-sol. *Bull. Société Vaudoise Sci. Nat.* 90, 23–40.
- Marre, A., 2013. Géomorphologie et vignobles de France. *In : Géomorphologie de La France*, Paris, 187–200.
- Martínez-Zavala, L., Jordán, A., 2008. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain. *Soil Use Manag.* 24, 108–117.
- Martinez-Zavala, L., Jordán, A., Bellinfante, N., Gil, J., 2010. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment. *Soil Sci. Plant Nutr.* 56, 95–104.
- Mazac, O., Milena, C., Kelly, W., Landa, Y., 1990. Determination of Hydraulic Conductivities by Surface Geoelectrical Methods. *In: Geotechnical and Environmental Geophysics*. Stanley H. Ward, 125–132.
- McBratney, A., Mendonça Santos, M., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S., Shatar, T.M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293–327.
- Mehra, O.P., Jackson, M.L., 1958. Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. *Clays Clay Miner.* 7, 317–327.
- Menéndez Duarte, R., Wozniak, E., Recondo, C., Cabo, C., Marquínez, J., Fernández, S., 2008. Estimation of surface roughness and stone cover in burnt soils using SAR images. *Fire Eff. Soil Prop.* 74, 264–272.
- Mériaux, S., Chrétien, J., Vermi, P., Leneuf, N., 1981. La Côte viticole. Ses sols et ses crus. *Bull. Sci. Bourgogne* 34, 17–40.
- Michot, D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire. Université Paris 6, Paris, 393 p.
- Milhade, C., Le Moigne, M., Fadaili, E.M., Ben Ghazlen, N., Cerovic, Z.G., 2013. Cartographier la variabilité intraparcellaire de paramètres foliaires d'un vignoble. *Rev. Oenologies* 15–17.
- Millot, G., 1964. *Géologie des argiles*. Masson, 499 p.
- Ministère de l'agriculture et de la pêche, 2008. Plan écophyto 2018 de réduction des usages de pesticides 2008-2018. 20 p. <http://agriculture.gouv.fr>
- Moeys, J., Nicoulaud, B., Dorigny, A., Coquet, Y., Cousin, I., 2006. Cartographie des sols à grande échelle : intégration explicite d'une mesure de résistivité apparente spatialisée à l'expertise pédologique. *Étude Gest. Sols* 13, 269–286.

- Monteiro, A., Lopes, C.M., 2007. Influence of cover crop on water use and performance of vineyard in Mediterranean Portugal. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121, 336–342.
- Montgomery, D.R., 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 13268–13272.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C., 1997. *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press, 378 p.
- Morelot, D., 1831. *Statistique de la vigne dans le département de la Côte-d'Or*, Clea. éd, 286 p.
- Morlat, R., 1989. *Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de moyenne vallée de la Loire*. Université de Bordeaux II U.E.R. institut d'œnologie, 289 p.
- Morlat, R., Guilbault, P., 2001. *Terroirs viticoles: étude et valorisation*. Oenoplurimédia Sarl, 118 p.
- Mulder, V.L., de Bruin, S., Schaepman, M.E., Mayr, T.R., 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma* 162, 1–19.
- Musy, A., Higy, C., 2004. *Hydrologie: Une science de la nature*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 314 p.
- Nanni, M.R., Demattê, J.A.M., 2006. Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. *Soil Sci Soc Am J* 70, 393–407.
- National Cooperative Soil Survey, 1999. *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2nd ed., United States Department of Agriculture & Natural Ressources Conservation Service, 871 p.
- Nicklès, M., 1969. Le Service de la Carte géologique de la France. À propos d'un centenaire. *Rev. Hist. Sci. Leurs Appl.* 22, 163–166.
- non signé, 1971. *Monthelie : les vigneronns ne veulent pas que l'on emporte la terre*. Le Bien Public.
- Nuninger, L., Fruchart, C., Opitz, R., 2010. LiDAR : quel apport pour l'analyse des paysages ? *Bull. AGER*, 34–43.
- OIV, 2010. Définition du "terroir" vitivinicole. Résolution OIV/VITI 333/2010. Tbilissi, 1 p.
- OIV, 2012. Lignes directrices OIV des méthodologies du zonage vitivinicole au niveau du sol et au niveau du climat. Résolution OIV/VITI 423-2012 REV1, 19 p.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Phys. Qual.* 79, 131–143.
- Palacios-Orueta, A., Ustin, S.L., 1998. Remote Sensing of Soil Properties in the Santa Monica Mountains I. Spectral Analysis. *Remote Sens. Environ.* 65, 170–183.
- Palacky, G., 1988. 3. Resistivity Characteristics of Geologic Targets. *In: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. 52–129.
- Panissod, C., Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, J., Tabbagh, A., 1998. Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics* 63, 1542–1550.

- Panissod, C., Dabas, M., Jolivet, A., Tabbagh, A., 1997. A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: the “Vol-de-canards” array. *Geophys. Prospect.* 45, 983–1002.
- Papadopoulos, N.G., Tsokas, G.N., Dabas, M., Yi, M.-J., Tsourlos, P., 2009. 3D Inversion of Automated Resistivity Profiling (ARP) Data. *ArchéoSciences* 33, 329–332.
- Petit, C., 1989. Formations de versant de l’Auxois: l’exemple du système de base de corniche du Mont-Auxois (Cote d’Or). *TOO Société Sci. Semur-En-Auxois* 2, 11–16.
- Petit, C., 1993. Un bassin d’avant-pays de type pelliculaire: la Bresse au Pli o-Pléistocène. Université de Bourgogne, Dijon, 349 p.
- Petit, C., Chevigny, E., Curmi, P., Quiquerez, A., Vannier-Petit, F., 2012. Sols et paysages viticoles de la Côte bourguignonne: une construction historique à préserver. IX^{ième} Congrès International des Terroirs vitivinicoles, Dijon-Reims, 29–33.
- Pieri, P., 2010. Changement climatique et culture de la vigne: l’essentiel des impacts. Dans *Changement Climatique, Agriculture et Forêt En France : Simulations D’impacts Sur Les Principales Espèces*. Ademe, 213–223.
- Poesen, J., Lavee, H., 1994. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Rock Fragm. Soil Surf. Dyn.* 23, 1–28.
- Poesen, J.W., Torri, D., Bunte, K., 1994. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *Rock Fragm. Soil Surf. Dyn.* 23, 141–166.
- Pomerol, C., 1984. Terroirs et vins de France: itinéraires oenologiques et géologiques. Éd. du BRGM, 343 p.
- Poupet, P., 2000. Science du sol et archéologie. *Études Rural*, 91–114.
- Priori, S., Fantappiè, M., Magini, S., Costantini, E., 2013. Using the ARP-03 for high-resolution mapping of calcic horizons. *Int. Agrophysics* 27, 313–321.
- Puissant, A., 2003. Information géographique et image à très haute résolution. Utilité et applications en milieu urbain. Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 343 p.
- Quiquerez, A., Brenot, J., Garcia, J.-P., Petit, C., 2008. Soil degradation caused by a high-intensity rainfall event: Implications for medium-term soil sustainability in Burgundian vineyards. *Catena* 73, 89–97.
- Quiquerez, A., Chevigny, E., Allemand, P., Curmi, P., Petit, C., Grandjean, P., 2014. Assessing the impact of soil surface characteristics on vineyard erosion from very high spatial resolution aerial images (Côte de Beaune, Burgundy, France). *Catena* 116, 163–172.
- Rat, P., 1974. Le système Bourgogne - Morvan - Bresse, articulation entre le Bassin parisien et le domaine préalpin. In *Debelmas J., Géologie de la France 2*. Doin, 480–500.
- Rat, P., 1986. Bourgogne Morvan. Coll. Guides géologiques régionaux. 2^e éd., Dunod, 215 p.
- Rees, G., Rees, W.G., 2012. *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press, 492 p.

- Rémond, C., 1972. Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000 - Gevrey-Chambertin - n°499, BRGM éd., 33 p.
- Rémond, C., 1985. Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000 - Beaune - n°526. BRGM éd., 52 p.
- Rémond, F., 2005. Prospection géophysique des versants de la Côte viticole. Université de Bourgogne, Dijon, 52 p.
- Rey, E., Jongmans, D., Gotteland, P., Garambois, S., 2006. Characterisation of soils with stony inclusions using geoelectrical measurements. *J. Appl. Geophys.* 58, 188–201.
- Reynier, A., 2011. Manuel de viticulture : Guide technique du viticulteur. Tec & Doc Lavoisier, 592 p.
- Rhoades, J.D., Raats, P.A.C., Prather, R.J., 1976. Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity. *Soil Sci Soc Am J* 40, 651–655.
- Richard, J., 2001. Le vignoble et les vins de Bourgogne au Moyen Âge: un état de la recherche. *Ann. Bourgogne* 73, 9–17.
- Richards, J.A., 2012. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer, 513 p.
- Ritz, M., Robain, H., Pervago, E., Albouy, Y., Camerlynck, C., Descloitres, M., Mariko, A., 1999. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon*. *Geophys. Prospect.* 47, 85–101.
- Robain, H., Descloitres, M., Ritz, M., Atangana, Q.Y., 1996. A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *J. Appl. Geophys.* 34, 237–253.
- Robbez-Masson, J.M., 1994. Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages. École Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier, 173 p.
- Rouvellac, E., 2013. Le terroir, essai d'une réflexion géographique à travers la viticulture (Habilitation à Diriger des Recherches, Volume 1: Position et projet scientifique). Université de Limoges, 226 p.
- Roy, A., Apparao, A., 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics* 36, 943–959.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res.* 83, 173–193.
- Scheurer, O., Barakat, B., 2011. Les besoins en données pédologiques dans les études de génie civil. Contributions potentielles des bases de données IGCS. *Étude Gest. Sols* 18, 43–52.
- Schott, J.R., 2007. Remote Sensing: The Image Chain Approach. Oxford University Press, USA, 688 p.
- Schowengerdt, R.A., 2006. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Elsevier Science, 560 p.

