

Centre Eau Terre Environnement

**Intensification des pluies et impacts sur l'érosion hydrique des sols et
la qualité des eaux sous six systèmes cultureux à
Saint-Lambert-de-Lauzon**

Par

Zita Antoine Ondo

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès Sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

Silvio J. Gumiere PhD.
Université Laval

Examineur externe

Robert Lagacé, ing., PhD.
Département des sols et de génie
agroalimentaire
Université Laval

Directeur de recherche

Alain N. Rousseau, ing., PhD.
INRS-ETE

Codirecteur de recherche

Claude Bernard, PhD.
IRDA

REMERCIEMENTS

Je remercie notre Seigneur Jésus-Christ dont la grâce et les bénédictions m'ont et m'accompagnent tout au long de ce parcours :

(« ...Et voici, je suis avec vous tous les jours jusqu'à la fin du monde » (Matthieu 28 : 20)).

Je remercie particulièrement mon Directeur de recherche Alain N. Rousseau ainsi que mon Codirecteur Claude Bernard pour l'opportunité si enrichissante qu'ils m'ont offerte (formation, encadrement, séminaires-conférences, écoute, patience, rigueur) : c'est inestimable.

Je remercie l'IRDA et particulièrement Marc-Olivier Gasser pour le financement de ce projet de maîtrise recherche, le personnel de la ferme expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon pour l'aide accordée, ainsi que le reste du personnel et particulièrement Antoine Lamontagne, Luc, Jérémy Vallée, Bernard Montminy, Marie-Ève, Michèle Grenier pour le précieux temps qu'ils ont accordé à ce projet.

Avec la même marque de reconnaissance, je remercie : Dr. Mvondo Ze (Université de Dschang, Cameroun), Pierre Juteau (Cégep Saint-Laurent, Montréal), Sylvain Gélinas (Ville de Québec, service du traitement des eaux), Mabarex Inc pour leurs recommandations.

Je remercie Mohamed Laaboulli, Alexandre Borduas, Jean Simpore, Ralph Tasing Kouom, Cheick Doumbia et Otron Aba Marie-Anne pour leur aide (séjours sur le terrain, relecture).

J'embrasse chaleureusement chacun de mes enfants : Raphael, Steve, Gémima, Stéphane, Saint-David, Alexandre-Karl, Mark-Harry, ainsi que ma grande sœur Marie Nicole Andzama, vous avez tous adhéré à ce projet et chacun de vous individuellement a su m'apporter son soutien lors des moments difficiles.

Je remercie très spécialement Henriette-Blanche Bilo'o «Mfoumou» pour sa présence et pour toutes ses paroles d'encouragement.

A ma maman, madame Éloumou née Tsogo Marthe qui le 26 décembre 2021, a répondu à l'appel du Seigneur tout juste avant l'achèvement de ces travaux ; du fond du cœur, humblement et avec une immense affection : **merci pour tout.**

RÉSUMÉ

Deux pluies simulées de 30 minutes d'une récurrence de 1/20 ans représentatives du climat actuel (61 mm.hr^{-1}) et du climat futur, horizon 2050 (71 mm.hr^{-1}) ont été appliquées en trois répétitions par niveau de pluie (blocs) et sur six systèmes culturaux (traitements) de chacun des blocs.

L'analyse des échantillons de sols prélevés et du ruissellement, les observations de terrain, l'ANOVA et l'ANCOVA sur les moyennes obtenues, et l'application de la USLE ont permis d'évaluer l'effet des différents systèmes culturaux sur l'érosion du sol et la qualité des eaux dans une perspective d'intensification des pluies dans le sud du Québec. Les données démontrent :

- les effets principaux contrôlant la pollution diffuse agissent suivant le gradient de « force » décroissant suivant pour :
 - o les pertes de sol, les pertes particulaires ($P_{\text{bio.total}}$), la matière organique (MO) et l'azote total (N-t) :
Travail du sol (semis direct, SD; chisel, Ch) > Niveaux de pluies (climat) > Pratique de conservation (plante de couverture/sans plante de couverture),
 - o le ruissellement et les pertes solubles (o-PO_4) : Niveau de pluie > [Plante de couverture $\geq$ Travail du sol]
- un accroissement significatif des variables réponses avec l'intensification des pluies.
- une réduction significative des taux d'exportation sous le SD à l'opposé du labour au Ch.
- un rôle de régulation exercé par l'effet plante de couverture vis-à-vis des deux autres effets principaux : niveau des pluies et travail du sol.
- l'interaction travail du sol et le niveau de pluies influencent significativement les taux de ruissellement et des pertes de sol contrairement à l'exportation des nutriments qui elle est influencée par l'interaction niveau de pluies et plante de couverture.
- l'érodabilité sous simulateur de pluies a varié de 0.0038 à $0.0085 \text{ t.ha.h.}(\text{ha.MJ.mm})^{-1}$, soit 2 à 5 fois inférieures à la valeur obtenue au nomographe de Wischmeier.
- l'indice C a varié de 0.19 (prairie) à 2.38 (Ch). Sous le climat futur, le SD, même en l'absence de plante de couverture, limite déjà significativement l'indice C à une valeur 3.7 fois inférieures à celle obtenue sous le labour au Ch.
- une relation logarithme significative (****) et forte ($r = 0.911$) entre l'indice cultural et l'érosion spécifique par érosivité d'où l'avantage comparatif démontré par le SD avec plante de couverture.

Mots-clés : intensification des pluies, simulateur de pluie, érosion hydrique, systèmes cultureux, pertes de sol et des nutriments, USLE, érodabilité du sol, indice cultural C.

ABSTRACT

Two simulated 30-minute rainfall events with a recurrence of 1:20 years, representative of the current (61 mm.hr⁻¹) and future climates, horizon 2050 (71 mm.hr⁻¹), were applied in three repetitions per rainfall level (blocks) and on six cropping systems (treatments) of each of the blocks.

