

Impacts hydrologiques et pédologiques d'une haie en ceinture limoneuse belge

Présenté par Sophie Charlier

Promoteur : Prof. Charles Bielders (UCL/ELI/ELIE)

Lecteurs : Prof. Bruno Delvaux (UCL/ELI/ELIE)
Prof. Anne-Laure Jacquemart (UCL/ ELI/ELIA)
Prof. Mathieu Javaux (UCL/ELI/ELIE)

Remerciements

Pour commencer, j'aimerais remercier mon promoteur, le Professeur Charles Bielders, qui m'a accompagnée tout au long de ce travail. Ses conseils, ainsi que ses corrections, ont été très enrichissants et m'ont permis d'acquérir de nombreuses compétences tout au long de ce travail. Je remercie aussi mes lecteurs : le Professeur Anne-Laure Jacquemart, le Professeur Mathieu Javaux et le Professeur Bruno Delvaux.

Je remercie également les personnes du GERU ayant participé à mon mémoire : Mr Frédéric Laurent pour son aide lors des analyses en laboratoire, Mr Axel Willems pour la construction du simulateur de ruissellement et de sédimentation ainsi que Mr Sébastien François pour son aide en laboratoire.

Pour ses conseils lors de la mesure de densité racinaire, je remercie le Professeur Xavier Draye. Je remercie également Mme Govaerts qui m'a apportée une aide précieuse lors de l'analyse statistique. Certaines personnes m'ont également aidée lors de ce travail et je les en remercie : Jolan Wolter, le service informatique de la faculté des bioingénieurs ainsi que le personnel du secrétariat.

Je remercie sincèrement Caroline Kempen pour sa relecture finale soigneuse de mon mémoire.

Je ne remerciai jamais assez toutes les personnes de mon entourage qui m'ont soutenue, motivée, encouragée quotidiennement durant cette épreuve. Je pense particulièrement à mon copain mais également à mes parents et à ma petite sœur. Enfin, je remercie également profondément mes amis et mes cokoteurs : Axelle, Anthony, Oksana et Mathilde et tous les autres.

Bonne lecture !

Mots clefs

Ceinture limoneuse belge, Haie arbustive, Erosion, Sol, Qualité physique, Qualité chimique

Table des matières

Remerciements	i
Mots clefs	i
Table des matières	iii
Table des figures.....	v
Table des tableaux.....	vii
Table des annexes	ix
Table des variables et abréviations	xi
Partie 1 : Introduction	1
Partie 2 : Revue bibliographique	3
1. Barrières végétales et haies	3
1.1. Définition	3
1.2. Fonction et typologie des haies.....	4
2. Les haies en Belgique	5
2.1. Histoire	5
2.2. Situation actuelle en Belgique.....	6
3. Fonctions et services écologiques des haies en bordure de champ	7
3.1. Biodiversité	7
3.2. Effet brise-vent	8
3.3. Création d'un microclimat	8
3.4. Qualité chimique du sol.....	9
3.5. Structure du sol	11
3.6. Fonctions hydriques	12
3.7. Erosion et sédimentation	18
3.8. Rendements agricoles	23
Partie 3 : Matériels et méthodes.....	25
1. Région d'étude	25
2. Site d'étude	25
3. Stratégie d'échantillonnage	28
4. Analyses chimiques et granulométriques du sol.....	31
5. Courbe de rétention	32
6. Réserve en eau utile	35

7.	Densité apparente, porosité et macroporosité.....	35
8.	Conductivité hydraulique à saturation.....	36
8.1.	Infiltromètre à charge constante	36
8.2.	Perméamètre à charge constante	39
9.	Densité racinaire.....	41
10.	Simulateur de ruissellement et de sédimentation	42
11.	Epaisseur de l'horizon humifère.....	44
12.	Analyse statistique	44
Partie 4 : Résultats.....		47
1.	Analyses chimiques et granulométriques	47
2.	Densité apparente, porosité et macroporosité.....	52
3.	Courbe de rétention	55
4.	Réserve en eau utile	60
5.	Conductivité hydraulique à saturation.....	61
5.1.	Infiltromètre à charge constante	61
5.2.	Perméamètre à charge constante	63
6.	Densité racinaire.....	65
7.	Simulateur de ruissellement et de sédimentation	68
8.	Epaisseur de l'horizon humifère et observations.....	68
9.	Corrélation entre les résultats.....	69
9.1.	Matrice de corrélation.....	69
9.2.	Analyse en composantes principales	72
Partie 5 : Discussion.....		75
1.	Impact de la haie	75
2.	Impact des transects	84
3.	Interaction poste-transect.....	86
4.	Champ.....	86
5.	Critiques des expériences.....	88
Partie 6 : Conclusion.....		89
Bibliographie.....		91
Annexes		99

Table des figures

FIGURE 1 : DENSITÉ DE LA MAE 1.A (HAIES ET BANDES BOISÉE) EN RÉGION WALLONIE EN 2005 (DAUTREBANDE ET SOHIER, 2006)	6
FIGURE 2: SCHÉMA DES PRINCIPALES FONCTIONS D'UNE HAIE PARALLÈLE AUX COURBES DE NIVEAUX SITUÉE EN AVAL D'UNE CULTURE ET D'UNE BANDE ENHERBÉE	7
FIGURE 3: IMPACT DE LA HAIE SUR LE RAYONNEMENT INCIDENT SUR LA PARCELLE (LIAGRE, 2006)	9
FIGURE 4: TYPE D'EAU DANS LE SOL EN FONCTION DE LA POROSITÉ, L'ACCESSIBILITÉ AUX ORGANISMES VIVANTS, LA RÉTENTION D'EAU ET LE TYPE D'HUMIDITÉ DANS LE SOL (RIDREMONT ET AL., 2012).....	13
FIGURE 5 : TENEUR EN EAU (%) À LA CAPACITÉ AU CHAMP ET AU POINT DE FLÉTRISSEMENT EN FONCTION DE LA TEXTURE DU SOL (RIDREMONT ET AL., 2012)	14
FIGURE 6: TENEUR EN EAU VOLUMIQUE (%) EN FONCTION DE LA PRESSION APPLIQUÉE (kPa) POUR UN SOL À 0-30 CM DE PROFONDEUR SOUS UNE HAIE (□) ET DANS LA PARCELLE (Δ) AINSI QU'À 30-150 CM DE PROFONDEUR SOUS LA HAIE (◇) ET DANS LA PARCELLE (◇) (KIEPE, 1995).....	14
FIGURE 7 : CAPACITÉ D'INFILTRATION (MM H ⁻¹) EN FONCTION DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) EN SAISON HUMIDE AVEC TIGES (■) ET SANS TIGES (□) ET EN SAISON SÈCHE AVEC TIGE (◆) ET SANS TIGES (◇) POUR UNE HAIE À PLAT AU KENYA (KIEPE, 1995)	17
FIGURE 8: LOCALISATION DE LA PRAIRIE D'ÉTUDE DANS LE VILLAGE DE VIEUX-SART (GOOGLE MAPS, CONSULTÉ EN AVRIL 2018)	25
FIGURE 9: VUE AÉRIENNE DE LA PRAIRIE D'ÉTUDE ET ZONIFICATION (GOOGLE EARTH, CONSULTÉ EN AVRIL 2018, ZONIFICATION PERSONNELLE)	26
FIGURE 10: PHOTOS DE LA HAIE D'ÉTUDE, PRISES DEPUIS L'AMONT : PARTIE NORD (GAUCHE) ET PARTIE SUD DE LA HAIE (DROITE)....	26
FIGURE 11 : TOPOGRAPHIE (M) DE LA ZONE EN AMONT DE LA HAIE (À PARTIR DE GEOPORTAIL DE LA WALLONIE, CONSULTÉ EN AVRIL 2018)	27
FIGURE 12: PARCELLE D'ÉTUDE AVEC LA CLASSIFICATION DES SOLS SELON LA CLASSEMENT CNSW (WALONMAP, CONSULTÉ EN AVRIL 2018)	28
FIGURE 13: PENTES (%) SUR LA ZONE EN AMONT DE LA HAIE AVEC LA SITUATION DES TRANSECTS (À PARTIR DE GEOPORTAIL DE LA WALLONIE, CONSULTÉ EN AVRIL 2018)	29
FIGURE 14: SCHÉMA LOCALISANT LES TRANSECTS ET LES POSTES ÉTUDIÉS (GOOGLE EARTH, CONSULTÉ EN JANVIER 2018 AVEC DESSINS PERSONNELS).....	30
FIGURE 15: SCHÉMA DE L'INFILTROMÈTRE	36
FIGURE 16: VOLUME CUMULÉ DE L'INFILTRATION EN FONCTION DU TEMPS (BIELDERS, NON PUBLIÉ)	37
FIGURE 17: SCHÉMA REPRÉSENTANT L'ÉCOULEMENT DE L'EAU DANS LE SOL À TRAVERS UN SIMPLE ANNEAU (BIELDERS, NON PUBLIÉ)	37
FIGURE 18: SCHÉMA DU PERMÉAMÈTRE À CHARGE CONSTANTE (BIELDERS ET JAVAUX, 2016-2017 AVEC MODIFICATIONS PERSONNELLES).....	40
FIGURE 19: SCHÉMA DU SIMULATEUR DE RUISSELLEMENT ET DE SÉDIMENTATION	43
FIGURE 20 : PHOTOS DU SIMULATEUR DE RUISSELLEMENT ET DE SÉDIMENTATION.....	43
FIGURE 21 : GRANULOMÉTRIE (%) EN FONCTION DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C ..	48
FIGURE 22 : TENEUR EN C _{ORG} (G KG ⁻¹) EN FONCTION DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C	49
FIGURE 23: TENEUR EN K (MG PAR 100G) EN FONCTION DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E,F : LES VALEURS SUIVIES DE LA MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5 %).....	50
FIGURE 24: TENEUR EN P (MG PAR 100 G) EN FONCTION DE DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E,F : LES VALEURS SUIVIES DE LA MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5 %)	51
FIGURE 25: TENEUR EN N _{TOT} (%) EN FONCTION DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E,F : LES VALEURS SUIVIES DE LA MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5 %)	52
FIGURE 26: DENSITÉ APPARENTE (G CM ⁻³) EN FONCTION DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E, F, G : LES VALEURS SUIVIES DE LA MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5 %).....	53
FIGURE 27: DENSITÉ APPARENTE (G CM ⁻³) EN FONCTION DU TRANSECT POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E,F : LES VALEURS SUIVIES DE LA MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5 %)	53
FIGURE 28: DENSITÉ APPARENTE (G CM ⁻³) POUR LES POSTES 3 ET 4 DES TRANSECTS A ET B	54

FIGURE 29: MACROPOROSITÉ (%) EN FONCTION DE LA DISTANCE PAR RAPPORT À LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E,F : LES VALEURS SUIVIES DE LA MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5 %).....	55
FIGURE 30 : MACROPOROSITÉ (%) POUR LES POSTES 3 ET 4 DES TRANSECTS A ET B	55
FIGURE 31: TENEUR EN EAU À LA SATURATION (% VOLUMIQUE) EN FONCTION DU TRANSECT ET DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E,F : LES BARRES SUIVIES D'UNE MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5% AU SEIN DU MÊME TRANSECT).....	57
FIGURE 32: TENEUR EN EAU AU POINT DE FLÉTRISSEMENT PERMANENT (% VOLUMIQUE) EN FONCTION DU TRANSECT ET DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E, F, G : LES BARRES SUIVIES D'UNE MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5% AU SEIN DU MÊME TRANSECT)	58
FIGURE 33 : COURBES DE RÉTENTION POUR LES POSTES 1 (DANS LA HAIE), 2 (2 M DE LA HAIE) ET 3 (15 M DE LA HAIE). CHAQUE COURBE EST LA MOYENNE DES TRANSECTS A-B-C.	58
FIGURE 34: COURBES DE RÉTENTION POUR LES TRANSECTS A-B-C. CHAQUE COURBE EST LA MOYENNE DES POSTES 1-2-3.	59
FIGURE 35: TENEUR EN EAU À LA SATURATION ET AU POINT DE FLÉTRISSEMENT PERMANENT (% VOLUMIQUE) POUR LES POSTES 3 ET 4 ET LES TRANSECTS A ET B (GAUCHE) ET TENEUR EN EAU À LA CAPACITÉ AU CHAMP (% VOLUMIQUE) POUR LES POSTES 3 ET 4 (DROITE) (E,F : LES VALEURS SUIVIES DE LA MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5 %) ..	59
FIGURE 36: LOGARITHME DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE À SATURATION (MM H^{-1}) EN FONCTION DU TRANSECT ET DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E, F, G : LES BARRES SUIVIES D'UNE MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5% AU SEIN DU MÊME TRANSECT).....	63
FIGURE 37: CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE À SATURATION (MM H^{-1}) DU PERMÉAMÈTRE EN FONCTION DU TRANSECT ET DE LA DISTANCE DE LA HAIE (M) POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E, F : LES BARRES SUIVIES D'UNE MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5% AU SEIN DU MÊME TRANSECT).....	64
FIGURE 38: CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE À SATURATION (MM H^{-1}) OBTENUE PAR LE PERMÉAMÈTRE POUR LES POSTES 3 ET 4 DES TRANSECTS A ET B	65
FIGURE 39: DENSITÉ RACINAIRE (KG M^{-3}) EN FONCTION DU TRANSECT (GAUCHE) ET RATIO DE DÉTACHEMENT DU SOL (-) AVEC LA DENSITÉ DE LONGUEUR RACINAIRE EN FONCTION DU POSTE (DROITE) POUR LES POSTES 1 ET 3 DES TRANSECTS A ET B	67
FIGURE 40: PROFONDEUR MOYENNE DE LA TRANSITION ENTRE L'HORIZON AP ET BT (CM) EN FONCTION DE LA DISTANCE PAR RAPPORT À LA HAIE (M)	69
FIGURE 41: MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES RÉSULTATS OBTENUS AUX POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (GRIS = TRÈS PEU CORRÉLÉ ; ROUGE = CORRÉLÉ NÉGATIVEMENT ; BLEU = CORRÉLÉ POSITIVEMENT).....	70
FIGURE 42 : ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE DES RÉSULTATS OBTENUS AUX POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (1)	73
FIGURE 43 : ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE DES RÉSULTATS OBTENUS AUX POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (2)	73
FIGURE 44 : FRACTION VOLUMIQUE DU SOL EN FONCTION DE LA TAILLE DES PORES ET DE LA DISTANCE PAR RAPPORT À LA HAIE POUR LES POSTES 1, 2 ET 3 ET LES TRANSECTS A, B ET C.....	80

Table des tableaux

TABLEAU 1 : RÉSULTATS DE LA TENEUR EN C_{ORG} ($G\text{ KG}^{-1}$) ET LA DENSITÉ APPARENTE ($G\text{ CM}^{-3}$) DU SOL EN FONCTION DE LA DISTANCE DE LA HAIE ET DE LA PROFONDEUR DANS LE SOL POUR 7 HAIES EN BORD DE CULTURE OU DE PRAIRIE EN FRANCE (WALTER ET AL., 2003)	10
TABLEAU 2 : DENSITÉ APPARENTE ($G\text{ CM}^{-3}$) ET DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE ($MM\text{ H}^{-1}$) À SATURATION EN FONCTION DE LA DISTANCE À LA HAIE (M) ET DE LA PROFONDEUR DANS LE SOL (M) POUR TROIS HAIES EN BAS DE PENTE POUR UN SOL SABLO-ARGILEUX AU KENYA (KIEPE, 1995)	12
TABLEAU 3 : SYNTHÈSE DES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE	30
TABLEAU 4 : SYNTHÈSE DES PRESSIONS ET DES ÉCHANTILLONS UTILISÉS POUR LA COURBE DE RÉTENTION	33
TABLEAU 5 : TENEUR MOYENNE DE CHAQUE CLASSE GRANULOMÉTRIQUE POUR LES POSTES 1-2- 3 DES TRANSECTS A-B-C (EN %)...	47
TABLEAU 6: ANALYSE ANOVA II POUR LA GRANULOMÉTRIE (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	47
TABLEAU 7: ANALYSE ANOVA II POUR LE PH_{EAU} ET LE PH_{KCL} (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	48
TABLEAU 8: ANALYSE ANOVA II POUR LE CARBONE ORGANIQUE (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	48
TABLEAU 9: ANALYSE ANOVA II POUR L'INDICE DE BATTANCE (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	49
TABLEAU 10: ANALYSE ANOVA II POUR LES ÉLÉMENTS DISPONIBLES (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	50
TABLEAU 11: ANALYSE ANOVA II POUR L'AZOTE TOTAL (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	51
TABLEAU 12: ANALYSE ANOVA II POUR LE RAPPORT C/N (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	52
TABLEAU 13: ANALYSE ANOVA II POUR LA DENSITÉ APPARENTE ET LA POROSITÉ	52
TABLEAU 14: ANALYSE ANOVA II POUR LA MACROPOROSITÉ	54
TABLEAU 15: ANALYSE ANOVA II POUR LA COURBE DE RÉTENTION	56
TABLEAU 16: ANALYSE ANOVA II POUR LES PARAMÈTRES DE VAN GENUCHTEN (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	60
TABLEAU 17: ANALYSE ANOVA II POUR LA RÉSERVE EN EAU UTILE (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	61
TABLEAU 18: ANALYSE ANOVA II POUR LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE À SATURATION OBTENU PAR L'INFILTRMÈTRE (UN '-' INDIQUE QUE L'ANALYSE N'EST PAS RÉALISABLE COMPTE TENU DU DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE)	62
TABLEAU 19: ANALYSE ANOVA II POUR LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE À SATURATION OBTENUE PAR LE PERMÉAMÈTRE	64
TABLEAU 20 : ANALYSE ANOVA II POUR LA DENSITÉ RACINAIRE POUR LES POSTES 1 ET 3 DES TRANSECTS A ET B	66
TABLEAU 21: RÉSUMÉ DES EFFETS SIGNIFICATIFS POUR LE FACTEUR POSTE POUR LES POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C (E, F, G : LES VALEURS SUIVIES DE LA MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5 %)	75
TABLEAU 22 : RÉSUMÉ DES RÉSULTATS SIGNIFICATIFS POUR LE FACTEUR TRANSECT POUR LES POSTES 1,2 ET 3 ET LES TRANSECTS A, B ET C (E, F, G : : LES VALEURS SUIVIES DE LA MÊME LETTRE NE SONT PAS SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES AU SEUIL DE 5 %) ..	84

Table des annexes

ANNEXE 1 : ZONES DES PRINCIPAUX BOCAGES ET HAIES EN WALLONIE EN 1992 (MINISTÈRE DE LA RÉGION WALLONNE, ANNÉE INCONNUE)	99
ANNEXE 2 : COÛTS, AVANTAGES FINANCIERS ET SUBSIDES POUR UNE HAIE	99
ANNEXE 3 : LOCALISATION DE LA PRAIRIE D'ÉTUDE (POINT ROUGE) SUR LA CARTE DES RIVIÈRE ET BASSINS HYDROGRAPHIQUES EN BELGIQUE	100
ANNEXE 4: EVOLUTION DE LA PRAIRIE ENTRE 1971 (GAUCHE) ET 2016 (DROITE) (WALONMAP,CONSULTÉ EN MAI 2018).....	100
ANNEXE 5: LISTE DES ESPÈCES VÉGÉTALES PAR STRATE PRÉSENTES DANS LA HAIE (GRAS : ESPÈCE DOMINANTES) (FRASELLE, 2018) ..	101
ANNEXE 6: TOPOGRAPHIE DE LA PARCELLE ÉTUDIÉE (1) (À PARTIR DE GEOPORTAIL DE LA WALLONIE, CONSULTÉ EN AVRIL 2018) ..	102
ANNEXE 7 : TOPOGRAPHIE DE LA PARCELLE ÉTUDIÉE (2) (À PARTIR DE GEOPORTAIL DE LA WALLONIE, CONSULTÉ EN AVRIL 2018) .	103
ANNEXE 8: ESPÈCES VÉGÉTALES ET LEUR QUANTITÉ SEMÉES EN AVRIL 2017 SUR LES BANDES ENHERBÉES	104
ANNEXE 9: PHOTO DES ÉCHANTILLONS DANS LE BAC DE SATURATION	104
ANNEXE 10: PHOTO DU BAC DE SATURATION	104
ANNEXE 11: PHOTOS DU BAC À SABLE (GAUCHE) ET DE LA CASSEROLE À PRESSION (DROITE)	104
ANNEXE 12: PHOTOS DE L'INFILTROMÈTRE	105
ANNEXE 13: POURCENTAGE DE TERRE DÉPOSÉE DANS LE CANAL EN FONCTION DU TEMPS DE RÉSIDENCE, DU DÉBIT ET DU TYPE D'OBJET TOUTES CONCENTRATIONS EN SÉDIMENTS ET PENTES CONFONDUES (DELOGE, 2017).	105
ANNEXE 14: OBSERVATIONS PERSONNELLES.....	106
ANNEXE 15: RÉSULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE	106
ANNEXE 16: RÉSULTATS DE L'ANALYSE CHIMIQUE (C_{ORG} , IB, N_{TOT} , C/N, PH_{EAU} ET PH_{KCL}).....	106
ANNEXE 17: RÉSULTATS DES ÉLÉMENTS DISPONIBLES (CA, MG, NA ET K)	107
ANNEXE 18: RÉSULTATS DE LA DENSITÉ APPARENTE ET DE LA POROSITÉ	107
ANNEXE 19 : RÉSULTATS DE LA MACROPOROSITÉ	108
ANNEXE 20 : MOYENNE DES EFFONDEMENTS PAR POSTE EN FONCTION DE LA DISTANCE À LA HAIE ET DES TRANSECTS	109
ANNEXE 21: RÉSULTATS DE LA COURBE DE RÉTENTION	110
ANNEXE 22: RÉSULTATS MOYENNÉS DE LA COURBE DE RÉTENTION.....	110
ANNEXE 23: COURBES DE RÉTENTION EN FONCTION DES TRANSECTS (GAUCHE) ET DES POSTES (DROITE)	111
ANNEXE 24: RÉSULTATS DES PARAMÈTRES DE VAN GENUCHTEN	112
ANNEXE 25 : EXEMPLE DE LA COMPARAISON ENTRE LA COURBE DE RÉTENTION ET L'ÉQUATION DE VAN GENUCHTEN OPTIMISÉE POUR LE POSTE B1 ET B2	112
ANNEXE 26: RÉSULTATS DE LA RÉSERVE EN EAU UTILE	112
ANNEXE 27: RÉSULTATS DE L'INFILTROMÈTRE	113
ANNEXE 28: RÉSULTATS DU PERMÉAMÈTRE	114
ANNEXE 29 : RÉSULTATS DE LA DENSITÉ RACINAIRE	114
ANNEXE 30 : SCANS DES RACINES DE LA HAIE (POSTE A1) (GAUCHE) ET DE LA BANDE ENHERBÉE (POSTE A3) (DROITE)	115
ANNEXE 31: SCAN DES RACINES APRÈS TRAITEMENT DE L'IMAGE (POSTE A1).....	115
ANNEXE 32 : PHOTO ILLUSTRANT L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DE LA VÉGÉTATION DANS LA PRAIRIE PERMANENTE	115
ANNEXE 33 : RÉSULTATS DU SIMULATEUR DE RUISSELLEMENT ET DE SÉDIMENTATION AU POSTE A1	116
ANNEXE 34 : RÉSULTATS DE L'ÉPAISSEUR DE L'HORIZON ORGANO-MINÉRAL EN FONCTION DE LA DISTANCE À LA HAIE (PROFIL À LA TARIÈRE).....	116
ANNEXE 35: PHOTOS ILLUSTRANT LA TRANSITION DE COULEUR ENTRE LES HORIZONS (GAUCHE) ET UN PROFIL À LA TARIÈRE (DROITE)	116
ANNEXE 36 : CORRÉLATION ENTRE LES RÉSULTATS OBTENUS AUX POSTES 1-2-3 DES TRANSECTS A-B-C.....	117

Table des variables et abréviations

α	: coefficient de forme de l'équation de Van Genuchten (cm^{-1})
α_g	: paramètre de l'équation de Gardner (m^{-1})
θ_{cc}	: teneur en eau volumique à la capacité au champ (% volumique)
$\theta(h)$	: teneur en eau volumique en fonction de h (% volumique)
θ_{pfp}	: teneur en eau volumique au point de flétrissement permanent (% volumique)
θ_r	: teneur en eau volumique résiduelle (% volumique)
θ_{sat}	: teneur en eau volumique à la saturation (% volumique)
θ_v	: teneur en eau volumique (% volumique)
ρ_a	: densité apparente (g cm^{-3})
ρ_r	: densité réelle (g cm^{-3})
ρ_{eau}	: densité de l'eau (g cm^{-3})
$\emptyset m$	: potentiel de flux matriciel
A	: surface du kopecky (mm^2)
a_i	: rayon de l'anneau de l'infiltromètre enfoncé dans le sol (m)
b_v	: paramètre de la régression de Vannoppen (-)
Ca	: calcium
C_{org}	: carbone organique
CPAR	: Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité
d_i	: hauteur de l'enfoncement de l'anneau de l'infiltromètre (m)
d_v	: paramètre de la régression de Vannoppen (-)
g	: l'efficacité de sédimentation (%)
G	: paramètre de forme de l'équation de Gardner (-)
h	: charge matriciel (cm ou m)
H	: charge hydrostatique constante (cm ou m)
ha	: hectare
H_p	: gradient de charge totale (mm)
h_z	: hauteur de la zone calme (m)
HT	: hors taxe
K	: potassium
K_s	: conductivité hydraulique à saturation (mm h^{-1} ou m s^{-1})
L_s	: largeur du simulateur de ruissellement (m)
L_z	: longueur de la zone calme (m)
i	: pente (%)
IB	: indice de battance (-)
n	: coefficient de forme de l'équation de Van Genuchten ($n > 1$) (-)
n_m	: coefficient de Manning ($\text{s m}^{-1/3}$)
N_{tot}	: azote total

m_{sat} : masse de l'échantillon à saturation (g)
 m_{cc} : masse de l'échantillon à la capacité au champ (g)
 MAE : mesure agro-environnementale
 Mg : magnésium
 m : coefficient de forme de l'équation de Van Genuchten (-)
 m_h : masse humide (g)
 m_s : masse sèche (g)
 m_{rs} : masse des racines scannées après séchage (g)
 m_{rf} : masse des racines fibreuses séparées après séchage (g)
 MO : matière organique
 P : phosphore
 pF : succion (-)
 pH_{eau} : pH déterminé avec l'eau (-)
 pH_{KCl} : pH déterminé avec le KCl (-)
 Q : débit (m^3/s)
 RD : densité racinaire ($kg\ m^{-3}$)
 R_h : rayon hydraulique (m)
 RL_{rf} : longueur racinaire des racines fibreuses séparées (m)
 RL_{rs} : longueur racinaire des racines scannées (m)
 RLD : densité de longueur racinaire ($km\ m^{-3}$)
 SDR : ration de détachement du sol (-)
 t_R : temps de résidence (s)
 v : vitesse moyenne de l'eau ($m\ s^{-1}$ ou $l\ m^{-2}\ s^{-1}$)
 $V_{échantillon}$: volume de l'échantillon (cm^3)
 z : hauteur du kopecky (mm)

Partie 1 : Introduction

A l'origine, les haies arbustives faisaient partie intégrante de nos paysages et étaient principalement utilisées pour délimiter les parcelles. Suite à l'intensification agricole, les haies ont progressivement disparu de nos campagnes, remplacées par des barrières et des clôtures. Malheureusement, tous les avantages que procuraient les haies ont disparu avec elles (*Liagre, 2006 ; Ecowal, consulté en avril 2018*). Si nous nous intéressons aux haies aujourd'hui, c'est parce que leurs services écologiques correspondent à différents enjeux actuels de notre société.

Le premier avantage des haies concerne la biodiversité. Ces dernières créent un maillage écologique dans le paysage. Ceci est essentiel dans nos régions touchées par la fragmentation des habitats et l'urbanisation. Elles favorisent donc le développement de la faune et de la flore (*Billeter, 2007*). Elles attirent entre autres les pollinisateurs, les insectes et les oiseaux en leur procurant un habitat et de la nourriture (*Liagre, 2006 ; Percsy, 2008*).

Les impacts hydrologiques des haies constituent le deuxième avantage principal et celui qui nous intéresse tout particulièrement dans ce travail. Le ruissellement intensif est fréquent sur les parcelles limoneuses intensément cultivées (*Richet et al, 2017*). C'est la raison pour laquelle ce phénomène est particulièrement présent sur la ceinture limoneuse belge soumise à un climat tempéré océanique (*Verstraeten et Poesen, 2000*). Lorsque ces eaux de ruissellement viennent des cultures, elles se chargent en sédiments et peuvent engendrer des coulées boueuses. Ces phénomènes ont des conséquences parfois désastreuses du point de vue financier mais également social et environnemental comme la diminution de la fertilité des sols ou bien l'augmentation de la pollution des eaux (*Ouvry et al., 2012*). Les coûts annuels ont été estimés à 16-172 millions d'euros rien que pour la ceinture limoneuse belge (*Evrard, 2008*). L'urbanisation du centre de la Belgique augmente également l'imperméabilisation des sols et pousse les gens à construire des bâtiments dans des zones à risque d'inondations. De plus, avec le réchauffement climatique, beaucoup de modèles prévoient des événements pluvieux de plus en plus intenses pour notre région, ce qui ne fera qu'aggraver la situation.

Evidemment, des mesures sont mises en place pour limiter les inondations et les coulées boueuses. Il existe des différentes méthodes comme les bassins d'orage, les égouts ou bien l'installation de barrières végétales en bordure de champ. Il existe plusieurs types de barrières végétales dont les bandes enherbées et les fascines (*Evrard et al, 2008*) mais les barrières végétales qui nous intéressent dans ce travail sont les haies arbustives.

A ce jour, il existe un grand nombre d'articles concernant les haies arbustives, que ce soit dans la littérature scientifique ou bien dans la littérature destinée aux agriculteurs. Pour les agriculteurs, cette littérature se présente sous forme de guides pratiques pour comprendre les fonctions des haies, les planter et les entretenir. En ce qui concerne la littérature

scientifique, *Holland et al. (2017)* ont recensé plus de 150 articles concernant les haies en bordure de champ sur environ les 30 dernières années rien qu'en Europe. Beaucoup de ces articles s'intéressent aux barrières végétales dans le but de favoriser la pollinisation ou bien de lutter contre les ravageurs. Cependant, il y a nettement moins d'études ayant un rapport avec les propriétés hydrologiques et pédologiques de ces barrières végétales (*Holland et al. 2017*). Certains travaux concernent l'impact des haies sur les flux d'eau, souvent à l'échelle du bocage ou du bassin versant (ex. Caubel, 2001 ; Mérot et al., 1999) mais il existe moins d'articles étudiant cet impact à l'échelle de la haie. Parmi ces articles scientifiques, on peut citer *Kiepe (1995)* qui s'intéresse aux haies pour combattre le ruissellement et l'érosion au Kenya ainsi que *Richet et al. (2017)* qui se concentrent sur les haies et les fascines en France mais aussi *Chaowen et al. (2009)* qui étudient les haies antiérosives en Chine, ou encore *Viaud et al. (2009)* qui se penchent sur l'impact des haies sur les ressources en eau et en sol en France. Il manque donc des informations concernant les impacts des haies sur les paramètres hydriques et pédologiques à l'échelle de la parcelle, pour notre région limoneuse et notre climat continental océanique.

Ce mémoire s'intéresse plus précisément à une haie située dans le Brabant Wallon en Belgique. Elle se trouve au bord d'une parcelle agricole et en bas de pente, parallèle aux courbes de niveau. Le but de ce mémoire est de quantifier l'impact de la haie sur le sol et l'hydrologie à l'échelle de la parcelle. Mettre en commun différents propriétés permet d'avoir une vue d'ensemble de la haie. Nous pouvons alors identifier trois objectifs principaux qui ont pour but de comprendre comment les haies :

- Impactent les propriétés hydriques et chimiques du sol.
- Améliorent l'infiltration d'eau dans le sol.
- Protègent le sol contre l'érosion et favorisent la sédimentation des particules érodées.

Mieux comprendre les haies et leurs impacts sur la parcelle est essentiel si nous voulons augmenter leur implantation pour lutter contre le ruissellement et l'érosion. Ceci permettra de justifier leur financement et de les promouvoir auprès des agriculteurs.

Ce travail est réalisé dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude de Master Bioingénieur, option ressources en eau et en sol, à la Faculté des bioingénieurs de l'Université catholique de Louvain. Il est structuré en six grandes parties. Après l'introduction, la revue bibliographique présente l'état de la littérature scientifique sur le sujet puis la partie 3 présente les matériels et méthodes utilisés pour les expériences. Ensuite, la partie 4 développe chaque résultat séparément et la partie 5 est une discussion générale de l'ensemble des résultats. Pour finir, la partie 6 conclut ce travail.

Partie 2 : Revue bibliographique

1. Barrières végétales et haies

1.1. Définition

Il existe plusieurs types de barrières végétales qui peuvent être implantées pour diminuer le ruissellement excessif et l'érosion dans nos régions. Les plus connues sont les haies, les bandes enherbées et les fascines.

Les bandes enherbées sont des bandes étroites d'un couvert composé de graminées et de légumineuses et exploitées de manière peu intensive (sans intrants) (*Natagriwal, consulté en décembre 2017*). Les bandes enherbées ont pour avantages d'être faciles d'entretien, de fournir du fourrage et de favoriser le développement de la biodiversité. Elles sont efficaces pour diminuer le ruissellement et l'érosion, principalement dans le cas d'écoulement diffus (définition §3.7.). Les bandes enherbées sont un frein aux ruissellements, diminuent leur vitesse et donc leur capacité de transport de sédiments. Elles favorisent la sédimentation et l'infiltration (*Duchemin et Majboud, 2004*). En revanche, leurs propriétés physiques, et donc leur efficacité, varient en fonction du stade de développement de la végétation (*Daili et al., 2017*).

Les fascines sont des fagots de branches, matériel végétal le plus souvent mort, retenus par deux lignes de piquets. Au niveau hydrique, les structures linéaires comme les fascines favorisent la sédimentation et dans une moindre mesure l'infiltration de l'eau dans le sol. Les fascines utilisent moins d'espace que les bandes enherbées. Leur efficacité est prouvée (*Richet et al., 2017*). Cependant, les agriculteurs considèrent que les fascines demandent plus d'entretien et s'intègrent moins bien au paysage que les autres structures végétales (*Heitz et al., 2012*). En effet, les fascines demandent à être renouvelées de façon régulière et n'apportent pas autant d'avantages variés que les haies, comme par exemple concernant la biodiversité (*Richet et al., 2017*).

Une haie arbustive est un alignement d'arbres et d'arbustes créé par l'homme qui marque le plus souvent la limitation entre deux parcelles. Par extension, le bocage est "un réseau de haies entourant les parcelles agricoles" (*Caubel, 2001*). Elles peuvent participer à la conservation de la biodiversité et diminuer l'érosion ainsi que le ruissellement sur le long terme. La littérature fait souvent référence aux haies ripisylves, situées en fond de bassin sur le bord des cours d'eau. Ces dernières ont un rôle important pour la filtration de l'eau et le maintien des berges (*Liage, 2006*). Il est toutefois à noter qu'il faut attendre une longue période pour que la végétation se développe et remplisse ses fonctions, 10 ans selon *Ouvry et al. (2012)*. Elles doivent également être entretenues régulièrement (*Richet et al., 2017*). Il existe également les haies herbacées constituées d'espèces végétales rigides. Ces haies sont

moins larges que les haies arbustives. Elles sont largement utilisées et étudiées en milieu tropical. Elles ont une fonction similaire aux haies en ce qui concerne la réduction du ruissellement et l'augmentation de la sédimentation (*Ouvry et al., 2012*).

Les bandes enherbées sont fortement répandues dans nos régions à l'inverse des haies arbustives et des fascines qui sont beaucoup moins présentes. Cependant, il y a un clair intérêt de combiner les barrières végétales (haies, fascines et bandes enherbées). Il est surtout important, à l'échelle du bassin versant, de coordonner les installations afin d'augmenter leur efficacité, que ce soit pour combattre l'érosion mais également pour limiter le ruissellement et les pics de crue (*Richet et al., 2017*).

1.2. Fonction et typologie des haies

Le mot haie est un terme très large qui englobe tous les alignements d'arbres¹. En réalité, les haies peuvent se différencier par leur fonction, leur typologie ou bien encore leur localisation. Plusieurs sources (ex. *Wolton et al., 2014*) font le lien entre la fonction recherchée pour la haie, la typologie de sol et les essences végétales conseillées.

Tout d'abord, les haies se différencient par leurs fonctions, c'est-à-dire le but recherché lorsqu'on l'implante : haies hydrauliques, haies brise-vent, haies clôtures, haies paysagères, etc (*Ouvry et al., 2012*). Toutes ces haies n'ont donc pas les mêmes caractéristiques (*Liagre, 2006*). Les haies antiérosives ou hydrauliques sont installées pour réduire le ruissellement d'eau de surface et l'érosion. Elles sont généralement utilisées pour limiter les écoulements concentrés (définition §3.7.). Elles doivent être placées selon les courbes de niveau et en bas de pente pour être efficaces (*Richet et al., 2017*). Les haies peuvent être placées sur un talus ou bien être à plat, c'est-à-dire directement au niveau du sol.

Les haies se différencient également par leur typologie. La Région Wallonne distingue deux grands types de haies arbustives en fonction de leur végétation (*Biodiversité.Wallonie, consulté en janvier 2018*) : la haie indigène, composée d'essences issues de nos régions (hêtre, aubépine, charme, cornouiller, etc.) et la haie exotique, composée d'essences étrangères à nos régions (laurier cerise, thuya, cyprès, etc.). Pour des raisons environnementales, la Région Wallonne conseille de privilégier les essences locales (*Natagriwal, consulté en avril 2018*). La végétation va déterminer la hauteur de la haie mais également la biodiversité qu'elle va abriter, l'imperméabilité au vent, les besoins en eau, sa saisonnalité, la densité racinaire, la profondeur des racines, etc (*Liagre, 2006*). La présence et la nature des plantes herbacées aux pieds de la haie est également une donnée importante à prendre en compte (*Chaowen et al., 2009*). Dans le cas des haies à plat, la strate herbacée joue un rôle crucial car la densité de tiges partant du sol est un facteur primordial pour l'efficacité hydraulique de la haie. Il faut veiller à ce que la haie soit suffisamment haute et longue afin d'éviter son contournement par

¹ Description des types de haie dans *Ouvry et al. (2012)* (pages 10 et 11).

les flux de ruissellement (*Ouvry et al., 2012*). La région pédoclimatique influence également certains paramètres de la haie comme les paramètres hydriques, sujet de ce travail.

2. Les haies en Belgique

2.1. Histoire

Les haies sont apparues plus largement en Europe occidentale lors du grand défrichement au Moyen-Age (*Caubel, 2001*) ayant pour but d'agrandir les surfaces agricoles. Ces haies avaient alors comme principal usage de délimiter les propriétés et les chemins mais aussi de limiter le déplacement des animaux (*Caubel, 2001*). A cette époque, il n'est pas rare que des haies soient également utilisées comme moyen de défense et pour protéger les villes. Au fil des siècles, l'utilisation des haies comme clôture naturelle se répand, augmentant ainsi leur présence dans nos paysages. Chez nous, les haies atteignent leur apogée au 19^{ème} et début du 20^{ème} siècle (*Liagre, 2006*).

Après la seconde guerre mondiale, l'intensification de l'agriculture engendre la simplification de notre paysage. Ceci entraîne la disparition des haies mais aussi des prairies, des vergers et des zones humides (*Viaud et al., 2009*). En effet, on attribue alors aux haies plus d'inconvénients que d'avantages : elles perdent donc leur utilité. On estime qu'en France, pays qui a suivi la même évolution que la Belgique dans le domaine, les haies sont passées de 2 millions à un demi-million de kilomètres sur les 100 dernières années. Les raisons principales de leur diminution sont les suivantes (*Liagre, 2006*) :

- La haie est considérée comme un obstacle à l'extension des parcelles agricoles. Avec l'augmentation du prix de la main d'œuvre et l'apparition de la mécanisation, les haies ont perdu leur intérêt économique (fourrage, fruits, le bois, etc).
- L'arrivée des clôtures électriques engendre le remplacement des haies car elles sont plus faciles à gérer.
- L'amélioration des équipements pour la production de bois rend les exploitations forestières plus efficaces et diminue le besoin de bois venant des haies.
- L'arrivée du pétrole pour se chauffer rend la production du bois de chauffage moins intéressante.
- Les premières primes de la PAC ne favorisaient pas la conservation des arbres.

Il aura fallu que les haies aient presque totalement disparu chez nous pour que nous nous s'interrogeons sur les fonctions et bénéfices qu'elles pourraient apporter. En effet, depuis plusieurs années maintenant, les études s'intéressent aux fonctions des haies. Que ce soit des fonctions environnementales mais aussi financières et sociales, les haies s'inscrivent de plus en plus comme une évidence pour rendre notre agriculture plus durable.

2.2. Situation actuelle en Belgique

Le ministère de la Région Wallonne présente une carte situant les grandes zones de haies et de bocages en Belgique (Annexe 1). Nous pouvons voir que les haies et bocages sont plus présentes dans le Condroz, le pays de Herve, la Famenne et les Fagnes et l'ouest du Hainaut. Le nord de la Wallonie, région où se situe la haie étudiée, est très pauvre en haies et en bocages. Plus récemment, la Région Wallonne a publié une carte représentant la densité des mesures agro-environnementales concernant les haies et les bandes boisées en Région Wallonne (MAE 1.a) (Fig. 1). Cette carte présente seulement les haies concernées par une demande de subsides mais elle nous permet tout de même de nous faire une idée de la répartition des haies en Wallonie. Les zones de bocages et de haies correspondent quasiment aux zones dans lesquelles il y a le plus de demande de subsides pour les haies. Nous constatons que ces demandes sont très peu nombreuses dans la région étudiée, au nord de la Wallonie. La densité de haies et de bocages peut être mis en lien avec l'occupation des sols : le nord de la Wallonie est une région de grandes cultures alors qu'on retrouve plus de prairies, d'élevages et de vergers dans la partie sud de la région (*Wallonmap, consulté en avril 2018*).

En Région Wallonne, grâce au programme agro-environnemental (MAE), il existe des subsides qui soutiennent financièrement les agriculteurs afin de couvrir une partie des frais liés à l'implantation et à l'entretien d'alignements d'arbres. Les coûts, avantages financiers et subsides liés aux haies sont décrits en profondeur en annexe 2.

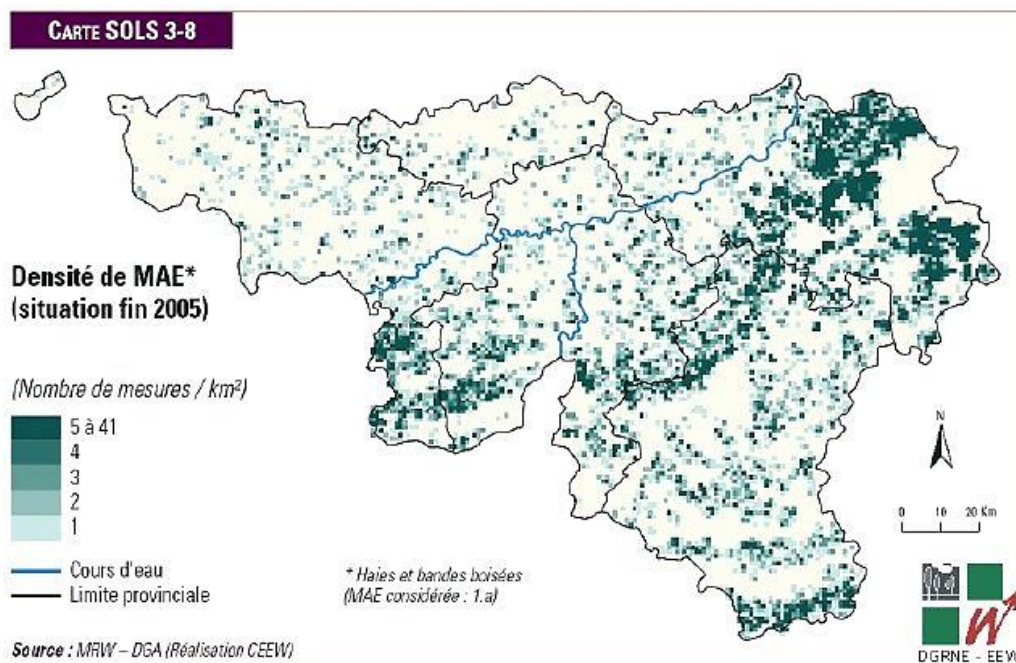


Figure 1 : Densité de la MAE 1.a (Haies et bandes boisée) en Région Wallonie en 2005 (Dautrebande et Sohier, 2006)

3. Fonctions et services écologiques des haies en bordure de champ

Il est important de passer en revue les multiples fonctions des haies (Fig. 2) car cela permet d'avoir une vue globale de l'impact des haies en bordure de champ et de comprendre les interactions entre les fonctions. Celles en lien avec la pédologie et l'hydrologie sont plus approfondies car elles correspondent aux propriétés étudiées dans ce mémoire.

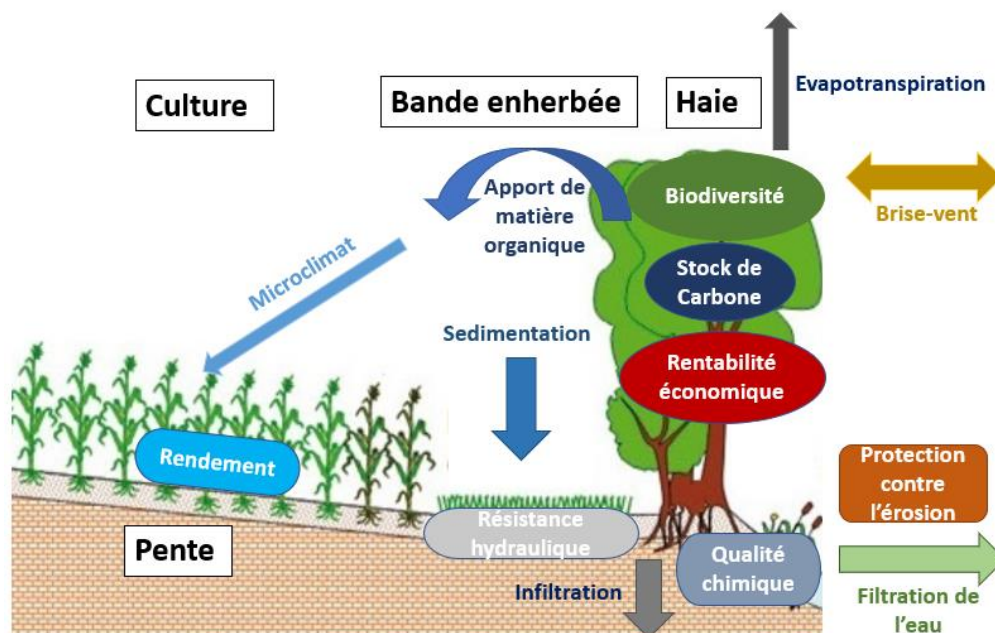


Figure 2: Schéma des principales fonctions d'une haie parallèle aux courbes de niveau située en aval d'une culture et d'une bande enherbée

3.1. Biodiversité

En Belgique, *Van Den Berge et al. (2018)* indiquent que les structures linéaires telles que les haies accueillent environ 45 % de la diversité végétale de la région étudiée. Concernant la faune, il a été prouvé qu'on retrouve plus de 40 fois plus de lombrics dans les haies et les bandes enherbées que dans les grandes cultures céréalières (*Solagro, 2000 dans Liagre, 2006*). Les haies constituent souvent l'ultime refuge pour certains animaux sauvages dans les régions agricoles où l'homme a enlevé tous les milieux naturels primitifs (*Van Den Berge et al., 2018 ; Percsy, 2008*). En effet, les haies procurent à certaines espèces un abri, de la nourriture et un site de reproduction et peuvent aussi avoir une fonction de corridor, c'est-à-dire de connexion entre les habitats. En République Tchèque, *Saleka et al. (2018)* ont montré que l'hétérogénéité du paysage, et principalement les éléments non cultureux tels que les bandes enherbées et les haies, augmentent la biodiversité et plus précisément la présence d'oiseaux, d'araignées et de papillons. On retrouve également des pollinisateurs dans les haies (*Wolton et al., 2014*). *Holland et al. (2017)* indiquent que sur les 30 dernières années environ, 28 publications concernent les barrières végétales et les pollinisateurs en Europe. Parmi elles, 78 % des études montrent que les barrières végétales telles que les haies ont un impact positif sur la quantité de pollinisateurs.