- Schumacher, T., Lindstrom, M., Schumacher, J., Lemme, G., 1999. Modeling spatial variation in productivity due to tillage and water erosion. *Soil Tillage Res.* 51, 331–339.
- Sigales, 2010. Carte pédologique de l'appellation Pouilly-Fuissé. Union des Producteurs de Pouilly-Fuissé. <http://terroirs-des-cotes-maconnaises.vins-macon.com>
- Silvester, P. P., Ferrari, R.L., 1996. *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge University Press, 494 p.
- Sorel, D., Vergely, P., 2010. *Atlas d'initiation aux cartes et aux coupes géologiques*. 2^e éd., Dunod, 120 p.
- Steinberg, J., 2002. *Cartographie : Systèmes d'information géographique et télédétection*. Armand Colin, 159 p.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M., Wetterlind, J., 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. In: *Advances in Agronomy*. Academic Press, 163–215.
- Stengel, P., Gelin, S., 1998. *Sol: interface fragile, Mieux comprendre*. Institut national de la recherche agronomique, 213 p.
- Szaraniec, E., 1970. La résistivité apparente comme transformation linéaire du potentiel et la transformation inverse*. *Geophys. Prospect.* 18, 816–825.
- Tenenbaum, J.B., Silva, V. de, Langford, J.C., 2000. A Global Geometric Framework for Nonlinear Dimensionality Reduction. *Science* 290, 2319–2323.
- Tetegan, M., Pasquier, C., Besson, A., Nicoullaud, B., Bouthier, A., Bourennane, H., Desbourdes, C., King, D., Cousin, I., 2012. Field-scale estimation of the volume percentage of rock fragments in stony soils by electrical resistivity. *Catena* 92, 67–74.
- Thévenot, E., 1951. Les origines du vignoble bourguignon, d'après les documents archéologiques. *Ann. Bourgogne* 23, 47–52.
- Tou, J.T., González, R.C., 1974. *Pattern recognition principles*. Addison-Wesley Pub. Co., 377 p.
- Tournebize, J., 2001. *Impact de l'enherbement du vignoble alsacien sur le transfert des nitrates*. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 306 p.
- Toy, T.J., Foster, G.R., Renard, K.G., 2002. *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control*. Wiley, 352 p.
- Valentin, C., Bresson, L.-M., 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma* 55, 225–245.
- Van Der Maaten, L., Hinton, G., 2008. Visualizing data using t-SNE. *J. Mach. Learn. Res.* 9, 2579–2605.
- Van Leeuwen, C., Baudet, D., Duteau, J., Seguin, G., Wilbert, J., 1989. Les sols viticoles et leur répartition à Saint-Emilion, Pomerol et quelques autres communes du Libournois. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 23, 131–150.

- Van Leeuwen, C., Gaudillière, J.-P., Tregoat, O., 2001. L'évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. L'intérêt de sa mesure sur les sucres du moût à maturité. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 35, 195–205.
- Van Leeuwen, C., Seguin, G., 2006. The concept of terroir in viticulture. *J. Wine Res.* 17, 1–10.
- Van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Jaeck, M.-E., Rabusseau, S., Gaudillière, J.-P., 2003. Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bull. Organ. Int. Vigne Vin* 76, 367–379.
- Van Leeuwen, C., Vivin, P., 2008. Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins. *Innov. Agron.* 2, 159–167.
- Vannier-Petit, F., 2013. Maranges: du sous-sol au paysage viticole (étude géologique et physiographique de l'appellation). ODG des Maranges, 121 p.
- Vannier-Petit, F., Allemand, P., Bichet, V., Chevigny, E., Petit, C., Quiquerez, A., 2012. Cartographie géologique à haute résolution pour une meilleure compréhension de la diversité du sous-sol viticole de la "Côte" (Bourgogne, France). IXième Congrès International des Terroirs vitivinicoles, Dijon-Reims, 4–69 à 4–72.
- Vannier-Petit, F., Quiquerez, A., Petit, C., Chevigny, E., 2011. Le sol et sous-sol des versants viticoles de la Côte de Nuits nouvelles cartographies géologiques, investigations géophysiques et pédologiques à haute résolution spatiale. Association des Sédimentologues Français. éd., 60 p.
- Vanwalleghe, T., Laguna, A., Giráldez, J.V., Jiménez-Hornero, F.J., 2010. Applying a simple methodology to assess historical soil erosion in olive orchards. *Geomorphology* 114, 294–302.
- Vaudour, E., 2003. Les terroirs viticoles : Définitions, caractérisation et protection. Dunod, 293 p.
- Vaudour, E., Morlat, R., Van Leeuwen, C., Dolédec, A.F., 2011. Terroirs viticoles et sols. *In* : Sols et Environnement. Dunod, 237–258.
- Vaudour, E., Shaw, A.B., 2005. A worldwide perspective on viticultural zoning. *South Afr. J. Enol. Vitic.* 26, 106–115.
- Vernou, C., 2009. La viticulture. *In* : La Côte d'Or. Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, Paris, 265–266 (Carte Archéologique de la Gaule, 21/1).
- Viscarra Rossel, R.A., Cattle, S.R., Ortega, A., Fouad, Y., 2009. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. *Geoderma* 150, 253–266.
- Viscarra Rossel, R.A., Fouad, Y., Walter, C., 2008. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosyst. Eng.* 100, 149–159.
- Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B., 1998. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content. *Geoderma* 85, 19–39.
- Viscarra Rossel, R.A., Minasny, B., Roudier, P., McBratney, A.B., 2006a. Colour space models for soil science. *Geoderma* 133, 320–337.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006b. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131, 59–75.

- Vosselman, G., 2000. Slope based filtering of laser altimetry data. IAPRS, Amsterdam, 935–942.
- Walling, D.E., Quine, T.A., 1991. Use of ^{137}Cs measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations. *J. Soil Sci.* 42, 147–165.
- Walter, C., Schvartz, C., Claudot, B., Bouedo, T., Aurousseau, P., 1997. Synthèse nationale des analyses de terre. II; Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. *Étude Gest. Sols* 4, 205–209.
- Wassenaar, T., Andrieux, P., Baret, F., Robbez-Masson, J.M., 2005. Soil surface infiltration capacity classification based on the bi-directional reflectance distribution function sampled by aerial photographs. The case of vineyards in a Mediterranean area. *Catena* 62 (2-3), 94–110.

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Figure 1.1 Carte du vignoble de la Côte et de ses Appellations d'Origine Contrôlées (AOC) (source INAO), et Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la Côte (source BD ALTI 25m IGN).....	13
Figure 1.2 Extrait de la carte géologique de la France au 1/250 000 centré sur le secteur de la Côte. Les formations du Trias figurent en orangé, celles du Jurassique inférieur en violet, celles du Jurassique moyen en marron-orangé, celles du Jurassique supérieur en bleu, celles du Tertiaire et du Quaternaire en couleurs pastel (feuilles n°19 Dijon, 1989 ; n°24 Chalon-sur-Saône, 1987, BRGM).....	15
Figure 1.3 Coupe géologique transversale de la Côte de Nuits (Rat, 1986).....	16
Figure 1.4. Contexte géologique de la Côte viticole. Selon Rat (1986). La diversité géologique entre les deux Côtes s'explique par deux ondulations transversales : le synclinal de Volnay et l'anticlinal de Gevrey (A). Les cartes géologiques à l'échelle du 1/10 000 sur les secteurs de la combe Grands Vaux (Marsannay-la-Côte) et de la combe Lavaux (Gevrey-Chambertin) mettent en évidence une dissymétrie entre les versants nord et sud, s'expliquant par la présence de failles transversales (B et C) (Vannier-Petit et al., 2012).....	17
Figure 1.5 Grèzes litées observées à l'affleurement au lieu-dit « Le Clos du Roy » en appellation Marsannay. Les éléments lithiques sont de taille infra-centimétrique (gauche). Ressaut topographique correspondant à un pan de falaise de Calcaires à Entroques glissé sur le versant marneux au lieu-dit « La Fussière » en appellation Maranges (droite) (Vannier-Petit, 2013).	19
Figure 1.6. Schémas des toposéquences en Côte de Nuits et en Côte de Beaune, et limites des AOC (d'après Leneuf, 1988).	20
Figure 1.7 Extrait de la carte pédologique de la France au 1/100 000, feuille de Beaune n°12, ciblé sur le secteur de la Côte (Chrétien, 1996). Les communes sont référencées par une lettre majuscule ; D : Dijon ; C : Couchey ; NSG : Nuits-Saint-Georges ; A-C : Aloxe-Corton ; B : Beaune. Les encadrés de couleur rouge correspondent aux secteurs d'étude.	21
Figure 1.8 Illustration de diverses formations géologiques observées sur la Côte présentant divers faciès sédimentaires.....	23
Figure 1.9 Logs lithologiques des formations observées pour chaque secteur d'étude et cartes géologiques des secteurs. Les secteurs d'étude sont délimités par un encadré jaune (logs lithologiques d'après Vannier-Petit, 2013 ; Vannier-Petit et al., 2012, modifiés) ; cartes géologiques de la France au 1/50 000, feuilles de Gevrey n°499, de Beaune n°526 et du Creusot n°552, BRGM).	25
Figure 1.10 Localisation du Pagus Arebrignus, situé au niveau des actuelles Côte de Nuits et Côte de Beaune (A, d'après Chevrier et Garcia, 2011). Photographie aérienne du vignoble gallo-romain de Gevrey-Chambertin, au lieu-dit « Au-dessus de Bergis ». 300 fosses alignées sont réparties sur 26 rangs (B, in Garcia, 2009, photographie INRAP®).	28
Figure 1.11 Photographie aérienne du versant viticole de Couchey en 1953. La ligne rouge représente la limite occidentale du vignoble actuel (IGN, 1953). Les tons foncés caractérisent des zones de pâtures ou de friches. Les tons clairs mettent en évidence les zones cultivées en vigne.	31
Figure 1.12 Calendrier des différents travaux de la vigne réalisés au cours d'une année en Bourgogne (source : BIVB).	32
Figure 2.1 État d'avancement de la cartographie des Référentiels Régionaux Pédologiques en France au 1/250 000, en décembre 2013 (Laroche et Richer de Forges, 2013).	43

Figure 2.2 Représentation d'un système Source-Cible-Capteur-Vecteur dans le domaine réflectif en télédétection passive.....	51
Figure 2.3 Spectre électromagnétique illustrant les principaux domaines spectraux utilisés en télédétection (McBratney et al., 2003).	52
Figure 2.4 Représentation de divers systèmes de télédétection en fonction de leurs résolutions spatiale et spectrale (modifié d'après Schowengerdt, 2006). Les domaines spectraux sont les suivants : V=Visible, NIR=Near InfraRed, LWIR=Long Wave IR, MWIR=Mid Wave IR, SWIR=Short Wave IR et P=Panchromatic.	53
Figure 2.5 Courbes de réflectance pour diverses surfaces naturelles dans le spectre VIS-PIR (modifié d'après, Bonn et Rochon, 1992 ; Rees, 2012).....	54
Figure 2.6 Réflectance mesurée en laboratoire sur les 3 bandes visibles du satellite Landsat Thematic Mapper en fonction des coordonnées RGB calculées à partir de l'estimation Munsell (Escadafal et al., 1989, modifié).	56
Figure 2.7 Extrait de la carte de pierrosité issue de la photo-interprétation (A) et classification de l'image SAR (Menéndez Duarte et al., 2008).....	57
Figure 2.8 Relation entre la quantité d'argiles mesurée et le continuum removal de la bande 2206 nm, pour les différents contextes de mesure : laboratoire, terrain et HYMAP (Lagacherie et al., 2008).	58
Figure 2.9 Relation entre le calcaire et la réflectance à 400 nm, et regroupement en fonction des formes de courbes dans le visible et les clartés Munsell correspondantes (d'après Courault, 1989).....	59
Figure 2.10 Cartographie du taux de carbone organique du sol (SOC) réalisée par krigeage des prélèvements analysés (A) et zoom sur une portion de la carte du SOC prédite à partir du modèle spectral VIS/NIR (Hbirkou et al., 2012).	60
Figure 2.11 Compilation des valeurs de résistivité électrique pour chaque type de roche sédimentaire (d'après Chapellier, 2000 ; Henry, 2000 ; Palacky, 1988).	64
Figure 2.12 Relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau du sol pour différents types de sol (Samouëlian et al., 2005).	65
Figure 2.13 Schéma d'un quadripôle : les électrodes A et B injectent le courant, la mesure de potentiel se fait à partir des électrodes M et N.	66
Figure 2.14 Schéma d'une séquence d'acquisition utilisant un dispositif Wenner à 20 électrodes (modifié d'après Loke, 2013).	68
Figure 2.15 Schéma représentant la mise en place d'un roll-along pour une configuration Syscal Pro 96 électrodes.	69
Figure 2.16 Processus d'inversion réalisé sous le logiciel Res2dinv (Geotomo Software©). Les trois étapes sont itérativement réalisées jusqu'à convergence du modèle.	70
Figure 2.17 Dispositif ARP [®] monté sur un enjambeur (A). Les trois espacements entre les couples d'électrodes permettent de cartographier la résistivité électrique sur trois profondeurs d'investigation (B).....	72