The analysis of soil samples and runoff, field observations, ANOVA and ANCOVA on the averages obtained, and the application of the USLE made it possible to evaluate the effect of the different cropping systems on soil erosion and water quality in a perspective of rainfall intensification in southern Quebec. The data show:

- the main effects controlling diffuse pollution act according to the following decreasing gradient of “strength” for:
 - o soil losses, particulate losses (total P.bio.), organic matter (OM) and total Nitrogen (N-t): Tillage (no-tillage, chisel ploughing) > Rainfall levels (climate) > Conservation practice (cover crop/no cover crop),
 - o runoff and soluble losses (o-PO₄): Rainfall level > [Cover plant ≥ Tillage].
- a significant increase in response variables with increasing rainfall.
- a significant reduction in export rates under no-tillage as opposed to chisel ploughing.
- a regulatory role exerted by the cover crop effect vis-à-vis the other two main effects: rainfall level and tillage.
- interaction of tillage and rainfall significantly influences runoff rates and soil losses in contrast to nutrient export which is influenced by the interaction of rainfall and cover crop.
- erodibility under rainfall simulator varied from 0.0038 to 0.0085 t.ha.h.(ha.MJ.mm)⁻¹, that is 2 to 5 times lower than the value obtained with Wischmeier’s nomograph.
- the C index varied from 0.19 (grassland) to 2.38 (chisel ploughing). Under the future climate, no-till even in the absence of a cover crop already significantly limits the C-index to a value 3.7 times lower than that obtained under chisel ploughing.
- a significant (****) and strong (r = 0.911) logarithmic relationship between the cultural index and specific erosion by erosivity hence the comparative advantage demonstrated by no-till with cover crop.

Keywords : rainfall intensification, rainfall simulator, water erosion, cropping systems, soil and nutrient losses, USLE, soil erodibility, crop Index.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES ÉQUATIONS	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XVII
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 CONTEXTE	1
1.2 DEFINITIONS	2
1.2.1 <i>L'érosion hydrique des sols</i>	2
1.2.2 <i>Les changements climatiques (CC) et l'intensification des pluies</i>	3
1.2.3 <i>Agriculture de Conservation (AC)</i>	3
1.3 PROBLEMATIQUE	4
1.4 BUT ET OBJECTIFS SPECIFIQUES.....	6
2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	9
2.1 IMPACT DE L'ÉROSION SUR LE SITE ET HORS SITE	9
2.2 IMPACTS PREVISIBLES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (CC) SUR L'ÉROSION	10
2.3 EFFET DES PRATIQUES DE CONSERVATION (TRAVAIL DU SOL, PLANTE DE COUVERTURE) SUR LA REDUCTION DE L'ÉROSION	12
2.4 ÉQUATION UNIVERSELLE DES PERTES DE SOL (USLE) : INDICE K ET C	14
2.4.1 <i>L'érosivité ou l'indice R ou EI_{30max} en $[MJ.mm. (ha.h.an)^{-1}]$</i>	16
2.4.2 <i>L'érodabilité ou l'indice K en $[t.ha.h.(ha.MJ.mm)^{-1}]$</i>	17
2.4.3 <i>Facteur de déclivité ou topographique (L.S)</i>	18
2.4.4 <i>Facteur C</i>	19
2.4.5 <i>Facteur P</i>	21
2.5 SIMULATEUR (SIM) DE PLUIES	22
3 MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	25
3.1 SITE D'ETUDE	25
3.2 TRAITEMENTS AGRONOMIQUES RETENUS ET LEUR DISPOSITION	26
3.3 PRISE EN CHARGE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	29
3.3.1 <i>Travail préliminaire du sol</i>	29

3.3.2	<i>Couvert au sol</i>	30
3.4	SIMULATION DE PLUIE	30
3.4.1	<i>Intensités de pluies cibles</i>	30
3.4.2	<i>Conception, construction et calibration du simulateur de pluie, puis simulations de pluies au champ</i>	31
3.4.3	<i>Simulation de pluies (tests au champ), collecte des échantillons, conservation et analyses de laboratoire</i>	33
3.5	ANALYSES STATISTIQUES	34
3.6	CALCUL DES FACTEURS K ET C	36
4	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	39
4.1	CALIBRATION DU SIMULATEUR ET CARACTERISTIQUES DES PLUIES SIMULEES	39
4.2	ÉTAT DES PARCELLES AU MOMENT DES SIMULATIONS DE PLUIE	44
4.3	RUISSELLEMENT ET EROSION	48
4.3.1	<i>Niveaux de pluies (climat) en variable catégorielle (Cdt.Ac. et Cdt.Fu.)</i>	48
4.3.2	<i>Niveaux de pluie (climat) en covariable</i>	53
4.3.3	<i>Exportation sélective des fractions de sables, de limons et d'argiles</i>	57
4.4	PERTE DE NUTRIMENTS	61
4.4.1	<i>Niveaux de pluies (climat) en variable catégorielle (Cdt.Ac. et Cdt.Fu.)</i>	61
4.4.2	<i>Niveaux de pluies (climat) en covariable</i>	65
4.4.3	<i>Érosion sélective des nutriments sous forme particulière</i>	69
4.4.4	<i>Relation entre les pertes de matière organique et de nutriments</i>	73
4.5	DETERMINATION DES FACTEURS K ET C DU SOL EN PLACE	75
4.5.1	<i>L'érodabilité (calculé/$K_{calculé}$ ou au nomographe/$K_{nomo.}$) du sol en place</i>	75
4.5.2	<i>Facteur LS (pour estimation du facteur $K_{mesuré}$ et indice C)</i>	80
4.5.3	<i>Érodabilité mesurée (effective) du site ($K_{mesurée/effective}$)</i>	82
4.5.4	<i>Calcul de l'indice C</i>	85
5	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	93
6	BIBLIOGRAPHIE	99
7	ANNEXE	109

LISTE DES FIGURES

FIGURE 3.1: DISPOSITIF EXPERIMENTAL, INTENSITE DE PLUIE A L'ECHELLE DU BLOC ET DISTRIBUTION ALEATOIRE DES SYSTEMES CULTURAUX COMME PARCELLES SECONDAIRES AU SEIN D'UN MEME BLOC	27
FIGURE 3.2: PARCELLES SECONDAIRES (SYSTEMES CULTURAUX) DANS UNE PARCELLE PRINCIPALE (BLOC)	28
FIGURE 4.1 : VARIATION DE L'EROSION SPECIFIQUE PAR EROSIVITE SUIVANT LE % DE COUVERTURE AU SOL	53
FIGURE 4.2 : INDICE CULTURAL C (CP) ET POURCENTAGE (%) DE COUVERTURE DU SOL	90
FIGURE 4.3 : ÉROSION SPECIFIQUE PAR EROSIVITE DE LA PLUIE REÇUE ET INDICE CULTURAL C	91
FIGURE 4.4 : ÉROSION SPECIFIQUE PAR EROSIVITE DE LA PLUIE REÇUE ET INDICE CULTURAL C	92