Finalement, la faune et la flore de la haie ont une interaction importante avec le sol. *Ouvry et al. (2012)* décrivent l'influence importante des racines sur les propriétés hydriques des haies. La faune et la flore impactent aussi la structure du sol par les galeries et les terriers des animaux et par les systèmes racinaires des plantes. Ceux-ci décompactent le sol, l'aèrent et influencent les écoulements de l'eau. En outre, certains de ces organismes utilisent la matière organique (MO) pour se nourrir. Ils fragmentent, humifient et minéralisent la litière, libérant ainsi de la matière minérale assimilable par les plantes. Certains êtres vivants tels que les vers de terre brassent la MO ce qui rend sa distribution plus homogène dans les premières couches du sol (*Liagre, 2006 ; White, 2006*).

3.2. Effet brise-vent

Les haies ont un effet brise-vent qui protège les cultures. *Forman et Baudry (1984)* ont observé une influence de la haie sur le vent sur une longueur équivalente à 28 fois la hauteur de la haie. *Wolton et al. (2014)* estiment que la haie impacte le vent sur 4 fois la hauteur de la haie du côté du vent et 12 fois la hauteur de la haie du côté opposé au vent. Si elles sont trop imperméables, les haies provoquent l'effet inverse du brise-vent en créant un tourbillon de vent après cette dernière. En revanche, une haie qui filtre efficacement le vent peut diminuer sa vitesse de 50 à 75 % sur 5 à 7 fois sa hauteur et de 30 à 50 % jusque 15 fois sa hauteur (*Liagre, 2006 d'après Read 1964 et Guyot 1997*). Le *Ministère de la Région Wallonne (année inconnue)* décrit qu'une haie réduit le vent sur 10 à 15 fois sa hauteur mais l'influence d'une haie sur le vent dépend de la hauteur de la haie, de sa perméabilité et de son orientation face aux vents dominants et du relief. L'impact de la haie sur le vent varie également avec d'autres paramètres tels que la vitesse du vent ou bien la hauteur à laquelle la mesure est prise (*Guyot, consulté en avril 2018*).

3.3. Création d'un microclimat

La haie modifie le bilan radiatif de la parcelle. Durant le jour, le rayonnement solaire, c'est-à-dire les rayons de courte longueur d'onde, va être influencé par l'orientation de la haie par rapport au soleil (Fig. 3). Le côté de la haie exposé au soleil recevra plus de rayons que le côté ombragé de la haie (*Guyot, consulté en avril 2018 ; Liagre, 2006*). La parcelle reçoit également un rayonnement de grande longueur d'onde venant de la présence et de la protection offerte par la haie. Il a été mesuré que le côté ensoleillé des haies et soumis à un bon rayonnement peut avoir une augmentation de la température jusque 2°C au total (*Forman et Baudry, 1984*). Durant la nuit, les haies et le sol renvoient de la chaleur qui a été stockée pendant la journée, ce qui réchauffe la parcelle (*Guyot, consulté en avril 2018 ; Liagre, 2006*). Ces effets de la haie sur la température de la parcelle doivent cependant être nuancés

en fonction, entre autres, de la distance au brise-vent, du bilan radiatif, du bilan hydrique et de la vitesse du vent (Guyot, consulté en avril 2018).

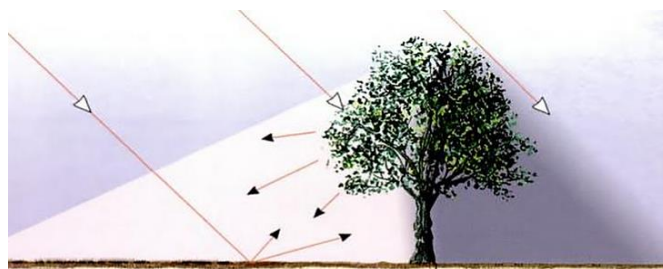


Figure 3: Impact de la haie sur le rayonnement incident sur la parcelle (Liagre, 2006)

3.4. Qualité chimique du sol

A. Carbone et la matière organique

Plusieurs études se sont intéressées au carbone organique (C_{org}) dans le sol sous les haies qui est évidemment directement lié à la quantité de matière organique (MO). En France, *Walter et al. (2003)* étudient la concentration en C_{org} dans le sol à l'approche de la haie pour des haies parallèles aux courbes de niveau (Tableau 1). En amont, ils ont observé un épaissement progressif de l'horizon organique à l'approche de la haie. Cet horizon est profond d'en moyenne 44 cm en amont de la haie et d'en moyenne 51 cm sous la haie. En amont, la teneur en C_{org} varie peu au sein de cet horizon, passant de $11,6 \text{ g kg}^{-1}$ à 5-10 m de la haie à $10,4 \text{ g kg}^{-1}$ plus de 40 m de la haie. Sous cette dernière, l'enrichissement en C_{org} est plus important, passant à $16,7 \text{ g kg}^{-1}$. De plus, la teneur en C_{org} est nettement plus élevée dans les 30 premiers centimètres du sol et décroît en profondeur. Sur les 10 premiers centimètres du sol, elle est en moyenne de $32 \text{ g de C kg}^{-1}$ de sol alors que cette valeur est de $9,7 \text{ g kg}^{-1}$ à 30-60 cm de profondeur. En aval de la haie, les résultats sont nettement plus variables et dépendent beaucoup de l'occupation du sol et de l'hydrologie. L'horizon A est souvent plus fin (16 cm) et fortement chargé en C_{org} ($31 \text{ g de C kg}^{-1}$). Ils concluent que l'augmentation de C_{org} a deux origines : l'activité biologique sous la haie, et l'impact anti-érosif de la haie (accentué par le talus), influençant la zone en amont de la haie. En Belgique, *Van Vooren et al. (2017)* synthétisent les résultats de plusieurs autres expériences. Lorsqu'on compare une parcelle cultivée à la même situation avec haie, le stock de C_{org} est 22 % plus élevé en présence de la haie mais cette augmentation ne s'observe que sur les 10 à 40 premiers centimètres du sol. La haie modifie aussi le sol autour d'elle : la teneur en C_{org} est augmentée de 14 % sur une distance équivalente à 0,5 fois la hauteur de la haie puis décroît pour devenir négligeable à partir d'une distance équivalente à 4,3 fois la hauteur de la haie. A noter que la teneur en C_{org} a une influence sur les propriétés du sol. La MO a une surface spécifique et une CEC élevée (valeur standard chez nous : $1,5 \text{ cmolc/kg de } C_{org}$). Ceci est souvent lié à une augmentation de la quantité de cations échangeables (*White, 2006*).

Tableau 1 : Résultats de la teneur en C_{org} ($g\ kg^{-1}$) et la densité apparente ($g\ cm^{-3}$) du sol en fonction de la distance de la haie et de la profondeur dans le sol pour 7 haies en bord de culture ou de prairie en France (Walter et al., 2003)

Factor	<i>n</i>	Bulk density ($g\ cm^{-3}$) ^a	SOC content ($g\ kg^{-1}$) ^a
General	461	1.34 (0.008)	14.6 (0.68)
Substrate			
Granite	70	1.14 ^A (0.021)	22.0 ^A (1.75)
Schist	391	1.37 ^B (0.008)	13.1 ^B (0.71)
Distance to hedge			
0–2 m	103	1.20 ^A (0.020)	16.7 ^A (1.31)
5–10 m	130	1.39 ^B (0.014)	11.6 ^B (0.83)
20–30 m	113	1.42 ^B (0.013)	11.4 ^B (0.69)
>40 m	55	1.41 ^B (0.012)	10.4 ^B (0.95)
Soil depth			
0–10 cm	65	1.18 ^A (0.021)	32.3 ^A (3.41)
20–30 cm	128	1.31 ^B (0.014)	17.9 ^B (0.74)
30–60 cm	145	1.37 ^C (0.015)	9.7 ^C (0.58)
>70 cm	123	1.40 ^C (0.015)	7.6 ^D (0.41)
Horizon type			
Ap & A	339	1.33 ^A (0.010)	14.5 ^A (0.63)
Apg & Ag	62	1.35 ^A (0.023)	16.9 ^A (1.92)
B & C	60	1.32 ^A (0.023)	6.9 ^B (3.23)

^aNumbers are means with standard errors in parentheses; means with same superscript letters are not significantly different (*t*-tests, $P=0.05$).

Trois sources sont identifiées pour expliquer l'augmentation de la MO (Follain et al., 2007 ; Viaud et al., 2009 ; Walter et al., 2003). Premièrement, la végétation pérenne apporte une grande quantité de biomasse et donc de C. Grâce à cela, une haie de feuillus fertilise le sol jusque 50 m autour de son pied. Les arbres puisent des éléments minéraux dans le sol par leurs racines. Lorsque ces derniers perdent leurs feuilles, le sol est enrichi en MO (White, 2006). Contrairement à une culture, une grande partie de la biomasse de la haie n'est pas exportée et est donc restituée au sol. Deuxièmement, l'enracinement profond de la végétation permet une plus grande activité biologique sur toute la profondeur des racines ce qui augmente la teneur en MO. Ceci permet aussi d'enrichir le sol par les racines mortes. L'apport de biomasse et l'enracinement des plantes sont à l'origine des valeurs élevées de C_{org} localement sous la haie (Walter et al., 2003). Pour finir, l'impact anti-érosif épaissit l'horizon A en amont de la haie (Walter et al., 2003). Lorsque les particules de sol transportées par l'érosion diffuse (cfr. §3.7.) sont des particules fines, ces dernières sont riches en matière organique ce qui engendre une augmentation de C_{org} en amont de la haie (Liagre, 2006).

Les haies aux bords des champs représentent un nouveau stock de C comparativement à une parcelle agricole sans haie. Wolton et al. (2014) estiment que la partie aérienne de la haie peut stocker 0,5 t de C $ha^{-1}\ an^{-1}$ durant sa croissance et lorsque la végétation n'est pas taillée pour une densité de haie de 50 m ha^{-1} . La partie souterraine de la haie peut également stocker 0,5 t de C $ha^{-1}\ an^{-1}$. En France, Follain et al. (2007) décrivent que les stocks additionnels sont principalement localisés dans le sol grâce un horizon superficiel préservé et enrichi par la litière aérienne de l'arbre (feuillage, bois) mais également par l'épaississement de l'horizon A. Selon eux, le stock de C aux alentours de la haie est en moyenne de 16,6 kg de C m^{-2} alors qu'il vaut 13,3 kg de C m^{-2} à l'échelle du paysage sans haie. Plus précisément, Walter et al. (2003) quantifie le stock de C dans le sol. Pour une densité de haie de 200 m ha^{-1} , le stock de C vaut

11,7 t de C ha⁻¹ sous la haie alors que pour une densité de haie de 50 m ha⁻¹, cette valeur est de 2,9 t de C ha⁻¹. A plus grande échelle, *Hamond et al. (2009)* estiment que le taux de stockage de C est de 0,1 t de C ha⁻¹ an⁻¹ si chaque hectare est bordé par 100 m de longueur de haie. En France, on pourrait ainsi stocker 2 à 4 millions de t de C, c'est-à-dire 1,5 % des objectifs de réductions des gaz à effet de serre entre 2020 et 2050.

B. Autres composés

La haie influence également les composés chimiques du sol autres que le C_{org} mais ce sujet est peu développé dans la littérature. Premièrement, les composés chimiques sont impactés par la sédimentation en amont de la haie. En Chine, *Lin et al. (2009)* montrent que les nutriments tels que le N et le P voient leur quantité augmentée de façon similaire au C_{org} à cause de la sédimentation en amont de la haie. L'élément K ne semble pas modifié par la présence de la haie. Cependant, ces résultats doivent être nuancés car cette accumulation est liée à la teneur en argile et dépend donc de l'érosion et de la sédimentation. *Kiepe (1995)* confirme que beaucoup de composés sont piégés en amont de la haie à cause de la sédimentation. Les haies retiennent également des oligo-éléments et des composés chimiques en amont de celles-ci (*Kiepe, 1995*).

Plus spécifiquement, la haie va aussi influencer l'azote de deux façons. Tout d'abord, niveau de la haie, la végétation est à l'origine d'une remontée des minéraux par le prélèvement racinaire (cfr A.). La MO enrichit les premières couches de sol en azote total (N_{tot}). Ensuite, la végétation absorbe le N par prélèvement racinaire, principalement sous forme de nitrates. Ce prélèvement a lieu majoritairement au printemps et en été. *Liagre (2006)* estime que jusque 80-90 % du nitrate est absorbé par la haie. *Viaud et al. (2009)* estiment que l'absorption peut faire disparaître totalement le N minéral de la rhizosphère à cette période, en sachant que les racines des haies peuvent s'étendre latéralement de 6 à 10 m autour de cette dernière.

3.5. Structure du sol

La haie modifie la structure du sol. Des mesures de densité apparente (ρ_a), c'est-à-dire la masse de sol sur le volume de sol (vides compris), permettent d'avoir une idée de la modification de la structure du sol par les haies. Toutes les études indiquent une diminution du ρ_a à l'approche de la haie. En France, *Walter et al. (2003)* obtiennent que le ρ_a passe de 1,2 g cm⁻³ sous la haie à 1,41 g cm⁻³ au-delà de 40 m de la haie (cfr. Tableau 1 §3.4.). Verticalement, le ρ_a passe de 1,18 g cm⁻³ dans les 10 premiers cm à 1,31 g cm⁻³ pour une profondeur de 20-30 cm puis à 1,40 g cm⁻³ à plus de 70 cm de profondeur. Au Kenya, *Kiepe (1995)* observe que le ρ_a passe de 1,31 g cm⁻³ sous la haie à 1,41 g cm⁻³ à 2 m en amont de la haie pour les 30 premiers centimètres de sols (Tableau 2). Cette différence s'atténue avec la profondeur pour être quasiment inexistante à plus de 1,1 m de profondeur où le ρ_a vaut environ 1,6 g cm⁻³ partout.

Tableau 2 : Densité apparente (g cm^{-3}) et de la conductivité hydraulique (mm h^{-1}) à saturation en fonction de la distance à la haie (m) et de la profondeur dans le sol (m) pour trois haies en bas de pente pour un sol sablo-argileux au Kenya (Kiepe, 1995)

	K_{sat}	d_B	K_{sat}	d_B	K_{sat}	d_B
Location	(0.0-0.3 m)		(0.3-1.1 m)		(1.1-1.5 m)	
Crop control	35.1	1.38	8.2	1.51	8.4	1.69
2.0 m uphill	33.8	1.41	2.8	1.59	2.5	1.63
1.0 m uphill	34.9	1.39	1.2	1.53	3.5	1.64
Hedgerow	60.8	1.31	3.2	1.56	8.7	1.62
1.0 m downhill	43.7	1.39	1.2	1.53	0.0	1.66

La porosité croît donc à l'approche de la haie. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer cette variation de porosité. Premièrement, le p_a dépend de la texture du sol : les particules d'argile ont une densité réelle (ρ_r) de 1,1-1,4 g cm^{-3} , les particules de limon de 1,3-1,5 g cm^{-3} et celles de sable de 1,5-1,8 g cm^{-3} (Hiller, 1998). De plus, certaines interactions dans le sol peuvent créer des microagrégats et aussi impacter le p_a . La haie anti-érosive influence la distribution de la granulométrie au sein de la parcelle (cfr. §3.7.) mais les impacts varient en fonction des conditions d'érosion et de sédimentation, favorisant parfois le dépôt de sable ou parfois le dépôt d'argile en amont de la haie. Deuxièmement, Walter *et al.* (2003) font le lien entre le p_a et la teneur en C_{org} : lorsque la teneur en C_{org} augmente, le p_a diminue (cfr. Tableau 1 §3.4.). Tous deux varient légèrement avec la distance de la haie et ont une valeur spécialement élevée sous la haie qui s'atténue avec la profondeur dans le sol. En effet, la MO stabilise la structure du sol (White, 2006). C'est sans doute le facteur le plus déterminant pour expliquer la soudaine diminution du p_a sous la haie. Troisièmement, les racines du sol améliorent sa structure (Kiepe, 1995). De plus, les petits organismes présents dans le sol ont une action de décompactage sur ce dernier. Les vers de terre principalement permettent de réorganiser la MO et creusent des galeries (Kiepe, 1995). Les déjections de certains organismes permettent même de créer des microagrégats ou servir de noyau pour la formation d'agrégats (White, 2006). Ensuite, les petites racines et les mycéliums sous la haie contribuent à la formation d'agrégats dans le sol. Pour finir, les plus gros animaux quant à eux impactent fortement la structure du sol en créant des terriers et des galeries mais cela ne se reflète pas dans les mesures classiques du p_a vu la petite taille des échantillons utilisés.

3.6. Fonctions hydriques

A. Interception de la pluie

La haie interfère avec la distribution spatiale de l'eau de pluie. En France, Ghazavi *et al.* (2008) ont conclu que, pour une haie de 15 m de large, la haie intercepte en moyenne 28 % d'un événement pluvieux lorsque la végétation est développée en été tandis qu'en hiver, cette valeur est de 12 %. Ils nuancent leurs résultats en fonction de l'intensité, de la durée de la pluie incidente et de la végétation concernée. En Grande Bretagne, Herbst *et al.* (2006) ont conclu que sous la haie, la pluie était réduite de 57 % lorsque la végétation est développée et

de 49 % pour la période où la végétation perd ses feuilles. Sur l'entièreté de la zone impactée par la présence de la haie, c'est-à-dire sur une distance équivalente à deux fois la hauteur de la haie, ces valeurs sont respectivement de 24 et 19 %.

B. Rétention d'eau

Dans le sol, l'eau est retenue par deux forces : les forces d'hydratation et les forces de capillarité. Les forces d'hydratation correspondent à une fine couche de molécules d'eau qui entoure les particules de sols et qui est cruciale pour les échanges solides-liquides. L'eau capillaire quant à elle a une mobilité qui dépend de la taille des pores. Pour quantifier la retenue de l'eau dans le sol, on utilise la courbe de rétention qui présente la teneur en eau d'un sol en fonction du potentiel matriciel. Ce dernier est souvent mesuré en pF (adimensionnel), qui est le logarithme du potentiel matriciel (en cm). En prenant la dérivée de la courbe de rétention, on obtient la courbe de densité de probabilité de la taille des pores.

Ridremont et al. (2012) présentent une synthèse de l'eau dans le sol (Fig. 4). Il définit les macropores comme les pores plus grands que 6-10 μm de diamètre. Ces pores structuraux dépendent principalement de la structure du sol. Ce sont donc des pores drainants pour l'eau dans lesquels l'eau est peu affectée par la capillarité et s'écoule facilement sous l'effet de la gravité. Les pores entre 6-10 et 0,2 μm contiennent l'eau absorbable par les plantes. L'eau contenue dans les pores plus petits que 0,2 μm est considérée comme indisponible pour les plantes. Ce sont des pores texturaux, donc plus généralement liés à la texture du sol. La figure 5 fait le lien entre l'humidité du sol et sa texture.

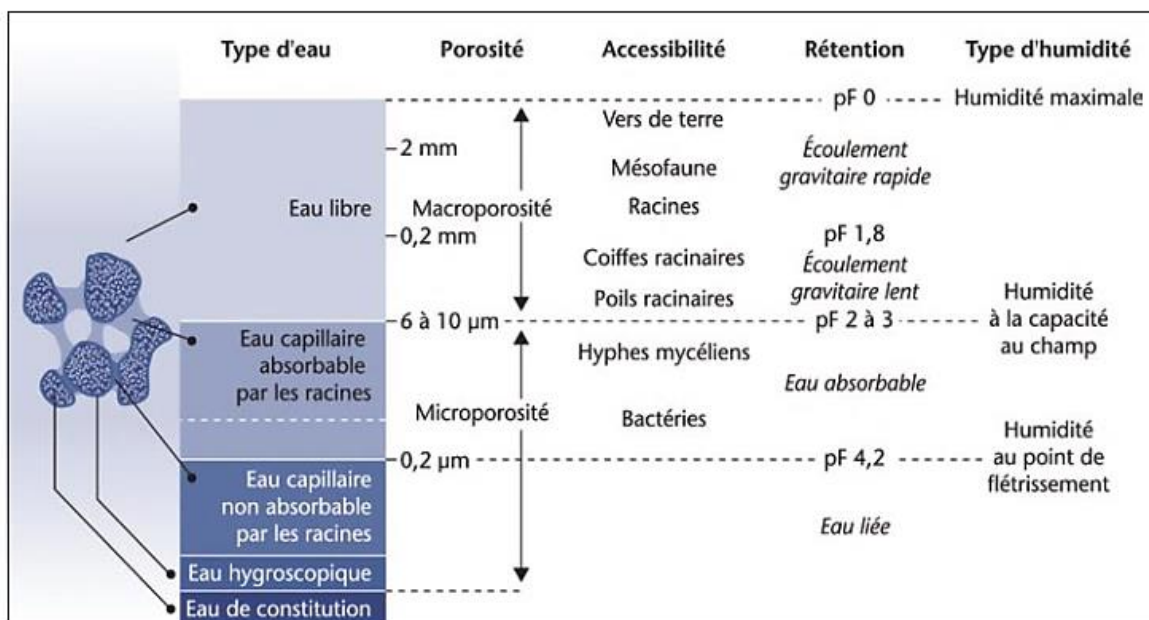


Figure 4: Type d'eau dans le sol en fonction de la porosité, l'accessibilité aux organismes vivants, la rétention d'eau et le type d'humidité dans le sol (Ridremont et al., 2012)

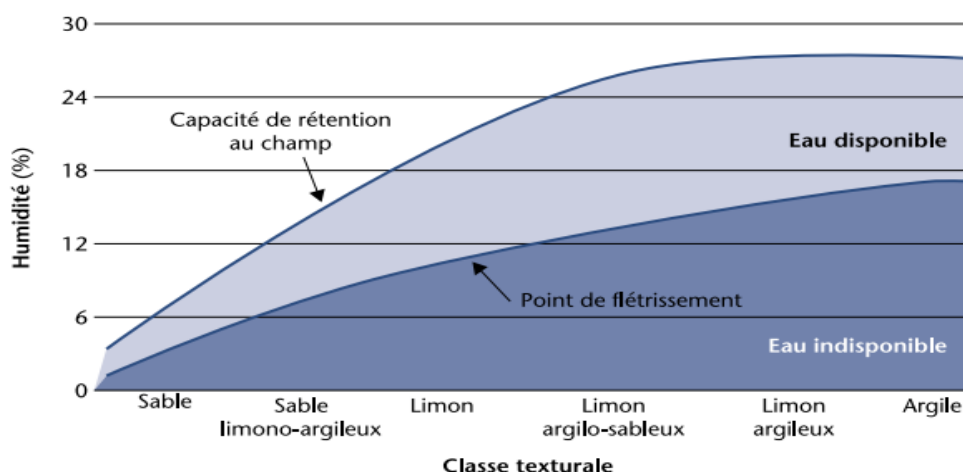


Figure 5 : Teneur en eau (%) à la capacité au champ et au point de flétrissement en fonction de la texture du sol (Ridremont et al., 2012)

La courbe de rétention du sol est modifiée par la présence d'une haie. En Chine, *He et al. (2016)* concluent que le sol sous la haie a une meilleure capacité de rétention d'eau. Au Kenya, *Kiepe (1995)* décrit les effets de la haie sur la courbe de rétention (Fig. 6). Il observe des différences significatives entre les courbes de rétention pour les 30 premiers cm de sol lorsqu'il compare le sol sous la haie à celui de la parcelle. Ces différences concernent une succion plus faible que 3 kPa, c'est-à-dire les pores plus grands que 50,9 μm . Le sol sous la haie contient donc plus de pores drainants pour l'eau. Une fois que la succion augmente, la haie n'a plus d'influence sur la courbe de rétention. Pour finir, à 30-150 cm de profondeur, les courbes de rétention des sols sous la haie et dans la parcelle se confondent.

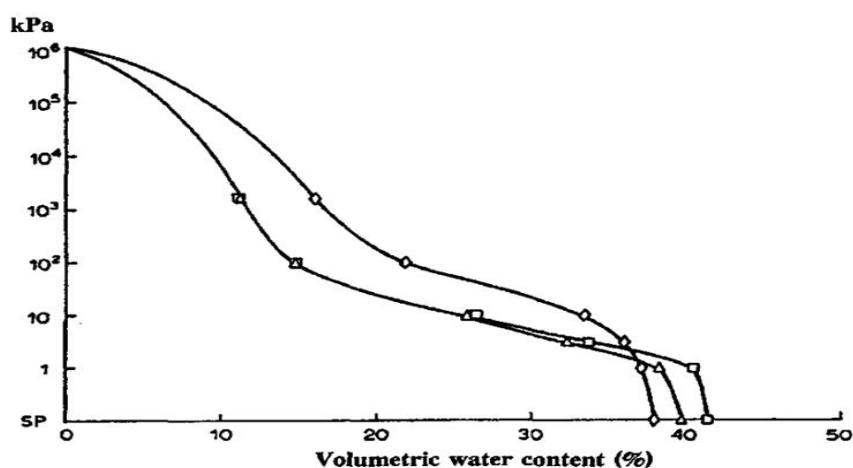


Figure 6: Teneur en eau volumique (%) en fonction de la pression appliquée (kPa) pour un sol à 0-30 cm de profondeur sous une haie ($\square$) et dans la parcelle (Δ) ainsi qu'à 30-150 cm de profondeur sous la haie ($\diamond$) et dans la parcelle ($\circ$) (Kiepe, 1995)

La haie impacte la teneur en C_{org} et donc en MO du sol. On observe en effet plus de C_{org} principalement sous la haie dans les premiers centimètres de sol (cfr. §3.4.). Or, la MO a une bonne affinité pour les molécules d'eau (*White, 2006*). L'augmentation de la teneur en C_{org} à l'approche de la haie pourrait donc être à l'origine d'une augmentation de la réserve en eau dans le sol et donc d'une modification de la courbe de rétention. Cependant, cet effet n'est pas développé dans la littérature.

C. Potentiel matriciel et transpiration

La haie en bordure de champ va engendrer une perte d'eau du sol vers l'atmosphère par la transpiration de la végétation. *Ghazavi et al. (2008)* décrivent que le potentiel matriciel, c'est-à-dire les forces de rétention du sol, sous la haie dépend de la pluviométrie, de l'évapotranspiration et du niveau de la nappe dans le sol. La transpiration quant à elle varie entre autres en fonction de l'espèce végétale, l'indice foliaire, les conditions climatiques et la disponibilité de l'eau dans le sol (*Caubel, 2001*).

L'évapotranspiration de la haie est plus élevée que celle des arbres en forêt pour plusieurs raisons : la haie est soumise à plus de turbulence du vent, les arbres de la haie peuvent développer leur système racinaire latéralement et utiliser une partie de l'eau du bord de la parcelle car la compétition avec les autres ligneux de la haie est moindre à cet endroit, il y a un apport de N par les cultures et, l'absence d'arbres autour de la haie augmente le développement du système aérien (*Viaud et al., 2009*).

En France, *Caubel et al. (2003)* décrivent qu'à la fin du printemps et en été, le potentiel matriciel du sol décroît plus vite sous et en amont de la haie par rapport à une parcelle sans haie. La différence de potentiel matriciel entre une parcelle avec haie et une parcelle sans haie augmente avec l'avancement dans la saison, s'élevant jusque -1 m en août. Au début de l'automne, l'augmentation du potentiel matriciel se fait plus tardivement sous la haie en comparaison avec une parcelle sans haie, d'environ 1 mois et sur 1,6 m de profondeur. Le noyau 'sec' qui se forme pendant l'été concerne une distance de 6 à 10 m de chaque côté de la haie (*Caubel et al., 2003*). En France, *Ghazavi et al. (2008)* font les mêmes conclusions : le sol est plus sec sous la haie à la fin de l'été et cela retarde la restauration de l'état hydrique du sol en automne. Cependant, il parle d'un retard de trois mois pour la réhumectation du sol mais avec des précipitations moins élevées que pour l'expérience de *Caubel et al. (2003)*. *Ghazavi et al. (2008)* décrivent que la zone en amont de la haie contient 76 % de la totalité des racines sur 16 m alors que la zone en aval contient 23 % de racines sur 12 m. Horizontalement, la quantité de racines diminue avec la distance de la haie. Verticalement, des racines sont présentes jusque 2 m de profondeur mais plus de la moitié des racines se trouve dans la couche de 10-50 cm de profondeur. Ils concluent que la haie impacte significativement l'eau dans le sol sur 9 m en amont de la haie et 6 m en aval.

La diminution du potentiel matriciel en été limite la percolation de l'eau vers les nappes et les mouvements latéraux de l'eau dans le sol (*Caubel, 2001 ; Caubel et al., 2003*). De plus, le retardement de la saturation en automne permet d'augmenter la capacité d'infiltration du sol à cette période (cfr point D.). *Caubel et al. (2003)* décrivent que le retardement de l'humidification en automne a un effet tampon sur les inondations.

La présence de la haie influence également la disponibilité de l'eau pour la culture avoisinante. *Forman et Baudry (1984)* considèrent que l'évaporation de la culture est diminuée sur une distance équivalente à 16 fois la hauteur de la haie à cause du microclimat

et de l'effet brise-vent de la haie. *Wolton et al. (2014)* indiquent aussi que le stock d'eau peut être augmenté sous la haie par l'augmentation de l'infiltration (cfr. D.).

D. Infiltration

La capacité d'infiltration dépend fortement de la première couche du sol, c'est donc la couche limitante. L'infiltration de l'eau dans le sol se fait sous l'effet de la gravité auquel s'ajoute le potentiel matriciel lorsque le sol n'est pas saturé. L'infiltration dépend de deux facteurs : l'intensité de la pluie et la capacité d'infiltration. Si l'intensité de la pluie est plus élevée que la capacité d'infiltration du sol, une partie de l'eau incidente va ruisseler. La capacité d'infiltration de la première couche diminue au fur et à mesure que cette dernière se sature en eau pour tendre vers un régime permanent où la capacité d'infiltration est équivalente à la conductivité hydraulique à saturation (K_s) (*Caubel, 2001*). Lorsque le sol n'est pas saturé, les transferts d'eau dans le sol sont principalement verticaux. A l'inverse, lorsqu'il est saturé, il peut également y avoir des flux d'eau horizontaux qui sont augmentés par la présence de macropores ou de fissures dans le sol (*Caubel, 2001*).

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'impact des haies sur le K_s mais peu de ces études sont situées dans la même région pédoclimatique que celle de ce travail. Il a été mesuré que le K_s d'une haie d'arbustes en bord de champ au Pérou était augmenté de 180 à 500 mm h⁻¹ par rapport à la même situation sans haie (*Alegre et al., 1996 in Richet et al., 2017*). *Ourvy et al. (2012)* étudient 3 haies à plat sur un sol limoneux en France. Ils obtiennent que pour des débits de 0 à 4,1 l s⁻¹ m⁻¹, l'infiltration moyenne est de 385 mm h⁻¹. Ils concluent qu'il faut 9 m² pour infiltrer 1 l s⁻¹. *Richet et al. (2017)* mesurent que, sur une surface de 2,5 m², le débit d'infiltration est de 0,28 l s⁻¹ ce qui représente 4-18 % de flux d'eau arrivant à la haie.

Kiepe (1995) étudie le K_s pour une haie à plat dans un sol sablo-argileux au Kenya (Fig. 7). Il obtient que la haie influence la capacité d'infiltration du sol que sur une distance <0,5 m de cette dernière. En saison sèche, la capacité d'infiltration du sol sous la haie est de 135 mm h⁻¹ alors qu'elle vaut 44 mm h⁻¹ sur le reste de la parcelle. La présence d'une haie sur la parcelle augmente donc la capacité d'infiltration de 30 % par rapport à la parcelle sans haie. En saison humide, la capacité d'infiltration du sol sous la haie est de 69 mm h⁻¹ alors qu'elle vaut 8-11 mm h⁻¹ sur le reste de la parcelle. La présence d'une haie sur la parcelle augmente donc la capacité d'infiltration de 94 % par rapport à la parcelle sans haie. On peut également observer que la capacité d'infiltration diminue sous la haie lorsqu'on retire les tiges, c'est-à-dire la partie aérienne de la végétation. *Kiepe (1995)* a également mesuré le K_s autour d'une haie ainsi qu'à différentes profondeurs du sol (Tableau 2 §3.5.). Le K_s est beaucoup plus élevé pour les 30 premiers centimètres de sol. Dans cette zone, le K_s sous la haie vaut 60 mm h⁻¹ et décroît rapidement avec la distance à la haie. En effet, à 1 m de la haie, le K_s vaut 43,7 mm h⁻¹ en aval et 34,9 mm h⁻¹ en amont. Au-delà de 1 m de la haie, le K_s varie peu avec la distance. Le K_s varie également verticalement. Au-delà des 30 premiers cm de sol, le K_s chute et les différences entre le K_s sous la haie et sur la parcelle de contrôle sont très faibles.

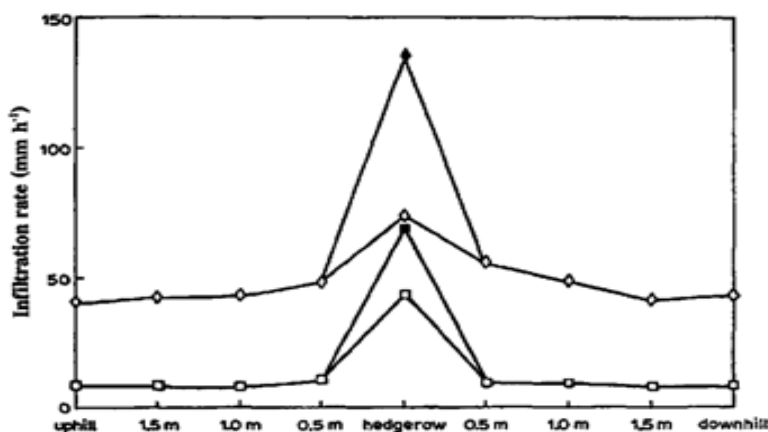


Figure 7 : Capacité d'infiltration (mm h^{-1}) en fonction de la distance de la haie (m) en saison humide avec tiges (■) et sans tiges (□) et en saison sèche avec tige (◆) et sans tiges (◇) pour une haie à plat au Kenya (Kiepe, 1995)

L'impact de la haie sur la capacité d'infiltration a plusieurs origines. Premièrement, divers auteurs dont Kiepe (1995) font le lien entre l'augmentation de l'infiltration et l'augmentation importante de la macroporosité sous la haie, c'est-à-dire les pores drainants pour l'eau. La macroporosité croît principalement à cause de l'augmentation de la quantité de MO et à cause de l'amélioration de la structure grâce aux racines et aux microorganismes (cfr §3.5.). En effet, la teneur en C_{org} a une évolution similaire à celle de K_s : une valeur spécialement élevée sous la haie, et principalement sur les premiers centimètres du sol (Kiepe, 1995 ; Ghazavi et al., 2008). L'influence de la macroporosité est d'autant plus importante lorsque le sol est proche de la saturation, quand le potentiel matriciel n'influence pas ou peu la capacité d'infiltration du sol. Deuxièmement, la capacité d'infiltration du sol est augmentée par le potentiel matriciel lorsque la première couche de sol n'est pas saturée (Kiepe, 1995). En effet, la végétation de la haie augmente la transpiration ce qui assèche le sol en été et retarde la saturation des sols en automne (cfr point C.). Finalement, l'infiltration est augmentée grâce à la résistance hydraulique de la haie (cfr §3.7.). La résistance de la haie ralentit la vitesse de l'eau en amont et crée une zone calme dans laquelle le temps de résidence (t_R) de l'eau est augmenté. L'infiltration de l'eau dans le sol est donc augmentée à cet endroit (Kiepe, 1995). Ceci explique pourquoi Kiepe (1995) a obtenu une capacité d'infiltration du sol augmentée par la présence de tiges qui représentent un obstacle au ruissellement et ralentissent l'eau.

E. Ruissellement

Au Kenya, Kiepe (1995) a obtenu une réduction du ruissellement de 41 % grâce à la présence d'une haie. Sur un sol limoneux en Chine, Yang et al. (2017) ont étudié des flux d'eau de $35\text{-}55 \text{ l min}^{-1} \text{ m}^{-1}$ sur des pentes de $24\text{-}32^\circ$. Ils obtiennent une réduction du ruissellement de 4 à 60 %. Ces dernières années, plusieurs études ont porté sur la modélisation de l'impact des haies sur les flux hydriques à l'échelle du bassin versant. Mérot et al. (1999) montrent que le coefficient de ruissellement est plus stable dans les paysages bocagers où il vaut 5 % alors qu'il est de 5-15 % dans les paysages sans haie. Liagre (2006) décrit que, pour une densité de haie de $30 \text{ à } 200 \text{ m ha}^{-1}$, et pour une pluviométrie de 700 mm an^{-1} , les bocages réduisent de

10 à 50 % la quantité d'eau ruisselée arrivant à la rivière. En somme, il en ressort que les bocages diminuent le ruissellement et atténuent les pics de crue. En général, le t_R de l'eau dans le bassin versant est augmenté quand il y a présence de haies. On peut donc dire qu'à l'échelle du bassin versant, les haies ont un rôle tampon pour les événements hydrologiques (Mérot *et al.*, 1999).

Les haies diminuent le ruissellement et atténuent les pics de crue grâce à l'augmentation de l'infiltration à l'approche de ces dernières. Pour les crues de fréquences rares, l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol. La présence ou non de haie est alors peu importante (Mérot *et al.*, 1999 ; Viaud *et al.*, 2009). En outre, plus le sol est humide avant un événement pluvieux, plus le ruissellement est favorisé (Dautrebande *et al.*, 2006). Ceci explique pourquoi le retardement de la saturation du sol (cfr. point C.) permet également d'atténuer les pics de crue.

F. Qualité de l'eau

La présence de la haie en bordure de champ améliore la qualité de l'eau qui ruisselle hors de la parcelle. Pour commencer, le retardement de l'humidification du sol en automne (cfr. point C.) augmente le t_R des particules polluantes au niveau de la parcelle (Caubel *et al.*, 2003). Deuxièmement, la résistance hydraulique de la haie (cfr §3.7.) réduit la vitesse d'écoulement des eaux et par conséquent la capacité de transport du ruissellement, ce qui favorise la sédimentation, l'infiltration et la rétention des particules de sol ainsi que des contaminants qui y sont liés (azote, phosphore, pesticides, bactéries) (Wolton *et al.*, 2014). Cependant, les particules plus grosses ont tendance à sédimenter en premier (cfr §3.7.) ce qui limite la rétention des polluants, sachant que l'adsorption s'effectue davantage sur les fines particules (Duchemin *et Majboud*, 2004). Le P et le N total sont toutefois plus facilement captés par la bande végétale puisqu'ils sont plus fortement liés aux sédiments en suspension que les nutriments et les pesticides maintenus en solution dans l'eau (Duchemin *et Majboud*, 2004). Van Vooren *et al.* (2017) synthétisent les résultats de plusieurs études en Europe et confirment que les haies filtrent une partie du N et du P contenus dans le ruissellement. Pour le N, l'interception est de 42 % pour les haies de 2 m de large et de 72% pour les haies de 5 m de large. Pour le P, l'interception est de 67 %.

3.7. Erosion et sédimentation

A. Érosion

L'érosion induit une redistribution des particules de sol ce qui modifie les horizons et leurs propriétés. L'érosion peut prendre différentes formes : hydrique, aratoire, éolienne, etc (Viaud *et al.*, 2009). Les haies brise-vent agissent contre l'érosion éolienne mais ce n'est pas le phénomène dominant dans nos régions (Percy, 2008). L'érosion aratoire apparaît lorsque les outils de travail du sol transportent de la terre sur une courte distance préférentiellement

vers le bas de la pente (*Dautrebande et al., 2006*). Une haie placée en bordure de parcelle existante n'aura cependant pas d'impact sur l'érosion aratoire. L'érosion hydrique est définie comme l'arrachement de particules de sol, leur transport par l'eau et leur dépôt (*Dautrebande et Sohler, 2006*). Le détachement du sol peut se faire soit par l'impact des gouttes de pluies, soit par friction de l'eau de ruissellement sur le sol (*Dautrebande et al., 2006*). Dans notre région, le climat combiné à la sensibilité à l'érosion de nos sols limoneux intensément cultivés rendent l'érosion hydrique particulièrement présente (*Verstraeten et Poesen, 2000*). En Région Wallonne, les pertes de sols ont été estimées à $3,03 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en moyenne entre 1991 et 2000 (*Dautrebande et Sohler, 2006*).

Les facteurs déterminant l'érosion hydrique sont les suivants : les précipitations, le sol, la topographie, les activités agricoles ainsi que le couvert végétal. L'érodibilité d'un sol augmente avec sa teneur en limon, sa structure faiblement développée, le manque d'agrégats stables, une faible teneur en MO et une faible perméabilité des couches de surface (*Dautrebande et al., 2006*). En Belgique, la période la plus sensible à l'érosion hydrique est en mai et juin en lien avec les pluies orageuses. Les orages sont intenses ce qui augmente la force érosive de la pluie. En effet, les gouttes sont plus grosses, leur procurant une énergie cinétique plus élevée. De plus, de nombreuses cultures à cette période (ex. betterave sucrière, maïs, pomme de terre) offrent une faible protection du sol.

L'agressivité des eaux de ruissellement dépend de la vitesse du flux. En effet, plus la vitesse de l'eau est élevée, plus le ruissellement arrache des particules de sol. Par ailleurs, l'augmentation de la vitesse du flux augmente sa capacité de transport en sédiments (*Duchemin et Majdoub, 2004*).

L'érosion hydrique peut avoir différentes formes (*Dautrebande et al., 2006 ; Ouvry et al., 2012*). Premièrement, l'érosion diffuse concerne l'ensemble de la parcelle de façon uniforme. Elle se produit lorsque les terres sont relativement planes (pente $< 5\%$), avec peu de relief marqué et des pluies peu intenses. Moins de 35 % des particules transportées ont une taille supérieure à $125 \mu\text{m}$. Les pertes moyennes en sol par érosion diffuse ont été estimées à 2 à $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ pour 2015 en Région Wallonne. L'érosion diffuse est fortement liée à la stabilité structurale du sol. Les haies peuvent avoir une influence sur cette forme d'érosion via la couverture végétale qui protège le sol contre l'impact des gouttes de pluie et l'enrichissement du sol en matière organique qui accroît la stabilité structurale de ce dernier. En effet, *Dautrebande et al. (2006)* indiquent qu'un gain d'1 % de MO correspond à une diminution de l'érodibilité d'environ 10 %.

Deuxièmement, l'érosion concentrée conduit à la formation d'une rigole ou d'une ravine. Elle se produit lorsque le terrain est pentu (pente $> 5\%$), irrégulier et les pluies sont intenses. L'eau a donc une vitesse plus élevée. L'érosion se fait sans tri lors de l'arrachement et du transport des sédiments. 50 % des particules transportées ont une taille supérieure à $125 \mu\text{m}$. La cohésion du sol est un facteur déterminant pour la sensibilité du sol à l'érosion

concentrée. *Vannoppen et al. (2017)* indiquent que plus la cohésion du sol est grande, moins le sol est sensible à l'érosion. En effet, la sensibilité du sol à cette érosion décroît avec les forces liant les particules de sol (*Knapen et al., 2007*). Pour cette raison, l'érodibilité augmente avec la teneur en sable du sol et diminue avec la teneur en argile à cause de la haute cohésion entre les particules fines. En effet, les particules d'argile sont chargées négativement et forment des complexes argilo-humiques. La MO augmente également la cohésion du sol car elle se lie avec les particules minérales du sol. La haie limite donc l'érosion concentrée via l'apport de MO. D'autres facteurs sont déterminants pour diminuer la sensibilité du sol à l'érosion concentrée parmi lesquels on peut citer la présence de fragments rocheux à la surface du sol, une faible teneur en eau, les pratiques de non labour, l'incorporation de résidus de culture, etc (*Knapen et al., 2007*). En Chine, *Wang et al. (2018)* font les mêmes conclusions : la sensibilité du sol à l'érosion concentrée augmente avec la teneur en sable et les particules grossières et diminue avec la cohésion du sol, le p_a , la teneur en MO, la teneur en limon et en argile.

La présence de racines dans les premières couches de sol réduit également la sensibilité du sol à l'érosion concentrée principalement parce qu'elles lient physiquement les particules et excrètent des agents liants (*Knapen et al., 2007*). En Belgique, *Vannoppen et al. (2017)* ont étudié le potentiel de réduction de l'érosion concentrée par les racines. Il en ressort que l'efficacité des racines dépend majoritairement de trois facteurs : la teneur en sable dans le sol, la densité apparente et le diamètre des racines. Le potentiel de réduction de l'érosion par les racines fibreuses est positivement corrélé à la teneur en sable et négativement corrélé à la densité apparente. Concernant les racines pivotantes, le potentiel de réduction de l'érosion est positivement corrélé à la teneur en sable et négativement au diamètre des racines pour des petites racines ($D < 5 \text{ mm}$) tandis que pour des racines plus grosses ($D > 5 \text{ mm}$), la corrélation est négative avec la teneur en sable et le diamètre des racines. Pour finir, ils concluent que les racines fibreuses et les petites racines pivotantes sont plus efficaces dans les sols moins cohésifs alors que les grosses racines pivotantes sont plus efficaces dans les sols ayant une grande cohésion. La haie limite donc l'érosion concentrée grâce aux racines de la végétation.

B. Résistance hydraulique

L'efficacité d'une barrière végétale contre le ruissellement et l'érosion dépend de sa résistance hydraulique engendrée par la rugosité de la surface. Pour les haies à plat, c'est-à-dire qui ne sont pas situées sur un talus ni dans un fossé, c'est la strate herbacée qui crée la résistance au ruissellement (*Ouvry et al., 2012*). Dans le cas d'écoulements concentrés, le flux d'eau est ralenti lorsqu'il arrive au niveau de la strate herbacée ce qui forme un ressaut hydraulique en amont de cette dernière. Grâce aux dimensions de la lame d'eau après ce ressaut hydraulique, il est possible d'estimer le coefficient de Manning (n_m), qui quantifier

donc la résistance hydraulique de la haie (Equation 1). Plus le coefficient n_m est grand, plus la vitesse de l'eau est diminuée.

$$Q = \frac{1}{n_m} R_h^{\frac{5}{3}} \sqrt{i} \quad \text{Équation 1}$$

Avec

Q : débit de l'eau ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

n_m : coefficient de Manning ($\text{s m}^{-1/3}$)

R_h : rayon hydraulique (m)

i : pente (%)

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la quantification du n_m pour les haies. Tout d'abord, *Freeman et al. (2000)* obtiennent que le n_m vaut de 0,016 à 0,090 $\text{s m}^{-1/3}$ pour une densité d'arbustes comprise entre 0,3 et 12 arbustes m^{-2} . En France, *Richet et al. (2017)* utilisent un simulateur de ruissellement afin de quantifier la résistance hydraulique, la capacité de sédimentation et la capacité d'infiltration d'une haie en bas de pente en mesurant le flux d'eau qui arrive et qui ressort de la haie. Les débits injectés dans le simulateur vont de 0,3 à 12 $\text{l s}^{-1} \text{ml}^{-1}$, ce qui correspond au pic de ruissellement pour une parcelle d'environ 50 ha. Le n_m obtenu vaut 0,4 à 0,8 $\text{s m}^{-1/3}$ pour des haies avec une densité de tiges plus élevée que 50 tiges ml^{-1} et vaut 0,06 à 0,3 $\text{s m}^{-1/3}$ pour une densité de tiges plus faible que 50 tiges ml^{-1} . Le n_m dépend donc de la densité de tiges de la haie mais également du tapis de feuille couvrant le sol. *Richet et al. (2017)* décrivent aussi que le n_m tend vers une asymptote aux alentours de 0,5 $\text{s m}^{-1/3}$ lorsque le débit incident dépasse 5 $\text{l s}^{-1} \text{ml}^{-1}$. En somme, le n_m se stabilise une fois que le R_h devient plus grand que la couche de litière et de tiges au sol. Ceci explique pourquoi les haies plus âgées ont une résistance hydrique plus élevée : elles ont plus de racines et une couche de litière plus épaisse. Pour finir, *Ouvry et al. (2012)* font les mêmes conclusions au niveau de la densité de tige et de la litière. Ils obtiennent un n_m de 0,5 $\text{s m}^{-1/3}$ pour des débits spécifiques limités à 6 $\text{l s}^{-1} \text{ml}^{-1}$ et une densité de tiges plus petite que 50 tiges ml^{-1} . Ils en concluent que les haies créent un frein efficace lorsque la densité de tiges sortant du sol est supérieure à 50 tiges ml^{-1} .