Figure 3.1 Organigramme de la démarche interdisciplinaire employée pour cartographier la diversité des sols viticoles de versant et en comprendre les déterminants.	80
Figure 3.2 Représentation graphique de l'erreur quadratique moyenne (RMS) calculée pour chaque itération. À partir de l'itération n°4, la diminution de la RMS n'est plus significative. On utilisera donc le profil de résistivité issu de cette itération pour interpréter les variations lithologiques du secteur.	84
Figure 3.3 Extrait d'un profil de résistivité (A) et d'un profil d'erreur quadratique moyenne (RMS) (B). Les plus fortes valeurs de résistivité situées à 608 m (A) sont très localisées à la surface, elles présentent donc une forte erreur RMS (B) ; cette zone correspond à une route goudronnée.	85
Figure 3.4 Configuration technique de DRELIO (A, modifié d'après Delacourt et al., 2009), dispositif opérationnel (B) et images THRS acquises par DRELIO à une résolution spatiale de 2 cm (C).	86
Figure 3.5 Orthophotographie THRS d'une parcelle viticole réalisée à partir du logiciel MicMac (logiciel libre, IGN). Une fois l'orthophotographie créée (A), la parcelle est détournée manuellement (B).	88
Figure 3.6 Segmentation d'image réalisée sur la bande spectrale Rouge. L'image initiale (A) est segmentée pour produire un masque (B), puis le masque est appliqué sur l'ensemble des bandes de l'image initiale (C).	89
Figure 3.7 Nombre de classes calculées à l'issue de la classification non supervisée pour différentes valeurs du nombre maximal de classes définies par l'opérateur.	91
Figure 3.8 Représentation schématique du système colorimétrique CIE $L^*a^*b^*$	94
Figure 3.9 Illustration de la diversité des pratiques culturales observées sur le secteur d'étude de la Côte. Les images THRS sont issues de l'acquisition drone sans traitement préalable.	96
Figure 3.10 Classification des textures du sol selon le Groupe d'Études pour les Problèmes de Pédologie Appliquée (d'après, Baize, 2000).	99
Figure 3.11 Schéma conceptuel de la méthode SUM (A) (modifié d'après Brenot et al., 2008). La densité de plantation de 10 000 pieds/hectare permet d'effectuer une mesure tous les mètres carré (B).	100
Figure 4.1 Carte des pentes et courbes de niveau (écartement 5 m) du secteur d'étude situé sur le versant d'Aloxe-Corton. L'encadré rouge représente le secteur d'étude. Les courbes de niveau sont matérialisées par des traits orange.	114
Figure 4.2 Localisation du profil de tomographie électrique (ERT) et de la zone survolée par le drone sur le versant d'Aloxe-Corton.	116
Figure 4.3 Profils 2D représentant les erreurs RMS correspondant à l'itération choisie pour l'interprétation (convergence). Les fortes valeurs de RMS sont principalement corrélées avec la présence de structures anthropiques.	117
Figure 4.4 Profil de résistivité électrique du sous-sol et coupe géologique interprétative du versant viticole d'Aloxe-Corton. La localisation du profil est renseignée sur la figure 4.1.	118
Figure 4.5 Orthophotographie THRS du versant d'Aloxe-Corton ; la résolution spatiale est égale à 10 cm.	121
Figure 4.6 Résultats de la classification non supervisée Isodata, réalisée sur l'orthophotographie THRS du versant d'Aloxe-Corton à 10 cm de résolution (A). Après le regroupement en classes et l'application du filtre majoritaire 9x9, la distribution des EDS peut être observée à une résolution spatiale du mètre carré (B).	122

Figure 4.7 Localisation des prélèvements pédologiques (A) et distribution spatiale des caractéristiques physico-chimiques des EDS du versant d'Aloxe-Corton : pierrosité (B), fer libre (C), teneur en carbonate de calcium total (D), carbone organique (E) et rapport C/N (F).....	125
Figure 4.8 Analyse en Composantes Principales réalisée sur les paramètres physico-chimiques des EDS du versant d'Aloxe-Corton. Projections des variables (A, C, E) et des individus (B, D, F) sur les trois plans factoriels couvrant plus de 83 % de l'inertie totale du système.	127
Figure 4.9 Cartographie des pratiques culturales au moment de l'acquisition des images THRS (A). Les parcelles nommées « C, NL et FL » correspondent respectivement aux parcelles en désherbage chimique, non labourées et fraîchement labourées (B). La cartographie des pratiques culturales utilisées sur le transect met en évidence une forte diversité des pratiques dans la partie aval du versant.	129
Figure 4.10 Schémas interprétatifs des sondages réalisés sur le versant d'Aloxe-Corton et localisation des sondages le long du profil topographique.	133
Figure 4.11. Carte pédologique du versant viticole d'Aloxe-Corton au 1/5 000, réalisée à partir de la démarche interdisciplinaire.....	135
Figure 4.12 Localisation des cartes de résistivité électrique acquises par le système ARP sur le versant d'Aloxe-Corton.	136
Figure 4.13 Cartes de résistivité électrique acquises sur le versant d'Aloxe-Corton. Les trois voies correspondent aux trois profondeurs d'investigation. La première composante de l'ACP est présentée pour chaque parcelle.	137
Figure 4.14 Cartes de résistivité électrique pour les parcelles situées aux lieux-dits « Les Languettes » et « Les Perrières ».	139
Figure 4.15 Fosses pédologiques situées au voisinage de la parcelle P3, au lieu-dit « Les Grèves ».	140
Figure 4.16 Cartes de résistivité électrique pour les parcelles situées aux lieux-dits « Les Grèves » et « Les Chaillots ».	141
Figure 4.17 Cartes de résistivité électrique pour la parcelle située au lieu-dit « Les Bruyères ». Les valeurs de faible résistivité, homogènes sur l'ensemble de la parcelle, mettent en évidence une homogénéité du sol.	142
Figure 4.18 Carte de résistivité de la voie 3 (0-200 cm) drapée sur la carte pédologique du transect d'étude d'Aloxe, réalisée à partir de la démarche interdisciplinaire.	144
Figure 4.19 Cartes des pentes et courbes de niveau du secteur de Cheilly-lès-Maranges.....	171
Figure 4.20 Localisation du profil de tomographie électrique (ERT) et de la zone survolée par le drone, sur le versant de Cheilly-lès-Maranges.....	172
Figure 4.21 Profils 2D représentant les erreurs RMS correspondant à l'itération choisie pour l'interprétation (convergence). Les fortes valeurs de RMS sont principalement corrélées avec la présence de structures anthropiques.	172

Figure 4.22 Profils de résistivité électrique du sous-sol et coupe géologique interprétative du versant viticole de Cheilly-lès-Maranges. La localisation du profil est renseignée sur la figure 4.20. Le remplissage des étoiles correspond à la formation géologique observée à l’affleurement.	174
Figure 4.23 Orthophotographie THRS du versant de Cheilly-lès-Maranges (résolution spatiale égale à 10 cm).	177
Figure 4.24 Résultats de la classification non supervisée, réalisée sur l’orthophotographie THRS du versant de Cheilly-lès-Maranges à 10 cm de résolution (A) et à 1 m de résolution (issue du filtre majoritaire) (B). Cartographie des pratiques culturales au moment de l’acquisition des photos (C).	179
Figure 4.25 Localisation des prélèvements (A) et distribution spatiale des caractéristiques physico-chimiques des EDS sur le versant de Cheilly-lès-Maranges : pierrosité de surface (B), teneur en fer libre (C).	180
Figure 4.26 Distribution spatiale des caractéristiques physico-chimiques des EDS sur le versant de Cheilly-lès-Maranges : teneur en carbonate de calcium (A), carbone organique (B), et rapport C/N (C).	181
Figure 4.27 ACP réalisée sur les paramètres physico-chimiques des EDS du versant de Cheilly-lès-Maranges. Projections des variables (A, C, E) et des individus (B, D, F) sur les trois plans factoriels couvrant plus de 85 % de l’inertie totale du système.	183
Figure 4.28 Schéma interprétatif des sondages réalisés sur le versant de Cheilly-lès-Maranges et distribution des sondages le long du profil topographique.	188
Figure 4.29 Carte pédologique du versant de Cheilly-lès-Maranges au 1/5 000.	190
Figure 4.30 Classification non supervisée Isodata réalisée sur l’orthophotographie de l’IGN de juin 2006. Le transect d’étude est matérialisé par l’encadré vert.	191
Figure 4.31 Bloc diagramme en 3D de la géologie du versant du « Clos du Roy » (à gauche) et nouvelle interprétation géologique du secteur (à droite)(d’après Rémond, 2005).	192
Figure 4.32 Représentation 3D de la classification issue de la t-SNE en fonction des quatre secteurs d’étude (A) et des différents types de sol (B). Des tendances sont observables sur la représentation graphique en 3D alors que la dimension intrinsèque des données est de 5 (d’après Chevigny et al., 2014a).	194
Figure S.1 Distribution de la pierrosité de surface en fonction du type de substrat (A) et du type de sol pour les deux contextes géologiques étudiés (B). Données issues des versants d’Aloxe-Corton et Couchey pour les versants à forte variabilité de faciès et de Cheilly-lès-Maranges pour les versants à faible variabilité de faciès.	201
Figure S.2 Relation entre les propriétés chimiques et les paramètres colorimétriques de la matrice des sols, exemple du versant viticole d’Aloxe-Corton.	202
Figure S.3 Analyse en Composantes Principales calculée sur les paramètres colorimétriques (L*, a* et b*) des EDS de chaque sondage pédologique pour l’ensemble des secteurs étudiés. La projection des variables sur le plan factoriel F1-F3 permet de discriminer certains types de sol.	203
Figure S.4 Distribution des sols des versants de Couchey et Aloxe-corton en fonction des limites d’AOC. L’appellation Marsannay, située en partie sur le versant de Couchey, fait actuellement une demande de reclassement des AOC de l’appellation. Les « futurs Premier Cru » sont localisés sur des Rendosols et Calcosols issus de l’altération de formations calcaires.	207

