

Résumé

L'évaluation de la diversité du sol dans un paysage permet une prise de décisions adaptée quant à son utilisation durable. Pourtant, en Suisse, il n'existe pas de carte à large échelle des sols au niveau national. Dans ce contexte, ce projet universitaire en collaboration avec la BFH-HAFL cherche à évaluer la répartition spatiale du régime hydrique des sols agricoles de la région de Schwarzenburg et cherche à définir les périodes d'engorgement potentiel.

La classification des sols suisses (KLABS) a été utilisée pour déterminer la classe de régime hydrique. Sur la base des données liées aux variables environnementales (obtenues à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et du geocover) et des données pédologiques de terrain, leurs contributions ont été testées statistiquement par une analyse factorielle des données mixtes (AFDM) puis par une classification ascendante hiérarchique (CAH), afin de réaliser des groupes des sols sur le terrain. Ces derniers ont permis d'évaluer la pertinence du choix des variables environnementales dans la répartition spatiale du régime hydrique. Les corrélations entre les variables retenues et le type de régime hydrique ont été testées par régression linéaire (ANOVA). Finalement, une carte prédictive de la profondeur d'apparition des traces d'hydromorphie a été réalisée par random forest (forêts d'arbres décisionnels). La pertinence d'utilisation des taches d'oxydation comme seul indicateur de l'hydromorphie a été évaluée par ANOVA entre la topographie (MNT) et les classes de régime hydrique (nappe permanente ou temporaire). Nos résultats montrent que les facteurs influençant significativement la répartition spatiale du régime hydrique sont la pente, l'indice multirésolution d'aplatissement de fond de vallée (MRVBF), l'altitude et la géologie. L'intensité des taches d'oxydation est statistiquement corrélée avec la teneur en eau (p -value < 0.001), le taux de limon (p -value de 0.044) et la densité apparente (p -value de 0.042) des horizons.

La topographie seule ne suffit pas pour différencier une nappe permanente d'une nappe temporaire. Ce travail montre qu'il est possible d'utiliser des cartes en libre-service et des analyses de terrain pour établir un modèle prédictif de la répartition spatiale du régime hydrique. Cependant, l'utilisation de prédicteurs indépendants de la profondeur d'apparition des traces d'oxydation est requise pour permettre de différencier une nappe permanente d'une nappe saisonnière. Il est aussi nécessaire de tester le modèle prédictif en effectuant des sondages qui permettront par la suite d'implémenter et d'améliorer les prédictions.

Mots-clés : Cartographie ; régime hydrique ; sol agricole ; modélisation ; taches d'oxydation

Summary

Assessing soil diversity in a landscape allows appropriate decisions to be made about its sustainable use. However, in Switzerland, there is no large-scale soil map at the national level. In this context, this university project in collaboration with BFH-HAFL aims to assess the spatial distribution of the water regime of agricultural soils in the Schwarzenburg region and to define periods of potential overcrowding.

The Swiss Soil Classification (KLABS) was used to determine the water regime class. On the basis of data related to environmental variables (obtained from the digital terrain model and geocover) and soil field data, their contributions were statistically tested by a mixed data factor analysis (AFDM) and then by a hierarchical bottom-up classification, in order to produce soil groups in the field. The latter made it possible to assess the relevance of the choice of environmental variables in the spatial distribution of the water regime. Correlations between the selected variables and the type of water regime were tested by linear regression (ANOVA). Finally, a predictive map of the depth of appearance of hydromorphic traces was produced by random forest. The relevance of using oxidation spots as the only indicator of hydromorphy was evaluated by ANOVA between topography (MNT) and water regime classes (permanent or temporary groundwater). Our results show that the factors significantly influencing the spatial distribution of the water regime are the slope, the multi-resolution valley bottom flattening index (MRVBF), the altitude and the geology. The intensity of the oxidation spots is statistically correlated with the water content (p-value < 0.001), silt rate (p-value of 0.044) and bulk density (p-value of 0.042) of the horizons.

Topography alone is not enough to differentiate between a permanent and a temporary slick. This work shows that it is possible to use open access maps and field analyses to establish a predictive model of the spatial distribution of the water regime. However, the use of predictors independent of the depth of appearance of oxidation traces are required to differentiate a permanent slick from a seasonal slick. It is also necessary to test the predictive model by conducting surveys that will then implement and improve predictions.

Key words : Cartography ; pedology ; hydrological regimes ; agricultural soils ; modelization

Table des matières

SUMMARY.....	2
TABLE DES MATIERES.....	3
LISTE DES FIGURES.....	5
1 LISTE DES ABREVIATIONS.....	8
1 INTRODUCTION.....	9
1.1 ETAT ET ENJEUX DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS EN SUISSE.....	9
1.2 UN ASPECT FONCTIONNEL DU SOL - LE REGIME HYDRIQUE ET SA CLASSIFICATION.....	13
2 PROBLEMATIQUE.....	16
2.1 QUESTIONS ET HYPOTHESES.....	16
3 SITE D'ETUDE.....	18
3.1 GEOLOGIE.....	19
4 MATERIEL ET METHODES.....	23
4.1 TERRAIN.....	24
4.1.1 Campagne de prospection.....	24
4.1.2 Echantillonnage préférentiel.....	25
4.1.3 Echantillonnage stratifié.....	26
4.2 ANALYSE DE LABORATOIRE.....	28
4.2.1 pH.....	28
4.2.2 Teneur en matière organique.....	28
4.2.3 Granulométrie.....	28
4.2.4 Densité apparente et porosité totale.....	28
4.3 TRAITEMENT DES DONNEES.....	28
4.3.1 Analyses de l'hypothèse 1.....	29
4.3.2 Analyse de l'hypothèse 2.....	31
5 RESULTATS.....	32
5.1 ANALYSES STATISTIQUES ET SPATIALES.....	32
5.1.1 Classification ascendante hiérarchique sur les résultats de l'AFDM.....	35
5.1.2 Régression linéaire.....	37
5.1.3 Résumé de la répartition spatiale des différents groupes et de leur classe de régimes hydriques selon les variables environnementales.....	39
5.1.4 Carte de prédiction.....	41
5.2 SONDES CAPACITIVES ET DONNEES DES PROFILS PEDOLOGIQUES.....	41
5.2.1 Teneur en eau volumique et intensité des traces d'hydromorphie.....	44
6 DISCUSSION.....	45
6.1 VERIFICATION DE L'HYPOTHESE I.....	45
6.1.1 Répartition spatiale du régime hydrique en fonction de la géologie.....	45

6.1.2	<i>Répartition spatiale du régime hydrique en fonction de la topographie.....</i>	47
6.1.3	<i>Répartition spatiale du régime hydrique en fonction des autres facteurs : le temps, le climat et le mode d'utilisation.....</i>	50
6.1.4	<i>Apport et limite de la première hypothèse.....</i>	50
6.2	HYPOTHESE II.....	52
6.2.1	<i>Discussion et limite des descripteurs liés au régime hydrique.....</i>	52
6.2.2	<i>Différencier une nappe temporaire ou permanente.....</i>	53
7	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	55
8	REMERCIEMENT.....	57
9	BIBLIOGRAPHIE.....	58
ANNEXE A.	MATRICE DES DONNEES.....	62
ANNEXE B.	FICHE DE LA FAL VIERGE ET CLE DE DONNEES POUR FICHE DE PROFIL ..	63
ANNEXE C.	LEGENDE DES FICHES PEDOLOGIQUES.....	64
ANNEXE D.	CARTE CONCEPTUELLE	65
ANNEXE E.	PROTOCOLE DE MESURE DE LA DENSITE APPARENTE ET POROSITE.....	67
ANNEXE F.	RESULTATS COMPLEMENTAIRES ACP ET AFDM.....	68

Liste des figures

FIGURE 1 : ZONE D'ETUDE SITUEE AU SUD-OUEST DE SCHWARZENBURG, FOND DE CARTE TIRE DE GEO.ADMIN.CH.....	18
FIGURE 2 : PHOTO PRISE SUR LE TERRAIN EN OCTOBRE 2019 REPRESENTANT LA PARTIE SUD DU TERRAIN. LE SITE EST CONSTITUE DE COLLINES ET D'ILOTS FORESTIERS SUR LES SOMMETS.....	19
FIGURE 3 : SCHEMA REPRESENTANT LE PROFIL GEOLOGIQUE DE LA MOLASSE AU SUD-OUEST DE LA REGION DE SCHWARZENBURG, TIRE DU LIVRE « GEOLOGIE DER UMGEBUNG VON SCHWARZENBURG » (FRASSON, 1947).....	20
FIGURE 4 : PROFIL TRANSVERSAL ENTRE NIEDERSCHERLI ET GIEBELEGG, TIRÉ DU LIVRE « GEOLOGIE DER UMGEBUNG VON SCHWARZENBURG » (FRASSON, 1947).....	20
FIGURE 5 : CARTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE FAIT SUR QGIS, TIRE DU GEOCOVER (MAP.GEO.ADMIN.CH, ATLAS GEOLOGIQUE AG25).....	21
FIGURE 6 : PHOTO PRISE EN OCTOBRE 2019, SUR LES FALAISES AU NORD-OUEST DU TERRAIN D'ETUDE. DES BANDES DE MOLASSE MARNEUSE (A) SONT INTERCALEES ENTRE LA MOLASSE GRESEUSE (B).....	22
FIGURE 7 : CARTE DE LA DERNIERE GLACIATION DU WÜRM. LA ZONE D'ETUDE SE TROUVE DANS UNE FRANGE ENTRE LE GLACIER DU RHONE (PARTIE DE GAUCHE) ET LE GLACIER DE L'AAR (PARTIE DE DROITE).....	22
FIGURE 8 : RECAPITULATIF DES DIFFERENTES ETAPES A REALISER DANS LE CADRE DE CE TRAVAIL AFIN D'OBTENIR UNE CARTE AU 1/5'000.....	24
FIGURE 9 : EMLACEMENT DES 20 PREMIERS SONDAGES CHOISIS A L'AIDE DES CARTES EXISTANTES, DE LA TOPOGRAPHIE, DES IMAGES AERIENNES ET DES DIFFERENTES UNITES GEOLOGIQUES RENCONTREES SUR LE TERRAIN. LA ZONE D'ETUDE EST DELIMITEE EN ROUGE.....	25
FIGURE 10 : PHOTO DU SONDAGE 51 (SOL BRUN SUR MOLASSE) REALISE SUR LE TERRAIN. L'ORDRE DU PROFIL EST CONSERVE (DE DROITE A GAUCHE SUR L'IMAGE) ET LES HORIZONS DETERMINES SELON LA TEXTURE ET LA COULEUR NOTAMMENT (PHOTO PRISE LE 08.10.2018).....	26
FIGURE 11 : A DROITE DE L'IMAGE, LA STATION AVEC LE PLUVIOMETRE ET LE PANNEAU SOLAIRE. A GAUCHE, LA SONDE HYGROMETRIQUE AVEC LE CAPUCHON BLEU, ENFONCE DANS LE SOL A UNE PROFONDEUR DE 60 CM (PHOTO PRISE LE 2.12.2018).....	27
FIGURE 12 : SCHEMA DES DIFFERENTES ETAPES DU TRAITEMENT DES DONNEES POUR L'ANALYSE SPATIALE DU REGIME HYDRIQUE DES SOLS AGRICOLES.....	30
FIGURE 13 : CONTRIBUTION DES VARIABLES A LA DIMENSION 1. LA GEOLOGIE (18.0%) LA PENTE (16.6%), LE TPI (15.3%), L'ALTITUDE (14.1%), LE MRVBF (12.7%), LE REGIME HYDRIQUE (10.3%) SONT LES VARIABLES EXPLIQUANT MAJORITAIREMENT LA REPARTITION DES DONNEES POUR LA DIMENSION 1. LA LIGNE DE REFERENCE (7.7%) (EN ROUGE) CORRESPOND A LA VALEUR ATTENDUE SI LA CONTRIBUTION DES VARIABLES ETAIT UNIFORME. 33	33
FIGURE 14 : REPRESENTATION DE LA CONTRIBUTION DES VARIABLES A LA DISTRIBUTION DES DONNEES DANS LA 2 ^{EME} DIMENSION. LA MOYENNE PONDEREE DU SABLE (21.7%) ET DU LIMON (21.6%), LE TYPE DE REGIME HYDRIQUE (16.6%), LA PROFONDEUR D'APPARITION DE G (1.4%) EXPLIQUE LE PLUS LA REPARTITION DES DONNEES POUR LA DIMENSION 2. LA LIGNE DE REFERENCE (7.7%) (EN ROUGE) CORRESPOND A LA VALEUR ATTENDUE SI LA CONTRIBUTION DES VARIABLES ETAIT UNIFORME.....	33
FIGURE 15 : LE CERCLE DE CORRELATION POUR LES VARIABLES QUANTITATIVES TESTEES A L'AIDE DE LA FONCTION FAMD DU PACKAGE « FACTORMINE ». CINQ DIMENSIONS ONT ETE CONSERVEES.....	34
FIGURE 16 : LES VARIABLES QUALITATIVES (LA GEOLOGIE TIREE DU GEOCOVER ET LE TYPE DE REGIME HYDRIQUE, SELON LES CLASSES DE LA KLABS) PROJETEES DANS LES DEUX DIMENSIONS AVEC ARS (MARAIS DRAINE), ARVM (DEBRIS DE MORAINES), ARCV (CONE DE DEBRIS DE RUISSEAU), ARVB (MOLASSE ALTEREE), M1(MOLASSE DU BURDIGALIEN), Q3S (LES GRAVIERS DU RISS) ET Q4S (ALLUVIONS FLUVIO-GLACIAIRES DU WÜRM).....	34
FIGURE 17 : RESULTAT DE LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE ETABLIE AVEC LA FONCTION « AGNES ». LES NUMEROS DE SONDAGE CORRESPONDANT A CHAQUE GROUPE, PEU LISIBLE SUR CE GRAPHE, PEUVENT ETRE LU DANS LA CARTE (FIGURE 24). L'ENCART INDIQUE LES INERTIES DU DENDROGRAMME.....	35
FIGURE 18 : SITUATION DES SONDAGES ET PROFILS, COLORES SELON LE GROUPE AUQUEL ILS APPARTIENNENT, ETABLIS PAR LA CAH D'APRES LES RESULTATS DE L'AFDM. LA COUCHE DE FOND UTILISEE POUR LA CARTE EST TIREE DU GEOCOVER.....	36
FIGURE 19 : SITUATION DES SONDAGES ET PROFILS, COLORES SELON LE GROUPE AUQUEL ILS APPARTIENNENT, ETABLIS PAR LA CAH D'APRES LES RESULTATS DE L'AFDM. LA COUCHE DE FOND UTILISEE POUR LA CARTE EST LA PENTE TIREE DU MNT.....	36

FIGURE 20 : TYPE DE REGIME HYDRIQUE SELON LA PENTE CALCULE A L' AIDE D'UNE ANOVA. LA VARIABLE QUALITATIVE REPNSE EST LE TYPE DE REGIME HYDRIQUE ET LA VARIABLE EXPLICATIVES EST LA PENTE. ICI L' INTERACTION EST STATISTIQUEMENT SIGNIFICATIVE (P-VALUE < 0.05). AVEC G, H, P EN SITUATION D'ENGORGEMENT TEMPORAIRE, INFLUENCE PAR UNE NAPPE PERCHEE ET L, M, S ET T EN SITUATION D'ENGORGEMENT PERMANENT, INFLUENCE PAR UNE NAPPE DE FOND.	37
FIGURE 21 : TYPE DE REGIME HYDRIQUE SELON L'ALTITUDE, CALCULE A L' AIDE D'UNE ANOVA. LA VARIABLE QUALITATIVE REPNSE EST LE TYPE DE REGIME HYDRIQUE ET LA VARIABLE EXPLICATIVE EST L' ALTITUDE. L' INTERACTION EST STATISTIQUEMENT SIGNIFICATIVE (P-VALUE < 0.05). AVEC G, H, P EN SITUATION D'ENGORGEMENT TEMPORAIRE, INFLUENCE PAR UNE NAPPE PERCHEE ET L, M, S ET T EN SITUATION D'ENGORGEMENT PERMANENT INFLUENCEE PAR UNE NAPPE DE FOND.	37
FIGURE 22 : GRAPHIQUE EN MOSAÏQUE. LE TESTE DE FISHER A ETE UTILISE POUR CALCULER LA REGRESSION ENTRE DEUX VARIABLES QUALITATIVES. LA P-VALUE EST DE 0.0005. AVEC G, H, P INFLUENCES PAR UNE NAPPE PERCHEE ET L, M, S ET T INFLUENCES PAR UNE NAPPE DE FOND PERMANENTE.	38
FIGURE 23 : TYPE DE REGIME HYDRIQUE SELON LE MRVBF CALCULE A L' AIDE D'UNE ANOVA. LA VARIABLE QUALITATIVE REPNSE EST LE TYPE DE REGIME HYDRIQUE ET LA VARIABLE EXPLICATIVE EST LE MRVBF. L' INTERACTION EST STATISTIQUEMENT SIGNIFICATIVE (P-VALUE < 0.05). AVEC G, H, P INFLUENCES PAR UNE NAPPE PERCHEE ET L, M, S ET T INFLUENCES PAR UNE NAPPE DE FOND PERMANENTE.	38
FIGURE 24 A, B, C, D, E ET F : BOXPLOTS REPRESENTANT LES SIX GROUPES FORMES LORS DE LA CAH SELON LA PROFONDEUR D' APPARITION DU G ET GG (A ET B) ET LES VARIABLES QUANTITATIVES ENVIRONNEMENTALES EXPLIQUANT LE MIEUX LA PREMIERE DIMENSION (PENDE, ALTITUDE, TRI ET MRVBF) (RESPECTIVEMENT C, D, E ET F).	39
FIGURE 25 : CARTE DE PREDICTION DE LA PROFONDEUR D' APPARITION DES TRACES D' OXYDATION (G) SUR LA ZONE D' ETUDE. LES SURFACES OU AUCUNE TRACE D' HYDROMORPHIE N' A ETE OBSERVEE (SUR UNE PROFONDEUR DE 120 CM, QUI REPRESENTE LA LONGUEUR DE LA TARIERE) SONT REPRESENTEES EN BLANC.	41
FIGURE 26 : CARTE REALISEE SUR QGIS REPRESENTANT LA ZONE D' ETUDE ET L'EMPLACEMENT DES PROFILS ET DES SONDES CAPACITIVES.	42
FIGURE 27 : PHOTOS DES SONDAGES TRIES SELON LEUR APPARTENANCE AU GROUPE 4, 5 ET 6 DE L' ACP.	47
FIGURE 28 : PHOTOS DES SONDAGES TRIES SELON LEUR APPARTENANCE AU GROUPE 4, 5 ET 6 DE L' AFDM.	47
FIGURE 29 : REPRESENTATION DES UNITES GEOLOGIQUES INFLUENÇANT LA FORMATION DES SOLS ET LEURS REGIMES HYDRIQUES SUR LA PARTIE NORD-EST DU TERRAIN.	48
FIGURE 30 : EXEMPLE ILLUSTRANT LES DIFFERENTS TYPES DE MRVBF RENCONTRE SUR LE TERRAIN (VUE DEPUIS LE SUD).	49
FIGURE 31 : TRACE D' INTENSITE GG DANS LE PROFIL P.2, PHOTO PRISE LE 19.12.2019.	53
FIGURE 32 A, B, C, D, E ET F : BOXPLOTS REPRESENTANT LES SIX GROUPES FORMES LORS DE LA CAH SELON LA PROFONDEUR D' APPARITION DU G ET GG (A ET B) ET LES VARIABLES QUANTITATIVES ENVIRONNEMENTALES EXPLIQUANT LE MIEUX LA PREMIERE DIMENSION (PENDE, ALTITUDE, TRI ET MRVBF) (RESPECTIVEMENT C, D, E ET F).	73

Tableau

TABLEAU 1 : ETAPES OFFICIELLES DE RELEVÉ DES INFORMATIONS DU SOL POUR L' ELABORATION DES CARTES (KELLER ET AL., 2018).	11
TABLEAU 2: DONNEES EN HECTARES TIREES DE LA STATISTIQUE FEDERALE DE LA SUPERFICIE, MISE A JOUR LE 27.11.2018.	11
TABLEAU 3 : SOUS-TYPES ATTRIBUABLES AU NOM DECRIT DANS LA KLABS.	14
TABLEAU 4 : TABLEAU COMPARATIF DES TYPES D' ENGORGEMENT TRAITES DANS LES CLASSIFICATIONS SUIVANTES : LE REFERENTIEL PEDOLOGIQUE (BAIZE ET GIRARD, 2008), LA KLABS (BRUNNER ET AL., 2008) ET LA WRB (IUSS, 2015).	15
TABLEAU 5: DONNEES UTILISEES DANS LA MATRICE ET MOYEN DE LES ACQUERIR.	23
TABLEAU 6 : VARIABLES UTILISEES POUR LE MNT ET SELECTIONNEES AVEC L' AIDE DE MADLENE NUSSBAUM (NUSSBAUM, IN PREP)	29
TABLEAU 7 : CLASSES DE REGIME HYDRIQUE SELON LA KLABS (ANNEXE B). EN ROUGE LES TYPES DE REGIME HYDRIQUE LIES A UNE NAPPE TEMPORAIRE (G, H, P) ET EN BLEU CEUX LIES A UNE NAPPE PERMANENTE (L, M, S, T)	32

TABLEAU 8 : ANALYSE CROISEE DU REGIME HYDRIQUE (R.H) ET DES GROUPES (1 A 6) POUR LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES QUANTITATIVES AYANT LE PLUS D'INFLUENCE SUR LE REGIME HYDRIQUE. LA PROFONDEUR D'APPARITION DU G (MINPG) ET DE GG (MINPGG) EST AUSSI REPRESENTEE.	39
TABLEAU 9A ET 9B : RESULTAT DE L'ANOVA (A) ET MOYENNE (B) DE L'INTENSITE DES TRACES D'HYDROMORPHIE AVEC LES RESULTATS DE LA TENEUR EN EAU POUR LE MOIS DE JANVIER, FEVRIER MARS, DE LA TEXTURE, DU pH H2O, DE LA DENSITE APPARENTE ET DE LA POROSITE TOTALE.....	44

1 Liste des abréviations

ACP	Analyse en composante principale
AFDM	Analyse factorielle des données mixtes
ARE	Office fédéral du développement territorial
BFH HAFL	Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires
CAH	Classification ascendante hiérarchique
FAL	Forschungsanstalt für Landwirtschaft – Agroscope Reckenholz
FAL 24+	Perfectionnement de la FAL par le canton de Soleure
KLABS	Klassifikation der Böden der Schweiz
MNT	Modèle numérique de terrain
MRVBF	Indice multirésolution d'aplatissement de fond de vallée
NABODAT	Nationale Bodeninformationssystem
OFAG	Office fédéral de l'agriculture
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFS	Office fédéral de la statistique
OSOL	Ordonnance sur les atteintes portées au sol
PNR 68	Programme national de recherche
PS SDA	Plan sectoriel des surfaces d'assolement
RP	Référentiel pédologique
SAU	Surface agricole utile
SDA	Surface d'assolement
SSP	Société Suisse de Pédologie
TPI	Indice de position topographique
TRI	Indice de rugosité
TWI	Indice d'humidité topographique
WRB	World reference base

1 Introduction

1.1 Etat et enjeux de la cartographie des sols en Suisse

La connaissance de la répartition spatiale de la ressource sol sur un territoire est un enjeu primordial, principalement dans un contexte de crise environnementale où le sol joue un rôle majeur en remplissant de nombreuses fonctions écosystémiques fondamentales (Grêt-Regamey, 2016).

Dans l'optique d'un développement durable, il est indispensable pour un pays d'avoir un relevé numérique complet de ses sols (Keller et al., 2018). En Europe, de nombreux pays ont créé des programmes nationaux afin de collecter et gérer les informations pédologiques sur l'ensemble de leur territoire¹. C'est le cas de la France, avec la création du Groupement d'intérêt scientifique Sol (Gis Sol) en 2001 qui a pour mission de concevoir et de coordonner un inventaire des sols au niveau national (www.gissol.fr) (Voltz et al., 2018) et des Pays-Bas, qui ont cartographié l'ensemble des sols de son territoire au 1/50'000, consultable sur la plateforme nationale néerlandaise : bodemdata.nl (Hartemink et al., 2013). En comparaison à ces pays, la Suisse accuse davantage de retard dans la cartographie des sols (Keller et al., 2018), le centre de service national pour la cartographie des sols ayant été supprimé en 1996 (OFEV, 2017).

À ce jour, la seule carte au niveau national donnant des informations pédologiques du territoire est la carte de l'aptitude des sols de la Suisse au 1/200'000 (PNR 68, 2015). Ce type d'échelle (1/200'000) donne lieu à une vue d'ensemble d'une région donnée mais ne permet pas de prendre en compte le caractère fonctionnel et les propriétés particulières du sol (Duchaufour, 1995). Seules les cartes à grandes échelles² (1/5'000 à 1/25'000) sont suffisamment précises et peuvent permettre une prise de décision durable (Borer et Knecht, 2014), la cartographie des sols pouvant être vue comme un inventaire de la répartition spatiale des propriétés et fonctionnalités du sol.

Le programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) élabore actuellement un système complet d'informations des sols suisses (nommé PIS-CH9) comme

¹ Plus d'informations sur ces programmes sont disponibles sur la plateforme du Centre Européen de données pédologiques (ESDAC) sous la section « données nationales » (esdac.jrc.ec.europa.eu).

² Une carte est dite à grande échelle quand le dénominateur de la fraction est un petit nombre et donc quand la réduction est faible et inversement pour une carte à petite échelle.

plateforme nationale (Keller et al., 2018). Un outil informatique, NABODAT³, mis au point par le groupe NABO (Rehbein et al., 2016) est également à disposition pour les cantons afin d'uniformiser les informations pédologiques disponibles en Suisse (www.nabodat.ch). Ces systèmes permettent de centraliser les données au niveau national même si la cartographie des sols en elle-même reste aux mains des cantons (Grêt-Regamey, 2018). Dans ce domaine, ces derniers subissent une importante pression, avec notamment les nouvelles directives renforcées par l'ordonnance sur la protection des sols (OSol, 2016) ainsi que les efforts de plus en plus croissants de la Confédération pour la sécurité alimentaire et la protection des terres agricoles, plus particulièrement des surfaces d'assolement (SDA). Ces dernières représentent les terres arables les mieux adaptées à l'agriculture (OFAG, 2012) et sont définies et délimitées selon la profondeur utile aux plantes, le régime hydrique, la pierrosité et la porosité (Keller et al., 2017). La Confédération impose à chaque canton une contingence de surfaces d'assolement (SDA) dans l'aménagement du territoire (ARE, 2016). Elle représente une superficie à protéger de près de 440'000 hectares, définie dans le « Plan sectoriel des surfaces d'assolement (PS SDA).

La densité de population importante, notamment sur le Plateau Suisse, impacte les surfaces productives ou à haute valeur écologique (OFS, 2017). Sur l'ensemble du territoire suisse, les surfaces d'habitats et d'infrastructures continuent d'augmenter au détriment des terres agricoles, en particulier dans les zones d'agglomérations et les régions rurales (Thétaz et Kellenberger, 2018). En 15 ans, les surfaces agricoles ont diminué de 851 km² sur le Plateau Suisse (ARE, 2014). Dans ce contexte, la révision de la loi sur l'aménagement du territoire (LAT, en vigueur depuis le 1^{er} mai 2014) tente de protéger les surfaces agricoles et principalement les SDA de l'extension des surfaces d'habitat et d'infrastructures (Grêt-Regamey et al., 2018). L'initiative populaire « Pour la sécurité alimentaire », acceptée en septembre 2017, va encore renforcer ces aspects, sa révision incluant l'obligation de protéger les surfaces et les sols exploités dans l'agriculture (art. 104a al. A et b CST) (Conseil national Suisse, 2017).

Dans ces conditions, les informations pédologiques de base sur un territoire doivent être comblées rapidement pour une utilisation durable de la ressource sol (OFAG, 2012) et doivent être uniformisées au niveau du pays. Dans cette perspective, les relevés cartographiques sont effectués pour chaque canton d'après les directives de la méthode de cartographie nommée FAL (Brunner et al., 1997) qui a été révisée par le canton de Soleure (appelée FAL+). Celle-ci comprend un formulaire standard de relevés de profils des sols (Annexe B).

³ Système national d'information pédologique.

Actuellement, la méthode de cartographie reste relativement standard à celle présentée en 1997 dans le manuel de cartographie des sols suisses (Tableau 1) (Brunner et al., 1997).

Tableau 1 : Etapes officielles de relevé des informations du sol pour l'élaboration des cartes (Keller et al., 2018).

I. Préparation du projet	
Définition d'objectifs	Formulation du projet, choix de la région à cartographier et de l'échelle
Elaboration de bases de travail	Acquisition et traitement des informations et des cartes disponibles (géologie, climat, végétation, modèle altimétrique, utilisation des terres, etc.), télédétection et photos aériennes, littérature et autres sources
Création d'une carte conceptuelle	Analyse de terrain, échantillons, hypothèses sur la distribution des types de sols
II. Travaux de terrain	
Profils de sol, forage, fosse	Choix des sites de profil, enregistrement du profil de sol, prélèvement d'échantillons pour analyse
Analyses de laboratoire	Analyse de propriétés du sol sélectionnées, archivage des échantillons
Cartographie	Délimitation d'unités de sol sur le terrain, légende de travail (forme du sol, formes principales et secondaires, niveaux de profondeur, particularités)
Carte du sol manuscrite (carte de terrain)	Première ébauche de la carte du sol, délimitation des unités cartographiques
III. Produits	
Carte du sol	Révision et correction de la carte de terrain, le cas échéant réitération de l'étape II, réalisation d'une carte du sol numérique et imprimée
Evaluations	Réalisation d'évaluations de la carte du sol pour des demandes et des profils d'utilisateur spécifiques
Données pédologiques	Mise à disposition des données pédologiques numériques faisant partie de la carte du sol sur une plateforme numérique

En sachant que la méthodologie pour concevoir une carte des sols au 1/5'000 impose 4 sondages par hectare (Keller et al., 2018) et en partant du principe que la surface de sol non scellée de la Suisse est de 3'806'272 hectares (Tableau 2), il faudrait effectuer 15'225'088 sondages pour avoir une carte précise des sols en Suisse et en termes de coûts, déboursier 1'355'032'832.⁴ Or, seuls 2'400 hectares par année sont actuellement cartographiés en Suisse et toujours dans le cadre de projets particuliers (OFEV, 2017). A ce rythme, il faudrait 1'586 ans pour cartographier l'ensemble de la Suisse. Cette méthode officielle est donc difficilement applicable.

Tableau 2: Données en hectares tirées de la statistique fédérale de la superficie, mise à jour le 27.11.2018.

Surface d'habitat et d'infrastructure	Surface agricole	Surface boisée	Surface improductive	Total de la surface de sol
322 496	1 463 865	1 297 923	1 044 484	4 128 768

⁴ Basé sur la liste des prix de Sol-conseil.ch pour une analyse « cartosol » (89.-/sondage).

Une des solutions à cette large problématique est la modélisation des propriétés du sol à partir de jeux de données nationales telles que le relief, la géologie ou le climat (Nussbaum et al., 2017). En considérant les cinq facteurs de pédogenèse -le climat, le temps, la géologie, la topographie et les agents biologiques (Jenny, 1941) – il est possible de les faire correspondre aux jeux de données modélisés de la Suisse (la topographie, le climat, le temps, la géologie et les agents biologiques : végétation/mode d'utilisation), afin de faciliter la modélisation des propriétés du sol d'une région donnée.

Avec l'avènement des données liées à la télédétection, prédire une propriété du sol (variable réponse) en fonction d'un grand nombre de covariables (variables environnementales) est devenue courant (Ben-dor et al., 2009 ; Mulder et al., 2011 ; Nussbaum et al., 2017). Utiliser ce système de façon appliqué permettrait de réduire les coûts et le temps investi et d'avoir une base de l'ensemble du territoire qui pourra être corrigée et améliorée au fur et à mesure de la récolte de données. Cette base ciblerait notamment de manière plus efficace la fonction du sol recherchée, tout en intégrant l'information des horizons sur la carte (par exemple le type de sol, l'hydromorphie, le stockage de carbone, etc.) et faciliterait les travaux de recherches futurs. Il est donc primordial d'acquérir les variables principales du sol.

Dans ce contexte, le bureau d'utilisation et protection des sols de la Haute École des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL) a pour objectif d'obtenir les informations pédologiques manquantes des sols du canton de Berne dans le but d'optimiser la cartographie au 1/5'000. Ce présent travail s'inscrit dans ce cadre et cherche à savoir s'il est possible de modéliser une propriété du sol en fonction des jeux de données nationales correspondant aux cinq facteurs de pédogenèse.

Au vu du contexte actuel autour des SDA, présenté plus haut, la propriété du sol qui a été choisie dans ce travail est le régime hydrique. Connaître le régime hydrique du sol et sa dynamique dans un paysage est un enjeu essentiel de la gestion et de l'aménagement du monde rural (Soutter et al., 2007). Ce dernier est un des critères fondamentaux dans la détermination des SDA (FAL+, 2019) et tient actuellement une place centrale dans « La classification des sols de Suisse » (KLABS⁵), (Niveau I des quatre niveaux hiérarchiques, Brunner et al., 2008) qui est le référentiel utilisé dans les travaux de pédologie appliquée, au niveau communal, cantonal et national en Suisse, dans un but d'une standardisation des données.

⁵ Pour la suite du travail, seul le terme KLABS sera utilisé pour faire référence à la classification des sols de Suisse (Brunner et al., 2008).

Le chapitre suivant définit le régime hydrique déterminé selon les descripteurs officiels de la KLABS (2010). Cette dernière sera utilisée pour la détermination des sols sur le terrain par souci de s'inscrire dans cette large problématique nationale ainsi que pour faciliter son utilisation dans les domaines appliqués de la pédologie.

1.2 Un aspect fonctionnel du sol - Le régime hydrique et sa classification

Dans la KLABS (2010), le régime hydrique du sol est décrit notamment par le type d'engorgement des sols. Ce dernier correspond à l'occupation de la totalité des pores d'un horizon par l'eau (Gobat et al., 2012). Deux types d'engorgement peuvent être décrits (Brunner et al., 2008) :

- I) Un engorgement permanent lié à une nappe phréatique qui varie selon la saison.
- II) Un engorgement lié à une nappe temporaire.

Ce deuxième aspect peut être provoqué lorsque le taux d'infiltration des eaux de précipitations dépasse la conductivité hydraulique à saturation d'une couche peu perméable (par exemple créé en surface par une semelle de labour ou en profondeur par un horizon argileux) (Archambeaud et al., 2016).

Dans un paysage donné, ces engorgements sont influencés par la topographie, qui peut avoir un rôle important sur l'excès d'eau d'un sol et peut causer des engorgements localisés, permanents ou saisonniers (Soutter et al., 2007). L'engorgement temporaire d'un sol est repérable par ses traces d'oxydation caractéristiques des sols hydromorphes (Soutter et al., 2007). Les descripteurs de la KLABS s'appuient sur ces taches pour la classification des sols.

Dans la KLABS, les sols à pseudogley sont marqués par un excès d'eau temporaire qui provoque la solubilisation et le lessivage du fer ainsi qu'une accumulation locale de fer lessivé qui subit une oxydation lors des phases non engorgées (trace d'oxydation). Les sols à gley, quant à eux, sont marqués par un horizon r (réduit) de teinte bleutée qui correspond à une zone de saturation permanente. La zone de battement de la nappe fonctionne comme les sols à pseudogley et comporte des traces d'oxyde de fer. La KLABS attribue des sous-catégories au sol : I, G, R (Annexe B), décrit dans le tableau ci-dessous (Tableau 3).

Tableau 3 : Sous-types attribuables au nom décrit dans la KLABS.

<p>I = Nappe perchée :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Faiblement pseudogleyifié (I1) : Taches de rouille peu marquées dès 60 cm de profondeur. Une zone tassée (épaisseur max 20 cm) dans la partie supérieure du profil (semelle de labour, tassement par le bétail) est à classer dans cette rubrique également</i> - <i>Pseudogleyifié (I2) : Taches de rouille peu marquées jusqu'en surface, sur une épaisseur > 20 cm ; taches nettes sur fond gris souvent visibles dès 60 cm de profondeur</i> - <i>Fortement pseudogleyifié (I3) : Horizon très taché de rouille à une profondeur > 40 cm, horizons supérieurs sans signes de pseudogley. Typique de l'intergrade Sol brun-Pseudogley</i> - <i>Très fortement pseudogleyifié (I4) : Horizon très taché de rouille atteignant la surface, parfois masqué par une accumulation d'humus. Typique du Pseudogley</i>
<p>G = Nappe permanente à niveau variable:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Humide en profondeur (G1): Faible engorgement, à plus de 90 cm de profondeur</i> - <i>Faiblement gleyifié (G2) : Taches de rouille peu marquées dès 60 cm de profondeur, taches très marquées et engorgement dès 90 cm</i> - <i>Gleyifié (G3) : Taches de rouille jusqu'à la surface, engorgement dès 60 cm de profondeur</i> - <i>Fortement gleyifié (G4) : Engorgement massif dès 40 cm de profondeur, typique de l'intergrade Sol brun-Gley</i> - <i>Très fortement gleyifié (G5) : Engorgement massif dès 20 cm de profondeur, mais fortes variations saisonnières, typique du Gley oxydé</i> - <i>Extrêmement gleyifié (G6) : Engorgement périodique jusqu'en surface, dessèchement en période sèche. Typique du Gley réduit</i>
<p>R = Nappe permanente stable:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Faiblement mouillé (R1): Niveau de nappe en permanence à plus de 90 cm de profondeur</i> - <i>Mouillé (R2): Niveau de nappe en permanence à 60-90 cm de profondeur</i> - <i>Fortement mouillé (R3): Niveau de nappe en permanence à 30-60 cm de profondeur</i> - <i>Très fortement mouillé (R4): Niveau de nappe en permanence à 10 - 30 cm de profondeur</i> - <i>Détrempé (R5): Niveau de nappe en permanence à moins de 10 cm</i>

Le référentiel pédologique (Baize et al., 2008) décrit ces horizons par l'indicateur G et g. Les horizons rédoxiques (notés g) correspondent à des engorgements temporaires. Ils sont caractérisés à la fois par des taches de rouille (zone enrichie en oxyde de fer) et des taches grises ou plus claires (zone appauvrie en oxyde de fer) (Baize et al., 2008). L'horizon G correspond à un engorgement permanent, fortement lié à un caractère saisonnier (battement de nappe) créant des horizons réductiques réduits (Gr) et d'autres temporairement réoxydés (Go).

Dans chacun des référentiels présentés (Tableau 4), la nomenclature fait la distinction entre un engorgement permanent et un engorgement temporaire. Au niveau physiologique, le profil présente dans les deux cas des traces d'oxydoréduction. Or, avec le système de la KLABS, pour décrire la profondeur utile des surfaces d'assolement des sols agricoles, seules la profondeur et l'intensité d'apparition des traces d'oxydoréduction sont prises en compte, quel que soit le type d'engorgement qu'elles décrivent. De plus, les traces réductiques sont toujours liées à un engorgement fonctionnel mais les traits rédoxiques persistent au-delà. Il est donc possible d'avoir

de l'hydromorphie fossile (Baize et al., 2008), ce qui restreint la détermination de l'activité du battement de nappe à l'aide de ce descripteur (type et intensité des traces rédoxiques).

Tableau 4 : Tableau comparatif des types d'engorgement traités dans les classifications suivantes : Le Référentiel pédologique (Baize et Girard, 2008), la KLABS (Brunner et al., 2008) et la WRB (IUSS, 2015).

	RP 2008	Profondeur (cm)	KLABS 2008	Profondeur (gg)⁶	WRB 2015	Profondeur (cm)
Engorgement permanent	REDUCTISOL	< 50	Gley	< 40	Gleysols	< 50
Engorgement temporaire	REDOXISOL	< 50	Pseudogley	< 40	Stagnosols	< 50
Autres qualificatifs	Réductique	50 - 80	gleyifié	60 – 90	epigleyic	< 50
	Rédoxique	50 - 80	pseudogleyifié	> 60	epistagnic	< 50
	À horizon réductique de profondeur	80 - 120	faiblement gleyifié	> 90	endogleyic	50 - 100
	À horizon rédoxiques de profondeur	80 - 120	faiblement pseudogleyifié	> 90	endostagnic	50 - 100

2 Problématique

Le présent travail s'inscrit dans un projet global coordonné par le groupe de protection et d'utilisation des sols de la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL). Il a pour objectif : I) d'apporter des informations pédologiques sur une région encore inconnue au niveau de ses sols ; II) de chercher si des lois d'apparition du régime hydrique permettent d'être définies à partir de jeux de données nationales décrivant des variables environnementales ; III) de réfléchir à la pertinence des descripteurs du régime hydrique pour définir les périodes d'engorgement potentiel.

Le but final est de proposer des pistes de développement d'outils de cartographie au 1/5'000 du régime hydrique.

2.1 Questions et hypothèses

Q.1. Comment la répartition du régime hydrique des sols agricoles varie en fonction de la géologie, de la topographie, des précipitations, du temps et des agents biologiques ?

H.1. Il est possible de prédire la répartition du régime hydrique en fonction de deux variables environnementales dont les jeux de données sont disponibles en libre accès : la géologie (tirée du geocover) et la topographie (tirée du modèle numérique de terrain (MNT)).