C. Sédimentation

Les haies jouent un rôle dans la lutte contre le transfert de sédiments car leur résistance hydraulique freine l'eau (*Viaud et al., 2009*). Comme décrit au point A, la diminution de la vitesse du flux est liée à une diminution de sa capacité de transport en sédiments (*Duchemin et Majdoub, 2004*). Toutes les études qui se sont intéressées aux haies anti-érosives vont dans le même sens : la sédimentation est augmentée devant la haie. En Chine, *Lin et al. (2009)* ont également étudié la sédimentation engendrée par trois haies consécutives en bordure de champs. La réduction de l'érosion est de 231,2 à 242,8 t ha^{-1} en huit ans, ce qui équivaut à 1,8 cm de sol. Ils mettent l'accent sur l'importance de la strate herbacée pour retenir les sédiments. Dans les zones semi-arides où les précipitations sont plus intenses que

chez nous (Nigeria, Rwanda et Philippines), il a été mesuré que les haies arborées et arbustives pouvaient arrêter de 48 à 85 % des sédiments et que le ruissellement est drastiquement réduit (*Panigbatan et al., 1995, Young, 1997 et Ndayizigie, 1992 in Richet et al., 2017*).

La sédimentation est variable en fonction de la taille des particules transportées par le ruissellement. *Yang et al. (2017)* ont étudiés des débits de 35 à 55 l min⁻¹ ml⁻¹ et des pentes de 24-32 %. La haie réduit de 15 à 50 % la teneur en sédiments. Pour un ruissellement transportant majoritairement des limons, la haie a réduit la teneur en sable et augmente la teneur en argile et en limon dans le sol sous la haie. *Richet et al. (2017)* ont fait une mesure plus détaillée de la sédimentation grâce à leur simulateur de ruissellement en France. Les débits mesurés dans cette expérience vont de 1,92 à 6,51 l s⁻¹ ml⁻¹ avec des concentrations de 9 à 28 g l⁻¹. Ils concluent que la sédimentation se fait dans les 20 cm après le ressaut hydraulique. Les particules sédimentées sont des agrégats visibles en grande partie et des particules fines pour le reste. Différents flux d'eau sont injectés dans le système avec des proportions de taille de particules différentes pour des pentes < 10 %. En moyenne, lorsque l'eau contient plus de particules grossières (>50 % des particules sont > 125 µm), 93 à 99 % de la masse de sol injectée est sédimentée par la haie. Pour les flux contenant des particules plus fines (un sol tamisé à 1 mm, <35 % des particules sont > 125 µm), 74 à 94 % de la masse de sol injectée est sédimentée par la haie. Ils remarquent que le phénomène de sédimentation semble indépendant de l'infiltration causée par la haie et la quantité de sol sédimentée semble indépendante de la concentration de particules dans le flux incident. *Ouvry et al. (2012)* indiquent que les particules plus grossières sédimentent directement après le ressaut hydraulique. Ensuite, dans la zone calme, les particules plus fines se déposent. Cependant, il faut garder à l'esprit que la sédimentation dépend de la granulométrie des particules de sol transportées et donc de l'érosion.

Avec la sédimentation en amont de la haie, la matière s'accumulant forme une terrasse avec le temps. La haie engendre donc des modifications topographiques : la pente en amont de la haie peut être réduite de plusieurs pourcents (*Caubel, 2001 ; Liagre, 2006 ; Lin et al., 2009*). La zone calme grandit donc aussi avec le temps. Ceci diminue la vitesse de l'eau de ruissellement, réduit sa force érosive ce qui augmente de plus en plus la sédimentation et l'infiltration de l'eau (*Ouvry et al., 2012*).

La haie est donc à l'origine d'une modification des horizons du sol, surtout en amont d'une haie parallèle aux courbes de niveaux. En amont de la haie, l'horizon organo-minéral, l'horizon A, s'épaissit. Cet épaississement peut atteindre 30 – 60 cm devant la haie et jusque 1 m sous la haie. En aval, l'épaisseur diminue sensiblement à cause de l'érosion accentuée dans cette zone (*Viaud et al., 2009 ; Lin et al., 2009*). *Ghazavi et al. (2008)* observent une augmentation d'environ 4 % d'argile et une diminution de 4 % de limon à 2 m en aval de la haie par rapport à l'amont.

3.8. Rendements agricoles

Liagre (2006) estime que les grandes cultures telles que les céréales ont un rendement augmenté de 5 à 30 % par la présence de haies. *Wolton et al. (2014)* estiment que la haie peut augmenter le rendement agricole des grandes cultures comme les cultures céréalières de 25 % et de 75 % pour les cultures de fruits et de légumes. Ces chiffres dépendent de facteurs comme la culture, le sol, le climat et la haie concernée. *Van Vooren et al. (2017)* synthétisent les résultats de plusieurs études et obtiennent que, sur une distance équivalente à 2 fois la hauteur de la haie, la haie réduit les rendements de 29 %. En revanche, au-delà de cette zone et sur une distance jusqu'à 20 fois la hauteur de la haie, la présence de la haie augmente le rendement des grandes cultures de 6 %. La haie permet également d'augmenter les rendements des élevages principalement par la protection physique et l'ombre qu'elle procure aux animaux (*Wolton et al., 2014*).

Plusieurs explications existent pour justifier l'augmentation du rendement. Premièrement, l'effet brise-vent de la haie limite la verse et diminue l'évapotranspiration de la culture (*Forman et Baudry, 1984*). La haie diminue la propagation des nuisibles de la culture car elle contient leurs ennemis naturels. *Holland et al. (2017)* indiquent que 81% des études en Europe obtiennent une réduction de la présence de nuisibles sur les cultures grâce aux barrières végétales, avec un effet plus marqué sur les grandes cultures comme les céréales. De plus, les pollinisateurs attirés par la haie participent à la pollinisation des cultures sur une distance d'au moins 750 m (*Wolton et al., 2014*). Finalement, la haie augmente la sédimentation en amont de cette dernière ce qui impacte la fertilité du sol (cfr. §3.7.). En revanche, la haie peut influencer négativement le rendement à proximité de la haie car elle augmente la compétition pour les ressources dans sa zone racinaire (cfr. §3.6.).

Partie 3 : Matériels et méthodes

1. Région d'étude

La haie étudiée pour ce mémoire se situe à Vieux-Sart, un petit village non loin de Louvain-La-Neuve dans la Brabant Wallon en Belgique (Fig. 8). Cette zone se trouve dans le bassin hydrologique de l'Escaut (Annexe 3). Le climat est tempéré et est caractérisé par des étés relativement frais et humides et des hivers relativement doux et pluvieux. La température moyenne est de 10,1°C (*IRM, consulté en janvier 2018*). Dans la région, la précipitation annuelle est de 792 mm an⁻¹ avec une différence de précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide de 20 mm (*Climate-data, consulté en avril 2018*). Les vents sont d'en moyenne 3,9 m s⁻¹ avec une dominance sud-ouest (*IRM, consulté en janvier 2018*).



Figure 8: Localisation de la prairie d'étude dans le village de Vieux-Sart (Google maps, consulté en avril 2018)

La région est basée sur le Massif du Brabant schisteux, datant d'environ 500 millions d'année. Ce massif a été recouvert il y a 40 millions d'années par les sables bruxelliens apportés par les mers qui recouvraient la région. Ceux-ci ont à leur tour été recouverts par les loess. Il s'agit de dépôts limoneux d'origine éolienne qui ont recouvert nos sols il y a environ 20 000 ans. Leur origine est l'érosion des roches lors de la déglaciation ce qui a apporté une couche de roche fraîches calcaire et fine, à l'origine de nos sols limoneux (*Sonnet, 2005*).

2. Site d'étude

La haie étudiée (Fig. 9 et 10) est située sur les terres de la ferme De Marbaix de l'UCL, en bas d'un versant et le long d'un thalweg (50°40'23.88"N, 4°38'19.42"E). Elle est longue de 229 m et large de 1 à 2 m. Il n'existe pas de documentation quant à son origine exacte mais elle existe depuis au moins 50 ans car elle apparaît sur les orthophotoplans de 1971 (*Geoportail de la Wallonie, consulté en mai 2018*). L'évolution de la haie et de la parcelle entre

1971 et 2016 se trouve en annexe 4. La haie est adjacente à un bas-fond planté d'arbres.

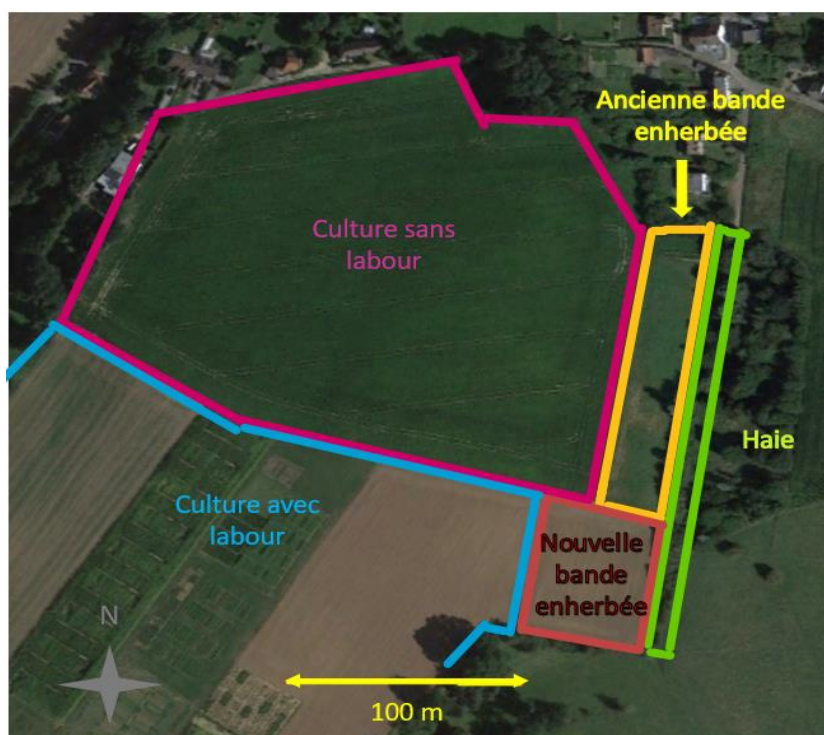


Figure 9: Vue aérienne de la prairie d'étude et zonification (Google Earth, consulté en avril 2018, zonification personnelle)

Les espèces végétales présentes sont principalement des prunus (*Prunus spinosa*) mais la liste complète des espèces se trouve en annexe 5 ². La végétation est bien dense mais irrégulière sur sa hauteur (Fig. 10). Selon Liagre (2006), les haies dominées par les prunus poussent de préférence dans les sols acides à neutre ($5,5 < \text{pH} < 7$), non compacts et humides. Les racines ont tendance à s'enfoncer profondément dans le sol, jusqu'à plus de 50 cm. Aux pieds des prunus, le sol a été colonisé par une végétation herbacée dense dominée par des ronces (*Rubus sp.*) et des orties (*Urtica dioïca*).



Figure 10: Photos de la haie d'étude, prises depuis l'amont : partie nord (gauche) et partie sud de la haie (droite)

² Voir aussi : FRASELLE DAPHNÉ. "Proposition d'un plan d'aménagement pour le réseau de haies du centre agronomique de Marbaix". Promoteur : Jacquemart A-L. UCL. Belgique. Année 2018.

Peu d'informations sont disponibles concernant la gestion de la haie. La dernière taille des branches date de 4 ans. Durant quelques années, cette haie a été la source de subsides dans le contexte des MAE. Cependant, la charge de travail comparée aux subsides était trop élevée ce qui a engendré l'arrêt de la demande de subvention.

La figure 11 présente un zoom de la topographie de la parcelle dont la carte complète se trouve en annexe 6. L'annexe 7 présente les pentes sur la parcelle, dont un zoom se trouve à la figure 13. Le côté est (aval) de la haie est caractérisé par une pente abrupte de plus d'un mètre de hauteur fortement érodée. Tout semble indiquer que la haie se trouve sur un talus formé par la déposition de sédiments mobilisés par l'érosion hydrique et le travail du sol sur le versant situé à l'ouest de la haie et/ou par érosion du thalweg situé à l'est de la haie. Le côté ouest (amont) de la haie est constitué d'une pente de 6-8 % sur une longueur de 135 mètres environ. On se trouve donc dans le cas d'une haie perpendiculaire aux écoulements de surface. Cette pente commence dans la culture et termine devant la haie. Elle s'adoucit légèrement sur les 2-3 derniers mètres en amont de la haie (Fig. 13). La haie n'est pas située dans un fossé ou sur un talus par rapport à la bande enherbée. On se trouve donc dans le cas d'une haie "à plat" où les écoulements de surface arrivent directement de la bande enherbée aux pieds de la haie.

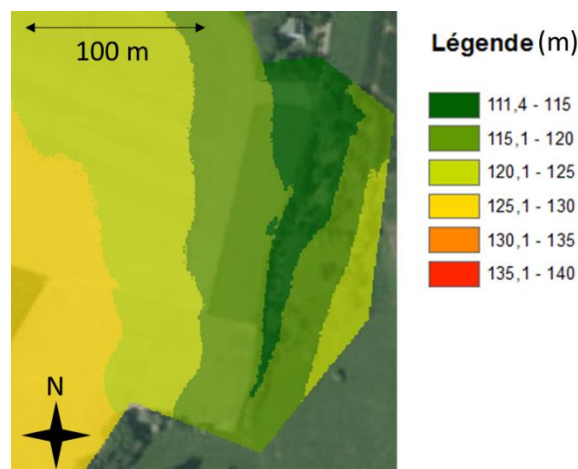


Figure 11 : Topographie (m) de la zone en amont de la haie (à partir de Geoportail de la Wallonie, consulté en avril 2018)

Sur les 30 derniers mètres de la pente, juste devant la haie, se trouve une bande enherbée (Fig. 9). Cette bande enherbée est constituée de deux parties : une partie ancienne (jaune) et une partie plus récente (rouge). L'ancienne bande enherbée a été implantée il y a, environ, 15-20 ans tandis que la nouvelle date du début de l'année 2017. Toutefois, l'ensemble de la bande enherbée a été labouré au printemps 2017 (04/04/2017) avant d'être ressemé et tassé avec un rouleau (05/04/2017). Le mélange semé se trouve en annexe 8. Au mois de mai 2017 (24/05), 200 kg de nitrate d'ammonium ont été épandus sur les bandes enherbées. L'herbe a été fauchée en mai, en août et en octobre 2017 et ramassée les deux dernières fois. L'ancienne bande enherbée est une acquisition récente de l'UCL (2017). La nouvelle bande enherbée faisait partie d'une plus grande parcelle cultivée depuis longtemps.

par l'UCL de façon traditionnelle avec labour (bleu). Une partie de cette parcelle a donc été transformée en nouvelle bande enherbée en 2017. En 2015, on y a cultivé du maïs puis de l'escourgeon l'année suivante. Ensuite, la parcelle a été couverte avec un mélange de vesce et d'avoine suivi de la plantation de pommes de terre en 2017. En rose sur la figure 9 se trouve une zone consacrée à la culture sans labour depuis plus de 15 ans récemment acquise par l'UCL. Une céréale d'hivers a été semée en automne 2017.

La figure 12 représente les différents types de sols de la parcelle étudiée selon la classification de la carte numérique des sols de Wallonie (CNSW) (*Walonmap, consulté en avril 2018*). Les bandes enherbées et la parcelle cultivées sont principalement composées de sol limoneux à drainage naturel favorable avec un développement de profil textural (Aba1), textural ou structural (AbB), ou absence de développement de profil (Abp). La zone sLba2_3 correspond à un sol sablo-limoneux à drainage naturel principalement favorable à développement de profil textural.



Figure 12: Parcelle d'étude avec la classification des sols selon la classe CNSW (*Walonmap, consulté en avril 2018*)

3. Stratégie d'échantillonnage

Pour ce travail, 3 transects (A, B et C) ont été étudiés, composés respectivement de 4, 4 et 3 postes. Le principal objectif de ce mémoire est d'analyser l'impact de la haie à différentes distances de cette dernière. Analyser plusieurs transects permet d'avoir une répétition des mesures. Cependant, les transects n'ont pas exactement les mêmes caractéristiques. Les transects A et B se trouvent dans l'ancienne bande enherbée tandis que le transect C se trouve dans la bande enherbée récente. De plus, la parcelle devant la haie est légèrement vallonnée, ce qui a un impact sur les écoulements des eaux de ruissellement dans la pente. La figure 11 présente la topographie de la parcelle et la figure 13 présente les pentes sur la parcelle ainsi que les transects analysés. Les transects A et C se trouvent dans un creux et correspondent à des axes d'écoulement, tandis que le transect B se trouve sur une légère

butte. A noter que la pente s'adoucit légèrement sur les 2-3 derniers mètres en amont de la haie. Entre les transects A et C, les caractéristiques de la haie semblent relativement uniformes.

Au sud du transect C, la haie devient moins dense et la pente est moins uniforme (Fig. 13). Par ailleurs, on sait que d'importantes accumulations de sédiments ont eu lieu au sud du transect C au cours de 15 dernières années suite à une érosion intense de la parcelle située en amont (*Biolders, communication personnelle*). Dans cette portion de la haie, les caractéristiques du sol risquaient donc d'être dominées par ces dépôts récents plutôt que par les effets biologiques de la haie. Etant limités dans le nombre de points de mesure réalisables, cette zone d'intense redéposition a été exclue.

En conclusion, les transects A et B ont donc un historique identique et se différencient uniquement par leur position topographique (creux vs. butte). La comparaison entre les transects A et B permettra de comprendre l'impact du vallonnement devant la haie sur les propriétés du sol. Les transects A et C ont une position topographique similaire mais un historique différent en amont de la haie. Comparer les transects A et C permettra de comprendre l'impact de l'ancienneté de la bande enherbée.

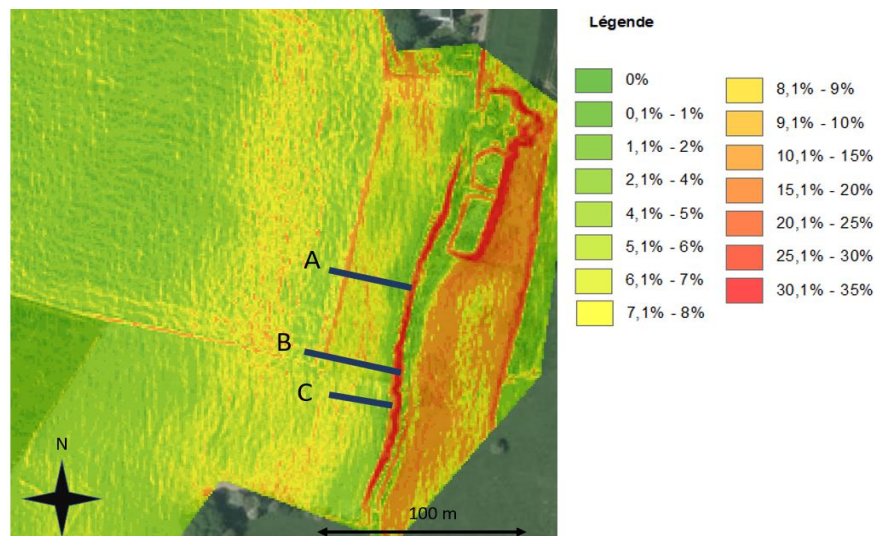


Figure 13: Pentes (%) sur la zone en amont de la haie avec la situation des transects (à partir de Geoportail de la Wallonie, consulté en avril 2018)

Les postes, quant à eux, ont été choisis en fonction de leur distance par rapport à la haie et de leur position dans la pente selon les critères suivants (Fig. 14) :

- 1 : sous la haie
- 2 : 2 m de la haie
- 3 : 15 m de la haie, milieu de la bande enherbée
- 4 : 2 m dans la culture

Ces postes ont été choisis afin d'analyser l'influence de la haie à différentes distances de cette dernière. Le poste 2 permet d'analyser si la haie a un impact sur le sol autour d'elle. Le poste 3 a été choisi suffisamment éloigné de la haie pour qu'on puisse supposer que le sol

n'y soit pas affecté par la présence de la haie mais pour qu'il ne soit pas non plus affecté par le léger adoucissement de la pente à la transition culture-bande enherbée.

Le poste 4 sert de référence 'sol cultivé' avec lequel comparer les caractéristiques de la haie et de la bande enherbée. Il n'y a pas de poste 4 pour le transect C. En effet, la culture en place en amont de la nouvelle bande enherbée est différente de celles trouvées aux postes 4 des transects A et B. Le but du mémoire n'étant pas de comparer des cultures entre elles, nous avons opté de ne pas échantillonner le poste 4 du transect C. Le tableau 3 présente une synthèse du plan d'échantillonnage.

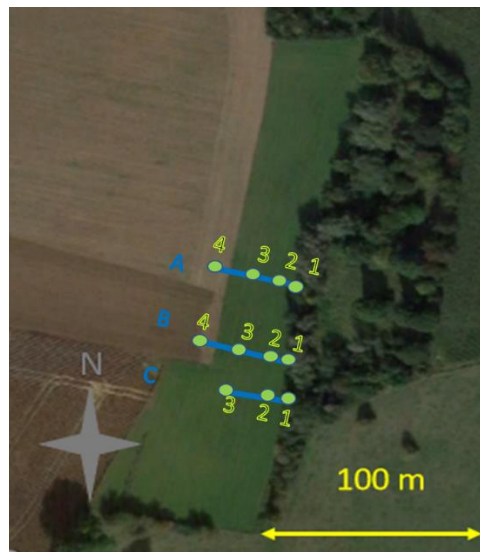


Figure 14: Schéma localisant les transects et les postes étudiés (Google earth, consulté en janvier 2018 avec dessins personnels)

Tableau 3 : Synthèse des points d'échantillonnage

Nom	Prairie permanente	Dénivelé	Poste
A1	Ancienne	Creux	Dans la haie
A2	Ancienne	Creux	2 m de la haie
A3	Ancienne	Creux	15 m de la haie, milieu de la pente
A4	Ancienne	Creux	2 m dans la culture
B1	Ancienne	Butte	Dans la haie
B2	Ancienne	Butte	2 m de la haie
B3	Ancienne	Butte	15 m de la haie, milieu de la pente
B4	Ancienne	Butte	2 m dans la culture
C1	Récente	Creux	Dans la haie
C2	Récente	Creux	2 m de la haie
C3	Récente	Creux	15 m de la haie, milieu de la pente

4. Analyses chimiques et granulométriques du sol

L'analyse chimique a été réalisée sur des échantillons prélevés en octobre 2017. Les échantillons sont obtenus sur les 15 premiers centimètres de profondeur. Un échantillon composite de trois points d'échantillonnage est analysé par poste. Les analyses ont été effectuées par le Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité (CPAR), situé à La Hulpe.

A. *Granulométrie*

La granulométrie est mesurée par sédimentation avec la méthode de la pipette dérivée de la norme NF-X 31-107. Différentes fractions ont été séparées : les sables grossiers ($> 200 \mu\text{m}$), les sables fins ($> 50 \mu\text{m}$ et $\leq 200 \mu\text{m}$), les limons grossiers ($> 20 \mu\text{m}$ et $\leq 50 \mu\text{m}$), les limons fins ($> 2 \mu\text{m}$ et $\leq 20 \mu\text{m}$) et les argiles ($< 2 \mu\text{m}$). Les fractions sont exprimées en pourcent de la fraction du sol plus fine que 2 mm (*Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité, 2007*).

B. pH_{H_2O} et pH_{KCl}

Le pH est déterminé selon la norme NF ISO 10390. Le sol est dilué avec une fraction volumique de 1 : 5 dans de l'eau déminéralisée pour le pH_{eau} et dans une solution de chlorure de potassium 1 N pour le pH_{KCl} . Le pH est déterminé avec un pHmètre (*Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité, 2007 ; Organisation internationale de normalisation, consulté en avril 2018*).

C. *Carbone organique*

La teneur en carbone organique (C_{org}) est déterminée selon la norme dérivée de NF ISO 10694. Il est dosé par combustion sèche à 400°C après décarbonatation des échantillons. Le C_{org} est mesuré en g kg^{-1} de sol (*Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité, 2007*).

D. *Indice de battance*

L'indice de battance (IB) est calculé à partir des équations 2 ou 3 qui dépendent de la granulométrie du sol et de la teneur en matière organique (MO). Le choix de l'équation dépend du pH_{eau} du sol. Plus l'indice de battance augmente, plus le sol est sensible à la battance (*Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité, 2007*).

$$\text{Si } pH_{eau} \leq 7 \text{ alors } IB = \frac{(1,5 \cdot \text{limon}_{fin} + 0,75 \cdot \text{limon}_{grossier})}{(\text{argile} + 10 \cdot MO)} \quad \text{Equation 2}$$

$$\text{Si } pH_{eau} > 7 \text{ alors } IB = \frac{(1,5 \cdot \text{limon}_{fin} + 0,75 \cdot \text{limon}_{grossier})}{(\text{argile} + 10 \cdot MO)} - 0,2 \cdot (pH_{eau} - 7) \quad \text{Equation 3}$$

Avec les fractions granulométriques et la matière organique (MO) en pourcents.

E. *Éléments disponibles (Mg, Ca K et P)*

Les éléments échangeables sont dosés selon la dérivée de la norme NF X 31-120. Ils sont d'abord extraits à l'acétate d'ammonium 0,5N-EDTA 0,002 mol/l, à un pH de 4,65. Le rapport masse/volume est de 1/5. Ensuite, les éléments K, Mg et Ca sont dosés par

spectrophotométrie d'absorption atomique dans la flamme air-acétylène. Le phosphore est dosé au spectromètre UV visible, méthode colorimétrique au bleu de molybdène à la longueur d'onde de 880 nm (*Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité, 2007*).

F. Azote total

La teneur totale en azote (N_{tot}) est déterminée selon la norme dérivée de NF ISO 13878. La teneur totale en azote est dosée par combustion sèche (*Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité, 2007*).

G. Rapport carbone/azote

Cette valeur est calculée en divisant le C_{org} dosé par combustion sèche (méthode dérivée de la norme ISO 10694) par l' N_{tot} dosé par combustion sèche (voir ci-dessus) (*Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité, 2007*).

5. Courbe de rétention

A. Courbe de rétention

La courbe de rétention présente la teneur en eau volumique contenue dans le sol à différentes succions (pF), qui est le logarithme de la charge matricielle (h, en cm) (Tableau 4). La courbe de rétention est déterminée par équilibration d'échantillons de sol à différentes charges matricielles. Trois dispositifs sont utilisés selon la gamme de charge matricielle : le 'bac à sable', la casserole à basse pression et la casserole à haute pression. Pour ces expériences, tous les transects (A, B et C) et tous les postes (1,2,3 et 4) ont été mesurés avec trois répétitions chacun. La prise d'échantillons a eu lieu début octobre 2017. Les mêmes échantillons non perturbés contenus dans des anneaux (Kopeckys) de 100 cm³ et 5 cm de hauteur sont utilisés d'abord pour le bac à sable puis pour la casserole à basse pression. Pour la casserole à haute pression, l'expérience est réalisée sur des échantillons déstructurés. Dans les deux cas, les échantillons ont été prélevés en surface du sol (environ 3-8 cm de profondeur), les résidus et les plantes ayant préalablement été retirés.

Trois points clefs de la courbe de rétention sont définis :

- θ_{sat} : teneur en eau volumique avant l'application d'une succion (% volumique)
- θ_{cc} : teneur en eau à la capacité au champ, par définition, cela correspond à la teneur en eau volumique après ressuyage du sol saturé pendant 48h (% volumique)
- θ_{ppf} teneur en eau à la capacité au champ ; par définition, cela correspond à la teneur en eau volumique après ressuyage du sol préalablement saturé pendant 48h. Dans la présente étude, elle est assimilée à la teneur en eau pour une charge matricielles de - 3 m (% volumique)

Tableau 4 : Synthèse des pressions et des échantillons utilisés pour la courbe de rétention

Expérience		Bac à sable				Casserole à basse pression			Casserole à haute pression		
Echantillons		Echantillon structuré (100 cm³)							Echantillons déstructurés		
Pression	pF pratique	0,48	1	1,49	1,84	2	2,477	3	3,49	4	4,2
	pF théorique	0,5	1	1,5	2	2	2,5	3	3,5	4	4,2
	h (m)	-0,03	-0,1	-0,31	-0,7	-1	-3	-10	-31	-100	-158
Point de référence							Capacité au champ (CC)				Point de flétrissement permanent (PFP)

Initialement, les échantillons ont été saturés durant une semaine dans un bac de saturation contenant de l'eau distillée à laquelle on a rajouté du sulfate de calcium dihydraté 0,05 mol L⁻¹ (photo en annexes 9 et 10). Les échantillons sont saturés par capillarité grâce à une lame d'eau maintenue constante par un système de Mariotte. La lame d'eau est ensuite montée progressivement jusqu'au-dessus des échantillons sur les dernières 48h afin d'assurer la saturation. Une fine toile fixée au bas de l'échantillon permet d'éviter la perte de sol durant les différentes expériences sans entraver le passage de l'eau.

Pour chaque succion appliquée, la masse humide de l'échantillon est mesurée à l'équilibre. Grâce à la masse sèche des échantillons (déterminée en fin de processus), il est alors possible de déterminer la teneur en eau volumique des échantillons pour chaque succion, en sachant que la densité de l'eau vaut 1 g cm⁻³ (ρ_{eau}) (Equation 4) (Hiller, 1998).

$$\theta_v = \left(\frac{m_h - m_s}{V_{\text{échantillon}}} \right) / \rho_{\text{eau}} \cdot 100 \quad \text{Equation 4}$$

Avec

θ_v : teneur en eau volumique (% volumique)

m_h : masse humide (g)

m_s : masse sèche (g)

$V_{\text{échantillon}}$: volume de l'échantillon (cm³)

Le bac à sable (photo en annexe 11) permet d'appliquer une charge matricielle de 0 à -70 cm. Il est constitué d'un bac de sable séparé des échantillons par une membrane poreuse. La charge matricielle désirée est appliquée dans le bac à sable et transférée aux échantillons par l'intermédiaire de la membrane. Le temps d'équilibrage est d'une semaine pour chaque pression sauf pour la succion de -70 cm qui est de deux semaines. Les échantillons sont pesés deux jours avant le temps d'équilibrage afin de vérifier que le poids est stable sur les deux derniers jours et donc que l'équilibre est atteint après une semaine.

Dans la casserole à basse pression (photo en annexe 11), la succion peut aller de -1 à -10 m. La pression est exercée par-dessus l'échantillon et l'eau est évacuée par le bas en traversant une plaque poreuse. Le temps d'équilibrage pour chaque pression est d'une semaine. Comme ci-dessus, les échantillons sont également mesurés 2 jours avant le temps d'équilibrage. A la fin de cette expérience, les échantillons sont d'abord utilisés pour le perméamètre (cfr. §8.2) puis placés à l'étuve (105°C) durant 2-3 jours afin de déterminer leur poids sec.

Dans la casserole à haute pression, la succion peut aller jusqu'à -158 m. Les échantillons pour cette expérience sont différents des expériences précédentes car ils sont déstructurés. En effet, on considère que la teneur en eau à des succions aussi élevées n'est plus liée à la structure du sol mais bien à la microporosité, qui elle-même dépend de la texture du sol. Le sol est donc mélangé avec de l'eau jusqu'à obtenir une pâte homogène puis il est disposé dans des anneaux d'environ 15 cm³. La teneur en eau volumique est obtenue en multipliant la teneur en eau massique par la densité apparente obtenue après le séchage des kopecys et en divisant par la densité de l'eau (ci-dessus).

B. Paramètre de Van Genuchten

Van Genuchten (1990) propose un modèle empirique pour la courbe de rétention, de forme sigmoïdale. Cette fonction donne la teneur en eau en fonction de la succion incluant les paramètres suivants : θ_s , θ_r , α , n et m (Equations 5 et 6).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_{sat} - \theta_r)}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad \text{Équation 5}$$

Et

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \text{Équation 6}$$

Avec

$\theta(h)$: teneur en eau volumique en fonction de h (% volumique)

θ_{sat} : teneur en eau volumique à saturation (% volumique)

θ_r : teneur en eau volumique résiduelle (% volumique)

α : coefficient de forme (cm⁻¹)

h : charge matricielle (cm)

n et m : coefficient de forme ($n > 1$) (-)

En général, les 4 paramètres de l'équation sont optimisés. Pour ce travail, seuls les paramètres α et n ont été approximés. Le paramètre θ_r n'ayant pas été mesuré et sa définition étant floue dans la littérature, il y a été remplacé par le θ_{PEP} qui est la valeur la plus proche mesurée. La θ_{sat} est remplacée par la valeur mesurée. L'équation a été optimisée en utilisant la fonction solver de excel. Pour cela, la somme des carrés de écarts entre le résultat obtenu expérimentalement pour $\theta(h)$ et la fonction de Van Genuchten a été minimisée.

6. Réserve en eau utile

La réserve en eau utile (REU) est par définition la différence entre la teneur en eau au point de flétrissement et la capacité au champ (Equation 7). Cette réserve en eau correspond à la quantité d'eau qui est maintenue dans les mésopores, c'est-à-dire les pores compris entre 5, 19 et 0,1 μm de diamètre. Cette eau est retenue par les forces capillaires dans le sol et absorbable par les plantes (*Ridremont et al., 2012 ; Hiller, 1998*).

$$REU = \theta_{CC} - \theta_{PFP} \quad \text{Equation 7}$$

Avec

θ_{CC} : teneur eau volumique à la capacité au champ (% volumique)

θ_{PFP} : teneur en eau volumique au point de flétrissement (% volumique)

7. Densité apparente, porosité et macroporosité

A. Densité apparente

La densité apparente (g cm^{-3}), notée ρ_a , est calculée en divisant le poids sec des échantillons contenus dans les kopeckys par le volume des kopeckys. Le poids sec des échantillons est obtenu après séchage pendant environ 2-3 jours à l'étuve à 105°C.

B. Porosité

La porosité (%) est calculée par l'équation 8. Pour ce travail, la densité réelle (ρ_r) est supposée égale à 2,65 g cm^{-3} qui est la densité réelle du quartz (*Hiller, 1998*).

$$\text{Porosité} = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) \cdot 100 \quad \text{Equation 8}$$

Avec

ρ_a : densité apparente (g cm^{-3})

ρ_r : densité réelle (g cm^{-3})

C. Macroporosité

La macroporosité (%) dans ce travail est le rapport entre le volume des pores ayant un diamètre plus grand que 5,19 μm et le volume total de l'échantillon (Equation 9). Cette valeur a été choisie car elle se rapproche très fortement de la taille des pores au-dessus de laquelle l'eau draine librement sous l'effet de la gravité (*Ridremont et al., 2012*).

$$\text{Macroporosité} = \left(\frac{m_{\text{sat}} - m_{CC}}{V_{\text{échantillon}}} \right) / \rho_{\text{eau}} \cdot 100 \quad \text{Equation 9}$$

Avec

m_{sat} : masse de l'échantillon à saturation (g)

m_{CC} : masse de l'échantillon à la capacité au champ (g)

$V_{\text{échantillon}}$: volume de l'échantillon (cm^3)

ρ_{eau} : densité de l'eau (1 g cm^{-3})

8. Conductivité hydraulique à saturation

Dans ce travail, la perméabilité du sol est quantifiée par la conductivité hydraulique à saturation (K_s). Ce paramètre est caractéristique du sol et représente la capacité d'infiltration du sol lorsque ce dernier est saturé et que seules les forces de gravité agissent. Deux types de mesures ont été réalisés : l'infiltromètre simple anneau à charge constante, réalisé en champ, et le perméamètre à charge constante, réalisé en laboratoire.

8.1. Infiltromètre à charge constante

A. Mesure du débit infiltré

L'infiltromètre simple anneau à charge constante est une mesure réalisée en champ au milieu du mois d'octobre 2017. La figure 15 est un schéma de l'infiltromètre et l'annexe 12 présente des photos de la mesure.

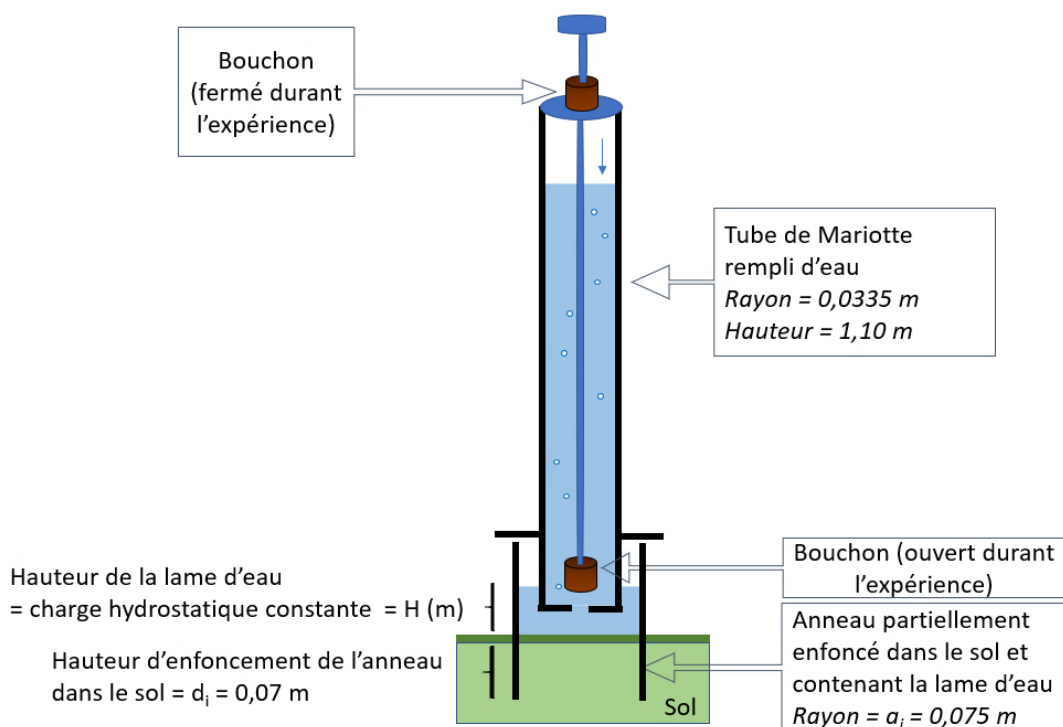


Figure 15: Schéma de l'infiltromètre

Pour commencer, un anneau de 15 cm de diamètre est partiellement enfoncé dans le sol sur une profondeur (d_i) d'approximativement 7 cm. Le bord qui est enfoncé dans le sol est préalablement enduit de graisse afin de combler les espaces entre l'anneau et le sol, évitant ainsi les écoulements préférentiels sur les bords. L'anneau est enfoncé verticalement avec

précaution afin de préserver la structure du sol. Ensuite, le sol est recouvert d'une litière. Cette étape permet d'éviter de modifier la structure du sol ainsi que la formation d'une croûte de battance lors de l'apport d'eau.

L'anneau est rempli d'eau durant une quinzaine de minutes avant le début de la mesure pour amener le sol proche de la saturation. Une lame d'eau d'environ 10 cm de hauteur est ensuite maintenue dans l'anneau via un réservoir d'eau fonctionnant selon le principe d'une bouteille de Mariotte. La hauteur de cette lame d'eau correspond à la charge hydrostatique (H). Une fois que la lame d'eau dans l'anneau est stabilisée, la diminution du niveau de l'eau dans le réservoir de Mariotte est mesurée pendant 30 minutes, d'abord toutes les 5 minutes puis toutes les 2 minutes. La vitesse d'infiltration est plus élevée au début de l'expérience, décroît ensuite, pour finir par se stabiliser les dernières minutes de la mesure pour tendre vers un régime permanent (Fig. 16). En pratique, pour chaque répétition, la charge hydrostatique a été mesurée. Le débit d'infiltration utilisé pour les calculs de K_s correspond à la moyenne des débits une fois que le régime permanent est atteint. Le plus souvent, cela correspond à la moyenne des débits sur les 10 dernières minutes de l'expérience (Biielders, non publié ; Biielders, consulté en mars 2018).

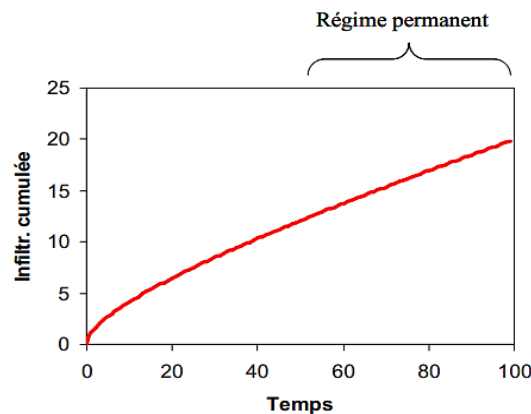


Figure 16: Volume cumulé de l'infiltration en fonction du temps (Biielders, non publié)

B. Calcul de K_s

Dans un sol non saturé, l'écoulement de l'eau à partir de l'anneau se fait en réponse aux forces de gravité (potentiel gravitationnel), de la charge hydrostatique (potentiel hydrostatique) et aux forces de capillarité (potentiel matriciel). Dès que le front d'humectation a dépassé la base de l'anneau, l'écoulement devient tridimensionnel (Fig. 17).

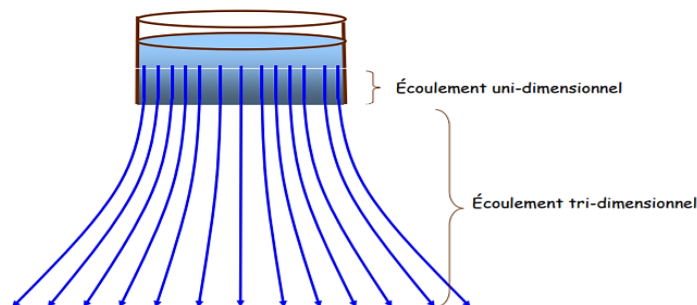


Figure 17: Schéma représentant l'écoulement de l'eau dans le sol à travers un simple anneau (Biielders, non publié)

Reynolds and Elrick (1990) font le lien entre le débit infiltré à partir d'un anneau et le K_s en tenant compte du caractère tridimensionnel des écoulements. Cette équation est une solution analytique 3D approximative développée sur base de l'équation de Wooding pour un régime permanent (Equation 10). Le premier terme représente l'effet de la capillarité. Le deuxième terme représente l'effet de la charge hydrostatique, c'est-à-dire de la lame d'eau dans l'anneau. Pour finir, le troisième terme représente l'effet de la gravité (*Biielders, non publié*).

$$Q = \frac{a_i \cdot \phi m}{G} + \frac{a_i \cdot H \cdot K_s}{G} + \pi \cdot a_i^2 \cdot K_s \quad \text{Équation 10}$$

Avec

- Q : débit d'infiltration ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- a_i : rayon de l'anneau (m)
- ϕm : potentiel de flux matriciel
- K_s : conductivité hydraulique à saturation (m s^{-1})
- H : charge hydrostatique (m)
- G : paramètre de forme (-) (cfr. Equation 13)

Il existe plusieurs façons de résoudre cette équation comportant deux inconnues : K_s et ϕm . Il est par exemple possible de réaliser l'expérience avec deux anneaux de diamètres différents ou bien avec deux lames d'eau différentes, ce qui nous donne un système de deux équations à deux inconnues. Dans ce travail, nous posons l'hypothèse que la courbe de conductivité hydraulique est exponentielle (cfr. Equation 12) et que le sol est initialement pas trop proche de la saturation ce qui permet de simplifier ϕm par $K_s \alpha_g^{-1}$ (*Biielders, non publié ; Hiller, 1998*). Dès lors, l'équation simplifiée dont K_s a été isolé est la suivante :

$$K_s = \frac{G \cdot Q}{\alpha_g \cdot H + \pi \cdot a_i^2 \cdot G + a_i / \alpha_g} \quad \text{Équation 11}$$

Avec

- K_s : conductivité hydraulique à saturation (m s^{-1})
- Q : débit de l'eau s'écoulant dans le sol ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- H : charge hydrostatique (m)
- a_i : rayon de l'anneau d'infiltration (m)
- α_g : paramètre de l'équation de Gardner (m^{-1})
- G : paramètre de forme (-)

Le paramètre α_g est le paramètre qui apparaît dans l'équation de Gardner qui décrit la forme de la courbe de conductivité hydraulique du sol (Equation 12). Ce paramètre est basé essentiellement sur des considérations structurales et texturales. Pour les sols sablo-limoneux et les sols limoneux comme celui étudié dans ce travail, on lui attribue la valeur de 12 m^{-1} (*Reynolds et Elrick, 1990*). Ce paramètre augmente quand la capillarité du sol est faible, à cause d'une texture grossière ou bien d'une structure bien développée.

$$K(h) = K_s \cdot e^{\alpha_g \cdot h} \quad \text{Équation 12}$$

Avec

K_s : conductivité hydraulique à saturation (m s^{-1})

h : charge matricielle du sol (m)

Le paramètre G est adimensionnel et prend en compte les interactions du rayon de l'anneau (a_i) et de la profondeur de son insertion dans le sol (d_i) avec la charge hydrostatique, les forces de gravité et de capillarité. *Reynolds and Elrick (1990)* ont déterminé que G était quasiment indépendant des propriétés hydriques du sol (K_s et α_g) et de H pour une valeur de H plus grande que 5 cm. L'équation 13 permet de calculer la valeur de G qui vaut 0,479 dans notre cas.

$$G = 0,316 \frac{d_i}{a_i} + 0,184 \quad \text{Équation 13}$$

Avec

d_i : enfoncement de l'anneau dans le sol (m)

a_i : rayon de l'anneau d'infiltration (m)

8.2. Perméamètre à charge constante

A. Mesure du débit infiltré

Cette mesure est réalisée sur des échantillons de sol non perturbés contenus dans des kopeckys de 100 cm^3 ce qui permet de conserver la structure du sol. Les échantillons sont les mêmes que pour la courbe de rétention. Ils ont donc préalablement servi pour le bac à sable et la casserole à basse pression avant cette mesure.

Dans un premier temps, les échantillons sont resaturés dans un bac de saturation durant 3 à 5 jours. La lame d'eau a été montée progressivement durant les dernières 24 h afin d'assurer la saturation tout en évitant l'emprisonnement de bulles d'air dans les pores. Les échantillons étaient considérés saturés lorsque leur face opposée à la lame d'eau devenait luisante. Les échantillons sont ensuite placés dans le perméamètre (Fig. 18), après avoir enduit les bords de graisse pour éviter les écoulements préférentiels sur les bords du kopecky. Les deux extrémités du kopecky sont fermées par une plaque rigide perforée protégeant la structure du sol. L'eau utilisée dans le système est de l'eau distillée à laquelle nous avons rajouté du sulfate de calcium dihydraté $0,05 \text{ mol l}^{-1}$. Le but est de travailler avec de l'eau dont la composition se rapproche de l'eau présente dans le sol afin d'éviter des effets de dispersion des particules d'argile ce qui risquerait de colmater les pores et biaiser les mesures.