Figure 5.1 Localisation de la parcelle sur le versant de Monthelie et carte des pentes du secteur d'étude. L'encadré rouge correspond à la zone d'étude.....	239
Figure 5.2 Carte de résistivité électrique du niveau superficiel du sol (0-50 cm) (A) et carte de déchaussement de la parcelle réalisée à partir de la méthode SUM (B).	240
Figure 5.3 Localisation des valeurs de SUM supérieures à 10 cm en fonction des classes de résistivité.	241
Figure 5.4 Distribution de la pierrosité de surface, mesurée sur le terrain, en fonction des classes de résistivité.	242
Figure 6.1 Localisation du site d'étude et des différentes prospections géophysiques réalisées au lieu-dit « L'Île des Hautes Vergelesses ».	249
Figure 6.2 Carte de résistivité électrique du sol (0-50 cm), acquise par le système ARP [®] . Les annotations font référence aux structures archéologiques identifiées.	250
Figure 6.3 Cartes de résistivité électrique du sol pour les deux niveaux les plus profonds (0-100 cm et 0-200 cm). La résistivité de la parcelle arrachée a été caractérisée par le résistivimètre RM15.	252
Figure 6.4 Cartographie du gradient du champ magnétique local (parcelle AN0002 arrachée).	253
Figure 6.5 Mobilier observé à la surface du sol lors de la prospection géophysique, de nombreux fragments de tegulae (A, tuiles romaines) couvrent la surface, quelques rares fragments de céramique sigillée (B, poterie utilisée pour le service à table) ont été observés, des blocs épars de mortier de tuileau ont été localisés au niveau des structures (C). Plan interprétatif des structures observées sur les cartes géophysiques (D).....	255
Figure 6.6 Localisation des diverses méthodes d'investigation pédologique, déterminée à partir des cartes issues des prospections géophysiques.....	256
Figure 6.7 Photographies de quelques relevés pédologiques effectués sur le secteur d'étude. Le sol peu épais de la fosse F2 se situe sur un sol bétonné constitué de mortier de tuileau.	256
Figure 6.8 Distribution des épaisseurs des sols estimées en fonction de la présence ou non de structures archéologiques pour deux types de prospections pédologiques (sondage et pénétrromètre).....	257
Figure 6.9 Représentation graphique des valeurs issues de la composante 1 de l'ACP en fonction de la profondeur du sol estimée par sondages à la tarière (A). Nuage de points représentant la profondeur estimée par le modèle de corrélation en fonction de la profondeur estimée par sondages à la tarière, avec la droite de corrélation et l'intervalle de confiance à 95% (B).....	259
Figure 6.10 Carte de la profondeur du sol de la parcelle AN0002 plantée, réalisée à partir du modèle de régression linéaire.	260
Figure 6.11 Extrait du plan ancien, issu de l'atlas général des routes de la Province de Bourgogne entre Ladoix-Serrigny et Aloxe-Corton, mettant en évidence les zones d'extractions de la Dalle Nacrée en contrebas de la Butte de Corton actuellement plantées en vignes (ADCO, C 3882-3883).....	261

Figure 6.12 Ancienne carrière d'exploitation de la pierre de Dijon-Corton à Aloxe-Corton au lieu-dit « Les Bressandes » (A). Les courbes de niveau plaquées sur le MNT à haute résolution, 5m (B), la carte des pentes (C) et la carte des expositions (D) mettent en évidence une modification locale des paramètres physiographiques du lieu-dit au niveau de l'ancienne carrière.	262
Figure 6.13 Fosses pédologiques creusées au lieu-dit « Les Bressandes », Aloxe-Corton, la fosse F1, située sur l'emplacement de l'ancienne carrière, met en évidence un Anthroposol calcaire très épais, alors que la fosse F2, située hors de la zone d'extraction, présente un Calcosol argilo-limoneux.....	264
Figure 6.14. Localisation d'anciennes carrières aux lieux-dits « Les Goulots » et « La Combe aux Moines » (A) ainsi que de gravières au lieu-dit « La Justice » (B), actuellement plantées en vignes sur la commune de Gevrey-Chambertin. La résolution spatiale du MNT est de 50 cm (acquisition LiDAR, pôle géomatique de la MSH de Dijon, 2009).	265
Figure 6.15 Fosse pédologique illustrant un apport de terre d'environ 40 cm d'épaisseur au lieu-dit « Les Languettes » (A). L'état de surface du sol, d'une parcelle de Couchey, au lieu-dit « Champs Perdrix », permet de mettre en évidence un apport de terre anthropique (B).Les apports peuvent être identifiés, dans certains cas, par la présence d'objets anthropiques, comme le montre la fosse située au lieu-dit « Clos du Roy » en appellation Marsannay (C).....	268
Figure 6.16 Évolution du paysage viticole à Monthelie sur la période 1968-2002 (photo-interprétation, Brenot, 2007)	269
Figure 6.17 Distribution des divers types d'occupation du sol pour chaque parcelle pour la période 1827 et 2013.	297
Figure 6.18 Secteur d'étude caractérisé par un ensemble de 6 parcelles contigües (A) et carte des pentes du secteur (B).	298
Figure 6.19 Carte de déchaussement de ceps dans une partie du lieu-dit « En Charlemagne », les limites cadastrales actuelles sont représentées en rouge (BD PARECLLAIRE® IGN) (SUM d'après Brenot, 2007). ...	301
Figure 6.20 Carte de déchaussement des ceps d'une partie du lieu-dit « En Charlemagne », les limites du cadastre napoléonien sont corrélées à certains motifs d'érosion (données de déchaussement d'après Brenot, 2007, plan du cadastre napoléonien, ADCO, cote 3 P PLAN 479/5).....	302
Figure 6.21 Évolution de l'occupation du sol pour chaque parcelle entre 1827 et 2013. Les données issues des matrices cadastrales n'étant pas continues, l'occupation du sol pour certaines périodes n'a pu être déterminée.	305
Figure 6.22 Photographies aériennes et photo-interprétations de l'occupation du sol des parcelles de Pernand-Vergelesses en 1940 et 1953 (photographie aérienne IGN).	306
Figure 6.23 Photographies aériennes et photo-interprétations de l'occupation du sol des parcelles de Pernand-Vergelesses en 1962 et 1968 (Photographie aérienne IGN).....	307
Figure 6.24 Limites parcellaires dessinées à partir de l'évolution de l'occupation du sol plaquées sur les cartes d'érosion du secteur d'étude.	308

Figure 6.25. Carte d'érosion de la parcelle et courbes de niveau calculées à partir du MNT haute résolution LiDAR (Acquisition par le pôle géomatique de la MSH de Dijon, 2009).	312
Figure 6.26 Distribution des valeurs moyennes du SUM en fonction des rangs (A) et en fonction de la position du cep (B).....	312
Figure 6.27 Indice topographique d'humidité (A) et carte des pentes (B) calculés à partir du MNT haute résolution (50cm) acquis par LiDAR sur une parcelle du versant de Couchey (acquisition LiDAR, pôle géomatique de la MSH de Dijon, 2009).....	313
Figure 6.28 Calcosol leptique situé sur la partie amont du versant d'Aloxe-Corton. La parcelle est non travaillée et présente en surface un paillage d'écorce de pin. L'horizon de subsurface compacté (3-15cm) présente de nombreuses zones de réduction.	314
Figure 6.29 Sous-solage et broyage du substrat en Côte de Nuits (A) et remodelage drastique d'un versant situé en Côte de Beaune (B) (Photo d'après Petit et al., 2012).	315
Figure A.1 MNE calculé sur le versant d'Aloxe-Corton, le secteur d'étude est représenté par un encadré rouge et les positions des points GPS par des points jaunes.	372
Figure A.2 MNE calculé sur le versant de Cheilly-lès-Maranges, les positions des points GPS sont représentées par des points jaunes et le secteur d'étude par un encadré rouge.	374
Figure A.3 Graphique illustrant la calibration de la datation radiométrique réalisée à partir du logiciel OxCal.	386

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Classification des échelles spatiales pour la cartographie pédologique et objectifs poursuivis. Bornes définies selon Jamagne et al., 1989 ; Legros, 1996 ; Duchaufour, 1997	44
Tableau 2-2 Densité d'observations et prix de revient pour l'élaboration d'une carte pédologique à diverses échelles spatiales (données compilées d'après Legros, 1996 ; OIV, 2012). Le prix est modifié et exprimé en euros sur la base 1991 en francs français.....	48
Tableau 2-3 Comparatif des dénominations des résolutions spatiales dans les domaines civil et militaire (d'après Puissant, 2003).	53
Tableau 2-4 Profondeurs d'investigation et types de structure reconnus pour les différents dispositifs utilisés en tomographie électrique. L représente la longueur totale du profil, exprimée en m (d'après Roy et Apparao, 1971 ; Barker, 1989).	69
Tableau 3-1 Caractéristiques techniques des diverses acquisitions.....	83
Tableau S-1 Tableau de synthèse des diverses techniques employées, de leurs caractéristiques et de leurs objectifs.....	107
Tableau 4-1 Caractéristiques techniques du profil de résistivité d'Aloxe-Corton ; résultats issus des filtrages (Prosyst II [®]) et de l'inversion des moindres carrés (Res2dinv [®]).....	116

Tableau 4-2 Caractéristiques techniques du vol et des images THRS acquises sur le versant d'Aloxe-Corton.	121
Tableau 4-3 Distribution des classes de radiance reconnues par imagerie sur le versant d'Aloxe-Corton et attribution des classes d'EDS.....	123
Tableau 4-4 Matrice de corrélation variables-facteurs pour l'ACP calculée sur les prélèvements de surface....	126
Tableau 4-5 Caractéristiques physico-chimiques des différents types de sol rencontrés sur le versant d'Aloxe-Corton.	131
Tableau 4-6 Valeurs de résistivité minimales, maximales, moyennes et écart-type (SD) pour les cinq parcelles étudiées.	138
Tableau 4-7 Caractéristiques techniques du profil de résistivité de Cheilly-lès-Maranges ; résultats issus des filtrages (Prosys II [®]) et de l'inversion des moindres carrés (Res2dinv [®]).....	173
Tableau 4-8 Caractéristiques techniques du vol et des images THRS acquises.	177
Tableau 4-9 Distribution des classes reconnues par imagerie sur le versant de Cheilly-lès-Maranges et attribution des classes d'EDS.	178
Tableau 4-10 Matrice des corrélations variables-facteurs issues de l'ACP du versant de Cheilly-lès-Maranges.	184
Tableau 4-11 Caractéristiques physico-chimiques des différents types de sol rencontrés sur le versant de Cheilly-lès-Maranges.	186
Tableau S-2 Tableau de synthèse illustrant l'aptitude des diverses techniques à reconnaître les paramètres qui contribuent à la diversité géopédologique des versants viticoles de la Côte.....	204
Tableau 5-1 Évolution des valeurs de SUM élevées (> 10cm) en fonction de la résistivité électrique du sol. ..	241
Tableau 6-1 Évolution de l'occupation du sol du secteur d'étude depuis 1827 à nos jours. Les différentes occupations sont : la culture de la vigne (V), la terre non cultivée (S), la friche (F) et la friche arbustive (FA). Les occupations soulignées sont renseignées à partir des photo-interprétations historiques.	296
Tableau 6-2 Vitesses d'érosion moyenne des parcelles du lieu-dit « En Charlemagne » (d'après Brenot, 2007).	299
Tableau 6-3 Vitesses d'érosion calculées pour les motifs d'érosion délimités par le parcellaire historique. Les tests statistiques ont été calculés pour un seuil de signification α égal à 0,01.	303
Tableau 6-4 Évolution de l'occupation du sol des parcelles du lieu-dit « En Charlemagne », pour la période 1827 à nos jours. Les différentes occupations sont : la culture de la vigne (V), la terre non cultivée (S) et la friche (F).	304
Tableau 6-5 Vitesses d'érosion calculées pour chaque parcelle historique.....	305
Tableau 6-6 Vitesses d'érosion calculées pour les motifs d'érosion délimités par le parcellaire historique lié à l'occupation du sol. Les tests statistiques ont été calculés pour un seuil de signification α égal à 0,01.	309