Pouvoir définir la variation spatiale du régime hydrique de manière statistiquement significative est un critère essentiel dans le but d'une modélisation future de la zone. Le climat et le facteur de temps sont identiques dans toute la région (cf. §3). Le facteur concernant les agents biologiques est *a priori* aussi identique dans toute la zone car le mode d'utilisation (techniques culturales) de l'ensemble des parcelles agricoles est en prairie permanente ou extensive. Ainsi la géologie et la topographie sont susceptibles d'être les facteurs prépondérants de la variation des sols en place sur la zone étudiée⁶ (cf. §2).

L'utilisation du jeu de données tiré du modèle numérique de terrain (MNT) permet de calculer avec précision la pente et l'altitude. Il permet aussi de calculer d'autres indices topographiques (TPI, TWI, MRVBF, TRI etc.) qui seront décrits plus loin (cf. §4.3.1). L'utilisation des descripteurs de la KLABS est utile dans le contexte dans lequel s'inscrit ce travail.

⁶ Cela ne signifie pas que ces facteurs sont les plus influents sur la formation des sols de la zone étudiée !

Q.2. Peut-on différencier les traces d'hydromorphie liées à une nappe temporaire ou permanente ?

H.2. Il est possible de différencier les taches d'oxydation liées à une nappe temporaire ou permanente grâce à la topographie (en utilisant le MNT) et aux propriétés liées à la circulation de l'eau dans le solum (teneur en eau, texture, porosité et densité).

Les traces d'hydromorphies sont les descripteurs principaux du régime hydrique dans la KLABS (Tableau 3) et sont aussi fondamentales dans la classification des SDA (cf. §1.1). Or, l'engorgement n'est pas toujours visible selon la saison et il est possible de trouver des taches d'oxydation fossile (cf. §1.1). Afin d'aller plus loin avec la première hypothèse (**H.1**), le but de cette question est de tester la pertinence d'utilisation des taches d'oxydation comme seul indicateur de l'hydromorphie.

L'hypothèse **H.2** propose, d'une part, d'utiliser les données liées à la topographie (MNT), sélectionnées selon **H.1**, afin de déterminer le lien entre les nappes permanentes ou saisonnières, observées sur le terrain et d'autre part, d'utiliser des données liées à la circulation d'eau dans le solum (texture, porosité et densité) afin de définir si les traces d'oxydation sont liées à un engorgement temporaire ou permanent.

3 Site d'étude

Le site d'étude se trouve dans le canton de Berne au sud-ouest de Schwarzenburg sur des parcelles agricoles à l'étage collinéen (map.geo.admin.ch). Cette zone a été choisie selon les critères définis en encart dans la figure ci-dessous (Figure 1) (cf. contexte de l'étude §1.1).



Figure 1 : Zone d'étude située au sud-ouest de Schwarzenburg, Fond de carte tiré de geo.admin.ch.

Le site se trouve à une altitude comprise entre 800 et 900 m (map.geo.admin.ch, 2019) avec des précipitations annuelles moyennes de 1'038 mm et une température moyenne de 7.3 °C (ce qui représente 1°C pour la température moyenne hivernale et 15°C pour la température moyenne estivale), (meteosuisse.admin.ch, 2018).

La zone comporte des prairies permanentes et des îlots forestiers composés de hêtraies (Figure 1 et Figure 2). La surface présente une superficie de 1.15 km², soit 115 ha et comprend une dizaine d'exploitations agricoles différentes.



Figure 2 : Photo prise sur le terrain en octobre 2019 représentant la partie sud du terrain. Le site est constitué de collines et d'îlots forestiers sur les sommets.

3.1 Géologie

D'un point de vue tectonique, la région de Schwarzenburg (BE) appartient au Mittelland et se compose principalement de molasse faiblement plissée du Burdigalien (Figure 3) (Frasson, 1947).

La zone étudiée, au sud-ouest de Schwarzenburg, recèle une grande diversité géologique (Figure 3). Elle est composée d'alluvions fluvio-glaciaires et glaciolacustres (q4s, Figure 5), de graviers sous formes de sables graveleux formés *in situ* par altération lors de la dernière glaciation du Riss (q3s, Figure 5) et de molasse gréseuse du Burdigalien qui compose les collines (m1, Figure 5) (Frasson, 1947 ; mapgeoadmin.ch). Un ancien marais drainé est également présent ainsi qu'une large zone constituée de molasse altérée et de poudingues de Vallorcine (+VK, Figure 5). Ces derniers sont le produit de la désagrégation physique de roches cristallines des massifs voisins (Chevalier, 2003). La molasse marine supérieure qui compose le site contient du grès quartzofeldspathique glauconieux à ciment calcaire (Keller, 1992). Elle est assez dure car elle contient plus de grès que de marne (Gratier, 1980).

Une partie de la molasse a été amenée lors de la formation de la Singine et est composée de grès indifférencié et de grès coquiller (Burdigalien) (Frasson, 197). Ce grès coquiller est constitué de coquilles marines fossilisées englobées d'une matrice gréseuse très poreuse (GYB, 2019). Des bandes de molasse marneuse sont retrouvées au sein du grès dans les falaises alentour (Figure 6).

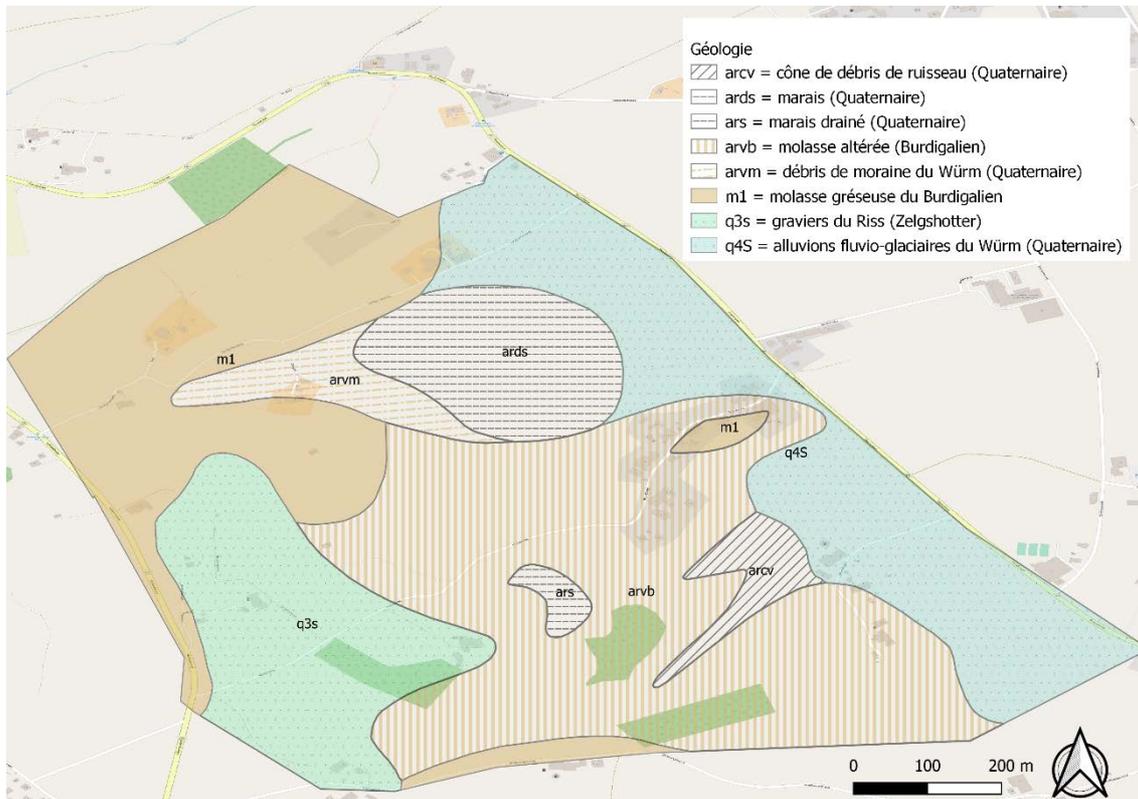


Figure 5 : Carte géologique de la zone fait sur Qgis, tiré du geocover (map.geo.admin.ch, Atlas géologique AG25).

La diversité lithologique présente sur le terrain permet de considérer cette zone comme particulièrement intéressante, notamment pour un développement méthodologique de cartographie numérique. En effet, cela va permettre d'utiliser les jeux de données géologiques pour tester leur influence sur le régime hydrique des sols de la zone étudiée.

A l'époque glaciaire du Würm, le glacier du Rhône était présent au nord-est, le long de la ligne Schwarzenburg-Oberbalm-Ulmizberg, tandis que le glacier de l'Aar était sur la partie sud-ouest de la zone (Figure 7), (Frasson, 1947). La région étudiée est donc située à l'extérieur du maximum de la glaciation du Würm (Figure 7) (Hantke et Wagner, 2004). Il est donc concevable qu'une partie de la pédogenèse des sols de la région étudiée ait commencé bien avant 10'000 ans, contrairement à une majorité de sols présents en Suisse.

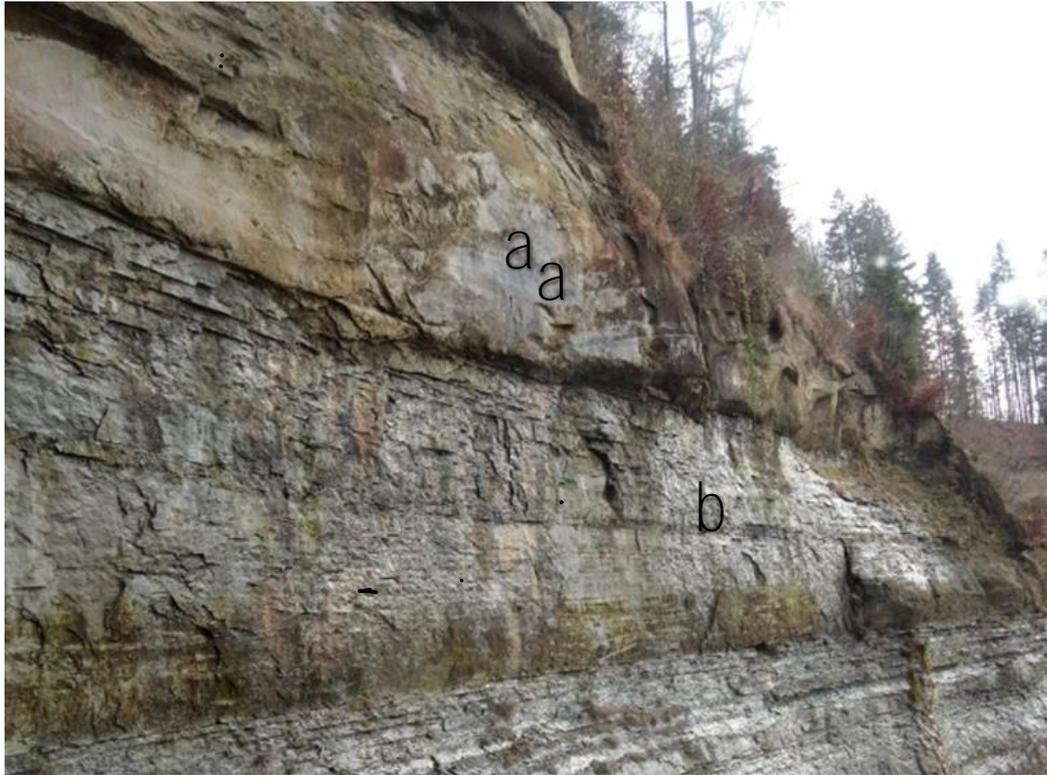


Figure 6 : Photo prise en octobre 2019, sur les falaises au nord-ouest du terrain d'étude. Des bandes de molasse marneuse (a) sont intercalées entre la molasse gréseuse (b).



Figure 7 : Carte de la dernière glaciation du Würm. La zone d'étude se trouve dans une frange entre le glacier du Rhône (partie de gauche) et le glacier de l'Aar (partie de droite).

4 Matériel et méthodes

La méthode effectuée pour répondre à la première hypothèse (cf. §2.1) est composée de trois étapes : I) la création d'une matrice (Annexe A) contenant les données environnementales (covariables) et les données de pédologie (Tableau 5) ; II) l'analyse des corrélations spatiales entre les variables (cf. §4.3) ; III) Une carte de prédiction de la profondeur d'apparition des traces d'hydromorphie.

Tableau 5: Données utilisées dans la matrice et moyen de les acquérir.

Origine	Données	Acquisition	Type
Environnementale	Relief (altitude, pente etc.,)	Modèle Numérique de Terrain (MNT25)	quantitative
	Géologique	Geocover (couche vectorielle tirée de l'Atlas géologique de la suisse au 1/25'000)	qualitative
Pédologique	Données de terrain	150 sondages et 7 profils, sondes capacitatives (teneur en eau)	quantitative et qualitative

Pour répondre à la deuxième hypothèse (cf. §2.1), des sondes capacitatives sont utilisées. Elles ont pour but de comparer le régime hydrique - qui décrit une propriété générale du sol, à la teneur en eau du sol (%) - qui donne des informations actuelles sur la réalité de la fluctuation de la nappe. En parallèle des mesures de la densité apparente (g/cm^3) et de la porosité totale (%) ont été faites afin de définir plus précisément la circulation de l'eau au niveau du *solum* (cf. §2.1). La pertinence d'utilisation des taches d'oxydation est évaluée dans les résultats de l'ANOVA entre la topographie (MNT) et les classes de régime hydrique (nappe permanente ou temporaire) effectuée lors des analyses pour répondre à l'hypothèse 1 (cf. §2.1).

Des analyses physico-chimiques des profils (cf. §2) ont servi de référence et de calibration, respectivement, aux données attribuées aux sondages sur le terrain (teste tactile pour la texture, par exemple) et à l'attribution d'une classe de régime hydrique sur chacun des sondages.

La méthode est divisée en trois étapes principales (Figure 8) :

1. Terrain
2. Laboratoire
3. Analyses spatiales et statistiques

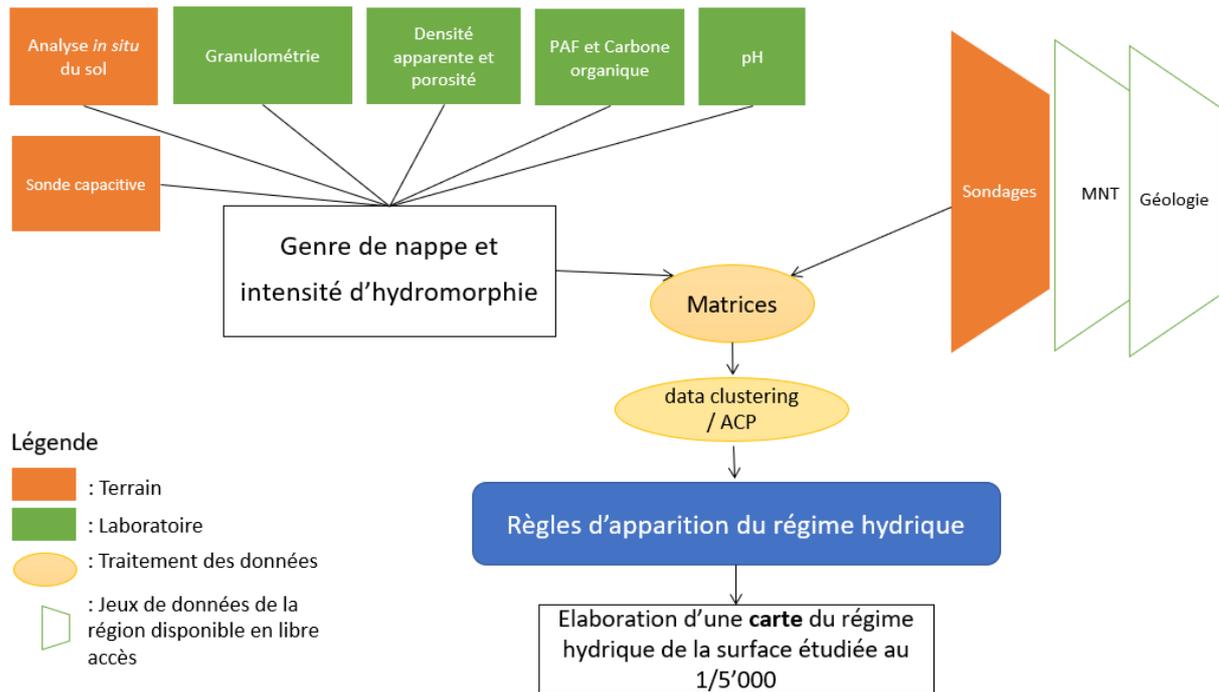


Figure 8 : Récapitulatif des différentes étapes à réaliser dans le cadre de ce travail afin d'obtenir une carte au 1/5'000.

4.1 Terrain

La campagne de terrain a été réalisée entre octobre 2018 et mars 2019 afin d'éviter d'interférer avec l'activité agricole. Elle s'est déroulée en quatre phases distinctes, à la suite de la synthèse et analyse des documents disponibles (cartes géologiques, cartes de la végétation, anciennes cartes Siegfried, disponible sur map.geoadmin.ch et map.apps.be.ch, Annexe D) et de l'établissement d'une carte conceptuelle permettant une première segmentation du paysage (Annexe D). Les agriculteurs exploitant les parcelles ont été contactés afin d'obtenir l'autorisation pour réaliser les sondages et profils. Des échanges informels ont permis de récolter des informations sur le mode d'utilisation des sols ou sur les lieux où des problèmes fréquents d'engorgement se faisaient observer.

4.1.1 Campagne de prospection

Une campagne de prospection à la tarière a eu lieu pour un sondage par unité géologique, ce qui représente 1 sondage par 5 ha en moyenne, afin d'avoir une vue d'ensemble des types de sol et de leur régime hydrique) (Figure 9). Ces sondages ont été effectués à l'aide des cartes préexistantes (cf. §4.1), d'une tarière, d'une rigole, d'acide chlorhydrique 6 N et d'un pH-mètre Hellige.

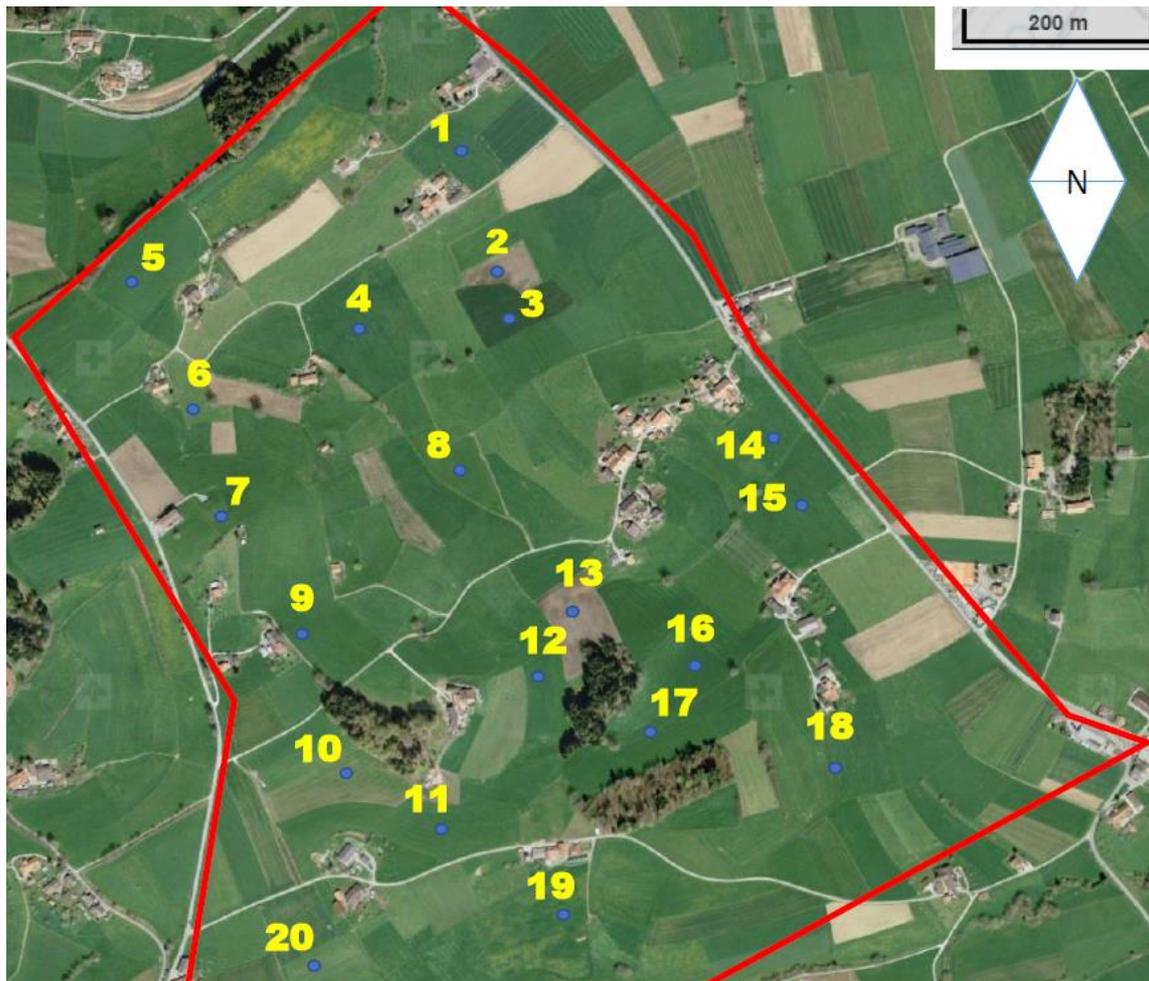


Figure 9 : Emplacement des 20 premiers sondages choisis à l'aide des cartes existantes, de la topographie, des images aériennes et des différentes unités géologiques rencontrées sur le terrain. La zone d'étude est délimitée en rouge.

4.1.2 Echantillonnage préférentiel

La deuxième phase de terrain comporte la récolte des données sur les sols et leurs types de régime hydrique. Il s'agit de sondages à la tarière réalisés durant l'automne 2019. Pour chacun des sondages, une photo a été prise et une fiche de la FAL a été remplie (Figure 10) (Annexe B). La texture a été déterminée sur le terrain par test tactile (FAL, 1997) et les traces d'hydromorphie systématiquement relevées selon l'intensité et le type (cn, g, gg, r) ainsi que leur profondeur d'apparition (cm).



Figure 10 : Photo du sondage 51 (sol brun sur molasse) réalisé sur le terrain. L'ordre du profil est conservé (de droite à gauche sur l'image) et les horizons déterminés selon la texture et la couleur notamment (photo prise le 08.10.2018).

4.1.3 Echantillonnage stratifié

La troisième phase consiste en la pose de 7 sondes capacitives (3 sondes de 90 cm et 4 sondes de 60 cm selon la disponibilité du matériel, *Adcon Telemetry*). Elles servent à mesurer la teneur en eau volumique (%) sur une profondeur de 60 à 90 cm tous les 10 cm. Les précipitations (mm) ont également été enregistrées grâce à un pluviomètre (*Adcon Telemetry*) incorporé à la station.

Les zones ont été choisies selon le type et la profondeur d'apparition des traces d'hydromorphies (> 90 cm), le type de géologie ainsi que la topographie d'après les premières données tirées de la campagne de sondage et de la carte conceptuelle réalisée (Annexe D). Un tube blanc contenant des électrodes a été placé dans le sol pour les mesures de teneur en eau volumique (%) et est relié à la station alimentée par des panneaux photovoltaïques (Figure 11). Les données sont transmises chaque 5 min à un serveur. Elles sont directement visibles sur le portail *RMadvice for Sensorbased Irrigation Management*.

Ces sondes donnent un état actuel de la nappe (dynamique hydrique) permettant une mise en relation avec le régime hydrique qui décrit une propriété générale. Le niveau de la nappe a été mesuré durant les mois de janvier, février, mars et avril (période de recharge hivernal des nappes, Baize et al., 2011). Il n'a pas été possible de les laisser plus longtemps pour des raisons de disponibilité du matériel et d'activités agricoles.



Figure 11 : A droite de l'image, la station avec le pluviomètre et le panneau solaire. A gauche, la sonde hygrométrique avec le capuchon bleu, enfoncé dans le sol à une profondeur de 60 cm (photo prise le 2.12.2018).

7 profils de sols complets ont été creusés à proximité des sondes afin de pouvoir rattacher les données des différents horizons aux données des sondes. Des sondages à la tarière ont été effectués afin de vérifier que le choix de l'emplacement du profil correspondait au sol de la sonde. Ils servent également de référence aux sondages effectués.

La profondeur des profils varie de 80 cm à 120 cm selon l'apparition de la roche mère. Les horizons ont été délimités et décrits à l'aide des descripteurs présentés dans les fiches de la FAL (Annexe B). La présence de taches observables et d'eau observable a été relevée dans chacun des horizons. Les horizons et les profils ont été décrits et nommés selon la KLABS puis selon le Référentiel Pédologique (Baize & Girard, 2009). L'altitude, l'exposition, les coordonnées géographiques et la pente ont été mesurées à l'aide d'une application smartphone GPS Suisse (Android, version 1.7).

Environ 500 g de sol (masse fraîche) ont été prélevés pour chacun des horizons afin de les analyser en laboratoire. Pour mesurer la densité apparente (g/cm^3) et la porosité totale (%), des cylindres d'un volume de 10 cm^3 ont été enfoncés verticalement dans l'horizon à l'aide d'un préleveur et d'un marteau. Des triplicats de chaque horizon ont été prélevés.

4.2 Analyse de laboratoire

4.2.1 pH

Les pH H₂O et CaCl₂ ont été mesurés sur chacun des horizons selon la méthode de référence des stations fédérales de recherche agronomique (FAL, 1999). Cela permet d'obtenir des informations sur l'acidité des horizons des sols et ainsi de donner des informations pour la classification sur le terrain.

4.2.2 Teneur en matière organique

Les analyses de l'humidité résiduelle, de la perte au feu (PAF) et du carbone organique (Corg) ont été réalisées en triplicatas selon la méthode standard des stations fédérales de recherche agronomique (FAL, 1999). Elles permettent ainsi d'évaluer le taux de matière organique des différents horizons et notamment de classer plus précisément les sols en fonction de la KLABS.

4.2.3 Granulométrie

Les analyses de granulométrie ont été effectuées par le laboratoire de la HAFL selon la méthode de référence des stations fédérales de recherche agronomique (FAL, 1995). Les résultats ont servi à corriger et à calibrer les tests tactiles effectués pour la texture sur les sondages. La texture a été un critère très important dans la classification des groupes de sols (cf. §5.1), la compréhension de la circulation de l'eau et la classification du régime hydrique. Elle a été entrée dans la matrice réalisée (Annexe A).

4.2.4 Densité apparente et porosité totale

La densité apparente (g/cm³) et la porosité totale (%) ont été calculées d'après la masse volumique sèche d'un sol, en tenant compte du volume du cylindre et du poids des contenants en aluminium, selon le protocole en vigueur à la HAFL (Annexe F). Pour la masse volumique du solide, la valeur de référence est de 2.65 g/cm³ (Rowell, 1994).

4.3 Traitement des données

Les données pédologiques collectées sur le terrain ont complété la base de données mise au point par le groupe de recherche de la HAFL. Cette base contient les champs standard de la FAL (Annexe B).

4.3.1 Analyses de l'hypothèse 1

La matrice de données contient les données pédologiques et environnementales (cf. §4). Concernant les données pédologiques, la matrice doit contenir une donnée par sondage tout en intégrant l'information des horizons. Pour ce faire, les variables simples quantitatives et qualitatives relevées sur le terrain (cf. §4.1.3) ont été transformées en variables intégratives. Les variables finales intégratives (qualitatives et quantitatives) utilisées sont : la texture (pourcentage de la moyenne pondérée selon l'épaisseur de chacun des horizons) et la profondeur d'apparition des traits d'hydromorphie (cm). Concernant les variables environnementales (covariable), elles ont été exportées depuis Qgis grâce à la fonction SAGA et GRASS (version 3.4.1) d'après le MNT (le DTM_1186_41 et le DTM_1186_43) et le geocover (téléchargé depuis le portail du canton de Berne, geocat.ch). Les variables tirées du MNT sont la pente, l'altitude, le TWI, le TPI, le TRI, et le MRVBF) et sont décrites plus en détail dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Variables utilisées pour le MNT et sélectionnées avec l'aide de Madlène Nussbaum (Nussbaum, in prep)

Variables tirées du MNT		Description
Pente	%	Le gradient et l'orientation de la pente est calculée pour chaque pixel à partir des pixels voisins (Burrough et McDonnell, 1986)
Altitude	m	L'altitude est calculée pour chaque pixel à partir des pixels voisins (Burrough et McDonnell, 1986)
Indice d'humidité topographique (TWI)	Classe	Permet de quantifier l'effet de la topographie sur le régime hydrique (Sorensen et al., 2006). Une haute valeur reflète une zone saturée et une faible valeur, une zone drainée.
Indice multi-résolution d'aplatissement de fond de vallée (MRVBF)	Classe	Permet de caractériser les zones de dépôt en calculant la planéité de bas de pentes / fonds de thalweg (Gallant et al., 2003) et permet notamment de faire la différence entre les pentes du à des collines ou des fonds de vallée. Les classes calculées par l'algorithme MRVBF sont les suivantes : pas des zones de fond de vallée <0.5 / fonds de vallée abrupte et petite entre 0.5 et 1.5 / fonds de vallée plus plats et grands entre 1.5 et 2.5 puis plus grands entre 2.5 et 3.5, etc.
Indice de position topographique (TPI)	Classe	Mesure la position topographique relative d'un pixel en calculant la différence entre l'altitude du pixel et l'élévation moyenne dans un voisinage prédéterminé. (Jenness et al., 2011). Permet d'identifier les formes du relief et des ruptures topographique Les crêtes ont des valeurs élevées tandis que les valeurs fortement négatives indiquent des vallées.
Indice de rugosité du terrain (TRI)	Classe	Permet d'identifier les zones planes (valeur faible) des zones à fort dénivelé (valeur forte). Elle est fortement corrélée à la pente.

Le traitement des données a été réalisé avec le logiciel Rstudio (version 3.5.1, 2018). Une analyse factorielle des données mixtes (appelé AFDM dans la suite du texte) a été réalisée à l'aide des packages « FactoMineR » et « factoextra » (méthode effectuée selon Pagès, 2004). Elle a été

préférée à l'analyse en composante principale (ACP), (Annexe G), dans le but d'intégrer des variables qualitatives (géologie et type de régime hydrique). Elle a permis de montrer les liens entre les variables et réduire leur nombre aux composantes principales.

Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été faite à l'aide du package « cluster » sur les résultats de l'AFDM et un dendrogramme a été tracé pour représenter la proximité des différents groupes, dans l'objectif de réaliser des classes de types de sols et de régimes hydriques observés sur le terrain.

Afin de vérifier la significativité ($p\text{-value} < 0.05$) de la corrélation entre les variables environnementales et le type de régime hydrique, une ANOVA à un facteur (pour tester une variable quantitative et qualitative) et un test de Fisher (pour tester deux variables qualitatives) ont été réalisés. Un test de Durbin-Watson a été utilisé au préalable, afin de vérifier l'absence d'autocorrélation entre les variables. Les tests ont été effectués avec les variables environnementales décrivant le mieux la répartition des individus dans l'AFDM. Ces corrélations ont été représentées à l'aide de boxplots.

Pour terminer, une carte de prédiction de la profondeur d'apparition des traces d'hydromorphie a été réalisée à l'aide d'un arbre de décision (random forest). Les rasters ont été exporté depuis Qgis sur R pour le traitement des données. Les packages « rgdal », « randomforest », « raster » ont été utilisés, le code a été tiré du cours de Madlène Nussbaum (Nussbaum, *in prep*).

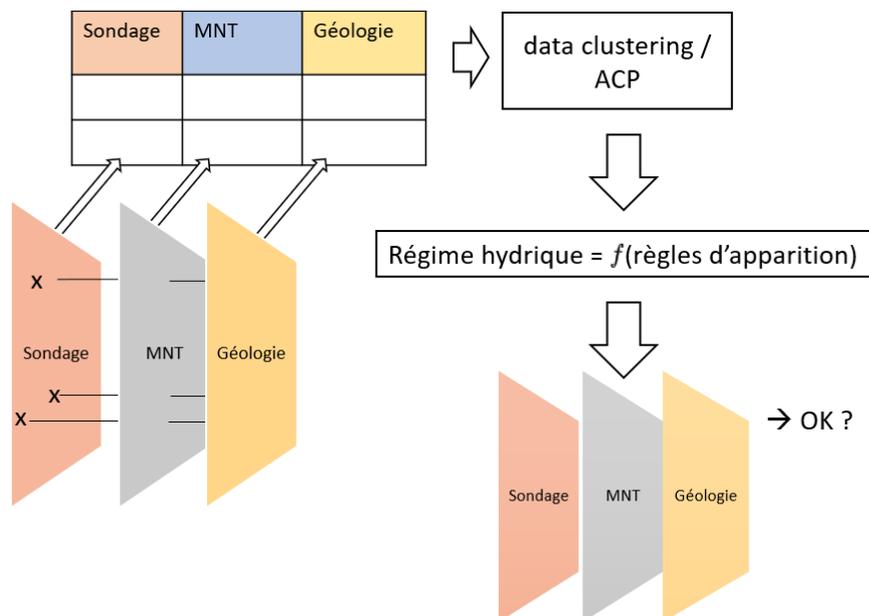


Figure 12 : Schéma des différentes étapes du traitement des données pour l'analyse spatiale du régime hydrique des sols agricoles.

4.3.2 Analyse de l'hypothèse 2

Les moyennes journalières de la teneur en eau (%) des sondes ont été exportées depuis la plateforme *RMA* *Advice for Sensorbased Irrigation Management* (cf. § 4.1.2). Elles ont permis de donner un état actuel de la dynamique hydrique du sol sur une saison (de décembre à avril).

Une ANOVA à un facteur a été réalisée afin de vérifier la significativité (p -value < 0.05) de la corrélation entre les données physico-chimiques (texture, densité apparente et porosité totale) et le type et l'intensité des traces d'hydromorphie (cn, g, gg, r). Un test de Durbin-Watson a été utilisé au préalable, afin de vérifier l'absence d'autocorrélation entre les variables.

Ces tests ont servi à lier les signes d'hydromorphie aux données du solum (teneur en eau, texture, porosité et densité) afin de trouver une méthode pour définir si l'engorgement du sol est temporaire ou permanent. Afin de lier le régime hydrique à la topographie, dans le but de définir si l'engorgement est permanent ou temporaire, les résultats et le traitement de données pour répondre à l'hypothèse **H.1** a été utilisés (cf. §2.1).

5 Résultats

En raison des conditions particulières de l'été (année 2018 marquée par la sécheresse), la nappe n'a été observée qu'à deux reprises. Dès lors, les variables quantitatives utilisées dans la matrice de données, en lien avec les descripteurs du régime hydrique, ont été la profondeur d'apparition du g et la profondeur d'apparition du gg (Annexe A). Les classes de régime hydrique définies sur la base de la KLABS, attribuées sur chacun des sondages, ont été adaptées en partie, pour faciliter le traitement des données. Ainsi, elles ont été réduites au nombre de huit, présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 7). Lorsque la nappe n'a pas assez d'influence pour en faire un sol hydromorphe mais que le profil présente tout de même des traces d'hydromorphie, les sols sont classés dans la catégorie **g**, **h**, **l** et **m**. Les sondages ne présentant aucune trace d'hydromorphie ont été classés comme **a** indépendamment de leur profondeur.

Tableau 7 : Classes de régime hydrique selon la KLABS (Annexe B). En rouge les types de régime hydrique liés à une nappe temporaire (**g**, **h**, **p**) et en bleu ceux liés à une nappe permanente (**l**, **m**, **s**, **t**).

Nom	Type de régime hydrique présent sur le terrain	Profondeur d'apparition du g
a	Percolés	-
g	Avec influence d'une nappe perchée temporaire	60 - 90 cm
h		40 - 60 cm
l	Avec influence d'une nappe permanente	60 - 90 cm
m		40 - 60 cm
p	Sols hydromorphes à nappe perchée	0 - 40 cm
s	Sols hydromorphes à nappe permanente	> 90 cm
t		60 - 90 cm

5.1 Analyses statistiques et spatiales

Les 119 sondages et profils ont été traités statistiquement par AFDM dont 26.1% de la variance est expliquée par les deux premières dimensions. A noter que la représentation restitue donc seulement le quart de l'information totale (Figure 13 à Figure 16).

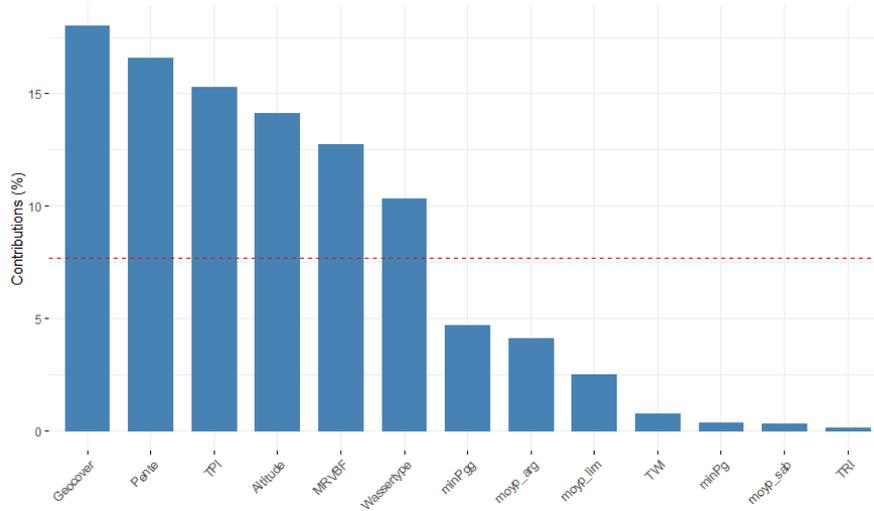


Figure 13 : Contribution des variables à la dimension 1. La géologie (18.0%), La pente (16.6%), le TPI (15.3%), l'altitude (14.1%), le MRVBF (12.7%), le régime hydrique (10.3%) sont les variables expliquant majoritairement la répartition des données pour la dimension 1. La ligne de référence (7.7%) (en rouge) correspond à la valeur attendue si la contribution des variables était uniforme.

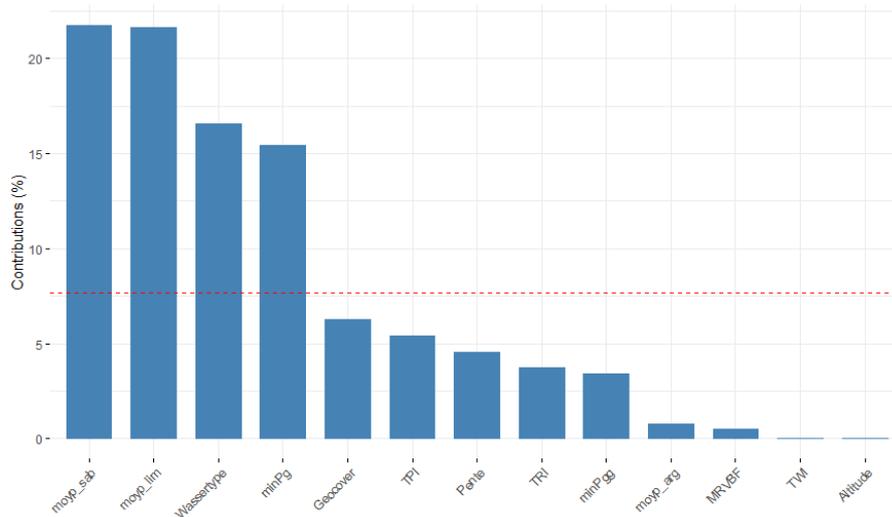


Figure 14 : Représentation de la contribution des variables à la distribution des données dans la 2^{ème} dimension. La moyenne pondérée du sable (21.7%) et du limon (21.6%), le type de régime hydrique (16.6%), la profondeur d'apparition de g (1.4%) explique le plus la répartition des données pour la dimension 2. La ligne de référence (7.7%) (en rouge) correspond à la valeur attendue si la contribution des variables était uniforme.

L'AFDM montre que les six variables les plus influentes dans la distinction des sondages sont la géologie, la pente, le TPI, l'altitude, le MRVBF et le régime hydrique pour la dimension 1. Dans la dimension 2, ce sont la moyenne pondérée du sable et la moyenne pondérée du limon, le régime hydrique et la profondeur d'apparition du g qui représentent principalement la répartition des données. Les variables quantitatives ont été projetées sur le cercle de corrélation (Figure 15). Les variables qualitatives ont été projetées sur les deux dimensions (Figure 16).