Grâce à la pompe, l'eau est maintenue à la même hauteur durant toute l'expérience dans le bac à gauche de la figure 18. Le bac à eau au centre contient les échantillons sur lesquels repose une lame d'eau. L'eau venant du bac s'infiltré dans l'échantillon par le bas et

une connexion entre la lame d'eau et la burette permet d'évacuer l'eau infiltrée vers la burette tout en maintenant la lame d'eau constante au-dessus de l'échantillon. La différence entre la hauteur de la lame d'eau dans le bac de gauche et la lame d'eau au-dessus de l'échantillon correspond au gradient de charge totale (H_p).

La quantité d'eau qui a percolée à travers l'échantillon est mesurée dans la burette à intervalle de temps régulier. Le régime permanent est atteint lorsque le débit arrivant dans la burette est stable (cfr. §8.1.) (LARABI, consulté en mars 2018). Au total, le débit a été mesuré 4 fois successivement.

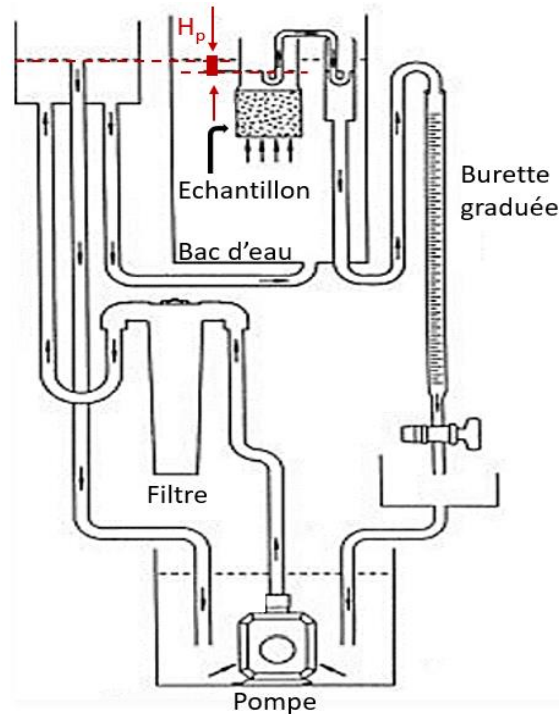


Figure 18: Schéma du perméamètre à charge constante (Bielders et Javaux, 2016-2017 avec modifications personnelles)

B. Calcul de K_s

Le K_s est calculé grâce à l'équation de Darcy (Equation 14) valable pour un écoulement avec un flux d'eau laminaire, une charge constante et en régime permanent. La loi de Darcy formalise les écoulements pour un solide homogène, isotrope et stable et pour un fluide homogène, isotherme et incompressible (Hiller, 1998).

$$Q = K_s \cdot A \cdot \frac{H}{z} \quad \text{Équation 14}$$

Avec :

Q : débit ($\text{mm}^3 \text{ h}^{-1}$)

K_s : conductivité hydraulique à saturation (mm h^{-1})

A : surface du kopecky (mm^2)

H_p : gradient de charge totale (mm)

z : hauteur du kopecky (mm)

9. Densité racinaire

A. *Prélèvement des échantillons*

La mesure de densité racinaire permet de faire le lien entre la quantité de racines dans un sol et la résistance de ce sol à l'érosion en cas d'écoulement concentré. Pour des raisons logistiques et de charge de travail, seuls les transects A et B dans l'ancienne bande enherbée ont été analysés, avec un poste sous la haie (poste 1) et un seul poste dans la prairie permanente (poste 3). Ainsi, 3 échantillons ont été prélevés pour les postes A1, A3, B1 et B3 le 26 mars 2018. Les échantillons ont été prélevés grâce un kopecky de 305 cm³ et 6 cm de hauteur enfoncés délicatement sur les 15 premiers centimètres de sol, les résidus et plantes à la surface du sol ayant préalablement été enlevés. Ensuite, les racines ont été séparées du sol grâce à un jet d'eau et un tamis comportant des mailles de 0,841 mm.

B. *Mesure du poids et de la longueur racinaire*

Afin de mesurer la longueur racinaire, les racines ont été étalées dans une boîte de pétri de 20x20 cm puis recouvertes d'une fine couche d'eau et d'une feuille de plastique transparent, le tout étant scanné. L'image obtenue est traitée grâce au logiciel libre ImageJ qui permet de mesurer la longueur totale des racines sur l'image. Cette dernière est cadrée, l'échelle est fixée puis les pixels des racines sont identifiés. Par la suite, les petites particules parasites sont éliminées et la fonction "skeletonize" permet d'obtenir un squelette des racines, c'est-à-dire que les racines sont réduites à un pixel de large. Le nombre de pixel représentant une racine est alors sommé pour obtenir la longueur racinaire totale de l'image. Certaines racines avec un diamètre plus important ont dû être mesurées manuellement car elles dépassaient la hauteur de la couche d'eau. Les réseaux de racines fibreuses et trop fines pour être scannées sont également séparés de l'échantillon. La masse racinaire de chaque échantillon est pesée après séchage des racines pendant 2 jours à 65°C (Vannoppen, 2017). Pour finir, la longueur racinaire des racines fibreuses est obtenue par l'équation 15.

$$RL_{rf} = \frac{RL_{rs}}{m_{rs}} \times m_{rf} \quad \text{Équation 15}$$

Avec

RL_{rf} : longueur racinaire des racines fibreuses séparées (m)

RL_{rs} : longueur racinaire des racines scannées (m)

m_{rs} : masse des racines scannées après séchage (g)

m_{rf} : masse des racines fibreuses séparées après séchage (g)

C. *Calcul du ratio de détachement du sol*

Vannoppen et al. (2017) étudient la sensibilité du sol à l'érosion concentrée grâce à un indicateur : le ratio de détachement du sol (SDR). Plus SDR diminue, moins le sol subit de l'érosion. Ils présentent une équation reliant SDR soit avec la densité racinaire (RD) (Equation 16), c'est-à-dire la masse de racines sèches sur un volume de sol, soit avec la densité de

longueur racinaire (RLD) (Equation 17), c'est-à-dire la longueur des racines sur un volume de sol. Ces équations contiennent également 2 paramètres : b_v et d_v . Selon *Vannoppen et al. (2017)*, b_v vaut 2,63 et d_v vaut 0,02, pour un sol principalement limoneux avec des plantes ayant un système racinaire fibreux.

$$SDR = e^{-b_v \cdot RD} \quad \text{Équation 16}$$

$$SDR = e^{-d_v \cdot RLD} \quad \text{Équation 17}$$

Avec

SDR : ratio de détachement du sol (-)

b_v et d_v : paramètres de la régression (-) ($b_v = 2,63$ et $d_v = 0,02$)

RD : densité racinaire (kg m^{-3})

RLD : densité de longueur racinaire (km m^{-3})

Vannoppen et al. (2017) proposent également une équation qui relie SDR avec la densité racinaire, le pourcentage de sable dans le sol et la densité apparente (Equation 18).

$$SDR = e^{(-6,80 - 0,08 \cdot \text{sable} + 4,85 \cdot \rho_a) \cdot RD} \quad \text{Équation 18}$$

Avec

Sable : teneur en sable du sol (%)

ρ_a : densité apparente (g cm^{-3})

RD : densité racinaire (kg m^{-3})

10. Simulateur de ruissellement et de sédimentation

Le simulateur de ruissellement permet d'évaluer la résistance de la haie aux écoulements de surface. Le ruissellement qui arrive à la haie forme un ressaut hydraulique suivi par une zone calme en amont de cette dernière (en bleu foncé sur la figure 19). Avec le débit et les dimensions de la zone calme devant la haie, il est possible d'estimer la sédimentation en amont de la haie (*Deloge, 2017*). Cette mesure est réalisée le 7 mai 2018 avec trois répétitions au niveau du transect A. Le simulateur est composé d'un canal en bois de 6 m de long sur 0,5 m de large, divisé en trois sous parties qui se fixent à l'aide de vis (Fig. 19 et 20). Dans le simulateur, les jonctions sont renforcées avec du scotch afin de limiter les fuites d'eau. Chaque partie du canal comporte 4 pieds réglables en hauteur afin d'appliquer la pente souhaitée sur l'ensemble du simulateur de ruissellement. Dans ce travail, la pente appliquée est de 6-8 %, ce qui se rapproche assez fort de la pente de l'ensemble de la bande enherbée. Une attention particulière a été apportée pour que le simulateur soit droit afin d'assurer que la lame d'eau soit régulière sur toute la largeur du simulateur.

En amont de celui-ci se trouve un bac plus petit et perforé de 8 trous de 2,4 cm de diamètre qui déversent l'eau dans le simulateur. Ces trous régulent un débit stable d'environ

$1,32 \text{ l s}^{-1}$ pour 0,5 m de large, le but étant de se rapprocher le plus possible du débit utilisé par *Deloge (2017)*. Il est également perforé de 3 trous d'environ 5 cm de diamètre situés à 13,5 cm du fond du bac. Ceux-ci permettent d'évacuer le trop plein d'eau et donc de maintenir une lame d'eau constante (H) de 13,5 cm. Le bac est rempli constamment d'eau par une citerne agricole en évitant les remous.

En aval du simulateur se trouve la haie étudiée. Le sol devant la haie a été égalisé et légèrement creusé afin que le simulateur finisse exactement devant la haie et au niveau du sol. Des plaques sont fixées à la fin du simulateur afin de prolonger les bords du canal dans la haie et de maintenir le flux d'eau sur la largeur du simulateur.

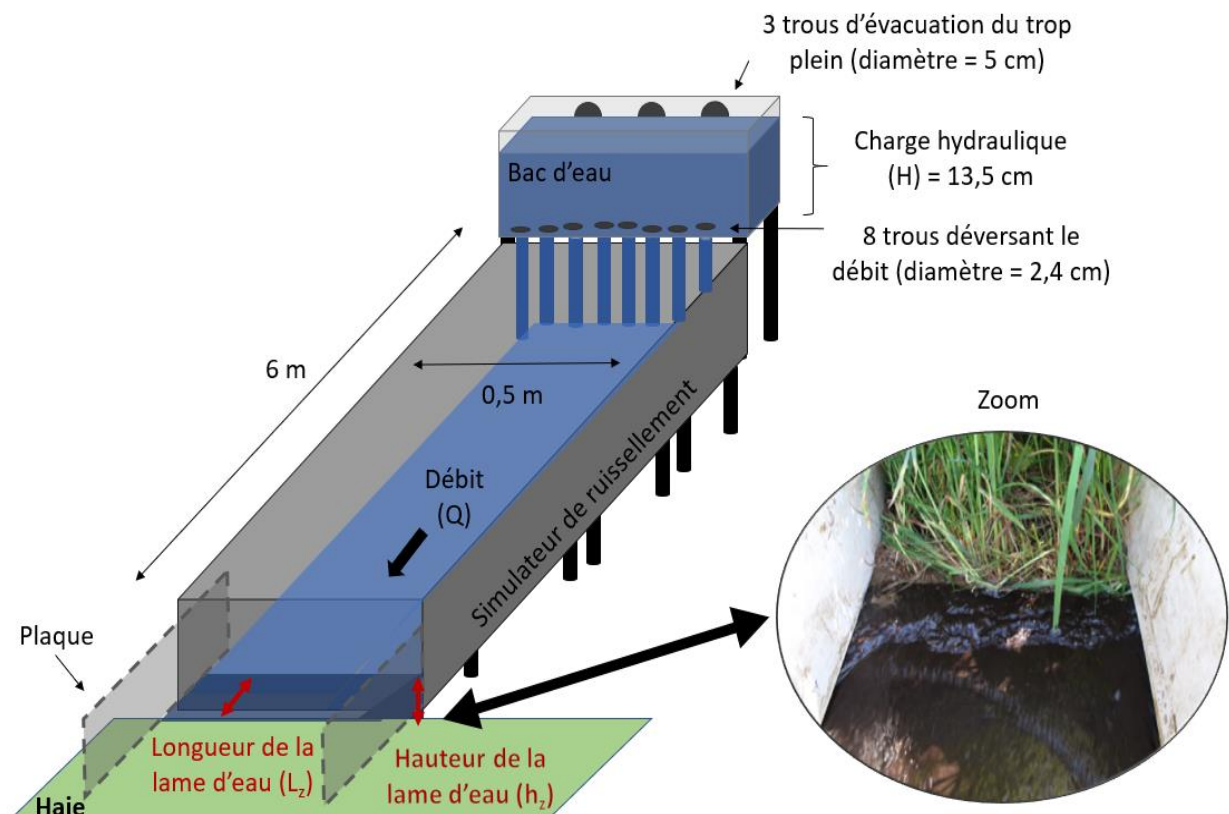


Figure 19: Schéma du simulateur de ruissellement et de sédimentation



Figure 20 : Photos du simulateur de ruissellement et de sédimentation

Pour chaque mesure, les paramètres suivants sont mesurés : la pente du simulateur (i), la hauteur de la zone calme (à l'entrée de la haie) (h_z), la longueur de la zone calme (L_z). Avec h_z et L_z et en connaissant la largeur du simulateur (L_s) ainsi que le débit (Q), il est possible de calculer le temps de résidence moyen de l'eau dans la zone calme (t_R) (Equation 19). Pour finir, *Deloge (2017)* propose une relation mathématique ($R^2=0,72$) qui fait le lien entre t_R et l'efficacité de la sédimentation (g), c'est-à-dire le pourcentage de terre déposée dans le canal en amont d'un barrage filtrant (Annexe 13 et Equation 20). Le canal de *Deloge (2017)* mesure 1 m de large pour un débit de 3 l s^{-1} , ce qui est comparable au débit de $1,32 \text{ l s}^{-1}$ pour un canal de 0,5 m de large.

$$t_R = \frac{((h_z \cdot L_z)/2) \cdot L_s}{Q} \quad \text{Équation 19}$$

$$g = 13,62 + 1,346 \cdot t_R \quad \text{Équation 20}$$

Avec

t_R : temps de résidence (s)

h_z : hauteur de la zone calme (m)

L_z : longueur de la zone calme (m)

L_s : largeur du simulateur de ruissellement = 0,5 m

Q : débit ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) = $0,00132 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

g : l'efficacité de sédimentation (%)

11.Épaisseur de l'horizon humifère

Grâce à une tarière, nous avons pu observer le profil du sol sur un mètre de profondeur. Ceci ne donne pas de résultats quantitatifs précis mais permet d'évaluer la profondeur de l'horizon humifère. Le profil a été réalisé pour chacun des trois transects à 7 postes : 0, 1, 2, 5, 10 et 15 m de la haie.

12.Analyse statistique

Pour la majorité des propriétés mesurées, 3 répétitions par poste ont été réalisées dans le but de caractériser la variabilité du sol au sein d'un même poste. Dans ces cas-là, les graphes sont présentés avec un écart type calculés avec la fonction "ecarttype" de excel sur l'ensemble de répétitions. Certaines expériences n'ont pas de répétition pour des raisons pratiques (p.ex., analyses chimiques de sol).

Les résultats ont été analysés avec une ANOVA II grâce au programme JMP Pro 13 dans le but d'identifier si les effets du poste, du transect ou de l'interaction poste-transect étaient significatifs. Dans ce travail, un paramètre est considéré comme significatif à partir du moment où la p-valeur est $< 0,05$. Par la suite, un ajustement de Tukey permet de déterminer les postes et les transects qui sont différents les uns des autres. Les groupes différents sont indiqués par

des lettres allant de E à H sur les graphes. Lorsque l'ANOVA indique une interaction significative, les lettres sur le graphique représentent les interactions au sein d'un même transect. Une première analyse ANOVA II compare les postes 1, 2 et 3 des transects A, B et C entre eux. Dans le texte, on fera référence à cette analyse comme étant l'ANOVA 'Haie-Bande enherbée'. Une deuxième analyse ANOVA II compare les postes 3 et 4 pour les transects A et B. En effet, le poste 4 n'est présent que pour les transects A et B mais pas pour le transect C. On fera référence à cette analyse comme étant l'ANOVA 'Bande enherbée-culture'.

Le dernier point (point 9.) de la partie 4 est une analyse de corrélation et une analyse en composantes principales entre les différentes variables étudiées, réalisées grâce au programme JMP Pro 13. Ces analyses sont effectuées sur les résultats moyennés par poste. Les expériences ayant des résultats corrélés seront analysées plus en profondeur.

Partie 4 : Résultats

A fil des expériences, certaines observations ont été notées (couleur du sol, présence de faune, etc.). Ces observations sont rassemblées en annexe 14.

1. Analyses chimiques et granulométriques

A. *Granulométrie*

L'ensemble des résultats se trouve en annexe 15. En moyenne sur les postes 1-2-3 des transects A-B-C, le sol est largement dominé par les limons qui représentent plus de 75 % de la granulométrie du sol (Tableau 5). Les pourcents restants sont partagés entre les argiles et, dans une moindre mesure, les sables. Il n'y a pas de différence texturale entre transects selon l'ANOVA Haie-Bande enherbée. Cependant, l'analyse statistique indique que la teneur en argile est significativement différente entre les postes (Tableau 6).

Tableau 5 : Teneur moyenne de chaque classe granulométrique pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (en %)

Postes	Argile (<0,002 mm)	Limon fin (0,002-0,02 mm)	Limon grossier (0,02-0,05 mm)	Limon total	Sable fin (0,05-0,2 mm)	Sable grossier (0,2-2 mm)	Sable total
Haie et bande enherbée	13,47	25,24	51,51	76,76	8,31	1,47	9,78

Tableau 6: Analyse ANOVA II pour la granulométrie (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
Teneur argile	0,1143	0,0082	-	-	-	-
Teneur limon	0,1859	0,0932	-	-	-	-
Teneur sable	0,0696	0,5461	-	-	-	-

La teneur en argile augmente quand on remonte dans la pente et qu'on s'éloigne de la haie (Fig. 21), passant de 11,5 % au poste 1 à 15,5 % au poste 3. Il y a donc 4 % moins d'argile dans la haie qu'au milieu de la bande enherbée. La teneur en argile est probablement influencée par des phénomènes d'érosion et/ou de sédimentation qui sont eux-mêmes impactés par la présence de la haie, ce qui sera vérifié grâce aux autres expériences.

Dans le champ, la répartition générale de la granulométrie est fortement semblable à la bande enherbée et à la haie : 13,3 % d'argile, 76,2 % de limon et 10,4 % de sable. La teneur en argile dans le champ est donc comparable à celle dans la bande enherbée.

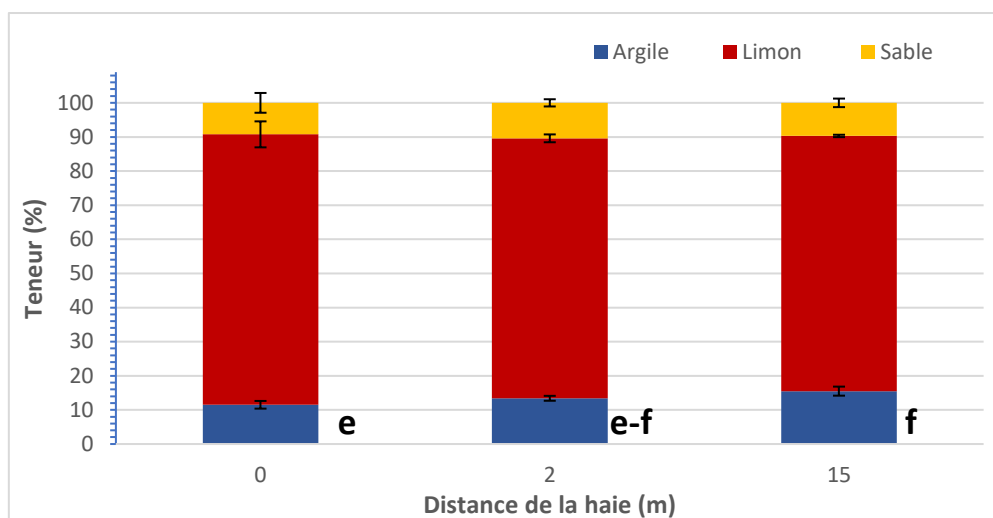


Figure 21 : Granulométrie (%) en fonction de la distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (e, f: les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ; concerne la teneur en argile)

B. pH_{H_2O} et pH_{KCl}

Les résultats complets de l'analyse de pH se trouvent en annexe 16. En moyenne sur les postes 1-2-3 des transects A-B-C, le pH_{eau} vaut 6,72 et le pH_{KCl} vaut 5,51. L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que le pH_{eau} et le pH_{KCl} ne sont impactés significativement ni par le facteur transect, ni par le facteur poste (Tableau 7). En moyenne sur le champ, pH_{eau} vaut 7,35 et pH_{KCl} vaut 6,5, ce qui est légèrement plus élevé que sur l'ensemble de la bande enherbée et la haie.

Tableau 7: Analyse ANOVA II pour le pH_{eau} et le pH_{KCl} (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
pH_{KCl}	0,2187	0,6963	-	-	-	-
pH_{eau}	0,2041	0,5752	-	-	-	-

C. Carbone organique

L'annexe 16 présente l'ensemble des résultats. En moyenne sur les postes 1-2-3 des transects A-B-C, il y a 14,87 g kg⁻¹ de C_{org}. L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que seul le poste impacte significativement le C_{org} (Tableau 8).

Tableau 8: Analyse ANOVA II pour le carbone organique (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
C _{org}	0,5858	0,0380	-	-	-	-

La teneur en C_{org} est en moyenne de $21,95 \text{ g kg}^{-1}$ sous la haie et décroît rapidement sur les 2 premiers m en amont de cette dernière (Fig. 22). Elle atteint $9,97 \text{ g kg}^{-1}$ au milieu de la bande enherbée. On note une très grande variabilité de la teneur en C_{org} dans la haie, ce qui explique probablement l'absence de différence significative entre les postes 1 et 2.

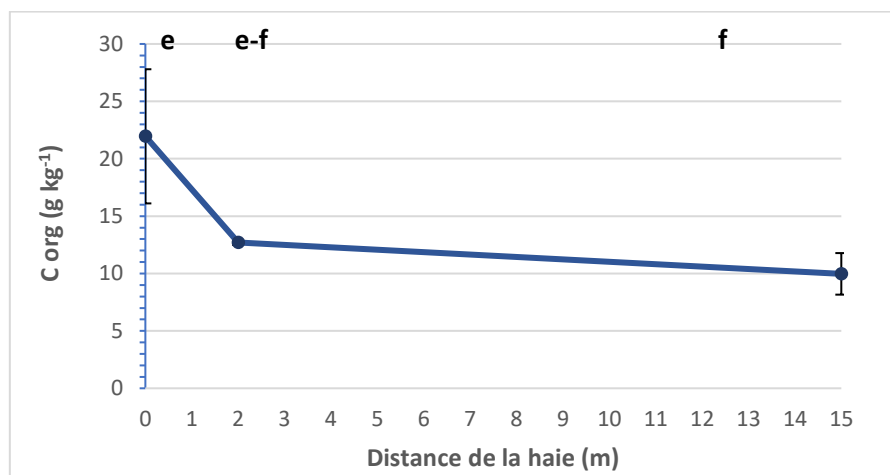


Figure 22 : Teneur en C_{org} (g kg^{-1}) en fonction de la distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (e,f : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

Dans le champ, la teneur en C_{org} est en moyenne de $14,09 \text{ g kg}^{-1}$. La teneur est donc légèrement plus élevée que sur l'ensemble de la bande enherbée où elle vaut $11,34 \text{ g kg}^{-1}$. Elle est cependant nettement plus faible que sous la haie.

D. Indice de battance

L'ensemble des résultats se trouve en annexe 14. L'IB obtenu vaut en moyenne 1,83 pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C, avec toutes les valeurs comprises entre 1,48 et 2,29, ce qui est évalué par le Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité de respectivement peu battant à très battant. Plus précisément, ils identifient le sol de la haie comme étant non ou assez battant alors que le sol au milieu de la bande enherbée est identifié comme étant battant ou très battant (Annexe 14). Pourtant, l'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que ni le poste, ni le transect ont une influence significative sur les résultats (Tableau 9). Dans le champ, l'IB est semblable entre le transect A et B et vaut en moyenne 1,76. Cette valeur est légèrement plus faible que pour l'ensemble de la bande enherbée et de la haie.

Tableau 9: Analyse ANOVA II pour l'indice de battance (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
IB	0,7202	0,0529	-	-	-	-

E. Eléments disponibles (Mg, Ca K et P)

L'ensemble des résultats se trouve en annexe 17. En moyenne sur les postes 1-2-3 des transects A-B-C, la teneur en Ca vaut 175 mg par 100 g, la teneur en Mg vaut 16,5 mg par 100 g, la teneur en K vaut 23,2 mg par 100 g et la teneur en P vaut 5,8 mg par 100 g. L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que la teneur en Ca n'est impactée par aucun des deux facteurs. La teneur en Mg est influencée par le facteur transect tandis que les teneurs en K et en P sont influencées par le facteur poste (Tableau 10).

Tableau 10: Analyse ANOVA II pour les éléments disponibles (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
Ca	0,5445	0,6733	-	-	-	-
Mg	0,0353	0,2643	-	-	-	-
K	0,1256	0,0167	-	-	-	-
P	0,0574	0,0229	-	-	-	-

Le sol du transect C (21,67 mg par 100 g) contient plus de Mg que le transect B (13,67 mg par 100 g) et que le transect A (14 mg par 100 g). L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique des résultats suivants : le transect A n'est significativement pas différent du transect B ni du C.

La teneur en K du sol décroît rapidement avec la distance depuis la haie (Fig. 23). La teneur en K sous la haie est environ deux fois plus élevée que sur l'ensemble des postes de la bande enherbée. En ce qui concerne le P, sa teneur décroît environ linéairement du poste 1 vers le poste 3, où elle est 2 fois moins élevée que dans la haie (Fig. 24). On observe une variabilité assez élevée pour les teneurs en P et K, principalement aux postes 1 et 2.

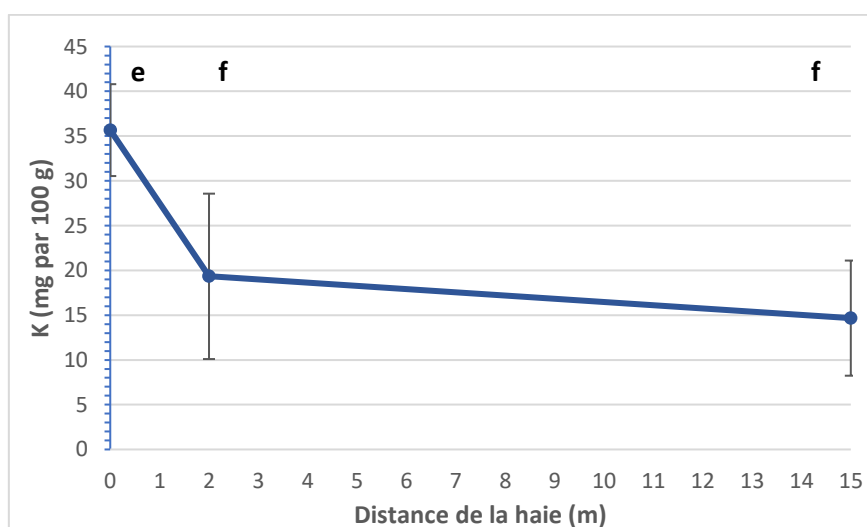


Figure 23: Teneur en K (mg par 100g) en fonction de la distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (e,f : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

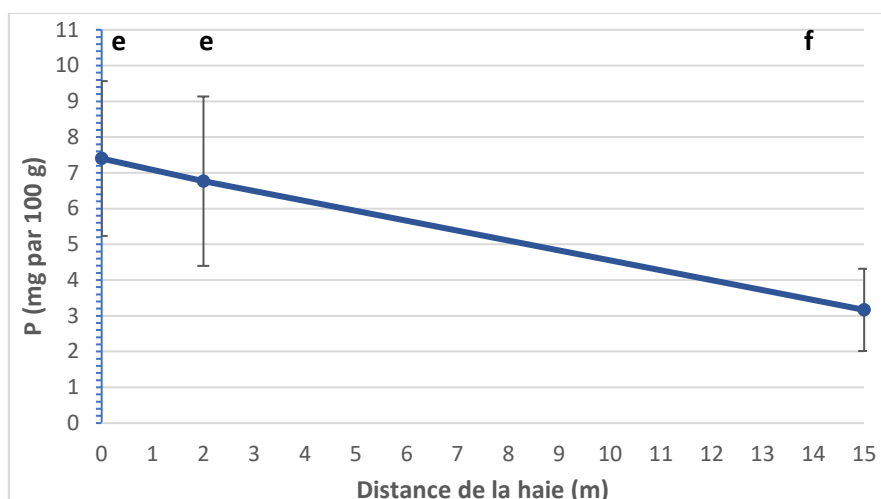


Figure 24: Teneur en P (mg par 100 g) en fonction de distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (e,f : : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

Dans le champ, on retrouve en moyenne 207 mg par 100g de Ca, 12 mg par 100g de Mg, 39 mg par 100g de K ainsi que 8,7 mg par 100 de P. Les teneurs en Ca, K et P sont donc plus élevées dans le champ que sur l'ensemble de la bande enherbée et de la haie. Seule la teneur en Mg est plus faible dans le champ qu'aux autres postes analysés.

F. Azote total

L'ensemble des résultats est présenté en annexe 16. En moyenne sur les postes 1-2-3 des transects A-B-C, N_{tot} vaut 0,14 %. L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que N_{tot} est influencé par le facteur poste mais pas par le facteur transect (Tableau 11).

Tableau 11: Analyse ANOVA II pour l'azote total (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
N_{tot}	0,4159	0,0144	-	-	-	-

La teneur en N_{tot} vaut en moyenne 0,193 % sous la haie et décroît rapidement avec la distance à haie (Fig. 25). Sur l'ensemble des bandes enherbées, cette valeur est de 0,11%. La teneur sous la haie est donc presque doublée par rapport à la bande enherbée.

Dans le champ, la teneur en N_{tot} est similaire entre les deux transects et vaut 0,14 %. La valeur est donc proche par rapport à la bande enherbée et nettement plus faible que sous la haie.

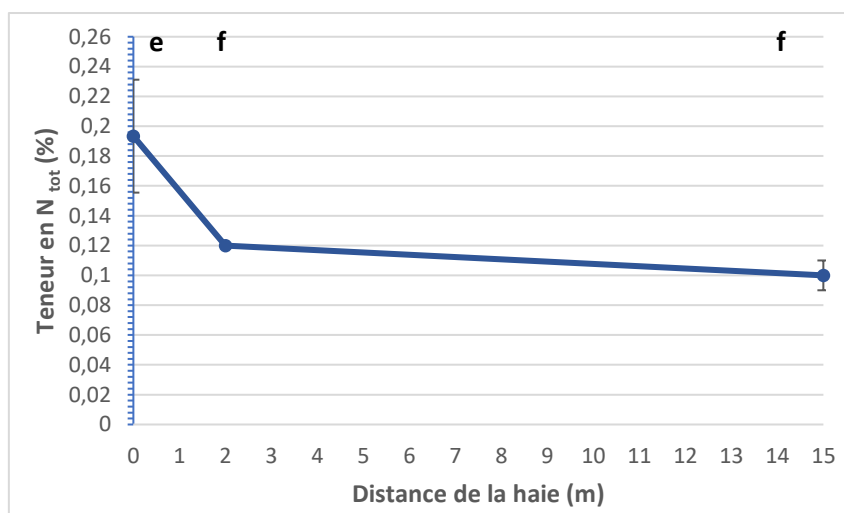


Figure 25: Teneur en N_{tot} (%) en fonction de la distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (e,f : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

G. Rapport carbone/azote

L'ensemble des résultats se trouve en annexe 16. En moyenne sur les postes 1-2-3 des transects A-B-C, le rapport C/N est de 10,4. Ni le transect, ni le poste n'influencent de façon significative le rapport C/N du sol selon l'ANOVA Haie-Bande enherbée (Tableau 12). Ce rapport vaut 10,0 pour les deux transects analysés dans le champ, ce qui est très semblable au rapport pour les postes 1, 2 et 3.

Tableau 12: Analyse ANOVA II pour le rapport C/N (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
C/N	0,6553	0,5017	-	-	-	-

2. Densité apparente, porosité et macroporosité

A. Densité apparente

Les résultats complets sont présentés en annexe 18. L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que le poste et le transect sont tous les deux des facteurs significatifs mais pas l'interaction poste-transect (Tableau 13).

Tableau 13: Analyse ANOVA II pour la densité apparente et la porosité

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
ρ_a	0,0057	<0,0001	0,7772	0,6481	0,2480	0,0081

Le ρ_a vaut $1,18 \text{ g cm}^{-3}$ dans la haie et croît rapidement avec la distance à cette dernière (Fig. 26). Sur la bande enherbée, le ρ_a vaut $1,50 \text{ g cm}^{-3}$. La remontée dans la pente et l'éloignement de la haie engendrent donc une plus grande compacité du sol.

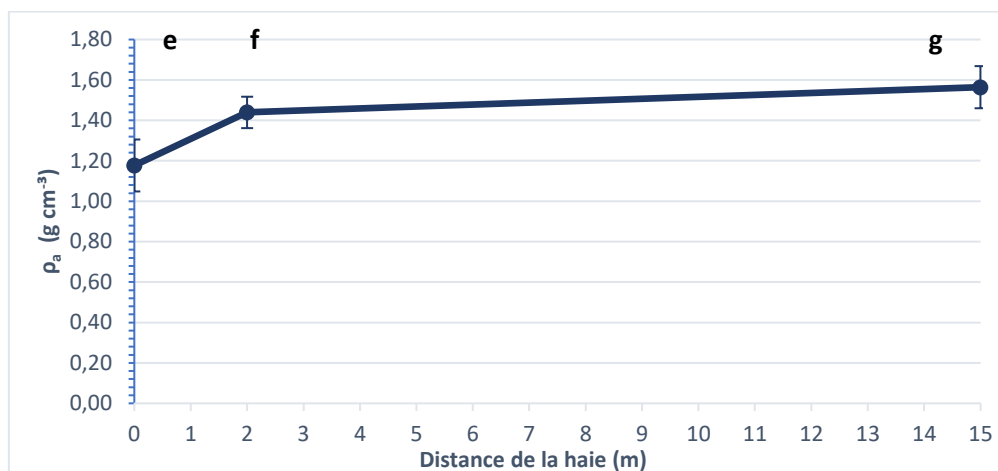


Figure 26: Densité apparente (g cm^{-3}) en fonction de la distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (e, f, g : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

Le transect C, situé dans la bande enherbée récente, a un ρ_a plus élevé que le transect B, situé sur la butte de la bande enherbée ancienne (Fig. 27). Cette augmentation vaut $0,14 \text{ g cm}^{-3}$. Le transect A ne se différencie ni du transect B, ni du C.

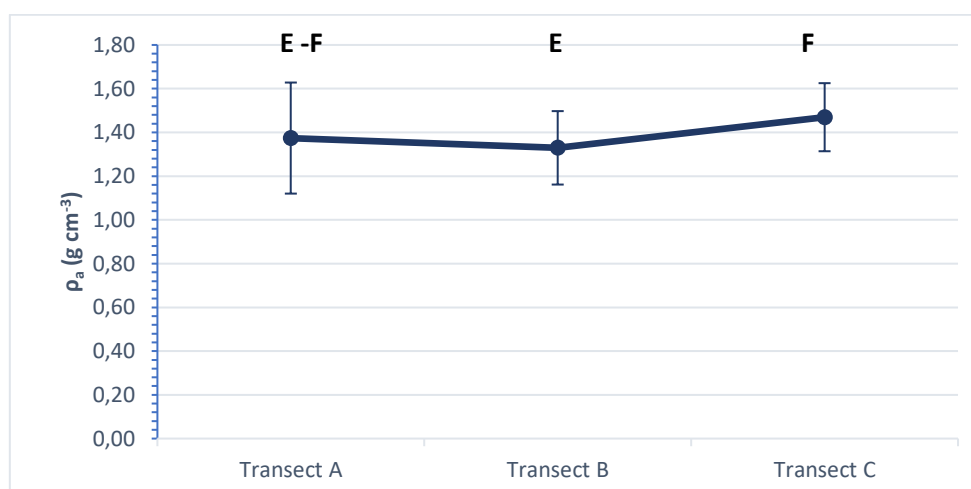


Figure 27: Densité apparente (g cm^{-3}) en fonction du transect pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (E, F : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

L'ANOVA Bande enherbée-Champ indique une interaction poste-transect significative (Tableau 13). En effet, la tendance entre les postes 3 et 4 est inverse pour le transect A et pour le transect B (Fig. 28).

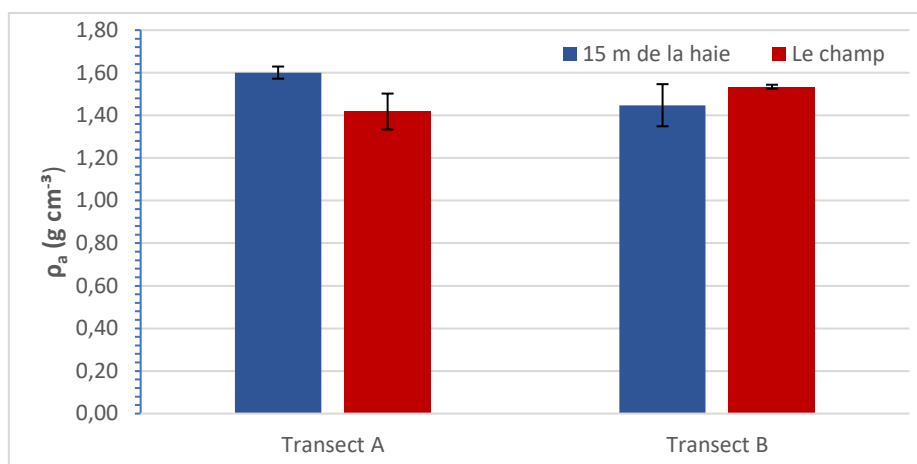


Figure 28: Densité apparente (g cm^{-3}) pour les postes 3 et 4 des transects A et B

B. Porosité

La porosité étant inversement proportionnelle au ρ_a , les résultats de l'analyse statistique sont identiques (Tableau 13 et Annexe 18). La porosité diminue donc quand on s'éloigne de la haie et qu'on remonte dans la pente. Le sol de la haie présente une porosité de 55,7 % et de 43,3 % sur l'ensemble de la bande enherbée. De plus, le sol du transect C, de l'ancienne bande enherbée, a une porosité de 44,6 % alors que le sol du transect B dans la nouvelle bande enherbée a une porosité de 49,9 %. Dans le champ, la porosité est de 46,6 % pour le transect A et 42,2 % pour le transect B.

C. Macroporosité

La macroporosité correspond au rapport du volume des pores $> 5,19 \mu\text{m}$ (suction de - 3 m) sur le volume total de l'échantillon. L'ensemble des résultats se trouve en annexe 19. L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que le poste est significatif (Tableau 14). En effet, la macroporosité vaut 25,8 % sous la haie et décroît rapidement avec la distance de la haie (Fig. 29). La macroporosité vaut 16,3 % sur l'ensemble de la bande enherbée. Ces pores correspondent à ceux qui contiennent l'eau libre dans le sol, donc l'eau soumise aux écoulements gravitaires. La variabilité est plus élevée à 15 m de la haie, ce qui est surprenant.

Tableau 14: Analyse ANOVA II pour la macroporosité

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
Macroporosité	0,2223	<0,0001	0,0512	0,3992	0,3042	0,0386

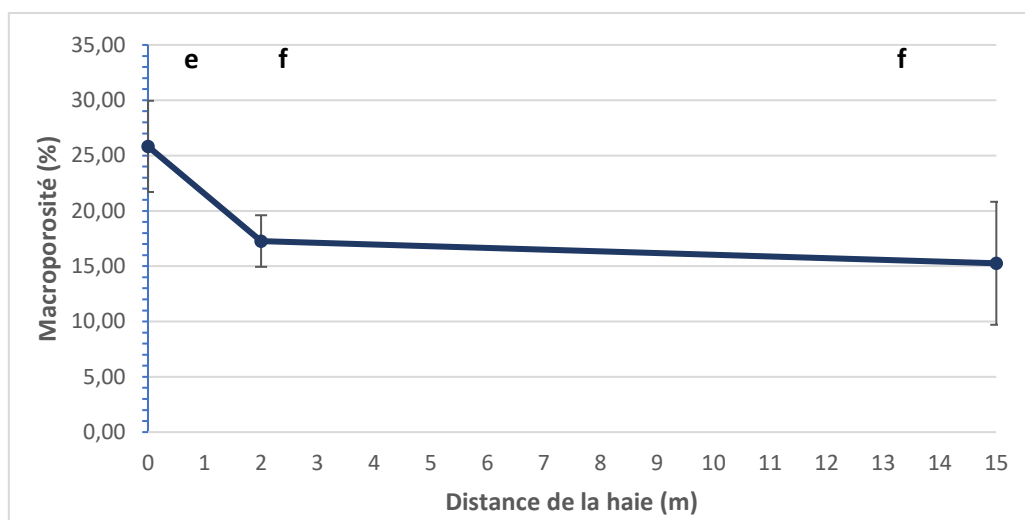


Figure 29: Macroporosité (%) en fonction de la distance par rapport à la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (e,f : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

Lorsqu'on compare les postes 3 et 4, l'interaction poste-transect est significative (Tableau 14). La macroporosité évolue de façon opposée entre les postes 3 et 4 pour les transects A et B (Fig. 30). La variabilité est spécialement élevée en B4.

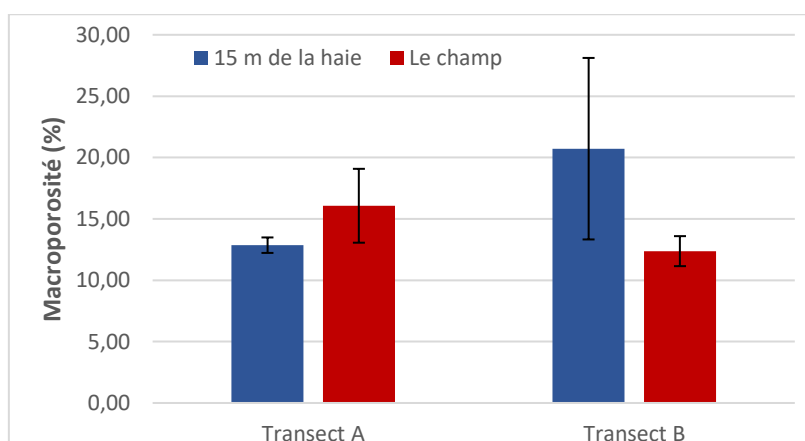


Figure 30 : Macroporosité (%) pour les postes 3 et 4 des transects A et B

3. Courbe de rétention

A. Courbe de rétention

Lors de la saturation, certains échantillons, principalement ceux de la haie, ont été déstructurés suite à l'activité de vers de terre présents dans les kopeckys (photo en annexe 9). L'échantillon A2R1 a subi une déstructuration importante avec 7,24 g de terre mouillée tombée hors du kopecky. L'incohérence des résultats pour la courbe de rétention et la densité apparente confirme l'hypothèse que cet échantillon est erroné.

Dans le bac à sable, 17 échantillons se sont affaissés suite à l'application de la succion. Les échantillons concernés ont perdu en moyenne 0,15 cm sur leur 5 cm de hauteur ce qui correspond à une perte d'environ 3 % de leur volume. De plus, 7 échantillons ont subi un affaissement plus important, allant de 0,2 à 0,5 cm, ce qui correspond à une perte de 4 à 10

% de leur volume. L'annexe 20 présente la moyenne des effondrements par poste. On peut voir que tous les postes sont touchés mais la somme des effondrements est plus élevée sous la haie et décroît avec la distance à cette dernière. Le poste A1 est spécialement touché. Lorsqu'on fait une analyse ANOVA II de l'effondrement, on obtient qu'il est significativement impacté par le poste (p-valeur de 0,0045). Cet affaissement de sol correspond très certainement au moment où les macropores se vident de l'eau qu'ils contiennent, ce qui provoque leur effondrement. Ces échantillons ne sont pas exclus des mesures car leurs teneurs en eau restent cohérentes. Cependant, il n'est pas possible d'estimer le biais que cet effondrement pourrait provoquer sur les mesures. Il est possible que les macropores aient été sous-estimés et les micropores surestimés, surtout pour les postes proches de la haie. C'est le volume initial de sol qui est utilisé pour calculer les teneurs en eau volumiques et la densité apparente (environ 100 cm³).

Durant les trois expériences, il est arrivé 3 fois que des échantillons voient leur teneur en eau augmenter pour deux succions successives. Ce phénomène est très certainement dû à un mauvais contact entre l'échantillon et la membrane ou plaque poreuse. Les mesures affectées ne sont pas prises en compte pour les succions concernées. On peut aussi noter que le bac à sable a engendré plus de mesures erronées que les autres dispositifs, 2 mesures au total alors que la casserole à haute pression en a engendré une seule.

L'annexe 21 est un tableau qui résume l'ensemble des résultats et l'annexe 22 présente les résultats moyennés par poste. On peut voir que la variabilité inter- et intra-poste diminue lorsqu'on augmente la succion. Pour analyser les facteurs significatifs, une analyse ANOVA II a été réalisée sur 3 points clefs de la courbe de rétention : θ_{sat} , θ_{cc} et θ_{pfp} (Tableau 15). Selon l'ANOVA Haie-Bande enherbée, le θ_{sat} et θ_{pfp} sont impactés significativement par le poste, le transect et l'interaction poste-transect tandis que le θ_{cc} n'est impacté par aucun facteur.

Tableau 15: Analyse ANOVA II pour la courbe de rétention

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
θ_{sat}	0,0208	<0,0001	0,0192	0,8622	0,6154	0,0135
θ_{cc}	0,3123	0,2874	0,5660	0,1186	0,0170	0,4464
θ_{pfp}	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,5934	0,0002	<0,0001

Le θ_{sat} décroît significativement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la haie (Fig. 31). En effet, le poste 1 est significativement différent des postes 2 et 3. Cette décroissance est très rapide et prononcée pour le transect A, et plus progressive pour les transects B et C. La tendance est similaire pour les transects B et C, bien que non significative dans le cas du transect B. A noter que la variabilité des mesures est la plus élevée dans ce dernier transect. L'augmentation de la θ_{sat} dans la haie par rapport à l'ensemble de la bande enherbée vaut 16,96 % pour le transect A, 7,26 % pour le transect B et 11,05 % pour le transect C. Pour finir,

l'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que le transect B est significativement différent du transect C mais pas du transect A qui ne se différencie d'aucun des deux.