Tableau 6-7 Surfaces moyennes des zones de compaction en fonction du nombre de passages des engins agricoles et du type d'entretien du sol (modifié d'après Lagacherie et al., 2006). Les surfaces de compaction ont été observées sur des profils pédologiques (nombres entre parenthèses) pour 28 sites viticoles situés dans la plaine languedocienne.	311
Tableau S-3 Tableau de synthèse illustrant les divers facteurs anthropiques observés et leurs impacts sur la diversité des sols viticoles de versant.	322
Tableau A-1 Liste des positions GPS utilisées pour la calibration et la détermination de la précision du MNE sur le versant d'Aloxe-Corton.	371
Tableau A-2 Liste des positions GPS utilisées pour la calibration et la détermination de la précision du MNE sur le versant de Cheilly-lès-Maranges.	373

Annexes

Annexe 1 Calibration des modèles numériques d'élévation

Les modèles numériques d'élévation (MNE) ont été calculés par une méthode de photogrammétrie, via le logiciel MicMac, (IGN) à partir de photographies aériennes. Pour le versant d'Aloxe-Corton, dix photographies ont été utilisées et six pour le versant de Cheilly-lès-Maranges. Les positions des points GPS ont été définies à partir de l'orthophotographie créée sous MicMac. Une partie de ces points a été utilisée pour calibrer l'altitude des MNE, les autres ont permis d'évaluer la précision des MNE calculés. Pour le MNE d'Aloxe-Corton, l'écart moyen entre les points GPS et le MNE calculé est égal à 0,14 m pour un écart-type de 2,24 m (Tableau A-1 ; Figure A.1). Pour le secteur de Cheilly-lès-Maranges, l'écart moyen est égal à 0,14 m pour un écart-type de 0,19 m (Tableau A-2 ; Figure A.2).

Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude GPS (m)	Altitude MNS (m)	Delta alti GPS/MNS (m)
6648362	826457	426.7	426.9	-0.16
6647360	826779	452.0	451.6	0.32
6647394	825639	377.4	377.0	0.38
6646919	825415	306.8	306.7	0.08
6647458	823883	295.0	295.0	-0.01
6646509	824382	332.0	331.9	0.14
6646286	824858	299.9	299.8	0.13
6645762	825489	296.5	296.2	0.22
6645004	824311	405.4	405.3	0.12
6645090	826781	252.3	252.4	-0.11
6644373	826434	233.9	233.8	0.12
6645249	825864	311.8	311.6	0.19
6645995	826250	233.2	233.0	0.23
6646776	826796	312.7	312.4	0.37
6646622	826231	297.4	297.3	0.12
6646585	827664	249.9	249.7	0.15
6645898	827278	248.4	248.5	-0.17
6645569	828882	259.2	259.4	-0.20
6646786	828514	233.1	233.0	0.10
6647507	828321	287.6	287.2	0.40
6647157	827280	341.3	340.8	0.49
Moyenne				0.14
Écart-type				0.19

Tableau A-1 Liste des positions GPS utilisées pour la calibration et la détermination de la précision du MNE sur le versant d'Aloxe-Corton.

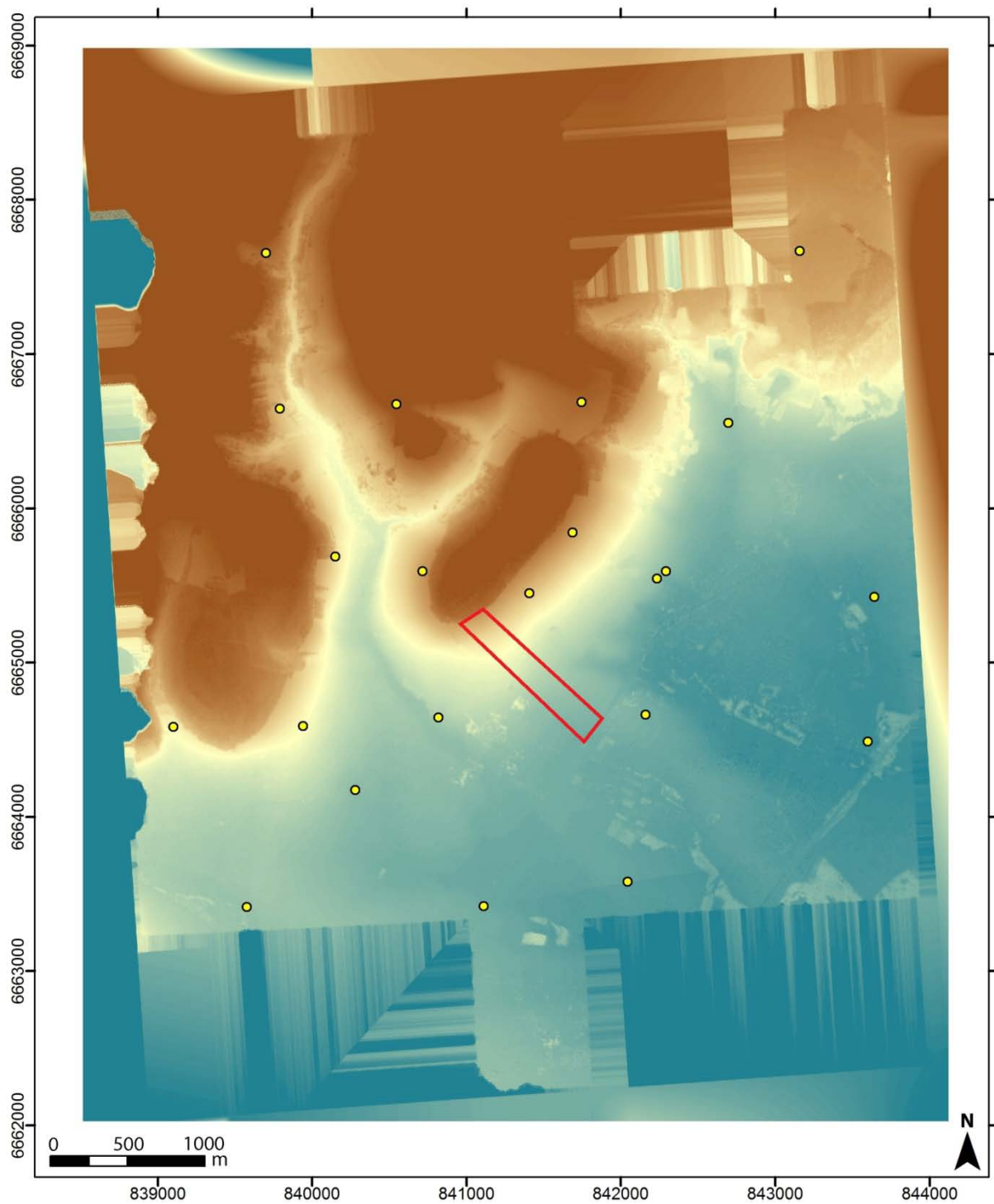


Figure A.1 MNE calculé sur le versant d'Aloxe-Corton. Le secteur d'étude est représenté par un encadré rouge et les positions des points GPS par des points jaunes.

Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude GPS (m)	Altitude MNS (m)	Delta alti GPS/MNS (m)
6667654	839701	353.0	360.2	-7.22
6666688	841744	361.8	361.9	-0.03
6667668	843158	327.9	333.9	-5.98
6666554	842695	246.4	246.2	0.26
6665425	843640	214.7	214.7	0.00
6664488	843599	209.4	207.9	1.53
6664662	842158	232.8	232.8	0.05
6665592	842292	240.8	239.2	1.57
6665545	842233	244.0	243.7	0.32
6665842	841686	335.9	334.2	1.70
6665450	841406	315.7	315.2	0.54
6664645	840819	252.7	252.6	0.16
6666647	839790	315.1	315.1	0.03
6666674	840546	375.5	375.4	0.04
6665687	840150	304.1	303.9	0.22
6665592	840715	331.7	331.8	-0.17
6664589	839941	285.8	285.6	0.22
6664174	840279	242.7	242.6	0.11
6664584	839102	293.6	290.6	3.05
6663415	839576	244.9	244.9	0.03
6663421	841110	229.8	229.7	0.09
6663579	842042	225.1	224.7	0.47
Moyenne				-0.14
Écart-type				2.24

Tableau A-2 Liste des positions GPS utilisées pour la calibration et la détermination de la précision du MNE sur le versant de Cheilly-lès-Maranges.