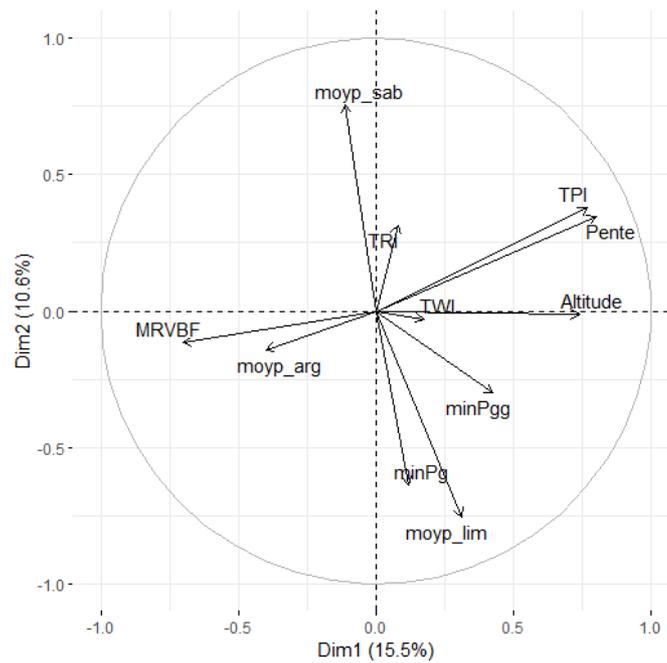


Figure 15 : Le cercle de corrélation pour les variables quantitatives testées à l'aide de la fonction FAMD du package « FactorMine ». Cinq dimensions ont été conservées.

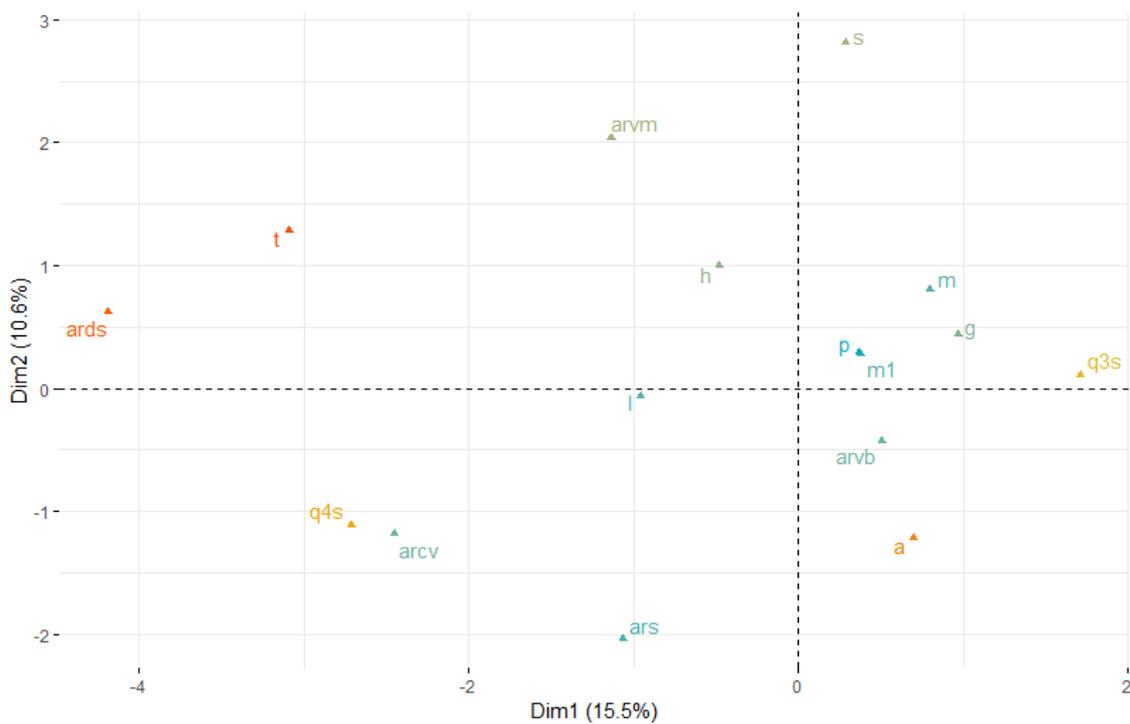


Figure 16 : Les variables qualitatives (la géologie tirée du geocover et le type de régime hydrique, selon les classes de la KLABS) projetées dans les deux dimensions avec ars (marais drainé), arvm (débris de moraine), arcv (cône de débris de ruisseau), arvb (molasse altérée), m1 (molasse du Burdigalien), q3s (les graviers du Riss) et q4s (alluvions fluvio-glaciaires du Würm).

5.1.1 Classification ascendante hiérarchique sur les résultats de l'AFDM

La classification ascendante hiérarchique (CAH) (fonction « agnes » dans R) (Figure 23) a été faite sur la base de l'AFDM. La classification en 6 groupes est celle qui a été retenue pour cette étude car elle représente le mieux la diversité des sondages décrits sur le terrain (Annexe E des autres tests réalisés). De plus, le diagramme d'inertie (encart, Figure 17), présente un saut qui est encore net entre la 5^{ème} classe et la 6^{ème} classe.

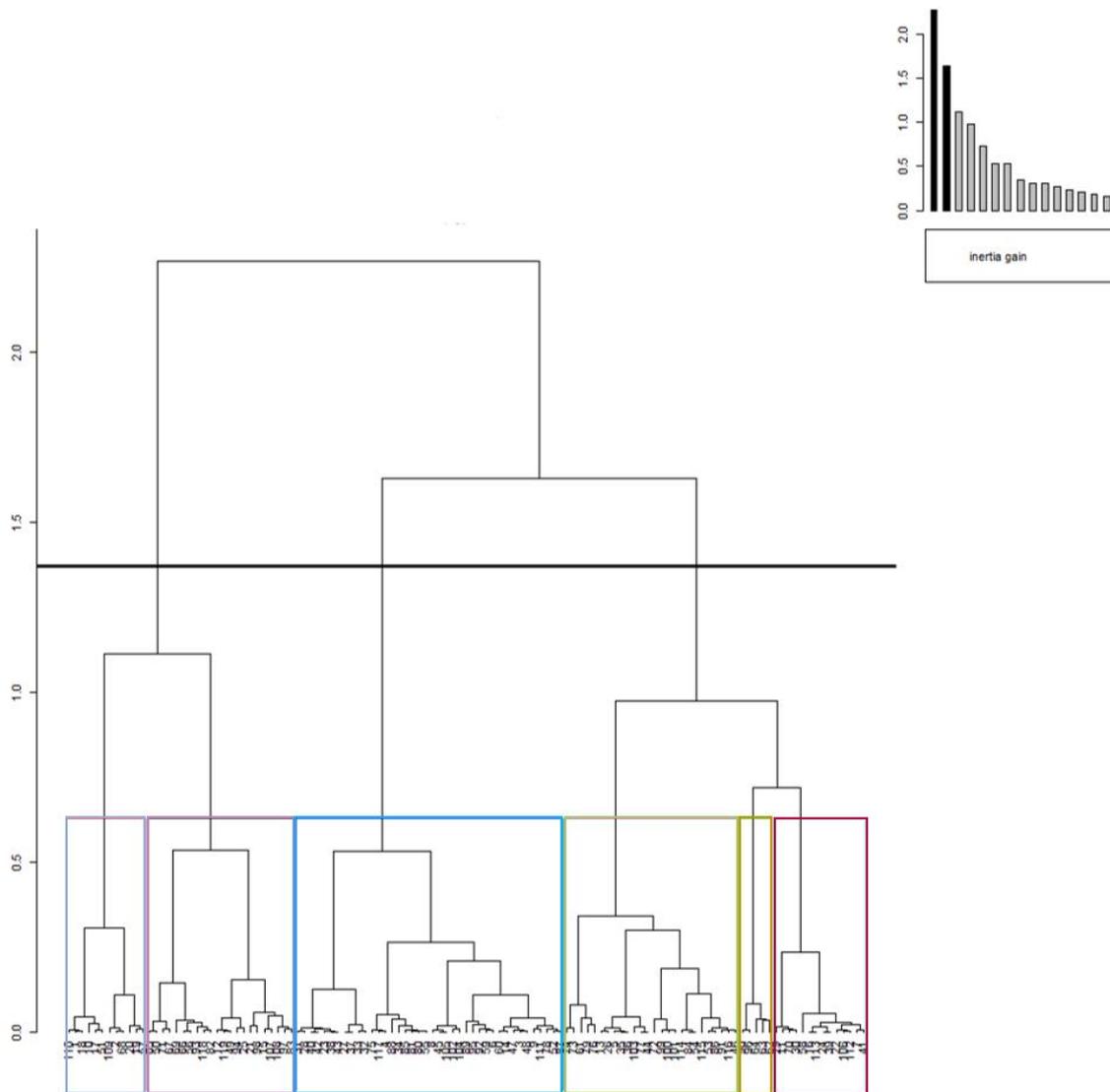


Figure 17 : Résultat de la classification ascendante hiérarchique établie avec la fonction « agnes ». Les numéros de sondage correspondant à chaque groupe, peu lisibles sur ce graphe, peuvent être lus dans la carte (Figure 18). L'encart indique les inerties du dendrogramme.

Les six groupes ont été attribués à chacun des sondages sur Qgis. Les cartes réalisées (Figure 18 et Figure 19) montrent une bonne proximité spatiale entre les groupes.

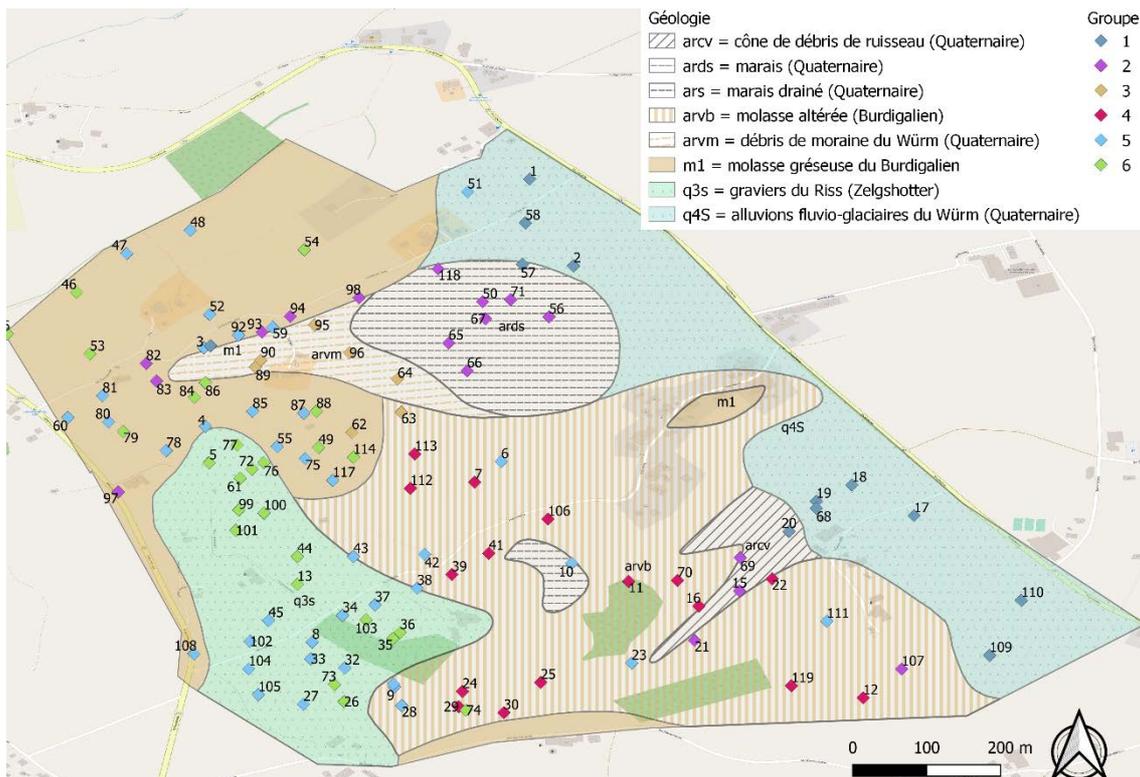


Figure 18 : Situation des sondages et profils, colorés selon le groupe auquel ils appartiennent, établis par la CAH d'après les résultats de l'AFDM. La couche de fond utilisée pour la carte est tirée du geocover.

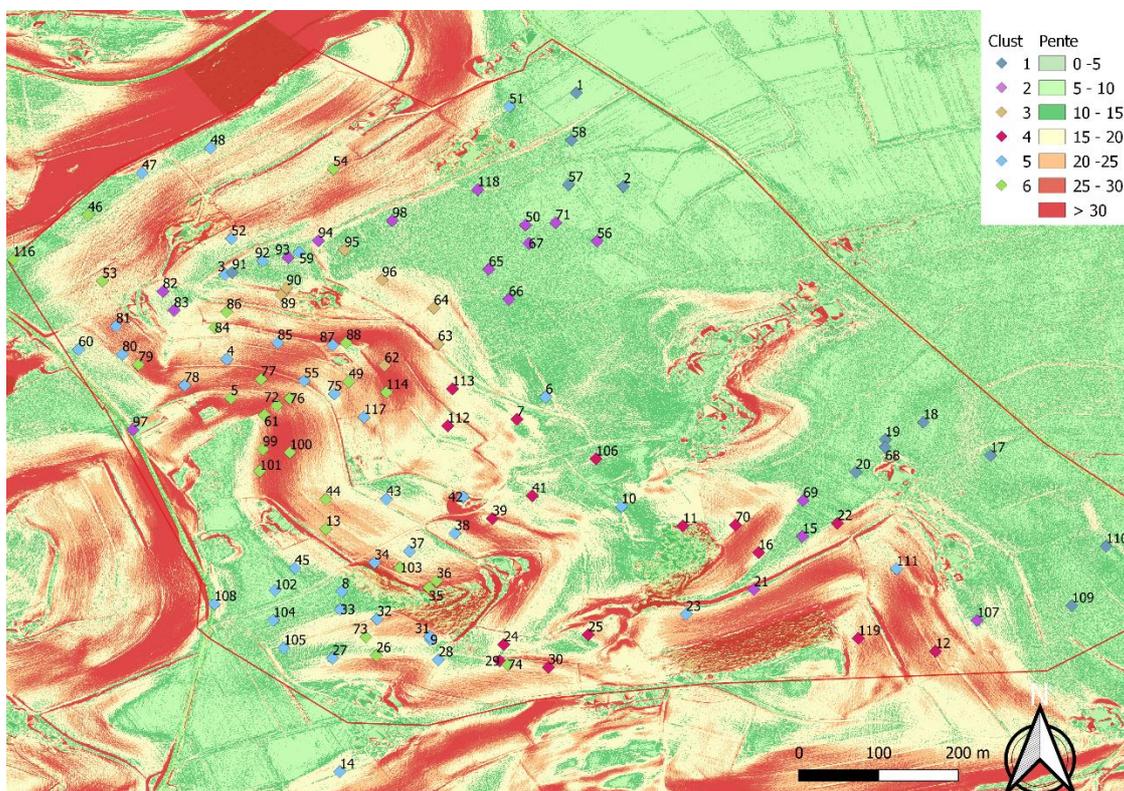


Figure 19 : Situation des sondages et profils, colorés selon le groupe auquel ils appartiennent, établis par la CAH d'après les résultats de l'AFDM. La couche de fond utilisée pour la carte est la pente tirée du MNT.

5.1.2 Régression linéaire

Les figures suivantes montrent la répartition des classes de régime hydrique attribuée à chacun des sondages en fonction des variables environnementales utilisées dans l'AFDM. Un test de Durbin-Watson a été utilisé au préalable dans le but de tester l'absence d'autocorrélation des résidus. Une corrélation statistiquement significative (p -value < 0.05) est montrée entre le régime hydrique et la pente (p -value de 0.0046), l'altitude (p -value de 0.0094), le MRVBF (p -value de 0.0038) et la géologie (p -value de 0.0005). Les résultats avec le TPI, TRI et TWI ne sont pas significatifs (p -value respectivement de 0.2291, 0.7861 et de 0.3347) et n'ont pas été retenus.

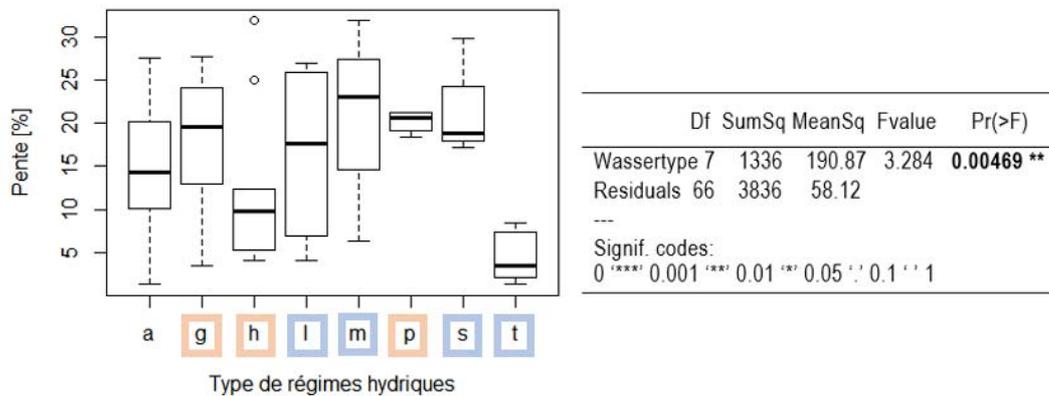


Figure 20 : Type de régime hydrique selon la pente calculé à l'aide d'une ANOVA. La variable qualitative réponse est le type de régime hydrique et la variable explicatives est la pente. Ici l'interaction est statistiquement significative (p -value < 0.05). Avec **g, h, p** en situation d'engorgement temporaire, influencé par une nappe perchée et **l, m, s et t** en situation d'engorgement permanent, influencé par une nappe de fond.

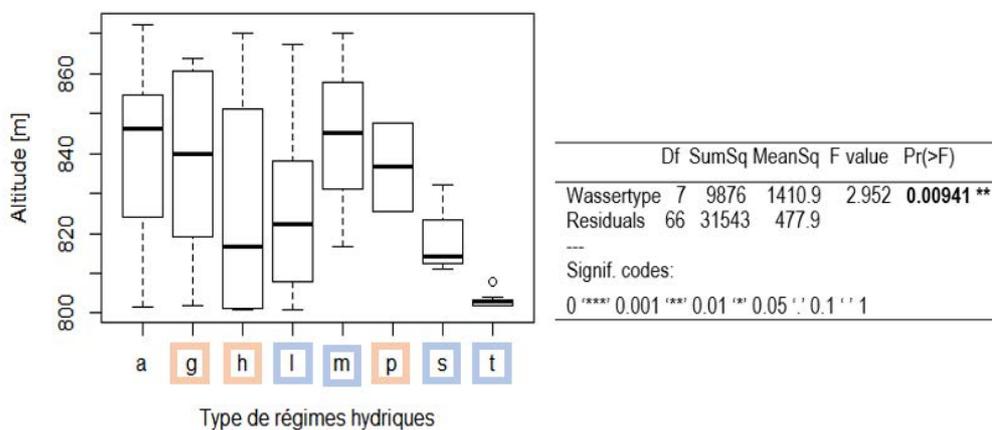


Figure 21 : Type de régime hydrique selon l'altitude, calculé à l'aide d'une ANOVA. la variable qualitative réponse est le type de régime hydrique et la variable explicative est l'altitude. L'interaction est statistiquement significative (p -value < 0.05). Avec **g, h, p** en situation d'engorgement temporaire, influencé par une nappe perchée et **l, m, s et t** en situation d'engorgement permanent influencée par une nappe de fond.

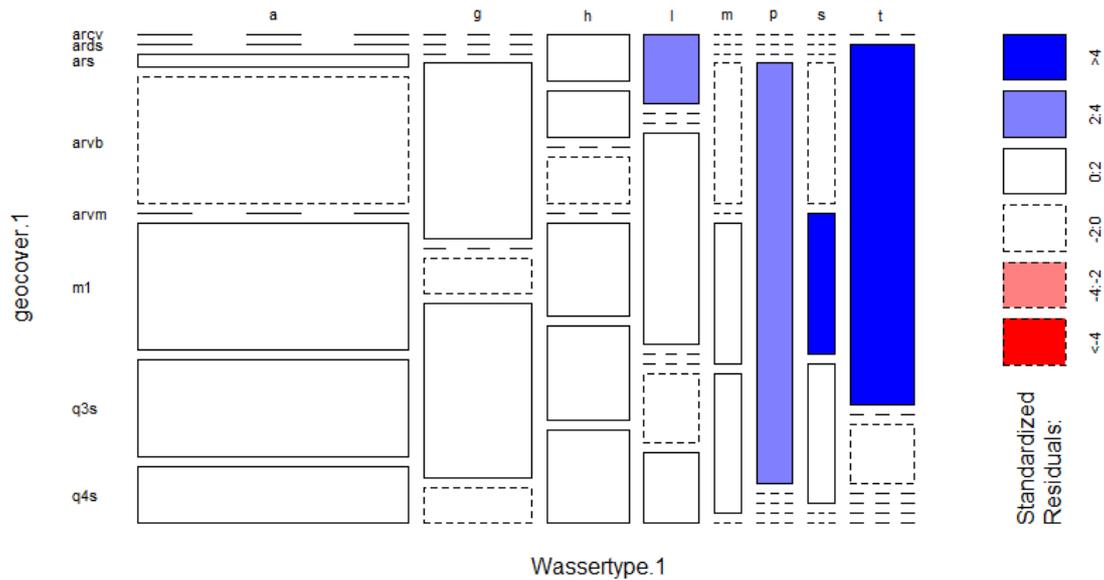


Figure 22 : Graphique en mosaïque. Le teste de Fisher a été utilisé pour calculer la régression entre deux variables qualitatives. La p-value est de 0.0005. Avec **g, h, p** influencés par une nappe perchée et **l, m, s** et **t** influencés par une nappe de fond permanente.

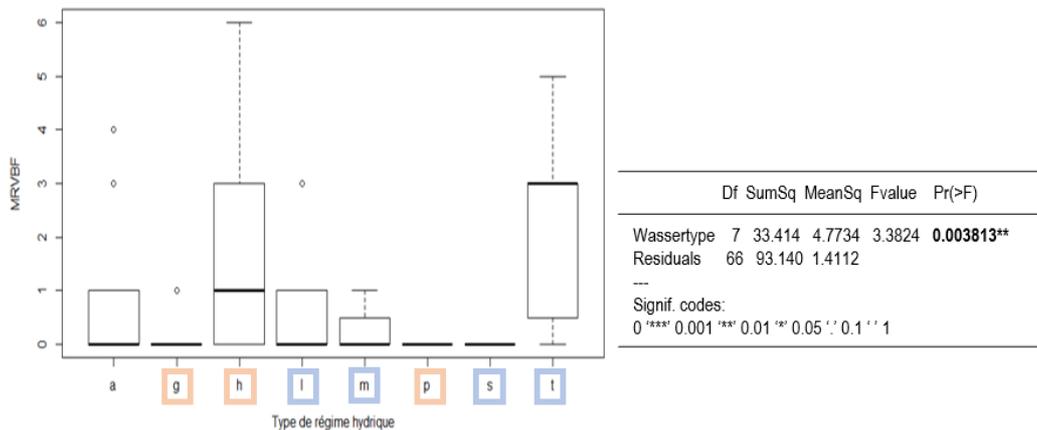


Figure 23 : Type de régime hydrique selon le MRVBF calculé à l'aide d'une ANOVA. La variable qualitative réponse est le type de régime hydrique et la variable explicative est le MRVBF. L'interaction est statistiquement significative ($p\text{-value} < 0.05$). Avec **g, h, p** influencés par une nappe perchée et **l, m, s** et **t** influencés par une nappe de fond permanente.

Bien que le test de significativité soit positif pour ces différentes variables environnementales, il est possible d'observer une grande dispersion dans l'altitude, la pente et le MRVBF dans lesquelles les régimes hydriques sont observés. Les facteurs d'altitude et de pente (Figure 20) semblent toutefois influencer les régimes **a, g, m** et **p** avec une altitude et une pente médiane plus élevée alors que les régimes **h, l, s** et **t** sont majoritairement représentés aux altitudes plus basses. Les valeurs extrêmes rencontrées, ainsi que l'écart entre le premier et troisième quartile suggèrent l'influence d'un facteur non dépendant de l'altitude et de la pente.

5.1.3 Résumé de la répartition spatiale des différents groupes et de leur classe de régimes hydriques selon les variables environnementales

Les résultats pour les différents groupes formés statistiquement sont présentés plus en détail selon les variables environnementales les plus significatives dans la relation avec le régime hydrique, à savoir, la pente, l'altitude, le MRVBF et la géologie. La texture (sable et limon), expliquant le plus la répartition des sondages, dans l'AFDM (Figure 13) est également prise en compte.

Tableau 8 : Analyse croisée du régime hydrique (R.H) et des groupes (1 à 6) pour les variables environnementales quantitatives ayant le plus d'influence sur le régime hydrique. La profondeur d'apparition du g (MinPg) et de gg (MinPgg) est aussi représentée.

R.H	Pente (%)						Altitude (m)						Moyenne MRVBF						Sable (%)						Limon (%)					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
a	4	11		16	43		800		816		846	836	2.5		0.5		0.3	0.0	56	58		54	61		31		26		32	27
g	4		15	23			801			824		853	1.5			0.3	0.0	59			54	57		23			33		29	
h	6		12	20			814			817		854	3.2			1.0	0.1	58			51	61		26			29		25	
l	4	7	20	8	17		801	820		830	871	857	3.0	1.0		0.0	0.0	0.0	50	52		53	50	68	29	30		36	36	20
m	9		20		28			812		842		856		0.5		0.0	0.0		46		53	59			32		30		28	
p			19							835						0.0					51						31			
s		22							819							0.0					61						23			
t	7	13						810	815					1.5	0.0				58	66					25	20				

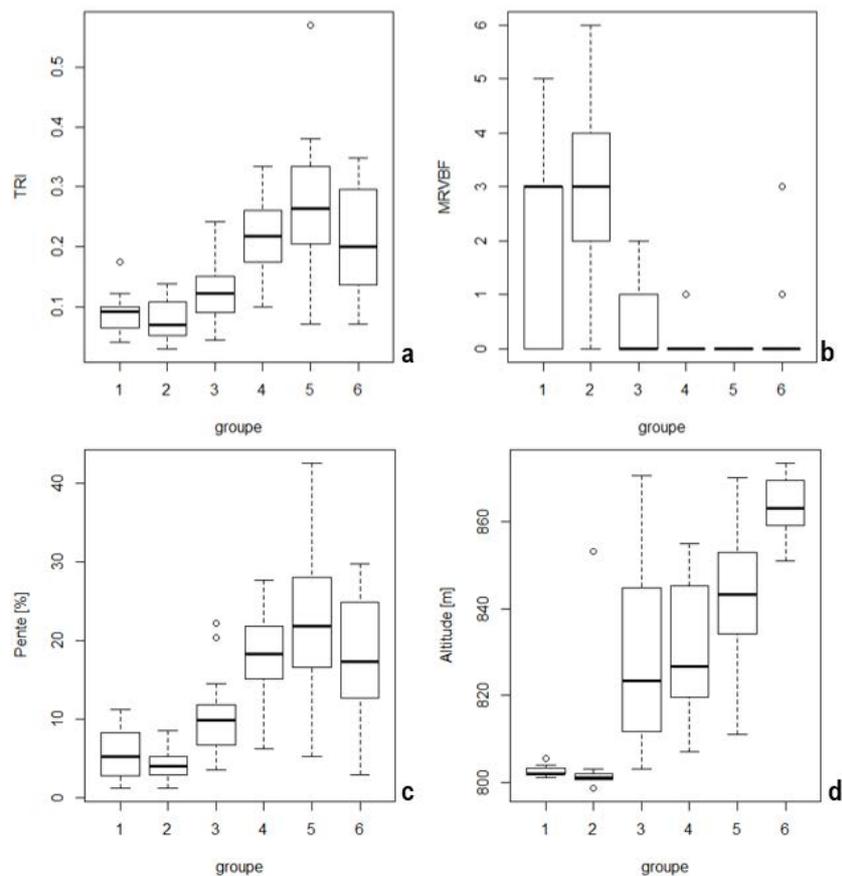


Figure 24 a, b, c, d, e et f : Boxplots représentant les six groupes formés lors de la CAH selon la profondeur d'apparition du g et gg (a et b) et les variables quantitatives environnementales expliquant le mieux la première dimension (pente, altitude, TRI et MRVBF) (respectivement c, d, e et f).

Groupe 1

Le groupe statistique 1 rassemble les sols situés en bas de pente (MRVBF entre 1.5 et 3, indiquant un fond de vallée large et plane (pente en moyenne de 4%), exclusivement formés dans les alluvions fluvio-glaciaires du Würm (Figure 18). Ce groupe est caractérisé par un régime hydrique de type **a**, **g**, **h** et **l** avec des sols percolés ou faiblement influencés par une nappe et peu de trace d'oxydation intense (gg) (Tableau 6 et Figure 32). Le type **g** et **h** (sol percolé influencé par une nappe perchée) présente un plus faible taux de limon (en moyenne entre 23 et 26%) que le type **l** (sol percolé influencé par une nappe permanente profonde) (Figure 32).

Groupe 2

Le groupe statistique 2 regroupe des sols situés en bas de pente à une faible altitude (Tableau 8). Ce groupe caractérise les sols du marais drainé (Figure 18) et présente des classes de régimes hydrique influencées par une nappe permanente (**l**, **m** et **t**) (Tableau 8). Les sols hydromorphes **t** sont caractérisés par un taux de sable plus élevé (58% en moyenne) que les sols percolés influencés par une nappe permanente (**l** et **m**) (respectivement 46 et 52%).

Groupe 3

Peu de sondages représentent le groupe 3 qui est localisé dans le cône de débris de moraine (Figure 18) avec un régime hydrique de type **s** et **t** (sols hydromorphes avec nappe permanente) pour une pente abrupte (respectivement en moyenne 22 et 13%). Les sondages situés sur une pente plus douce (en moyenne de 11%), sont positionnés légèrement en fond de colline (MRVBF de 0.5) et sont de type **a** (Tableau 6 et Figure 32).

Groupe 4

Le groupe statistique 4 est caractérisé par des sondages situés à une altitude médiane entre 817 et 842 m, sur les flancs nord-est des collines de la zone d'étude (pente entre 12 et 20% en moyenne, Figure 19), dans la molasse altérée du Burdigalien (Figure 18). Des classes de régime hydrique plus hétérogènes composent ce groupe (**g**, **h**, **l**, **m** et **p**) (Tableau 6 et Figure 32). Les sols percolés influencés par une nappe perchée (**g** et **h**) sont situés légèrement en fond de pente (MRVBF de 0.25 et 1 en moyenne). Les sols hydromorphes influencés par une nappe perchée sont représentés exclusivement dans ce groupe (Tableau 6 et Figure 32).

Groupe 5

Le groupe statistique 5 rassemble deux types de sols. Le premier présente un régime hydrique percolé (**a**), situé à une altitude médiane de 846 m, sur les flancs nord-est des collines. Le second possède un régime hydrique de type **l** (sol percolé influencé par une nappe permanente profonde) et se situe sur les zones plates des sommets des collines, côté sud-ouest (Tableau 6 et Figure 32). Ce groupe présente une diversité importante au niveau de la géologie mais est présent uniquement sur le côté sud-ouest de la zone d'étude.

Groupe 6

Le groupe 6 ne regroupe pas de sols hydromorphes (**p**, **s** ou **t**) mais toutes les autres classes de régime hydrique y sont représentées (**a**, **g**, **h**, **l** et **m**). Les sols percolés (**a**) se trouvent sur une très forte pente (43% en moyenne), tous les autres sondages de ce groupe sont confinés à des altitudes variant de 853 à 859 m.

5.1.4 Carte de prédiction

Une carte de prédiction de la profondeur d'apparition du **g** a été établie avec les données des sondages et les variables environnementales sélectionnées selon l'AFDM. Il n'y avait pas assez de données concernant la profondeur d'apparition du **gg** pour établir une carte de prédiction à l'aide de la méthode random forest.

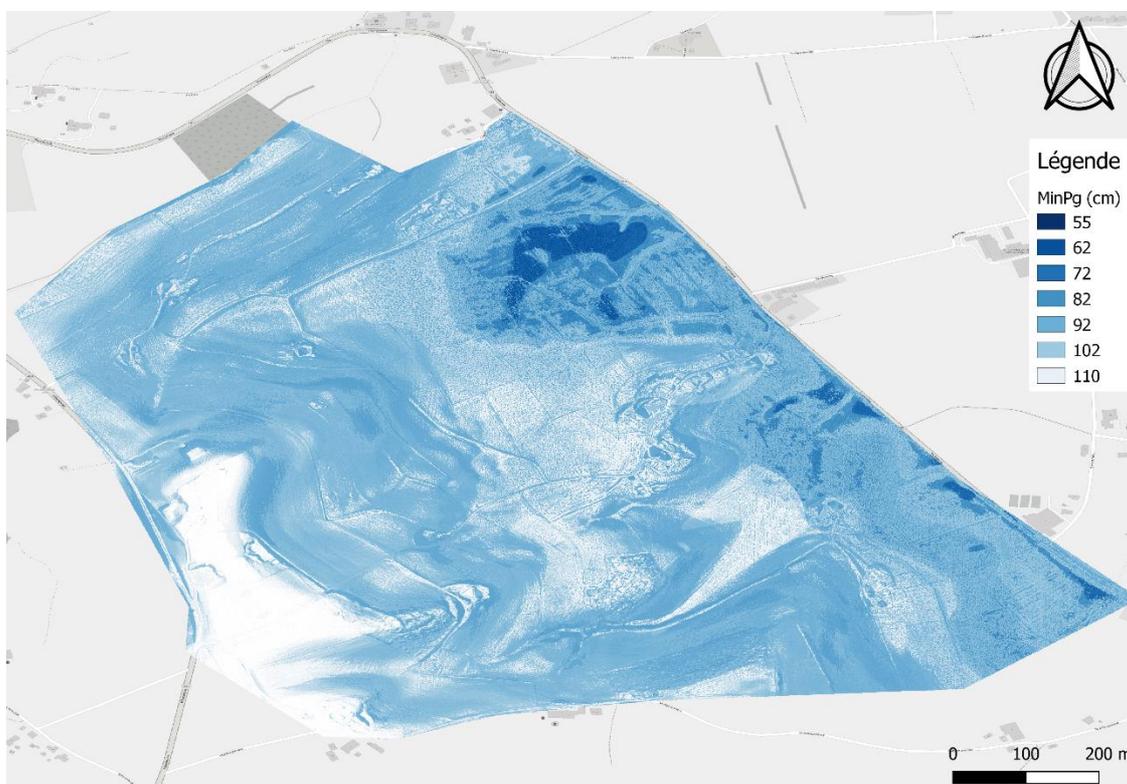
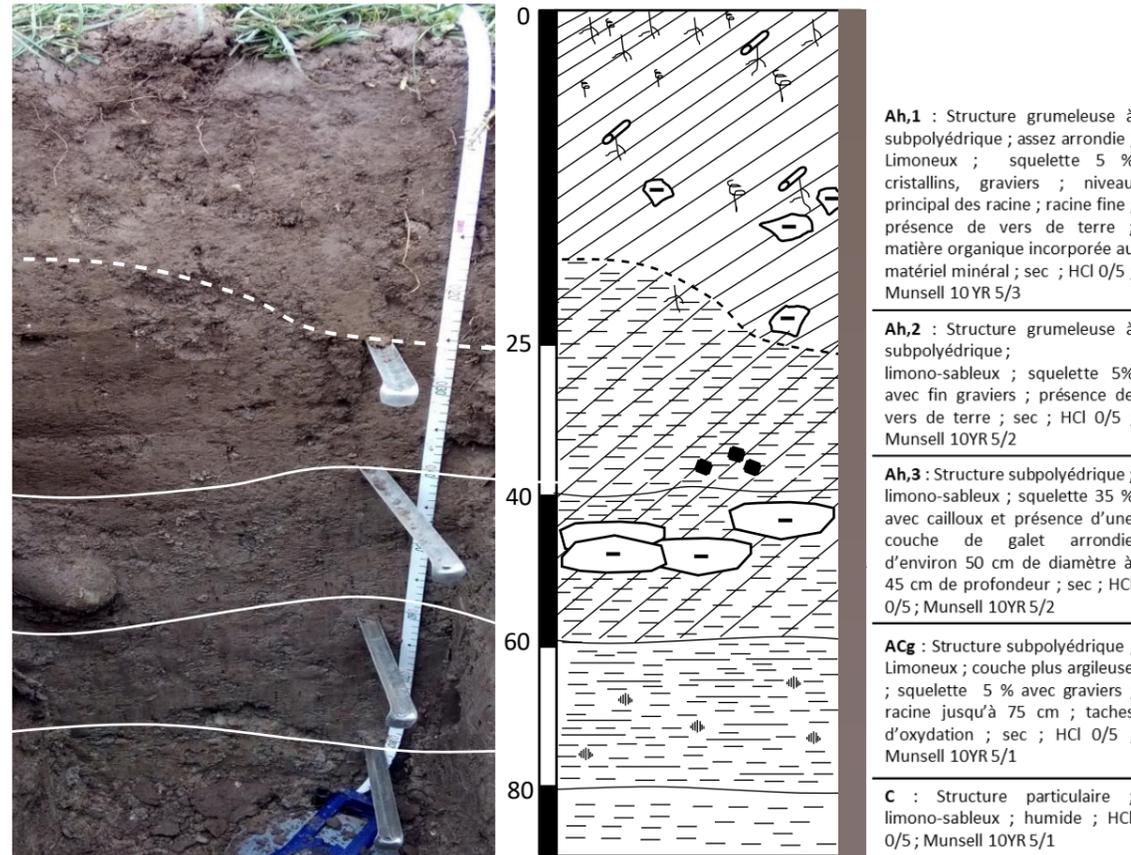


Figure 25 : Carte de prédiction de la profondeur d'apparition des traces d'oxydation (**g**) sur la zone d'étude. Les surfaces où aucune trace d'hydromorphie n'a été observée (sur une profondeur de 120 cm, qui représente la longueur de la tarière) sont représentées en blanc.

5.2 Sondes capacitives et données des profils pédologiques

Pour plus de lisibilité, les résultats des sondes capacitives et des profils sont présentés dans des fiches A3. Chaque fiche comprend les résultats des fosses pédologiques (détermination *in situ* et analyses en laboratoire) et les données mensuelles de la teneur en eau (%).

Nom	P_01	Date	19 décembre 2018
Classification Suisse des sols (KLABS, 2008)	Type : Regosol colluvial à mull (1323)	Référentiel pédologique (RP, 2009)	COLLUVIOSOL, de bas de versant, cultivé, à mull
	Sous-type : colluvial (Pk) tassé (L2), faiblement pseudogleyifié (I1), Faiblement mouillé (R1)		
Commune	Schwarzenburg (BE)	Coordonnées GPS	2°59'862/1°18'4'580
Topographie	3 %	Altitude	801 m
Végétation	Prairie permanente	Matériau de départ	Gravier du Würm (SC4)
Engorgement	Faible influence d'une nappe perchée temporaire, modérément profond (g)		



N°	Profondeur cm	Nom (KLABS)	Nom (RP)	pH H2O	pH KCl	MO (PAF) %	Corg (Hum) %	Texture Argile %	Limon %	Sable %	Profondeur et intensité d'hydromorphie
1.1	0 - 25	Ah,1	A1	6.5	5.8	6.9	6.3	20	22	58	-
1.2	25 - 40	Ah,2	A2	6.8	6.0	3.7	3.6	18	22	60	-
1.3	40 - 60	Ah,3	A3	6.9	6.4	3.6	3.1	19	22	59	-
1.4	60 - 80	ACg	ADg	7.1	5.0	2.9	2.0	23	19	58	g
1.5	80 - 95	C	Dx	7.2	6.4	-	0.5	18	19	63	-

Figure a : Fiche représentant les données du profil 1 récoltées in situ et les analyses physico-chimiques dans le tableau du bas.

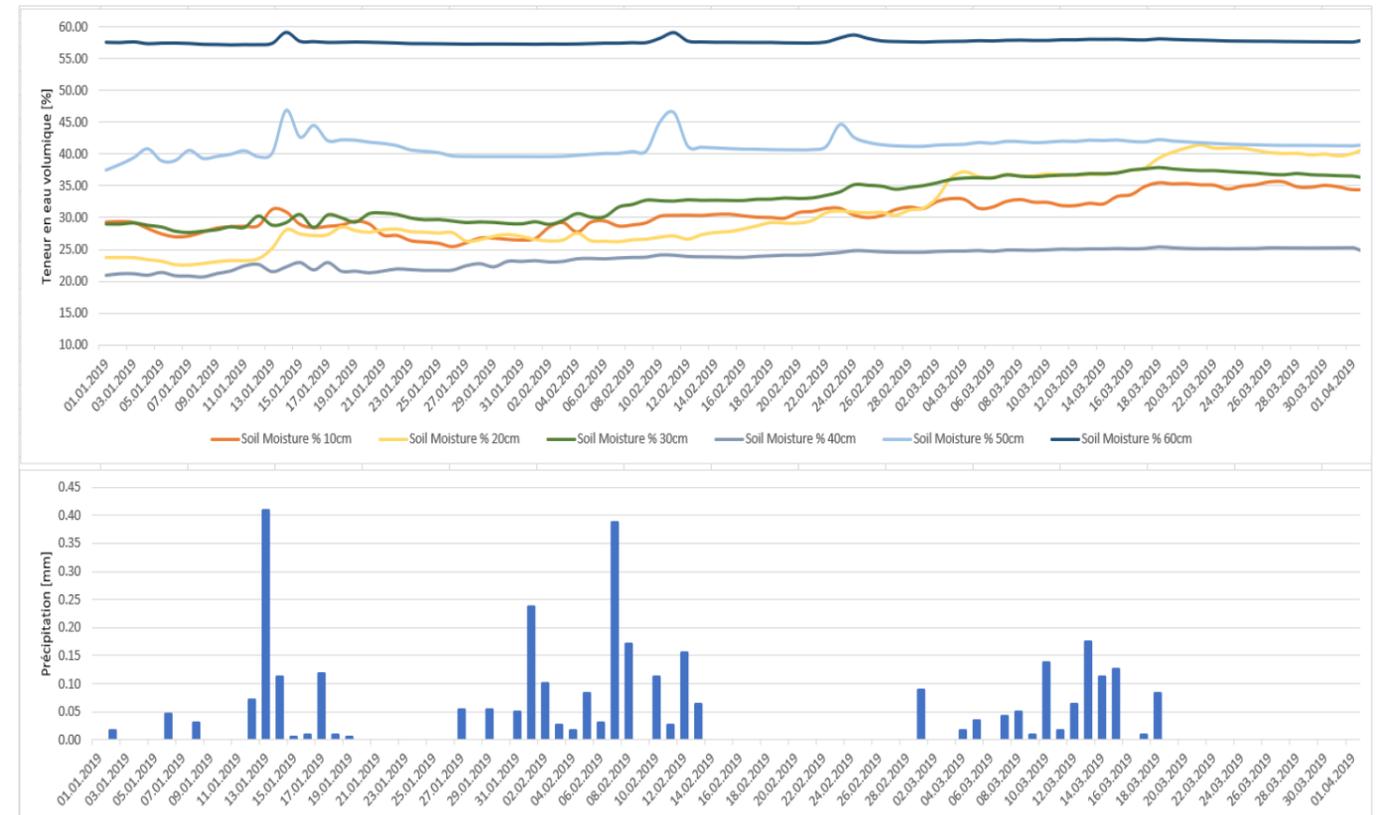


Figure b : Teneur en eau volumique (%) et précipitations (mm) mesurée à proximité de P1 depuis fin décembre à début avril.