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 3.1: DESCRIPTION DES EFFETS POUR L'ANOVA	35
TABLEAU 4.1: PARAMETRES D'OPERATION DU SIMULATEUR DE PLUIE	39
TABLEAU 4.2 : INTENSITES MOYENNES DE PLUIES (MM.HR ⁻¹) PAR PARCELLE SECONDAIRE AU SEIN D'UNE PARCELLE PRINCIPALE (BLOC)	40
TABLEAU 4.3 : ÉNERGIE CINETIQUE (E _{ci}) ET EROSIVITE (R) DES DEUX PLUIES SIMULEES.....	41
TABLEAU 4.4 : VARIATION DES CONDITIONS INITIALES DANS LES BLOCS A L'ISSU DES PRE-TRAITEMENTS APPLIQUES	45
TABLEAU 4.5 : ÉTAT TEXTURAL COMPLET ET DETAILLE PAR CLASSES DES FRACTIONS < 2 MM (36 PARCELLES-6 BLOCS)	47
TABLEAU 4.6 : RUISSELLEMENT ET PERTES DE SOL, EFFET DES TRAITEMENTS INDIVIDUELS	49
TABLEAU 4.7 : RUISSELLEMENT ET PERTES DE SOL, EFFETS PRINCIPAUX ET CROISES	50
TABLEAU 4.8 : VARIATION DU VOLUME DE RUISSELLEMENT PAR SYSTEME CULTURAL SUIVANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DE PLUIE	54
TABLEAU 4.9: VARIATION DU COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT PAR SYSTEME CULTURAL SUIVANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DE PLUIE	55
TABLEAU 4.10: VARIATION DES PERTES DE SOL (KG.HA-1) PAR SYSTEME CULTURAL SUIVANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DE PLUIE	56
TABLEAU 4.11: EXPORTATION SELECTIVE DES FRACTIONS DE SOL.....	58
TABLEAU 4.12 : EFFETS CROISES SUR L'EXPORTATION SELECTIVE DES FRACTIONS DE SOL	60
TABLEAU 4.13 : PERTE DES NUTRIMENTS, EFFETS DES TRAITEMENTS INDIVIDUELS	63
TABLEAU 4.14 : PERTE DES NUTRIMENTS, EFFETS PRINCIPAUX ET CROISES.....	64
TABLEAU 4.15: VARIATION DES PERTES DE MO (KG.HA-1) SUIVANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DE PLUIE PAR SYSTEME CULTURAL	66
TABLEAU 4.16: VARIATION DES PERTES EN N _T (MG.M ⁻²) SUIVANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DE PLUIE PAR SYSTEME CULTURAL	67
TABLEAU 4.17: VARIATION DES PERTES EN O-PO ₄ (MG.M-2) SUIVANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DE PLUIE PAR SYSTEME CULTURAL	68

TABLEAU 4.18: VARIATION DES PERTES DE PHOSPHORE BIODISPONIBLE TOTAL (MG.M-2) SUIVANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DE PLUIE PAR SYSTEME CULTURAL	69
TABLEAU 4.19 : EFFET DES TRAITEMENTS INDIVIDUELS SUR LE TRANSPORT SELECTIF DES NUTRIMENTS SELON LES DEUX NIVEAUX DE PLUIES.....	70
TABLEAU 4.20 : EFFETS PRINCIPAUX ET CROISES	72
TABLEAU 4.21: EFFETS PRINCIPAUX ET CROISES (IMPACT DES NIVEAUX DE CLIMAT/PLUIES)	74
TABLEAU 4.22 : ÉRODABILITE CALCULEE (KCALULEE) EN T.HA.H (HA.MJ.MM) ⁻¹	77
TABLEAU 4.23 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR L'ERODABILITE CALCULEE OU AU NOMOGRAPHE.....	78
TABLEAU 4.24 : FACTEUR DECLIVITE (TOPOGRAPHIQUE) LS SELON LES CONDITIONS DU SITE	81
TABLEAU 4.25 : K MESUREE/EFFECTIVE ET COMPARAISON AVEC K CALCULEE/NOMOGRAPHE SOUS PLUIES SIMULEES	83
TABLEAU 4.26 : INDICE C DES SYSTEMES CULTURAUX PAR PARCELLE SECONDAIRE (36) ET PAR BLOC (6).....	86
TABLEAU 4.27: INDICE C MOYEN PAR SYSTEME CULTURAL SUIVANT LES DEUX NIVEAUX DE CLIMAT (PLUIES).....	87

LISTE DES ÉQUATIONS

ÉQUATION 2.1: ÉQUATION UNIVERSELLE DES PERTES DE SOL (WISCHMEIER ET AL., 1978)	15
ÉQUATION 2.2 : ÉROSIVITE POTENTIELLE DE LA PLUIE OU INDICE R (LAGACE, 2016)	16
ÉQUATION 2.3 : ÉNERGIE CINETIQUE DE LA PLUIE (WISCHMEIER, 1958, CITE DANS LAGACE, 2016)	16
ÉQUATION 2.4 : INDICE D'ERODABILITE OU D'ERODIBILITE DES SOLS (WISCHMEIER ET AL., 1971, CITES DANS BERNARD, 1996)	17
ÉQUATION 2.5 : FACTEUR TOPOGRAPHIQUE (WALL ET AL., 2002)	18
ÉQUATION 2.6 : COEFFICIENT M (FONCTION DE LA PENTE) (MUTCHLER ET AL., 1981).....	18
ÉQUATION 2.7 : FACTEUR C (WISCHMEIER ET AL., 1978).....	19
ÉQUATION 2.8: DIAMETRE MEDIAN D'UNE GOUTTE DE PLUIE (LAWS ET AL., 1943), (MARSHALL ET AL., 1948).....	22
ÉQUATION 3.1 : COEFFICIENT D'UNIFORMITE (CHRISTIANSEN, 1942, CITE DANS WILSON ET AL., 2014)	33
ÉQUATION 3.2 : ÉRODABILITE EFFECTIVE OU MESUREE SUR LA PARCELLE DE REFERENCE	36
ÉQUATION 3.3 : INDICE CULTURAL (PARCELLES INDIVIDUELLES-SECONDAIRES).....	36
ÉQUATION 4.1: ÉNERGIE CINETIQUE D'UN EVENEMENT DE PLUIE (WISCHMEIER ET AL., 1958)	41
ÉQUATION 4.2 : ÉNERGIE TOTALE D'UNE PLUIE (LAGACE, 2016)	41
ÉQUATION 4.3 : ÉROSIVITE DE LA PLUIE (LAGACE, 2016)	41
ÉQUATION 4.4 : REGRESSION MULTIPLE A LA BASE DE L'ERODABILITE AU NOMOGRAPHE (WISCHMEIER ET AL., 1971)	76
ÉQUATION 4.5 : FACTEUR TOPOGRAPHIQUE SUR PENTE HOMOGENE (WISCHMEIER ET AL., 1978).....	80
ÉQUATION 4.6 : ÉRODABILITE D'UN SOL PAR DEFINITION (WISCHMEIER ET AL., 1978).....	82
ÉQUATION 4.7 : ÉRODABILITE MESUREE OU EFFECTIVE PONDEREE, ADAPTE DE WISCHMEIER ET AL. (1978)	83
ÉQUATION 4.8 : INDICE C PAR PARCELLE INDIVIDUELLE PONDEREE, ADAPTE DE (WISCHMEIER ET AL., 1978)	85