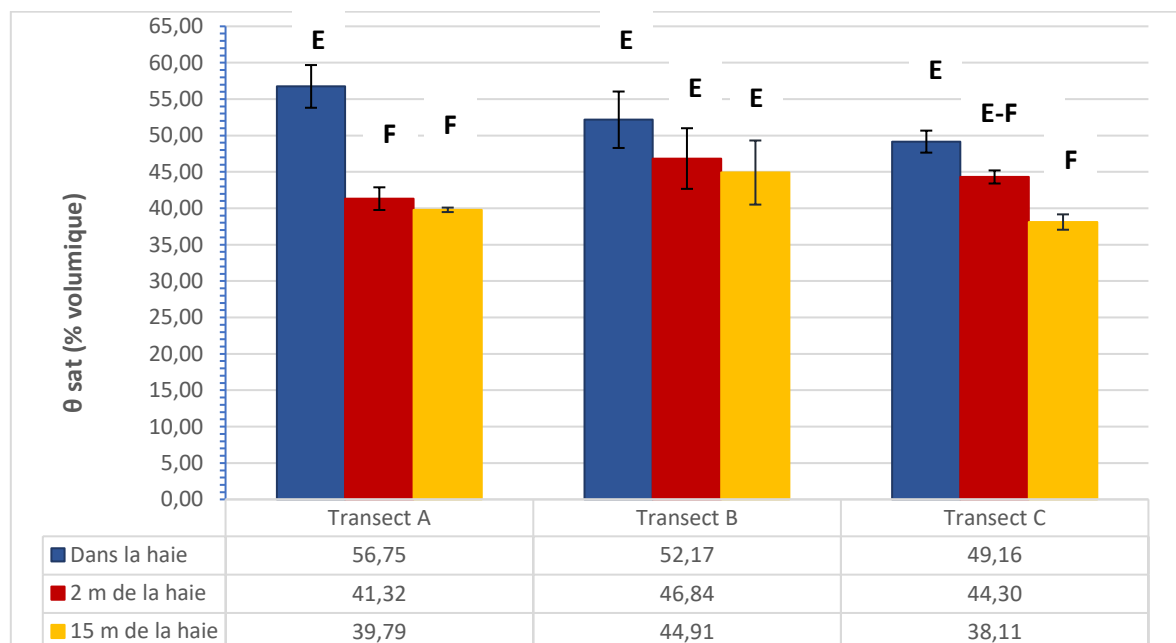


Figure 31: Teneur en eau à la saturation (% volumique) en fonction du transect et de la distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (E,F : les barres suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% au sein du même transect)

Le θ_{PFP} augmente quand on remonte dans la bande enherbée et qu'on s'éloigne de la haie (Fig. 32). Cependant, les écarts entre les valeurs de θ_{PFP} entre les postes sont plus faibles que pour le θ_{sat} . A cette succion ($pF= 4,2$), l'eau restante dans le sol est contenue dans les pores avec un diamètre plus petit que $0,1 \mu\text{m}$. Il y a donc moins de micropores dans la haie que dans la bande enherbée. A 2 m de la haie, le θ_{PFP} n'est pas différent de celui de la haie (Transects B et C) ou présente des valeurs intermédiaires entre la haie et le poste 3 (Transect A). Concernant les transects, le θ_{PFP} vaut en moyenne 12,85 % pour le transect A, 12,36 % pour le transect B et 15,26 % pour le transect C. Il y a donc plus de micropores dans la nouvelle bande enherbée que dans l'ancienne.

Les échantillons ayant subi un effondrement sur leur hauteur lors du bac à sable, ceci a très certainement diminué la quantité de macropores et augmenté la quantité de micropores dans le sol, principalement pour les mesures proches de la haie. Comme dit précédemment, il nous est impossible de quantifier le biais que l'effondrement pourrait avoir sur les mesures.

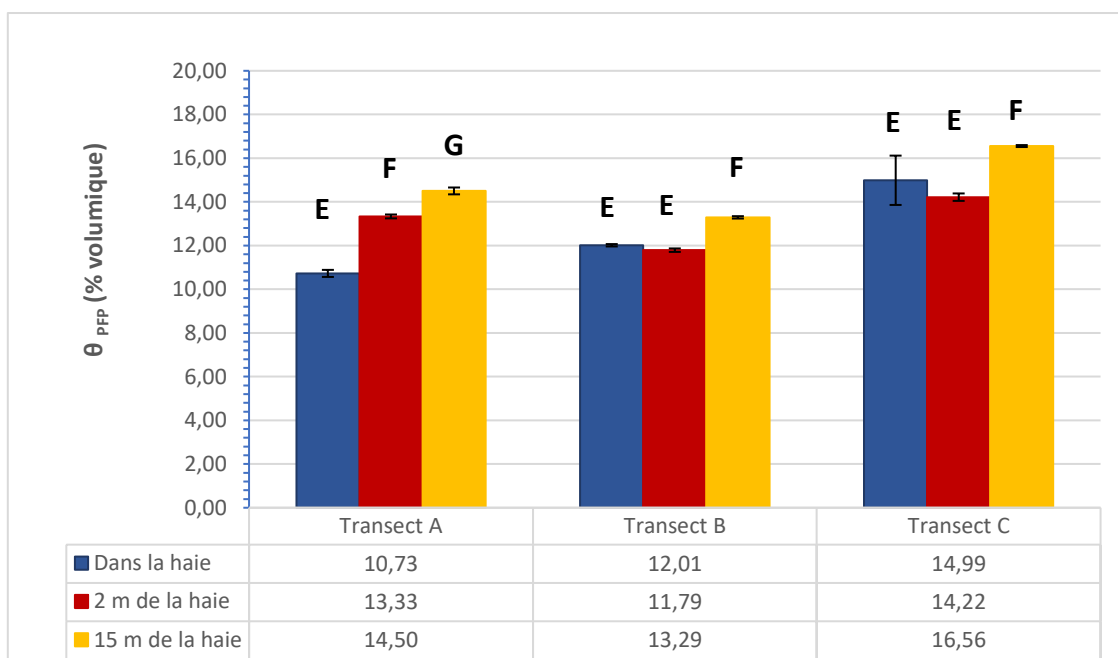


Figure 32: Teneur en eau au point de flétrissement permanent (% volumique) en fonction du transect et de la distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (E, F, G : les barres suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% au sein du même transect)

En résumé, la haie et la position le long de la pente ont bien un impact sur la courbe de rétention. Cependant, cet impact se marque au début et à la fin de la courbe de rétention, c'est-à-dire aux très faibles et très fortes succions (Fig. 33). Le milieu de la courbe de rétention n'est pas influencé. L'ensemble des courbes de rétention en fonction des transects et des postes se trouve en annexe 23. En ce qui concerne les transects, on peut voir sur la figure 34 que les transects A et B sont semblables et se différencient du transect C. L'ancienne bande enherbée a plus de porosité totale et légèrement moins de microporosité que la nouvelle bande enherbée.

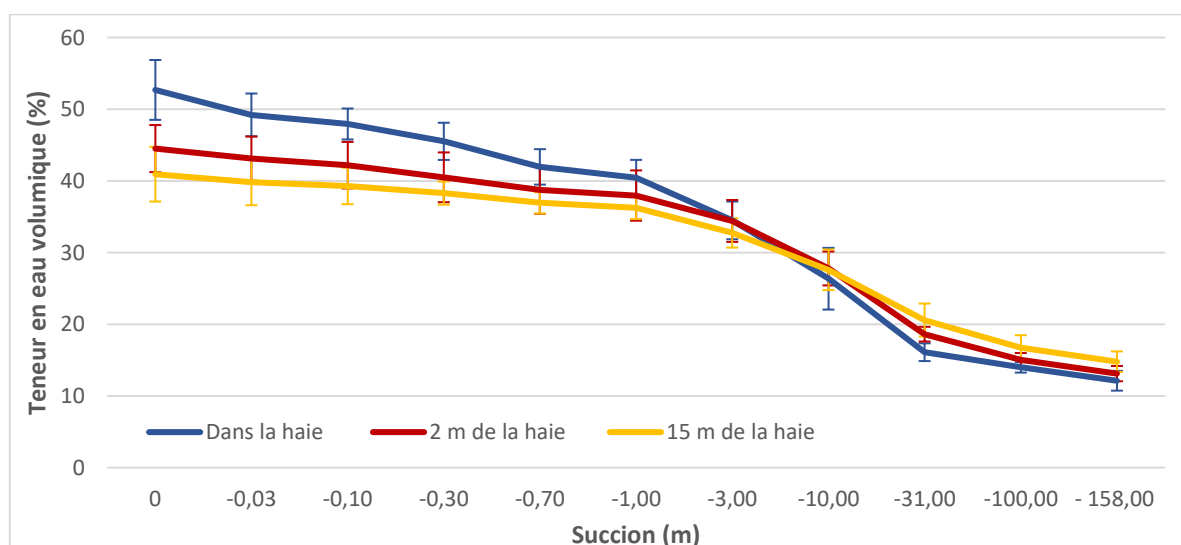


Figure 33 : Courbes de rétention pour les postes 1 (dans la haie), 2 (2 m de la haie) et 3 (15 m de la haie). Chaque courbe est la moyenne des transects A-B-C.

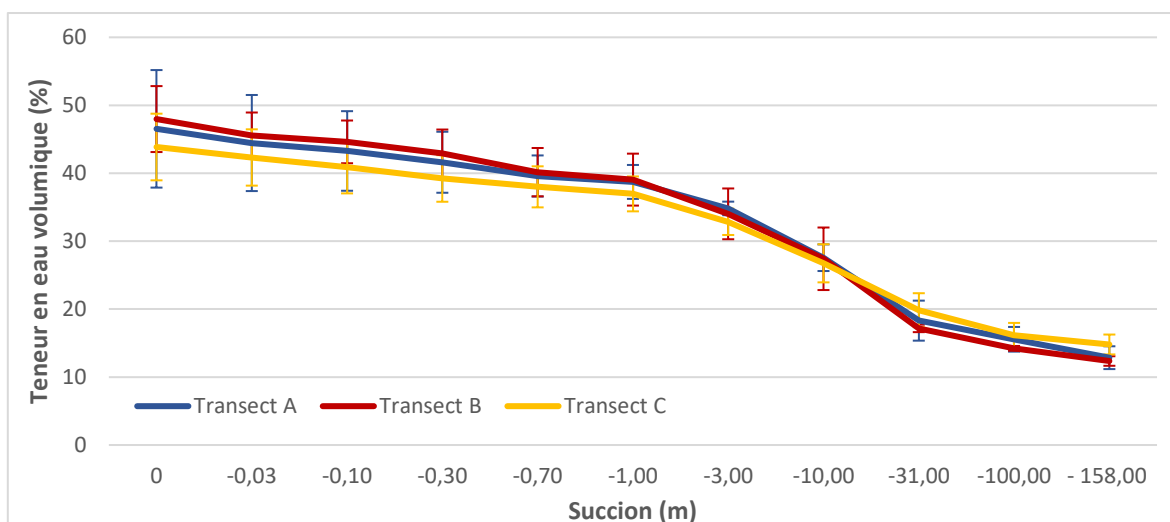


Figure 34: Courbes de rétention pour les transects A-B-C. Chaque courbe est la moyenne des postes 1-2-3.

En ce qui concerne les postes 3 et 4, le facteur poste est significatif pour le θ_{CC} et le θ_{PFP} (ANOVA Bande enherbée-Champs, Tableau 15) et l'interaction poste-transect est significative pour le θ_{sat} et le θ_{PFP} (Tableau 13). L'évolution du θ_{sat} et du θ_{PFP} entre les transects A et B est opposée (fig. 35). La θ_{CC} quant à elle augmente entre le milieu de la prairie permanente et le champ (Fig. 35). Cette augmentation vaut 3,3%. L'évolution entre les postes 3 et 4 ne semble pas suivre de tendance

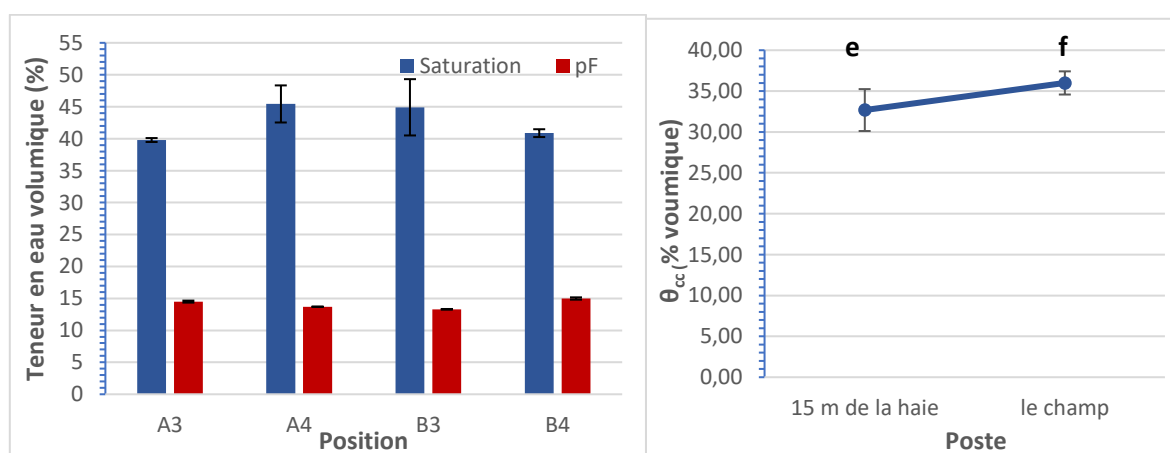


Figure 35: Teneur en eau à la saturation et au point de flétrissement permanent (% volumique) pour les postes 3 et 4 et les transects A et B (gauche) et teneur en eau à la capacité au champ (% volumique) pour les postes 3 et 4 (droite) (e,f : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

B. Paramètre de Van Genuchten

L'équation paramétrique de *Van Genuchten* (1980) permet d'approximer la courbe de rétention. Les deux paramètres estimés dans ce travail sont α et n car m (Equation 6) dépend de n et le θ_{sat} et le θ_{PFP} sont mesurés. Les résultats complets se trouvent en annexe 24. L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique qu'il n'y a pas d'effet significatif du poste ou du transect sur la valeur de α et n (Tableau 16). En moyenne sur les postes 1-2-3-4 des transects A-B-C, la paramètre α vaut $0,0043 \text{ cm}^{-1}$ et n vaut 1,98. Le paramètre α est inversement

proportionnel à la taille moyenne des pores. Il correspond au point d'inflexion de la courbe de rétention. Le paramètre n est lié à la pente de la courbe de rétention, il augmente lorsque la pente augmente (*Van Genuchten, 1980*). Les paramètres α et n sont donc plus représentatifs du centre de la courbe de rétention plutôt que des basses et hautes succions.

Tableau 16: Analyse ANOVA II pour les paramètres de Van Genuchten (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
α	0,9264	0,1803	-	-	-	-
n	0,5658	0,2853	-	-	-	-

Les résultats en annexe 24 indiquent que la qualité de l'ajustement de l'équation de Van Genuchten sur les données expérimentales est assez variable. La somme des carrés des écarts est nettement plus élevée pour les postes de la haie et diminue quand on s'éloigne de cette dernière. Elle réaugmente légèrement au poste situé dans le champ. On peut en effet voir en annexe 25 que la courbe de rétention estimée aux postes dans la haie présente des différences avec la courbe de rétention mesurée pour les succions faibles et les succions élevées.

L'équation de Van Genuchten est de forme sigmoïdale. Vu que les paramètres θ_{sat} et θ_{FPF} sont mesurés dans ce travail, seuls les paramètres α et n sont estimés. Ces deux paramètres sont plus représentatifs du centre de la courbe de rétention. Or, les différences significatives entre les postes et/ou les transects ne sont présentes qu'au θ_{sat} et θ_{FPF} et non au centre de la courbe (θ_{CC}) décrit-ci-dessus. Il n'est pas surprenant qu'on n'observe pas de variations significatives de α et n .

4. Réserve en eau utile

Les résultats de la REU se trouvent en annexe 26. L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que le REU n'est impacté par le poste, ni pas le transect (Tableau 17). Ces résultats ne sont pas surprenants au vu de l'analyse statistique des courbes de rétention. En effet, le θ_{CC} n'était significativement affecté ni par le transect, ni par le poste. Le θ_{FPF} est affecté par tous les facteurs mais les gammes de valeurs sont très faibles. En moyenne sur les postes 1-2-3 des transects A-B-C, le REU vaut 20,4 % avec un minimum à 16,3 % et un maximum à 24,9 %. Pour les postes dans le champ, le REU vaut 22,8 % pour le transect A et 20,5 % pour le transect B.

Tableau 17: Analyse ANOVA II pour la réserve en eau utile (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
REU	0,0560	0,0821	-	-	-	-

5. Conductivité hydraulique à saturation

5.1. Infiltromètre à charge constante

Cette mesure a été réalisée en octobre 2017, après plusieurs jours de pluies ce qui a préalablement augmenté la teneur en eau dans le sol. L'annexe 27 présente les débits d'infiltration et les valeurs de conductivité hydraulique à saturation (K_s) correspondantes.

Aux postes A4, B4 et C2, certains débits d'infiltration valaient 0 mm h⁻¹. Ces valeurs ont été considérées comme non représentatives car elles sont anormalement basses et fortement différentes des autres mesures aux mêmes postes. Il est très probable que les machines agricoles aient tassé le sol à l'endroit de mesure, ce qui diminue l'infiltration.

Aux postes A4, B4 et C1, certains débits d'infiltration étaient beaucoup plus élevés que les autres débits aux mêmes postes. Il est fort probable que des galeries d'animaux (souris, vers de terre, ...) dans le sol aient créé des écoulements préférentiels car l'eau y circule beaucoup plus rapidement que dans le reste du sol. Ces mesures n'ont pas été prises en compte afin que la valeur finale du K_s par poste soit le plus possible représentative de la matrice du sol même. L'équation de Wooding n'est par ailleurs pas applicable à ce type de situation.

Au poste B4, on observe une plus grande variabilité entre les mesures qu'aux autres postes. Plusieurs débits d'infiltration sont égaux à 0 mm h⁻¹ tandis que d'autres sont plus élevés (2,39 mm h⁻¹, 2,84 mm h⁻¹) voire beaucoup plus élevés (171 mm h⁻¹, 912 mm h⁻¹). Le poste B4 se trouve dans le coin du champ cultivé. La grande variabilité à ce poste vient très probablement du tassement du sol à certains endroits provoqué par le passage à répétition des machines agricoles qui manœuvrent dans cette zone. Le poste B4 a donc été retiré des graphes car il n'est pas représentatif d'un champ cultivé. A cause de cela, il n'est pas possible de réaliser une analyse statistique comparant les résultats au milieu de la bande enherbée et dans le champ.

Par convention, l'axe vertical des graphes ainsi que l'analyse statistique sont présentés avec une échelle logarithmique. L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique une différence significative entre les postes (Tableau 18). De plus, il y a différence significative entre le transect C, dans la nouvelle bande enherbée, et les transects A et B, dans l'ancienne bande enherbée.

Tableau 18: Analyse ANOVA II pour la conductivité hydraulique à saturation obtenu par l'infiltromètre (Un '-' indique que l'analyse n'est pas réalisable compte tenu du dispositif d'échantillonnage)

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
Ks	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-	-	-

Avant de développer l'analyse statistique, il faut noter que le poste A1 a un Ks spécialement élevé (Fig. 36) et au-delà des valeurs de référence de Ks pour des sols limoneux (100 - 300 mm h⁻¹ pour le sable, 50 mm h⁻¹ pour les limons et < 10 mm h⁻¹ pour les argile) (Biielders et Delvaux, 2018). Il est fort probable que la densité de galeries d'animaux au poste A1 était tellement importante que toutes les mesures ont été influencées par des écoulements préférentiels. Le Ks des autres postes mais surtout des postes B1 et C1 ont certainement aussi été impactés par les galeries mais il est impossible de quantifier leur influence dans ce travail.

Pour tous les transects, le Ks est toujours plus élevé dans la haie et diminue avec la distance de la haie, lorsqu'on remonte dans la pente (Fig. 36). Le Ks est 85 fois plus grand sous la haie que sur l'ensemble de la bande enherbée pour le transect A, 3,7 fois plus grand pour le transect B et 4 fois plus grand pour le transect C. On note que la variabilité au poste 2 juste devant la haie est plus élevée qu'au poste 3. Il est possible que les racines et les animaux de la haie aient encore une incidence sur le sol à 2 m de cette dernière.

Le transect de la nouvelle bande enherbée a un Ks plus faible que les transects de l'ancienne bande enherbée (Fig. 36). Au post C3, le Ks au transect C vaut 0 mm h⁻¹ ce qui est anormalement bas et sera discuté plus loin (cfr. partie 5 §1). L'écart entre les valeurs au transect A ainsi que le Ks de 0 mm h⁻¹ au poste C3 sont certainement à l'origine de l'interaction significative.

Dans le champ, il ne reste que le poste A4, le poste B4 étant non représentatif. A cet endroit, le Ks vaut 67,8 mm h⁻¹ avec un écart-type de 57,8 mm h⁻¹. Etant donnée la valeur très élevée de l'écart-type par rapport à la valeur moyenne, il est assez difficile de tirer des conclusions sur le Ks dans le champ. De plus, les propriétés de la parcelle cultivée sont plus enclines à varier au court de l'année en fonction de la teneur en eau que le sol de la bande enherbée ou de la haie.

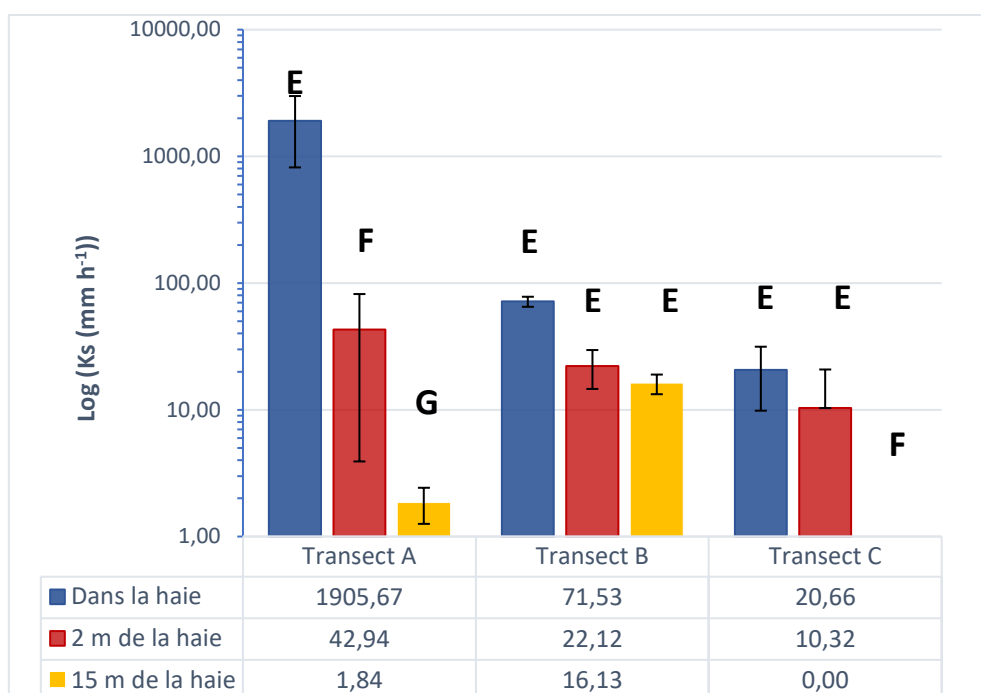


Figure 36: Logarithme de la conductivité hydraulique à saturation (mm h^{-1}) en fonction du transect et de la distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (E, F, G : les barres suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% au sein du même transect)

5.2. Perméamètre à charge constante

Les résultats sont présentés en annexe 28. Pour chaque point de mesure, 4 lectures successives ont été réalisées afin d'assurer d'être en régime permanent. Le Ks est calculé à partir de la moyenne des débits des mesures 2, 3 et 4 car le débit est stable, ce qui renforce l'hypothèse qu'on a atteint le régime permanent.

Deux points de mesures ont été considérés comme étant non représentatifs car leur débit est anormalement élevé comparé à l'ensemble des autres points de mesures. Ces derniers ont peut-être été impactés par des galeries de vers de terre ou d'insectes ayant créé des écoulements préférentiels. Un autre point de mesure a été considéré comme non représentatif car son débit était anormalement faible lors de la mesure. Or, cet échantillon n'était pas saturé après le bac de saturation car sa face supérieure n'était pas luisante à l'inverse des autres échantillons. La raison de son retard de saturation par rapport aux autres échantillons reste cependant inexpliquée.

Tout comme l'infiltromètre (cfr. partie 4 §5.1.), par convention, l'analyse statistique est réalisée sur une échelle logarithmique. L'ANOVA Haie-Bande enherbée ainsi que l'ANOVA Bande enherbée-Champ indiquent un effet significatif du poste, du transect et de l'interaction poste-transect (Tableau 19).

Tableau 19: Analyse ANOVA II pour la conductivité hydraulique à saturation obtenue par le perméamètre

Expérience	p-valeur					
	Haie-Bande enherbée			Bande enherbée-Champ		
	Transect	Poste	Transect*poste	Transect	Poste	Transect*poste
Ks	0,0315	0,0002	0,0005	0,0279	0,0279	0,0003

L'ANOVA Haie-Bande enherbée indique que le poste 1 est significativement différent des poste 2 et 3. En effet, le Ks est plus élevé pour le sol sous la haie qu'en moyenne dans la bande enherbée (Fig. 37). L'augmentation de Ks sous la haie comparée à la bande enherbée vaut 18,75 mm h⁻¹ pour le transect A, 1,52 mm h⁻¹ pour le transect B et 1,88 mm h⁻¹ pour le transect C. L'évolution de Ks du poste 1 au poste 3 quant à elle est différente pour chaque transect. Pour le transect A, on observe une nette décroissance de Ks entre la haie et la bande enherbée. Pour les deux autres transects, l'évolution de Ks est plus aléatoire.

Les transects A et B sont significativement différents l'un de l'autre mais le transect C ne se différencie ni du transect A ni du B. En moyenne, Ks vaut 6,45 mm h⁻¹ pour le transect A, 6,03 mm h⁻¹ pour le transect B et 5,85 mm h⁻¹ pour le transect C.

L'interaction suit une évolution différente pour chaque transect. On peut voir que le Ks en C2 est plus élevé qu'en A2 et B2. Il est probable que le poste C2 ait influencé l'analyse statistique. La même situation se présente au poste 3 où B3 a un Ks nettement plus élevé que A3 et C3. Les Ks en C2 et B3 étant plus élevés que les autres mesures dans les bandes enherbées, ils ont très probablement impacté l'analyse statistique.

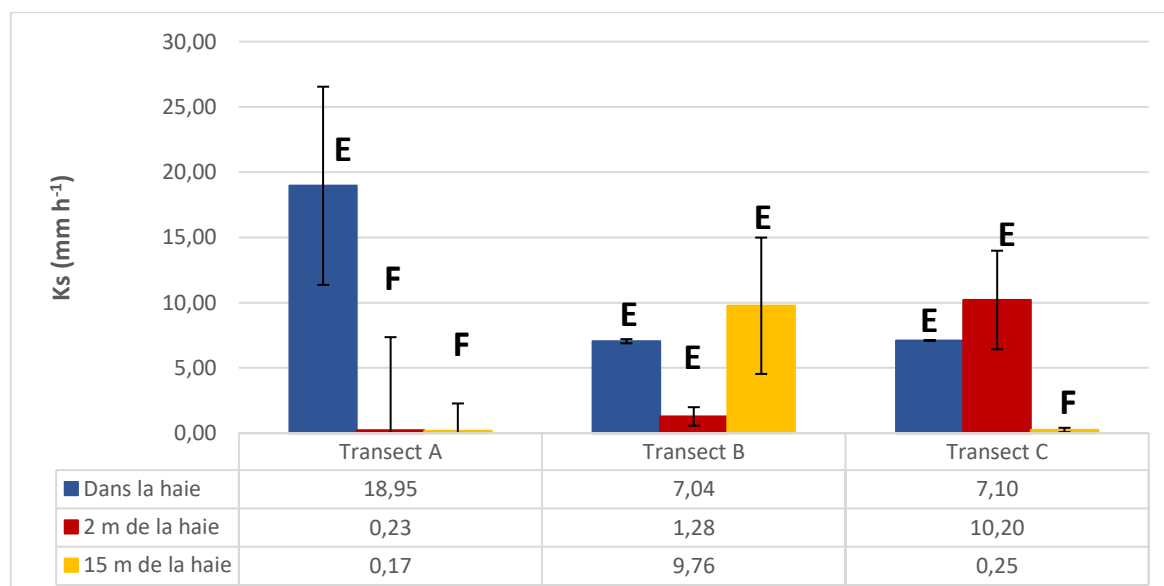


Figure 37: Conductivité hydraulique à saturation (mm h⁻¹) du perméamètre en fonction du transect et de la distance de la haie (m) pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (E, F : les barres suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% au sein du même transect)

Entre les postes 3 et 4, tous les facteurs sont significatifs. Cependant, l'évolution entre les postes 3 et 4 est inverse pour le transect A et pour le transect B (Fig. 38). De plus, le poste B3 a un K_s nettement plus élevé que les autres postes, comme déjà dit ci-dessus.

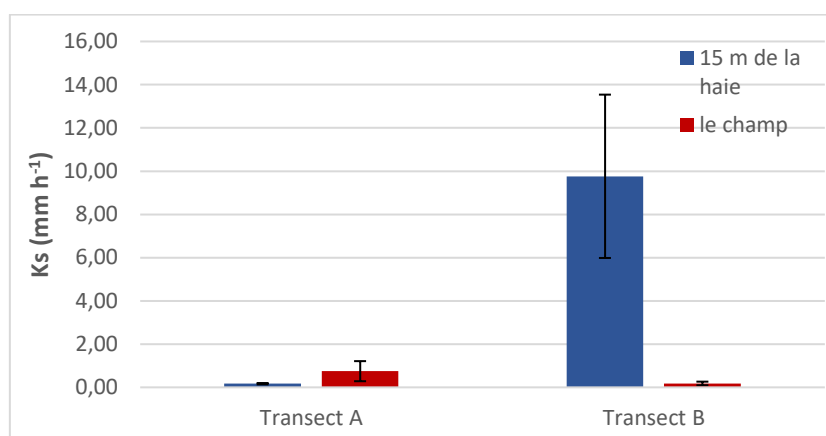


Figure 38: Conductivité hydraulique à saturation (mm h^{-1}) obtenue par le perméamètre pour les postes 3 et 4 des transects A et B

Les résultats du perméamètre doivent être nuancés. Les échantillons utilisés pour cette expérience ont préalablement servi pour le bac à sable et la casserole à basse pression, mesures durant lesquelles ils ont subi un affaissement. La hauteur de l'échantillon utilisée pour calculer le K_s avec l'équation de Darcy est la hauteur réelle de l'échantillon, après l'affaissement. Mais cet affaissement des échantillons a très probablement engendré une perte de macroporosité déterminante pour le drainage. A cause de cela, il est fort probable que le K_s ait été sous-estimé lors des mesures au perméamètre. L'impact de l'affaissement sur le K_s n'est pas calculable avec les données disponibles et n'est sûrement pas identique sur tous les échantillons. Ceci pourrait expliquer les grosses différences de K_s aux postes C2 et B3 par rapport aux autres postes de la bande enherbée. Il est également possible que la technique de prise des échantillons dans les kopeckys ait tassé légèrement le sol. Il serait intéressant dans le futur de réitérer cette expérience pour connaître le K_s non influencé par l'affaissement. Pour finir, les échantillons pour le perméamètre ont un petit volume (100 cm^3). Contrairement à l'infiltromètre, les galeries et les trous d'animaux ne sont pas été pris en compte car les échantillons ont été prélevés hors de ces trous. Le K_s du sol, galeries comprises, est très certainement plus élevé que ce qui a été mesuré durant cette expérience.

6. Densité racinaire

Les mesures ont été réalisées aux postes 1 et 3 des transects A et B, c'est-à-dire dans la haie et au milieu de la bande enherbée. L'ensemble des résultats se trouve en annexe 29. L'annexe 30 présente les images des scans des racines de la haie et de la bande enherbée tandis que l'annexe 31 présente un scan après traitement de l'image.

Le ratio de détachement du sol (SDR) a été calculé à partir de 3 résultats différents : la densité racinaire (RD, Equation 16), la densité de longueur racinaire (RLD ; Equation 17) et conjointement, le RD, le ρ_a et la teneur en sable (Equation 18). Plus le SDR diminue, moins le sol est sensible à l'érosion. L'analyse statistique est réalisée sur les données du RD et du RLD ainsi que sur le SDR.

Seulement deux facteurs sont significatifs pour l'ensemble des paramètres analysés : le facteur transect pour le RD et le facteur poste pour le SDR calculé à partir du RLD (Tableau 20). En moyenne sur tous les échantillons : le RD vaut $4,8 \text{ kg m}^{-3}$, le RLD vaut $197,9 \text{ km m}^{-3}$, le SDR calculé avec le RD vaut 0,00025, le SDR calculé avec le RLD vaut 0,1145. Concernant le SDR calculé avec la teneur en sable, le RD et le ρ_a , la moyenne vaut 0,62. Cependant, trois valeurs sont $<0,02$ et une valeur est égale à 2,46. Cette valeur de SDR valeur est nettement plus élevée, principalement à cause du ρ_a et d'un RD spécialement élevés.

Tableau 20 : Analyse ANOVA II pour la densité racinaire pour les postes 1 et 3 des transects A et B

Expérience	p-valeur		
	Haie-Milieu de la bande enherbée		
	Transect	Poste	Transect*poste
RD	0,0448	0,7870	0,7632
SDR avec RD	0,0685	0,7992	0,8412
RLD	0,1039	0,2187	0,7901
SDR avec RLD	0,1186	0,0240	0,2492
SDR avec RD, ρ_a et la teneur en sable	0,4968	0,4997	0,4971

Le RD est environ deux fois plus élevé pour le transect B que pour le transect A (Fig. 39). Deuxièmement, le SDR dans la haie est significativement plus grand qu'au milieu de la bande enherbée (Fig. 39). Le sol serait donc 10 fois moins sensible à l'érosion concentrée dans la bande enherbée que dans la haie. Ceci est très certainement dû à la végétation de la bande enherbée qui était bien développée au moment de l'échantillonnage, comparativement aux plantes herbacées sous la haie. Il est à noter que la variabilité des mesures est très grande et qu'un plus grand nombre d'échantillons serait nécessaire pour une caractérisation plus précise de la moyenne. Cela est particulièrement vrai dans la bande enherbée où l'on pouvait observer des lignes de végétation séparées par des lignes où le sol est totalement à nu (Annexe 32).

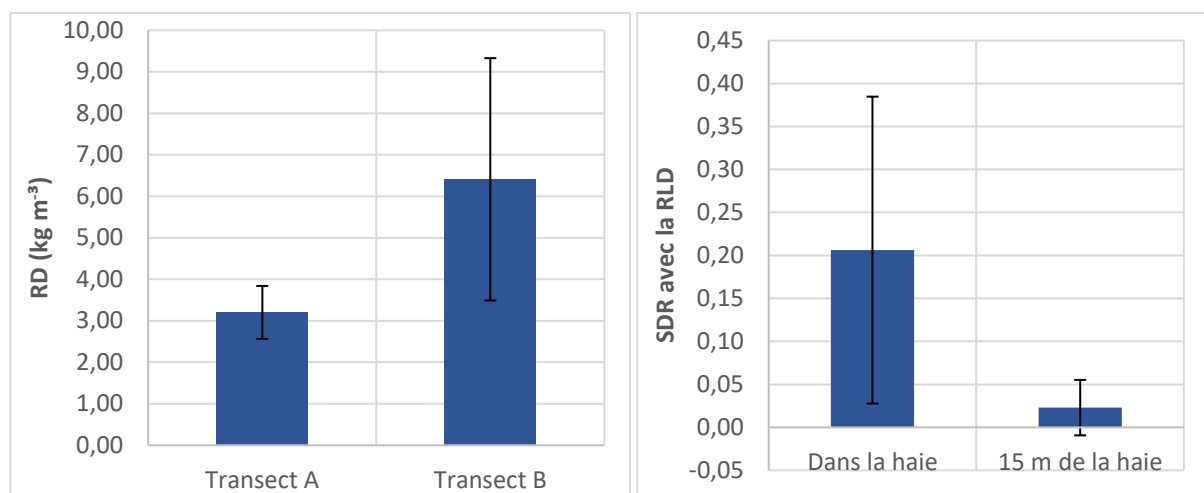


Figure 39: Densité racinaire (kg m⁻³) en fonction du transect (gauche) et ratio de détachement du sol (-) avec la densité de longueur racinaire en fonction du poste (droite) pour les postes 1 et 3 des transects A et B

Cependant, les résultats doivent être nuancés. Tout d’abord, ceux-ci dépendent fortement de l’état de la végétation lors de la prise des échantillons. En effet, les racines ont été prélevées fin mars, période à laquelle les plantes herbacées non vivaces (ronces, orties, etc.) ne sont pas encore complètement développées après l’hiver. Un échantillonnage à différents moments de l’année permettrait donc de mieux caractériser la capacité de la haie à résister aux écoulements concentrés. Deuxièmement, les racines dans la haie sont en majorité des racines lignifiées alors que les racines de la bande enherbée sont beaucoup plus fines et non lignifiées (Annexe 30). Les racines de la haie ont donc un plus grand diamètre et sont plus résistantes que les racines de la bande enherbée mais les équations utilisées ne tiennent donc pas compte de ces différences. *Vannoppen et al. (2017)* ont développé des équations qui incluent le diamètre des racines mais pour des raisons pratiques, le diamètre des racines n’a pas été analysé dans ce travail. Troisièmement, des racines ont été perdues à chaque étape de l’expérience : lavage, conservation, etc. Les racines lignifiées sont encore plus concernées car elles se cassent plus facilement lors de leur manipulation que les racines de la bande enherbée, ce qui a surement sous-estimé les mesures dans la haie. En outre, le traitement des images par le programme imageJ n’est pas optimal et la résolution utilisée n’a pas permis de détecter les racines les plus fines. Inversement, certains réseaux plus denses de racines ont engendré une surestimation du RLD. Les fonctions “skeletonize” et “erode” ont également pu engendrer un biais de la mesure de la longueur racinaire. Pour finir, les réseaux de racines les plus denses qui n’ont pas pu être scannés ont été estimés par extrapolation. Or, ces réseaux racinaires n’avaient pas forcément la même masse par rapport à la longueur racinaire que les racines utilisées pour l’extrapolation. Enfin, le coefficient de détermination des équations utilisées (Equations 16-17-18) par *Vannoppen et al. (2017)* ne vaut que 0,3. Par ailleurs, deux valeurs de masse racinaire dans ce travail dépassent les gammes de valeurs utilisées par *Vannoppen et al. (2017)* mais cette influence est surement négligeable vu que les valeurs de SDR sont très basses et peu sensibles à la masse racinaire lorsque les valeurs de celles-ci sont élevées.

7. Simulateur de ruissellement et de sédimentation

Cette mesure est réalisée début mai 2018. Les résultats complets se trouvent en annexe 33. La zone calme devant la haie est d'en moyenne 2,3 cm de haut et de 13,8 cm de longueur. L'eau a donc un temps de résidence (t_R) d'en moyenne 0,6 s, ce qui correspond à une efficacité de sédimentation de 14,4 %. La variabilité entre les mesures est très faible.

Cependant, cette mesure a ses limites. Pour commencer, en raison de la lourdeur de la mesure et de la mise au point tardive de l'équipement, seulement 3 mesures ont été réalisées et toutes les 3 ont été réalisées au niveau du transect A. Elle n'est donc pas représentative de l'ensemble de la haie. De plus, la résistance de la haie dépend directement du développement de la végétation herbacée. Pour représenter cette variation, il faudra répéter l'expérience tout au long de l'année. Ensuite, dans les conditions réelles, l'eau de pluie ruisselle d'abord dans la bande enherbée avant d'arriver à la haie. Or, la bande enherbée crée aussi une résistance aux écoulements ce qui n'est pas pris en compte dans ce protocole. Pour finir, les équations utilisées ne tiennent pas compte de la taille des particules transportées par l'eau. Elles ont cependant été mises au point sur des sols similaires. Le simulateur de ruissellement et sédimentation permet donc d'avoir une idée de la résistance de la haie aux écoulements de surface mais les résultats dépendent d'un grand nombre de variables non prises en compte dans ce protocole.

8. Épaisseur de l'horizon humifère et observations

Les profils à la tarière ont été réalisés fin mars et début avril 2018. Sous la haie, une couche d'humus est observée, très certainement de type mull. Cette couche est de couleur noire et constituée de matériau végétal grossier. Elle est plus épaisse au transect B (10-15 cm) puis au transect A (5-10 cm) et elle est assez fine au transect C (2-5 cm) (Annexe 34).

Le but de cette mesure était d'évaluer la couche de colluvions à différentes distances de la haie. On n'observe pas de transition d'horizon sous la haie. En revanche, à partir de 2 m de la haie, on observe une transition entre deux horizons (photo en Annexe 35). Cette transition est de moins en moins profonde avec une distance croissante à la haie (Fig. 40). Elle correspond très certainement à la transition entre l'horizon Ap et Bt, c'est-à-dire entre l'horizon organo-minéral travaillé et l'horizon d'enrichissement en argile avec présence de tâches d'oxydo-réduction (Annexe 34). Il ne faut pas oublier que tant la parcelle cultivée que les bandes enherbées ont été labourées durant de nombreuses années, avec pour conséquence une homogénéisation de l'horizon Ap. Il y a de légères différences entre les transects. En effet, la transition Ap-Bt est moins profonde dans la nouvelle bande enherbée que dans l'ancienne.

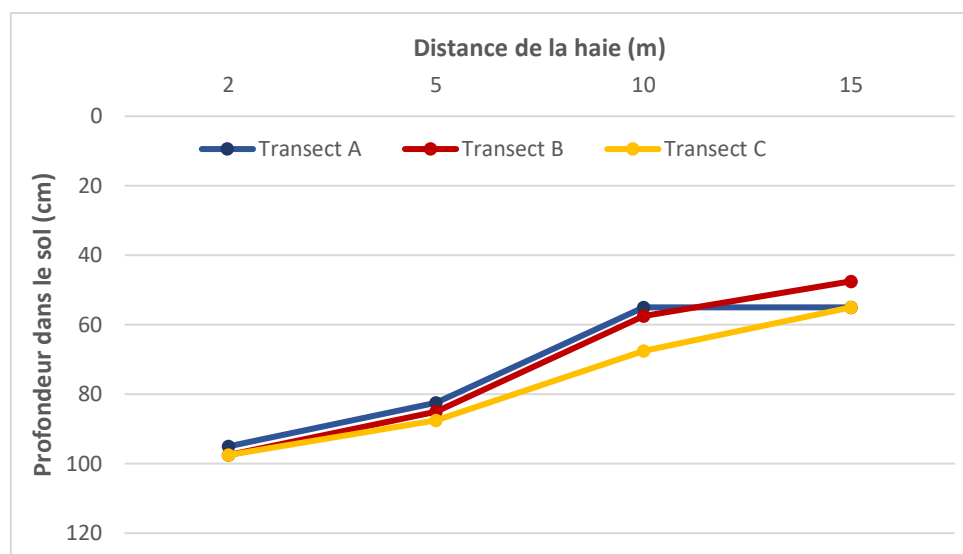


Figure 40: Profondeur moyenne de la transition entre l'horizon Ap et Bt (cm) en fonction de la distance par rapport à la haie (m)

9. Corrélation entre les résultats

9.1. Matrice de corrélation

L'analyse de corrélation permet de comprendre les corrélations entre les différentes variables étudiées dans ce travail (Fig. 41 et Annexe 36). Cette analyse est réalisée sur les postes 1-2-3 des transects A-B-C. Le poste 4 n'est pas inclus dans l'analyse car certaines données sont manquantes à cet endroit, comme par exemple pour l'infiltromètre (cfr. partie 4 §5.2.). L'analyse de corrélation rassemble l'ensemble des résultats sauf ceux du simulateur de ruissellement et la densité racinaire qui n'ont pas été réalisés sur l'ensemble des postes et des transects cités précédemment. Les résultats du perméamètre et de l'infiltromètre ont subi une transformation logarithmique ; la valeur C3 de l'infiltromètre a été remplacée par 0,1 au lieu du 0 mm h⁻¹ mesuré pour permettre cette transformation. Vu la relation étroite et inverse qui existe entre le pa et la porosité (Equation 8), les corrélations avec la porosité ne sont pas discutées plus amplement.

Ces analyses statistiques servent de base pour comprendre les corrélations entre les résultats. Seulement les corrélations supérieures à 70 % seront analysées. Cependant, il ne faut pas oublier qu'une corrélation élevée ne signifie pas toujours un lien de cause à effet.

	log(infitro)	log(perm)	saturation	cc	pf densiteapparente	reumacroporosite	n	alpha	argile	limon	sable	pH_kd	pH_eau_c_organique	humus	battance	P	K	Mg	Ca	N total	C/N
log(infitro)	1.00	0.64	0.87	0.51	-0.88	0.78	-0.62	0.72	-0.88	0.85	-0.36	-0.34	-0.64	0.67	-0.53	0.26	0.31	-0.09	-0.05	0.75	0.23
log(perm)	0.64	1.00	0.80	-0.11	-0.48	0.23	-0.98	0.94	-0.67	0.45	0.04	0.06	-0.17	0.58	-0.57	0.53	0.57	0.37	0.17	0.64	0.48
saturation	0.87	0.80	1.00	0.43	-0.76	0.67	-0.78	0.87	-0.91	0.80	-0.26	-0.15	-0.49	0.85	-0.76	0.40	0.61	0.11	0.17	0.91	0.47
cc	0.51	-0.11	0.43	1.00	-0.67	0.90	0.08	0.05	-0.52	0.63	-0.42	-0.12	-0.32	0.51	-0.43	0.06	0.15	-0.15	0.05	0.50	0.20
pf	-0.88	-0.48	-0.76	-0.67	1.00	-0.93	0.47	-0.52	0.80	-0.75	0.29	0.39	0.58	-0.60	0.44	-0.05	-0.08	0.30	-0.03	-0.65	-0.23
densiteapparente	-0.88	-0.75	-0.99	-0.48	0.77	-0.70	0.74	-0.83	0.95	-0.82	0.25	0.12	0.48	-0.89	0.80	-0.43	-0.63	-0.07	-0.23	-0.94	-0.50
reu	0.78	0.23	0.67	0.90	-0.93	1.00	-0.24	0.33	-0.73	0.76	-0.39	-0.29	-0.51	0.61	-0.48	0.06	0.12	-0.25	0.04	0.64	0.24
macroporosite	0.80	0.88	0.97	0.20	-0.63	0.48	-0.05	0.92	-0.84	0.72	-0.20	-0.15	-0.47	0.77	-0.70	0.41	0.63	0.17	0.13	0.84	0.43
n	-0.62	-0.98	-0.78	0.08	0.47	-0.24	1.00	-0.94	0.66	-0.41	-0.08	-0.17	0.07	-0.62	0.62	-0.59	-0.63	-0.39	-0.31	-0.67	-0.52
alpha	0.72	0.94	0.87	0.05	-0.52	0.33	-0.94	1.00	-0.72	0.65	-0.23	0.05	-0.23	0.75	-0.71	0.49	0.69	0.37	0.25	0.80	0.57
argile	-0.88	-0.67	-0.91	-0.52	0.80	-0.73	0.66	-0.72	1.00	-0.78	0.12	0.03	0.40	-0.87	0.80	-0.50	-0.56	-0.04	-0.26	-0.90	-0.54
limon	0.85	0.45	0.80	0.63	-0.82	0.76	-0.41	0.65	-0.78	1.00	-0.71	-0.31	-0.61	0.78	-0.64	0.10	0.39	-0.03	-0.00	0.82	0.41
sable	-0.36	0.04	-0.26	-0.42	0.29	-0.39	-0.08	-0.23	0.12	-0.71	1.00	0.45	0.52	-0.26	0.12	0.39	-0.00	0.09	0.29	-0.30	-0.03
pH_kd	-0.34	0.06	-0.15	-0.12	0.39	-0.29	-0.17	0.05	0.03	-0.31	0.45	1.00	0.91	0.19	-0.42	0.75	0.58	0.73	0.62	0.09	0.61
pH_eau	-0.64	-0.17	-0.49	-0.32	0.58	-0.51	0.07	-0.23	0.40	-0.61	0.52	0.91	1.00	-0.17	-0.05	0.46	0.23	0.58	0.50	-0.28	0.38
c_organique	0.67	0.58	0.85	0.51	-0.60	0.61	-0.62	0.75	-0.87	0.78	-0.26	0.19	-0.17	1.00	-0.96	0.50	0.77	0.17	0.56	0.99	0.77
humus	0.67	0.58	0.84	0.51	-0.60	0.61	-0.62	0.74	-0.87	0.78	-0.26	0.20	-0.17	1.00	-0.96	0.50	0.77	0.18	0.56	0.99	0.78
battance	-0.53	-0.57	-0.76	-0.43	0.44	-0.48	0.62	-0.71	0.80	-0.64	0.12	-0.42	-0.05	-0.96	1.00	-0.67	-0.88	-0.39	-0.61	-0.93	-0.86
P	0.26	0.53	0.40	0.06	-0.05	0.06	-0.59	0.49	-0.50	0.10	0.39	0.75	0.46	0.50	-0.67	1.00	0.81	0.75	0.43	0.47	0.59
K	0.31	0.57	0.61	0.15	-0.08	0.30	-0.03	0.09	-0.00	0.29	0.09	0.73	0.62	0.09	0.61	0.28	0.38	0.50	0.56	0.99	0.77
Mg	-0.09	0.37	0.11	-0.15	0.05	0.30	-0.03	0.09	-0.00	0.29	0.09	0.73	0.62	0.09	0.61	0.28	0.38	0.50	0.56	0.99	0.78
Ca	0.17	0.64	0.91	0.05	0.50	0.50	-0.03	0.09	-0.00	0.29	0.09	0.73	0.62	0.09	0.61	0.28	0.38	0.50	0.56	0.99	0.78
N total	0.75	0.64	0.91	0.50	-0.65	0.64	-0.67	0.80	-0.90	0.82	-0.30	0.09	-0.28	0.99	-0.93	0.47	0.75	0.14	1.00	0.48	0.68
C/N	0.23	0.48	0.47	0.20	-0.23	0.24	-0.52	0.57	-0.54	0.41	-0.03	0.61	0.38	0.77	-0.86	0.59	0.71	0.49	0.68	0.69	1.00

Figure 41: Matrice des coefficients de corrélation entre les résultats obtenus aux postes 1-2-3 des transects A-B-C (gris = très peu corrélé ; rouge = corrélé négativement ; bleu = corrélé positivement)

A. Analyse granulométrique

La teneur en limon est inversement corrélée avec la teneur en argile ($r=-0,78$) et en sable ($r=-0,71$), ce qui est cohérent vu que la somme de ces teneurs est égale à 100. La teneur en argile est corrélée négativement avec plusieurs paramètres physiques du sol comme par exemple le θ_{sat} ou bien le K_s obtenu par infiltromètre et positivement au p_a et la macroporosité. Presque tous les paramètres corrélés avec la teneur en argile ont une corrélation opposée avec la teneur en limon. L'analyse de corrélation indique également que la teneur en argile du sol est négativement corrélée à la teneur en C_{org} ($r=0,87$) et en N_{tot} ($r=0,90$) mais que la teneur en limon est positivement corrélée à ces résultats ($r=0,78$ et $r=0,82$).