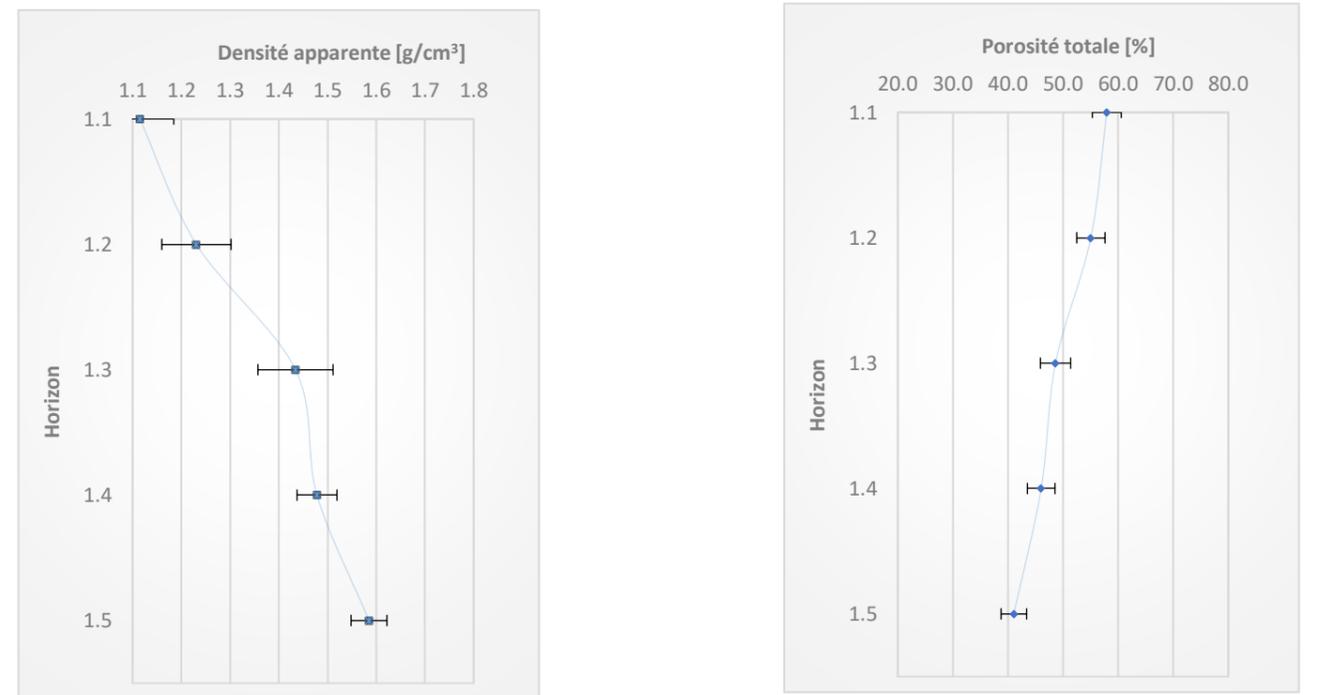
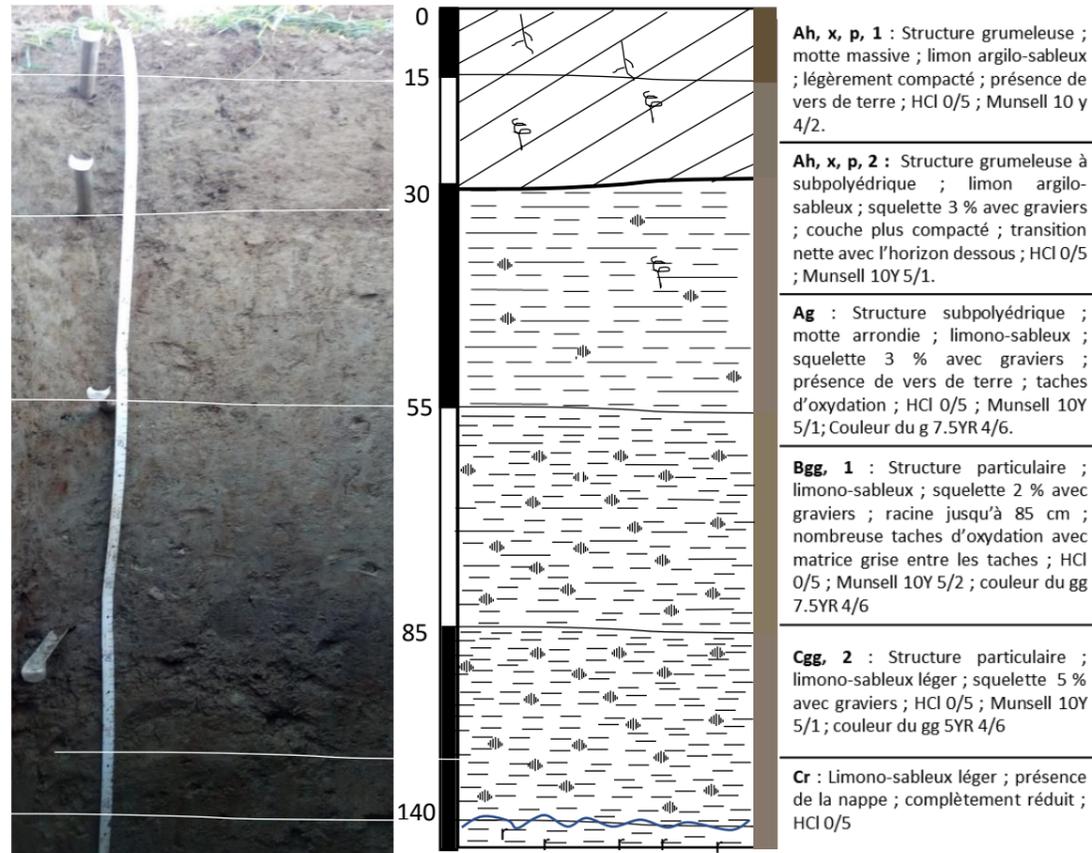


Figure c1 et c2 : Densité apparente [DA] et porosité totale (%) mesurées à l'aide de cylindre dans le profil 1. Des triplicats ont été prélevés et la moyenne a été faite pour chacun des horizons. Les écarts-types ont été mesurés d'après la valeur de chacun des triplicats.

Nom	P_02	Date	19 décembre 2018
Classification Suisse des sols (KLABS, 2008)	Type : Gley-sol brun 6356	Référentiel pédologique (RP, 2009)	COLLUVIOSOL REDUCTIQUE de bas de versant
	Sous-type : tassé (L2), gleyifié (I1), Faiblement mouillé (R1)		
Commune	Schwarzenburg (BE)	Coordonnées GPS	2°59'47.59"/1°18'47.482"
Topographie	8 %	Altitude	805 m
Végétation	Prairie permanente	Matériau de départ	Altération de la molasse (arvb)
Engorgement	Nappe permanente de fond/pente, rarement engorgé jusqu'en surface, assez superficiel (s)		



N°	Profondeur cm	Nom (KLABS)	Nom (RP)	pH H2O	pH KCl	MO (PAF) %	Corg (hum) %	Texture Argile %	Limon %	Sable %	Profondeur et intensité hydromorphie
2.1	0-15	Ahp, 1	ALs	6.3	5.7	6.7	4.8	24	22	55	-
2.2	15-30	Ahp,2	LA	6.3	5.7	4.3	3.8	25	22	53	-
2.3	30-55	Ag	Ag	6.6	5.8	1.2	2.0	19	22	59	g
2.4	55-85	ABgg	Jp	6.8	5.8	0.8	1.1	17	25	58	gg
2.5	85-140	Cgg	Go	6.8	5.9	-	0.4	11	11	78	gg
2.6	140+	Cr	Gr	6.9	5,8	-	0.6	14	16	71	r

Figure d : Fiche représentant les données du profil 2 récoltées in situ et les données des analyses physico-chimiques dans le tableau du bas

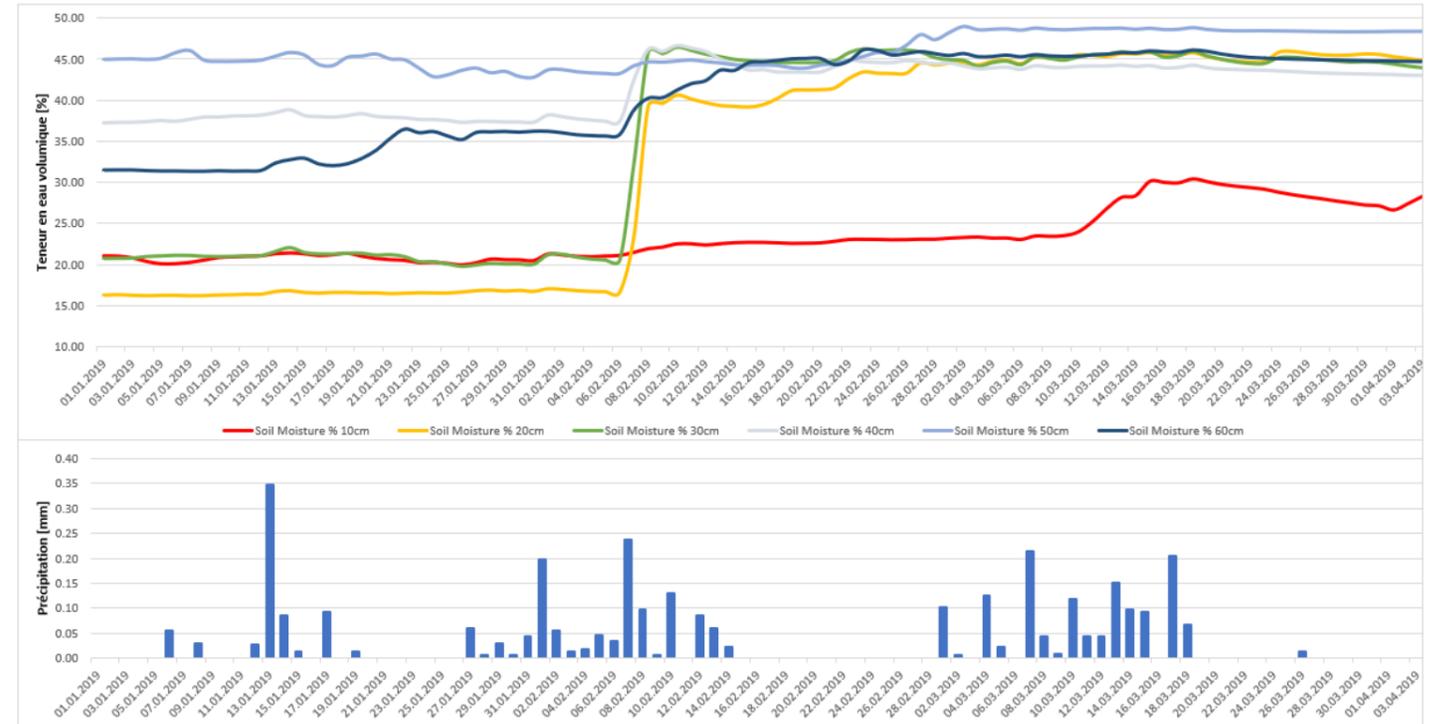


Figure e : Teneur en eau volumique (%) et précipitations (mm) mesurée à proximité de P2 depuis fin décembre à début avril.

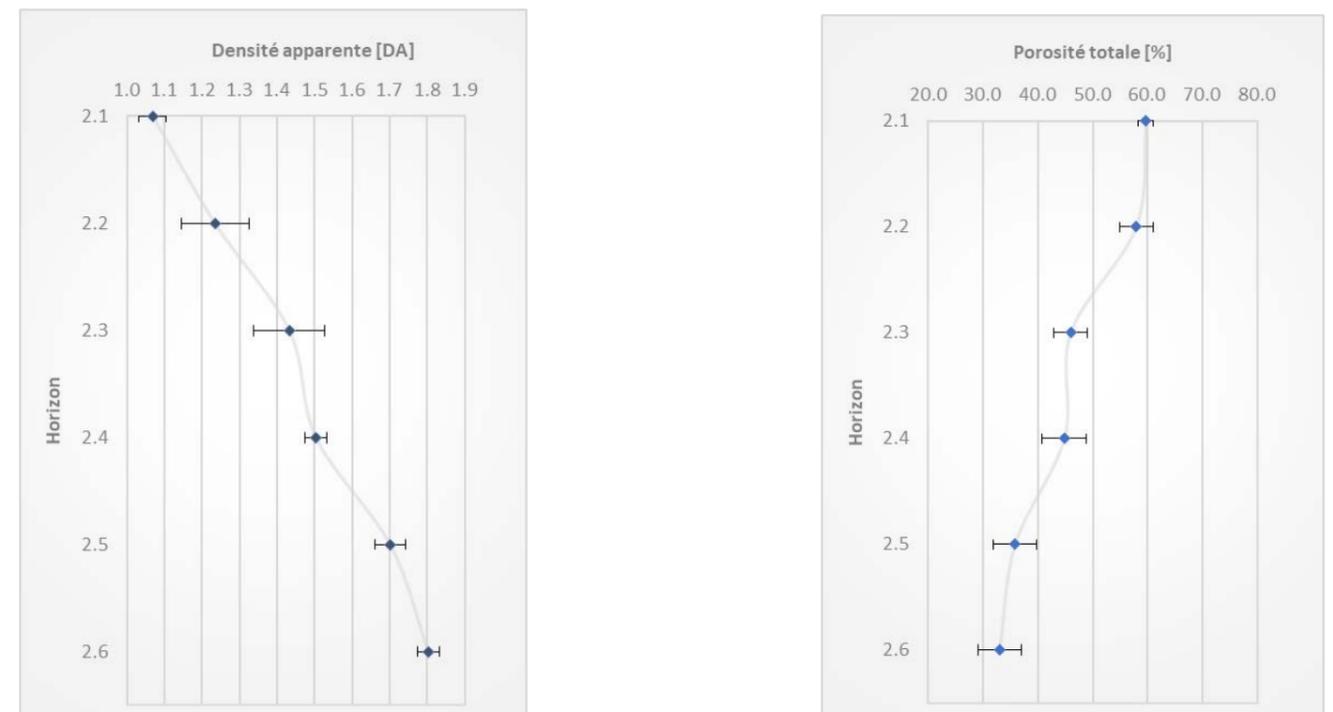
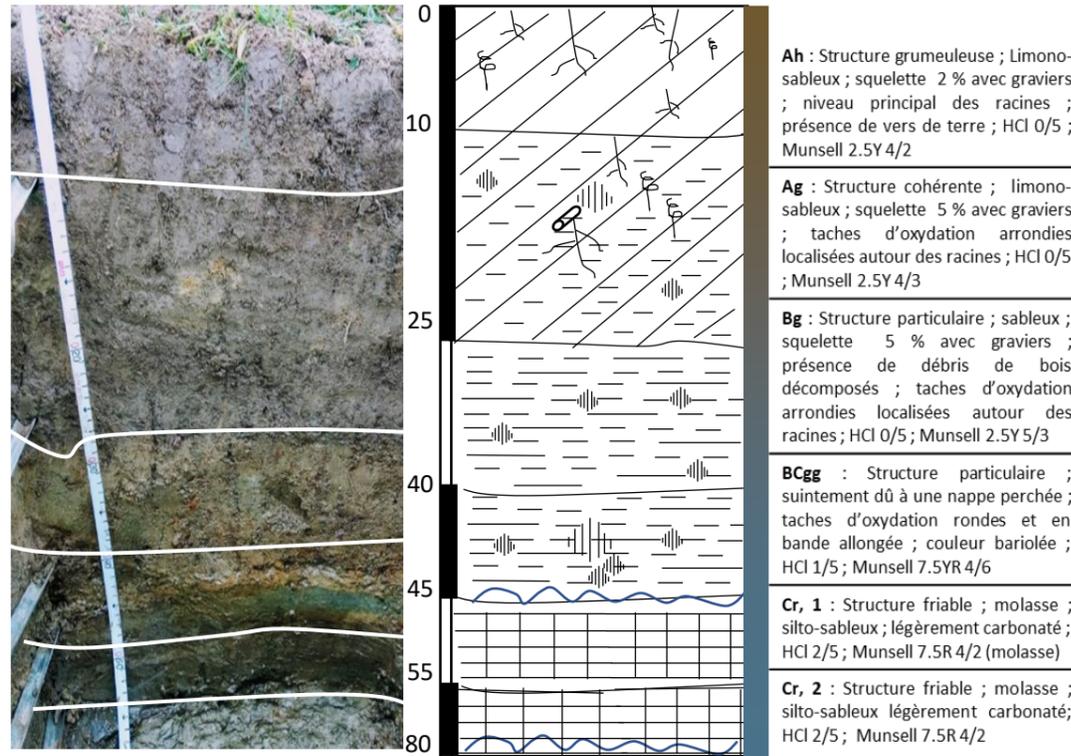


Figure f1 et f2 : Densité apparente [g/cm³] et porosité totale (%) mesurées à l'aide de cylindre dans le profil 1. Des triplicats ont été prélevés et la moyenne a été faite pour chacun des horizons. Les écarts-types ont été mesurés d'après la valeur de chacun des triplicats.

Nom	P_03	Date	Le 26 décembre 2019
Classification Suisse des sols (KLABS, 2008)	Type : Pseudogley (4376) érodé	Référentiel pédologique (2009)	REDOXISOL surrédoxique, à horizon d'altération, issu de molasse marneuse.
	Sous-type : érodé (PE), marmorisé (FM), très fortement pseudogleyifié (14)		
Commune	Schwarzenburg (BE)	Coordonnées GPS	2°59'4"674 / 1°18'4"437
Topographie	15 % (Fond de pente)	Altitude	820 m
Végétation	Prairie permanente	Matériau de départ	Molasse marneuse du Burdigalien
Engorgement	Nappe perchée temporaire due à un horizon peu perméable (p)		



N°	Profondeur cm	Nom (KLABS)	Nom (RP)	pH H2O	pH KCl	MO (PAF) %	Corg (Hum) %	Texture			Profondeur et intensité hydromorphie
								Argile %	Limon %	Sable %	
3.1	0-10	Ah, cn	A	6.8	6	4.9	4.3	17	22	61	cn
3.2	10-25	Ag	Ag	6.7	5.9	2.4	2.8	16	21	63	g
3.3	25-40	Bg	Sg	6.7	5.8	-	0.8	11	17	72	g
3.4	40-45	BCgg	llgk	6.8	5.8	-	0.4	6	18	76	gg
3.5	45-55	Cr,1	Mma	7.9	7.4	-	0.3	5	42	52	r
3.6	55-80+	Cr,2	Mma	8	7.4	-	0.4	9	50	41	r

Figure g: Profil réalisé en décembre 2019, proche d'un îlot forestier de hêtre, sous prairie permanente. Les analyses physico-chimiques sont représentées dans le tableau du bas.

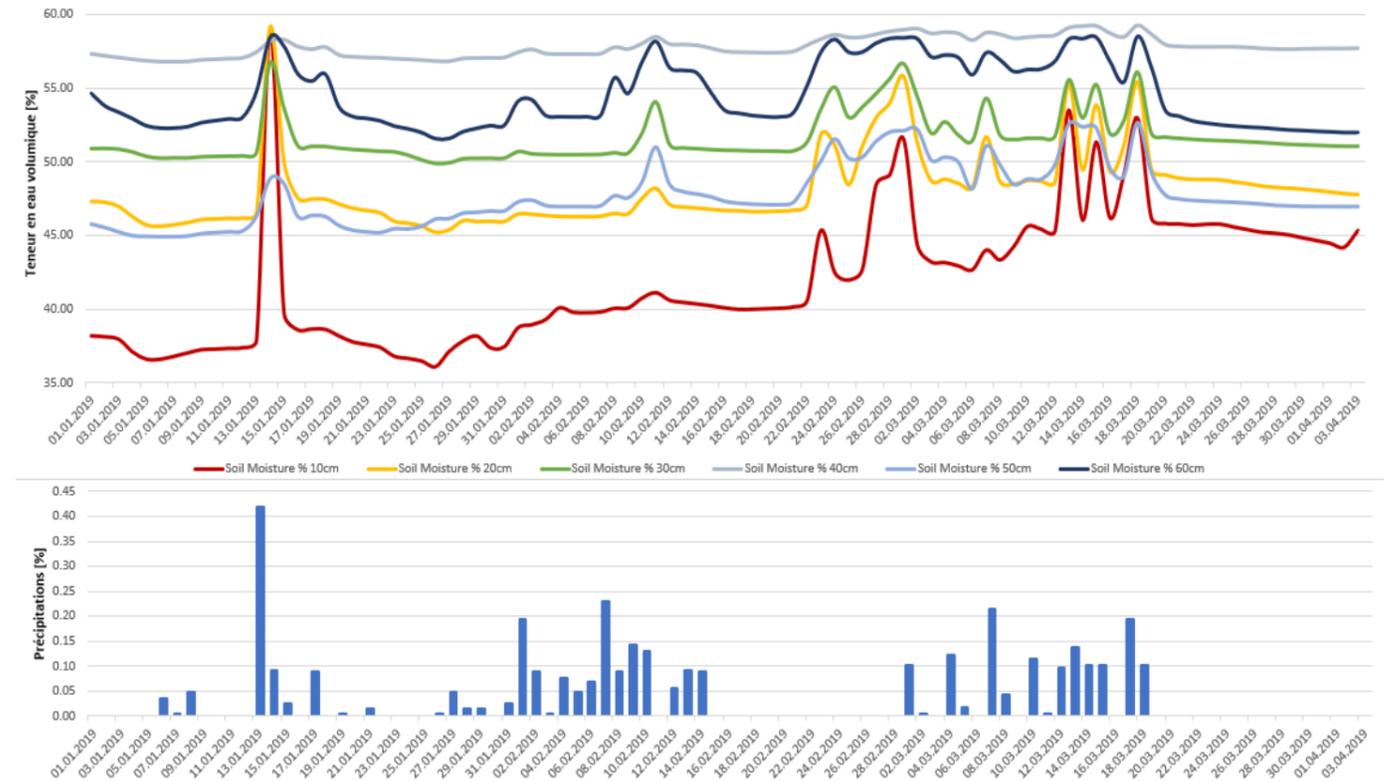


Figure h: Teneur en eau volumique (%) et précipitations (mm) mesurée à proximité de P1 depuis fin décembre à début avril sous prairie permanente.

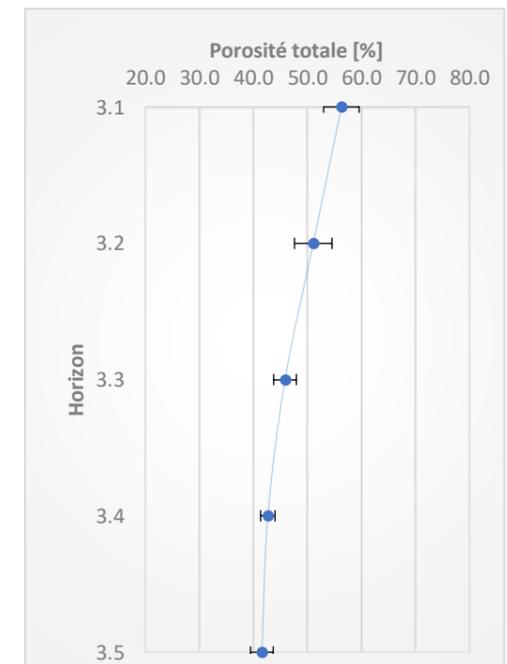
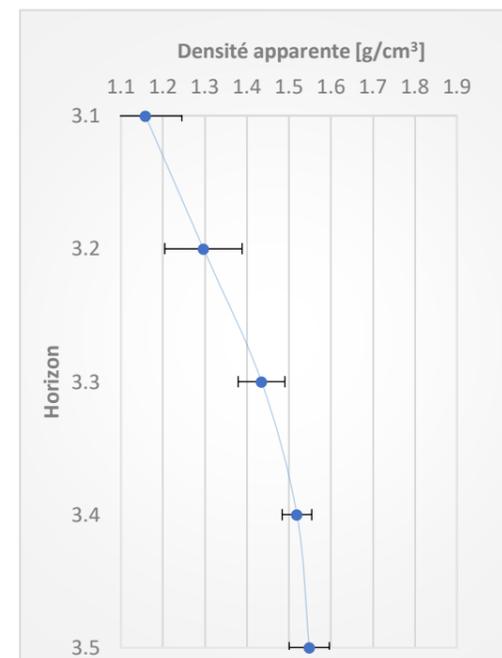
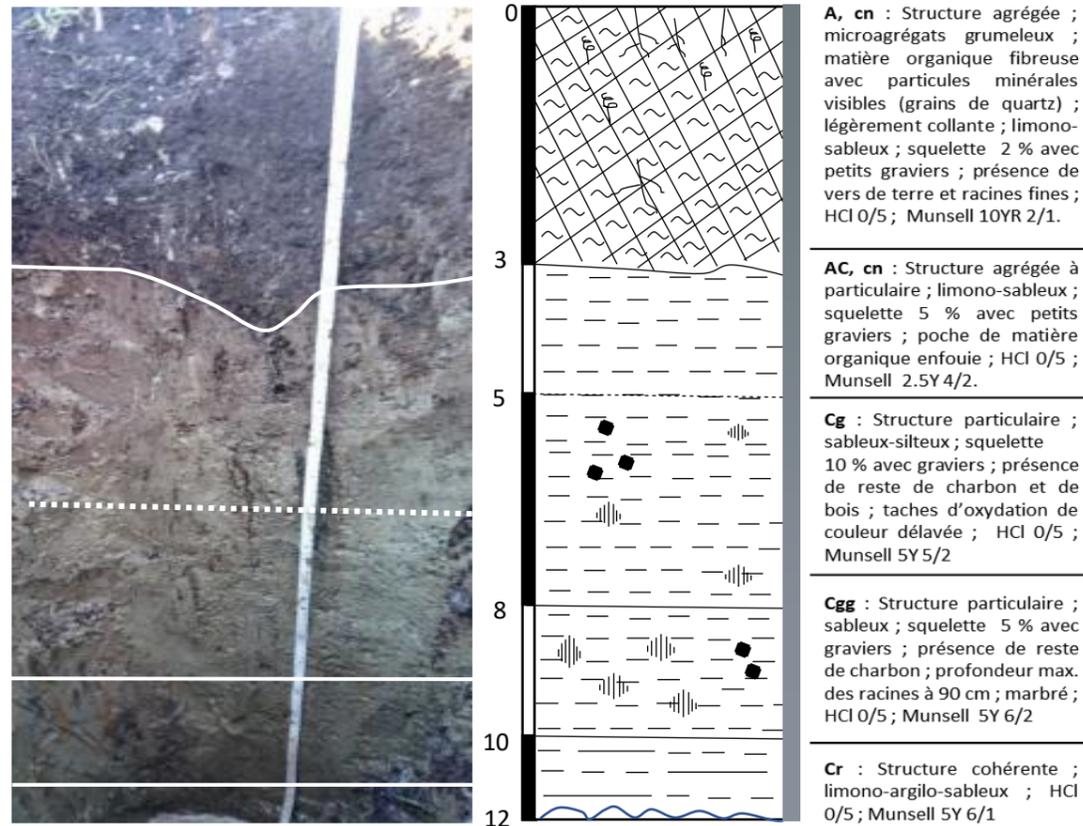


Figure i1 et i2 : Densité apparente [g/cm³] et porosité totale (%) mesurées à l'aide de cylindre dans le profil 3. Des triplicats ont été prélevés et la moyenne a été faite pour chacun des horizons. Les écarts-types ont été mesurés d'après la valeur de chacun des triplicats.

Nom	P_04	Date	27.01.2019
Classification Suisse des sols (KLABS, 2008)	Type : Gley oxydé (6376)	Référentiel pédologique (2009)	REDOXISOL réductique drainé, de bas de versant, d'ancien marais
	Sous-type : drainé (DD), neutre (E1), gleyifié (G3)		
Commune	Schwarzenburg (BE)	Coordonnées GPS	2°59'449 / 1°18'4999
Topographie	2 % (fond de pente)	Altitude	801 m
Végétation	Prairie permanente (WI)	Matériau de départ	Marais drainé
Engorgement	Nappe permanente de fond modérément profond (t)		



N°	Profondeur cm	Nom (KLABS)	Nom (RP)	pH H2O	pH KCl	MO (PAF) %	Corg (Hum) %	Texture %			Profondeur et intensité d'hydromorphie
								Argile	limon	sable	
4.1	0-35	A, cn	Ah	6	5.5	23.7	17.5	18	23	59	-
4.2	35-50	AC, cn	A-Scn	6.5	6	0.9	1.9	13	18	70	cn
4.3	50-80	Cg	g	6.7	6	-	0.4	8	18	74	g
4.4	80-100	Cgg	Go	6.8	6.2	-	0.5	9	13	79	gg
4.5	100-120	Cr	Gr	6.7	6.1	-	0.6	19	16	65	r

Figure j : Profil réalisé en décembre 2019, dans le marais drainé, sous prairie permanente. Les analyses physico-chimiques sont représentées dans le tableau du bas.

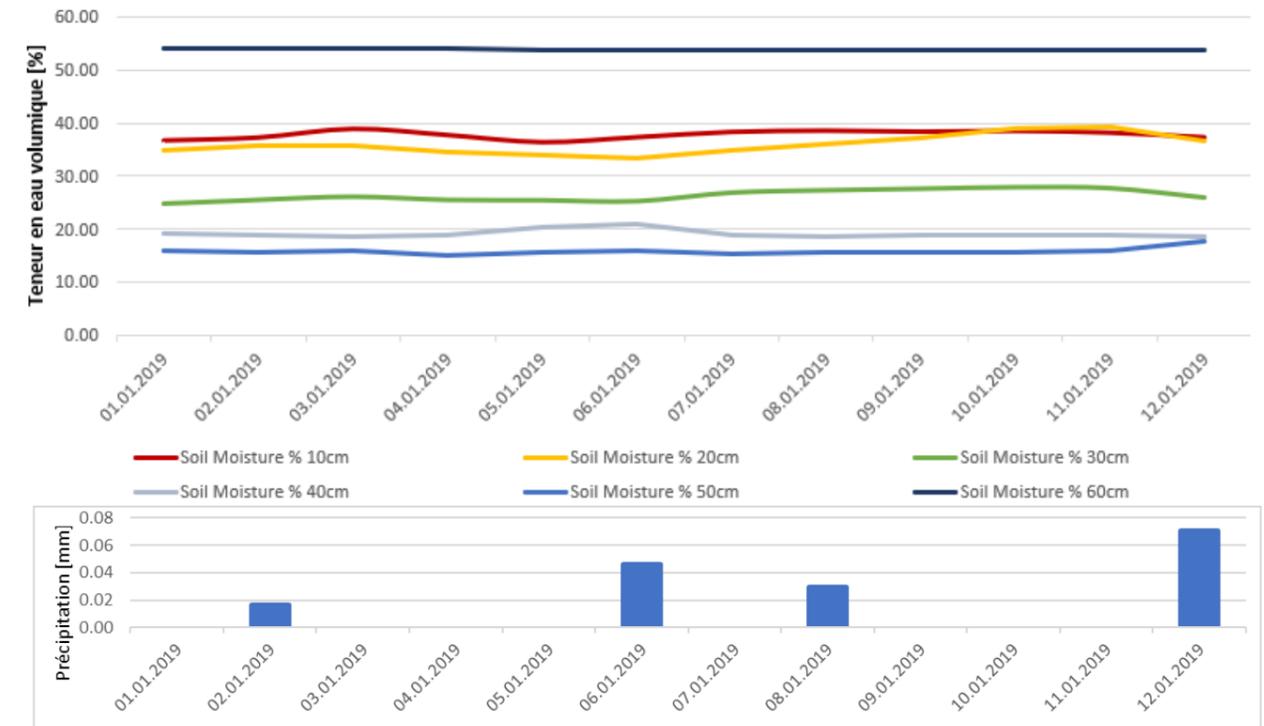


Figure k : Moyennes journalières de la teneur en eau (%) et précipitations (mm) mesurées par la sonde capacitive 5 située dans le marais drainé. Suite à des dégâts causés par un animal les mesures ont été enregistrées uniquement pour janvier.

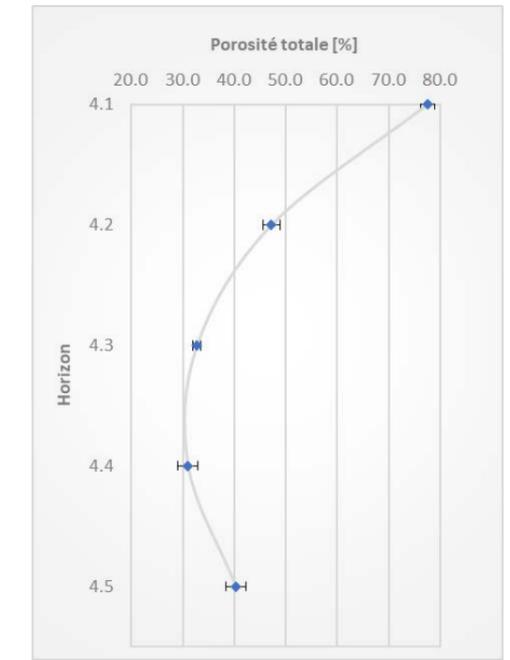
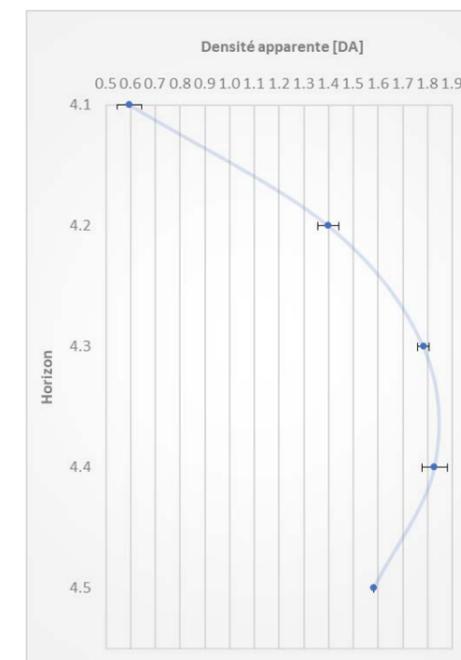
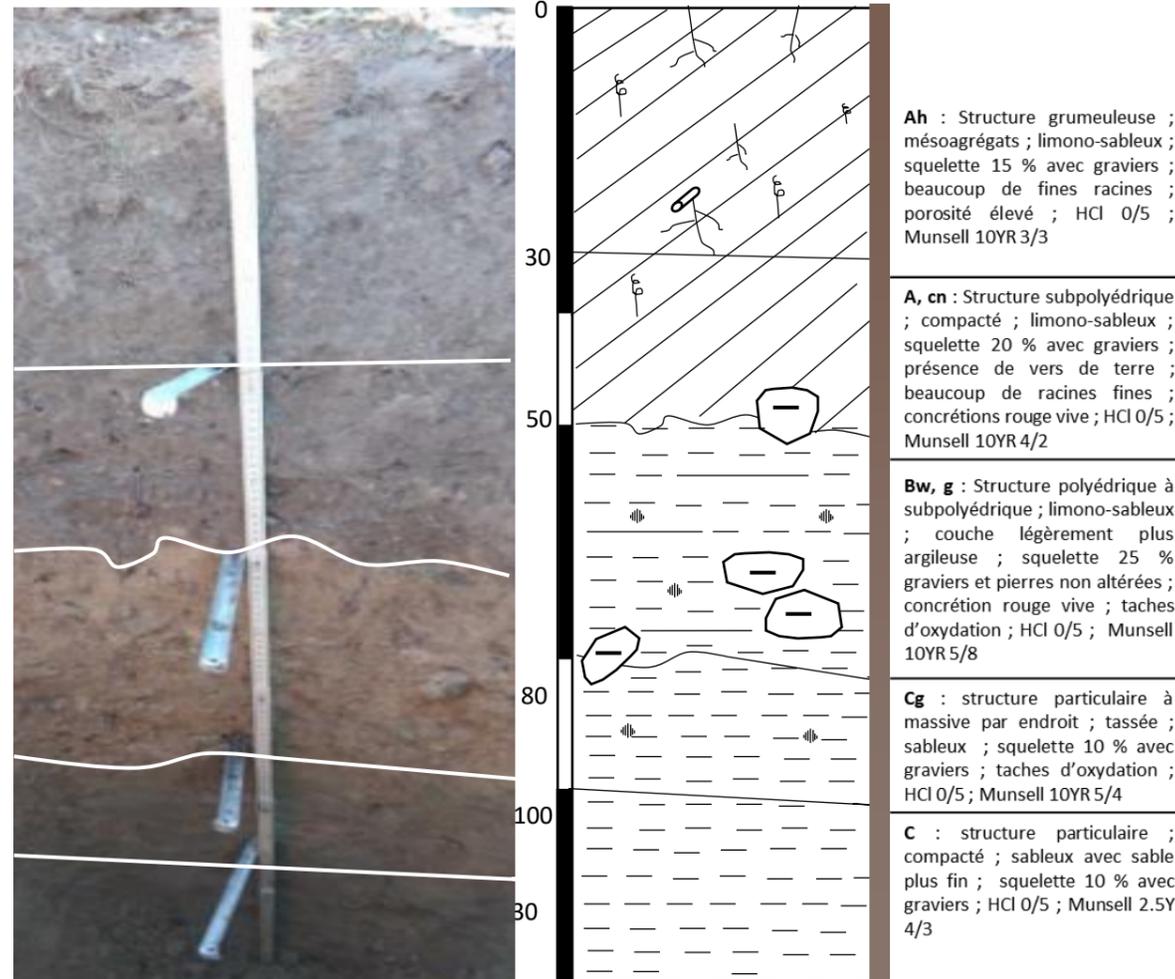


Figure l1 et l2 : Densité apparente [g/cm³] et porosité totale (%) mesurées à l'aide de cylindre dans le profil 4. Des triplicats ont été prélevés et la moyenne a été faite pour chacun des horizons. Les écarts-types ont été mesurés d'après la valeur de chacun des triplicats.

Nom	P_05	Date	27.01.2019
Classification Suisse des sols (KLABS, 2008)	Type : Sol brun	Référentiel pédologique (RP, 2009)	BRUNISOL EUTRIQUE, luvique, à horizon rédoxique de profondeur, sous prairie
	Sous-type : à concrétion (FK), tassé (L2), faiblement pseudogleyifié (I1), à mull (MM)		
Commune	Schwarzenburg (BE)	Coordonnées GPS	2°59'099/ 1°18'4'658
Topographie	23 %	Altitude	864 m
Végétation	Prairie permanente	Matériau de départ	Gravier du Riss (Zelgshotter, q3s)
Engorgement	Faible influence d'une nappe perchée temporaire, assez superficiel (h)		



N°	Profondeur cm	Nom (KLABS)	Nom (RP)	pH H2O	pH KCl	MO (PAF) %	Corg (Hum) %	Texture			Profondeur et intensité hydromorphie
								Argile %	Limon %	Sable %	
5.1	0-30	Ah	A	5.9	5	3.1	2.8	14	15	71	-
5.2	30-50	A, cn	A-S	6.1	5.9	1.6	2.4	13	15	72	cn
5.3	50-80	Bw,g	S	5.8	4.7	-	0.6	19	15	66	g
5.4	80-100	Cg	S&IIMx	6.1	5	-	0.4	11	8	81	g
5.5	100-130	C	IIMX	6.9	4.9	-	0.3	7	11	82	-

Figure m : Profil réalisé fin janvier 2019, sur la partie Sud-Ouest de la zone d'étude. Sous une prairie permanente. Les analyses physico-chimiques sont représentées dans le tableau du bas.