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CC	Changements climatiques
AC	Agriculture de conservation
MES	Matières en suspension
IRDA	Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement
INRS-ETE	Institut National de la Recherche Scientifique-Eau Terre Environnement
DMP	Diamètre moyen pondéré
MO	Matière organique
USLE	Universal Soil Loss Equation (Équation Universelle des Pertes de Sol)
RUSLEFAC	Revised Universal Soil Loss Equation for Application in Canada
MENV	Ministère de l'Environnement
SIM	Simulateur de pluie
CU ou CUC	Coefficient d'uniformité ou Coefficient d'uniformité de Christiansen
GTCS	Groupe de travail sur la classification des sols
ISP	Indice de saturation en phosphore
mÉq.	Milliéquivalent
CEC	Capacité d'échange cationique
IDF	Intensité Durée Fréquence
LPM	Litre par minute
MVA	Masse volumique apparente
ASE	Agrégats stables à l'eau

BV	Bassin versant
Cdt.Ac.	Conditions actuelles (niveau des pluies sous le climat actuel)
Cdt.Fu.	Conditions futures (niveau des pluies sous le climat futur)
TE	Taux d'enrichissement

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Les effets des changements climatiques (CC) dans le secteur agricole sont de plus en plus perceptibles au Canada et au Québec en particulier (Yagouti et al., 2008; Lemmen et al., 2008; Zhang et al., 2010; Ouranos, 2015).

La plupart des études portant sur l'adaptation aux CC au Québec soulignent que ceux-ci se traduiront par : (i) un allongement de la saison de croissance des plantes, (ii) une hausse du cumul de pluies printanières et automnales et parallèlement une tendance à la baisse des précipitations sous forme de neige dans le sud de la province, (iii) une hausse des températures moyennes annuelles (2°C – 6°C en hiver; 1°C – 4°C en été dépendamment du scénario), (iv) une augmentation de la fréquence des épisodes de gel-dégel, (v) un raccourcissement de la durée annuelle de la saison de gel (moyenne de 20 à 34 jours) attribuable à une fonte printanière de plus en plus hâtive avec en conséquence, (vi) un allongement de la saison sans gel, de même (vii) qu'un enneigement tardif en automne (Bélanger et al., 2002; Ouranos, 2015).

Ces changements seront perçus comme des opportunités économiques intéressantes pouvant se traduire par : (i) un accroissement des rendements des cultures comme le maïs-grain (54% à 70%), le soya (35% à 42%), les céréales de printemps et les plantes fourragères (Bootsma et al., 2001; Bélanger et al., 2002) et (ii) une possibilité d'extension des zones agro écologiques actuellement sous culture (Bélanger et al., 2002).

L'augmentation du nombre de degrés-jours avec le rallongement de la saison de croissance favorisera l'introduction des nouvelles variétés de cultures (Yagouti et al., 2008) plus rentables (Lemmen et al., 2008), ainsi que l'expansion de l'agriculture dans des régions plus au nord du Québec (Ouranos, 2015) associée à la hausse de la productivité des cultures ainsi qu'à l'augmentation de la superficie par exploitation agricole.

L'agriculture devrait donc continuer à jouer un rôle majeur, sinon de premier plan dans le tissu économique et social du Québec (plus de 7% du PIB, plus de 12% de l'emploi au Québec et plus de 7.6 milliards de dollars) (Ouranos, 2015).

Selon le MAPAQ (2019), l'activité agricole du Québec recense un peu plus de 27 300 exploitations agricoles avec des recettes globales générées, estimées à 9.1 milliards \$ produites sur près de 5% seulement de l'ensemble du territoire du Québec.

Le maintien et l'amélioration du niveau de productivité des sols demeurent cependant un des défis majeurs du 21^{ème} siècle au regard des contraintes imposées par les CC d'une part, et de la demande toujours croissante des produits agricoles à travers le monde (Lal et al., 2011; Basche et al., 2016).

1.2 Définitions

1.2.1 L'érosion hydrique des sols

L'érosion hydrique du sol est «...le processus naturel de destruction du sol causée par l'eau par le détachement et l'entraînement des particules, à la suite du martellement des gouttes de pluies et de l'écoulement de surface consécutive...» (Tabi et al., 1990).

Emerson (1967), Boiffin (1984), Le Bissonnais (1988), Le Bissonnais et al. (1995) et (Gumiere, 2020) identifient quatre grands groupes des mécanismes de désagrégation des agrégats conduisant tous à l'érosion hydrique des sols.

La désagrégation mécanique résultant de l'impact des gouttes de pluies met à l'épreuve les forces de cohésion humique (les oxydes, la matière organique et les argiles). La force d'impact des gouttes de pluies (chargée d'énergie cinétique) combinée à une réduction de la résistance mécanique des agrégats entraîne la fragmentation et le détachement de la structure massive du sol (par cisaillement) en micro-agrégats et en particules élémentaires (Al-Durrah *et al.*, 1982; Le Bissonnais *et al.*, 1995). Cette forme d'érosion est complétée par le déplacement des micro-agrégats et des particules élémentaires (<100 µm) qui par la suite rentrent en suspension dans le ruissellement de surface (Farres, 1987).