B. Analyses chimiques (ions, pH, N, C/N) et IB

Le pH_{eau} et le pH_{KCl} sont fortement corrélés positivement l'un avec l'autre ($r=0,91$). La corrélation indique également que les teneurs en P et en Mg sont corrélées au pH_{KCl} , respectivement $r=0,75$ et $r=0,73$, mais pas avec le pH_{eau} . Il n'y a aucun lien entre les paramètres physiques du sol et les pH.

Concernant les éléments disponibles, il y a peu de corrélations. La teneur en Ca n'est corrélée avec aucune autre variable de ce travail. La teneur en P est seulement corrélée aux teneurs en K ($r=0,81$) et Mg ($r=0,75$).

En ce qui concerne les teneurs en C_{org} du sol, les corrélations avec les autres variables sont beaucoup plus nombreuses, surtout concernant celles liées à la physique du sol. Ainsi, la teneur en C_{org} est corrélée positivement avec le θ_{sat} et la macroporosité et négativement avec le p_a . De plus, la teneur en C_{org} est inversement corrélée à la teneur en argile ($r=-0,87$) et légèrement liée la teneur en K ($r=0,77$). On observe également une corrélation très forte de $r=0,99$ entre C_{org} et N_{tot} , ce qui explique pourquoi une corrélation élevée pour C_{org} est souvent élevée pour N_{tot} .

Le IB est fonction du pH_{eau} (si $\text{pH}>7$), ainsi que de la teneur en C_{org} , en argile et en limon (Equations 2 et 3). Néanmoins, le IB n'est pas corrélé aux pH mais la corrélation est de $r=-0,96$ avec le C_{org} alors qu'elle n'est que de $r=0,80$ avec la teneur en argile et de $r=-0,64$ avec la teneur en limon.

C. p_a , porosité et macroporosité

Pour une texture donnée, les paramètres p_a , porosité et macroporosité sont des indicateurs de la structure du sol. Or, la structure du sol dépend en partie de sa composition. Dans ce travail, deux types d'analyses s'intéressent à la composition du sol : les analyses chimiques et l'analyse granulométrique. Le p_a est corrélé à $r=-0,94$ avec la macroporosité, à $r=0,95$ avec la teneur en argile et à $r=-0,89$ avec la teneur en C_{org} ce qui ne permet pas à ce stade de déterminer lequel de ces facteurs joue un rôle prédominant par rapport aux autres.

Le p_a est également corrélé à de nombreux paramètres physiques du sol tels que le Ks obtenu par le perméamètre et l'infiltromètre, le θ_{sat} et le θ_{PFP} .

D. Courbe de rétention et REU

La courbe de rétention est analysée par trois points clefs : θ_{sat} , θ_{CC} et θ_{PFP} . Le θ_{sat} et le θ_{PFP} sont négativement corrélés entre eux mais ne sont pas corrélés avec le θ_{CC} . Un sol ayant un θ_{sat} élevé contient donc moins de micropores. Le θ_{sat} est également très fortement corrélé négativement avec le p_a ($r=-0,98$) et positivement avec la macroporosité ($r=0,97$). Il est également corrélé aux paramètres influant sur la structure du sol : teneur en argile ($r=-0,91$), teneur en limon ($r=0,80$) et teneur en C_{org} ($r=0,85$). Le θ_{PFP} est corrélé à certains facteurs également corrélés au θ_{sat} mais avec une relation opposée : p_a ($r=0,77$), teneur en argile ($r=0,80$) et teneur en limon ($r=-0,75$).

Les corrélations avec les paramètres de Van Genuchten (α et n) ne sont pas développées car leur faible représentativité de la courbe de rétention (cfr partie 4 §3.) rend l'analyse de corrélation peu pertinente.

E. Conductivité hydraulique à saturation

Alors que le perméamètre et l'infiltromètre mesurent tous les deux le Ks, leurs résultats ne sont corrélés qu'à $r=0,64$ ce qui est assez faible. Ceci est très certainement dû en partie aux nombreuses sources d'erreurs, principalement l'effondrement des échantillons utilisés dans le perméamètre qui rendent les résultats peu fiables. Ceci peut également être une conséquence du fait que l'infiltromètre est une mesure réalisée en champ, sur une plus grande surface et que le Ks est estimé par une équation qui approxime les écoulements 3D. A l'inverse, le perméamètre est réalisé en laboratoire sur des petits volumes (100 cm^3). Pour finir, la mesure de l'infiltromètre est plus susceptible d'être influencée par les galeries d'animaux dans le sol que la mesure du perméamètre avec laquelle il est possible de recommencer le prélèvement des échantillons afin d'éviter ces biais. Par ailleurs, les résultats de ces deux expériences sont corrélés positivement avec le θ_{sat} et la macroporosité et négativement avec le p_a . La mesure de l'infiltromètre est aussi corrélée à la teneur en argile ($r=-0,88$) et en limon ($r=0,85$) et la teneur en N_{tot} ($r=0,75$) mais seulement à $r=0,67$ avec la teneur en C_{org} .

9.2. Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur les mêmes postes et paramètres que l'analyse de corrélation (cfr. partie 4 §9.1.) (Fig. 42 et 43). On peut voir que les 2 premières composantes représentent assez bien le plan d'expérience : la composante 1 représente le facteur poste (54,9 % de la variabilité) et la composante 2 représente le facteur transect (22,5 % de la variabilité).

L'analyse en composantes principales donne des corrélations comparables à l'analyse de corrélations. On peut voir que le p_a et la teneur en argile sont corrélés positivement entre eux et sont corrélés négativement avec les K_s , la teneur en C_{org} , la teneur en N_{tot} , la macroporosité et le θ_{sat} . Les analyses chimiques donnent des résultats peu corrélés entre eux et peu corrélés avec les autres variables de ce travail. La teneur en sable est très peu corrélée à d'autres résultats.

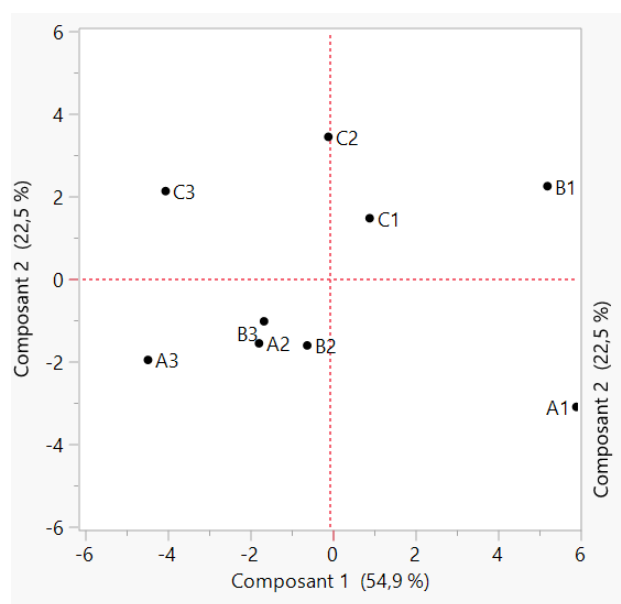


Figure 42 : Analyse en composante principale des résultats obtenus aux postes 1-2-3 des transects A-B-C (1)

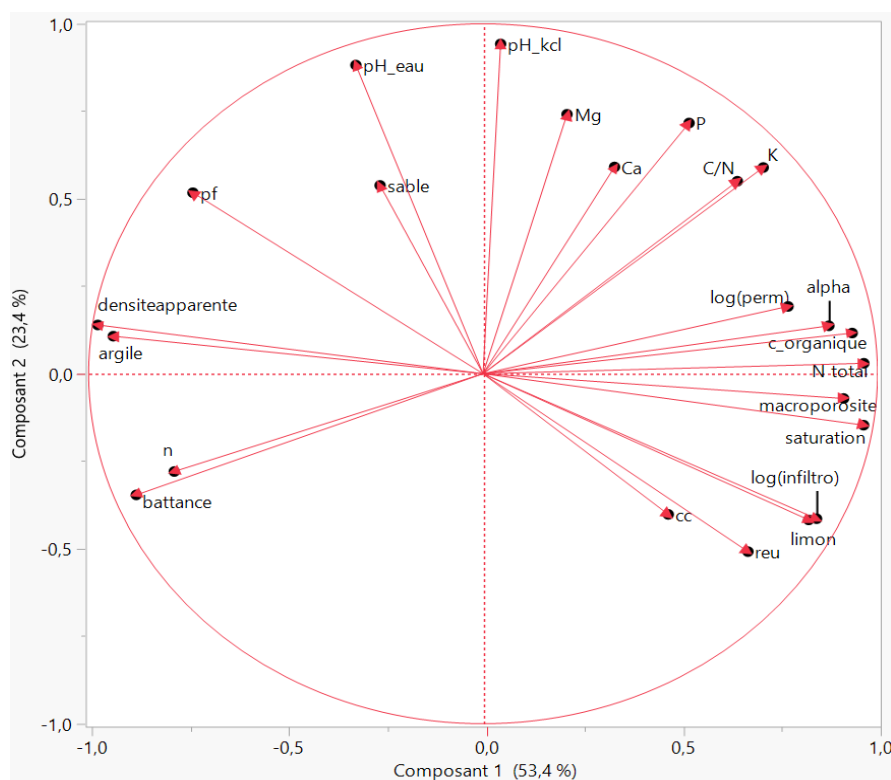


Figure 43 : Analyse en composante principale des résultats obtenus aux postes 1-2-3 des transects A-B-C (2)

Partie 5 : Discussion

1. Impact de la haie

Un grand nombre de mesures et d'analyses réalisées dans ce travail ont des résultats significativement impactés par la distance à la haie et la remontée dans la bande enherbée (Tableau 21). La distance à la haie n'a cependant pas influencé significativement le IB, le pH, le rapport C/N, le θ_{cc} , le REU et les teneurs en Mg, Ca, sable et limon. Pour rappel, le SDR n'a été mesuré qu'au poste 1 et 3 ce qui explique les données manquantes à 2 m de la haie. La profondeur de la transition entre l'horizon Ap et Bt mesurée à la tarière est donnée à titre d'indication car aucune analyse statistique n'a été réalisée sur ces résultats. Les mesures relatives à la sédimentation n'apparaissent pas dans ce tableau car les données ne concernent que le poste A1.

Tableau 21: Résumé des effets significatifs pour le facteur poste pour les postes 1-2-3 des transects A-B-C (e, f, g : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

Paramètre	Dans la haie		2 m de la haie		15 m de la haie
Argile	e	≤	e-f	≤	f
C _{org}	e	≥	e-f	≥	f
N _{tot}	e	>	f	=	f
K	e	>	f	=	f
P	e	=	e	>	f
ρ_a	e	<	f	<	g
Macroporosité	e	>	f	=	f
θ_{sat}	e	>	f	=	f
θ_{pfp}	e	<	f	<	g
Ks (infiltromètre)	e	>	f	>	g
Ks (perméamètre)	e	>	f	=	f
SDR avec RLD	e		>		f
Tarière	1 m	>	0,8 m	>	0,5 m

A. Analyse granulométrique, profondeur de l'horizon humifère et simulateur de ruissellement

Ce travail étudie une haie implantée parallèlement aux courbes de niveaux sur une parcelle située dans le Brabant Wallon en Belgique. Elle a été implantée il y a environ 50 ans. En amont de la haie se trouve une pente de 6-8 %, longue de 135 mètres environ. La pente s'atténue légèrement en aval, juste devant la haie (cfr. partie 3 §2.). Sur les 30 derniers mètres de la pente se trouve une bande enherbée. La partie nord de la bande enherbée a été implantée il y a une vingtaine d'année tandis que la partie sud date de l'année passée (2017). L'eau ruisselle donc d'abord sur le champ en amont de la bande enherbée puis sur la bande enherbée pour finir dans la haie en aval.

L'analyse granulométrique indique que seule la teneur en argile varie significativement à l'approche de la haie. Le sol sous la haie contient en effet moins d'argile que celui au milieu

de la bande enherbée, passant de 15,5 à 11,5 % (cfr. partie 4 §1.). Cette perte relative en argile dans le sol est corrélée à un enrichissement relatif (mais non significatif) en limon (cfr. partie 4 §9.). De plus, les profils à la tarière ont mis en évidence une couche de colluvions de plus en plus épaisse à l'approche de la haie : l'horizon Ap est profond de 0,5 m au milieu de la bande enherbée et de 1 m sous la haie (cfr. partie 4 §8.). Par le passé, la partie actuellement occupée par les bandes enherbées en amont de la haie était cultivée. Avant l'implantation des bandes enherbées, le sol était donc régulièrement labouré, mélangeant aussi les colluvions qui s'accumulaient en bas de pente. Ceci peut expliquer l'homogénéité de cet horizon organo-minéral.

Walter et al. (2003) ont également mesuré un épaississement progressif de l'horizon organo-minéral à l'approche de la haie. Cet horizon est profond d'en moyenne 44 cm en amont de la haie et d'en moyenne 51 cm sous la haie. *Viaud et al. (2009)* décrivent un épaississement de l'horizon A en amont de la haie va de 30 – 60 cm devant la haie et jusque 1 m sous la haie ce qui se rapproche plus des valeurs obtenues dans ce travail.

L'érosion et la sédimentation ont certainement impacté les transferts de particules au sein de la parcelle. L'érosion aratoire a probablement participé à l'épaississement de l'horizon Ap, surtout avant l'implantation de la bande enherbée et de la haie. Cependant, cette forme d'érosion n'est pas sélective en termes de granulométrie et ne devrait pas donc conduire à un changement de texture dans les colluvions. Il est dès lors fort probable que l'érosion hydrique ait joué un rôle déterminant dans l'évolution de la parcelle étudiée, sachant par ailleurs qu'elle fait partie de la ceinture limoneuse belge particulièrement sensible à l'érosion hydrique (*Verstraeten et Poesen, 2000*). On peut observer différentes dynamiques d'érosion et de sédimentation au sein de la parcelle étudiée.

Premièrement, depuis la mise en place des bandes enherbées, une grande partie de la déposition de sédiments se fait à la transition entre la parcelle cultivée et la bande enherbée en raison de la forte résistance hydraulique qu'offre la végétation de la bande enherbée. En effet, *Van Dijk et al. (1996)* ont montré qu'une bande enherbée peut retenir jusqu'à 99 % des sédiments lorsqu'elle est plus longue de 10 m, comme celle dans ce travail. Ils décrivent que la sédimentation se fait, selon un gradient granulométrique favorisant le dépôt de sable et limon.

Deuxièmement, une épaisse couche de colluvions est observée en bas de pente. L'apport de colluvions doit déjà avoir eu lieu avant l'implantation de la haie et de la bande enherbée. La carte de Vandermaelen indique l'état de la parcelle en 1850 (*Geoportail de la Wallonie, consulté en juin 2018*). On peut voir qu'à cette époque, la parcelle se trouvait dans un vallon naturel et la pente s'adoucisait déjà légèrement sur les derniers mètres en aval de la parcelle. A ce jour, l'adoucissement de la pente est situé sur les 2-3 m en amont de la haie. Or, cet adoucissement diminue la vitesse de l'eau et donc sa capacité de transport en

sédiments (*Ouvry et al., 2012*). Ceci contribue à l'accumulation de colluvions à l'approche de la haie et probablement aussi à l'enrichissement relatif en limon.

Troisièmement, la haie favorise également la sédimentation. Dans le cas d'une haie à plat comme celle étudiée dans ce travail, la résistance hydraulique dépend principalement de la strate herbacée. La résistance dépend effectivement de la densité de tiges mais aussi de la litière couvrant le sol (*Ouvry et al., 2012 ; Freeman et al., 2000 ; Richet et al., 2017*). Dans ce travail, le simulateur de ruissellement démontre que la strate herbacée de la haie pose une résistance au ruissellement venant de la parcelle. Les résultats indiquent que les particules d'eau ont un temps de résidence de 0,6 s dans la zone calme après le ressaut hydraulique ce qui pourrait engendrer une sédimentation de 14,4 % des particules lorsque le débit est de 2,64 l s⁻¹ ml⁻¹ (cfr. partie 4 §7).

Dans la littérature, *Richet et al. (2017)* étudient la sédimentation dans un contexte pédoclimatique similaire à celui de ce travail. Les débits utilisés sont de 1,92 à 6,51 l s⁻¹ ml⁻¹ avec des concentrations de 9 à 28 g l⁻¹ et des pentes <10 %. Ils concluent que lorsque l'eau contient plus de particules grossières (>50 % des particules sont > 125 µm), 93 à 99 % de la masse de sol injectée est sédimentée par la haie tandis que lorsque les flux contiennent plus de particules fines (<35 % des particules sont > 125 µm), 74 à 94 % de la masse de sol injectée est sédimentée par la haie. La différence entre ces résultats et les nôtres est surprenante et pourrait être due à un manque de représentativité de l'équation utilisée (cfr 10. de la partie 3). En effet, les résultats sur lesquels la régression est basée présentent une grande variabilité pour un t_R aussi faible que 0,6 s (Annexe 13). La différence entre ces résultats pourrait également être liée au développement de la végétation. En effet, les résultats issus du simulateur de sédimentation dépendent du degré de développement de la végétation. Cette mesure a été réalisée au début du mois de mai alors qu'en Belgique, la période la plus critique pour l'érosion hydrique est en mai et juin. Il serait logique que le t_R et l'efficacité de sédimentation augmentent avec le développement de la végétation. Pour finir, la quantité de sol sédimentée est indépendante de la concentration de particules dans le flux incident (*Richet et al., 2017*), ce qui indique que cela n'est pas une explication possible aux différences entre les résultats des diverses études.

Ouvry et al. (2012) et Richet et al. (2017) indiquent que la sédimentation impacte majoritairement les particules plus lourdes, c'est-à-dire les particules de sable. Elles sont les premières à sédimenter dans la zone calme juste après le ressaut hydraulique. Sur la parcelle étudiée, les particules fines ont sûrement traversé la haie, emportées par le ruissellement. Ceci est cohérent avec la diminution relative de la teneur en argile observée à l'approche de la haie.

Notons aussi que depuis l'implantation de la haie, il est possible que la sédimentation qu'elle engendre ait accentué l'adoucissement de la pente en amont de cette dernière. En effet, plusieurs auteurs décrivent que la sédimentation en amont de la haie peut créer une

terrasse avec le temps et engendrer des modifications topographiques en réduisant la pente de quelques pourcents (*Caubel, 2001 ; Liagre, 2006 ; Lin et al., 2009*).

B. Analyse chimique

Les pH, le rapport C/N et les teneurs en Mg et Ca ne sont pas impactés par la distance à la haie. En revanche, toutes les analyses chimiques indiquant un impact significatif de la distance à la haie vont dans le même sens : le sol s'enrichit en N_{tot} , P, K et en C_{org} à l'approche de la haie (cfr. partie 4 §1). Lorsqu'on compare le sol sous la haie à l'ensemble de la bande enherbée, la teneur en C_{org} est 2 fois plus élevée sous la haie (de 11,33 à 21,95 g par kg), la teneur en N_{tot} est 1,75 fois plus élevée sous la haie (de 0,11 à 0,19 %), et la teneur en K est 2 fois plus élevée dans la haie (de 17,00 à 35,67 mg par 100g). Ces éléments ont une teneur qui augmente fortement sous la haie. La teneur en P quant à elle décroît régulièrement avec la distance à la haie, passant de 7,4 à 3,2 mg par 100g de la haie à 15 m en amont. En ce qui concerne le N_{tot} , les valeurs présentent également un pic au niveau de la haie et diminuent brutalement à 2 m de la haie, ce qui provient de la forte corrélation qui existe naturellement entre N_{tot} et C_{org} (rapport C/N quasiment constant). A noter que les teneurs en C_{org} et en N_{tot} sont négativement corrélées à la teneur en argile et la teneur en limon est positivement corrélées à ces paramètres.

L'influence des haies sur la qualité chimique du sol est peu développée dans la littérature, excepté concernant le N_{tot} et le C_{org} . *Lin et al. (2009)* indiquent que les nutriments tels que le N et le P voient leurs quantités augmentées de façon similaire au C_{org} mais que le K ne semble pas impacté par la haie. Leurs résultats sont donc comparables à ceux de ce travail sauf pour K. En ce qui concerne le C_{org} , toutes les études montrent la même tendance que nos résultats : la teneur en C_{org} augmente légèrement à l'approche de la haie et croît brutalement sous la haie. En France, *Walter et al. (2003)* ont réalisé leur étude dans des conditions pédoclimatiques similaires à ce travail. Ils obtiennent une teneur élevée en C_{org} sous la haie (32 g de C kg^{-1} sur les 10 premiers centimètres de profondeur). Cette valeur est plus faible en amont de la haie et est peu variable au sein de l'horizon A (11,6 g kg^{-1} à 5-10 m en amont de la haie). Ils observent également une diminution de la teneur en C_{org} avec la profondeur sous la haie, mais ceci n'a pas été analysé dans ce travail. *Van Vooren et al. (2017)* synthétisent les résultats de plusieurs autres études en Europe. Lorsqu'on compare une parcelle cultivée à la même situation avec haie, la teneur en C_{org} est augmentée de 14 % sur une distance équivalente à 0,5 fois la hauteur de la haie puis décroît pour devenir négligeable à partir d'une distance équivalente à 4,3 fois la hauteur de la haie. Sous la haie, l'augmentation de la teneur en C_{org} concerne une profondeur de 10 à 40 cm.

Plusieurs hypothèses peuvent justifier l'enrichissement du sol en N_{tot} , P, K et en C_{org} à l'approche de la haie. La sédimentation pourrait expliquer cet enrichissement en amont de la haie. Cependant, les éléments analysés sont plus enclins à être transportés en association avec les argiles et la MO ou bien tout simplement en solution dans l'eau de ruissellement. Or, ces

particules fines ont tendance à traverser la haie plutôt que de sédimenter en amont comme discuté ci-dessus.

L'enrichissement du sol à l'approche de la haie est certainement la conséquence de la végétation de la haie. En effet, les plantes prélèvent les minéraux dans le sol par leur enracinement profond. Ces éléments sont restitués au sol lors de la chute des feuilles. Ceci enrichit les premières couches de sol en MO et est à l'origine de l'augmentation de C_{org} et de N_{tot} sous la haie. Une fois que les microorganismes ont dégradé la MO fraîche, le sol est également enrichi en minéraux (White, 2006 ; Walter et al., 2003 ; Follain et al., 2007 ; Viaud et al., 2009) ce qui explique les teneurs plus élevées de K et de P sous la haie. Ceci est cohérent avec l'abondance d'animaux tels que les vers de terre et les insectes observés sous la haie.

White (2006) décrit qu'une haie de feuillu peut fertiliser le sol jusqu'à 50 m autour de son pied. Dans ce travail, il est difficile d'évaluer sur quelle distance exactement la haie impacte la composition du sol. Il est uniquement possible de conclure que la haie a encore une légère influence sur la qualité chimique du sol à 2 m en amont. En revanche, la décroissance graduelle (plutôt que rapide) de P avec la distance à la haie reste inexpliquée, tout comme le fait qu'il n'y ait pas de variation significative pour les teneurs en Ca et Mg en fonction de la distance à la haie.

Il faut noter que la bande enherbée influence également la composition chimique du sol. Premièrement, 200 kg de nitrate d'ammonium ont été rependus en mai 2017 mais cet apport est peu influant étant donné les teneurs élevées en N_{tot} obtenues. Deuxièmement, l'herbe a été fauchée en mai, en août et en octobre 2017 puis ramassée les deux dernières fois. Si cette exportation est répétée chaque année, elle a certainement diminué les teneurs en minéraux et acidifié le sol. Cependant, ces effets sont limités vu l'implantation récente de la bande enherbée. Pour finir, le labour a certainement dilué les teneurs en C_{org} et en N_{tot} à la surface du sol.

C. ρ_a , porosité et macroporosité

Le ρ_a passe de 1,18 g cm⁻³ dans la haie à 1,44 g cm⁻³ à 2 m puis 1,56 g cm⁻³ à 15 m de la haie (cfr. partie 4 §2.). La porosité augmente donc fortement dans la haie par rapport à la bande enherbée, passant de 43,3 à 55,7 %. Ceci est cohérent avec les observations qui indiquent que le sol sous la haie est moins compact que dans la bande enherbée (Annexe 14.). Le ρ_a est totalement lié à la porosité du sol. Il est aussi corrélé à $r=0,94$ avec la macroporosité, c'est-à-dire les pores plus grands que 5,19 μ m de diamètre. Une grande partie de la tendance des résultats du ρ_a est donc liée à la macroporosité. La figure 44 présente une synthèse de la répartition des pores dans le sol et confirme cette hypothèse : la quantité de macropores est plus élevée sous la haie et décroît avec la distance à cette dernière. Les mésopores sont aussi plus présents dans le sol sous la haie et diminuent également avec la distance à la haie. À l'inverse, les micropores (plus petits que 0,1 μ m) sont moins présents dans la haie.

Il faut cependant noter que la bande enherbée a été labourée et tassée avec un rouleau au printemps 2017 ce qui a certainement légèrement impacté le ρ_a à cet endroit. En outre, il est probable que le labour dans la bande enherbée ait augmenté la porosité dans la première couche de sol. Ce labour a certainement atténué les différences du ρ_a entre la haie et la bande enherbée.

Dans la littérature, toutes les sources renseignent la même tendance. En France, *Walter et al. (2003)* rapportent que le ρ_a passe de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ sous la haie à $1,39 \text{ g cm}^{-3}$ entre 5-10 m de la haie. Au Kenya, *Kiepe (1995)* observe un ρ_a de $1,31 \text{ g cm}^{-3}$ sous la haie à $1,41 \text{ g cm}^{-3}$ à 2 m en amont de la haie. Ces résultats sont proches de ceux obtenus dans ce travail.

Les trois facteurs les plus susceptibles d'expliquer ces résultats sont les suivants : texture du sol, la teneur en C_{org} et l'activité biologique (présence de racines ainsi que de petits organismes ; *Walter et al., 2003 ; White, 2006 ; Kiepe, 1995*). En effet, le ρ_a est fortement corrélé positivement avec la teneur en argile et négativement avec la teneur en C_{org} . L'argile favorise la formation de microagrégats dans le sol. Cependant, on observe une diminution de la teneur en argile à l'approche de la haie. L'argile ne peut donc pas expliquer la diminution du ρ_a à l'approche de la haie. La teneur en C_{org} peut expliquer les résultats du ρ_a . *Walter et al. (2003)* font le lien entre le ρ_a et la teneur en C_{org} : lorsque la teneur en C_{org} augmente, le ρ_a diminue. Tous deux varient légèrement avec la distance de la haie et ont une valeur spécialement différente sous la haie. Troisièmement, les racines du sol améliorent sa structure (*Kiepe, 1995*). Les observations indiquent aussi plus de micro et macrofaune sous la haie. Or, les petits organismes présents en abondance sous la haie améliorent aussi la structure du sol (*Kiepe, 1995*). Ils ont une action de décompactage sur ce dernier, tout comme les racines. Pour finir, les plus gros animaux quant à eux impactent fortement la structure du sol en créant des terriers et des galeries.

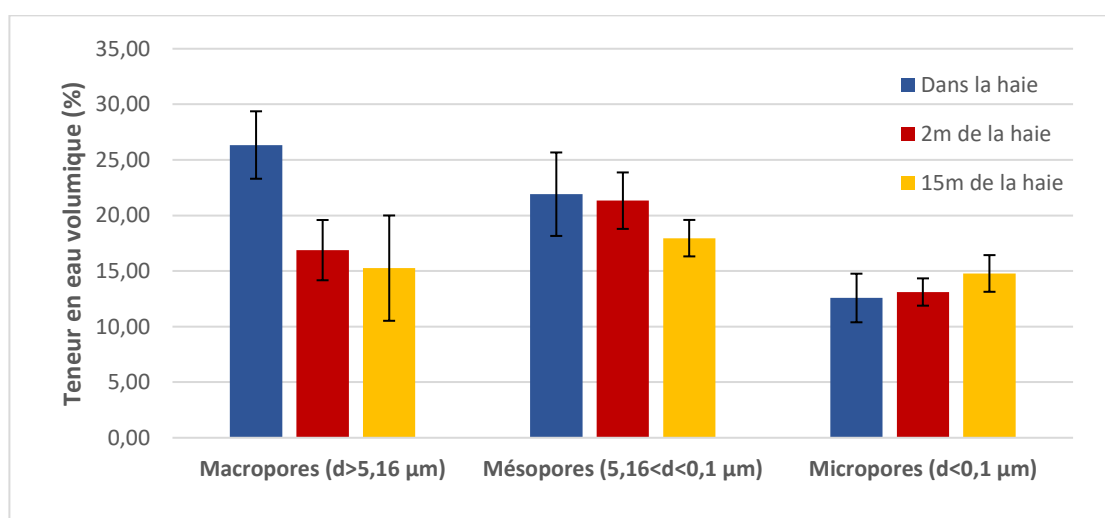


Figure 44 : Fraction volumique du sol en fonction de la taille des pores et de la distance par rapport à la haie pour les postes 1, 2 et 3 et les transects A, B et C

D. Courbe de rétention et REU

La courbe de rétention a été analysée par trois points clefs : θ_{sat} , θ_{CC} et θ_{PFP} (cfr. partie 4 §3.). La figure 33 présente les courbes de rétention moyennées en fonction de la distance à la haie. Pour commencer, on peut voir que le θ_{sat} (succion nulle) est plus élevé dans la haie et décroît avec la distance à la haie (Fig. 31). Le θ_{sat} dans la haie vaut 53 % alors qu'il vaut 41 % au milieu de la bande enherbée. Or, le θ_{sat} est lié à la porosité totale du sol (aux erreurs expérimentales près) et donc aussi au p_a comme discuté ci-dessus. En effet, le θ_{sat} est lié à $r=0,99$ au p_a . De plus, il est corrélé à $r=0,97$ à la macroporosité. L'augmentation du θ_{sat} sous la haie est donc principalement engendrée par l'amélioration de la structure comme discuté au point précédent. A la succion équivalente à la capacité au champ (succion de -3 m), le θ_{CC} n'est pas significativement impacté par la distance à la haie. On peut en déduire que la distance à la haie influence peu les pores structuraux du sol. A la succion de -158 m, le θ_{PFP} passe de 12,6 à 14,8 % entre le sol de la haie et le sol du milieu de la bande enherbée (Fig. 32). Le θ_{PFP} étant lié à la microporosité du sol, on peut en déduire que la microporosité diminue dans la haie par rapport à la bande enherbée, tout comme indiqué sur la figure 33. L'eau restante dans le sol à cette succion est contenue dans les pores avec un diamètre plus petit que 0,1 μm , les pores texturaux. Dans ces pores, l'eau est considérée comme indisponible pour les plantes (Ridremont et al., 2012). La diminution de microporosité dans la haie est certainement liée à l'appauvrissement relatif en argile du sol. En effet, la teneur en argile et le θ_{PFP} sont corrélés positivement à $r=0,80$. Ridremont et al. (2012) indiquent que la diminution de la teneur en argile est liée à une diminution de θ_{CC} et de θ_{PFP} (cfr. partie 2 au point 3.5. Fig. 5).

Dans la littérature, Kiepe (1995) étudie une haie sur un sol sablo-argileux au Kenya. Il fait les mêmes conclusions : la teneur en eau à faible succion augmente sous la haie. Il précise aussi que l'influence de la haie sur la courbe de rétention ne concerne que les 30 premiers centimètres du sol. Il n'observe cependant pas d'impact de la haie sur la microporosité, contrairement à nous.

Le REU n'est pas significativement impacté par la distance à la haie (cfr. partie 4 §4). Ces résultats ne sont pas surprenants lorsqu'on sait que le REU dépend du θ_{CC} et du θ_{PFP} . En effet, l'analyse statistique (cfr. partie 4 §3.) n'indique pas d'effet significatif pour le θ_{CC} . Les valeurs du θ_{PFP} sont significativement croissantes avec la distance à la haie mais les teneurs en eau à cette succion sont faibles et relativement proches. Le REU est contenu dans les mésopores qui contiennent l'eau disponible pour les plantes. La figure 44 indique une légère augmentation de la mésoporosité sous la haie mais pas suffisante afin d'être significative statistiquement.

E. Conductivité hydraulique à saturation

Le K_s a été déterminé par deux méthodes : l'infiltromètre (en champ) et le perméamètre (en laboratoire). Le K_s mesuré par l'infiltromètre est toujours plus élevé dans la haie et diminue avec la distance à la haie mais avec de grandes différences entre les transects : respectivement pour les transects A-B-C, le K_s sous la haie vaut 1906, 72 et 23 mm h⁻¹ et le K_s au milieu de la bande enherbée vaut 2, 16 et 0 mm h⁻¹ (cfr. partie 4 §5.1.). Le K_s est donc 85 fois plus grand sous la haie que sur l'ensemble de la bande enherbée pour le transect A, et presque 4 fois plus grand pour les transects B et C. Les résultats du perméamètre n'étant pas fiables à cause de nombreuses sources d'erreurs, les valeurs ne seront pas développées (cfr. partie 4 §5.2.).

Le poste A1 présente une valeur de K_s spécialement élevée. Le sol à cet endroit a fortement été impacté par les nombreuses galeries d'animaux situées sous l'infiltromètre. Les autres mesures de l'infiltromètre, et principalement les postes sous la haie, ont certainement aussi été biaisées par les galeries d'animaux sans pouvoir en quantifier l'impact. *Ouvry et al. (2012)* soulignent également l'influence des galeries de mammifères sur leurs mesures.

Dans la littérature, *Ouvry et al. (2012)* étudient 3 haies à plat sur un sol limoneux en France. Ils obtiennent que, pour des débits allant de 0 à 4,1 l s⁻¹ ml⁻¹, l'infiltration moyenne sous la haie vaut 385 mm h⁻¹. *Kiepe (1995)* étudie les haies à plat dans un sol sablo-argileux au Kenya. Il obtient un K_s de 60 mm h⁻¹ sous la haie. Ce K_s décroît rapidement sur une distance > 1 m de la haie et varie peu au-delà de cette zone. Il décrit aussi que le K_s est augmenté sous la haie que sur les 30 premiers centimètres du sol.

Kiepe (1995) fait le lien entre l'augmentation de l'infiltration et l'augmentation importante de la porosité sous la haie. En effet, les résultats de K_s sont corrélés à $r=0,88$ avec les résultats du p_a et donc de la porosité. Le K_s et la porosité ont tous les deux des valeurs spécialement élevées sous la haie et qui décroissent rapidement avec la distance à cette dernière. Le p_a quant à lui dépend fortement de la macroporosité. Or, *Ridremont et al. (2012)* indiquent que les pores plus grands que 6-10 µm sont des pores drainants : l'eau s'y écoule sous l'effet de la gravité. La macroporosité est donc importante pour le drainage de l'eau dans le sol, ce qui explique la corrélation de $r=0,80$ entre la macroporosité et le K_s . Pour finir, la résistance de la haie crée une zone calme en amont de cette dernière, zone où le t_R de l'eau est augmenté. Le volume d'eau susceptible de s'infiltrer dans le sol est donc augmenté à cet endroit (*Kiepe, 1995*) mais cela n'a pas été quantifié dans ce travail. Cet effet reste cependant limité au vu du faible t_R mesuré.

Les valeurs de référence du K_s sont les suivantes : 100 - 300 mm h⁻¹ pour le sable, 30-50 mm h⁻¹ pour les limons et < 10 mm h⁻¹ pour les argiles (*Biielders et Delvaux, 2018*). Les valeurs de K_s mesurées dans ce travail sont donc plus faibles que les valeurs typiques pour des sols limoneux, ce qui peut être expliqué par plusieurs hypothèses. Pour commencer, la bande enherbée est un lieu de passage des machines agricoles, certainement à l'origine d'un

tassement du sol. De plus, les bandes enherbées ont été impactées par le travail du sol avant leur implantation mais également après, étant donné que le sol a encore été labouré l'année dernière (2017) (cfr. partie 3 §2.). Ce labour a mélangé les premiers centimètres du sol, ce qui a certainement dilué la MO plus abondante à la surface. A cause de la diminution de la teneur en MO, le sol est moins stable (discuté au point suivant) et donc plus enclin à se tasser sous l'effet de l'humectation. De plus, cette diminution de MO dans la bande enherbée a certainement augmenté la sensibilité du sol à la battance. Ceci crée une croûte de battance à la surface du sol et limite l'infiltration de l'eau. Ceci pourrait également expliquer le Ks de 0 mm h⁻¹ au poste C3, valeur anormalement faible. Ce résultat est certainement la combinaison de plusieurs facteurs : la sensibilité du sol à la battance (cfr. point suivant), la végétation plus éparsée à cet endroit (Annexe 32), le passage des machines agricoles qui tassent le sol et la compaction du sol plus élevée pour ce transect (cfr. partie 5 §2.).

F. Sensibilité du sol à l'érosion

Le sol de la culture étant limoneux et intensément cultivé, il est sensible à l'érosion hydrique (*Verstraeten et Poesen, 2000*). L'érosion diffuse est certainement présente sur la parcelle, favorisant le transport de particules fines. Cependant, compte tenu de la pente du terrain en amont de la haie, l'érosion concentrée est probablement dominante, principalement dans la culture mais aussi avant l'implantation de la bande enherbée. Dans ce cas, l'érosion se fait sans tris des particules (*Dautrebande et al., 2006 ; Ouvry et al., 2012*).

Pour commencer, la haie influence l'érosion diffuse au sein de la parcelle. Cette érosion est fortement liée à la stabilité structurale du sol. La strate herbacée de la haie protège le sol contre l'impact des gouttes de pluie. De plus, on observe une augmentation de la teneur en C_{org} à l'approche de la haie ce qui diminue la sensibilité du sol à l'érosion. En effet, *Dautrebande et al. (2006)* disent qu'un gain d'1 % de MO correspond à une diminution de l'érodibilité d'environ 10 %. L'IB permet aussi d'évaluer la sensibilité du sol à cette érosion. L'IB diminue lorsque la teneur en argile et/ou en MO augmente (Equation 2 et 3). L'IB n'est pas significativement pas impacté par la distance à la haie (cfr. partie 4 §1.). Cependant, le CPAR a identifié que le sol de la haie était non ou assez battant alors que le sol au milieu de la bande enherbée est identifié comme étant battant ou très battant (Annexe 14). Dans ce travail, on observe une diminution de la teneur en argile à l'approche de la haie ce qui est donc défavorable. Cependant, on observe une augmentation de la teneur en C_{org} à l'approche de la haie ce qui diminue donc la sensibilité du sol à l'érosion.

Deuxièmement, la bande enherbée et la haie participent à la diminution de l'érosion concentrée au sein de la parcelle. Dans ce travail, la mesure de densité racinaire a permis d'évaluer la sensibilité du sol à cette érosion. Le ratio de détachement du sol (SDR) calculé à partir de la densité de longueur racinaire (RLD), c'est-à-dire la sensibilité à l'érosion, est plus faible dans la bande enherbée que dans la haie (cfr. partie 4 §6). Ceci est certainement la conséquence de la grande quantité de racines fibreuses dans la bande enherbée,

particulièrement efficace contre l'érosion (*Vannoppen et al., 2017*). La bande enherbée étant peu sensible à l'érosion, elle participe à la diminution de la quantité de sédiments transportés vers la haie. Il faut noter que cette mesure a été réalisée fin mars alors qu'en Belgique, la période la plus critique pour l'érosion hydrique est en mai et juin. Avec l'avancement de la saison, la végétation se développe ce qui pourrait faire influencer le SDR.

Cependant, le SDR n'est basé que sur la densité de racines dans le sol. Or, la composition et la structure du sol sont déterminantes pour évaluer la sensibilité de ce dernier à l'érosion (*Dautrebande et al., 2006*). *Vannoppen et al. (2017)* indiquent que plus la cohésion du sol est grande, moins le sol est sensible à l'érosion. En effet, la sensibilité du sol à cette érosion décroît avec les forces liant les particules de sol (*Knapen et al., 2007*). L'érodibilité augmente avec la teneur en sable du sol et diminue avec la teneur en argile à cause de la haute cohésion entre les particules fines. La teneur en argile plus faible sous la haie augmente donc la sensibilité à l'érosion à l'inverse de la teneur en MO, comme discuté ci-dessus. *Vannoppen et al. (2017)* indiquent aussi que le potentiel de réduction de l'érosion par les racines fibreuses est positivement corrélé à la teneur en sable et négativement corrélé à la densité apparente.

2. Impact des transects

Les différences significatives entre les transects sont nettement moins nombreuses que pour les postes (Tableau 22). Pour rappel, les transects A et B sont situés sur l'ancienne bande enherbée alors que le transect C est situé sur une bande enherbée implantée en 2017. Les transects A et C sont situés dans des creux et sont donc plus propices à concentrer les écoulements de surface que le transect B situé sur une légère butte. Peu de liens sont faits avec la littérature dans cette partie car le cas étudié dans ce travail est très spécifique.

Tableau 22 : Résumé des résultats significatifs pour le facteur transect pour les postes 1,2 et 3 et les transects A, B et C (E, F, G : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %)

Paramètre	Transect A		Transect B		Transect C
Mg	E-F	=	E	≤	F
ρ_a	E-F	=	E	<	F
θ_{sat}	E-F	=	E	>	F
θ_{ppp}	E	>	F	<	G
Ks (infiltromètre)	E	=	E	>	F
Ks (perméamètre)	E	>	F	=	E-F
RD	E	<	F	-	-
Tarière	-	=	-	<	-

Au niveau de la chimie, seule la teneur en Mg est impactée, passant de 13,67 à 21,67 mg par 100g du transect B au transect C (cfr. partie 4 §1.). Pour les paramètres physiques du sol, le ρ_a présente une augmentation de 0,14 g cm⁻³ entre le transect B et C (cfr. partie 4 §2.). La courbe de rétention est également impactée par le transect. Plus précisément, le θ_{sat} au

transect B vaut 48,0 % alors qu'il vaut 43,9 % pour le transect C et le θ_{PPF} vaut 12,8 % pour le transect A, 12,4 % pour le transect B et 15,3 % pour le transect C (cfr. partie 4 §3.). Le transect C contient donc moins d'eau à faible succion mais plus d'eau à grande succion que les transects A et B (Fig. 34). Le K_s de l'infiltromètre est variable en fonction du transect : respectivement pour les transects A, B et C, le K_s vaut 22, 19 et 5 mm h⁻¹. Concernant la mesure de densité racinaire, le RD est 2 fois plus grand pour le transect B qu'au transect A. Pour finir, la transition entre les horizons Ap et Bt est légèrement moins profonde pour le transect A et B comparativement au transect C.

Pour commencer, les transects A et B sont situés sur une bande enherbée vieille d'environ 20 ans alors que le transect C est situé sur une bande enherbée datant de l'année passée. Cela influence une partie des variables de ce travail même si les effets ont certainement été atténués à cause du travail du sol réalisé l'année dernière sur les deux bandes enherbées.

Le p_a est plus élevé dans la nouvelle bande enherbée ce qui indique que le sol est plus compact à cet endroit. La porosité du sol est donc plus faible ce qui explique certainement la raison pour laquelle le θ_{sat} et le K_s de l'infiltromètre diminuent dans la nouvelle bande enherbée. La figure 34 indique que la nouvelle bande enherbée contient par ailleurs moins d'eau à faible succion que l'ancienne bande enherbe. Trois hypothèses peuvent expliquer ces résultats. Tout d'abord, les teneurs en argile ou en C_{org} pourraient expliquer ces variations mais elles ne sont pas significativement impactées par le transect. Une troisième hypothèse concerne la végétation. En effet, les racines du sol améliorent sa structure (Kiepe, 1995). Ceci coïncide avec les observations indiquant une végétation plus éparse et moins développée dans la nouvelle bande enherbée. Le sol de la nouvelle bande enherbée est donc à nu entre les lignes de végétation, le rendant plus sensible à l'érosion et à la battance. Malheureusement, la mesure de densité racinaire n'a pas été réalisée au transect C ce qui aurait permis de quantifier la végétation. La faune est également légèrement moins présente dans la nouvelle bande enherbée. Or, les petits organismes dans le sol ont une action de décompactage sur ce dernier (Kiepe, 1995).

Les résultats indiquent que la granulométrie semble homogène entre les transects. La couche de colluvions est légèrement plus profonde dans la nouvelle bande enherbée. Il est possible que l'érosion aratoire ait plus impacté la nouvelle bande enherbée qui a été cultivée plus longtemps que l'ancienne. Pour les mêmes raisons, il est possible que la nouvelle bande enherbée ait été enrichie par des engrais et des amendements apportés par le fermier. Ces apports pourraient expliquer la teneur plus élevée en Mg dans cette zone.

L'impact de l'ancienneté de la bande enherbée étant plus important que celui du vallonnement de la pente, il est difficile de comparer le transect C au transect A. Au sein de l'ancienne bande enherbée, on s'attendait à ce que le transect A situé dans un vallon soit plus soumis à l'érosion concentrée. Cependant, on n'observe pas de différence de profondeur de

la couche de colluvions. L'augmentation de K_s au transect A est certainement due à la valeur très élevée du K_s mesuré en A1. L'analyse statistique indique que le θ_{PFP} est différent pour chaque transect. Or, on peut voir que les valeurs des transects A et B sont très proches et toutes deux plus faibles qu'au transect C. Le θ_{PFP} est lié aux pores texturaux du sol et donc à la teneur en argile du sol. Cependant, cette dernière n'est pas impactée par les transects.