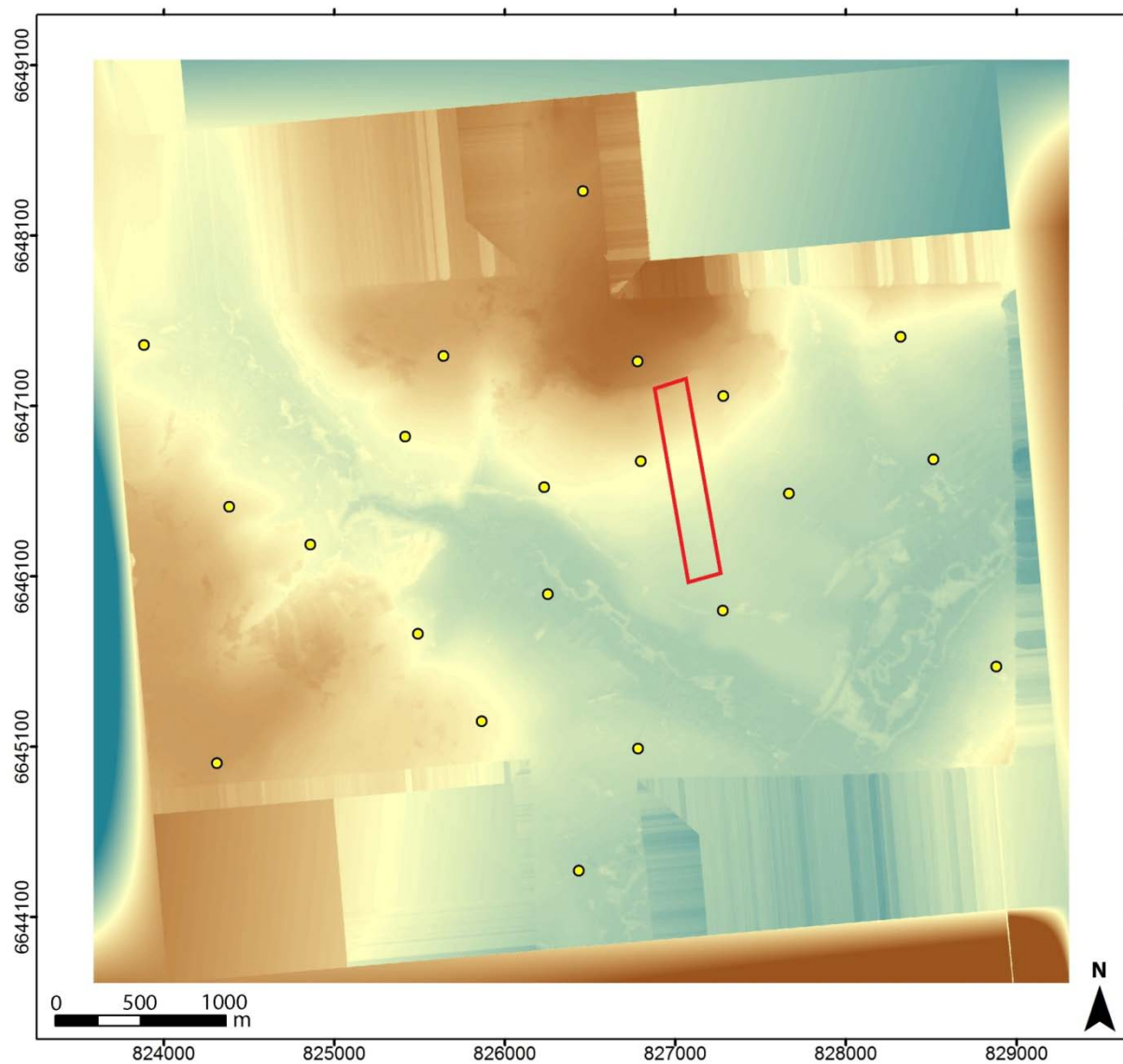


Figure A.2 MNE calculé sur le versant de Cheilly-lès-Maranges, les positions des points GPS sont représentées par des points jaunes et le secteur d'étude par un encadré rouge.

Annexe 2 Analyses de sol

L'ensemble des analyses réalisées sur les prélèvements de surface et sur les sondages à la tarière pour les trois secteurs étudiés sont présentés sous forme de tableaux.

La dénomination « C » correspond au versant de Couchey, « AC » à celle d'Aloxe-Corton et « MAR » à celle de Cheilly-lès-Maranges.

Numéro Prélèvement	Longitude m	Latitude m	Cailloux %	Graviers %	Fines %	C _{org} g/100 g	N _{tot} g/100 g	C/N	CaCO ₃ _{tot} g/100 g	Colorimétrie		
										L*	a*	b*
C_1	848786	6685744	38	24	37	3.71	0.21	17.8	16	64.0	12.7	30.7
C_2	848830	6685835	10	33	57	2.46	0.21	11.5	16	60.6	16.1	33.6
C_3	848838	6685785	28	25	47	2.97	0.19	15.3	36	62.3	14.5	33.2
C_4	848858	6685734	17	25	57	3.41	0.26	13.2	14	62.3	14.5	33.2
C_5	848872	6685821	15	28	57	4.22	0.19	21.7	23	61.6	15.2	32.9
C_6	848903	6685693	33	17	50	2.99	0.21	14.1	8	58.0	19.5	36.3
C_7	848910	6685808	9	23	68	3.41	0.23	14.5	10	59.6	15.1	32.5
C_8	848969	6685790	15	17	68	3.04	0.20	15.0	13	58.5	18.7	35.0
C_9	848973	6685747	17	20	63	2.66	0.17	15.6	11	61.4	13.8	33.1
C_10	849054	6685660	31	24	45	2.43	0.16	14.9	18	61.6	15.3	33.6
C_11	849082	6685747	42	11	47	3.12	0.20	15.6	11	55.1	13.0	30.0
C_12	849107	6685712	29	17	54	2.91	0.21	13.6	10	62.6	17.8	34.8
C_13	849144	6685706	18	9	74	3.16	0.22	14.4	4	54.0	16.2	31.0
C_14	849171	6685593	10	15	75	2.58	0.18	14.1	21	60.9	14.9	33.3
C_15	849193	6685683	13	13	74	2.34	0.17	13.8	12	64.5	12.1	32.0
C_16	849198	6685700	10	17	73	2.06	0.18	11.4	22	65.3	14.3	33.8
C_17	849268	6685568	9	8	82	1.41	0.11	12.7	16	67.0	13.3	35.5
C_18	849285	6685666	12	13	75	1.91	0.14	13.2	8	55.6	14.0	32.2
C_19	849375	6685628	0	2	98	1.31	0.09	14.6	0	65.2	11.5	33.6
C_20	849447	6685529	6	3	90	2.05	0.15	13.8	1	70.3	13.6	34.7
C_21	849449	6685594	1	2	97	1.71	0.12	14.0	0	63.5	10.7	31.4
C_22	849528	6685541	7	5	90	2.05	0.13	15.4	3	65.2	11.7	32.6

La dénomination "Fines" correspond à la fraction granulométrique Argile_Limon_Sable

Numéro sondage	Longitude m	Latitude m	Profondeur cm	Type d'horizon RP 2008	C _{org} g/100 g	N _{tot} g/100 g	C/N	pH eau	CaCO _{tot} g/100 g	Fer libre g/100g	Granulométrie					Texture GEPPA
											A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)	
C_01	848830	6685835	0-20	LA	2.56	0.15	17.3	8.10	18.0	1.69	35.7	31.1	15.4	4.5	13.3	Als
C_02	848872	6685821	20-50	Sca	2.17	0.10	21.3	8.23	34.4	1.36	30.5	29.7	13.7	7.6	18.5	LAS
			0-25	LAc	2.40	0.13	18.4		20.7							
C_03	848910	6685808	25-45	Sca	1.40	0.10	14.4		17.2							
			0-30	LA	2.66	0.17	15.3		12.8							
C_04	848969	6685790	10-30	LA	1.95	0.16	12.5	8.05	10.8		41	25.9	16.7	6.5	9.9	A
C_05	849082	6685747	10-30	LA	2.15	0.14	15.0	8.10	10.4	2.55	45.2	22.9	16.4	5.7	9.8	A
C_06	849107	6685712	0-20	LA	2.08	0.15	13.8		6.8							
C_07	849144	6685706	20-45	S	1.67	0.12	14.4		8.5							
			0-30	LA	2.29	0.18	13.1		4.2							
C_08	849193	6685683	0-40	LA	2.15	0.16	13.6		9.2							
C_09	849198	6685700	40-50	Sca	2.17	0.12	18.2		20.1							
			0-20	LA	1.50	0.14	10.6		25.2							
C_10	849285	6685666	30-35	Sca	1.53	0.08	18.1		22.5							
			35-40	Sca/C	0.83	0.04	21.8		41.2							
C_11	849375	6685628	0-30	LAc	1.13	0.08	13.8	8.06	5.2	2.79	47.3	22.9	15.8	7.5	6.5	A
			30-40	S	0.87	0.05	17.1	8.11	16.4	2.79	42.8	21.3	15.1	8.1	12.7	A
C_12	849449	6685594	40-50	Sca/C	0.90	0.04	25.2	8.39	43.1	2.52	30.5	20.9	11.5	9.9	27.2	Als
			50-70	Cca	1.19	0.01	81.5	8.60	59.0	1.90	18.6	19.2	8.6	8.8	44.8	Sal
C_11	849375	6685628	0-25	LAc	0.92	0.07	13.9		0.0							
			25-50	Sci g	0.49	0.03	17.3		0.0							
C_12	849449	6685594	50-90	Sci g/C	0.35	0.02	14.7		6.5							
			90-125	C g	0.33	0.02	16.2		13.2							
C_12	849449	6685594	0-20	LAc	1.24	0.09	13.3	7.45	0.0	0.10	28	21.5	25.5	18.6	6.4	LAS
			20-40	Sci g	0.79	0.05	15.4	7.74	0.0	0.11	32.5	22.8	24.4	15.8	4.5	Als
C_12	849449	6685594	40-65	Sci g/C	0.41	0.03	13.9	7.65	0.0	0.11	39	23.1	20	13.7	4.2	Als
			65-110	Cci g	0.29	0.03	10.3	7.47	0.0	0.12	41.5	18.7	20	17	2.8	Als

Numéro sondage	Colorimétrie				Minéralogie des argiles					
	L*	a*	b*	Munsell	C (%)	CV (%)	V (%)	IS (%)	I (%)	K (%)
C_01	67.2	13.0	31.4	10 YR 4/4	T	0	26	44	22	T
	71.9	12.5	30.9	10 YR 4/4	T	13	24	35	21	T
C_02	64.8	14.4	32.8	10 YR 4/4						
	62.4	16.4	34.6	10 YR 4/6						
C_03	59.3	11.1	27.5	10 YR 4/4						
C_04	58.6	17.0	33.2	7,5 YR 4/4	T	15	29	27	21	T
C_05	58.9	15.5	32.0	10 YR 4/4	T	0	T	66	27	T
C_06	62.2	16.5	33.9	7,5 YR 4/4						
	59.2	17.4	34.3	7,5 YR 4/6						
C_07	53.6	14.2	30.4	7,5 YR 4/4						
C_08	61.8	10.4	29.7	10 YR 4/3						
	66.0	11.6	30.6	10 YR 4/4						
C_09	68.6	12.7	31.8	10 YR 4/4						
	72.5	14.1	35.3	10 YR 4/6						
	82.7	11.9	36.3	10 YR 6/8						
C_10	62.3	12.5	31.8	7,5 YR 4/4	T	6	20	37	30	T
	65.8	14.8	34.9	7,5 YR 5/6	T	7	28	43	18	T
	73.3	13.5	38.6	10 YR 6/8	0	0	23	47	29	T
	77.8	11.2	36.6	10 YR 6/8	T	0	17	59	24	0
C_11	70.5	14.7	38.8	10 YR 4/6						
	81.4	14.7	42.6	2,5 Y 6/4						
	79.2	8.9	35.0	2,5 Y 6/4						
	81.6	8.9	34.5	2,5 Y 7/4						
C_12	62.7	10.6	31.9	10 YR 5/4	6	9	T	51	19	11
	67.6	11.8	34.4	10 YR 5/4	T	11	7	41	26	11
	64.5	13.4	36.6	10 YR 4/6	T	10	17	44	14	10
	76.4	11.7	37.3	10 YR 5/4	T	0	7	53	24	12