L'intensité des pluies est l'un des facteurs de l'érosion hydrique des sols. Elle agit sur deux dimensions : l'énergie de désagrégation du sol liée à la chute des gouttes de pluies, le volume de la lame d'eau accumulée et le volume de ruissellement résultant, lequel contrôle l'exportation des agrégats. La qualité du sol résiduel est un paramètre clé au maintien d'une agriculture pérenne (Warkentin, 1995, cité dans Carter, 2002).

1.2.2 Les changements climatiques (CC) et l'intensification des pluies

Les « changements climatiques » désignent toute modification du climat survenant dans le temps et induits soit par des facteurs naturels, soit par des activités humaines (gaz à effet de serre) soit conjointement par les deux (Lemmen et al., 2008).

Il s'agit des « modifications à moyen et long terme des statistiques décrivant le climat », à savoir les variables météorologiques que sont la température, les précipitations (neige et pluies), le vent, l'humidité, les nuages (Mailhot et al., 2007).

L'analyse des précipitations, et principalement des pluies à l'échelle du Québec (Audet et al., 2012), montre une tendance à la hausse des intensités de pluies dans les horizons futurs. L'hypothèse répandue est celle selon laquelle les pluies seront de plus en plus érosives sous le climat futur avec à terme un impact négatif sur la qualité des sols en place.

1.2.3 Agriculture de Conservation (AC)

L'agriculture de conservation est une approche de gestion d'un agroécosystème orientée en quatre axes à savoir : (i) l'amélioration soutenue de la productivité, (ii) l'augmentation des profits, (iii) l'augmentation de la sécurité alimentaire, et (iv) la préservation de l'environnement (Friedrich, 2012, cité dans M'hamed, 2018). Elle repose sur trois facteurs : (i) le degré du travail du sol (du travail minimal du sol au semis direct), (ii) le pourcentage de couvert au sol (vivant ou résidu) et (iii) le degré de diversification des espèces associées (M'hamed, 2018). Ainsi selon les degrés d'intégration du travail du sol et du maintien du couvert, on parle de façons culturales réduites qui regroupent une combinaison de pratiques entre le travail moins intensif et plus superficiel du sol avec le maintien d'un pourcentage de couvert variable à la surface du sol (Koro et al., 1995).

On parle alors de labour de conservation qui désigne toute intervention garantissant un taux de couvert au sol minimal de 30% (Corak et al., 1993).

Chow et al. (2000) dans une étude conduite au Nouveau Brunswick (Canada) relèvent que les différentes pratiques de travail du sol, de même que leur saisonnalité, ont un impact sur les déperditions de sol et la pratique d'une agriculture intensive sans aucune alternance avec des systèmes de protection de sol comme les prairies (Ketcheson, 1980). Les différentes interventions, tels que le type de labour (labour au chisel, le semis directe), les systèmes culturaux, l'intensité de la mécanisation, et la fertilisation, exercent une influence sur la structure du sol, son taux de matière organique (MO) ainsi que son degré d'agrégation (stabilité structurale) (Carter et al., 1995).

D'autres études conduites au Missouri (États-Unis) et ailleurs ont démontré l'efficacité du couvert au sol (plante de couverture et résidus de cultures) sur le contrôle de l'érosion hydrique par l'augmentation de l'infiltration des eaux de pluie au détriment du ruissellement de surface et la réduction de l'impact au sol des gouttes de pluie (Langdale et al., 1991; Dabney, 1998, cités dans Kaspar et al., 2001).

En effet, l'absence de labour (semi direct-SD-) diminue la perturbation du sol, ce qui contribue à améliorer son agrégation sur place contrairement au travail superficiel du sol. Cette pratique est répandue au nord de l'Alberta et de la Colombie Britannique malgré le caractère marginal des gains associés (Franzluebbers et al., 1996).

Dans le bassin agricole du Missouri plusieurs études (Went et al., 1985; Zhu et al., 1989; Mutchler et al., 1990; cités dans Kaspar et al., 2001) rapportent une efficacité de réduction des taux d'érosion de 87% à 96% liée au SD en association aux plantes de couverture (PLC) dépendamment du type de culture et de la séquence-chronologie- de leur association.

Elustondo et al. (1990), Perfect et al. (1990) dans des études similaires démontrent que le mode d'utilisation du sol (travail du sol, association et séquence des cultures avec effet de couverture au sol) influence les propriétés physiques du sol.

1.3 Problématique

L'érosion hydrique des sols est l'une des menaces à large échelle ayant un impact majeur sur la productivité agricole et la dégradation de la qualité de l'eau (Nearing et al., 2005; Mohamadi et al., 2015; Kaviani et al., 2017). Les nouvelles conditions créées par les CC vont accentuer l'exposition des sols, accroître le ruissellement de surface, ce qui contribuera à accélérer et à accroître la susceptibilité des sols à l'érosion hydrique (pertes de sols et exportation des nutriments). Ces conséquences vont même s'accélérer pendant la période de dégel et de fonte de neige (Michaud et al., 2012, cités dans Ouranos, 2015).

Les méfaits liés aux CC pressentis dans le domaine agricole au Québec sont largement identifiés. Rousseau et al. (2007) mentionnent le lien entre l'intensification des pluies, le taux de couvert végétal et l'accroissement des taux moyens d'érosion des sols.

L'exploitation intensive des sols en cultures en rangs et sous monoculture de productions annuelles conduisent à terme à la perte des stocks de MO disponible dans le sol et à la

dégradation des propriétés physiques du sol (Ketcheson, 1980), ce qui accroît son érodabilité (Bernard, 1996). Cette surexploitation des sols les exposera davantage à l'agressivité des pluies avec une augmentation de la vulnérabilité de la couverture du sol selon les systèmes culturaux en place. Tout ceci aura un impact sur la déstructuration des sols ainsi exposés et leur érodabilité (Ball-Coelho et al., 2000).

En effet, le labour tend généralement à diminuer le taux de macro-agrégats présents dans un sol à la faveur de la coexistence des méso et micro-agrégats (Six et al., 1999) qui malheureusement sont facilement mobilisables dans un contexte d'intensification des pluies.

Plusieurs études au Canada ont mis en évidence diverses interrelations entre l'érosion, le taux de MO, la qualité de sol et le rendement des cultures (Verity et al., 1990; Larson et al., 1991; Gregorich et al., 1994; Angers et al., 2020).