3. Interaction poste-transect

Certains résultats indiquent une interaction significative poste-transect : θ_{sat} , θ_{PFP} , K_s de l'infiltromètre et du perméamètre. Le θ_{sat} a une évolution similaire pour chaque transect lorsqu'on s'éloigne de la haie mais la valeur en A1 est particulièrement élevée (cfr. partie 4 §3.). Concernant le θ_{PFP} , la valeur en A1 est spécialement faible et est donc significativement différente du poste A2 alors que pour les autres transects, l'interaction n'indique pas de différence entre le poste 1 et 2. En ce qui concerne le K_s de l'infiltromètre, on retrouve la même tendance : le poste A1 a un K_s extrêmement élevé comparativement aux autres de postes de la haie et à l'ensemble des mesures (cfr. partie 4 §5.1.). L'interaction pour les résultats du perméamètre ne sera pas discutée au vu des sources d'erreur sur la mesure (cfr. partie 4 §5.2.).

Toutes les interactions semblent mener à la même conclusion : le sol en A1 contient nettement plus de porosité et légèrement moins de micropores par rapport aux autres postes. Ceci coïncide avec les observations visuelles indiquant une faune clairement plus présente à cet endroit. La faune est certainement à l'origine de l'augmentation de la porosité ainsi qu'à la quantité élevée de galeries dans le sol. En effet, ni la teneur en C_{org} , ni la teneur en argile ne sont significativement différentes entre les transects. Les mesures de l'ensemble des autres postes mais surtout des postes B1 et C1 ont certainement aussi été impactées par la présence de la faune. Cependant, avec les données disponibles, il est impossible de quantifier cet influence. Au départ dans ce travail, la répartition de la faune était supposée homogène dans la haie mais il serait intéressant de réaliser une expérience sur le sujet car cela ne semble pas être le cas.

4. Champ

Les mesures et analyses dans le champ servent de référence afin de comparer les résultats de la haie avec ceux de la bande enherbée. L'analyse statistique comparant le milieu de la bande enherbée et le champ n'est réalisée que lorsque 3 répétitions sont disponibles. Les différences entre les deux postes étant généralement très faibles, les résultats sont moyennés.

La granulométrie est fortement semblable entre la bande enherbée et la haie. La teneur en argile est de 13,3 % ; elle ne se différencie ni des valeurs de la haie, ni du milieu de la bande enherbée. Le pH_{eau} vaut 7,35 et pH_{KCl} vaut 6,5 ce qui est légèrement plus élevé que sur l'ensemble de la bande enherbée et la haie. La teneur en C_{org} vaut 14,1 g kg⁻¹ et N_{tot} vaut 0,14 %, valeur proche du bas de la bande enherbée. L'IB vaut en moyenne 1,76, ce qui est légèrement plus faible par rapport à l'ensemble de la bande enherbée et de la haie. Pour finir, les teneurs en Ca, K et P sont plus élevées dans le champ que sur l'ensemble de la bande enherbée, à l'inverse de la teneur en Mg qui est légèrement plus faible dans le champ.

Le sol du champ est fortement influencé par les pratiques agricoles. Uniquement sur l'année 2017, l'agriculteur a répandu 4 fois de l'engrais, 2 fois du fumier ainsi que plusieurs fois des produits phytosanitaires. Les pratiques agricoles sont certainement à l'origine des résultats décrits ci-dessus. L'agriculteur a répandu des engrais, généralement riches en N, P et K ce qui est à l'origine de leurs teneurs élevées dans le champ. Des pratiques telles que le chaulage peuvent expliquer l'augmentation du pH. La diminution de la teneur en Mg peut être la conséquence de l'exportation de la végétation ce qui appauvrit le sol lorsque l'agriculteur ne compense pas l'exportation par un apport externe de minéraux.

Le p_a et la macroporosité indiquent toutes deux une interaction positive quand on compare statistiquement les postes au milieu de la bande enherbée et les postes dans le champ. En effet, au passage de la bande enherbée au champ, le p_a diminue pour le transect A et augmente pour le transect B. Le poste B4 est situé dans le coin du champ. Il est fort probable que les mesures prises à ce poste soient biaisées par le tassement du sol, lui-même provoqué par le passage à répétition des machines agricoles qui font demi-tour à cet endroit. Ceci pourrait être la raison pour laquelle, au passage de la bande enherbée au champ, le θ_{sat} augmente et le θ_{PPF} diminue pour le transect A alors que la tendance est inverse au transect B. Ceci pourrait aussi être à l'origine de l'augmentation du θ_{CC} entre le milieu de la bande enherbée et le champ.

Le transect A semble donc plus représentatif des paramètres physiques du sol du champs. Ses paramètres sont les suivants : p_a vaut 1,4 g cm⁻³, macroporosité vaut 16 %, porosité vaut 47 %, REU vaut 20,5 %, K_s vaut 68 mm h⁻¹, θ_{sat} vaut 45,4 % et θ_{PPF} vaut 13,7%. Ces valeurs sont semblables à celles obtenues dans la bande enherbée avec une légère amélioration de la structure du sol, peut-être liée aux amendements tel que le fumier. De plus, le p_a varie dans le temps sur une parcelle cultivée, se densifiant au cours de la saison ce qui a pu influencer les résultats.

5. Critiques des expériences

La plus grosse lacune de ce travail est l'absence d'une parcelle témoin sans haie ce qui aurait permis de mieux distinguer les effets liés à la haie. La bande enherbée devant la haie a comme avantage de conserver le sol et de diminuer l'influence de l'agriculture sur celui-ci. Malheureusement, les pratiques agricoles ont tout de même modifié les mesures, principalement les mesures physiques du sol mais cela n'est pas quantifiable avec les données dans ce travail. De plus, certains résultats obtenus sont impactés à la fois par la présence de la haie et par l'adoucissement de la pente en amont de la haie ce qui rend difficile la distinction entre ces deux facteurs.

Certaines mesures dans ce travail demanderaient à être répétées. C'est le cas des mesures du perméamètre réalisées sur les échantillons contenus dans les kopeckys qui s'étaient préalablement effondrés lors des mesures concernant la courbe de rétention. Les mesures au poste B4 ont également fortement été influencées par le trafic (demi-tour) des machines agricoles dans cette zone et demanderaient à être répétées.

Pour finir, l'ajout du poste C4 au plan d'expérience n'est pas pertinent puisque ce poste se trouve dans une autre culture. Cependant, avoir 4 postes pour chaque transect aurait permis de réaliser l'analyse statistique sur l'ensemble des mesures et ainsi comparer tous les postes ensembles.

Partie 6 : Conclusion

Avant l'implantation de la haie il y a plus de 50 ans, la parcelle étudiée était cultivée. A cette époque, le sol était déjà affecté par l'érosion et la sédimentation. En effet, l'érosion aratoire a engendré le dépôt de colluvions en aval de la pente. Cette érosion a contribué à la formation d'un horizon Ap épais et à l'adoucissement de la pente sur les derniers mètres en amont de la haie. De plus, l'érosion hydrique était aussi présente car la parcelle se trouve sur la ceinture limoneuse belge, particulièrement sensible. Cette érosion favorise le transport de particules de l'amont vers l'aval de la parcelle. Depuis son implantation, la haie mais surtout la strate herbacée à ses pieds, opposent une résistance aux écoulements de surface. Ceci favorise le dépôt de particules grossières en amont de la haie et participe à l'adoucissement de la pente à cet endroit. Il est cependant difficile de distinguer la sédimentation engendrée par l'adoucissement de la pente et de celle engendrée par la présence de la haie. Pour cette raison, il aurait été intéressant d'analyser l'érosion et la sédimentation en comparant une parcelle avec haie à une parcelle témoin sans haie.

Depuis l'implantation de la haie, cette dernière impacte la composition chimique et la structure du sol. L'apport de MO par la végétation augmente les teneurs en C_{org} et en N_{tot} dans la première couche de sol. Lorsque cette MO est dégradée par les microorganismes, le sol est également enrichi en minéraux tels que le K et P. Etonnamment, la haie ne semble pas impacter les teneurs en Mg et Ca. Elle n'a pas non plus d'influence sur le pH. Les modifications du sol par la haie sont encore légèrement observables à 2 m en amont de cette dernière. Il serait intéressant d'analyser la qualité chimique du sol à plusieurs points proches de la haie afin d'identifier la largeur exacte sur laquelle la haie a une influence. La haie améliore également la structure du sol. En effet, on observe une nette diminution de la densité apparente qui se traduit par une augmentation de la porosité sous cette dernière. Cette augmentation est fortement liée à la croissance de la macroporosité. L'augmentation de la porosité est certainement une conséquence de la teneur en MO nettement plus élevée à l'approche de la haie. La végétation (par ses racines) et l'activité biologique élevée sous cette dernière ont également décompacté le sol. On observe en effet une quantité supérieure de faune (insectes, vers de terre, etc.) à cet endroit qui décroît avec la distance à la haie. Dans ce travail, la répartition de la faune était supposée homogène au sein de la haie mais les résultats indiquent l'inverse. Il serait donc intéressant d'étudier dans le futur la répartition de la faune dans cette zone.

L'impact de la haie sur la chimie et la structure du sol a eu plusieurs conséquences. Premièrement, l'augmentation de la teneur en MO à l'approche de la haie diminue la sensibilité du sol à l'érosion. A l'inverse, deux facteurs favorisent la sensibilité du sol à l'érosion à cet endroit : la diminution de la teneur en argile et la diminution de la cohésion du sol qui se traduit par l'augmentation de la porosité. En revanche, les racines de la végétation de la haie

participent à la protection du sol contre l'érosion. Il serait toutefois intéressant d'approfondir les recherches sur l'érosion au niveau de la haie, d'autant plus que certains auteurs indiquent une érosion plus accrue dans cette zone. Deuxièmement, l'impact de la haie sur la qualité chimique et la structure du sol a une répercussion sur plusieurs paramètres physiques du sol. L'augmentation de la porosité à l'approche de la haie augmente le K_s à cet endroit. Pour les mêmes raisons, la teneur en eau à saturation du sol est également croissante. La haie permet donc de diminuer le volume d'eau ruisselant de la parcelle. En revanche, elle ne semble pas influencer le centre de la courbe de rétention, c'est-à-dire la teneur en eau aux suctions moyennes. Par conséquent, ni la réserve en eau utile, ni la teneur en eau à la capacité au champ ne semblent influencées par la présence de la haie. Pour finir, on observe une diminution de la microporosité à l'approche de la haie, qui est probablement la conséquence de la perte relative en argile dans cette zone.

La partie nord des 30 derniers mètres de la pente a été transformée en bande enherbée il y a une vingtaine d'années tandis que la partie sud n'a été transformée que l'année passée (2017). Lors de l'implantation de la nouvelle bande enherbée, l'agriculteur a labouré l'ensemble de la zone en amont de la haie. Ce travail du sol a malheureusement eu des répercussions sur une partie des mesures physiques de ce travail et a dilué les éléments chimiques plus concentrés à la surface du sol. Toutefois, les bandes enherbées en amont de la haie ont tout de même limité l'influence de l'agriculture sur le sol ce qui a permis de mieux observer les modifications venant de la haie. A noter que la bande enherbée participe fortement à la réduction de l'érosion au sein de la parcelle.

L'implantation plus tardive de la nouvelle bande enherbée a eu des conséquences sur la parcelle. En effet, la couche de colluvions est légèrement plus profonde dans la nouvelle bande enherbée. L'âge de la bande enherbée ne semble cependant pas influencer la granulométrie du sol. En outre, le sol de la nouvelle bande enherbée est plus compact que celui de l'ancienne. La végétation y est également plus éparse et la faune légèrement moins présente. L'hypothèse est que le jeune âge de cette bande enherbée a limité l'action de décompaction de la faune et la flore. De plus, la végétation éparse augmente la battance du sol. Ce travail étudie également le vallonnement de la bande enherbée en amont de la haie. En effet, les creux sont plus enclins à concentrer les écoulements de surface que les buttes. On s'attendait donc à observer plus d'effets de l'érosion dans les creux et moins d'effets sur les buttes mais aucun résultat n'est concluant.

Dans le futur, il serait intéressant d'étudier les haies à différents âges car leurs propriétés varient certainement avec le développement de la végétation. Pour la même raison, il serait pertinent d'étudier les paramètres physiques de la haie tout au long de l'année, en fonction du développement saisonnier de la végétation tout comme d'étudier des haies dominées par une végétation différente. Finalement, il serait pertinent de s'intéresser aux modifications de la haie sur le sol à différentes profondeurs.

Bibliographie

A. Livres

HILLER DANIEL. "Environmental soil physics". Academic press. Année 1998. 771 p.

LIAGRE FABIEN. "Les haies rurales : rôle-création-entretien". Edition France agricole. France. Année 2006. 320 p.

MORGAN R.P.C."Soil erosion et conservation". 4  me édition. Edition Blackwell. Année 2005. 316 p.

WHITE ROBERT E. "Principles and practice of soil science, the soil as a natural resource". 4  me édition. Edition Blackweel. Année 2006. 363 p.

B. Articles scientifiques, mémoires et thèses

BIELDERS C. "Mesure de l'infiltration au moyen d'un infiltromètre à charge constante". PROSENSOLS : protégeons nos sols. UCL. Non publié.

BILLETER R. et all. "Indicators for Biodiversity in Agricultural Landscapes: A Pan-European Study". Journal of Applied Ecology 2008, n  4. Europe. Année 2007.

BROUYAUX FRANCOIS et TRICOT CHRISTIAN. "Etude en support au « Plan Pluies » pour la Région de Bruxelles-Capitale". Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement. Belgique. Année 2006.

CENTRE PROVINCIAL DE L'AGRICULTURE ET DE LA RURALITE. "Enregistrement, liste des méthodes". Brabant Wallon. Année 2017.

CAUBEL VIRGINIE. "Thèse : influence de la haie de ceinture de fond de vallée sur les transferts d'eau et de nitrate". France. Année 2001.

CAUBEL VIRGINIE, GRIMALDI CATHERINE, MEROT PHILIPPE et GRIMALDI MICHEL. "Influence of a hedge surrounding bottomland on seasonal soil-water movement". Hydrological processes, n   17. France. Année 2003.

CHAOWEN LIN, SHIHUA TU, JINGJING HUANG et YIBING CHEN. "The effect of plant hedgerows on the special distribution of soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple-soil area of China". Soil and tillage research, n  105. Année 2009.

DAILI PAN, XIAODONG GAO, MILES DYCK, YAQIAN SONG, PUTE WU et XINING ZHAO. "Dynamics of runoff and sediment trapping performance of vegetative filter strips: run-on experiments and modeling". Science of the total environment, n°593-594. China. Année 2017.

DAUTREBANDE SYLVA, CORDONNIER HELENE, THIRION MARC et BIELDERS CHARLES. "Les livrets de l'agriculture, n°12. Lutter contre l'érosion des terres". Ministère de la Région Wallonne. Année 2006.

DAUTREBANDE SYLVA et SOHIER CATHERINE. "L'érosion hydrique et les pertes en sol agricoles en Région Wallonne". Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux. Année 2006. 122 p.

DELOGE CHARLOTTE. "Mémoire : étude de l'efficacité relative des barrages filtrants dans la rétention de sédiments". Promoteurs : Biielders C. et Staquet J-B. UCL. Année 2016-2017.

DE THYSEBAER DIDIER (DIRECTION). "Rapport sur l'état de l'environnement Wallon 2017". Service public de Wallonie. Année 2017.

DUCHEMIN M. ET R. MAJDOUB. "Les bandes végétales filtrantes : de la parcelle au bassin versant". Vecteur Environnement 37. Page 36–50. Année 2004.

EVARD OLIVER. "Thèse: Muddy floods in the Belgian loess belt: problems and solutions". Promoteur: Van Wesemael B. et Biielders C. UCL. Année 2008.

EVARD OLIVIER, VANDAELE KAREL, VAN WESELMAN BAS, BIELDERS CHARLES. "A grassed waterway and earthen dams to control muddy flow from a cultivated catchment of the Belgian loess belt". Geomorphology, n°40. Belgique. Année 2008.

FRASELLE DAPHNÉ. "Proposition d'un plan d'aménagement pour le réseau de haies du centre agronomique de Marbaix". Promoteur : Jacquemart A-L. UCL. Belgique. Année 2018.

FOLLAIN STÉPHANE, WALTER CHRISTIAN, LEGOUT ARNAUD, LEMERCIER BLANDINE et DUTIN GILLES. "Induced effects of hedgerow networks on soil organic carbon storage within an agricultural landscape". Geoderma, n°142. France. Année 2007.

FORMAN RICHARD T. T. ET BAUDRY JACQUES. "Environmental Management, Hedgerows and hedgerow networks in landscape ecology". Année 1984. P 495-510.

FREEMAN GARY E., RAHMEYER WILLIAM H. et COPELAND RONALD R. "Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation". US Army Corps of Engineers. Année 2000.

GHAZAVI G., THOMAS Z., HAMON Y., MARIE J-C., CORSON M. et MEROT P. " Hedgerow impacts on soil-water transfer due to rainfall interception and root-water uptake". Hydrological processes, n°22. Année 2008.

HAMON XAVIER, DUPRAZ CHRISTIAN ET LIAGRE FABIEN. "L'Agroforesterie, outil de séquestration du carbone en agriculture". France. Année 2009. 18 p.

HE X-D., DANG H-Z., WANG L., ZHOU Z-F et LV W-Q. " Simulation and analysis of soil water retention curves within and between hedgerows in Northern China farm systems". Acta Prataculturae Sinica, vol 25. Chine. Année 2016.

HEITZ C., FLINOIS G. ET GLATRON S. " Protection against muddy floods: Perception for local actors in Alsace (France) of a protection measure (fascines)". France. Année 2012.

HERBST, M., ROBERTS, J. M., ROSIER, P. T. W. & GOWING, D. J. 2006. "Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England". *Agricultural and forest meteorology* n° 141, p 244-256. Angleterre. Année 2006.

HOLLAND JOHN M., DOUMA JACOB, CROWLEY LIAM, JAMES LAURA et KOR LAURA. "Semi-natural habitats support biological control, pollinisation and soil concervation in Europe. A review". Agronomy sustainable development, n°37. France. Année 2017.

KIEPE PAUL. "No runoff, no soil loss: soil and water conservation in hedgerow barrier systems". Hollande. Année 1995.

KNAPEN A., POESEN J., GOVERS G., GYSSELS G. NACHTERGAELE J. "Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review". Earth-Science Reviews, n°80, p 75–109. Année 2007.

LIN J., ZHANG H., CHEN Q. et ZHOU H. " An analysis of soil fractal dimension in a sloping hedgerow agroforestry system in the Three Gorges Reservoir Area, China". Agroforestery systems, n°89. Chine. Année 2015.

MEROT PHILIPPE, GASCUEL-ODOUX C., WALTER C., ZHANG X. et MOLENAT J. "Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface". Journal of water science, n°12. Année 1999.

MINISTERE DE LA REGION WALLONNE, DIVISION DE LA NATURE ET DE LA FORET. " Guide pour la plantation de haies". CARE asbl. Brochure technique n°3. Année inconnue.

OUVRY J. F., RICHET J. B., BRICARD O., LHÉRITAU M., BOUZID M., SAUNIER M. "Fascines et haies pour réduire les effets du ruissellement érosif : caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation". Areas. Année 2012. 68 p.

PERCSY CHRISTIANE. " Des haies pour demain". Région Wallonne. Collection "Nature et forêts", n° 1. Année 2008.

POINTEREAU P. "Evolution du linéaire de haies en France durant ces 40 dernières années : l'apport et les limites des données statistiques". Colloque « Hedgerows of the world, their ecological functions in different landscapes ». Année 2001.

REYNOLDS et ELRICK. "Ponded infiltration from a single ring, 1. Analysis of steady flow". Soil science so, SOC. AM. J., vol 54. Année 1990.

RICHET J-B., OUVRY J-F et SAUNIER M. " The role of vegetative barriers such as fascine and dense shrub hedges in catchment management to reduce runoff and erosion effects: experimental evidence of efficiency, and conditions of use". Ecological engineering, n°103. France. Année 2017.

RIDREMONT FRANÇOIS, DEGRÉ AURORE et CLAESSENS HUGUES. " Mieux comprendre et évaluer la réserve en eau des sols forestiers". Forêt Wallonnes, n° 116. Belgique. Année 2012.
SERVICE PUBLIC WALLON. " Rapport sur l'état de l'environnement Wallon 2017". Année 2017. 368 p.

SONNET PHILIPPE. " Un aperçu de la géologie de la Belgique". UCL. Année 2005.

ŠÁLEKA MARTIN, HULAC VLADIMÍR, KIPSOND MARINA, DAŇKOVÁC RENATA, NIEDOBOVÁC JANA et GAMEROD ANNA. "Bringing diversity back to agriculture: Smaller fields and non-crop elements enhance biodiversity in intensively managed arable farmlands". Ecological Indicators, n°90. République Tchèque. Année 2018.

VAN DEN BERGE S., BAETEN L., VANHELLEMONT M., AMPOORTER E., PROESMANS W., EERAERTS M., HERMY M., SMAGGHE G., VERMEULEN I. et VERHEYEN, K. " Species diversity, pollinator resource value and edibility potential of woody networks in the countryside in northern Belgium". Belgique. Année 2018.

VAN GENUCHTEN M. TH. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". Soil science, SOC AM J., vol 44. Année 1980.

VANNOPPEN w., DE BAETS S., KEEBLE J., DONG Y. et POESEN J. " How do root and soil characteristics affect the erosion-reducing potential of plant species?". Ecological Engineering, n° 109. Belgique. Année 2017.

VAN VOOREN LAURA, REUBENS BERT, BROEKX STEVEN, DE FRENNE PIETER, NELISSEN VICTORIA, PARDON PAUL et VERHEYEN KRISA. " Ecosystem service delivery of agri-environment measures: A synthesis for hedgerows and grass strips on arable land". Agriculture, Ecosystems and Environment n° 244 p. 32–51. Année 2017.

VERTSTRAETEN G. et POESEN J. " Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate". Geomorphology, n° 40. Belgique. Année 2000.

VIAUD VALERIE, GRIMALDI CATHERINE et MEROT PHILIPPE. " Impact des haies sur la ressource en eau et en sol à partir de l'exemple de la Bretagne : résultats récents et perspectives". France. Année 2009.

WALTER C., MEROT P., LAYER B. et DUTIN G. " The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes". Soil Use and Management n°19, 201-207. France. Année 2003.

WANG BING, ZHANGB GUANG-HUI, YANGA YAN-FEN, LIA PAN-PAN et LIU JIA-XIN. " The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment". Catena n°166. Chine. Année 2018.

WOLTON ROBERT, POLLARD KATIE, GOODWIN AMY et NORTON LISA. "Regulatory services delivered by hedges: The evidence base". Report for Defra and Natural England. Angleterre. Année 2014.

YANG S., LI Y., GAO Z., NIU Y., BAI H. et WANG K. " Runoff and sediment reduction benefit of hedgerows and fractal characteristics of sediment particles on loess plateau slope of engineering accumulation". Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, n°48. Chine. Année 2017.

C. Cours

BIELDERS C. et JAVAUX M., "Physique du sol appliqué à l'agronomie et l'environnement". UCL. Année 2016-2017.

BIELDERS C. et DELVAUX B. "Gestion et aménagement des sols en région chaude". UCL. Année 2018.

D. Sites internet

BIELDERS CHARLES. "Perméamètre à charge variable". Réseau d'Excellence des Sciences de l'Ingénieur de la Francophonie. Lien : <https://www.youtube.com/watch?v=mBLIwwkZEX4>. Année 2017. Consulté en mars 2018.

BIODIVERSITE.WALLONIE. "La biodiversité en Wallonie : Plantez une haie indigène". Fédération Wallonie-Bruxelles. Consulté en janvier 2018.

CLIMATE-DATA. "Climat: Ottignies-Louvain-la-Neuve". Lien : <https://fr.climate-data.org/location/29735/>. Consulté le 04/04/2018.

ECOWAL. "Les haies". Ecowal ASBL. Lien : <https://ecowal.be/infos/fiches-conseil/guide-general/haies>. Consulté en le 10/04/2018.

FEDERATION WALLONIE-BRUXELLES. "Carte complète : Belgique, rivières et bassins hydrographiques". Le portail de l'enseignement en fédération Wallonie-Bruxelles. Lien : http://www.enseignement.be/index.php?page=23827&do_id=3161&do_check. Consulté le 04/04/2018.

GEOPORTAIL DE LA WALLONIE. "Carte des sols de Wallonie". Service publique Wallon. Lien : <http://geoapps.wallonie.be/CigaleInter/#CTX=CNSW#BBOX=10185.428202523064,311149.57179747697,14211.49039031411,169985.2394378122>. Consulté de janvier à avril 2018.

GEOPORTAIL DE LA WALLONIE. "Carte numérique des sols de Wallonie". Service publique Wallon. Lien : <http://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=-26856.3125476251,348191.3125476251,32798.506731013455,151067.49326898655>. Consulté de janvier à avril 2018.

GEOPORTAIL DE LA WALLONIE. "Orthophotos : la Wallonie vue du ciel". Service publique Wallon. Lien <http://geoportail.wallonie.be/georeferentiel/orthophotos>. Consulté en mai 2018.

GEOPORTAIL DE LA WALLONIE. "Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2013-2014". Service publique Wallon. Lien :

<http://geoportail.wallonie.be/catalogue/6029e738-f828-438b-b10a-85e67f77af92.html>.
Consulté en avril 2018.

GEOPORTAIL DE LA WALLONIE. "Voyage dans le temps : carte de Vandermaelen (1850)".
Service publique Wallon. Lien :
<http://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=168172.27165291057,170709.6308942957,150823.90659426036,151659.99159976369>. Consulté en juin 2018.

GOOGLE MAPS. Lien : <https://www.google.com/maps>. Consulté en avril 2018.

GUYOT G. "METEOROLOGY AND AGROFORESTRY, SECTION 7 : WINDBREAKS, Les effets
aérodynamiques et microclimatiques des brise-vent et des aménagements régionaux". World
Agroforestry Centre. Lien :
http://www.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/Book%2077/meteorology%20and%20agroforestry/html/les_effets_microclimatiques.htm?n=64. Consulté en avril 2018.

IRM. "Climat: Généralités sur le climat belge". Lien :
<https://www.meteo.be/meteo/view/fr/357714-Generalites.html>. Consulté de janvier à mai
2018.

IRM. "Climat : Caractéristiques de quelques paramètres climatiques". Lien :
<https://www.meteo.be/meteo/view/fr/360361-Parametres.html>. Consulté de janvier à mai
2018.

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. "ISO 10390: 2005, Qualité du sol,
détermination du pH". Lien : <https://www.iso.org/fr/standard/40879.html>. Année 2015.
Consulté en avril 2018.

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. "ISO 10694:1995, qualité du sol,
dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (analyse
élémentaire)". Lien : <https://www.iso.org/fr/standard/18782.html>. Année 2016. Consulté en
avril 2018.

LARABI ABDELKADDER. "Perméamètre à charge constante". Réseau d'Excellence des Sciences
de l'Ingénieur de la Francophonie. Lien : <https://www.youtube.com/watch?v=ymspRUI51po>.
Année 2017. Consulté en mars 2018.

NATAGRIWAL. "Les Méthodes Agro-Environnementales et Climatiques : En quelques mots".
Natagriwal asbl. Belgique. Lien : <https://www.natagriwal.be/fr/mesures-agro-environnementales/en-quelques-mots>. Consulté en mai 2018.

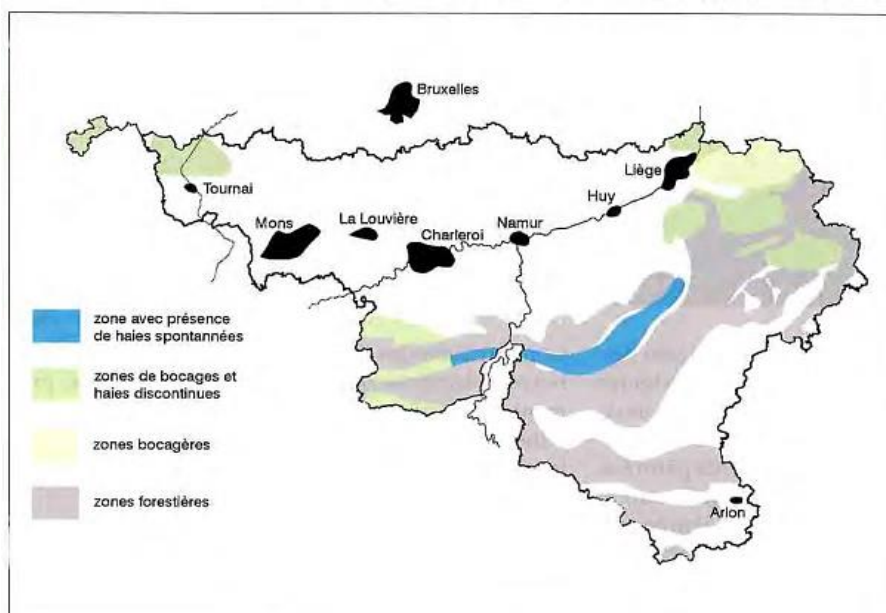
NATAGRIWAL. "Les Méthodes Agro-Environnementales et Climatiques : Haies et alignements d'arbres". Natagriwal asbl. Belgique. Lien : <https://www.natagriwal.be/fr/mesures-agro-environnementales/haies-et-alignements-darbres>. Consulté en avril et mai 2018.

NATAGRIWAL. "Les Méthodes Agro-Environnementales et Climatiques : Tournière enherbée". Natagriwal asbl. Belgique. Lien : <https://www.natagriwal.be/fr/mesures-agro-environnementales/tourniere-enherbee>. Consulté en décembre 2018.

WALONMAP. "Carte d'occupation du sol de Wallonie (COSW) (version 2_07)". Service public Wallon. Lien : <http://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=47890.72961645925,56289.16624333249,1409.928287189847,163899.8106002878>. Année 2014. Consulté en avril 2018.

WALONMAP. "Orthophotos 1971 et 2016". Service public Wallon. Lien : <http://geoportail.wallonie.be/walonmap#CTX=default#BBOX=168485.4236726891,169767.3324865067,151179.41252955652,151783.9866553714>. Année 2016. Consulté en avril 2018.

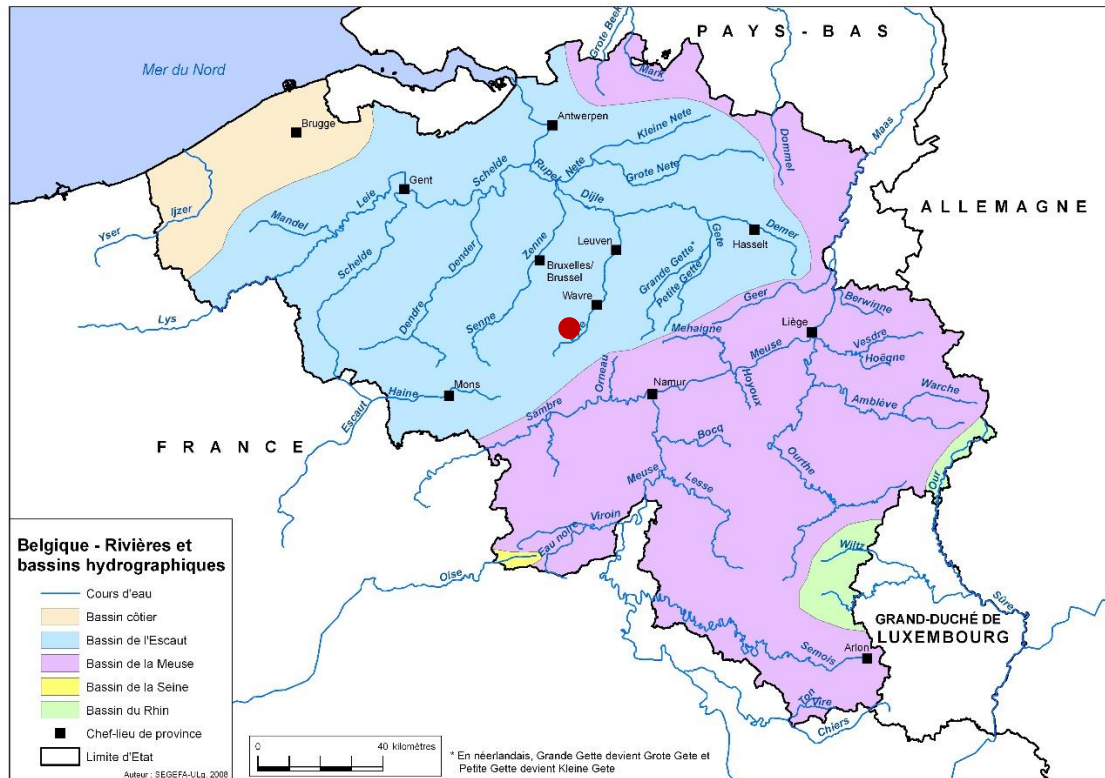
Annexes



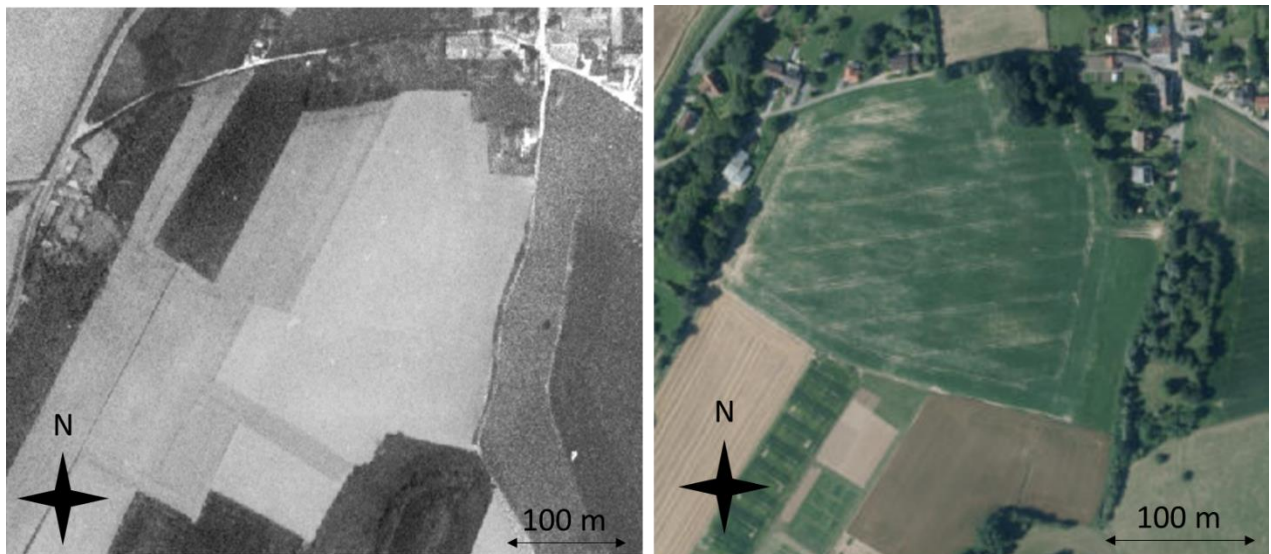
Annexe 1 : Zones des principaux bocages et haies en Wallonie en 1992 (Ministère de la région Wallonne, année inconnue)

Coûts et avantages financiers	<i>Ouvry et al. (2012)</i> évaluent les frais liés à l'installation d'une haie en bordure de champ. Le coût de mise en place est de 15 à 17,5 € hors taxe (HT) ml⁻¹ pour une densité de l'ordre de 6 pieds m⁻². Durant les 2-3 premières années, le coût pour les tailles de formation est de 15 € HT ml⁻¹ par opération. Ensuite, il est souvent nécessaire de prévoir des frais de tailles et d'entretien. Il faut environ 10 ans pour qu'une haie atteigne le maximum de son efficacité. Cependant, elle conserve toute son efficacité pendant de nombreuses années. Les haies peuvent offrir des avantages financiers non négligeables : production de bois (une production d'environ 4 m³/km de haie par an juste par l'entretien des haies) (<i>Pointreueau, 2001</i>), production de miel, production de fruits, etc.
Subsides	Il existe des subsides qui soutiennent financièrement les agriculteurs pour couvrir une partie des frais liés à l'implantation et à l'entretien d'alignements d'arbres. En Wallonie, le programme agro-environnemental (MAE) fait partie du deuxième pilier de la PAC et "consiste à mettre en place des pratiques favorables à la protection de l'environnement (préservation de la biodiversité, de l'eau, du sol, du climat), à la conservation du patrimoine (animal ou végétal) et au maintien des paysages en zone agricole" (<i>Natagriwal, consulté en mai 2018</i>). Grâce à la MAE 1a relative aux haies, bandes boisées et alignements d'arbres, les agriculteurs participants volontaires reçoivent 50 – 60 € par 200 m de haie à condition de remplir certaines conditions comme le maintien et entretien de la haie, l'interdiction d'appliquer des fertilisants et des produits phytos et l'interdiction de la tailler du 15/04 au 01/07 (<i>Natagriwal, consulté en mai 2018</i>). C'est la MAE qui a le plus grand taux de participation des agriculteurs avec 30,6 % en 2017 (<i>de Thysebaer, 2017</i>)

Annexe 2 : Coûts, avantages financiers et subsides pour une haie



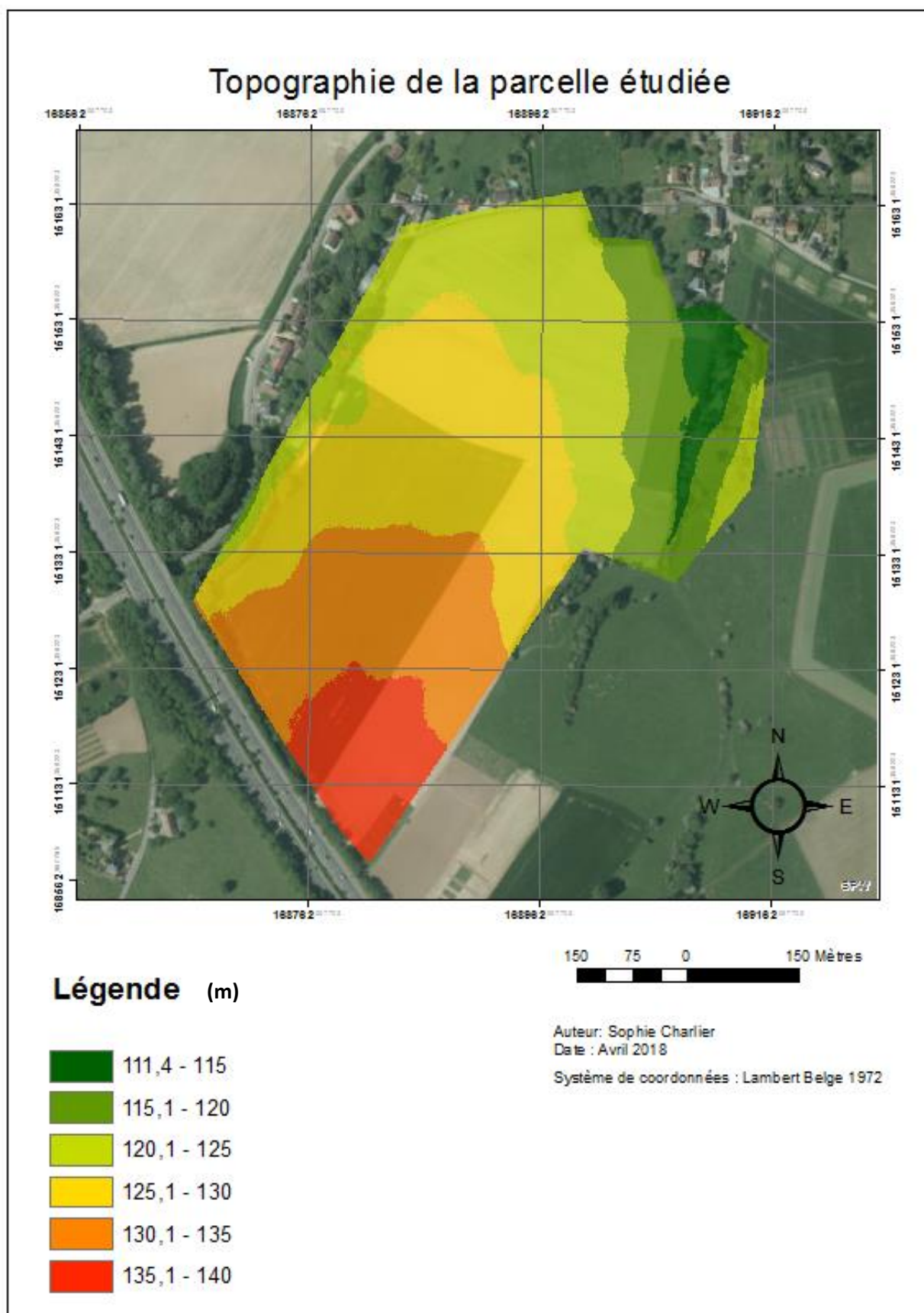
Annexe 3: Localisation de la prairie d'étude (point rouge) sur la carte des rivières et bassins hydrographiques en Belgique



Annexe 4: Evolution de la prairie entre 1971 (gauche) et 2016 (droite) (Walonmap, consulté en mai 2018)

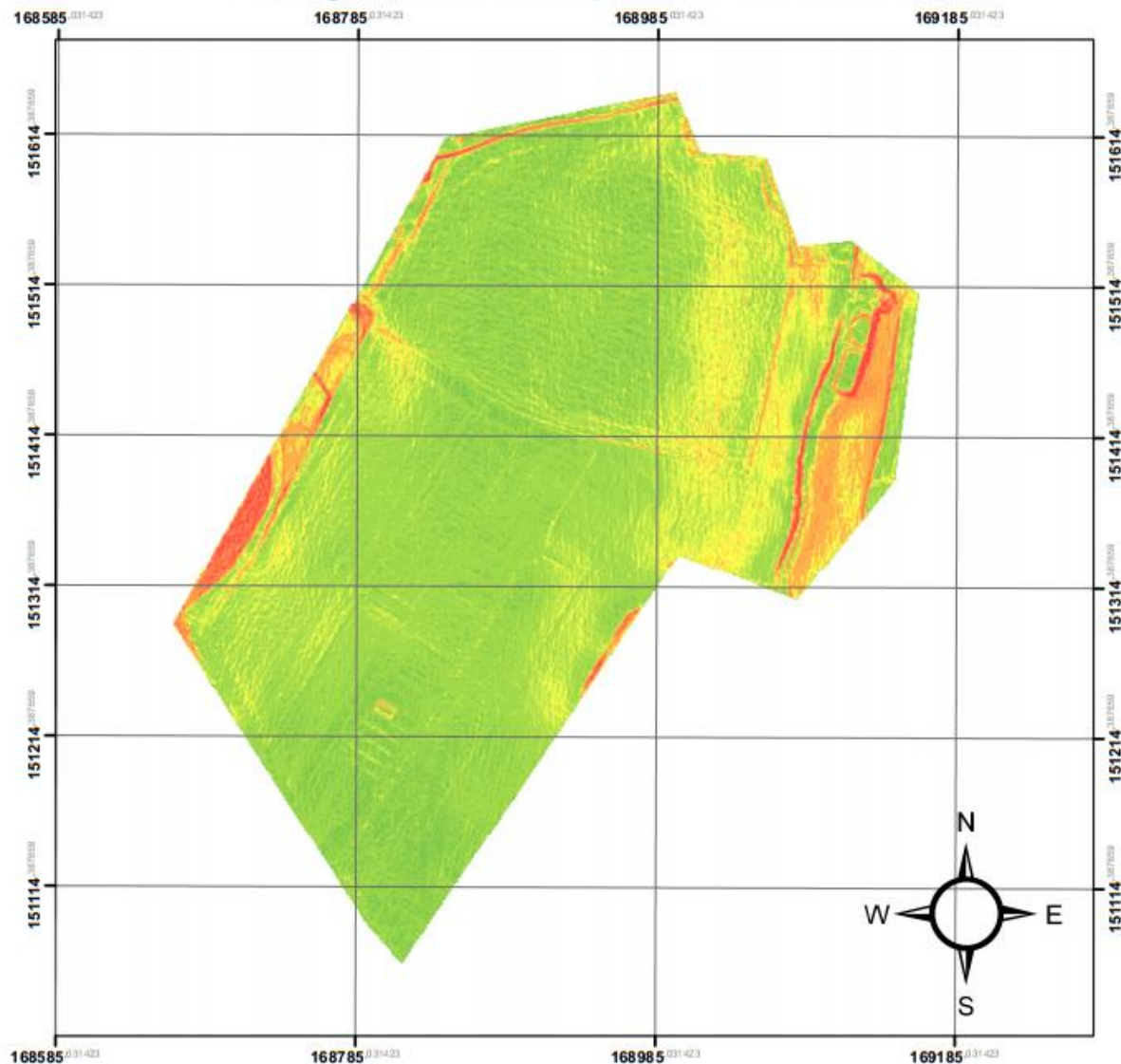
Strate arborescente	Strate arbustive	Strate herbacée
<i>Acer campestre</i> <i>Acer pseudoplatanus</i> <i>Betula pendula</i> <i>Corylus avellana</i> <i>Crataegus monogyna</i> <i>Fraxinus excelsior</i> <i>Prunus serotina</i> <i>Prunus spinosa</i> <i>Quercus robur</i> <i>Quercus velutina</i> <i>Robinia pseudoacacia</i> <i>Salix alba</i> <i>Sambucus nigra</i>	<i>Acer campestre</i> <i>Acer pseudoplatanus</i> <i>Aesculus hippocastanum</i> <i>Betula pendula</i> <i>Bryonia dioica</i> <i>Carpinus betulus</i> <i>Cornus sanguinea</i> <i>Corylus avellana</i> <i>Corylus maxima</i> <i>Crataegus monogyna</i> <i>Fraxinus excelsior</i> <i>Juglans regia</i> <i>Lonicera periclymenum</i> <i>Prunus avium</i> <i>Prunus laurocerasus</i> <i>Prunus serotina</i> <i>Prunus spinosa</i> <i>Quercus robur</i> <i>Ribes rubrum</i> <i>Rosa canina</i> <i>Rubus sp.</i> <i>Sambucus nigra</i> <i>Symphoricarpos albus</i> <i>Taxus baccata</i>	<i>Aegopodium podagraria</i> <i>Aesculus hippocastanum</i> <i>Agave sp.</i> <i>Alliaria petiolata</i> <i>Bromus sterilis</i> <i>Bryonia dioica</i> <i>Calystegia sepium</i> <i>Cardamine hirsuta</i> <i>Chelidonium majus</i> <i>Chenopodium album</i> <i>Cirsium arvense</i> <i>Convolvulus arvensis</i> <i>Cornus mas</i> <i>Crataegus monogyna</i> <i>Dactylis glomerata</i> <i>Dryopteris filix-mas</i> <i>Equisetum arvense</i> <i>Fraxinus excelsior</i> <i>Galium aparine</i> <i>Geranium robertianum</i> <i>Geum urbanum</i> <i>Glechoma hederacea</i> <i>Hedera helix</i> <i>Heracleum sphondylium</i> <i>Holcus mollis</i> <i>Lamium galeobdolon</i> <i>Lonicera periclymenum</i> <i>Myosotis arvensis</i> <i>Potentilla sterilis</i> <i>Prunus serotina</i> <i>Prunus spinosa</i> <i>Ranunculus ficaria</i> <i>Rosa canina</i> <i>Rubus sp.</i> <i>Sambucus nigra</i> <i>Sonchus arvensis</i> <i>Triticum sp.</i> <i>Urtica dioica</i> <i>Veronica chamaedrys</i> <i>Veronica hederifolia</i>

Annexe 5: Liste des espèces végétales par strate présentes dans la haie (gras : espèce dominantes) (Fraselle, 2018)



Annexe 6: Topographie de la parcelle étudiée (1) (à partir de Geoportail de la Wallonie, consulté en avril 2018)

Topographie de la parcelle étudiée



Légende

0 25 50 100 150 200 Meters



Auteur: Sophie Charlier

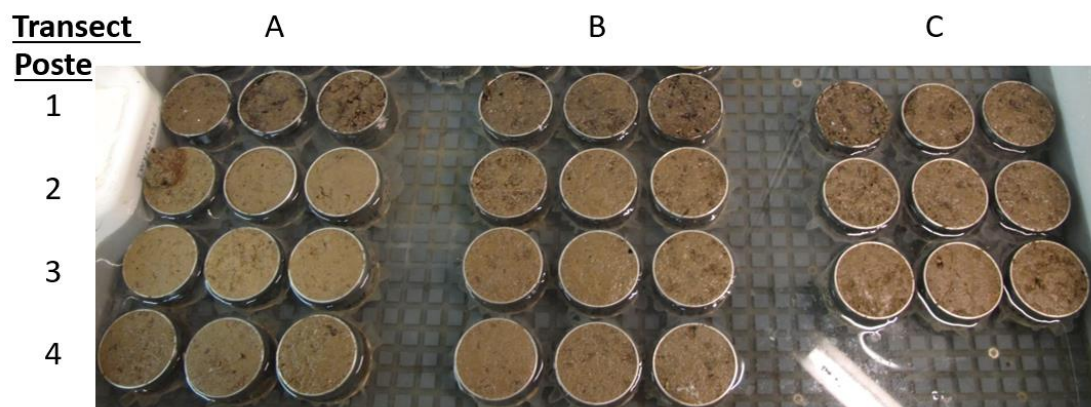
Date : Avril 2018

Système de coordonnées : Lambert Belge 1972

Annexe 7 : Topographie de la parcelle étudiée (2) (à partir de Geoportail de la Wallonie, consulté en avril 2018)

Espèce végétale	Masse de graines répandues (kg)
Trèfle violet	2 x 0,5 kg
Ray-grass Anglais	2 x 2,75 kg
Fétuque élevée	2 x 6 kg
Dactyle	2 x 6 kg
Trèfle blanc	2 x 1,75 kg

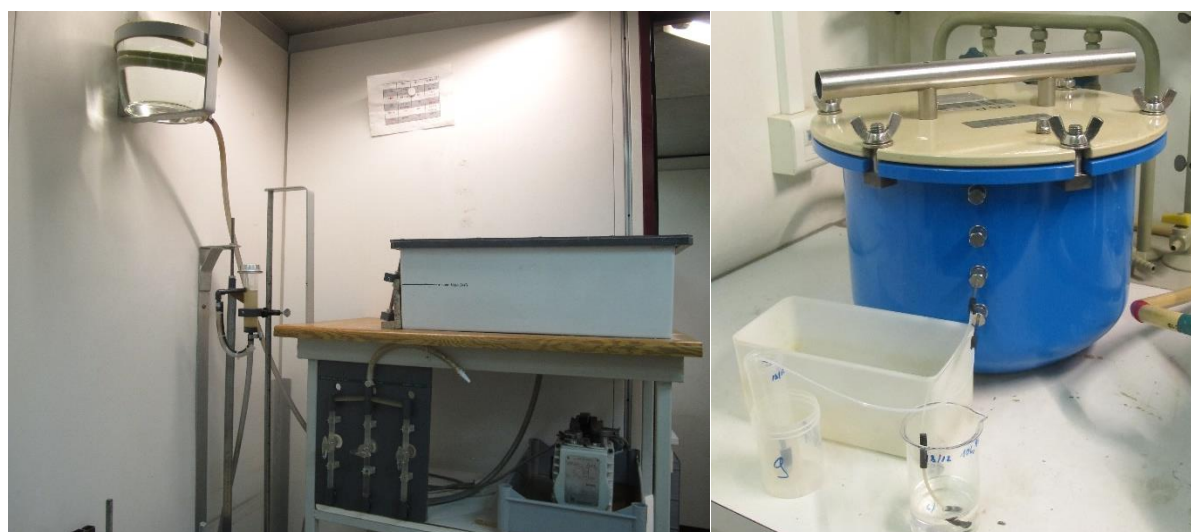
Annexe 8: Espèces végétales et leur quantité semées en avril 2017 sur les bandes enherbées



Annexe 9: Photo des échantillons dans le bac de saturation



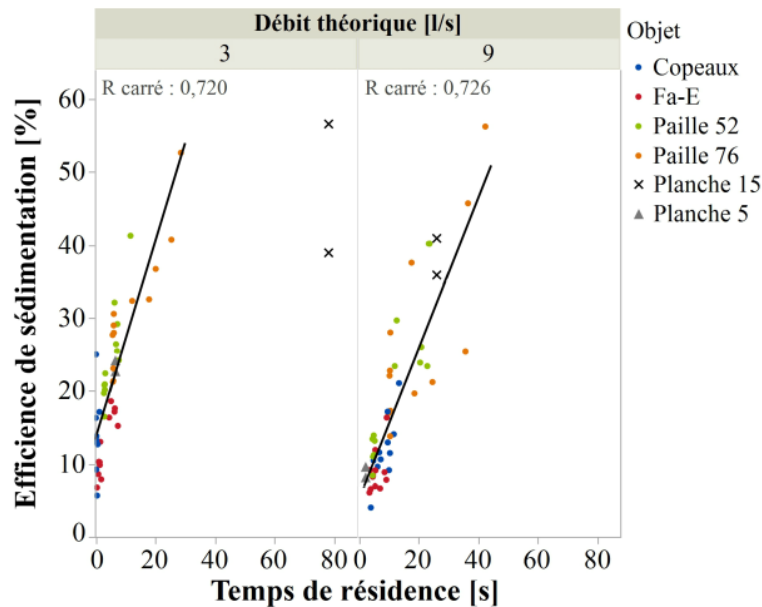
Annexe 10: Photo du bac de saturation



Annexe 11: Photos du bac à sable (gauche) et de la casserole à pression (droite)



Annexe 12: Photos de l'infiltromètre



Annexe 13: Pourcentage de terre déposée dans le canal en fonction du temps de résidence, du débit et du type d'objet toutes concentrations en sédiments et pentes confondues (Deloge, 2017).