Numéro Prélèvement	Longitude m	Latitude m	Cailloux %	Graviers %	Fines %	C _{org} g/100 g	N _{tot} g/100 g	C/N	CaCO ₃ tot g/100 g	Colorimétrie		
										L*	a*	b*
AC_1	841031	6665259	17	16	70	2.88	0.12	24.0	37	66.2	9.5	29.1
AC_2	841047	6665226	15	21	67	2.30	0.11	21.5	39	68.3	13.7	33.6
AC_3	841114	6665191	13	22	68	1.83	0.10	18.8	49	75.8	9.8	28.6
AC_4	841110	6665109	9	23	70	1.98	0.09	21.4	28	64.0	15.6	33.9
AC_5	841142	6665144	21	20	63	3.21	0.12	27.8	27	60.8	12.9	30.2
AC_6	841161	6665112	13	34	58	3.01	0.12	25.4	31	62.6	13.2	31.1
AC_7	841233	6665080	18	15	70	2.04	0.11	19.1	17	61.8	17.2	35.6
AC_8	841193	6665040	19	17	67	2.35	0.12	19.3	14	61.9	13.9	32.6
AC_9	841306	6664967	20	12	71	1.41	0.07	20.5	13	64.0	22.1	42.3
AC_10	841336	6664936	12	13	76	2.12	0.13	16.7	5	56.8	20.7	39.5
AC_11	841394	6664881	19	10	73	1.46	0.10	15.0	1	57.8	22.1	39.6
AC_12	841429	6664853	23	22	60	2.25	0.14	16.2	12	59.1	18.1	36.9
AC_13	841479	6664811	25	11	67	1.79	0.12	15.1	1	56.0	16.1	36.0
AC_14	841537	6664761	42	14	50	1.75	0.12	15.0	1	58.0	15.5	35.6
AC_15	841594	6664718	26	10	66	1.81	0.12	15.7	0	59.6	11.2	31.7
AC_16	841715	6664642	19	3	79	1.47	0.10	14.7	0	59.6	13.3	35.9
AC_17	841731	6664583	16	8	77	1.45	0.10	14.2	0	61.7	11.5	32.2
AC_18	841792	6664556	9	2	88	1.59	0.11	14.8	1	57.1	11.7	32.8

La dénomination "Fines" correspond à la fraction granulométrique Argile_Limon_Sable

Numéro sondage	Longitude m	Latitude m	Profondeur cm	Type horizon	C _{org} g/100 g	N _{tot} g/100 g	C/N	pH eau	CaCO ₃ tot g/100 g	Fer libre g/100 g	Granulométrie				Texture GEPPA
											A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	
AC_1	841030	6665259	0-5	LA ₁ ca	2.69	0.18	15.4	8.01	39	1.35					
			5-30	LA ₂ ca	0.28	0.09	3.0	8.36	57	1.37	20.9	22.7	17	15.7	23.7 LAS
			30-65	Sca	1.19	0.05	24.9	8.38	59	1.07	19.3	29.6	14.6	15.1	21.4 LAS
AC_2	841047	6665226	0-25	LAca	1.67	0.11	15.4		40						
			25-50	Sca	0.44	0.06	7.5		60						
			50-110	S/C ₁ ca	0.00	0.00	-		70						
			110-150	S/C ₂ ca	0.00	0.00	-		65						
AC_3	841114	6665191	0-10	LA ₁ ca	0.78	0.09	9.0		54						
			10-30	LA ₂ ca	0.12	0.05	2.6		55						
AC_4	841141	6665144	0-5	LA ₁ ca	1.15	0.12	10.0		40						
			5-20	LA ₂ ca	0.68	0.07	9.7		37						
			20-50	S	0.66	0.06	11.6		16						
			50-105	S/Cca	0.20	0.01	27.4		70						
AC_5	841160	6665112	0-10	LAca	0.92	0.12	7.9		44						
			10-40	Sca	0.62	0.05	11.9		34						
AC_6	841233	6665080	0-50	A	0.91	0.09	10.0	8.06	20	2.55	31.6	17.4	19.6	17.9	13.5 Als
			50-70	S	0.77	0.07	11.0	8.12	18	2.12	32	18.5	21.2	17.3	11 Als
AC_7	841307	6664967	0-45	A	0.84	0.08	10.1	8.07	16	3.35	37.5	17	18.7	16.7	10.1 Als
			45-60	Sca	0.00	0.03	-	8.00	49	2.01	32.1	15.5	19.2	19	14.2 Als
AC_8	841394	6664881	0-10	LAci	1.65	0.12	13.5	7.97	3	4.31	40.9	20.2	18	14.7	6.2 Als
			10-60	Sci	0.69	0.05	13.1	7.91	0	3.7	44.5	25.3	17.6	10.1	2.5 A
AC_9	841479	6664811	0-40	Aci	1.16	0.09	13.0		0						
			40-60	Sci	0.72	0.05	13.2		0						
AC_10	841537	6664761	0-35	Aci	1.26	0.09	14.1	7.66	0	2.63	35.2	23.3	23.1	13.3	5.1 Als
			35-60	S ₁ ci	0.44	0.04	10.7	7.55	0	3.6	56.3	15.1	16.6	9.1	2.9 A
			60-120	S ₂ ci	0.13	0.02	8.5	7.51	0	2.57	44.6	14.3	22.5	16.1	2.5 A
			120-180	Sci g	0.07	0.01	4.6	7.23	0	3.54	46.6	15.6	20.9	15.1	1.8 A
			180-205	Sci g/C	0.07	0.01	4.7	6.41	0	3.18	45.1	16.2	21.9	14.9	1.9 A

Numéro sondage	Longitude m	Latitude m	Profondeur cm	Type horizon	C _{org} g/100 g	N _{tot} g/100 g	C/N	pH eau	CaCO ₃ tot g/100 g	Fer libre g/100 g	Granulométrie				Texture	
											A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)		
AC_11	841595	6664717	0-25	Aci	1.31	0.09	16.4		0							
			25-80	S ₁ ci	0.48	0.04	14.1		0							
			80-145	S ₂ ci g	0.17	0.02	8.5		0							
			145-185	Sci g/C	0.13	0.01	14.8		0							
AC_12	841715	6664642	0-25	LAc _i	0.91	0.07	12.9		0							
			25-55	Aci	0.40	0.03	12.0		0							
			55-85	Sca	0.00	0.02	-		38							
			85-175	S/C g	0.00	0.01	-		38							
			175-200	Cca g	0.00	0.01	-		23							
AC_13	841791	6664556	0-30	LAc _i	0.81	0.07	11.0	8.04	2	1.99	36.2	18.8	25.4	14.2	5.4	Als
			30-70	Sca	0.00	0.02	-	8.23	23	5.82	48.9	18.7	15.4	7.1	9.9	A
			70-110	S/C g k	0.00	0.01	-	8.29	24	4.29	47.8	17.8	13.9	6.2	14.3	A
			110-155	Cca g	0.00	0.02	-	8.29	29	1.78	45.7	20.7	13.2	5.8	14.6	A

Numéro sondage	Colorimétrie				Minéralogie des argiles					
	L*	a*	b*	Munsell	C (%)	CV (%)	V (%)	IS (%)	I (%)	K (%)
AC_1	77.2	13.7	35.4	10 YR 4/3	T	23	T	42	28	T
	79.3	13.6	37.3	10 YR 5/3	T	27	9	41	21	T
	86.0	9.4	34.6	10 YR 6/6	0	21	10	49	20	T
AC_2	74.7	16.9	38.0	7,5 YR 4/4						
	83.0	14.0	35.3	10 YR 5/4						
	94.4	12.9	43.0	10 YR 7/6						
	95.9	9.6	33.8	2,5 Y 6/4						
AC_3	77.9	11.5	32.6	7,5 YR 4/4						
	81.5	12.9	34.6	7,5 YR 5/4						
AC_4	66.7	13.4	32.6	7,5 YR 4/3						
	71.3	16.5	37.0	7,5 YR 4/4						
	66.0	19.5	38.4	5 YR 4/6						
	89.8	12.2	36.6	10 YR 6/4						
AC_5	67.7	14.7	33.7	7,5 YR 4/3						
	73.7	19.6	41.1	5 YR 4/4						
AC_6	65.3	16.8	36.7	5 YR 4/3	0	13	12	40	35	0
	68.5	20.4	40.8	5 YR 4/4	T	17	19	38	22	T
AC_7	71.7	20.4	40.9	5 YR 4/4	0	11	0	52	35	T
	86.0	17.5	42.3	10 YR 6/6	0	0	0	73	26	T
AC_8	66.7	19.0	39.3	5 YR 4/4	T	0	12	47	35	T
	71.8	21.0	44.0	5 YR 5/4	T	0	30	46	19	T
AC_9	66.2	15.9	37.3	5 YR 4/3						
	69.5	16.3	39.2	5 YR 4/4						
AC_10	67.4	15.2	38.0	7,5 YR 4/3	T	0	0	58	36	T
	74.1	18.3	48.3	7,5 YR 5/6	T	0	0	79	17	T
	83.4	17.5	51.8	7,5 YR 6/6	T	0	0	83	13	T
	77.2	17.4	51.3	7,5 YR 5/6	T	0	0	78	16	T
	76.1	15.7	46.9	7,5 YR 5/6	T	0	0	70	24	T
AC_11	62.0	10.6	31.6	7,5 YR 4/3						
	61.6	14.3	36.1	7,5 YR 4/4						
	72.2	14.9	45.6	7,5 YR 5/6						
	82.6	6.7	30.6	2,5 Y 6/3						
AC_12	65.2	12.0	36.2	7,5 YR 4/3						
	72.2	12.5	41.7	10 YR 5/6						
	78.4	11.1	40.6	10 YR 6/8						
	83.6	9.4	40.9	2,5 Y 7/2						
	90.1	3.5	23.3	2,5 Y 6/4						
AC_13	67.7	9.8	35.3	10 YR 4/4	T	0	0	75	19	T
	72.6	16.3	52.7	10 YR 5/6	T	0	0	92	T	T
	75.1	15.2	51.5	10 YR 5/8	T	0	0	85	10	T
	86.0	9.7	41.1	10 YR 6/8	T	0	0	88	7	T