La présence d'un couvert plus ou moins permanent de résidus culturaux et des plantes de couverture favorise l'apport par incorporation du carbone et de l'azote dans le sol ce qui accroît le stockage de la MO (Carter et al., 1995), et une amélioration des propriétés physiques (mécaniques) du sol (Carter et al., 1995).

Par ailleurs, la régie des cultures a un impact sur les pertes de sol. Des travaux en parcelle au Québec rapportent des taux annuels de pertes de sol variables selon les cas : (i) 0.5 t.ha⁻¹ (sous couvert herbacé permanent), (ii) 0.5 t.ha⁻¹ à 17 t.ha⁻¹ (sous des céréales ou du maïs), (iii) 6 t.ha⁻¹ à 13 t.ha⁻¹ (sous culture de pommes de terre) (Dubé, 1975; Mehuys, 1981; Pesant et al., 1987); (iv) 12 t.ha⁻¹ à 49 t.ha⁻¹ (sous culture de maïs en terrain accidenté à 9% de pente) (Pesant, 1984); (v) 3.87 t.ha⁻¹ sous du maïs fourrager sans travail du sol pendant 3 années de rotation sur une prairie de luzerne-mil; et (vi) 50.68 t.ha⁻¹ avec du maïs en monoculture sous travail conventionnelle du sol pour 3 années de rotation (Pesant, 1984).

Ces taux d'érosion démontrent la contribution du travail du sol et des plantes couvre-sol à l'érosion hydrique, mais ils se situent encore au-dessus du seuil agronomiquement acceptable au Québec de 6 t.(ha.an)⁻¹ (Wall et al., 2002). Tout cela, ne rassure pas quant à l'efficacité présumée des pratiques de conservation des sols face à l'urgence et à la nécessité d'une agriculture de conservation devant garantir la pérennité des rendements agricoles face à la demande de plus en plus croissante et la préservation des sols dans un contexte des CC.

Les coûts moyens de remplacement associés aux pertes de nutriments (fertilisants) liés à l'érosion hydrique des sols sont estimés autour de 15 à 30\$/ha (Wall et al., 2002). Pour le Québec, ces coûts se situent entre 5 à 17 M\$/an (Anonyme, 1985, cité dans Bernard, 1996) ce

qui représente une autre externalité négative en plus de la perte directe des rendements auprès des producteurs agricoles du Québec.

L'effet cumulatif de l'ensemble de ces méfaits pourrait plus tard constituer un obstacle au plein essor de l'activité agricole (Bootsma et al., 2001; Bootsma et al., 2004) malgré le déploiement des pratiques avérées de conservation des sols. Gombault et al. (2015) évoquent cette hypothèse en présentant le cas de la Baie Missisquoi (Sud du Québec) où le scénario de CC projeté, bien que non transposable ailleurs au Québec, pourrait rendre inefficace toute pratique de conservation de sol (systèmes culturaux) éprouvée jusqu'ici.

1.4 But et objectifs spécifiques

Le but de la présente étude est de répondre à la question principale suivante : **quel sera l'effet d'une intensification des pluies liées aux changements climatiques sur l'érosion des terres agricoles et la qualité de l'eau ?**

Pratiquement, il est question d'évaluer et de comparer l'efficacité de six systèmes culturaux sur les risques d'érosion et de détérioration de la qualité des eaux sous les conditions de climat et de qualité de sol attendues à l'horizon 2050 à Saint-Lambert-de-Lauzon, Québec.

Plus spécifiquement, il est question :

- 1- d'évaluer et de comparer l'impact des conditions de climats actuel et futur sur les taux d'érosion, du ruissellement et de l'exportation des nutriments pour l'ensemble des systèmes culturaux étudiés,
- 2- d'évaluer et de comparer l'impact des pratiques de conservation (plante de couverture/PLC, sans plante de couverture/SPLC) sur les taux d'érosion, du ruissellement et de l'exportation des nutriments,
- 3- d'évaluer et de comparer l'impact du travail du sol (semis direct/SD, travail réduit au Chisel/Ch) sur les taux d'érosion, du ruissellement et de l'exportation des nutriments,

- 4- de comparer l'impact des cultures de couverture et du travail réduit (interaction des pratiques de conservation et du travail du sol) à protéger les sols de l'érosion hydrique,
- 5- d'évaluer et de comparer l'effet des pratiques de conservation, du travail du sol et de leur interaction selon la variation de l'intensité de pluie,
- 6- de déterminer les valeurs empiriques de l'érodabilité du sol (facteur K) et de l'indice cultural (indice C) de l'équation universelle des pertes de sol (USLE) spécifiques au site.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Impact de l'érosion sur le site et hors site

L'érosion est avant tout un processus naturel qui peut être accéléré par un certain nombre de facteurs anthropiques (agriculture, constructions, et autres). Le terme perte de sol désigne le déplacement ou l'exportation des sédiments hors des limites d'une parcelle sous l'effet de l'eau pour ce qui est de l'érosion hydrique. Celle-ci se manifeste par l'arrachement (désagrégation) des particules d'une roche ou d'un sol à la suite de son humectation ou de l'impact des gouttes de pluie, leur transport par l'eau, puis leur re-déposition/sédimentation (Bidon, 1994; Lagacé, 2016).

Elle contribue à la modification de la structure du sol en place, à l'exportation massive des éléments fins tels que les argiles qui contribuent pourtant au maintien de la fertilité du sol.

Selon leur ampleur, ces modifications vont occasionner des difficultés de passages ultérieurs des outils aratoires ainsi que retarder la levée des semences suite à l'installation d'une croûte de battance (Casenave et al., 1989). Le décapage ultérieur de la couche arable (superficielle) conduit à la perte du contenu en matière organique (MO) du sol ainsi que sa teneur en nutriments essentiels (Verity et al., 1990). Anderson et al. (1985), Tiessen et al. (1982) évaluent ces pertes à 20-81% pour l'azote total et le phosphore total, ce qui réduit la qualité des sols impactés et par conséquent les rendements des cultures (Verity et al., 1990) selon un facteur de décroissance de rendements estimée à 4.3 % par 10 cm de sol perdu (Bakker et al., 2004).