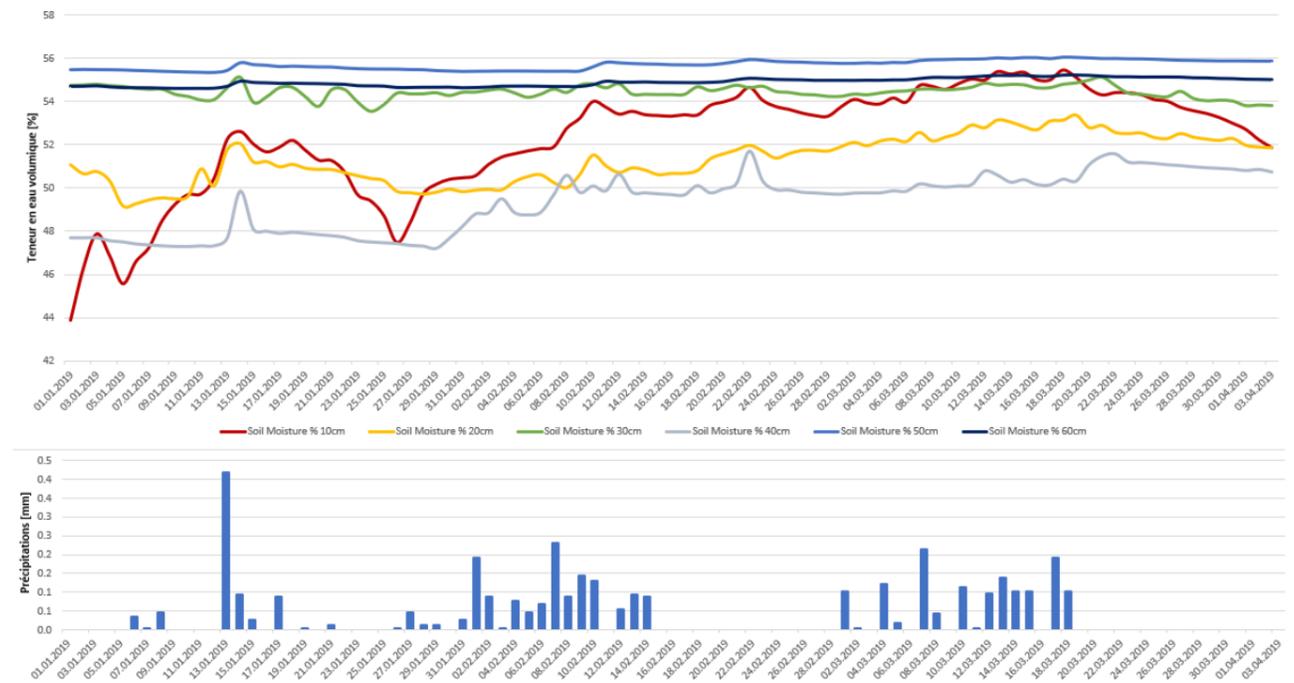


Figure n: Moyennes journalières de la teneur en eau (%) et précipitations (mm) mesurées par la sonde capacitive 5 à proximité du profil 5

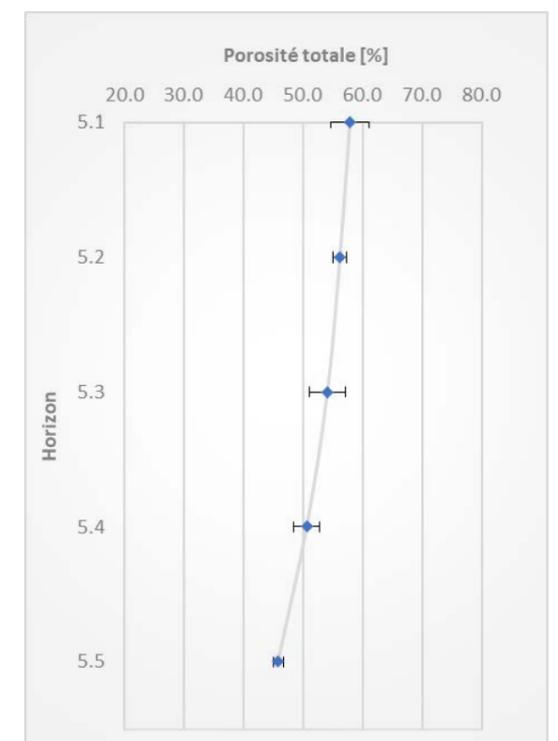
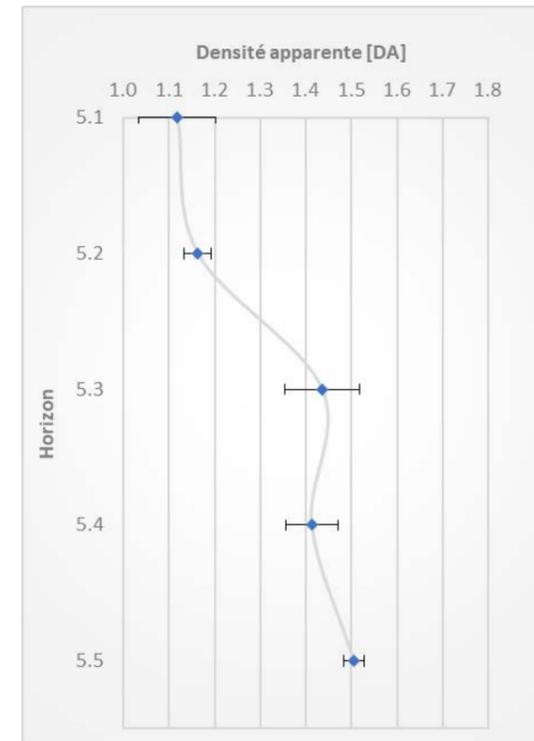
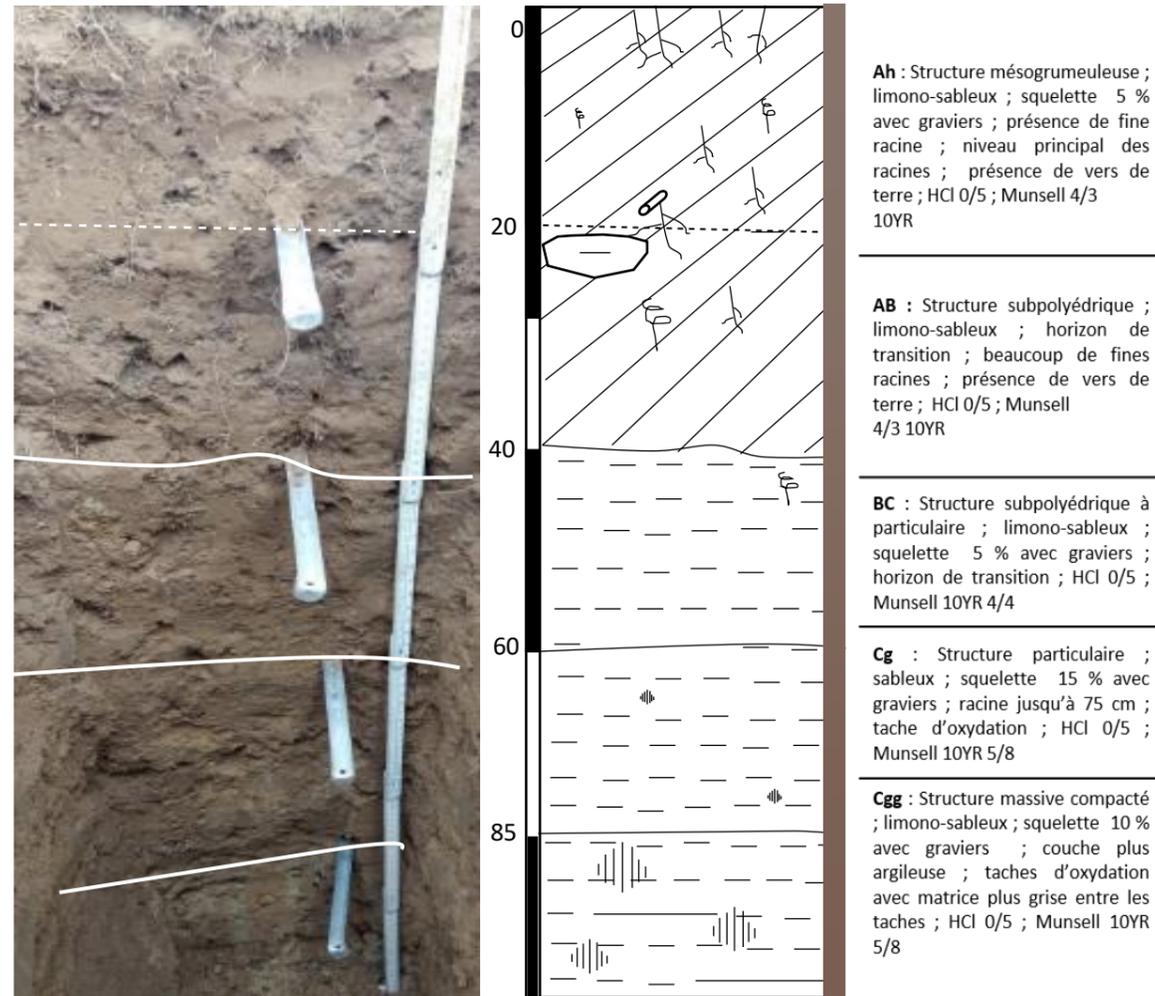


Figure o1 et o2 : Densité apparente [g/cm³] et porosité totale (%) mesurées à l'aide de cylindre dans le profil 4. Des triplicats ont été prélevés et la moyenne a été faite pour chacun des horizons. Les écarts-types ont été mesurés d'après la valeur de chacun des triplicats.

Nom	P_06	Date	3 avril 2019
Classification Suisse des sols (KLABS, 2008)	Type : Sol brun eutrophe	Référentiel pédologique (RP, 2009)	BRUNISOL EUTRIQUE, à horizon réductique de profondeur, colluvial, limoneux-sableux, sous prairie
	Sous-type : colluvial (Pk), tassé (L2), faiblement pseudogleyifié (I1), à mull (MM)		
Commune	Schwarzenburg (BE)	Coordonnées GPS	2°59'210 / 1°18'231
Topographie	16 %	Altitude	862 m
Végétation	Prairie permanente	Matériau de départ	Gravier du Riss (Zelgshotter, q3s)
Engorgement	Faible influence d'une nappe permanente, modérément profond (I)		



N°	Profondeur cm	Nom (KLABS)	Nom (RP)	pH H2O	pH KCl	MO (PAF) %	Corg (Hum) %	Argile %	Texture Limon	Sable %	Profondeur et intensité hydromorphie
6.1	0-20	Ah	A	6.3	4.9	2.9	3.9	12	15	73	-
6.2	20-40	AB	A-S	6	5	1.8	2.2	14	15	71	-
6.3	40-60	B	S	6	5.1	0.7	1.4	13	15	72	-
6.4	60-85	Cg	S&Dx	6.2	5.1	-	0.9	8	11	81	g
6.5	85-120+	Cgg	Dx	6.2	5.2	-	0.4	18	15	67	gg

Figure p : Profil réalisé en décembre 2019, sous prairie permanente, sur le côté Sud de la zone d'étude. Les analyses physico-chimiques sont représentées dans le tableau du bas

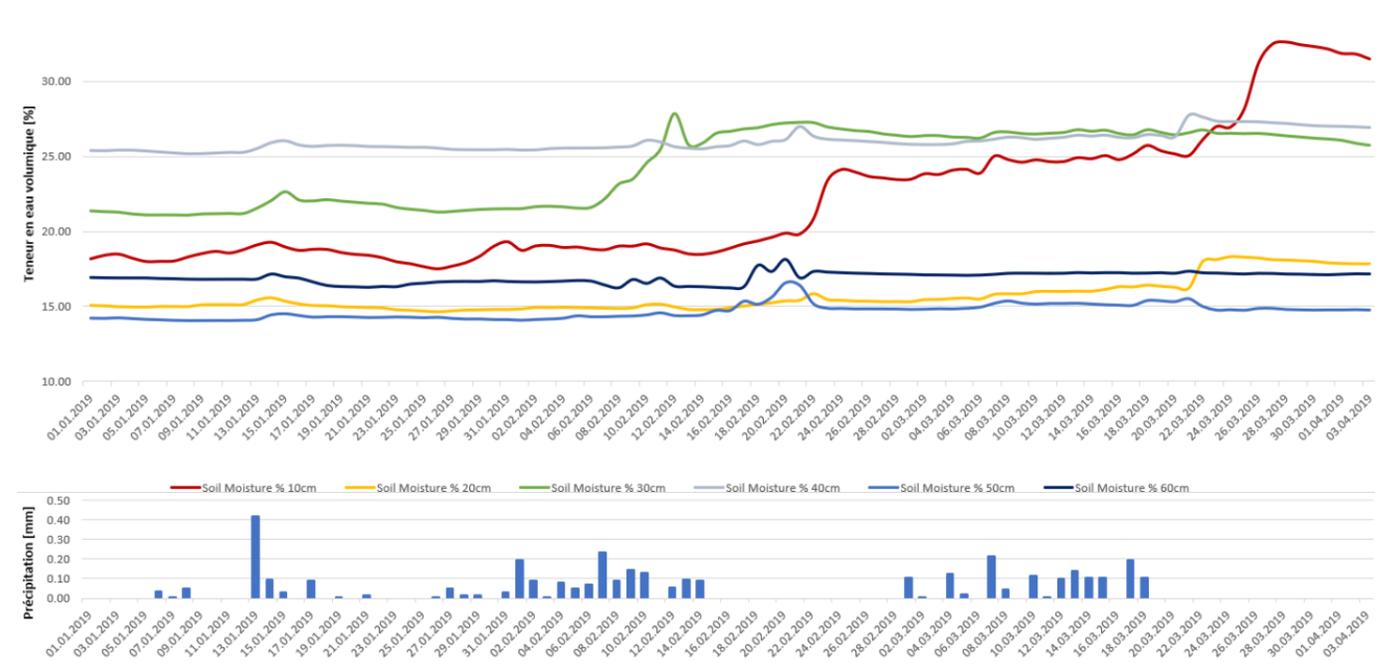


Figure q : Moyennes journalières de la teneur en eau (%) et précipitations (mm) mesurées par la sonde capacitive 6 à proximité du profil 6. Les mesures ont été enregistrées de janvier à mars

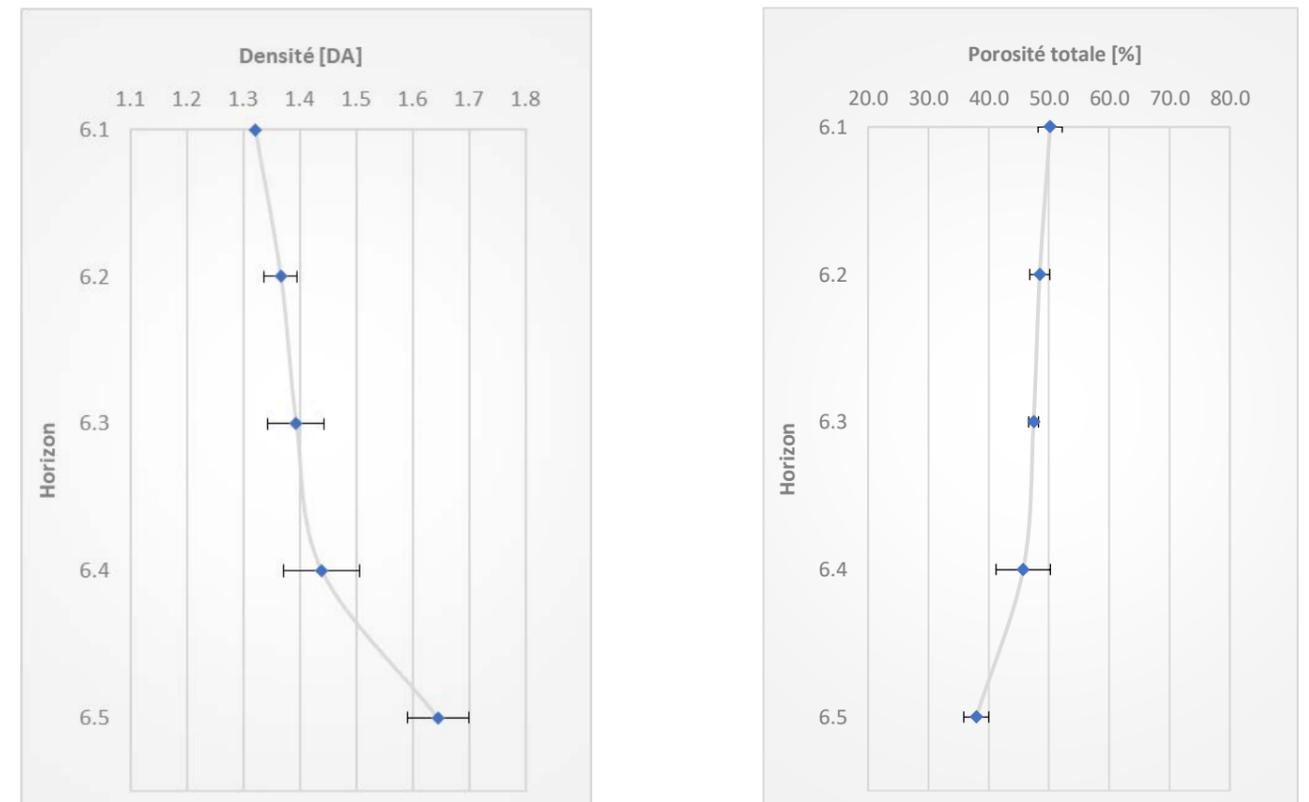
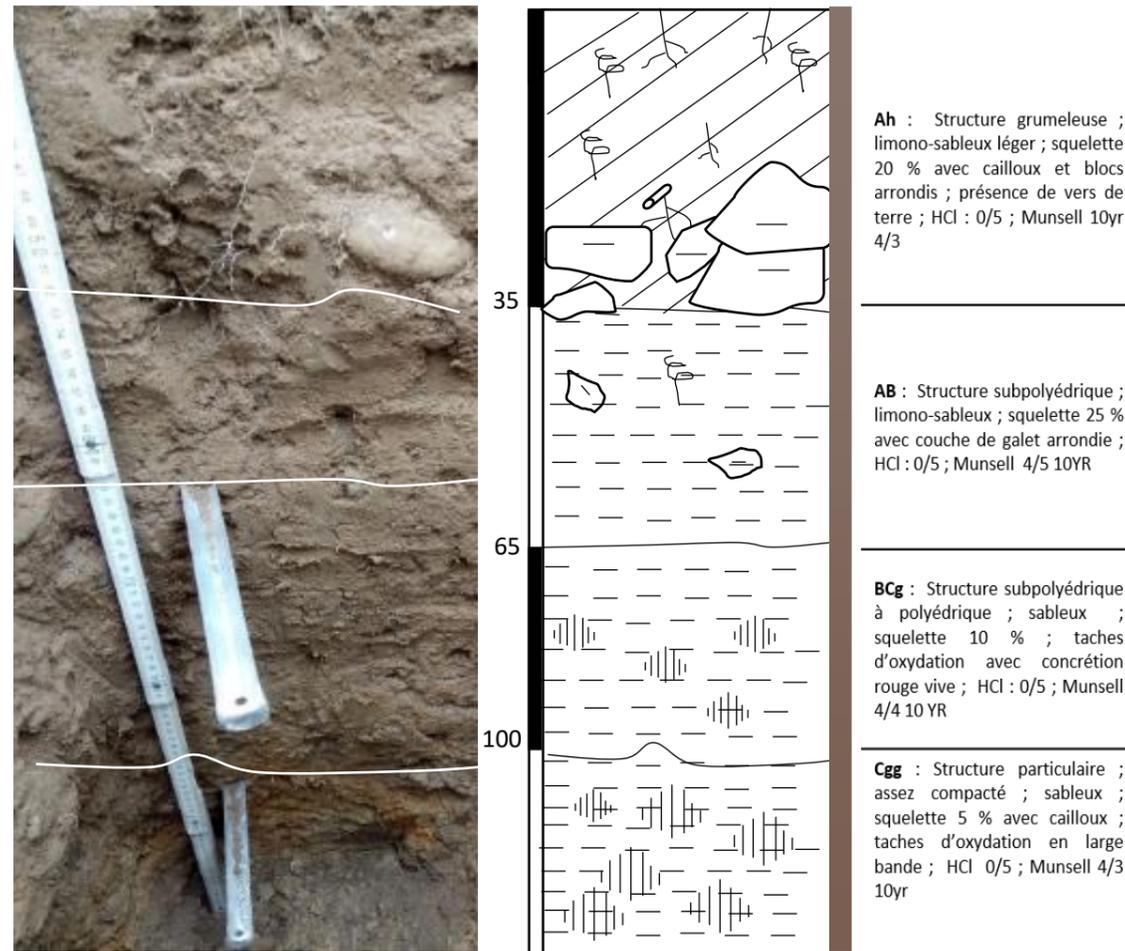


Figure r1 et r2 : Densité apparente [g/cm³] et porosité totale (%) mesurées à l'aide de cylindre dans le profil 6. Des triplicats ont été prélevés et la moyenne a été faite pour chacun des horizons. Les écarts-types ont été mesurés d'après la valeur de chacun des triplicats.

Nom	P_07	Date	3 avril 2019
Classification Suisse des sols (KLABS, 2008)	Type : Sol brun eutrophe	Référentiel pédologique (RP, 2009)	BRUNISOL colluvial, à horizon réductique de profondeur, sous prairie issue de molasse altérée
	Sous-type : colluvial (PK) tassé (L2), faiblement pseudogleyifié (I1), à mull (MM)		
Commune	Schwarzenburg (BE)	Coordonnées GPS	2°59'388/1°18'180
Topographie	19%	Altitude	848 m
Végétation	Prairie permanente	Matériau de départ	Molasse altérée
Régime hydrique	Faible influence d'une nappe permanente, profond (I)		



N°	Profondeur cm	Nom (KLABS)	Nom (RP)	pH H2O	pH KCl	MO (PAF) %	Corg %	Texture Argile %	Limon %	Sable %	Profondeur et intensité d'hydromorphie
7.1	0-35	Ah	A	6.0	4.8	4	4.6	17	18	64	-
7.2	35-65	AB	A-S	6.0	4.9	1.7	1.8	16	18	66	-
7.3	65-100	BCg	S-C	6.2	5.0	1	1.8	13	17	71	g
7.4	100-120+	C,gg	Cg	5.9	5.2	-	1	14	16	70	gg

Figure s : Profil réalisé en décembre 2019, sous prairie permanente à l'Est du terrain. Les analyses physico-chimiques sont représentées dans le tableau du bas

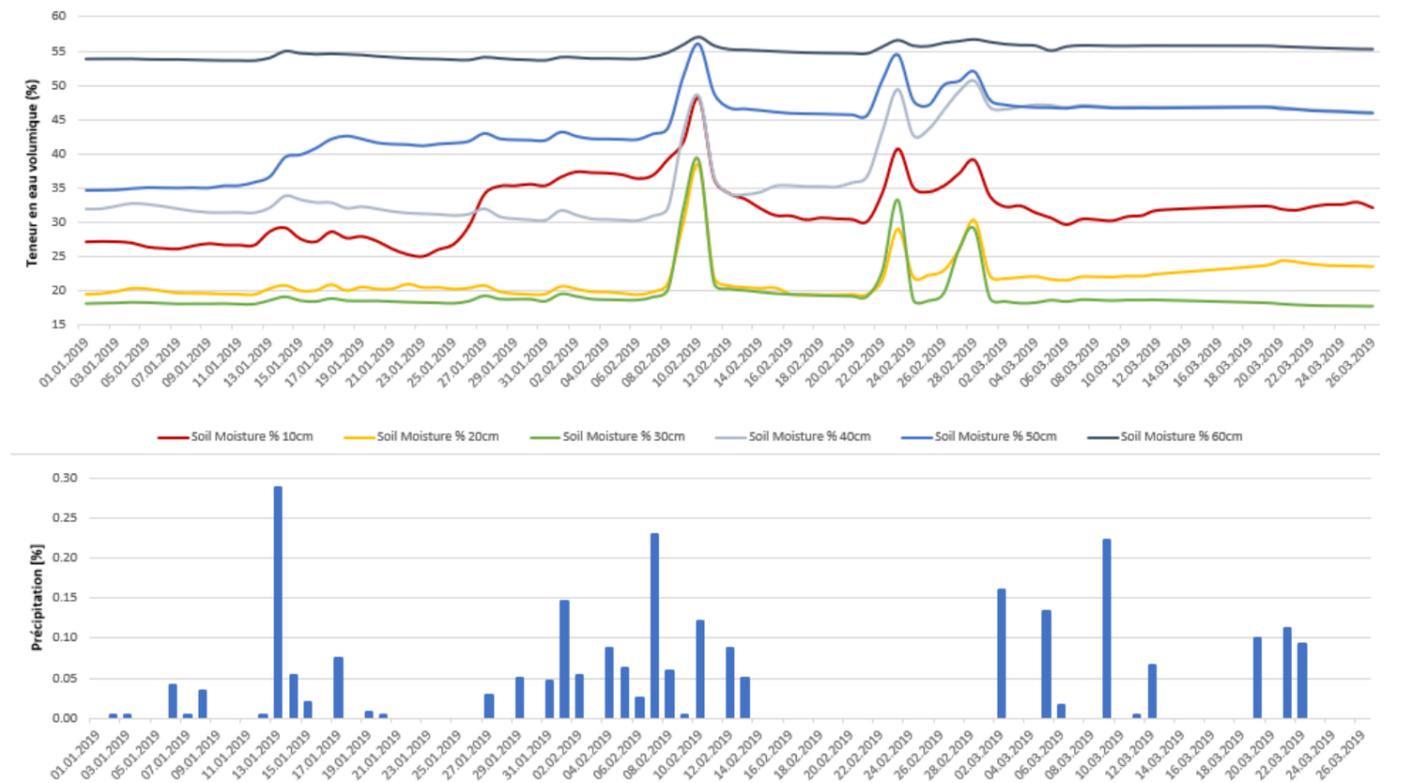


Figure t : Moyennes journalières de la teneur en eau (%) et précipitations (mm) mesurées par la sonde capacitive 7 située à proximité du profil 7. Les mesures ont été enregistrées de janvier à mars

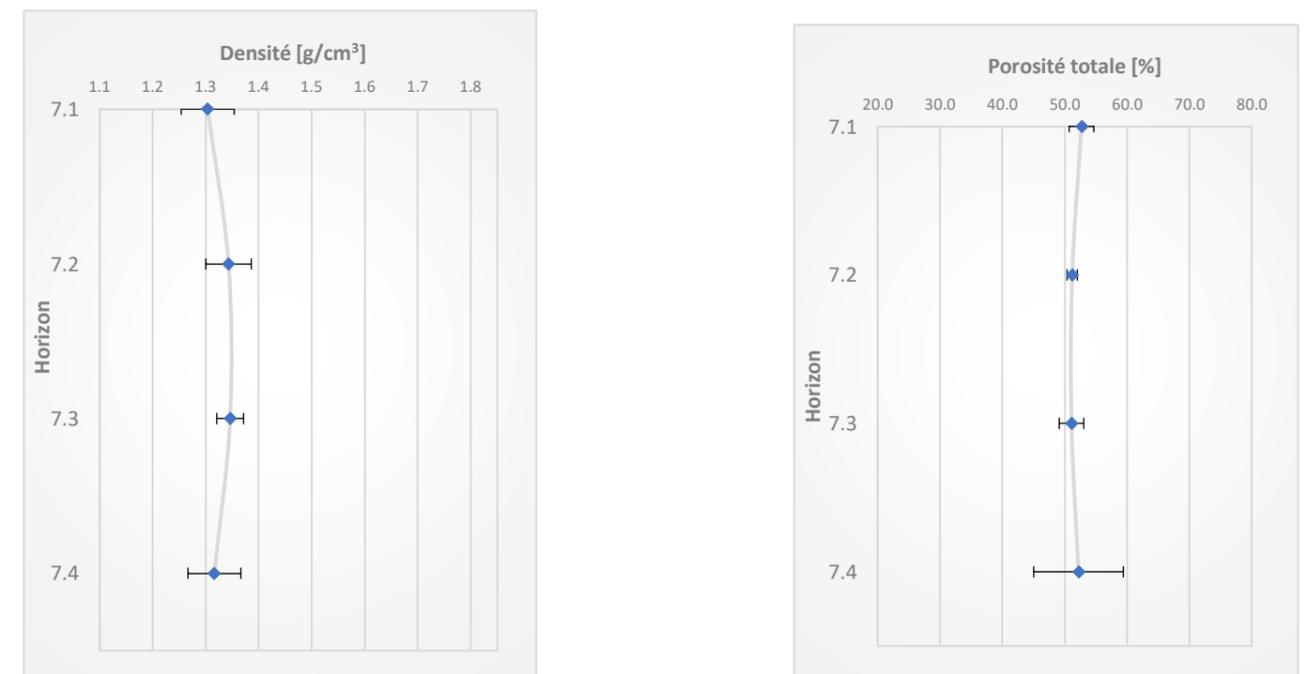


Figure u1 et u2 : Densité apparente [g/cm³] et porosité totale (%) mesurées à l'aide de cylindre dans le profil 7. Des triplicats ont été prélevés et la moyenne a été faite pour chacun des horizons. Les écarts-types ont été mesurés d'après la valeur de chacun des triplicats.

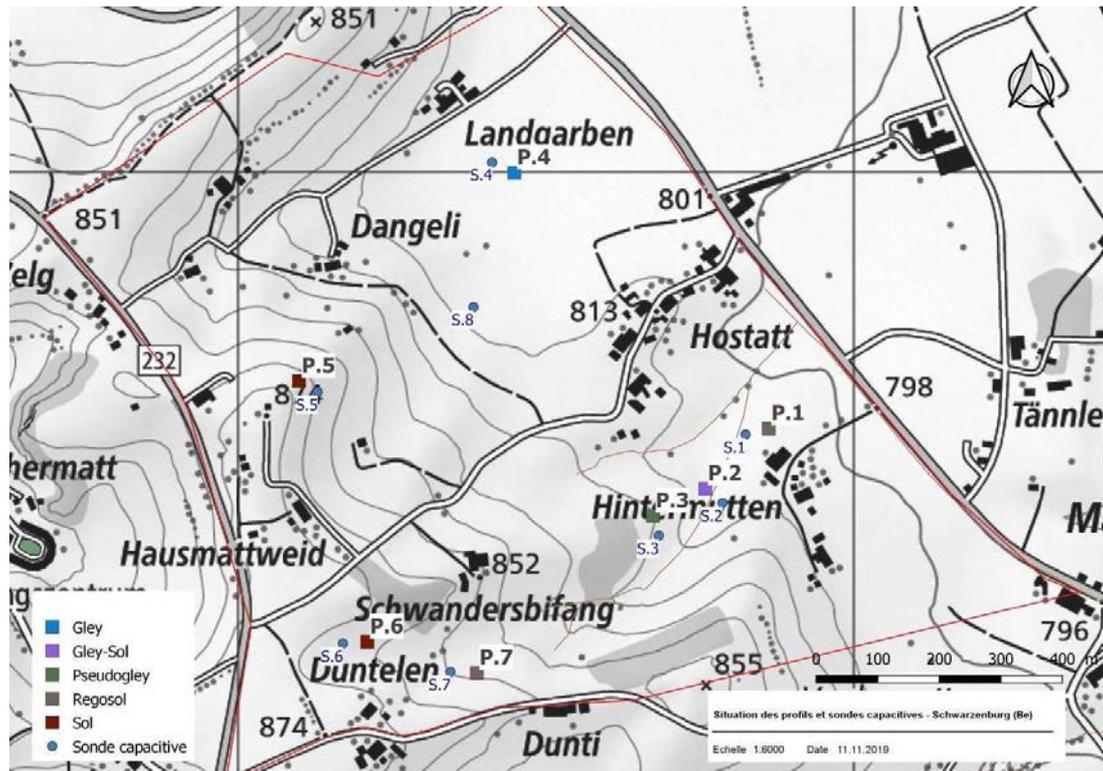


Figure 26 : Carte réalisée sur Qgis représentant la zone d'étude et l'emplacement des profils et des sondes capacitatives.

Le profil P.1 (Fiche 1, Figure a) est caractérisé par une couche de galets (à 50 cm), se retrouvant plus en hauteur, dans le profil 7 (Fiche 7, Figure s). Les deux premiers horizons ne dépassent jamais 50% de la teneur en eau (Fiche 1, figure b). A 60 cm, la teneur en eau approche 60%. Cet horizon est caractérisé par une teneur en argile légèrement plus élevée (23%). Mais globalement la texture reste similaire dans tout le profil (Fiche I, Figure a). Des traces d'oxydation légères (g) sont également observées à cette profondeur. La porosité des premiers horizons (0 à 40 cm) est supérieure à 50%. A partir de l'horizon 1.3 (>40 cm), elle baisse légèrement jusqu'à atteindre 41%. La densité apparente du sol varie de 1.1 à 1.6 g/cm³ entre le premier et le dernier horizon, ce qui indique une diminution forte de la capacité en air (environ 20% à 5%).

Le profil P.2 est caractérisé par une transition nette entre le premier et le deuxième horizon (entre 25 et 30 cm), ainsi que des horizons décrits comme compactés (Fiche 2). La nappe a été découverte à 140 cm. Le profil présente des taches d'oxydation dès 30 cm. Les résultats de la sonde capacitive 2 indiquent une augmentation brusque de la teneur en eau le 7 février (Fiche 2, Figure b). Cette augmentation est particulièrement forte entre 20 et 30 cm de profondeur (16.7% de plus en une journée) et fait suite à un épisode de fortes précipitations. La teneur en eau à 50 cm est légèrement plus élevée (46.6% en moyenne) qu'à 60 cm (43.6%). La partie supérieure du profil (10 cm) présente une percolation plus importante (>30.5%). La teneur en eau augmente

significativement après un épisode de pluie, début mars (Fiche 2, Figure e). La texture est assez variable dans ce profil (Fiche 2, Figure d). Les mesures montrent une porosité diminuant fortement avec la profondeur (59% dans l'horizon 2.1 à 33% dans l'horizon 2.6) et inversement pour la densité apparente (1.07 g/cm^3 à 1.8 g/cm^3) (Fiche 2, Figure f1 et f2)

Le profil 3 (P.3), situé proche d'un îlot forestier (Figure 26), s'est formé sur la molasse marneuse visible dès 45 cm de profondeur. Malgré une texture et une structure très variables (Fiche 3, Figure a), les variations de la teneur en eau suivent les épisodes de précipitations (Fiche 3, Figure b). L'horizon situé à 40 cm de profondeur, présente tout de même une particularité, la teneur en eau (>55%) indique la présence d'une nappe perchée (également observée sur le terrain), indépendante des épisodes de précipitation. La porosité diminue fortement avec l'horizon situé au-dessus de cette nappe (de 51% à 41%) et la densité apparente augmente (1.2 g/cm^3 à 1.5 g/cm^3).

Le profil P.4 est situé dans le marais drainé (Figure 26). À la suite de dégâts causés par un animal sur les câbles de la sonde 4, seules les deux premières semaines de janvier ont été enregistrées. Le sol étudié se compose d'horizons anmooriques de surface (Fiche 4, figure a) et d'horizons sableux influencés par le battement de nappe. La porosité et la densité témoignent de la nature des horizons (respectivement 76% et 0.6 g/cm^3 pour l'horizon 4.1 et 32% et 1.8 g/cm^3 pour l'horizon 4.3 et 4.4). A partir de l'horizon 4.5, la porosité augmente à nouveau (40%). Les horizons sableux (30, 40, 50 cm) sont très perméables et présentent une teneur en eau plus réduite que les horizons anmoor (10 et 20 cm). A 60 cm, la teneur en eau augmente (55% en moyenne) et des taches d'oxydation se font observer, ce qui suggère le battement de la nappe observée sur le terrain.

Le fonctionnement hydrique du profil 5 (P.5) est influencé par les précipitations à 10, 20 et 40 cm (Fiche 5, figure b). A 30 cm, la teneur en eau volumique est plus élevée et constante (entre 53 et 55%). La texture du profil 5, dans ces horizons (5.1, 5.2) ne varie pas beaucoup (Fiche 5, Figure a). Des concrétions (cn) ont été observées à 30 cm de profondeur et la structure a été notée comme plus compacte à cet endroit, qui n'est cependant pas visible dans les résultats de la densité (1.44 g/cm^3) et de la porosité (54%). Cette dernière est assez élevée dans le premier horizon (58%) et baisse progressivement jusqu'à atteindre les 46% dans l'horizon 5.5.

Les résultats de la sonde 6 montrent une faible teneur en eau (<34%) sur l'ensemble de la période (Fiche 6, Figure q). À 20, 50 et 60 cm, la teneur en eau est proche de 15%. A 40 cm, elle est constamment plus élevée que dans les autres profondeurs. La partie supérieure du sol, ainsi qu'à 30 et 40 cm, présentent une saturation progressive à partir de début février jusqu'à fin mars alors qu'à 20, 50 et 60 cm, la teneur en eau y est plus constante et réagit seulement au fort épisode de

pluie. Des taches d'oxydation apparaissent à 60 cm, ce qui témoigne de la bonne percolation de la partie supérieure. La porosité est à 50% et baisse progressivement jusqu'à atteindre 36% dans l'horizon 6.5 (noté comme plus compacté à cet endroit) et inversement pour la densité apparente. Le dernier horizon est caractérisé par des taches d'oxydation intense avec une matrice grise (noté gg). L'horizon entre 60 et 85% présente des teneurs en sable élevées (81%).

La partie supérieure du profil 7 présente une bonne percolation avec des teneurs en eau augmentant selon les épisodes de précipitations (Fiche 7, Figure t). À 60 cm, la teneur en eau indique la présence d'une nappe qui n'était pas visible sur le terrain (teneur en eau fluctuant de 52 et 56% sur toute la saison). Il faut noter deux pics d'augmentation de la teneur en eau qui ne sont pas liés à des précipitations pour chacune des profondeurs entre le 22 et 24 février pour le premier puis entre le 27 et 2 mars pour le deuxième. La porosité est constante et assez élevée sur tout le profil (en moyenne entre 51 et 52%). Des larges bandes de taches d'oxydation apparaissent entre 100 et 120 cm. Le profil ne présente pas de tache d'oxydation avant 65 cm.

5.2.1 Teneur en eau volumique et intensité des traces d'hydromorphie

Les taches d'oxydation (cn, g, gg) relevées dans chacun des profils et les résultats des sondes, des cylindres et des analyses physico-chimiques ont été testées avec une ANOVA et la moyenne a été calculée (Tableau 9a et 9b).

Tableau 9a et 9b : Résultat de l'ANOVA (a) et moyenne (b) de l'intensité des traces d'hydromorphie avec les résultats de la teneur en eau pour le mois de janvier, février mars, de la texture, du pH H2O, de la densité apparente et de la porosité totale.

	p-value	Intensité	T.eau_Janv (%)	T.eau_Fév (%)	T.eau_Mars (%)	Argile (%)	Limon (%)	pHH2O	DA (g/cm3)	Por.tot (%)
T.eau_Janv (%)	0.00074	cn	41	47	50	15	20	6.3	1.44	48
T.eau_Fév (%)	0.00074	g	51	52	53	16	19	6.6	1.48	45
T.eau_Mars (%)	0.00019	gg	44	49	50	9	28	7.2	1.52	43
Argile	0.101	nul	28	32	34	18	19	6.3	1.28	53
Limon	0.044									
Sable	0.914									
pHH2O	0.017									
DA (g/cm3)	0.042									
Por.tot (%)	0.067									

L'intensité des traces d'hydromorphie est corrélée significativement aux teneurs en eau. Les horizons, avec des taches d'intensité g, présentent en moyenne 51% pour le mois de janvier et 53% pour le mois de mars et pour gg, 44% pour le mois de janvier et 49% pour le mois de mars. Les horizons présentant des concrétions notées cn avaient, en moyenne, une teneur en eau de 41% pour janvier et 47% pour mars et enfin les horizons sans trace d'hydromorphie avaient une teneur en eau de 28% pour janvier et 34% pour mars. Les traces d'hydromorphie sont statistiquement corrélées avec le taux de limon (p-value de 0.044), le pHH²0 (p-value de 0.017) et la densité apparente (p-value de 0.042).

6 Discussion

6.1 Vérification de l'hypothèse I

H.1. Il est possible de décrire la répartition spatiale du régime hydrique en fonction de deux variables environnementales dont les jeux de données sont disponibles en libre accès : la géologie (tirée du geocover) et la topographie (tirée du modèle numérique de terrain (MNT)).

En considérant les différents groupes formés statistiquement, l'hypothèse 1 est partiellement vérifiée. En effet, l'utilisation des jeux de données tirées du geocover et de la topographie permettent de classer les sols et leurs régimes hydriques selon une répartition spatiale cohérente, visible notamment par la proximité spatiale de ces différents groupes sur la carte (cf. §Figure 18 et Figure 19). Aussi, des groupes de régimes hydriques différents peuvent être décrits à partir de ces classes. L'utilisation d'une AFDM a permis de sélectionner les variables les plus importantes dans la répartition spatiale des individus (sondages et profils), liées à la topographie (tirée du MNT) et à la géologie (geocover) (Figure 17) et sont fortement corrélées au régime hydrique (Figure 20 à Figure 24). Cependant, les résultats de l'AFDM, les valeurs extrêmes ainsi que les écarts importants entre le premier et troisième quartile (boxplots, Figure 15) suggèrent l'influence de facteurs indépendants des variables environnementales expliquant la répartition du régime hydrique.