Numéro prélèvement	Longitude m	Latitude m	Cailloux %	Graviers %	Fines %	C _{org} (%) g/100 g	N _{tot} g/100 g	C/N	CaCO ₃ tot g/100 g	Colorimétrie		
										L*	a*	b*
MAR_1	826993	6647196	22	23	55	2.02	0.13	15.9	26.4	68.9	12.2	32.6
MAR_2	827049	6647141	14	17	70	2.53	0.15	17.3	18.2	70.2	11.1	31.9
MAR_3	826961	6647104	17	24	59	2.43	0.12	20.6	38.7	69.4	13.1	33.1
MAR_4	827016	6647061	22	27	52	3.56	0.16	21.6	38.7	69.4	13.1	33.1
MAR_5	826981	6647031	21	20	59	1.94	0.12	16.1	26.1	72.5	12.1	35.4
MAR_6	827076	6646993	20	18	63	1.53	0.12	13.1	17.0	68.1	14.9	35.7
MAR_7	827067	6646939	15	22	63	2.28	0.16	13.9	24.7	69.1	12.4	33.9
MAR_8	827062	6646878	28	14	58	4.72	0.31	15.1	13.7	67.7	11.4	31.5
MAR_9	826983	6646874	12	17	71	2.83	0.18	16.2	7.4	69.7	11.8	33.9
MAR_10	827032	6646766	14	23	63	5.39	0.31	17.2	15.6	64.1	11.0	29.2
MAR_11	827069	6646699	13	5	82	2.32	0.14	17.0	4.1	69.4	10.0	33.4
MAR_12	827017	6646644	2	5	93	3.95	0.27	14.5	6.2	66.3	9.8	30.6
MAR_13	827081	6646585	6	8	86	1.94	0.12	16.1	7.3	72.8	11.5	36.7
MAR_14	827097	6646465	9	11	80	1.58	0.11	14.1	4.2	72.6	11.3	36.4
MAR_15	827057	6646388	6	9	85	1.94	0.13	15.0	1.4	71.8	12.4	36.9
MAR_16	827116	6646374	21	14	65	1.74	0.13	12.9	4.8	69.3	12.5	36.8
MAR_17	827102	6646287	14	14	72	2.05	0.14	14.9	7.8	70.5	13.8	37.6
MAR_18	827070	6646263	9	9	81	1.70	0.13	13.5	1.5	69.4	12.3	36.4
MAR_19	827075	6646205	7	11	82	2.37	0.15	15.8	1.9	70.5	12.8	37.9
MAR_20	827114	6646146	9	10	81	1.98	0.12	17.0	6.7	68.3	13.3	39.1
MAR_21	827064	6646143	0	1	99	3.11	0.21	14.5	0.6	66.8	11.5	33.9

La dénomination "Fines" correspond à la fraction granulométrique Argile_Limon_Sable

Numéro sondage	Longitude m	Latitude m	Profondeur cm	Type horizon	C _{org} g/100 g	N _{tot} g/100 g	C/N	pH eau	CaCO ₃ tot g/100 g	Fer libre g/100 g	Granulométrie				Texture
											A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	
MAR_1	826994	6647199	0-30	Laca	0.31	0.10	3.0		26						
			30-120	S	0.00	0.02	-		16						
			120-145	Cg	0.00	0.01	-		14						
MAR_2	826958	6647108	0-20	Laca	0.38	0.12	3.2	8.05	41	2.12	28.6	20.4	12.9	14.4	23.7 LAS
			20-50	Sca	0.00	0.08	-	8.17	55	2.00	25.6	19	11.2	13	31.2 LAS
			50-80	S/Cca	0.00	0.01	-	8.49	80	0.94	15.4	19.5	10.5	14.3	40.3 Sal
MAR_3	826977	6647034	0-25	Laca	0.21	0.05	3.9		32						
			25-80	S	0.00	0.01	0.0		8						
			80-115	Cg	0.00	0.01	0.0		14						
MAR_4	826979	6646876	0-40	Laci	0.79	0.09	8.5	8.05	10	3.53	47.4	23.2	9.8	8.6	11 A
			40-85	Sci	0.75	0.07	10.1	7.82	5	3.80	55.6	22.7	9.3	6.9	5.5 A
			85-105	Cca	0.00	0.05	-	8.15	31	3.38	40	22.4	9.2	7	21.4 Als
			105-165	Cca g	0.00	0.02	-	8.23	19	3.82	48.7	29.5	9.3	4.7	7.8 A
MAR_5	827031	6646767	0-30	LA	1.07	0.11	9.5		18						
			30-80	Sca	0.10	0.07	1.3		21						
			80-110	Cca g	0.00	0.04	-		57						
MAR_6	827067	6646699	0-40	LA	0.92	0.09	10.2	8.02	6	2.79	50.4	24.5	10.8	9.8	4.5 A
MAR_7	827079	6646586	0-40	Laci	1.24	0.10	12.2		5						
			40-60	Sci g	0.47	0.05	10.3		7						
			60-80	Sca k g	0.00	0.02	-		25						
			80-85	Cca g	0.00	0.02	-		21						
MAR_8	827098	6646465	0-20	Laci	0.70	0.08	8.7		5						
			20-70	Sci g	0.50	0.06	7.7		3						
MAR_9	827059	6646392	0-30	Laci	1.34	0.13	10.1		5						
			30-60	Sci g	0.60	0.07	8.1		5						
MAR_10	827070	6646260	0-30	Laci	1.06	0.11	9.8	7.99	3	4.11	48.6	24.3	10.8	8.8	7.5 A
			30-65	Sci g	0.65	0.07	8.9	8.13	6	4.45	52	22.3	10	8.3	7.4 A
MAR_11	827064	6646142	0-20	Laci	1.53	0.13	11.9	7.67	3	3.82	49.2	26.9	11.7	7.2	5 A
			20-65	Sci	0.95	0.10	9.6	7.92	3	4.14	51.3	22.1	11	9.1	6.5 A
			65-105	Sci g	0.54	0.06	8.9	7.88	3	4.71	53.7	21.3	10	6.9	8.1 A

Numéro sondage	Colorimétrie				Minéralogie des argiles					
	L*	a*	b*	Munsell	C (%)	CV (%)	V (%)	IS (%)	I (%)	K (%)
MAR_1	69.9	10.6	33.8	2,5 Y 4/4						
	78.1	8.1	32.2	2,5 Y 5/4						
	77.6	8.6	33.4	2,5 Y 4/4						
MAR_2	67.2	12.9	33.7	10 YR 4/4	5	0	16	45	29	5
	69.0	13.3	34.0	10 YR 5/4	6	0	14	48	28	T
	82.0	9.7	32.6	2,5 Y 6/4	T	0	19	43	35	T
MAR_3	73.7	11.8	38.8	10 YR 5/6						
	78.4	10.0	38.8	2,5 Y 5/4						
	78.3	9.8	38.5	2,5 Y 5/4						
MAR_4	73.4	13.5	38.2	10 YR 5/4	8	17	12	38	14	10
	70.8	15.0	37.9	10 YR 4/4	7	13	12	38	19	11
	75.6	13.3	38.2	2,5 Y 5/4	8	11	13	35	21	12
	79.6	10.4	39.8	2,5 Y 5/4	7	8	13	39	19	14
MAR_5	70.1	12.9	36.2	10 YR 4/4						
	71.0	11.2	38.6	10 YR 4/6						
	73.3	11.7	38.7	10 YR 5/6						
MAR_6	73.0	10.8	36.5	2,5 YR 4/4	7	16	15	33	20	10
MAR_7	73.3	11.5	38.6	10 YR 4/3						
	79.4	9.1	38.4	2,5 YR 4/4						
	83.9	8.6	38.7	2,5 YR 4/4						
	81.1	11.9	45.8	2,5 YR 5/4						
MAR_8	72.9	10.7	38.1	2,5 YR 5/4						
	71.6	12.2	39.6	2,5 YR 5/4						
MAR_9	59.6	9.0	31.0	10 YR 4/3						
	71.3	12.3	39.5	10 YR 4/4						
MAR_10	69.2	11.0	36.9	10 YR 4/3	9	16	14	37	13	12
	68.6	10.4	37.1	10 YR 5/3	9	8	15	38	18	13
MAR_11	67.4	10.4	34.6	2,5 YR 4/4	8	32	11	27	14	9
	69.7	10.5	36.4	10 YR 4/4	10	11	22	31	16	10
	62.1	9.3	32.3	2,5 YR 4/3	7	12	22	35	14	9

Poznań, 09-01-2013

Report

on C-14 dating in the Poznań Radiocarbon Laboratory

Customer: **CHEVIGNY Emmanuel**
UMR CNRS 6298 ARTEHIS

6 Bd Gabriel
21000- DIJON
France

Job no.: 6792/12

Sample name	Lab. no.	Age 14C	Remark
--------------------	-----------------	----------------	---------------

PV_SOL_001	Poz-51653	1930 ± 30 BP	
------------	-----------	---------------------	--

Comments: Results of calibration of 14C dates enclosed

Head of the Laboratory

Prof. dr hab. Tomasz Goslar

Results of calibration of ^{14}C dates – order 6792/12.

Given are intervals of calendar age, where the true ages of the samples encompass with the probability of ca. 68 % and ca. 95 %. The calibration was made with the OxCal software.

OxCal v4.1.5 Bronk Ramsey (2010); r:5

Atmospheric data from Reimer et al (2009);

PV SOL_001 R_Date(1930,30)

68.2% probability

28AD (8.6 %) 39AD

50AD (41.9 %) 89AD

101AD (17.7 %) 123AD

95.4% probability

3AD (95.4 %) 131AD

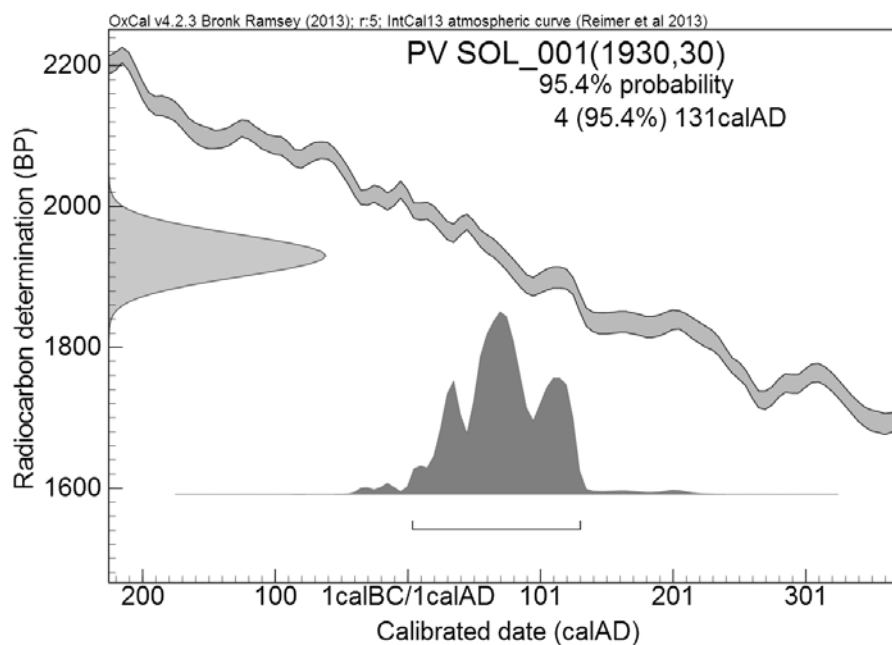


Figure A.3 Graphique illustrant la calibration de la datation radiométrique réalisée à partir du logiciel OxCal.