Au niveau environnemental, l'agriculture demeurent l'une des principales sources des apports diffus en milieu rural avec des bassins versants fortement agricoles marqués par la répartition inégale entre l'offre en fumiers-lisiers et les besoins réels des terres cultivées, ce qui rend la situation préoccupante quant au risque de pollution des eaux souterraines et de surface. Au Québec, les bassins versants des rivières Chaudière, Etchemin (Saint-Lambert-de-Lauzon y étant localisé), Yamaska et L'Assomption sont d'ailleurs les plus affectés (Beaudet, 1999). Les exportations charrient d'importantes quantités d'azote, de phosphore, de métaux lourds, d'organismes pathogènes, une variété de polluants organiques persistants, ainsi que toute la charge sédimentaire (matières en suspension/MES) générée. Pour ce qui est du phosphore par exemple, si sa solubilité lors de son épandage constitue un avantage pour les cultures, son apport

moindrement excessif présente un risque d'exportation vers les plans d'eaux (Carpenter *et al.*, 1998b). Dans un contexte similaire, la mobilité de l'azote (migration vers les nappes d'eau souterraines, volatilisation vers l'atmosphère et re-déposition dans les plans d'eau de surface) présente également un risque de pollution des plans d'eau en milieux agricoles (Carpenter *et al.*, 1998a). Cette mobilisation des sédiments et des nutriments provoque l'appauvrissement du site d'origine suite au transport sélectifs des différents nutriments et de la MO du sol en place (Sinukaban, 1981).

Au niveau des sites ou milieux récepteurs, les exportations des charges engendrent d'autres impacts environnementaux, entre autres :

- (i) les apports des charges sédimentaires (MES, phosphore, oxydes d'azote- NO_x , NH_x , nitrates- NO_3^-) sont à l'origine de l'eutrophisation des plans d'eau conduisant à la détérioration de leur qualité (physique, chimique, biologique et esthétique) (Lloyd *et al.*, 1987) cités dans (Bilotta *et al.*, 2008). On assiste alors à la disparition des espèces de poissons et au déclin des stocks des ressources halieutiques. Par ailleurs, une telle qualité des eaux présente également des risques pour la santé humaine (cancers d'estomac et méthémoglobinémie) (Haygarth *et al.*, 2002);
- (ii) surcoûts des opérations de traitement de l'eau potable et à la réduction de la durée de vie des ouvrages (réservoirs-barrages) (Bilotta *et al.*, 2008), et ultimement à des pertes économiques liées à la limitation de certains usages des plans d'eau à l'exemple des activités récréotouristiques (Blais, 2002) cité dans (Giroux *et al.*, 2008);
- (iii) la bioaccumulation des résidus de pesticides et des métaux lourds (Bilotta *et al.*, 2008).

Les CC déjà observés, l'intensification de l'agriculture, et le phénomène d'érosion des sols vont accentuer la problématique de la qualité des ressources en eau disponibles, avec des impacts sur la qualité des eaux issues des divers procédés de traitement et donc la fourniture de l'eau potable à l'échelle des municipalités ainsi que la qualité des eaux récréatives (Blais, 2002).

2.2 Impacts prévisibles des Changements Climatiques (CC) sur l'érosion

Les CC à l'échelle du Québec auront des impacts directs et indirects sur l'érosion hydrique des sols à l'horizon 2050. Les sols seront de plus en plus exposés à la force érosive des pluies elles-mêmes devenant de plus en plus agressives, ce qui aura pour conséquence l'augmentation des

volumes de ruissellement, amplifiant ainsi la vulnérabilité des sols en place. D'autre part, l'augmentation des pluies orageuses et l'accroissement du ruissellement va accentuer des risques de contamination éventuelle des eaux de surface (Mailhot et al., 2007; Michaud et al., 2012; cités dans Ouranos, 2015).

Le rallongement de la saison de croissance ainsi que l'agrandissement (extension) de la zone agroécologique des cultures comme le maïs, le soja, des céréales de printemps et des plantes fourragères pourrait conduire à l'intensification des activités agricoles (Bootsma et al., 2004). De 1966 à 1983, l'on a observé des accroissements des superficies cultivées de maïs ensilage et maïs grains au Québec et en Ontario associé à des taux de réduction équivalents des superficies de foin et d'avoine (Pesant et al., 1987). Les pertes de sols (couches arables) associées se situent au-delà du seuil agronomique acceptable (5 – 12 tonnes/ha soit $0.4 - 1 \text{ mm.an}^{-1}$; densité 1.2 kg.m^{-3}) tel que défini par le USDA en 1950 (Montgomery, 2007).

Sanchis et al. (2008) ont examiné les effets de la variabilité du climat sur l'érodabilité des sols dans quatre écorégions représentatives de la diversité du climat mondial (forêt tropicale humide en Amérique du Sud, en Afrique et en Indonésie ; forêts enneigées et humide en Amérique du Nord ; zone tempérée chaude en Europe du Nord et central ; zone de la méditerranéenne en Europe du Sud, Chypre et Italie). Ce travail a mis en évidence l'impact significatif de la stabilité des agrégats sur la variabilité saisonnière de l'érodabilité des sols. En effet, les forces de cohésion des particules primaires constituant les agrégats du sol sont moins fortes dans les sols des régions froides comparativement aux régions chaudes (Trapnell et al., 1986; Lavee et al., 1996; Andreu et al., 2001), ce qui démontre que la dynamique de la stabilité des agrégats dans un sol est influencée par la température de l'air et par l'humidité du sol. La faible stabilité relative des agrégats en régions froides justifie donc qu'ils puissent facilement être dispersés sous l'action de diverses forces érosives (Sanchis et al., 2008).

Ce portrait justifie d'examiner l'hypothèse selon laquelle un scénario d'intensification des pluies à l'horizon 2050 résultant des CC pourrait accélérer le phénomène d'érosion des terres agricoles au Québec. Ceci dit, à l'échelle de la planète, les pertes de sol estimées demeurent encore supérieures au seuil maximal agronomiquement acceptable de $11 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (Schaller et al., 1983). Au Canada, cette valeur seuil est encore plus conservatrice ($6 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) (Wall et al., 2002) certainement par souci de prise en compte des effets contributifs du phénomène de gel et de dégel des sols.

2.3 Effet des pratiques de conservation (travail du sol, plante de couverture) sur la réduction de l'érosion

Les pratiques culturales désignent l'ensemble des techniques déployées sur une parcelle de terrain en vue de réduire l'érosion, conserver son humidité, et soutenir sa productivité tout en préservant la qualité de l'eau en milieu agricole. Ces pratiques intègrent prioritairement la régie des cultures (diversité végétale avec le maintien d'un couvert au sol) et le travail du sol, l'installation des bandes riveraines. Chacun de ces aspects contribue à la réduction des risques d'érosion hydrique.