6.1.1 Répartition spatiale du régime hydrique en fonction de la géologie

De manière générale, les résultats montrent une corrélation significative entre la géologie et le régime hydrique (p -value < 0.0005) (Figure 22). Sur le terrain, une partie des sols étudiés se sont développés dans une formation superficielle autochtone composée de molasse gréseuse fortement altérée (arvb, Figure 5 ; Frasson, 1947) et riche en quartz (Gobat et al., 2019). Cette dernière compose principalement les flancs nord-est des collines (Figure 5). Le groupe statistique 4 est spatialement lié à ce matériel parental et présente une grande diversité de classes de régimes hydriques (Figure 18). Cela peut s'expliquer par le manque de précision des données du geocover (d'après la carte de l'Atlas géologique au 1/25'000 de la Suisse (GA25), elle-même établie d'après l'étude géologique de la région de Frasson en 1947). En effet, sur le terrain, il est observé que la molasse n'est pas homogène, mais contient des bandes de marne intercalées dans le grès, visibles sur les falaises alentours (Figure 6). Cette couche de marne se retrouve sur une petite surface de la zone étudiée et est à l'origine de la formation de la nappe perchée du profil 3

(Pseudogley, Figure g). Cette couche altérée, présente à faible épaisseur (40 cm, Figure g), est composée de limons fins compactés qui forment une couche imperméable comme le témoigne les résultats de la sonde capacitive 3 (Figure h). Cette dernière a enregistré des teneurs en eau supérieures à 55% dès 30 cm de profondeur et les sondages liés à ce matériel parental présentaient systématiquement des caractères rédoxiques.

Les bandes gréseuses sont, quant à elles, plus poreuses et riches en sable (Piazza, 1996). Le régime hydrique des sols formés dans ce type de matériel parental devrait être de type **a** (percolé), témoignant d'une bonne percolation, d'après les résultats de texture, montrant des teneurs en sable supérieures à 50% (AFES, 2009). Cependant, malgré une texture sableuse, les sols de la molasse altérée présentaient systématiquement des signes d'engorgement (réductique et rédoxiques de profondeur). Il est possible que la localisation de la molasse sur les flancs nord-est induit ces traces d'oxydation. En effet, elles correspondent à des emplacements de captages dans les coteaux indiquant des sorties d'eau (Annexe D). La molasse gréseuse non altérée (m1), sur la partie nord, représentée majoritairement par le groupe 5, présentait de nombreux sols classés **I** (percolé avec présence d'une nappe permanente profonde).

Ces différents éléments renforcent l'importance d'utiliser la variable liée à la géologie dans la conception de la carte, malgré le fait que le mélange des variables qualitatives et quantitatives peut être délicat lors du traitement de données. Le matériel parental est indispensable pour l'établissement d'un modèle prédictif de l'organisation spatiale du sol (Thomas et al, 1999) et dans ce cadre, du régime hydrique. Cependant, le régime hydrique que l'on peut s'attendre à retrouver sur un certain type de matériel parental reste fortement dépendant de la topographie. La carte présentée en Annexe E, a été établie sans la variable géologie, d'après les résultats de l'ACP. Elle montre une répartition des données plus hétérogène des sondages (Figure 27 et Figure 28). Par exemple, les sondages 28 et 36 présentaient des particularités différentes (Annexe A), mais avec les groupes formés sur l'ACP, ces deux sondages sont classés ensemble, alors qu'avec l'AFDM, ils sont classés séparément (Figure 27 et Figure 28).

Dans l'AFDM, le sondage 26 est classé avec le sondage 36, ce qui n'est pas le cas avec l'ACP (Figure 27 et Figure 28). Cette meilleure classification s'est vérifiée pour une majorité de sondages. Seul un exemple est présenté dans les figures ci-dessous (Figure 27 et Figure 28).

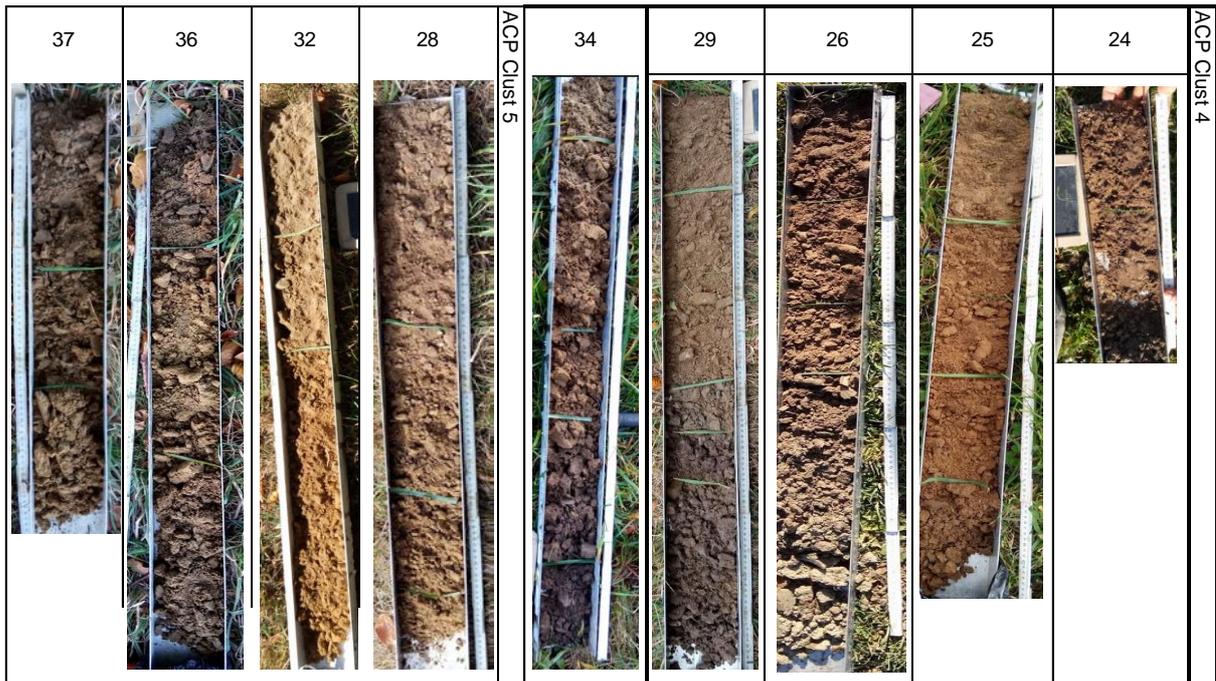


Figure 27 : Photos des sondages triés selon leur appartenance au groupe 4, 5 et 6 de l'ACP

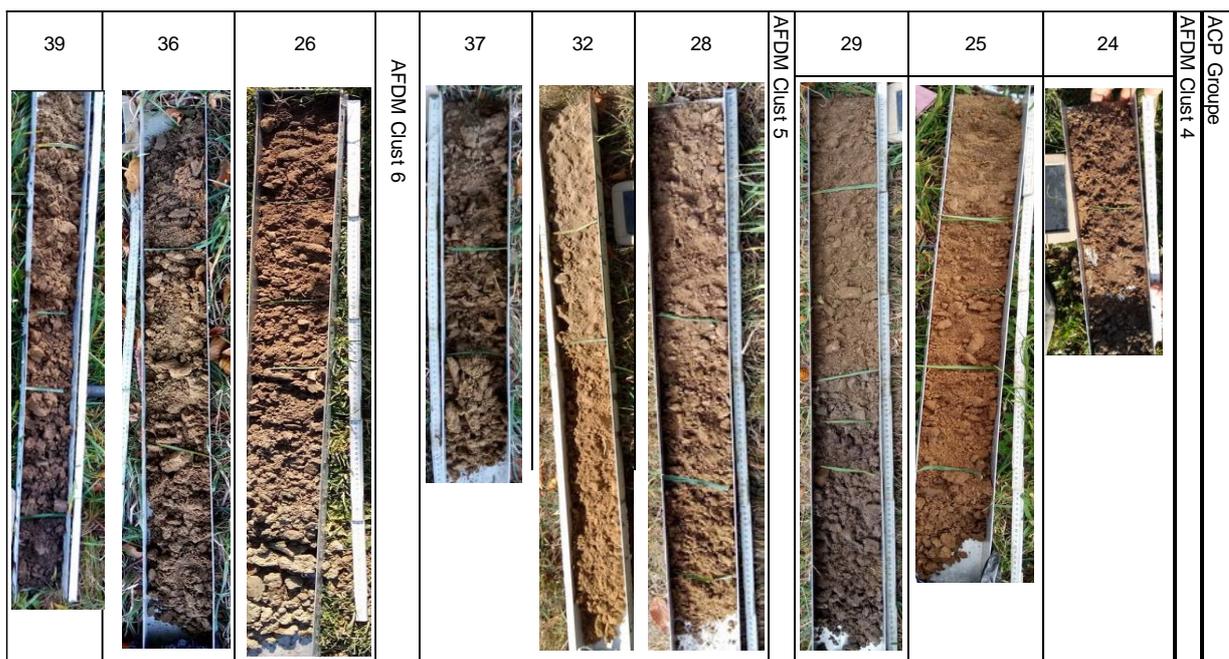


Figure 28 : Photos des sondages triés selon leur appartenance au groupe 4, 5 et 6 de l'AFDM.

6.1.2 Répartition spatiale du régime hydrique en fonction de la topographie

L'utilisation de la topographie pour la prédiction de la répartition spatiale des sols semble fonctionner en partie. La pente est la variable quantitative environnementale expliquant le plus la répartition spatiale des sols et leur régime hydrique (16.6% selon l'AFDM, Figure 13). Il est indéniable que l'intensité de la pente contribue à déterminer l'intensité de la morphogenèse,

notamment en tant qu'accélératrice de l'érosion ou de zones d'accumulation (Gobat et al., 2019). Cependant, aucun seuil précis n'est fourni dans la littérature quant à l'inclinaison et à la longueur de pente propices au ruissellement ou à la rétention d'eau, influençant sur la présence de sols hydromorphes.

Les sols situés en contrebas de la molasse marneuse, présentent des caractères témoignant de l'accumulation de matériaux notamment une texture irrégulière (Profil P.2., Figure d). Cela peut s'expliquer par le caractère moins perméable des bandes de molasse marneuse situées une trentaine de mètres plus haut, ainsi que des pentes assez fortes (supérieures à 18%), qui peuvent créer des zones d'accumulation (Revel, 1982). Les sondages situés dans ces zones sont définis par une MRVBF supérieur à 1 (groupe 1 et 2) et présentent une hydromorphie marquée. La plupart des sondages ne présentent pas d'horizon B développé et sont classés comme des Régosols (selon la KLABS). Cependant, la stabilité du versant sur lequel se trouve ces sols les amène à s'orienter vers des sols bruns eutrophes (Gratier et al., 2015).

La plupart des sols de basse altitude (groupe 1 et 2) présentent des traces d'oxydation dès 50 cm. Leur position dans le paysage est propice à la récolte d'eau des versants lors de la fonte des neiges (Soutter, 2007). Dans le sondage 16, décrit juste au-dessus du profil 2, les traces d'oxydation sont absentes et le régime hydrique est de type **a** (percolé). Le sol P.1 est caractérisé par une rétention hydrique assez importante en comparaison avec le profil P.2, quelques mètres plus haut, qui est un Gley-sol brun (Figure 25).

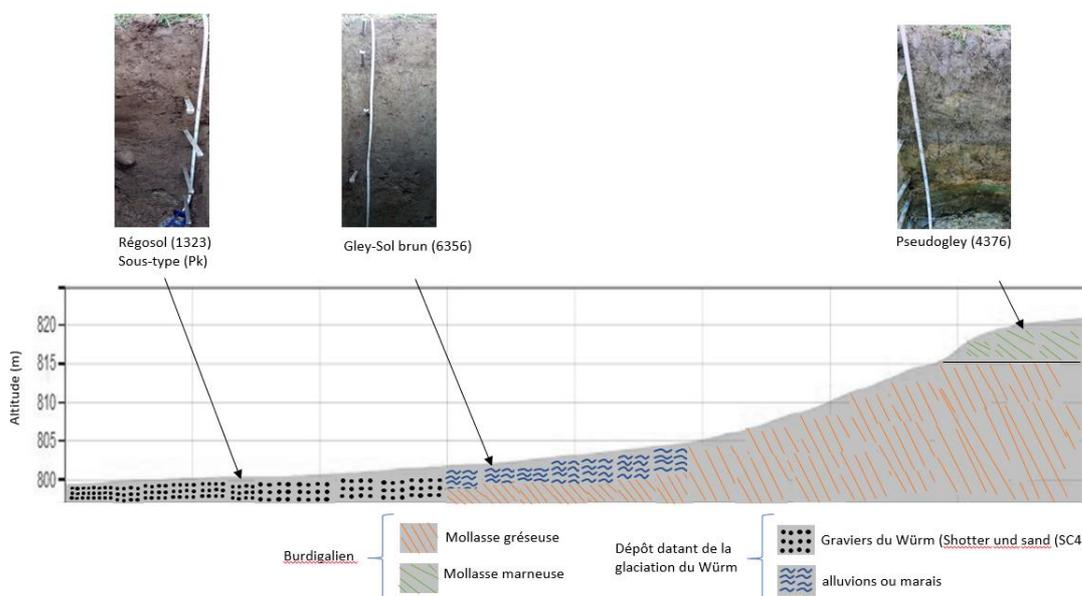


Figure 29 : Représentation des unités géologiques influençant la formation des sols et leurs régimes hydriques sur la partie nord-est du terrain.

Il y a donc une relation spatiale entre les traces d'oxydation, et plus généralement le type de régime hydrique, avec la pente et l'altitude (Figure 29). Ces sols présentent majoritairement une texture limono-sableux (avec moins de 15% d'argile) et sont plus sensibles au tassement superficiel, ce qui est attendu pour des sols agricoles (Derungs, 2018). Ce tassement peut notamment être créé par le passage régulier des tracteurs effectuant les travaux des champs. Les phénomènes de compaction peuvent participer à accentuer le ruissellement en situation de pente (Soutter, 2007). Le régime hydrique du sol fonctionne de manière semblable dans un sol compacté par l'activité humaine et dans un Rédoxisol formé par les processus naturels de pédogénèse (Soutter, 2007).

Le MRVBF permet de faire la distinction entre les deux types de fond de pente (les valeurs de 0.5 à 1.5 indiquent les fonds de vallées plus petits et raides et les valeurs supérieures à 1.5 indiquent les fonds de vallée de plus en plus plats et grands (Gallant et al., 2003), (Figure 30). Ils n'ont pas la même influence sur le régime hydrique. Les sols situés directement en bas des collines sont dominés par le ruissellement d'eau de précipitation, par l'érosion et les régimes de transport, tandis que les fonds de vallée sont généralement des milieux plus sédimentaires où les matériaux s'accumulent plus lentement au fil du temps (Herron et al., 2001).



Figure 30 : Exemple illustrant les différents types de MRVBF rencontré sur le terrain (vue depuis le sud).

Avec une p-value largement inférieure à 0.05 dans les ANOVA effectuées entre le régime hydrique et la pente, l'altitude et le MRVBF, la topographie (tirée du MNT) confirme son rôle clé dans la modulation des types de régime hydrique. Ainsi le modèle fonctionne particulièrement bien pour les régimes hydriques de bas de pente. Cependant, les sols présentant des défauts de

drainage interne d'origine pédologique, anthropique ou lithologique sont difficilement représentables avec ce jeu de données (Herron et al., 2001).

6.1.3 Répartition spatiale du régime hydrique en fonction des autres facteurs : le temps, le climat et le mode d'utilisation

Les résultats de l'AFDM ainsi que les valeurs extrêmes et l'écart entre le premier et troisième quartile dans les boxplots (Figure 13, Figure 14) suggèrent l'influence de facteurs non dépendants des variables tirées du MNT et du geocover. Dès lors, il faut chercher du côté des facteurs n'étant pas pris en compte dans ce travail.

Concernant le facteur climatique, les précipitations sont similaires sur toute la zone, d'après les données pluviométriques des sondes (cf. §Fiches). Concernant le facteur temps, il est possible que le temps géologique soit différent sur la zone, cette dernière faisant partie d'une frange n'ayant pas été atteinte par le glacier (cf. §3.1). La dernière glaciation du Würm fait partie du cycle court dans l'évolution des sols, et il est généralement admis que l'orientation d'une pédogenèse datant de la dernière glaciation soit continue et que ces sols soient caractérisés par une altération biochimique à processus de transformation (Calvet, 2003). Pour les sols ayant commencé une pédogenèse plus ancienne, les horizons profonds peuvent porter des traces d'un climat plus chaud qu'actuellement, par exemple, des traces de rubéfaction (Mailänder et al., 2001). Cependant ces différents éléments n'ont pas été observés sur le terrain, ce qui laisse penser que les sols de la zone d'étude ont un âge similaire.

Le dernier facteur est celui du vivant. Dans les études de cartographie du sol, sur les cinq facteurs de pédogenèse, le facteur « vivant » est celui qui est le moins pris en compte dans les modèles de cartographie et de statistique du sol (Vaysse, 2015). Or, d'une part, il a été démontré que l'action humaine a une importance primordiale sur l'évolution des sols (Grunwald et al., 2011) et d'autre part, que les organismes du sol, par exemple, les bactéries régulatrices du fer ont un rôle essentiel dans l'apparition des taches d'oxydation, mais aussi en tant qu'indicateurs biologiques de la qualité du sol (Nouaïm et al., 2015). Il est cependant très difficile de savoir la part d'importance que ce facteur pourrait prendre dans un modèle de cartographie numérique (Vaysse, 2015).

6.1.4 Apport et limite de la première hypothèse

La carte prédictive de la profondeur d'apparition du g (Figure 25) fonctionne globalement bien et est un bon résumé final des éléments discutés plus haut. Ainsi les taches d'oxydation dès 50 cm apparaissent essentiellement dans le marais drainé. Tandis que les taches d'oxydation dès 60 cm se situent sur les coteaux, là où des captages et sorties d'eau sont observées (Annexe D). Les sols

bien percolés sans taches d'hydromorphie se trouvaient essentiellement sur les zones plus raides et sur les graviers du Riss (surface blanche, au sud-est sur la carte prédictive). Il faudrait cependant établir le pourcentage d'erreur de la carte, en retournant sur le terrain.

Même si le but final de cette étude est d'utiliser les données environnementales dans une perspective d'application sur de grandes surfaces avec des faibles densités d'observation pour des questions de réduction de temps et de coût, mais aussi d'accessibilité des parcelles (cf. §1.1), la phase d'acquisition des données sur le terrain demeure l'élément essentiel de toutes analyses spatiales des sols. Cette phase comporte dans tous les cas un biais statistique difficile à quantifier (Girard et al., 2005). Dans ces conditions, il est très important de pouvoir tester l'incertitude (Vaysse, 2015). Une densité trop faible de sondages pour expliquer la variation spatiale d'une propriété peut conduire à augmenter l'incertitude sur la variabilité des données (Lagacherie et al., 2013). L'augmentation du nombre de variables environnementales et la pertinence de leur choix vis-à-vis des variations spatiales des propriétés étudiées peuvent permettre de corriger le manque de données sur le terrain et augmenter la précision du modèle (Nussbaum et al., 2017).

Ces hypothèses ont permis de montrer l'importance d'inclure les variables qualitatives dans les SIG, dans le but d'intégrer la géologie. En effet, cette dernière apporte une classification intéressante et pertinente des sondages, le facteur lié au matériel parental ayant une influence prépondérante sur la formation et le régime hydrique des sols de la région.

Concernant les variables quantitatives, il a été montré dans ce travail que les facteurs les plus importants dans la répartition spatiale des sols et de leurs régimes hydriques sont par ordre d'importance : la pente, le MRVBF et l'altitude. Les mesures statistiques significatives du comportement spatial du régime hydrique, sur une zone donnée, selon un ensemble de covariables, considérées comme explicatives d'une partie de sa variabilité, est un critère essentiel pour sa modélisation future (Paegelow et al., 2008). Concernant son comportement temporel, notamment l'évolution de la dynamique de l'eau vers d'autres types de régimes hydriques, l'utilisation informatisée des procédures de cartographie, mise en place notamment par les scripts de type logiciel R permettrait d'actualiser et de mettre à jour les données pédologiques, par exemple, sous la forme d'ajouts de nouvelles données issues de campagnes de terrain ou la mise à jour des covariables environnementales tirées des jeux de données nationales (Vaysse, 2015).

6.2 Hypothèse II

H.2. Il est possible de différencier les taches d'oxydation liées à un engorgement temporaire ou permanent grâce à la topographie (en utilisant le MNT) et aux propriétés liées à la circulation de l'eau dans le solum (teneur en eau, texture, porosité et densité).

L'hypothèse 2 n'a pas pu être vérifiée. Les résultats des classes de régime hydrique et des données liées à la topographie étaient statistiquement significatives ($p\text{-value} < 0.05$) mais il n'a pas été possible de différencier les sources. Cependant, des pistes intéressantes sont ressorties. La discussion qui suit se penche, en première partie, sur les limites et la pertinence de l'utilisation des traces d'hydromorphie comme descripteurs du régime hydrique, notamment dans la KLABS, à la suite de difficultés rencontrées sur le terrain. L'utilisation des variables environnementales liées au MNT et geocover et des analyses physico-chimiques (texture, densité, porosité et teneur en eau) pour déterminer les périodes d'engorgement sont discutées en seconde partie.

6.2.1 Discussion et limite des descripteurs liés au régime hydrique

La nappe était anormalement basse pendant la période de terrain (l'été 2018 était particulièrement sec, selon les discussions avec les agriculteurs), ce qui a rendu plus difficile l'attribution à une classe de régime hydrique. Ce dernier était donc difficile à évaluer avec précision, étant donné son aspect dynamique. Or, c'est un critère diagnostique dans de nombreux systèmes de classification. Certains sols (par exemple le profil 2) ne présentaient pas d'engorgement visible sur une profondeur de 150 cm alors que des traces intenses d'oxydation sur une matrice grise ont été observées (Figure 31).

Concernant l'utilisation des traces d'oxydation dans la détermination du régime hydrique, il faut noter l'absence d'une relation réciproque entre l'engorgement et l'hydromorphie pour beaucoup de sondages. En effet, comme décrit dans §1.3, les traces d'oxydation ne correspondent pas toujours à un fonctionnement hydrique actuel et sont fréquemment des traces fossiles (Baize et al., 2011).



Figure 31 : trace d'intensité gg dans le profil P.2, photo prise le 19.12.2019

Dès lors, le diagnostic fonctionnel est difficile à établir en suivant exclusivement la KLABS. Le sol aurait pu être classé comme un sol brun-pseudogley ou un sol brun-gley. Sur le terrain, les sols à nappe temporaire gardent leurs signes d'hydromorphie toute l'année, pour des engorgements subis sur une courte période, en hiver ou au printemps (Baize et al., 2011). Ainsi les variations spatiales des traces de rouille (tel que décrit plus haut §6.1.2) s'accompagnent de variations temporelles. Dans un contexte agricole, une nappe éphémère liée à la fonte des neiges n'aura pas la même répercussion qu'une nappe temporaire de six mois, particulièrement sur les plantes et le développement racinaire (Barnaud et al., 2007).

Les sous-types de la KLABS, liés au régime hydrique (I, G et R, Tableau 3), sont également peu précis et n'ont pas été utilisés dans le cadre de cette étude. Le sous-type G est défini comme une « nappe permanente à niveau variable » et le sous-type R comme une « nappe permanente à faible battement ». Ainsi, le critère de classification pour ces deux types est le niveau de la nappe et son emplacement (horizon r). Or, la nappe a été atteinte à très peu d'endroits en raison des conditions particulièrement sèches. Au vu de ces observations et des résultats, il est primordial de replacer les signes d'hydromorphie dans leur contexte paysager (ici en utilisant le MNT) et propre au solum (notamment avec la texture, porosité et densité).

6.2.2 Différencier une nappe temporaire ou permanente

L'organisation spatiale de la zone d'étude interfère directement sur le régime hydrique des sols et il est normalement attendu que les nappes perchées temporaires, liées aux précipitations, se

situent en position de plateaux et de bas de pentes (Barnaud et al., 2007). Or, les Pseudogleys (régime hydrique de type **p**) sont situés sur une pente moyenne de 19% (Figure 20). En effet, sur le site d'étude, c'est le matériel parental qui est prédominant dans l'apparition de ce type de régime hydrique, et non la topographie (cf. §6.1.1). Il ressort cependant que les larges fonds de vallée ($MRVBF > 1.5$) et les fonds de colline indiquent un type de configuration propice aux engorgements permanents (de type **s** ou **t**), (Figure 20). Les résultats d'ANOVA montrent une corrélation significative ($p\text{-value} < 0.05$) entre la classe de régime hydrique (permanente ou temporaire) et la pente, l'altitude et le MRVBF.

Les résultats de l'ANOVA présentent une corrélation entre l'intensité des traces d'hydromorphie et le pourcentage de limon. Or, dans la littérature, il a été démontré que pour une texture limoneuse, une porosité inférieure à 40% engendre déjà de l'hydromorphie (Duchaufour, 2001). Pour une même durée d'engorgement, la solubilisation du fer peut varier selon la texture, les matériaux plus limoneux présentant souvent des signes d'hydromorphie intenses, ce qui est moins le cas pour une texture plus sableuse, souvent plus pauvre en fer (Schmidhalter et al., 1988). Il est probable que l'intensité des taches d'oxydation soit, en partie, directement liée aux propriétés du sol plutôt qu'à la durée de la nappe. Cependant, les horizons des profils présentant des taches d'oxydation intenses, notés gg (2.4, 2.5, 3.4, 4.4, 4.5, 6.5) avaient une densité apparente supérieure à 1.5 g/cm^3 (horizons 1.4, 2.4 à 2.6, 3.4 et 3.5, 4.3 à 4.5, 5.5 et 6.5) ce qui peut suggérer une capacité en air inférieure à 5% (Duchaufour, 2001) et témoigner d'un défaut de drainage interne. Il est finalement plus judicieux de se demander si le bilan hydrique est excédentaire, de façon temporaire ou non, que de se baser uniquement sur les traces d'hydromorphie sur le terrain. Dans le système de classification américain, Soil Taxonomy, utilisé par le USDA Soil Conservation Service, le régime hydrique est aussi utilisé comme un critère majeur mais les taches d'oxydation n'ont pas la place prépondérante qu'elles ont dans la KLABS (Soil Survey Staff, 1999). Ainsi, pour les travaux de cartographie, le classement des SDA ou tout autres systèmes de classification, en lien notamment avec les sols agricoles, il pourrait être intéressant de créer des classes de drainage spécifiques aux paysages et aux types de sols, liées au contexte suisse.

Les taches d'oxydations sont liées, sur le site d'étude, aux paramètres suivants :

- La teneur en eau
- La texture
- Le matériel parental (géologie)
- La position dans le paysage (apport d'eau par écoulement topographiques ou phréatiques)

Pour terminer, les critères utilisés dans la KLABS et la classification des SDA sont notamment liés à la capacité à produire des sols, dans un contexte de rendement agricole. Cependant, les sols hydromorphes ont toute leur place dans un paysage agricole. Leur capacité à stocker l'eau peut devenir très intéressante, les apports d'eau de nappe aidant à surmonter des périodes de sécheresse, qui risquent de devenir plus fréquentes ces prochaines années (Arlot, 1990). Même si les nappes perchées superficielles (Pseudogley) ne peuvent jouer le rôle de compensateur en période de sécheresse, disparaissant rapidement lorsque les pluies deviennent insuffisantes (c'est le cas du profil 3) (Duchaufour, 2015), ces dernières restent tout de même importantes dans un paysage agricole. En effet, les Pseudogleys sont connus pour leur capacité à gérer les flux d'azote dans un bassin versant, en raison de leur potentiel de dénitrification important, ils jouent donc un rôle primordial dans la régulation de la teneur en nitrates (Curmi et al., 1996).

7 Conclusions et perspectives

L'étude du fonctionnement hydrique constitue une composante essentielle de toute caractérisation approfondie d'un type de sol même quand il ne s'agit pas d'un sol hydromorphe. Ce travail a pu mettre en avant les points suivants :

- La possibilité d'utiliser les cartes en libre-service couplées aux données de terrain afin d'établir un modèle prédictif de la répartition spatiale du régime hydrique.
- L'intérêt d'intégrer les variables qualitatives en lien avec le matériel parental aux prédictions.
- Les problèmes liés aux descripteurs de la KLABS.
- Le diagnostic des taches d'hydromorphie pour évaluer le type de nappe (permanente ou saisonnière), complexe et pas toujours utilisable.

En utilisant des données de terrain couplées aux cartes disponibles (géologie, MNT), il a été possible d'identifier puis d'intégrer les facteurs déterminant l'hydromorphie dans un modèle prédictif. L'analyse statistique couplée à des données qualitatives et quantitatives par une AFDM a permis d'augmenter la précision du modèle, notamment en incluant la géologie.

Cependant, ce travail questionne la pertinence des descripteurs liés à l'utilisation de la KLABS. En effet, se baser sur les taches d'hydromorphie pour évaluer le type de régime hydrique ne permet pas toujours d'être précis, particulièrement lors de sécheresses. De plus, les taches fossiles peuvent fausser l'identification du type de nappe par l'apparition de fer oxydé liés à des variations

de nappes passées. Il serait intéressant que la classification des sols Suisse (KLABS) revoit et homogénéise le diagnostic du fonctionnement hydrique des sols engorgés, dans le but d'une représentation spatiale pertinente du régime hydrique des sols de Suisse. Une fiche des classes de régime hydrique établie d'après les résultats est présentée à la page suivante.

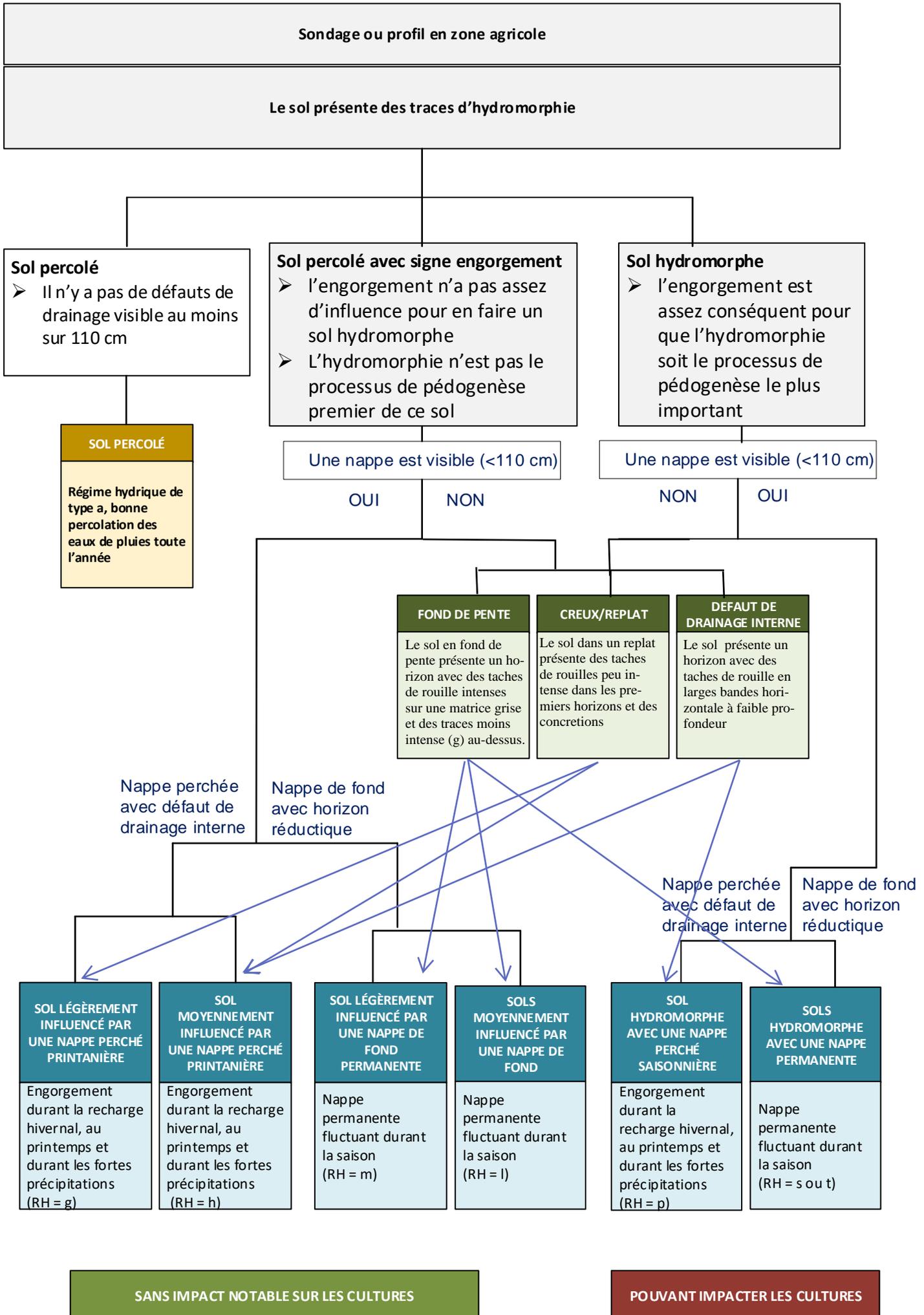
Enfin, il est important que les modélisations et travaux de cartographie futurs développent et mettent l'accent sur les lois de distribution des sols dans le paysage. Comme l'a mentionné Camenzing et al. (2011), la Suisse compte 38 types de paysages majeurs dont 12 ont été étudiés par Gobat et al. (2019). Leurs facteurs influençant la dynamique pédologique ont ainsi pu être mis en évidence. Il serait intéressant de se baser sur ces facteurs de pédogenèse prédominants pour chacun de ces types de paysages afin de proposer une méthodologie de cartographie des sols à une échelle précise, adaptée aux variations environnementales des différentes stations présentes en Suisse.

TYPE DE RÉGIME HYDRIQUE

Aspect visuel du sol

Type de sol

Classe de drainage



8 Remerciement

Je remercie les agriculteurs du site d'étude pour avoir accepté de mettre à disposition leur parcelle et pour les discussions enrichissantes (en suisse allemand) et je remercie Peter Trachsel pour m'avoir mis en contact avec ces derniers. Merci à Andréa Marti pour la mise à disposition des sondes, ses conseils et son aide, merci à Liv Kellermann pour nous avoir trouvé un coin pour travailler et pour le matériel, merci à Jolanda Keller, pour les deux profils et les sondages réalisés ensemble, merci à Madlène Nussbaum, pour son aide dans les statistiques, la mise à disposition de ses codes et ses conseils, merci à Dylan Tatti pour sa présence sur le terrain, son aide dans l'installation des sondes, ses relectures et ses conseils, merci à mes deux co-directeurs, Stéphane Burgos pour sa présence sur le terrain, sa patience, ses nombreux conseils et Claire Le Bayon, pour sa disponibilité, sa bonne humeur et ses relectures. Finalement, merci à Paul-Émile Desaulles pour tous les moments de rires et de détresse sur le terrain et lors du tamisage, et à mes proches pour leur appui sans faille et leur relecture.

9 Bibliographie

- AFES, Association française pour l'étude du sol, 2008. Référentiel pédologique. Quae, Versailles, p. 432.
- ARE, Office Fédéral du développement territorial, 2009. Monitoring projets d'agglomérations – transport et urbanisation. Indicateurs comparatifs selon les agglomérations. Berne : ARE, version du 16.04.09.
- ARE, Office Fédéral du développement territorial, pour le Conseil Fédéral Suisse, 2016. Stratégie pour le développement durable 2016 –2019, 27. ARE, version de janvier 2016.
- Archambeaud M., Thomas F., 2016. Les sols agricoles, comprendre, observer, diagnostiquer. Editions France Agricole, Paris, p. 259.
- Arlot M. P., 1999. Nitrates dans les eaux : drainage acteur, drainage témoin ? Thèse, Université de Paris, 6. p. 446.
- Baize D., Jabiol B., 2011. Guide pour la description des sols. Edition Quae, Versailles, p. 376.
- Baize D., Girard M.-C., 2008. Référentiel pédologique. Association française pour l'étude du sol (AFES). Éditions Quae. France., p. 405.
- Barnaud G. Fustec E., 2007. Conserver les zones humides : Pourquoi ? Comment ? Edition Dijon, Coll. Sciences en partage, p. 295.
- Ben-Dor, E., Chabrilat, S., Demattê, J. A. M., Taylor, G. R., Hill, J., Whiting, M. L., and Sommer, S., 2009. Using imaging spectroscopy to study soil properties, Remote Sensing of the Environment, S38–S55, doi: 10.1016/j.rse. 2008.09.019, p.113.
- Bernoux M., Chenu C., Blanchart E., Eglin T., Bispo A., Bardy M., King D., 2011. Le programme GESSOL 2 : Impact des pratiques agricoles sur les matières organiques et les fonctions des sols. Etude et gestion des sols, 18, p. 145.
- Beven K. J., Kirkby M.-J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull., 24(1) : 43 – 70.
- Blumel F., 1962. Forme des précipités d'hydroxydes de fer dans les gleys et pseudogley- (5) z. Pflanz. Düng. Bodenk. P. 107.
- Brunner J., Jäggli F., Nievergelt J., Peyer K., 1997. Cartographie et estimation des sols agricoles (résumé en français). Station fédérale de recherche en agroécologie et agriculture (FAL, ed.), sr nr. 24., Reckenholz, Zurich.
- Calvet R., 2003. Le sol. Editions France Agricole, Paris, p.233.
- Camenzind R., Stalder A., 2011. Typologie des paysages de Suisse. Offices fédéraux du développement territorial, de l'Environnement, de la Statistique, Berne et Neuchâtel.
- Conseil Fédéral Suisse, 2017. Message relatif à l'initiative populaire « pour la souveraineté alimentaire. L'agriculture nous concerne tous », sr 17.023.
- Curmi P., Walter C., Gascuel-Oudoux C., Durand p., 1996. Interest of class pedotransfer functions and soil distribution models for water quality studies: the case of nitrate in armorican catchments. The use of pedotransfer in soil hydrology research in europe, Orléans (France), 10-12 oct. 1996, p. 7.
- Derung N., 2018. La gestion durable des sols agricoles : sécuriser les démarches ou légitimer les controverses ? L'exemple des politiques agroenvironnementales autour de l'érosion hydrique des sols arables en Suisse, Thèse, Institut d'Ethnologie et Institut de Biologie, Université de Neuchâtel, p.388.

- Duchaufour P., 1995. L'humus forestier et les facteurs de sa décomposition. *Revue forestière française* 9 : p.488.
- Duchaufour P., 2015. *Introduction à la Science du sol. Sol, végétation, environnement*, Dunod, Paris, p.388.
- Escadafal P., Girard M.-G., Courault d, 1988. La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie, EDP sciences*, 8 (2), p.154.
- FAL, 1997. *Cartographie et estimations des sols agricoles, les cahiers de la FAL*, n° 24.
- Frasson B. A., 1947. *Geologie der Umgebung von Schwarzenburg: (Kanton Bern)*. Stämpfli & Cie, p. 63.
- Gallant, J. C., and J. P. Wilson, primary topographic attributes, in *terrain analysis: principles and applications*, edited by j. P. Wilson, and j. C. Gallant, pp. 51– 85, John Wiley, Hoboken, M. J., 2003
- Gobat, J.-M, Guenat C., 2019. *Sols et paysages, types de sols, fonctions et usages en Europe Moyenne*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, p. 562.
- Grêt-Regamey A., Drobnik. T, Greiner L., Keller A., Papritz A., 2016. Soils and their contribution to ecosystem services. Fiche d'information du PNR 68. www.nfp68.ch/fr (consulté le 11.12.2019).
- Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S., 2018. Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire. Synthèse thématique ST3 du programme national de recherche « utilisation durable de la ressource sol », PNR 68, Berne.
- Hantke R., Wagner G., 2004. *Altere Berner Schotter und eiszeitliche Mittelmoränen*. Sonderdruck aus «mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern», band 61, p.123.
- Hartemink, A., Sonneveld, M.-P.-W., 2013. Soil maps of the Netherlands. *Geoderma*. S 204–205. 10.1016/j.geoderma, (consulté le 11.12.2019).
- Herron, N., Wilson C., 2001. A water balance approach to assessing the hydrologic buffering potential of an alluvial fan, water resource. *Res.*, 37 (2), p. 351.
- Jenness, J., L'vfajka, D., Beier, P., 2011. Corridor designer evaluation tools: extension for Arcgis. Jenness enterprises. [Http://www.jennessent.com/arcgis/corridor.htm](http://www.jennessent.com/arcgis/corridor.htm), (consulté le 07.08.2019).
- Jenny H., 1941. *Factores of soil fromation*. McGraw-Hills, New York, p. 243.
- Jenny H., 1961. Derivation of state factor equation of soils and ecosystems. *Soils. Sci. Soc. Am proc.* 25: p.388.
- Borer F., Knecht M., 2014. *Cartographie des sols en suisse. Développement et perspectives*. Éd. Société suisse de pédologie, p. 100.
- Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A., Zürrer M., 2018. Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH). Synthèse thématique ST4 du programme national de recherche «utilisation durable de la ressource sol » (PNR68), Berne.
- Lagacherie, P., Sneep, A.-R., Gomez, C., Bacha, S., Coulouma, g., hamrouni, m.h., mekki, i., 2013. Combining vis-nir hyperspectral imagery and legacy measured soil profiles to map subsurface soil properties in a mediterranean area (cap-bon, tunisia). *Geoderma* p. 209–210 et p. 168–176.
- Lebègue G., 2007. Du spatial aux travaux publics : les maquettes virtuelles. Lettre AAAF Cannes, publiée sur archive-host.com, reprise dans la lettre AAAF no 6 de juin 007 [archive], issn 1767-0675, (consulté le 09.11.2019).