Sous la haie	Le sol est d'une couleur beaucoup plus foncée et moins compact que le sol de la prairie permanente, ce qui indique très certainement une quantité de matière organique plus abondante à cet endroit. De plus, en creusant le sol, on retrouve nettement plus d'insectes et trous d'animaux (vers de terre, araignées, souris, taupes, etc.) sous la haie qu'aux autres postes. A cette période de l'année (octobre 2017), les ronces et les orties sous la haie sont très abondantes et développées. A l'inverse, l'échantillonnage pour la mesure de densité racinaire a eu lieu en mars 2018. A ce moment, la végétation herbacée de la haie est beaucoup moins abondante. A noter que la présence de taupes et de souris est plus faible au transect C qu'aux transects A et B. La végétation est également légèrement moins développée.
--------------	--

A 2 m de la haie (poste 2)	On remarque beaucoup de trous d'animaux (souris, taupes, etc.) et de galeries. Les vers de terre et insectes sont également présents, cependant leur présence reste moindre par rapport à la haie. Le sol à cet endroit est beaucoup plus collant. Tous ceci rend l'échantillonnage difficile.
A 15 m de la haie (poste 3)	On remarque nettement moins la présence de souris. Le sol est plus compact que pour tous les autres postes.
Dans la culture (poste 4)	On peut observer une diminution de la quantité de trous de souris et de vers de terre. Le sol est cependant plus foncé que la prairie permanente mais moins foncé que dans la haie. Il contient une grande quantité de déchets organiques tels que des résidus de paille, venant de l'ajout de fumier.

Annexe 14: Observations personnelles

Position	Argile (%) (<0,002 mm)	Limon fin (%) (0,002-0,02 mm)	Limon grossier % (0,02-0,05 mm)	Total Limon (%)	Sable fin (%) (0,05-0,2 mm)	Sable grossier (%) (0,2-2 mm)	Total sable (%)
A1	10,8	30,5	52,9	83,4	5	0,9	5,9
A2	13,2	24,8	52,7	77,5	8,3	1	9,3
A3	16,5	23,6	51,4	75	7,3	1,2	8,5
A4	13,7	25,8	50,1	75,9	8,6	1,4	10
B1	10,9	24,5	54	78,5	8,9	1,7	10,6
B2	12,8	22,1	53,7	75,8	10	1,4	11,4
B3	14	26	49	75	8,9	2,1	11
B4	12,9	24,7	51,7	76,4	8,7	2	10,7
C1	12,8	24,4	51,5	75,9	9,7	1,5	11,2
C2	14,2	25,5	49,8	75,3	8,7	1,8	10,5
C3	16	25,8	48,6	74,4	8	1,6	9,6

Annexe 15: Résultats de l'analyse granulométrique

Position	C _{org} (g kg ⁻¹)	IB	Battance	N _{tot} (%)	Ratio C/N	pH KCl	pH eau
A1	23,428	1,48	Peu battant	0,21	11	4,9	6
A2	12,771	1,98	Battant	0,12	10	5,4	6,6
A3	7,9289	2,29	Très battant	0,09	9	5,1	6,6
A4	14,333	1,72	Assez battant	0,14	10	6,6	7,4
B1	26,918	1,19	Non battant	0,22	12	6,1	7
B2	12,46	1,95	Battant	0,12	10	5,3	6,6
B3	10,606	2,16	Très battant	0,11	10	5	6,5
B4	13,734	1,81	Battant	0,13	10	6,4	7,3
C1	15,514	1,72	Assez battant	0,15	10	5,6	6,6
C2	12,858	1,81	Battant	0,12	11	6,3	7,4
C3	11,377	1,9	Battant	0,1	11	5,9	7,2

Annexe 16: Résultats de l'analyse chimique (C_{org}, IB, N_{tot}, C/N, pH_{eau} et pH_{KCl})

Position	P (mg/100g)	K (mg/100g)	Mg (mg/100g)	Ca (mg/100g)
A1	4,9	30	17	154
A2	5,3	14	13	162
A3	2	12	12	167

A4	9,1	49	13	207
B1	8,6	40	16	242
B2	5,5	14	14	157
B3	3,2	10	11	171
B4	8,3	29	11	208
C1	8,7	37	20	167
C2	9,5	30	26	177
C3	4,3	22	19	180

Annexe 17: Résultats des éléments disponibles (Ca, Mg, Na et K)

Poste	Volume (cm ³)	Masse de terre sèche (g)	Densité apparente (g cm ⁻³)	Moyenne densité apparente (g cm ⁻³)	Ecart type de la densité apparente (g cm ⁻³)	Porosité (%)	Moyenne de la porosité (%)	Ecart-type de la porosité (%)
A1	99,84	108,24	1,08	1,07	0,03	59,17	59,51	1,01
A1	99,20	108,73	1,10			58,72		
A1	99,38	103,82	1,04			60,65		
A2*	99,84	127,52	1,28	1,48	0,05	51,89	44,14	1,70
A2	100,54	145,89	1,45			45,35		
A2	99,16	150,22	1,51			42,94		
A3	100,56	157,67	1,57	1,60	0,03	40,95	39,71	1,07
A3	95,00	153,88	1,62			38,99		
A3	100,14	161,67	1,61			39,19		
A4	99,76	143,51	1,44	1,42	0,08	45,82	46,60	3,18
A4	98,27	146,41	1,49			43,88		
A4	99,70	132,09	1,32			50,10		
B1	99,00	98,11	0,99	1,16	0,16	62,67	56,22	6,05
B1	98,67	129,21	1,31			50,68		
B1	99,94	118,54	1,19			55,32		
B2	99,23	124,95	1,26	1,38	0,10	52,57	48,07	3,90
B2	99,52	143,02	1,44			45,87		
B2	99,67	143,52	1,44			45,77		
B3	100,62	150,19	1,49	1,45	0,10	43,78	45,48	3,73
B3	99,82	151,31	1,52			42,90		
B3	99,98	133,38	1,33			49,75		
B4	100,15	154,06	1,54	1,53	0,01	42,06	42,21	0,36
B4	99,68	151,87	1,52			42,62		
B4	100,18	154,41	1,54			41,94		
C1	99,74	132,33	1,33	1,29	0,06	50,03	51,28	2,17
C1	100,02	122,7	1,23			53,79		
C1	99,79	132,41	1,33			50,03		
C2	99,64	148,03	1,49	1,47	0,02	44,04	44,60	0,84
C2	100,04	148,21	1,48			44,20		
C2	99,24	143,44	1,45			45,56		
C3	100,00	166,76	1,67	1,64	0,03	37,19	38,06	1,03
C3	100,72	166,31	1,65			37,81		
C3	99,44	160,53	1,61			39,20		

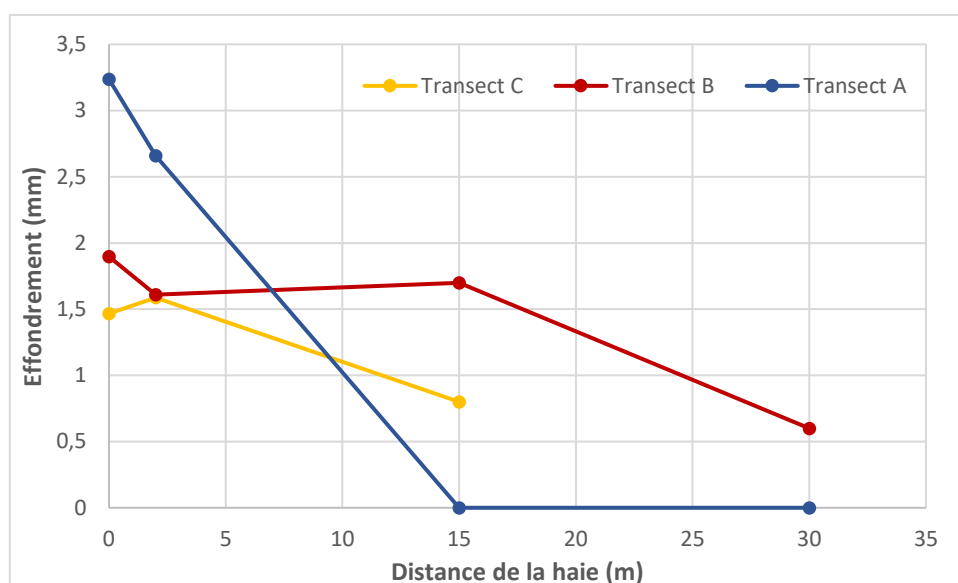
*Echantillon erroné pour les raisons citées dans la partie "courbe de rétention"

Annexe 18: Résultats de la densité apparente et de la porosité

Poste	Teneur en eau dans les macropores (%)	Moyenne de la teneur en eau dans les macropores (%)	Ecart -type
A1	29,83	29,83	2,55
A1	25,35		
A1	29,72		
A2*	15,30	13,75	0,10
A2	13,68		
A2	13,83		
A3	13,54	12,86	0,63
A3	12,30		
A3	12,72		
A4	16,74	16,07	3,00
A4	12,78		
A4	18,69		
B1	30,92	24,32	5,78
B1	20,16		
B1	21,87		
B2	17,67	18,40	0,96
B2	18,05		
B2	19,49		
B3	17,28	20,72	7,39
B3	15,67		
B3	29,21		
B4	12,08	12,37	1,22
B4	13,71		
B4	11,32		
C1	23,20	24,87	3,75
C1	29,18		
C1	22,24		
C2	18,42	18,49	1,24
C2	17,28		
C2	19,77		
C3	12,55	12,21	1,08
C3	10,99		
C3	13,08		

*Echantillon erroné pour des raisons expliquée dans la partie courbe de rétention

Annexe 19 : Résultats de la macroporosité



Annexe 20 : Moyenne des effondrements par poste en fonction de la distance à la haie et des transects

Position	Volume (cm³) (sans affaissement)	Volume (cm³) (avec affaissement)	Teneur en eau volumique (%) en fonction de la succion (m)										
			Saturation	-0,03 m	-0,10 m	-0,30 m	-0,70 m	-1 m	-3 m	-10 m	-31 m	-100 m	-158 m
A1	99,84	95,94	58,99	53,70	50,53	47,45	43,83	41,96	36,17	27,36	14,68	18,91	10,59
A1	99,20	89,86	53,43	51,00	48,58	44,80	41,53	40,37	35,36	25,99	14,50	12,69	10,68
A1	99,38	93,69	57,82	53,92	51,56	48,33	43,83	42,40	35,40	23,59	14,39	12,95	10,91
A2	99,84	94,90	49,02	46,03	46,63	46,52	45,24	45,02	40,99	30,54	19,20	15,91	13,43
A2	100,54	93,28	40,22	39,15	38,81	38,01	37,15	36,71	33,80	27,75	19,40	15,80	13,25
A2	99,16	95,97	42,43	41,04	40,71	39,81	38,86	38,11	35,57	29,15	19,28	15,60	13,32
A3	100,56	100,56	39,99	39,33	39,10	38,08	36,84	36,27	33,58	28,29	21,12	17,01	14,67
A3	95,00	95,00	39,95	38,85	38,72	38,45	37,74	37,36	35,03	29,41	20,84	17,31	14,47
A3	100,14	100,14	39,43	38,57	38,19	38,00	36,96	36,58	33,65	28,98	21,31	17,22	14,36
A4	99,76	99,76	43,84	43,05	43,12	40,46	38,18	37,29	34,31	29,59	19,44	16,11	13,72
A4	98,27	98,27	43,69	43,01	42,72	42,15	41,12	40,75	38,02	33,52	18,93	16,18	13,72
A4	99,70	99,70	48,79	47,27	46,46	44,66	42,57	41,13	37,23	30,76	19,50	16,39	13,66
B1	99,00	92,79	56,25	49,30	46,63	42,20	38,72	37,19	32,54	24,12	16,70	14,30	12,07
B1	98,67	95,82	48,54	46,78	46,57	46,56	42,93	41,86	35,79	27,93	16,44	14,45	12,01
B1	99,94	97,94	51,71	47,92	47,49	47,03	43,41	42,16	37,08	36,45	16,40	14,26	11,96
B2	99,23	95,60	51,64	49,86	49,56	47,98	46,22	45,88	41,17	32,94	17,13	13,86	11,70
B2	99,52	97,04	44,21	43,61	43,30	43,10	40,50	39,53	33,65	25,73	17,57	13,68	11,81
B2	99,67	96,36	44,66	42,58	41,49	39,45	37,18	36,12	32,13	25,74	17,10	13,82	11,86
B3	100,62	98,35	42,23	40,95	40,52	40,57	38,18	37,17	32,01	25,09	17,75	14,57	13,34
B3	99,82	97,55	42,51	41,60	41,42	40,98	39,68	38,63	33,96	27,18	17,69	14,60	13,23
B3	99,98	94,51	49,99	47,27	44,52	38,21	34,58	32,99	27,84	21,49	17,72	14,48	13,31
B4	100,15	96,63	40,52	39,58	39,31	38,96	38,21	37,85	35,58	33,07	20,09	16,54	15,20
B4	99,68	99,68	41,57	40,60	40,33	39,65	38,58	37,92	34,80	30,06	20,35	16,83	14,89
B4	100,18	100,18	40,51	40,44	40,41	39,92	39,03	38,46	36,05	31,28	20,28	16,55	14,88
C1	99,74	97,67	48,54	47,04	47,02	46,66	44,33	42,60	36,39	25,74	17,09	14,50	12,95
C1	100,02	95,49	50,88	46,66	45,13	41,13	37,21	35,68	28,78	21,10	17,42	14,25	12,98
C1	99,79	97,78	48,06	46,58	46,74	45,99	41,81	39,84	32,92	24,90	17,31	14,45	14,92
C2	99,64	96,32	43,89	42,67	40,37	37,66	36,02	35,20	32,81	27,19	19,27	15,55	14,41
C2	100,04	97,21	43,69	42,64	41,95	39,82	37,86	36,87	33,64	26,43	19,19	15,73	14,08

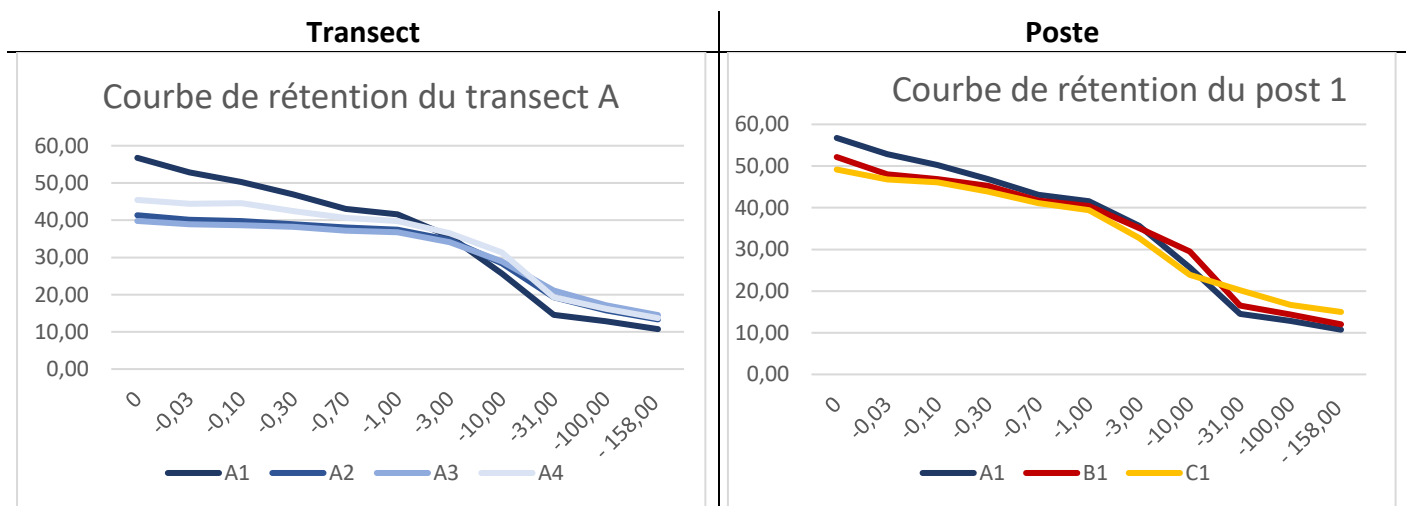
C2	99,24	96,09	45,33	43,32	41,33	38,17	36,24	35,25	32,56	27,35	19,43	15,38	14,16
C3	100,00	97,27	37,89	37,11	36,86	36,54	36,04	35,69	32,43	27,72	22,92	18,32	16,50
C3	100,72	100,72	37,18	36,49	36,19	36,06	35,61	35,35	32,87	29,11	22,98	18,57	16,58
C3	99,44	97,47	39,26	38,34	38,12	37,79	36,83	36,13	33,29	31,14	22,99	18,55	16,58

NB : Les valeurs en rouge sont erronées

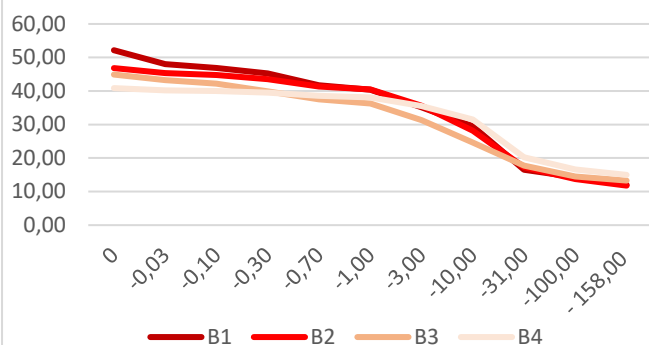
Annexe 21: Résultats de la courbe de rétention

Teneur en eau volumique (%) en fonction de la succion (m)												
Méthode	Bac de saturation	Bac à sable				Casserole à basse pression			Casserole à haute pression			
Poste	Saturation	-0,03	-0,10	-0,30	-0,70	-1,00	-3,00	-10,0	-31,0	-100,0	-158,0	0
A1	56,75	52,87	50,22	46,86	43,06	41,58	35,64	25,65	14,52	12,82	10,73	
A2	41,32	40,10	39,76	38,91	38,00	37,41	34,68	28,45	19,30	15,77	13,33	
A3	39,79	38,92	38,67	38,17	37,18	36,73	34,09	28,89	21,09	17,18	14,50	
A4	45,44	44,44	44,59	42,42	40,62	39,72	36,52	31,29	19,29	16,22	13,70	
B1	52,17	48,00	46,90	45,26	41,69	40,40	35,14	29,50	16,51	14,34	12,01	
B2	46,84	45,35	44,79	43,51	41,30	40,51	35,65	28,14	17,27	13,79	11,79	
B3	44,91	43,27	42,15	39,92	37,48	36,26	31,27	24,59	17,72	14,55	13,29	
B4	40,87	40,21	40,02	39,51	38,61	38,08	35,47	31,47	20,24	16,64	14,99	
C1	49,16	46,76	46,08	43,90	41,12	39,38	32,69	23,91	20,24	16,64	14,99	
C2	44,30	42,88	41,22	38,55	36,71	35,77	33,00	26,99	19,30	15,55	14,22	
C3	38,11	37,31	37,06	36,80	36,16	35,72	32,86	29,33	22,96	18,48	16,56	

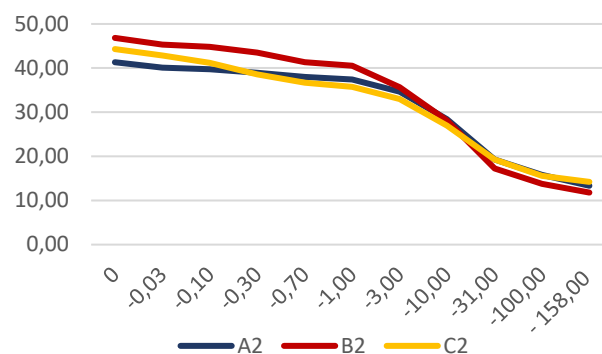
Annexe 22: Résultats moyennés de la courbe de rétention



Courbe de rétention du transect B



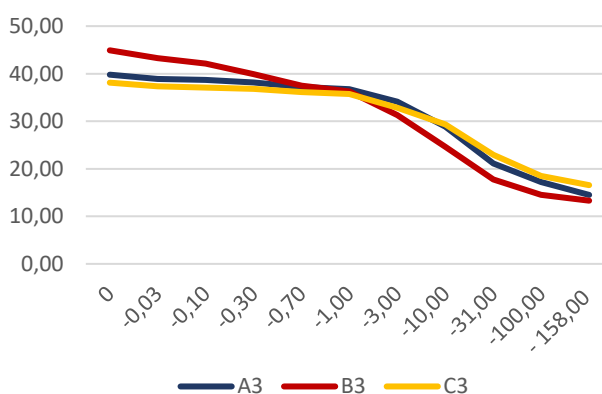
Courbe de rétention du post 2



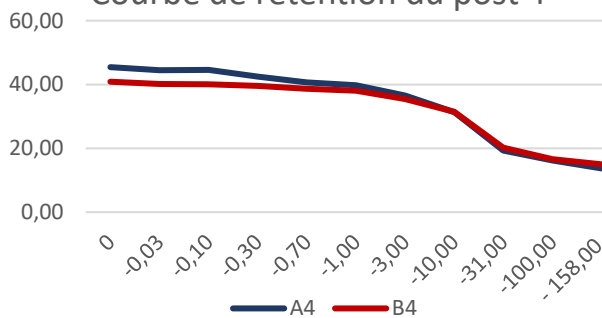
Courbe de rétention du transect C



Courbe de rétention du post 3



Courbe de rétention du post 4

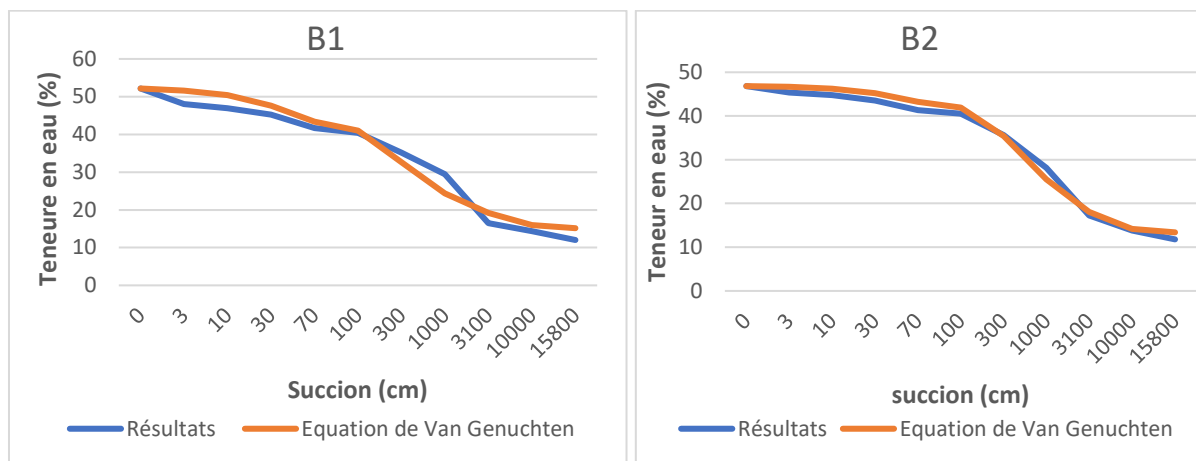


Annexe 23: Courbes de rétention en fonction des transects (gauche) et des postes (droite)

Poste	n	α	Somme du carré des écarts entre les résultats et l'équation de Van Genuchten
A1	1,529	0,012	81,6
A2	2,147	0,001	13,6
A3	2,123	0,001	8,4
A4	2,029	0,001	29,6
B1	1,516	0,009	86,6
B2	1,912	0,002	23,0
B3	1,610	0,006	20,1

B4	3,626	0,000	9,8
C1	1,638	0,007	13,2
C2	1,518	0,008	40,7
C3	2,158	0,001	7,3

Annexe 24: Résultats des paramètres de Van Genuchten



Annexe 25 : Exemple de la comparaison entre la courbe de rétention et l'équation de Van Genuchten optimisée pour le poste B1 et B2

	Teneur en eau CC (%)	Teneur en eau PF (%)	REU (%)
A1	35,64	10,73	24,92
A2	34,68	13,33	21,35
A3	34,09	14,50	19,59
A4	36,52	13,70	22,82
B1	35,14	12,01	23,12
B2	35,65	11,79	23,86
B3	31,27	13,29	17,98
B4	35,47	14,99	20,49
C1	32,69	14,99	17,70
C2	33,00	14,22	18,78
C3	32,86	16,56	16,31

Annexe 26: Résultats de la réserve en eau utile

Position*	H (cm)	Débit Stabilisé (mm ³ h ⁻¹)	Débit Stabilisé (mm h ⁻¹)	Ks (mm h ⁻¹)	Moyenne de Ks par poste (mm h ⁻¹)	Ecart type de Ks par poste (mm h ⁻¹)	Remarques
A1	10,00	1,46E+08	8287,38	3157,54	1905,67	1087,48	
A1	8,50	6,01E+07	3400,76	1364,83			
A1	9,50	5,45E+07	3082,58	1194,65			
A2	11,83	8,27E+05	46,80	16,79	42,94	39,02	Un essai non représentatif : débit de 0 mm/h
A2	9,57	3,38E+06	191,53	74,06			
A2	11,55	3,83E+06	216,97	78,56			
A2	10,16	0	0	0			
A2	9,20	1,06E+05	5,99	2,34	1,84	0,58	
A3	10,17	6,70E+04	3,79	1,44			

A3	10,30	7,40E+04	4,19	1,58			
A3	10,87	1,20E+05	6,78	2,51			
A4	9,53	4,72E+05	26,73	10,35	67,79	57,81	Plusieurs essais non représentatifs : un essai avec un débit de 0 mm/h et un essai avec un débit 1100 mm/h
A4	11,00	3,22E+06	181,95	67,06			
A4	9,77	5,80E+06	328,00	125,96			
B1	10,40	3,23E+06	182,55	68,63	71,53	6,53	
B1	9,70	3,07E+06	173,97	66,96			
B1	9,73	3,63E+06	205,50	79,01			
B2	11,37	8,50E+05	48,08	17,51	22,12	7,50	
B2	11,53	8,81E+05	49,88	18,07			
B2	10,67	1,46E+06	82,60	30,78			
B3	9,63	7,23E+05	40,90	15,78	16,13	2,85	
B3	10,47	6,35E+05	35,91	13,47			
B3	12,14	9,52E+05	53,87	19,14			
B4	11,30	4,23E+04	2,39	0,87			Plusieurs essais non représentatifs : 3 essais où avec un débit de 0 mm/h et un avec 912 mm/h
B4	11,40	5,02E+04	2,84	1,03			
B4	11,83	3,03E+06	171,58	61,56			
C1	11,73	4,23E+05	23,94	8,62	20,66	10,82	Un essai non représentatif : débit de 1360 mm/h
C1	10,63	1,13E+06	63,84	23,82			
C1	10,63	1,40E+06	79,21	29,55			
C2	14,93	1,27E+05	7,18	2,35	10,32	10,48	Un essai non représentatif : débit de 0 mm/h
C2	12,33	1,11E+06	62,85	22,20			
C2	9,50	2,93E+05	16,56	6,42			
C3	10,13	0,00E+00	0,00	0,00	0,00	0,00	
C3	11,40	0,00E+00	0,00	0,00			
C3	11,23	0,00E+00	0,00	0,00			
C3	12,27	0,00E+00	0,00	0,00			

Annexe 27: Résultats de l'infiltromètre

Position*	H (cm)	Mesures 1 De Ks (mm h ⁻¹)	Mesure 2 De Ks (mm h ⁻¹)	Mesure 3 de Ks (mm h ⁻¹)	Mesure 4 de Ks (mm h ⁻¹)	Moyenne de Ks (mm h ⁻¹)	Remarques	Moyenne de Ks par poste (mm h ⁻¹)	Ecart type par poste (mm h ⁻¹)
A1	1,7	24,67	24,23	23,94	24,23	24,13		18,95	7,59
A1	1,5	22,44	22,44	22,28	22,75	22,49			
A1	1,4	10,59	10,59	10,24	9,89	10,24			
A2	2,5	0,07	0,20	0,10	0,10	0,13		0,23	0,16
A2	2,5	1,24	0,48	0,38	0,38	0,42			
A2	2,3	/	0,33	0,11	0,00	0,15			
A3	2,5	0,31	0,10	0,31	0,09	0,17		0,17	0,03
A3	2,4	1,14	0,41	0,10	0,09	0,20			
A3	2,4	0,22	0,11	0,22	0,09	0,14			
A4	1,7	0,46	0,92	1,38	1,53	1,28		0,75	0,46
A4	1,7	2,90	0,76	0,46	0,46	0,56			
A4	1,7	0,61	0,46	0,31	0,46	0,41			

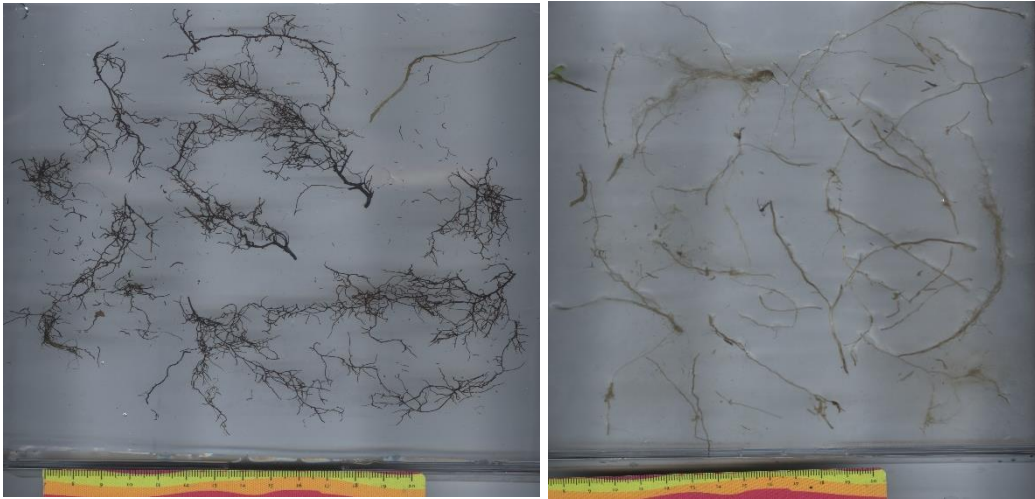
B1	1,5	2754,03	2773,43	2716,04	2590,96	2693,48	Non représentatif	7,04	7,13
B1	1,4	0,36	1,82	2,37	1,82	2,01			
B1	1,5	10,21	11,74	11,91	12,59	12,08			
B2	2,5	308,33	288,76	307,15	282,00	292,64	Non représentatif	1,28	0,71
B2	2,5	0,76	0,41	1,02	0,92	0,78			
B2	2,6	0,27	2,82	1,07	1,46	1,78			
B3	2	1,26	1,77	1,77	1,77	1,77		4,44	3,78
B3	1,1	3,01	7,19	7,19	6,96	7,11			
B3	1,4	16,19	21,11	20,41	19,71	20,41			
B4	2,4	0,31	0,10	0,10	0,09	0,10		0,18	0,08
B4	2,5	1,04	0,31	0,31	0,18	0,27			
B4	2,4	0,54	0,22	0,22	0,09	0,18			
C1	1,7	0,60	0,60	0,75	0,75	0,70	Erroné car problème de saturation	7,10	2,11
C1	1,3	4,97	5,74	5,74	5,36	5,61			
C1	1,5	8,19	8,37	8,71	8,71	8,59			
C2	2,5	7,62	8,36	8,16	8,16	8,23		4,53	5,22
C2	2,4	1,15	0,84	0,73	0,94	0,84			
C2	2,5	21,38	21,95	21,44	21,24	21,54			
C3	2,1	1,21	0,60	0,36	0,31	0,43		0,25	0,17
C3	2,6	0,20	0,30	0,20	0,17	0,22			
C3	2,6	1,18	0,10	0,10	0,08	0,09			

NB : Les valeurs en rouge sont erronées ou bien retirées des moyennes car non représentatifs

Annexe 28: Résultats du perméamètre

Posi tion	RD						RLD				
	Poids (g)	RD (kg m ⁻³)	SDR	Moyenne SDR	Ecart type SDR	SDR avec p _a et teneur en sable (%)	Longueur (m)	RLD (kg m ⁻³)	SRD	Moyenne SDR	Ecart type SDR
A1	1,24	4,07	0,000023	0,00	0,00	0,001312	26,50	86,90	0,18	0,30	0,19
	0,94	3,08	0,000302				23,67	77,61	0,21		
	0,77	2,52	0,001307				9,77	32,04	0,53		
A3	1,19	3,90	0,000035	0,00	0,00	2,462148	37,58	123,23	0,09	0,04	0,04
	0,9	2,95	0,000426				53,87	176,64	0,03		
	0,82	2,69	0,000850				81,68	267,83	0,00		
B1	1,15	3,77	0,000049	0,00	0,00	0,000006	22,51	73,83	0,23	0,11	0,11
	2,84	9,31	0,000000				149,74	490,98	0,00		
	1,51	4,95	0,000002				36,03	118,14	0,09		
B3	1,62	5,31	0,000001	0,00	0,00	0,011226	89,66	294,00	0,00	0,01	0,01
	3,3	10,82	0,000000				129,96	426,13	0,00		
	1,31	4,30	0,000012				63,15	207,07	0,02		

Annexe 29 : Résultats de la densité racinaire



Annexe 30 : Scans des racines de la haie (poste A1) (gauche) et de la bande enherbée (poste A3) (droite)



Annexe 31: Scan des racines après traitement de l'image (poste A1)



Annexe 32 : Photo illustrant l'hétérogénéité de la végétation dans la prairie permanente

Position	Pente (%)	Dimension de la zone calme après le ressaut hydraulique		Volume d'eau (m ³)	t _R (s)	Efficience de sédimentation (%)
		Hauteur (cm)	Longueur (cm)			
1	6,5	2,3	14,5	8,34E-04	0,63	14,47
2	7	1,75	14	6,13E-04	0,46	14,24
3	8	2,75	13	8,94E-04	0,68	14,53

Annexe 33 : Résultats du simulateur de ruissellement et de sédimentation au poste A1

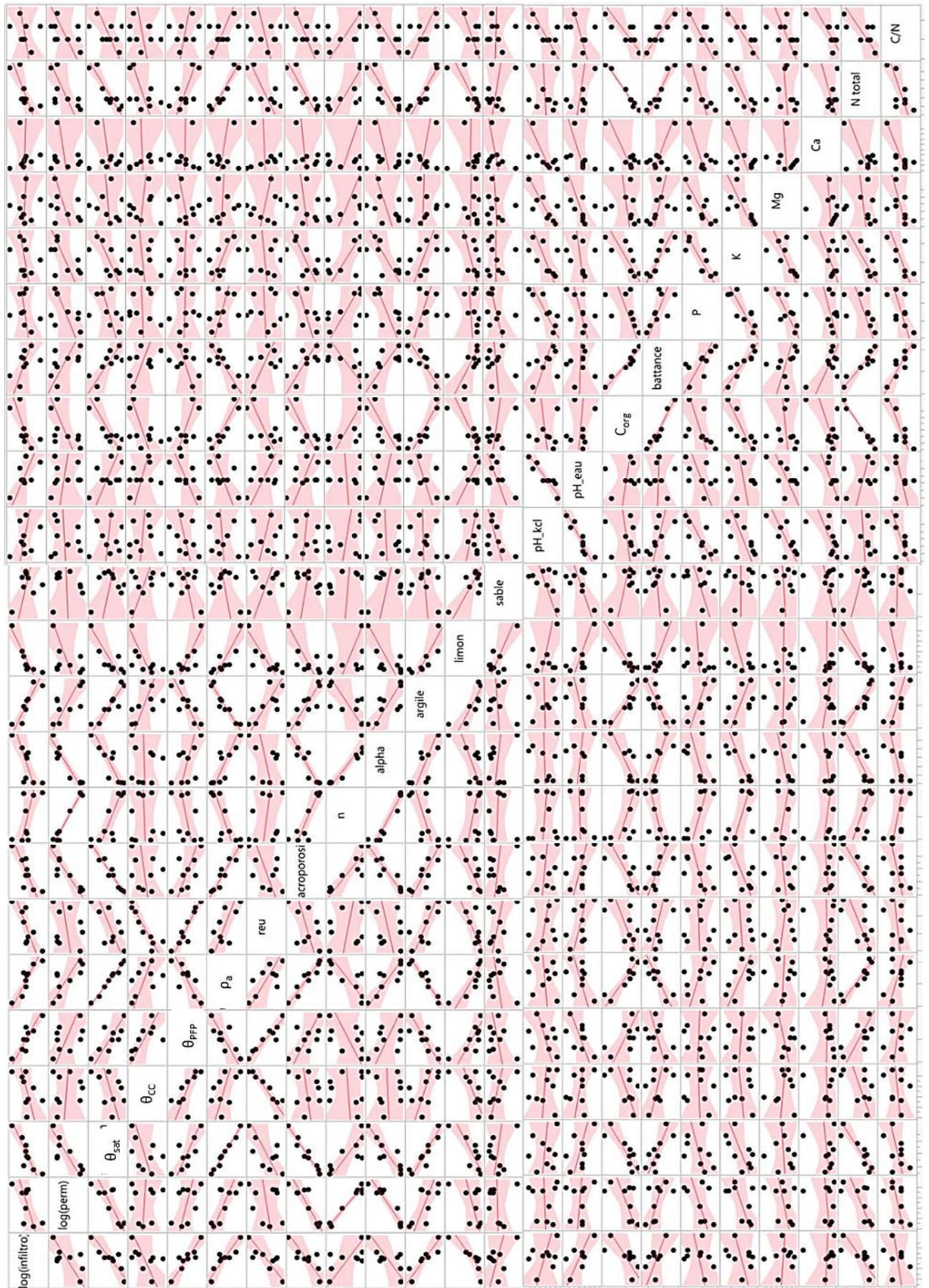
Transect	Distance de la haie (m)	Profondeur de la transition de couleur (cm)*	Observations
A	0	Pas	Beaucoup de vers et de racines dans les 20 premiers cm de profondeur Humus de 5-10 cm de profondeur
	1	Pas	
	2	90	
	5	75-80	
	10	50-60	
	15	50-60	
B	0	Pas	Humus de 10-15 cm de profondeur
	1	Pas	
	2	95-100	
	5	80-90	
	10	55-60	
	15	45-50	
C	0	Pas	Grosse ravine dans la haie Humus de 2-5 cm de profondeur Sol très compact (sur tout le transect à part la haie)
	1	Pas	
	2	95-100	
	5	85-90	
	10	65-70	
	15	50-60	

* La présence de matériau orangé est accompagnée de légères taches orange foncé, taches d'oxydo-réduction de Fer.

Annexe 34 : Résultats de l'épaisseur de l'horizon organo-minéral en fonction de la distance à la haie (profil à la tarière)



Annexe 35: Photos illustrant la transition de couleur entre les horizons (gauche) et un profil à la tarière (droite)



Annexe 36 : Corrélation entre les résultats obtenus aux postes 1-2-3 des transects A-B-C

Résumé

La ceinture limoneuse belge est fréquemment touchée par des inondations et des coulées boueuses. Plusieurs solutions existent parmi lesquelles on peut citer l'implantation de barrières végétales telles que les haies en bordure de champs. L'objectif de ce travail est de mieux comprendre comment les haies impactent les propriétés hydriques et chimiques du sol, améliorent l'infiltration et favorisent la sédimentation des particules érodées. Ce travail s'intéresse plus précisément à une haie implantée il y a une cinquantaine d'années sur un sol limoneux dans le Brabant Wallon. Elle est située en bas d'une pente de 6-8 % de 135 m de long, parallèle aux courbes de niveaux. En amont de la haie se trouve une culture puis une bande enherbée sur les 30 derniers mètres. La partie nord de la bande enherbée a été implantée il y a une vingtaine d'années tandis que la partie sud date de 2017.

Les résultats indiquent un horizon Ap profond de 0,5 m au milieu de la bande enherbée et de 1 m sous la haie ainsi qu'une perte relative de 4 % d'argile sous la haie. L'accumulation de colluvions en bas de pente avait certainement déjà lieu avant l'implantation de la haie, surtout que la pente s'adoucit sur les derniers mètres en amont de cette dernière. Néanmoins, la haie a certainement participé à la sédimentation. Un simulateur de sédimentation a permis d'estimer que la résistance de la haie au ruissellement augmente le temps de résidence de l'eau en amont de la haie de 0,6 s, ce qui engendre un taux de sédimentation de 14 % pour un débit de $2,64 \text{ l s}^{-1} \text{ ml}^{-1}$. A l'approche de la haie, les résultats indiquent un enrichissement du sol par rapport au milieu de la bande enherbée sur la première couche de sol : la teneur en C_{org} est 2 fois plus élevée (de 11,33 à 21,95 g par kg), la teneur en N_{tot} est 1,75 fois plus élevée (de 0,11 à 0,19 %), la teneur en K est 2 fois plus élevée dans la haie (de 17,00 à 35,67 mg par 100g) et la teneur en P est 2 fois plus élevée (de 3,2 à 7,4 mg par 100g) mais les teneurs en Ca, Mg, C/N et le pH ne varient pas. Ces résultats sont surement dus à l'apport de MO par la végétation de la haie. La haie influence aussi les paramètres physiques du sol. A l'approche de la haie, la porosité augmente de 43,3 à 55,7 %, principalement à cause de l'augmentation de MO, des racines de la végétation et de la faune plus présente. Par conséquent, le K_s augmente aussi sous la haie mais présente une grande variabilité à cause de l'impact des galeries d'animaux sur les mesures. La haie modifie aussi la courbe de rétention en eau : la teneur en eau à saturation augmente (de 41 à 53 %) et la teneur en eau au point de flétrissement diminue (de 14,8 à 12,6 %). Le centre de la courbe de rétention (teneur en eau à la capacité au champ) n'est pas impacté par la haie, tout comme la réserve en eau utile. L'effet de la haie s'observe encore à 2 m en amont de cette dernière. Pour finir, une analyse de densité racinaire a permis d'identifier que la bande enherbée participe aussi à la diminution de l'érosion au sein de la parcelle.

Ce travail a permis de déterminer que la haie a bien un impact positif sur les propriétés pédologiques et hydrologiques du sol. Dans le futur, il serait intéressant d'étudier ces paramètres en fonction de l'âge de la haie, de la saison, des espèces végétales et à différentes profondeurs.