- Legros, J.-P., 1996. Cartographie des sols, de l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Coll. Science et technologie de l'environnement, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, p.380.
- Mailänder, R., Veit., H., 2001. Periglacial cover-beds on the Swiss Plateau : indicators of soil, climate and landscape evolution during the Late Quaternary. *Catena* 45 : 251-272.
- Mcbratney, A.B., Santos, M.L.M., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, p. 52.
- Mosimann T., Crole-Rees A, Maillard A., Neyroud J.-A, Thöni M., Musy A., Rohr W., 1990. Bodenerosion im schweizerischen mittelland ausmass und gegenmassnahmen - erosion du sol sur le plateau Suisse ampleur et remedes, bericht 51 des Nationalen Forchungsprogrammes «Nutzung des Bodens in der Schweiz»; liebefeld-bern.
- Mulder, V. L., de Bruin, S., Schaepman, M. E., and Mayr, T. R., 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping – A review, *Geoderma*, 162, 1–19, doi: 10.1016/j.geoderma, (consulté le 03.11.2019).
- Nouaïm, R., 2015. Biodiversité microbienne et qualité du sol : des indicateurs biologiques à portée agronomique. 12^{ème} rencontre de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, Lyon.
- Nussbaum M., Spiess K., Baltensweiler A., Grob U., Keller A., Greiner L., Schaepman M.E., Papritz A., 2017. Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. *Soil discussions*, p.32.
- Nussbaum M., Walthert L., Fraefel M., Greiner L., Papritz A., 2017. Mapping of soil properties at high resolution in switzerland using boosted geoadaptive models. *soil discussions*, 1–32, 10.5194/soil-2017-13, <https://www.soil-discuss.net/soil-2017-13>, (consulté le 03.04.2019).
- OFAG, Office fédéral de l'agriculture, 2012. Protection des terres agricoles. Bilans et défis. Berne. www.blw.admin.ch/blw/fr/home.html > politique > protection des terres agricoles, (consulté le 03.04.2019)
- OFEV, Office fédérale de l'environnement, 2017. Sols suisses. État et évolution – 2017. Berne. État de l'environnement n° 1721, p. 86.
- OFS, Office fédérale des statistiques, 2017. L'utilisation du sol en suisse. Exploitations et analyses. Office fédéral de la statistique, Neuchâtel, p. 64.
- Osol, Ordonnance sur les atteintes portées aux sols, du 1er juillet 1998 (état le 12 avril 2016) (sr 814.12).
- Paegelow, M. Camacho, M.-T, Ferraty, F. Ferré, L., Sarda, P., Villa, N., 2008. Environmental science and engineering modelling environmental dynamics. Doi: 10.1007/978-3-540-68498-55, p. 70.
- Pagès J., 2004. Analyse factorielle de données mixtes. *Revue statistique appliquée* 4: 93–111
- PNR 68, programme national de recherche, ofev, office fédéral de l'environnement, ofag, office fédéral de l'agriculture, are, office fédéral du développement territorial, 2015. Richesses du sol. Brochure publiée à l'occasion de l'année internationale des sols 2015, p. 32.
- Rehbein K., Grob U., Klausner L., Keller A., 2016. Système national d'information pédologique NABODAT – modèle de données version 1.4. Agroscope, Centre de services NABODAT, Zurich.
- Revel, JC. 1982. Formation des sols sur marnes. Etude d'une chrono séquence et d'une toposéquence complexes dans le terrefort toulousain. Thèse sci., inp Toulouse, p.249.

- Service de protection des sols du canton Soleure, 2005. Bodenkartierung kanton solothurn. Konzept bodenkartierung Kanton Solothurn 2005. Aktualisierung des konzeptes von 1995, Soleure.
- Soil Survey Staff, 1999. Soil taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436 (PDF). United States Dept. of Agriculture, Naturel Resources Conservation Service.
- Sorensen R., Zinko U., Seibert J., 2006. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observation. Hydrology and earth system sciences, European Geosciences Union, p.112.
- Soutter M., Mermoud A., Musy A., 2007. Ingénierie des eaux et du sol, processus et aménagements. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, p. 294.
- Vaysse K., 2015. Application et développement de méthodes de cartographie numérique des propriétés des sols à l'échelle régionale : cas du Languedoc-Roussillon. p. 140.
- Voltz, M., Arrouays, D., Bispo, A., Lagacherie, P., Laroche, B., Lemercier, B., Richer de Forges, A., Sauter, J., Schnebelen, N. 2018. La cartographie des sols en France : état des lieux et perspectives. INRA, France, p. 112.
- Walser O., Thévoz L., Joerin F., Schuler M., Joost S., Debarbieux B., Dao H., 2011. Les SIG au service du développement territorial. Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, p. 318.
- WRB, world reference base, IUSS working group, 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. ISSN 0532-0488, p.203.

Annexe A. Matrice des données

ID	ID2	Xcoord	Ycoord	Type sol	RH	Mingg (cm)	Moyp_arg (%)	Moyp_sab (%)	Moyp_lim (%)	Pente (%)	Altitude (m)	TPI	MRVBF	TWI	TRI	Geocover	Clust
1	s_1	2594475	1185233	1323	a		17.36	54.91	27.73	2.41	803.12	0.05	4	8.48	-0.01	q4s	2
2	s_2	2594534	1185061	1352	h		18.41	58.35	23.24	5.56	800.72	0.06	6	9.32	0.00	q4s	2
3	s_3	2594034	1184899	1311	a		16.8	49.8	33.4	7.99	822.98	0.12	1	9.68	-0.02	m1	5
4	s_4	2594036	1184743	1352	a		9.5	64.11	26.39	20.25	846.30	0.26	0	1.93	0.05	m1	6
5	s_5	2594041	1184671	1352	g		14.57	56.96	28.48	24.88	862.91	0.35	0	10.82	-0.05	q3s	4
6	s_6	2594436	1184673	1352	a		12.18	60.91	26.91	10.07	812.69	0.11	0	3.28	0.00	arvb	5
7	s_7	2594400	1184632	1352	h		20.27	50.64	29.09	12.36	816.79	0.15	1	10.12	-0.02	arvb	4
8	s_8	2594180	1184315	1352	a		13	62.67	24.33	5.67	872.14	0.07	1	9.34	0.00	q3s	5
9	s_9	2594291	1184226	1323	a		12.91	66.41	20.68	14.51	854.12	0.16	0	10.28	0.00	arvb	5
10	s_10	2594531	1184471	1352	a		13.57	58.33	28.1	7.25	823.75	0.08	1	2.30	-0.01	ars	2
11	s_11	2594608	1184435	4356	p	25	24.59	49.27	26.14	21.30	825.50	0.24	0	10.66	0.00	arvb	4
12	s_12	2594925	1184204	1452	l	75	13.77	48.45	37.77	25.90	822.30	0.30	0	3.99	0.02	arvb	5
13	s_13	2594160	1184430	1352	g		14.64	49	36.36	18.35	859.26	0.23	0	10.51	-0.03	q3s	4
14	s_14	2594177	1183983	1323	a		16.29	54.65	29.06	11.93	869.87	0.13	0	10.08	0.00	m1	5
15	s_15	2594758	1184416	1352	l	95	18.2	50.8	31	6.95	808.08	0.11	1	2.87	-0.03	arcv	1
16	s_16	2594703	1184386	1352	g		14.91	49.36	35.73	9.26	811.52	0.11	0	9.83	0.02	arvb	4
17	s_17	2594994	1184565	1352	a		12.41	54.65	32.94	8.51	798.63	0.11	1	9.74	-0.01	q4s	2
18	s_18	2594910	1184626	1323	a		12.5	55	32.5	1.26	801.53	0.03	3	-0.21	0.00	q4s	2
19	s_19	2594862	1184594	1323	l	85	21.05	49.82	29.14	4.06	800.97	0.07	3	1.83	0.00	q4s	1
20	s_20	2594825	1184534	1352	h		17.73	52.14	30.14	4.60	802.96	0.06	0	1.69	0.01	arcv	2
21	s_21	2594697	1184318	1352	m	50	19.11	45.42	35.47	6.28	816.79	0.10	1	9.44	-0.02	arvb	1
22	s_22	2594802	1184440	1352	g		10.41	61.59	28	23.13	807.13	0.28	0	3.05	-0.03	arvb	4
23	s_23	2594612	1184273	1323	a		14.91	49.27	35.82	22.26	824.15	0.26	0	5.08	0.00	arvb	5
24	s_24	2594383	1184217	1323	g		15.41	49.05	35.55	15.12	844.97	0.18	0	10.32	0.02	arvb	4
25	s_25	2594489	1184235	1452	l	90	8	57.91	34.09	14.99	837.98	0.17	0	10.31	0.01	arvb	4
26	s_30	2594223	1184197	1452	g		13.27	49.82	36.91	17.38	860.66	0.20	0	10.46	0.02	q3s	4
27	s_31	2594168	1184192	1323	a		15.2	42.4	42.4	12.79	865.32	0.14	1	4.73	-0.01	q3s	5
28	s_32	2594301	1184189	1324	a		11.38	42.06	46.56	17.22	852.71	0.19	0	0.69	0.00	arvb	5
29	s_33	2594378	1184187	4356	p		17	50.64	32.36	18.45	847.77	0.22	0	10.52	0.01	arvb	4
30	s_34	2594439	1184175	4356	p	80	18.18	48.09	33.73	19.87	847.74	0.23	0	3.19	0.00	arvb	4
31	s_35	2594290	1184232	1452	a		14.86	45.32	39.82	15.86	855.01	0.18	0	5.31	0.01	arvb	5
32	s_36	2594224	1184264	1323	a		16	32	52	20.19	867.42	0.23	0	2.24	-0.01	q3s	5
33	s_37	2594178	1184282	1323	a		17	33	50	13.85	871.74	0.17	0	2.10	-0.02	q3s	5
34	s_38	2594221	1184368	1352	a		10.77	56.86	32.36	22.76	863.08	0.27	0	3.85	0.03	q3s	5
35	s_39	2594289	1184322	1352	g		13.32	53.09	33.59	27.82	863.76	0.32	0	10.93	0.00	q3s	4
36	s_40	2594299	1184334	1352	g		11	51	38	27.32	860.69	0.32	0	10.91	-0.02	q3s	4

Jaune = Données du terrain

Vert = Données environnementales

ID	ID2	Xcoord	Ycoord	Type sol	RH	Mingg (cm)	Moyp_arg (%)	Moyp_sab (%)	Moyp_lim (%)	Pente (%)	Altitude (m)	TPI	MRVBF	TWI	TRI	Geocover	Clust
37	s_41	2594265	1184389	1352	a		15.77	42.46	41.77	12.73	854.08	0.14	0	5.03	0.00	q3s	5
38	s_42	2594322	1184422	1352	a		11.82	49.09	39.09	18.14	846.07	0.22	0	10.50	0.00	arvb	5
39	s_43	2594369	1184449	1352	g		12.82	49	38.18	20.72	835.04	0.24	0	10.63	0.00	arvb	4
40	s_44	2594332	1184489	1311	a		14.94	47.59	37.47	27.62	833.41	0.33	0	10.92	-0.02	arvb	5
41	s_45	2594419	1184491	1352	g		8.82	55.73	35.45	10.67	827.18	0.14	1	1.97	-0.03	arvb	4
42	s_46	2594332	1184489	1323	a		11.23	48.18	40.59	27.62	833.41	0.33	0	10.92	-0.02	arvb	5
43	s_47	2594236	1184485	1323	a		9.11	51.21	39.68	18.17	844.27	0.20	0	10.50	-0.01	arvb	5
44	s_48	2594160	1184485	1323	h		14.14	55.14	30.71	24.96	851.08	0.28	0	10.82	0.01	q3s	6
45	s_49	2594121	1184358	1323	a		13.18	59.64	27.18	8.45	872.46	0.11	0	9.73	0.01	q3s	5
46	s_50	2593862	1185009	1323	h		10.5	57.5	32	9.85	857.00	0.13	1	3.78	-0.01	m1	6
47	s_51	2593930	1185086	1352	a		15.5	49.5	35	11.58	854.66	0.14	0	10.05	-0.01	m1	5
48	s_52	2594016	1185132	1352	a		15.89	51.42	32.68	6.63	847.43	0.09	0	3.60	-0.01	m1	5
49	s_55	2594189	1184701	1352	m	60	16.53	47.26	36.21	23.01	845.34	0.27	0	3.35	0.00	m1	5
50	s_56	2594411	1184990	6356	t	55	16.27	53.14	30.59	1.32	801.90	0.07	3	-0.38	0.00	ards	1
51	s_57	2594391	1185208	1323	a		18.27	54.36	27.36	14.09	805.00	0.16	0	0.23	0.01	q4s	2
52	s_59	2594042	1184965	1323	a		16.13	51.87	32	14.57	824.17	0.17	0	10.28	0.02	m1	5
53	s_60	2593880	1184887	1323	h		15	57.63	27.37	11.11	842.22	0.14	0	10.01	0.02	m1	6
54	s_61	2594170	1185093	1352	g		14.59	60.27	25.14	23.42	826.72	0.26	0	1.88	0.01	m1	6
55	x_1	2594133	1184703	1352	a		14.35	54.47	31.18	26.69	851.74	0.32	0	-0.48	0.00	m1	5
56	x_10	2594501	1184960	6356	t	55	16.95	55.9	27.14	8.37	801.94	0.10	0	9.73	0.01	ards	1
57	x_11	2594465	1185064	1352	h		20.13	51.13	28.75	5.29	801.08	0.09	4	9.27	-0.01	ards	2
58	x_12	2594469	1185146	1352	g		19.05	55.05	25.91	2.92	801.99	0.14	0	8.67	0.04	q4s	2
59	x_13	2594127	1184940	1352	a		20.55	52.06	27.39	12.23	815.00	0.17	1	9.74	0.05	m1	5
60	x_14	2593850	1184761	1323	a		14.55	57.27	28.18	10.60	853.68	0.12	0	2.17	0.00	m1	5
61	x_2	2594083	1184640	1323	m	50	8.67	71.29	20.05	31.93	870.25	0.38	0	4.73	0.02	q3s	6
62	x_4	2594234	1184731	6356	s	80	15.22	61.89	22.89	29.82	832.29	0.35	0	0.53	-0.01	m1	3
63	x_5	2594301	1184771	6356	s		16.09	57.32	26.59	18.78	814.36	0.22	0	10.53	0.03	arvb	3
64	x_6	2594296	1184837	6356	s		13.91	65.18	20.91	17.22	810.92	0.21	0	0.62	-0.02	arvm	3
65	x_7	2594365	1184908	6356	t	50	19.71	56.48	23.81	2.07	803.06	0.06	3	8.33	-0.02	ards	1
66	x_8	2594390	1184853	6356	t	60	20.65	49.65	29.71	7.74	803.93	0.10	0	0.55	0.02	ards	1
67	x_9	2594415	1184956	6356	t	45	17.75	61.42	20.83	3.42	801.96	0.06	3	3.17	-0.01	ards	1
68	P_01	2594862	1184580	1323	h		19.79	59.32	20.89	3.78	801.28	0.05	3	2.33	0.00	q4s	2
69	P_02	2594759	1184482	6356	t	55	16.43	65.4	18.17	8.28	805.54	0.12	1	9.71	0.02	arvb	1
70	P_03	2594674	1184437	4376	p	40	11	57.13	31.88	15.63	820.28	0.17	0	10.35	0.00	arvb	4
71	P_04	2594449	1184994	6386	t	80	12.79	69.88	17.33	2.88	801.54	0.04	5	8.66	0.00	ards	1
72	P_05	2594099	1184658	1351	h		12.92	75.5	11.58	23.55	864.44	0.28	0	-0.32	0.03	q3s	6

Jaune = Données du terrain

Vert = Données environnementales

ID	ID2	Xcoord	Ycoord	Type sol	RH	Mingg (cm)	Moyp_arg (%)	Moyp_sab (%)	Moyp_lim (%)	Pente (%)	Altitude (m)	TPI	MRVBF	TWI	TRI	Geocover	Clust
73	P_06	2594210	1184231	1323	l	90	13	73	14	16.11	862.88	0.18	0	4.33	0.00	q3s	6
74	P_07	2594388	1184180	1323	l	100	13	75.62	14.57	19.25	848.64	0.22	0	4.52	-0.02	arvb	6
75	X.3	2594171	1184679	1352	a		9.82	71.09	19.09	16.19	850.47	0.18	0	4.13	0.00	m1	6
76	X.15	2594115	1184671	1352	m	50	11	61.22	27.78	25.30	859.17	0.30	0	5.69	0.01	q3s	6
77	X.16	2594079	1184706	1352	h		19.8	53.95	26.25	24.13	855.01	0.30	0	10.78	0.02	q3s	6
78	X.17	2593983	1184695	1352	a		21	48.2	30.8	27.48	852.73	0.31	0	10.91	0.00	m1	5
79	X.18	2593925	1184733	1352	m	60	19.11	54.44	26.44	29.87	849.26	0.35	0	11.00	0.02	m1	6
80	X.19	2593905	1184752	1352	a		18	54.71	27.29	23.31	849.88	0.29	0	2.48	0.04	m1	5
81	X.20	2593897	1184804	1352	a		12.86	62.14	25	25.85	843.16	0.29	0	4.09	0.00	m1	5
82	X.21	2593956	1184868	6386	t	60	18.6	53.8	27.6	6.57	830.72	0.12	0	3.78	0.03	m1	1
83	X.22	2593970	1184833	6386	t	75	16.42	52.26	31.32	11.79	831.17	0.16	1	10.07	-0.03	m1	1
84	X.23	2594021	1184801	1352	g		12.25	61.19	26.56	13.05	836.88	0.23	0	3.91	0.06	m1	6
85	X.24	2594100	1184773	1352	a		15.58	56.26	28.16	27.42	836.47	0.33	0	10.91	0.04	m1	5
86	X.25	2594036	1184830	1352	h		14.86	59.32	25.82	17.10	832.04	0.20	0	1.80	0.03	m1	6
87	X.27	2594169	1184769	1352	a		16.53	53.47	30	22.25	836.59	0.24	0	5.14	0.00	m1	5
88	X.28	2594186	1184773	1352	a		11.95	61.05	27	42.55	836.32	0.57	0	11.35	0.00	m1	6
89	X.29	2594104	1184861	1352	a		15.55	58.86	25.59	17.43	822.15	0.22	0	10.46	0.03	arvm	3
90	X.30	2594111	1184874	6386	t	65	11.7	66.5	21.8	7.18	819.52	0.14	0	2.44	0.03	arvm	3
91	X.31	2594043	1184903	1352	h		14.5	59.5	26	9.69	822.07	0.11	1	4.28	0.00	m1	2
92	X.32	2594081	1184924	1352	a		18.32	63.36	18.32	11.56	818.92	0.13	1	10.05	0.00	m1	2
93	X.33	2594113	1184930	6386	t	45	15.23	62.46	22.31	7.75	816.43	0.14	1	0.45	-0.03	m1	1
94	X.34	2594151	1184961	6386	t	60	17.81	54.38	27.81	20.74	814.00	0.26	0	10.63	-0.03	m1	1
95	X.35	2594184	1184944	1352	a		16.33	57	26.67	4.37	810.63	0.06	1	1.14	0.00	arvm	2
96	X.36	2594231	1184889	6386	t	70	14.78	66.13	19.09	18.44	811.45	0.23	0	10.52	0.04	arvm	3
97	X.39	2593918	1184613	1352	l	90	19.24	53.38	27.38	3.55	861.08	0.04	1	2.80	0.01	m1	1
98	X.38	2594244	1184998	1352	m	60	24.4	46.6	29	11.40	807.12	0.14	0	10.03	0.03	m1	1
99	S.62	2594081	1184577	1352	h		13.4	60.21	26.39	29.78	869.25	0.35	0	1.32	-0.01	q3s	6
100	S.63	2594115	1184571	1352	h		12.45	67.09	20.45	31.81	858.66	0.38	0	5.02	0.01	q3s	6
101	S.64	2594077	1184537	1352	g		14.35	66.25	19.39	28.78	868.02	0.34	0	4.65	-0.01	q3s	6
102	S.65	2594096	1184317	1352	a		13.25	61.36	25.39	3.00	873.59	0.10	3	8.70	-0.03	q3s	2
103	S.66	2594253	1184359	1352	l		11.03	56.13	32.84	14.56	858.24	0.17	0	10.28	0.01	q3s	6
104	S.67	2594094	1184262	1352	a		15	54	31	5.09	873.25	0.13	1	9.23	-0.04	q3s	5
105	S.68	2594107	1184211	1352	a		14.4	55.7	29.9	13.90	869.55	0.15	0	1.90	-0.01	q3s	5
106	S.69	2594499	1184559	1352	g		9.39	55.67	34.93	12.20	820.40	0.15	1	10.10	0.01	arvb	4
107	S.70	2594977	1184261	1352	l	75	13.77	48.45	37.77	4.65	809.47	0.08	2	-0.60	-0.02	arvb	1
108	S.71	2594020	1184292	1352	l	90	14.5	49.57	35.94	8.12	870.76	0.09	0	9.70	0.01	m1	5

Jaune = Données du terrain

Vert = Données environnementales

ID	ID2	Xcoord	Ycoord	Type sol	RH	Mingg (cm)	Moyp_arg (%)	Moyp_sab (%)	Moyp_lim (%)	Pente (%)	Altitude (m)	TPI	MRVBF	TWI	TRI	Geocover	Clust
109	S.72	2595096	1184288	1352	g		17.03	62.94	20.03	5.25	800.69	0.08	3	9.26	-0.02	q4s	2
110	S.73	2595139	1184397	1352	a		11.09	59.71	29.2	4.11	798.67	0.07	2	1.74	0.00	q4s	2
111	S.74	2594876	1184356	1352	a		12.41	59.55	28.04	18.67	820.82	0.25	0	10.53	-0.04	arvb	5
112	S.75	2594313	1184620	1352	g		15.18	60.91	26.11	15.08	826.09	0.18	0	10.31	-0.01	arvb	4
113	s.76	2594319	1184688	1352	g		20.27	50.64	29.09	15.94	818.81	0.18	0	4.90	-0.02	arvb	4
114	s.77	2594236	1184682	1352	g		15.2	64.77	20.02	28.59	837.05	0.34	0	5.17	0.01	m1	6
115	S.26	2593711	1184929	1352	h		10.5	65.5	24	5.33	853.30	0.13	5	3.78	-0.01	m1	2
116	s.27	2593768	1184927	1352	h		10	65	25	5.33	856.45	0.07	0	9.27	0.01	m1	6
117	S.28	2594208	1184636	1352	a		11.31	70.48	18.21	21.88	842.81	0.26	0	10.69	0.01	m1	6
118	S.29	2594351	1185055	1323	l	60	18.11	56.65	25.24	11.19	803.32	0.18	0	10.02	0.02	ards	1
119	s.53	2594828	1184228	1323	m	50	17.4	52.57	30.02	20.41	842.39	0.23	0	-0.78	0.02	arvb	5

Jaune = Données du terrain

Vert = Données environnementales

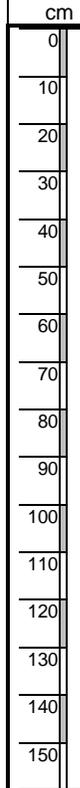
Annexe B. Fiche de la FAL vierge et clé de données pour fiche de profil

Formulaire	Relevé de terrain	Profil pédologique
------------	-------------------	--------------------

N° Id (6-7)*	Coordonnées GPS- X (13)	Coordonnées GPS- Y (14)	Altitude (m)	Commune (8)	Elt paysage (64)	Micro-relief (65)	Forme terrain (26)	Pente %
	2	1						

Projet (2)*	Cartographe (4)	Date (5)	Type de Sol(16)	Sous-types de sol (18)	EG en surface %	Texte UB (22)	Régime hydrique (23)	Profondeur utile PU (cm)	Classe PU (24)	NEK (76)	Végétation (61)	Couverture surface (ii)	Apparition nappe (cm)	Apparition du calcaire (cm)	Remarques

Schéma	Horizon N° (27)	Profondeur de (28)	Profondeur à (28)	Chang. litho (29.1)	Type horizon (29.3)	Formation du sol (29.2)	Etat MO. (30/1)	Hydromorphie (30/2)	Etat structural (30/3)	Enrichiss. minér. (30/4)	Alcalins alcalin. (30/5)	MO visuel % (33)	Degré déc. tourbe (cc)	Structure 1 (31 et 32)	Structure 2 (31 et 32)	Enracinement (bb)	Etat des racines (bb1)	Fomes racines (bb2)	Activité vers ers de terre (gg)	Porosité visible (kk)	Compacité (ll)	Friabilité (nn)	Argile tactile % (35)	Silt tactile % (37)	Graviers % (41)	Pierres % (43)	Nature EG (ee)	Réaction HCl (44)	pH Helliger (46)	Fact. PU hydromorphie	Fact. PU texture	Fact. PU compacité	Humidité (dd)	Couleur Munsel (48-51)	Nom Echantillons (56)		



(n°) : code FAL ; (yy) : champs supplémentaires. Tous les champs doivent être renseignés: chiffre / lettre = caractéristique renseignée ; 0 ou - = élément décrit mais absent ; case vide = élément non décrit ; * donnée fournie par le mandant

Clé de données 6.1 (modifiée) pour fiche de profil - avec complément de la Cartographie des Sols Canton de Soleure, Août 2004 (■) et adaptations à NABODAT, Avril 2010 (■) ** Résolution des codes des thèmes: "limite inférieure"(incl.) - "limite supérieure"(excl.) #

3 Type de profil

P Fosse / Profil
 B Talus, gravière
 C Carotière hydrologique
 H Tanière à main
 U Sondage à percussion (Pürckhauer)
 S Gouge #
 X Autres
 * Avec photo, Dia

16 Type de sol (sélection) 17

O Régosol 1322
 F Fluvisol 1322
 R Rendzine 1333
 K Sol brun calcaire 1353
 B Sol brun 1352
 T Sol brun lessivé 1355
 E Sol brun acide 1351
 Q Sol core podzolique 1361
 P Podzol hummo-ferrugineux 1368
 Z Phaenozem 2342
 Y Pseudogley - Sol brun 4356
 P Pseudogley 4376
 I Gley - Sol brun 6352
 V Gley oxydé 6376
 G Gley réduit 6386
 N Sol semi-tourbeux 6582
 M Tourbe 6592
 A Sol alluvial d'inondation 8322
 X Remblai ■

18 Sous types

P Discontinuités lithologiques
 PE érodé
 PK colluvial
 PM anthropogène
 PA alluvial
 PU recouvert
 PS sur marne de marais
 PP polygénétique
 PL érique
 PT avec intercalation(s) de tourbe
 PD sous-sol très perméable
 PB aménagé en terrasse ■
 V Degré d'altération

VL lithologique (< 10 cm de profondeur)
 VF sur roc (10 - 60 cm de profondeur)
 VU crevasse
 VA karstique
 VB en blocs
 VK pséphitique (extr. graveleux)
 VS psammitique e (extr. sablonneux)
 VT pélitique (extr. fin)
 E Degré d'acidité (pH CaCl2)

E0 acide >6.7
 E1 neutre 6.2-6.7
 E2 faiblement acide 5.1-6.1
 E3 acide 4.3-5.0
 E4 fortement acide 3.3-4.2
 E5 extrêmement acide <3.3

K Teneur en carbonates et sels
 KE partiellement calcaire/décarbonaté
 KH calcaire
 KR riche en calcaire
 KF à efflorescences calcaires
 KA à tuf calcaire
 KA sodique
 F Distribution des oxydes de fer (Fe)

FB brunifié
 FP podzolique
 FE enveloppes ferrugineuses
 FQ à grains de quartz
 FM marmorisé
 FK concrétions
 FG à taches grises
 FR rubéfié

ZS grumeleux, mottoux (stable)
 ZK en mottes
 ZT à recouvrements argileux
 ZV vertisolique
 ZL labile

ZP pélosolique
 L Assemblage des composants

L1 meuble
 L2 compact
 L3 compact
 L4 induré

I Nappe perchée
 I1 faiblement pseudogleyifié
 I2 pseudogleyifié
 I3 fortement pseudogleyifié
 I4 très fortement pseudogleyifié

G Nappe permanente à battements

G1 humide en profondeur
 G2 faiblement gleyifié
 G3 gleyifié
 G4 fortement gleyifié
 G5 très fortement gleyifié
 G6 extrêmement gleyifié

R1 Nappe permanente stable
 R2 faiblement mouillé
 R3 mouillé
 R4 fortement mouillé
 R5 très fortement mouillé

D Drainage artificiel
 DD drainé

M Mat. organiques en milieu aérobie
 ML à humus brut
 MF à moder
 MA pauvre en humus
 MM à null

MH riche en matières humiques
 O Mat. organiques en milieu anaérobie
 OM amonoïque
 OS sapro-organique
 OA para tourbeux
 OF tourbeux superficiel
 OT tourbeux profond

T Expression du type

T1 peu typé
 T2 typé
 T3 atteint/dégradé

H Neteté des horizons

HD diffus
 HA nettement délimité / transition abrupte
 HU à horizons irréguliers
 HB bioturbation / mélange biologique
 HT labour profond, défoncé

Pierrosité (Vol.-%) **

19 CsS estimation / 20 CIS estimation ■

0 non/peu pierreux < 5 %
 1 faiblement pierreux 5 - 10 %
 2 graveleux 10 - 20 %
 3 assez pierreux 20 - 30 %
 4 très graveleux* 0 - 30 %
 5 très caillouteux 0 - 30 %
 6 riche en graviers* 30 - 50 %
 7 pierreux, riche en pierres 30 - 50 %
 8 graviers ≥ 50 %
 9 éboulis, blocs ≥ 50 %
 *au maximum 1/3 de squelette grossier (> 5 cm)

Pierrosité sols de forêts (Vol.-%) ** ■

0 non/peu pierreux 0 - 5 %
 1 faiblement pierreux 5 - 10 %
 2 pierreux 10 - 20 %
 4 fortentent pierreux 20 - 30 %
 6 riche en squelette 30 - 50 %
 8 graviers, éboulis, charriage ≥ 50 %

Texture de la terre fine **

21 CsS estimation / 22 CIS estimation ■ #

1 sableux Argile % Silt %
 2 sablo-silteux uS 0 - 5 15 - 50
 3 sablo-limoneux IS 5 - 10 0 - 50
 4 limono-sableux léger 10 - 15 0 - 50

IFS
 5 limono-sableux sL 15 - 20 0 - 50
 6 limono-L 20 - 30 0 - 50
 7 limono-argileux TL 30 - 40 0 - 50
 8 argilo-limoneux IT 40 - 50 0 - 50
 9 argile T 50 - 100 0 - 50
 10 silto-sableux sU 0 - 10 50 - 70
 11 silteux U 0 - 10 70 - 100
 12 silto-limoneux IU 10 - 30 50 - 90
 13 silto-argileux TU 30 - 50 50 - 70

23 Groupes du régime hydrique

Sols lavés verticalement

Normalement perméables
 a très profond
 b profond
 c modérément profond
 d assez superficiel
 e superficiel - très superficiel
Influencés par de l'eau de fond
 f profond
 g profond
 h assez superficiel
 i superficiel - très superficiel
 j *Influencés par de l'eau de fond ou de pente*
 k profond
 l profond
 m assez superficiel
 n superficiel - très superficiel

Sols influencés par de l'eau de fond

Rarement engorgés jusqu'en surface
 o modérément profond - profond
 p assez superficiel - superficiel
Souvent engorgés jusqu'en surface
 q assez superficiel
 r superficiel - très superficiel

Sols influencés par de l'eau de fond/pente

Rarement engorgés jusqu'en surface
 s profond
 t modérément profond
 u assez superficiel-superficiel
Souvent engorgés jusqu'en surface
 v modérément profond
 w assez superficiel-superficiel
Fréquemment engorgés jusqu'en surface
 x assez superficiel
 y superficiel - très superficiel
 z très superficiel

24 Profondeur utile **

0 extrêmement profond > 150 cm
 1 très profond 100 - 150 cm
 2 profond 70 - 100 cm
 3 modérément profond 50 - 70 cm
 4 assez superficiel 30 - 50 cm
 5 superficiel 10 - 30 cm
 6 très superficiel < 10 cm

26 Forme du terrain

a plat 0 - 5 %
 b régulièrement incliné 5 - 10 %
 c convexe 0 - 10 %
 d concave 0 - 10 %
 e irrégulier 0 - 10 %
 f pente régulière 10 - 15 %
 g convexe 10 - 15 %
 h concave 10 - 15 %
 i irrégulier 10 - 15 %
 j pente régulière 15 - 20 %
 k pente régulière 0 - 25 %
 l convexe 0 - 25 %
 m concave 0 - 25 %
 n irrégulier 0 - 25 %
 o pente régulière 25 - 35 %
 p convexe 0 - 35 %
 q concave 0 - 35 %
 r irrégulier 0 - 50 %
 s pente régulière 35 - 50 %
 t convexe 0 - 50 %
 u concave 0 - 50 %
 v irrégulier 0 - 50 %
 w pente régulière 50 - 70 %
 x irrégulier 0 - 75 %
 y pente régulière > 75 %
 z irrégulier 0 - 75 %

Description des horizons

29 Horizons principaux

A horizon supérieur organo-minéral (<30 % MO)
 B horizon d'altération
 C horizon de profondeur (matériau de départ)
 D horizon d'alluviation ou de lessivage
 E horizon d'alluviation ou d'accumulation
 O horizon organique supérieur (>30 % MO)
 R rocher
 T tourbe
 AB horizon de transition
 B/C horizon complexe
 II, III changement lithologique

30 Caractéristiques des horizons

a anmoor (10 - 30 % MO)
 h horizon enfoui
 ch altération achevée de la partie minérale
 cn concrétions ou nodules riches en zone de fermentation (30 - 90 % de restes végétaux)
 f teneur élevée en oxydes de fer
 fe enrichi en calcaire (efflorescences tuf)
 g horizon modérément taché de rouille
 gg horizon très taché de rouille (hydromorphe)
 h humifère (< 30 % restes vég. reconnaissables)
 hh Couche d'humus noire supérieure
 k enrichi en calcaire (efflorescences tuf)
 l Litière (90 % de restes végétaux)
 m zone massive, cimentée et durcie
 n riche en alcalis
 ox horizon à oxydes (oxydes de Fe/Al)
 p horizon labouré
 q enrichissement en quartz résiduel détrempé en permanence; fortement enrichissement en sels solubles
 sa bien structuré
 st horizon relativement riche ou enrichi
 t vertisolique; fissuré
 vt roche-mère altérée
 w zone compactée, non cimentée
 y anthropogène (dépot artificiel) ■
 z fragmentation de la roche-mère peu développé
 () horizon partiellement présent

31 Structure: forme

Gr granulé ■
 Kr structure grumeleuse
 Sp subpolyédrique
 Po structure polyédrique
 Pr structure prismatique
 Pl structure squameuse / en plaquettes
 Ko structure cohérente
 Ek structure particulaire, granulaire
 osm sapro-organique
 ofi fibreuse } organique
 ofu feuilletée }

structures anthropogènes ■
 Br mottes massives
 Kir mottes arrondies
 Kik mottes anguleuses
 Fr fragments

32 Taille de la structure (●)**

1 < 2 mm
 2 2 - 5 mm
 3 5 - 10 mm ■
 3.5 5 - 20 mm #
 4 10 - 20 mm ■
 5 20 - 50 mm ■
 6 50 - 100 mm ■
 7 ≥ 100 mm #

44 Carbonates (CaCO₃)

0 pas de CaCO₃
 1 CaCO₃ seulement dans le squelette
 2 CaCO₃ ± présent, efflorescences ponctuelles
 3 faible effervescence (+)
 4 effervescence modérée (++)
 5 effervescence marquée, durable (+++)

59 Exposition

N, NE, E, SE, S, SW, W, NW (= pas d'exposition)

60 Zone agroclimatique

D'après la carte des aptitudes climatiques (1977) #

60 b) Zone du cadastre agricole

D'après la Classification des Sols de Suisse (2008) #

61 Végétation (actuelle)

AK terres ouvertes
 KW prairies temporaires
 WI prairies permanentes
 WE pâturages
 BG vergers
 SO vergers intensifs
 SC cultures maraichères, jardins potagers
 SB baies, petits fruits
 SR vignes
 BK végétation herbacée
 BS buissons
 WA forêts
 SL surfaces à litère
 RI marécages
 MO tourbières
 UW steppes / pelouses naturelles
 OL terrains artificiels incultes
 XX autres

62 Matériau de départ

TO tourbe
 TU tuf
 SK craie lacustre
 SA sable
 LO loess
 HS éboulis (éboulement)
 AL alluvions
 KO colluvions
 HL limon de pente
 SL limon lacustre
 SC gravier *
 MS moraine graveleuse *
 MO moraine *
 MG moraine de fond *
 ME marne
 TN argille
 TS argillite
 SS molasse
 KG conglomérat
 KS calcaire (roche)
 DO dolomie
 RW Rauwacke, cornieule, dolomie vacuolaire
 GN granite
 GN gneiss
 SF schiste

63 Glaciation *

1 Günz
 2 Mindel
 3 Riss
 4 Würm
 5 postglaciaire

64 Élément du paysage

EE plaine, plateau - 5 %
 IM vallée en cuvette - 10 %
 TS fond de vallée - 15 %
 TC petite vallée, vallon - 15 %
 SF cône d'épanchement - 15 %

SK cône d'éboulement - 25 %
 TW bosse de vallée - 25 %
 TT terrasse de vallée - 15 %
 HT terrasse suspendue - 15 %
 PF plateau - 15 %
 HZ érie, dos, bosse - 25 %
 HF bas de pente - 25 %
 HH pente modérée - 25 %
 HX pente forte - 50 %
 HY pente raide - 75 %
 HZ pente très raide > 75 %
 HR terrain instable
 HM dépression sur pente
 ER ravine d'érosion
 HP cote suspendue

65 Microrelief

1 convexe (ablation)
 2 concave
 00 plane / équilibré

66 Etat de la structure

1 bon
 2 modérément perturbé
 3 très perturbé

67 Limitations

du sol
 A type de sol
 D perméabilité
 C chimisme
 F eau de fond
 G profondeur utile pour les racines
 I eau de rétention
 S squelette du sol
 K osm extrêmement perméable
 Z état de la structure de la topographie
 L position dans le relief
 N pente du versant
 O configuration de la surface du climat
 K situation climatique
 X altitude/étage de végétation
 H exposition
 Y précipitations

68 Restrictions à l'utilisation

B exploitation mécanique
 E érosion
 G profondeur
 M microclimat (gel, vent etc.)
 P recouvrement
 Q submersion, inondation
 R glissement de terrain
 T résistance
 V période de végétation
 W régime hydrique et aération

69/70 Aménagements

Amélioration du régime hydrique et de l'aération
 WR conduites de drainage
 WM sous-solage au boulet
 WU ameublissement du sous-sol
 WG captage des sources
 WJ fossé de drainage
 WV réglage du cours d'eau évacuateur
 WB irrigation
 OE Aménagement de la surface
 OS nettoyage
 OR aménagement en terrasses
 OR remise en culture
 OS Mesures de conservation du sol
 EU épandage de sable
 EH apport de terre végétale
 ET labourage profond
 EC enherbement permanent
 EF reboisement
 EW protection contre le vent
 EG stabilisation de la structure
 EG Corrections du chimisme du sol

CK épandage de calcaire
 CD complément de fumure
 CS lessivage des sels
 CA apport de supports absorbants

71 Utilisation d'engrais solides

1 normal
 2 prudence
 3 précaution renforcée
 4 pas d'application

72 Restriction à l'épandage d'engrais liquides

1 risques faibles
 2 risques moyens
 3 risques élevés
 4 risques très élevés

73 classes d'aptitude

74 points

1 classe d'aptitude 1 90 - 100
 2 classe d'aptitude 2 80 - 89
 3 classe d'aptitude 3 70 - 79
 4 classe d'aptitude 4 60 - 69
 5 classe d'aptitude 5 35 - 49
 6 classe d'aptitude 6 20 - 34
 7 classe d'aptitude 7 10 - 19
 8 classe d'aptitude 8 0 - 9

75 Catégories d'exploitation du sol (complément)

FO prairie de fauche sans restriction
 FE prairie de fauche avec restriction
 FW prairie de fauche, prairie favorable
 FM prairie de fauche, fauche favorable
 MM fauche
 WG pâturage de bétail
 WJ pâturage de jeune bétail
 WK pâturage de petit bétail
 SG églumes
 SO fruits
 SR vignes } Cultures spéciales
 SB baies }
 SE épices }
 SM plantes médicinales }
 OT emplacement secs } Enrichissement écologique
 ON emplacement humide }

76 Classes d'exploitation

1 assolement sans restriction 1^{er} type
 2 assolement sans restriction 2^{ème} type
 3 assolement prédom. de céréales 1^{er} type
 4 assolement prédom. de céréales 2^{ème} type
 5 prédominance de cultures fourragères
 6 assolement prédominance de cultures fourragères (cultures céréalières possibles)
 7 prairies et pâturages (bon à moyen)
 8 prairies humides (à faucher uniquement)
 9 prairies extensives (pâture et fauche)
 10 surfaces à litère

FORET

100 Formes d'humus

Mull (M)
 Mt muli typique
 Mf muli-modér
 MH muli-humide typique
 MHH muli-modér humide

Modifier (F)

Fm modifier-mull
 Fa modifier typique, pauvre en humus fin
 Fr modifier typique, riche en humus fin
 Ff modifier-humus brut
 Fhm modifier-mull humide
 FHa modifier typique humide, pauvre en humus fin
 FHR modifier typique humide, riche en humus fin
 FHL modifier-humus brut humide

Humus brut (mor) (L)

La humus brut typique, pauvre en humus fin
 Lr humus brut typique, riche en humus fin
 LHa humus brut typique humide, pauvre en humus fin
 Lhr humus brut typique humide, riche en humus fin

Annour
 T Tourbe

101 Peuplement

a) Type de peuplement
 G profonduer utile pour les racines
 100 futaie traitée par coupes, unitaire
 200 futaie traitée par coupes, pluristrate
 300 forêt jardinée ou autre peuplement étagé
 400 (anciennement) taillis
 500 (anciennement) taillis sous futaie
 600 peuplements spéciaux : forêt buissonnante, bosquet, boisement dispersé

stade de développement
 .10 jeune futaie (diam. moyen < 10 cm)
 .20 perchis (diam. moyen 10 - 30 cm)
 .30 jeune futaie, futaie moyenne (diam. moyen 30 - 50 cm)
 .40 vieille futaie (diam. moyen > 50 cm)
 .50 maturité pureté du peuplement

.1 91 - 100 % de résineux = résineux pur
 .2 51 - 90 % de résineux = résineux mélangé
 .3 11 - 50 % de résineux = feuillus mélangé
 .4 0 - 10 % de résineux = feuillus pur

b) Degré de fermeture

1 comprimé, serré
 2 normal - lâche
 3 aéré - clairsemé
 4 en groupes comprimés ou normaux
 5 fermeture étagée

Hauteur des arbres

102 hauteur mesurée des (100) arbres les plus forts en m (chantillonage)

103 hauteur estimée en m

Réserve

104 réserve mesurée en m³/ha
105 réserve estimée en m³/ha

Age

106 âge „mesuré“ en années
107 âge estimé en années
108 forêt association #
 Numéro d'après Nais (OFEV, 2005)

109 Espèces d'arbres adaptés

Liste de combinaisons d'espèces d'arbres adaptés. Moyennant les abréviations officielles

110 Capacité de production

111 Points

1 excellente 92 - 100
 2 très bonne 80 - 91
 3 bonne 60 - 79
 4 assez bonne 30 - 59
 5 faible 10 - 29
 6 très faible 0 - 9

Signatures pour esquisses de profils

Limites des horizons

--- diffus
 - - - net
 - - - prononcé
 - - - fente
 - - - poche
 = fin de profil

Squelette

○ frais, non-altéré
 ○ altéré
 ○ calcaire
 ○ sans calcaire
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Substances organo-minérales

|||| neutre
 / / / / acide
 XXX tourbe peu décomposée
 XXX tourbe assez décomposée
 XXX tourbe très décomposée

Substances illuviales

/ / / / gains d'humus
 / / / / humines
 / / / / enveloppes argileuses
 / / / / activité de lombrics
 / / / / taches d'oxydation
 / / / / escargots
 / / / / racines
 / / / / sous-solage (ameublissement)
 / / / / compactions

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

Hydromorphie

○ limite des carbonates
 ○ charbon
 ○ bois
 ○ charbon
 ○ Carbonates

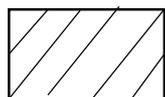
Carbonates

○ efflorescences calcaires
 / / / / tuf calcaire
 / / / / limite des carbonates
 / / / / charbon
 / / / / bois
 / / / / charbon
 / / / / Carbonates

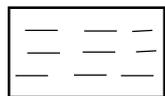
Hydromorphie

Annexe C. Légende des fiches pédologiques et du geocover

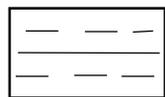
Légende des Fiches



Horizon A



Horizon B limono-sableux



Horizon B limono-argileux



Molasse en place



Trace d'oxydation



Horizon réduit



Nappe



Racine



Cailloux

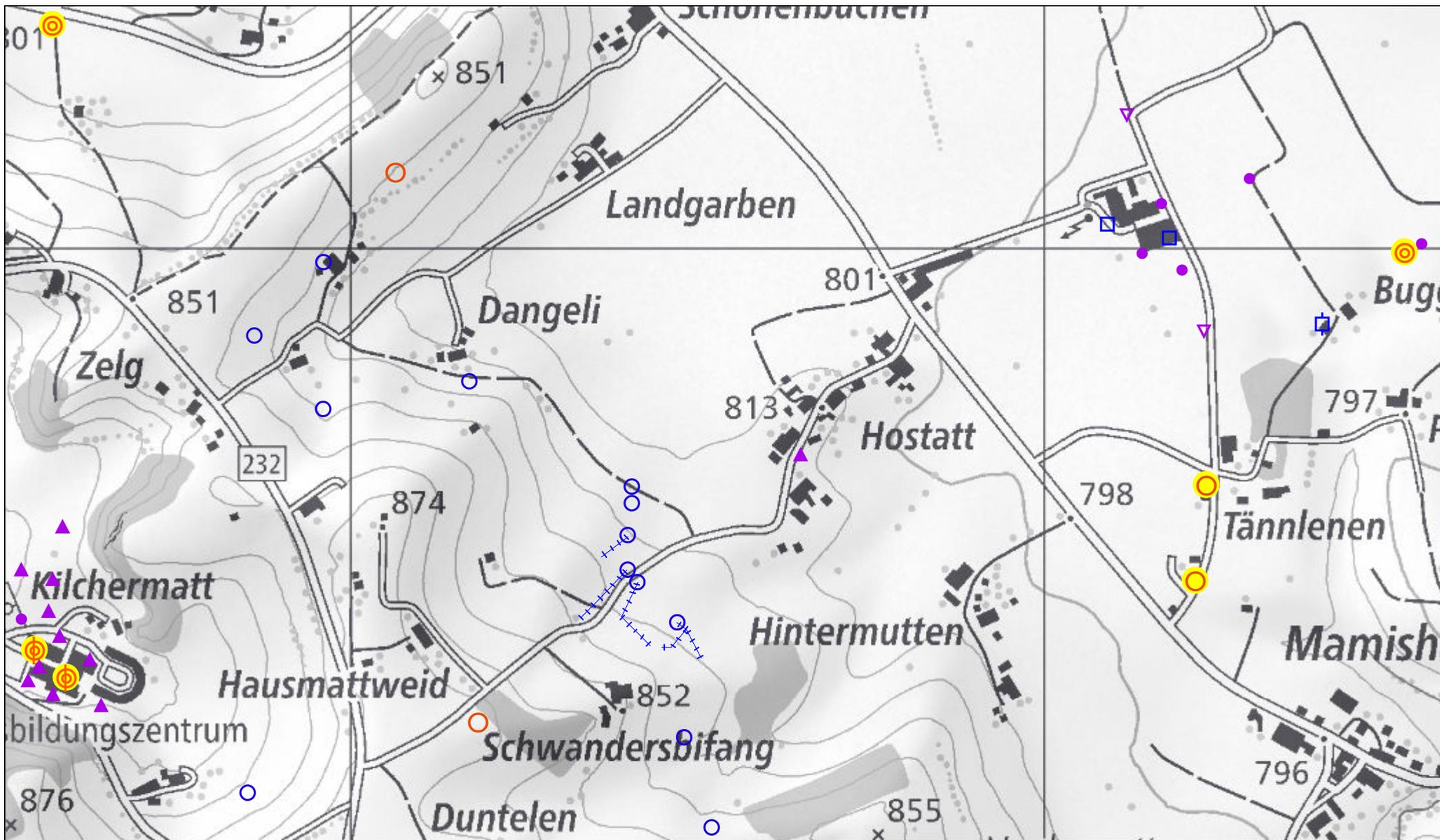


Reste de charbon



Vers de terre

Annexe D. Carte



Base de données géologique dans le canton de Berne

Remarques: Texte libre avec max. 120 caractères

Propriétaire de la carte: Office des eaux et des déchets du canton de Berne

Copyright: © Canton de Berne / © swisstopo

Des indications détaillées concernant le copyright et la légende sont disponibles dans le document accessible par le lien:

https://www.m.ap.s.be.ch/pub/pub/doku/geolog_fr.pdf

Ces données ne sont pas garanties quant à leur exactitude ni quant à leur exhaustivité. S'adresser au propriétaire de la carte pour obtenir des informations ayant force légale.



Geoportal des Kantons Bern
Géoportail du canton de Berne



Créé pour l'échelle 1:7'500

Date de création 12.12.2019



Legende

Geschützte geologische Objekte



Sondierungen

Sondierungen vereinfacht

- Bohrungen
- Sondierungen
- Brunnen

Sondierungen detailliert

- Kernbohrung
- Kernbohrung mit Piezo
- Spülbohrung
- Spülbohrung mit Piezo
- Tiefbohrung
- Rammsondierung
- gerammtes Piezo
- Baggerschlitz
- Horizontalfilterbrunnen
- Vertikalfilterbrunnen
- Schacht- oder Sodbrunnen
- Brauchwasserrückgabe

Vorhandene Bohrprofile



Quellen

Quellen

- Quelle gefasst, Sickerleitungsfassung
- Stollenfassung
- Quelle ungefasst

Sickerleitungsfassungen

- Stollen-Fassung > 40 m
- Sickerleitung > 40 m

Tracer Verbindungslinien



Grundstücke im vermessenen Gebiet

Rechtsgültige Grundstücke

- Grundstücke (Liegenschaften)
- Selbständig und dauernde Rechte (SDR)
- Grundstück-Nr. SDR

Projektierte Grundstücke

- Grundstücke (Liegenschaften)
- Selbständig und dauernde Rechte (SDR)
- Grundstück-Nr. SDR

Grundstücke im unvermessenen Gebiet

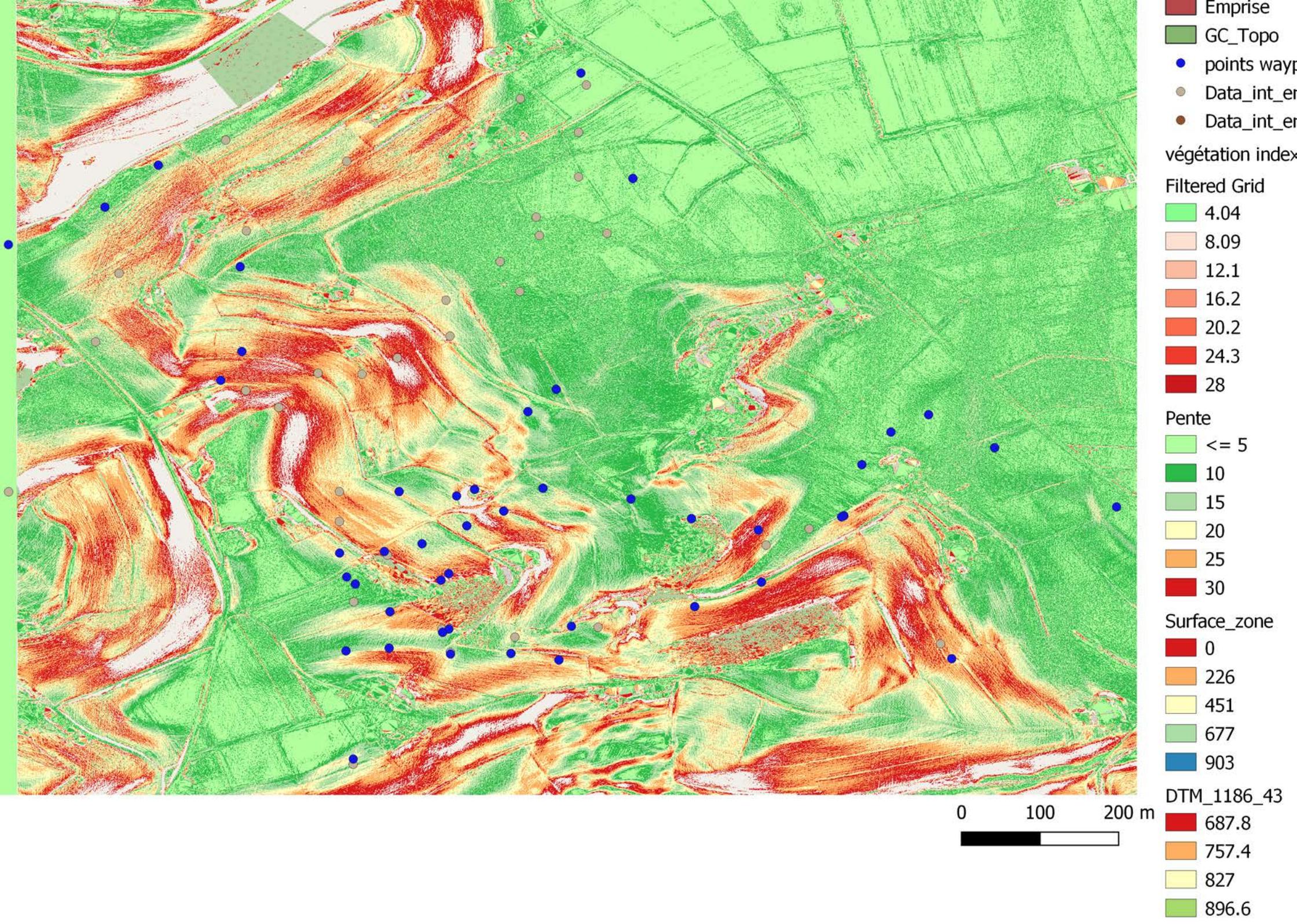
- Grundstück-Nr. SDR
- Grundstücke (Liegenschaften / SDR)

Laufende Landumlegung

- Laufende Landumlegung

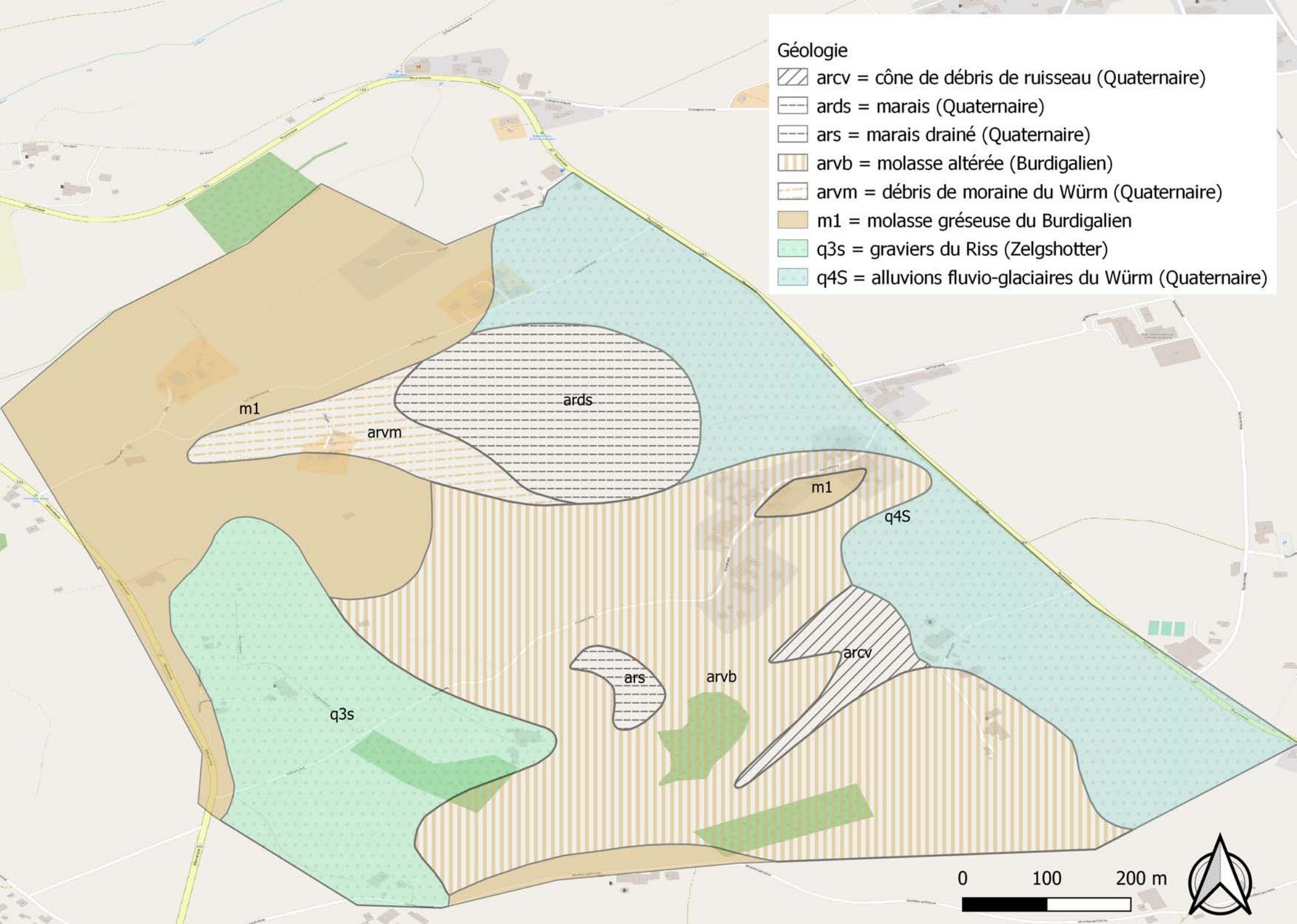
Grenzen

- Gemeindegrenzen
- Grundbuchkreisgrenzen
- Kantonsgrenzen



Géologie

- arcv = cône de débris de ruisseau (Quaternaire)
- ards = marais (Quaternaire)
- ars = marais drainé (Quaternaire)
- arvb = molasse altérée (Burdigalien)
- arvm = débris de moraine du Würm (Quaternaire)
- m1 = molasse gréseuse du Burdigalien
- q3s = graviers du Riss (Zelgshotter)
- q4S = alluvions fluvio-glaciaires du Würm (Quaternaire)



Annexe F. Protocole de mesure de la densité apparente et porosité

MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE (DENSITE APPARENTE) DU SOL, DU VOLUME D'EAU QU'IL CONTIENT

Niveau concerné : 2^{nde}, 1^{ère} S

Objectif : on cherche à mesurer la densité d'un sol, réfléchir sur sa capacité de rétention en eau, la porosité totale...

Matériel :

- Cylindre de volume connu (ex : raccord de tuyau en alu ou en PVC de 50 mm minimum)
- Balance
- Etuve
- Récipient résistant à la chaleur (barquette en aluminium par exemple)

Capacités travaillées : manipuler, suivre un protocole, présenter des données sous forme d'un tableau.

Protocole

1. Prélever un échantillon de sol humide à l'aide du cylindre utilisé comme un emporte-pièce.
2. Préparer un récipient allant à l'étuve. Pesez le récipient à vide.
3. Vider l'échantillon de sol prélevé dans le récipient et peser l'ensemble.
4. Mettre le récipient avec l'échantillon à l'étuve pour séchage (105°C).
5. Peser à nouveau. La différence entre la masse humide et la masse sèche donne la masse d'eau contenue dans le sol (et donc le volume).

Résultats

Les différents paramètres peuvent être présentés sous forme d'un tableau.

On peut calculer :

- Masse volumique du sol (ou Densité apparente : D_a) = poids sec sol / volume cylindre (en g/cm^3)
- Teneur en eau massique = (poids échantillon humide – poids échantillon sec 105°C) / poids échantillon sec (g/g)
- Porosité totale = [masse volumique du solide – masse volumique du sol (densité)] / masse volumique du solide (souvent exprimée en pourcent)

Discussion et exploitation des résultats

Tous les résultats permettent de réfléchir à la signification de la masse volumique et au calcul de la teneur en eau, de la masse volumique humide et sèche, et de la porosité.

On considère que la masse volumique du solide est de $2,65\text{g}/\text{cm}^3$.

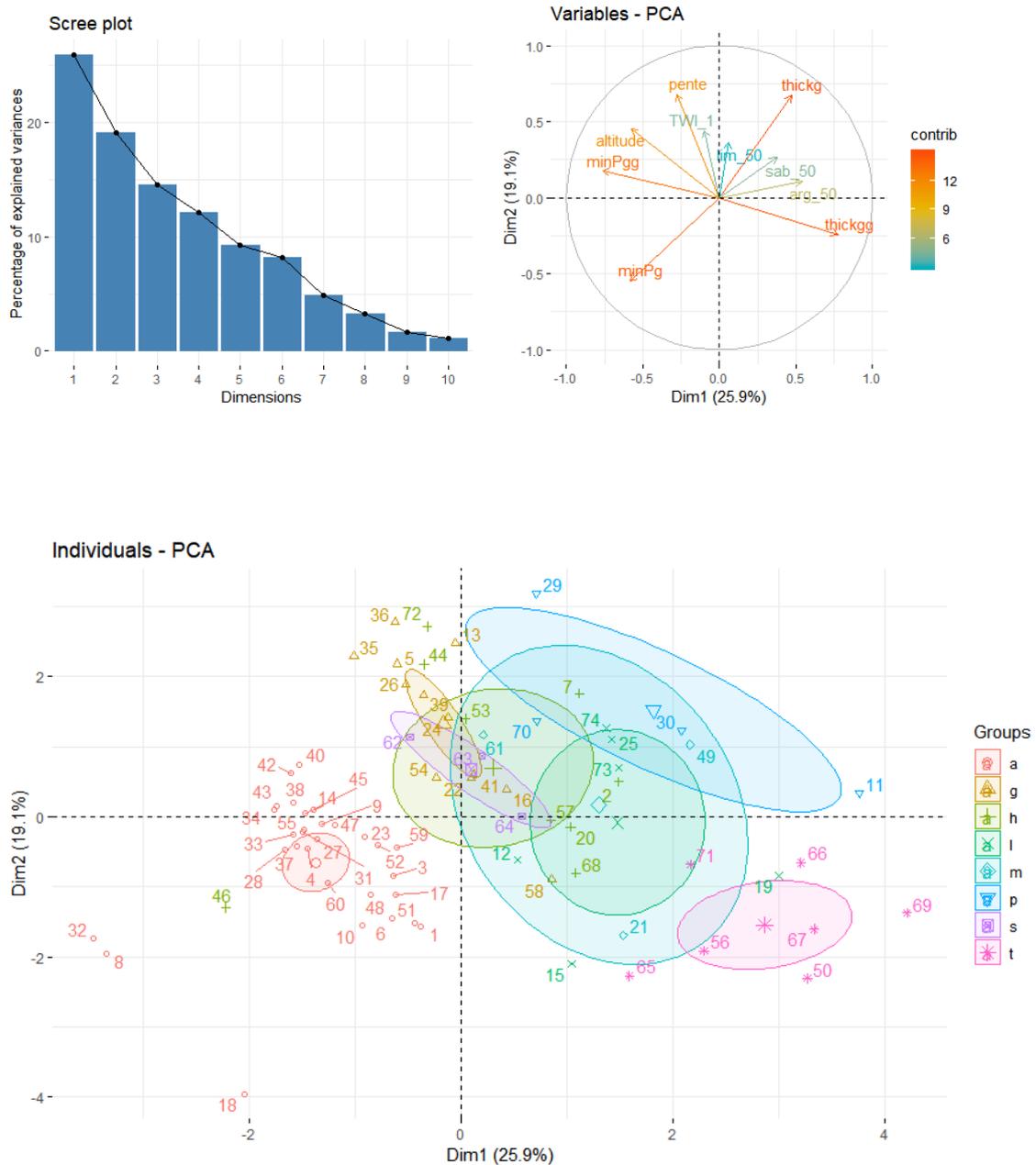
En comparant des sols sableux, argileux, limoneux on peut voir qu'ils sont plus ou moins poreux et retiennent plus ou moins d'eau. Cela a des répercussions sur la réserve en eau pour les plantes, leur enracinement, l'aération, etc... et donc sur l'utilisation de ces sols en agriculture.

Commentaire des chercheurs de l'unité Pessac

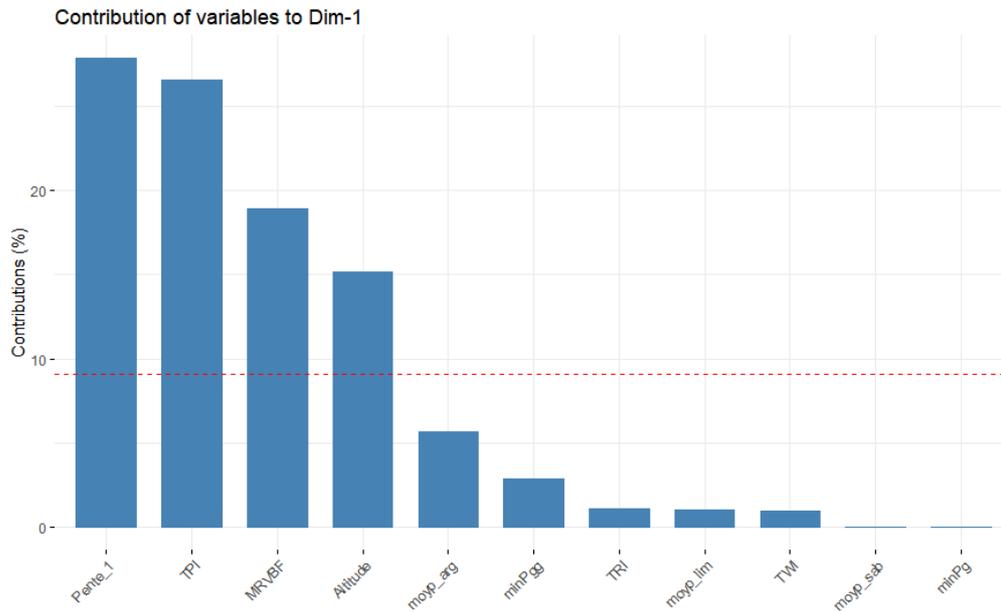
La rétention en eau dépend non seulement de la porosité totale, mais aussi de la distribution de la taille des pores. Plus la taille est petite, moins l'eau est disponible pour les plantes.

Annexe G. Résultats complémentaires ACP et AFDM

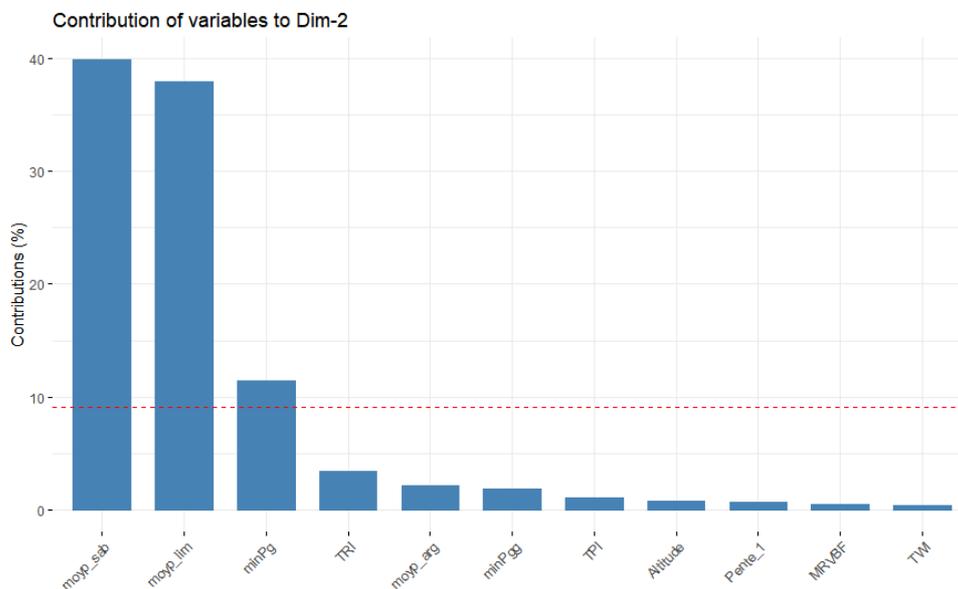
Le diagramme suivant ((a), *Figure X*) représente les valeurs propres par le pourcentage de variances expliquées par chaque axe principal. Le cercle de corrélation ((b), *Figure X*) représente la contribution de chaque variable. MinPgg qui représente la profondeur d'apparition du gg est corrélé positivement avec l'altitude. Le graphique b) représente la variable qualitative groupe de régime hydrique, utilisée pour colorer les sondages par groupes. Les ellipses représentent la concentration de sondage représentant le mieux les régimes hydriques définis plus haut.



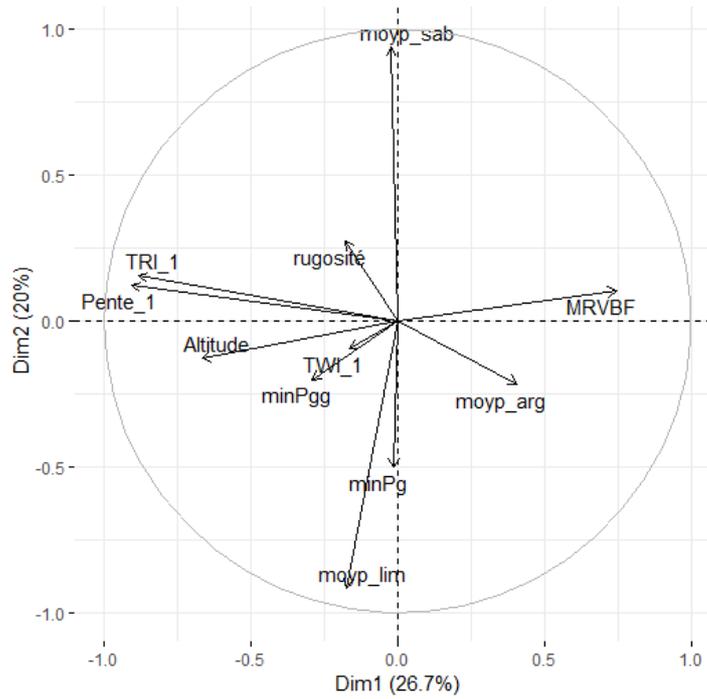
La classification ascendante hiérarchique (CAH) (fonction « agnes » dans Rstudio), montre une distinction entre trois groupes différents.



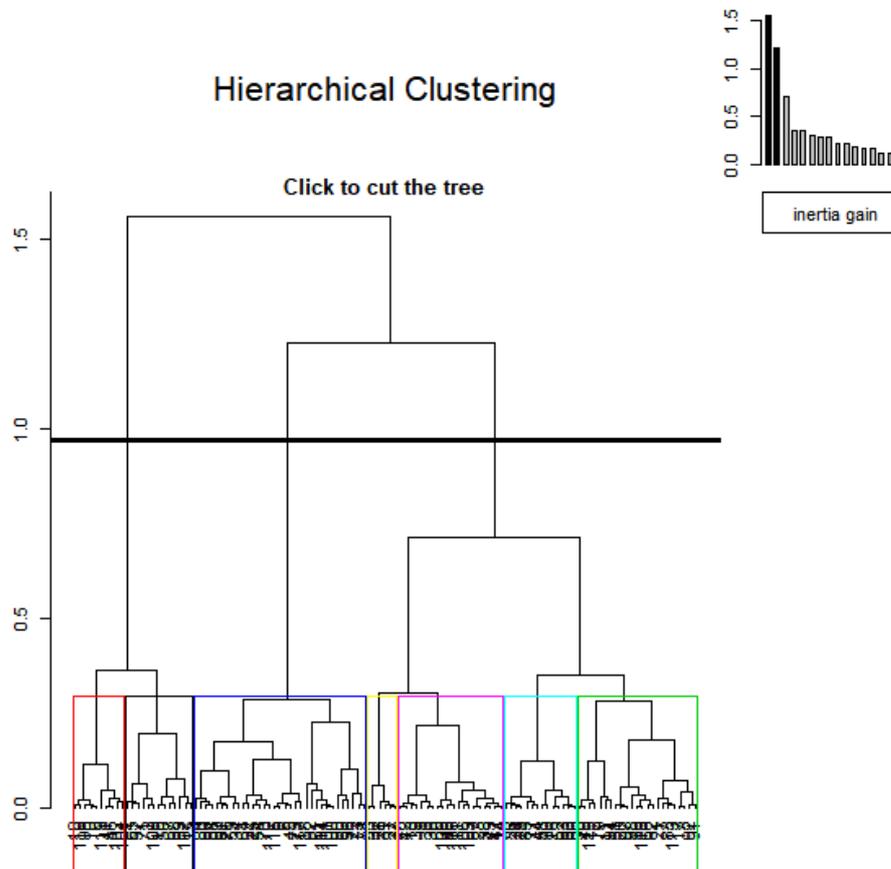
Contribution des variables à la dimension 1. pour l' ACP. La pente, le TPI, le MRVBF et l'altitude sont les variables expliquant le plus la répartition des données pour la dimension 1. La ligne de référence (en rouge) correspond à la valeur attendue si la contribution des variables étaient uniformes.



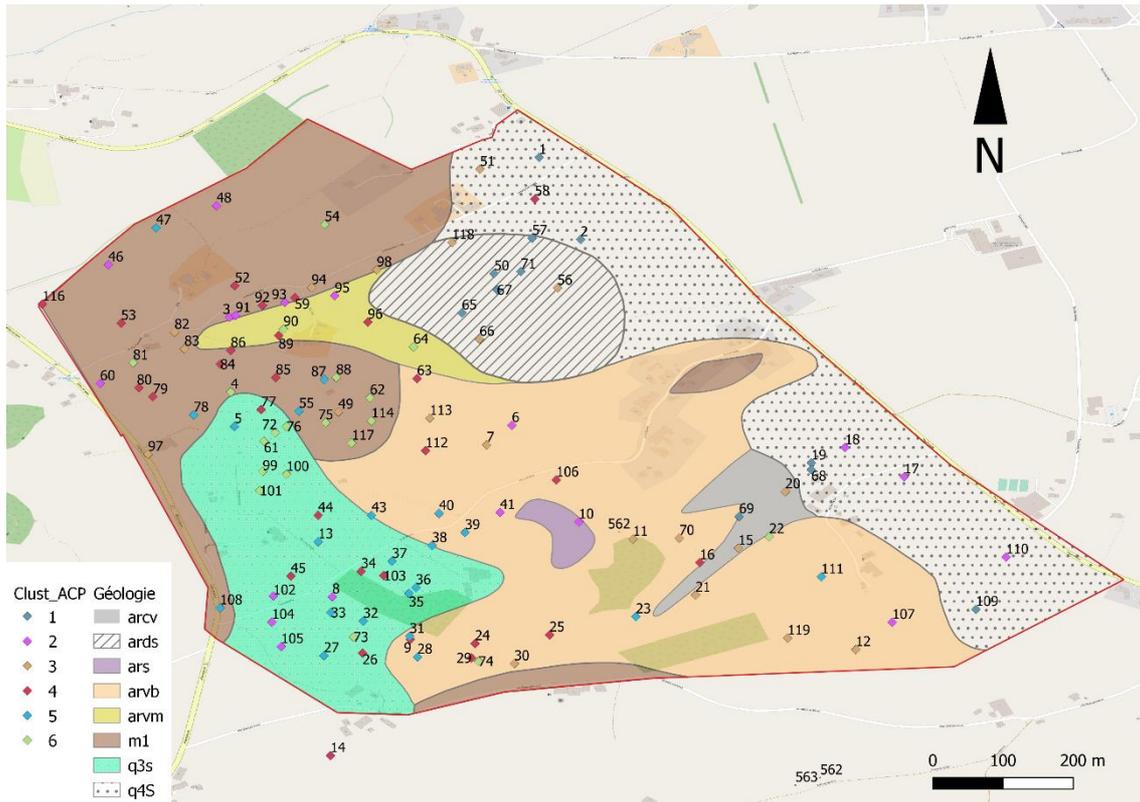
Le diagramme représente la contribution des variables à la distribution des données dans la 2ème dimension. La moyenne pondérée du sable et du limon explique le plus la répartition des données pour la dimension 2. La ligne de référence (en rouge) correspond à la valeur attendue si la contribution des variables étaient uniformes.



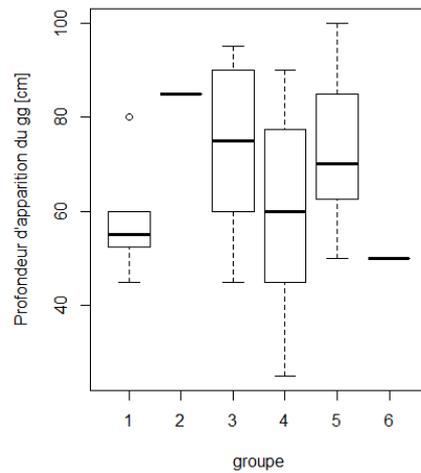
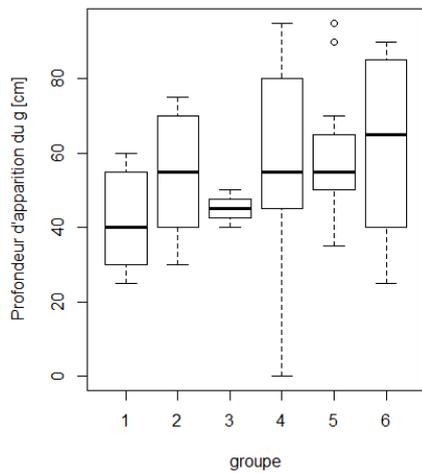
Le cercle de corrélation pour les variables quantitatives testé à l'aide du package « FactorMine ». 5 dimensions ont été conservés.



Résultat de la classification ascendante hiérarchique établie avec la fonction « agnes » selon la méthode Ward. Les numéros de sondage peu lisible sur ce graphe peuvent être lu dans la carte ci-dessous afin de voir la référence à chaque groupe. En haut à droite le graphique des inerties du dendrogramme.



Situation des sondages colorés selon le groupe auquel ils appartiennent, établis par la classification ascendante hiérarchique d'après les résultats de l'ACP. La couche de fond utilisée pour la carte est tirée du geocover, la légende se trouve en annexe (Annexe F). Représentation des classes selon les groupes établis par la classification ascendante hiérarchique



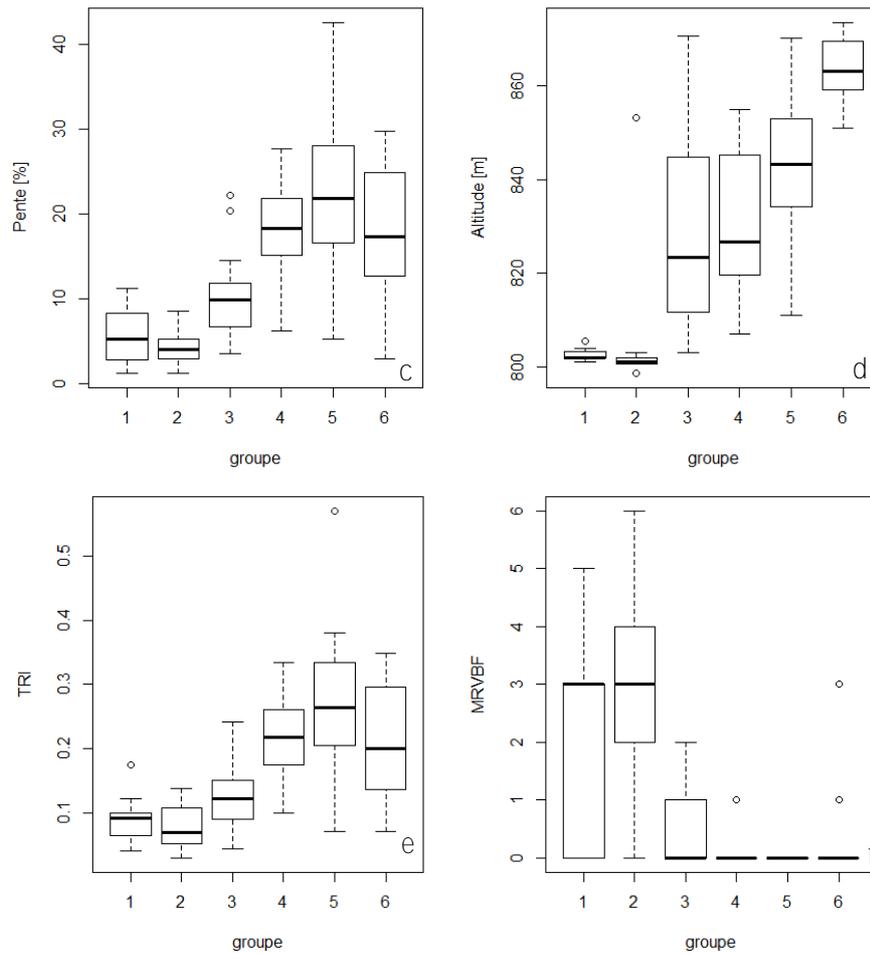


Figure 32 a, b, c, d, e et f : Boxplots représentant les six groupes formés lors de la CAH selon la profondeur d'apparition du g et gg (a et b) et les variables quantitatives environnementales expliquant le mieux la première dimension (pente, altitude, TRI et MRVBF) (respectivement c, d, e et f).