Les cultures pérennes (herbacées ou arbustives) limitent le travail du sol et jouent le rôle de couverture du sol. Certaines plantes par leur système racinaire ont la capacité d'agir comme filtre végétatif vis-à-vis des polluants et des éléments fertilisants. Des ouvrages à l'exemple des baissières ralentissent la vitesse du ruissellement, favorisent l'infiltration. Ces pratiques réduisent le transport de sédiments et des volumes d'eau ruisselés, ce qui facilite la préservation de la qualité de l'eau (Yu et al., 2001; Blanco-Canqui, 2003; cités dans Gasser et al., 2013). A ceci s'ajoute l'effet d'amplification lié à la saisonnalité telle qu'observée dans le contexte du Nouveau-Brunswick (Chow et al., 2000).

Des études conduites aux États-Unis (Missouri) et ailleurs ont démontrée l'impact positif du couvert au sol (plante de couverture et résidus de cultures) sur le contrôle de l'érosion hydrique par l'augmentation de l'infiltration des eaux de pluie au détriment du ruissellement de surface ainsi que la diminution de l'impact au sol des gouttes de pluie (Langdale et al., 1991; Dabney, 1998; cités dans Kaspar et al., 2001). Des réductions de 87% à 96% des taux de ruissellement ont été rapportées dans le bassin du Missouri avec la combinaison du semis direct avec une plante de couverture, dépendamment du type de culture et de l'itinéraire des associations (Wendt et al., 1985; Zhu et al., 1989; Mutchler et al., 1990; cités dans Kaspar et al., 2001).

Toute pratique culturale ayant un effet sur le processus érosif des sols agit sur l'une ou l'ensemble des variables suivantes : augmentation de l'infiltration, la diminution du ruissellement de surface, le ralentissement de la vitesse de ruissellement, la diminution de l'énergie des gouttes de pluie, l'amélioration de la stabilité des agrégats. Les travaux de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon portant sur l'intégration des risbernes et baissières dans des bandes végétatives de saule (arbustives) et d'alpiste roseau (graminée pérenne) en aval des enclos d'élevage bovin ont conduit à des réductions des volume de ruissellement de 46% et de plus de 50% pour nutriments (N,P) (Gasser et al., 2017).

Les pratiques de conservation favorisent le maintien d'un couvert au sol par l'installation d'une plante de couverture, le maintien en place des résidus de culture et un choix judicieux du mode de travail du sol permettant de limiter le lessivage du sol et l'exportation des nutriments par le contrôle du ruissellement de surface ainsi que l'enrichissement du sol en carbone et la conservation des nutriments en place (Poirier, 2007). Selon le mode de préparation du lit de semence, la taille des agrégats, la porosité et la perméabilité, l'état de compaction du terrain, le taux d'incorporation de la matière organique vont à leur tour moduler le ruissellement de surface (Haygarth et al., 2002). D'un point de vue physique, un certain nombre de paramètres, à savoir la stabilité structurale (pourcentage d'agrégats stables à l'eau), le diamètre moyen pondéré (DMP), renseigne sur la capacité de résistance d'un sol à l'érosion hydrique (Abiven, 2004) cité dans (M'hamed, 2018). À cet effet, Le Bissonnais (1996) propose une échelle ou grille reliant le DMP, le degré de stabilité, la susceptibilité à la formation d'une croûte de battance, le ruissellement et l'érosion diffus.

Le Bissonnais (1996) cité dans M'hamed (2018) présente des résultats démontrant que le labour provoque l'ameublissement (déstructuration) des agrégats du sol en place et inversement, un sol faiblement labouré ou pas du tout conserve ses macro-agrégats puisque mieux agrégés et par conséquent plus stables. Dans une étude menée au nord de la Tunisie sur des parcelles sous cultures céréalières, M'hamed (2018) dégage une relation entre l'augmentation significative du degré d'agrégation du sol et les durées de mise en œuvre des différentes pratiques culturales associées à l'agriculture de conservation.

D'autre part, les sols moins travaillés favorisent une meilleure incorporation du carbone organique sous forme de mulch, ce qui assure leur protection physique contre l'effet « splash » des gouttes de pluies (Prosdoci, 2016, cité dans M'hamed, 2018).

Dans une étude (simulations) portant sur des bassins versants de la Montérégie (Québec), Quilbé et al. (2007) ainsi que Michaud et al. (2007) concluent que l'adoption des meilleures pratiques de gestion-conservation agricole permettrait des réductions significatives des exportations d'azotes et de phosphore vers les cours d'eau contribuant ainsi à la préservation de la qualité des eaux de surface. Dans le bassin versant de la rivière aux Brochets (sud du Québec), Michaud et al. (2008) obtiennent des taux de réduction des exportations de phosphore de l'ordre de 22% à la suite de l'installation des cultures de couverture sur seulement 10% du parcellaire. Le travail réduit du sol quant à lui a contribué à des taux de réduction de 42%, 46% et 53% respectivement sur le ruissellement de surface, l'exportation des charges en sédiments et le phosphore à l'exutoire (Michaud et al., 2007; Mehdi, 2014; Mehdi et al., 2015).

Les résultats d'une étude menée par M'hamed (2018) au nord de la Tunisie concluent que l'agriculture de conservation (AC) est une option favorable pour la durabilité de la production agricole et précisément des céréales en Tunisie. L'utilisation des bonnes pratiques culturales face aux changements climatiques peut aider à atténuer les impacts négatifs pressentis sur l'érosion et donc sur la qualité de l'eau (Michaud et al., 2008; Rousseau et al., 2013; Mehdi, 2014; Mehdi et al., 2015).

Au même titre que la rotation et l'association des cultures (effet couverture au sol), l'alternance des méthodes de préparation du sol (le labour conventionnel et profond à versoirs, le semis direct, le labour superficiel à disques, le chisel) est recommandée puisqu'elle contribue à améliorer la structure du sol minimisant ainsi son érodibilité (Lal, 1994).

Dans l'idéal, le travail du sol recherche un meilleur compromis entre : l'aération du sol, le contact entre le grain (semence) et les agrégats du sol, la rétention et la circulation de l'eau, la rugosité afin de favoriser une plus grande infiltration d'eau plutôt que son ruissèlement en surface. A l'opposé, un travail inapproprié (passages excessifs d'engins) peut conduire à la compaction du sol (avec toutes ses conséquences), au retournement et à la concentration de la MO en profondeur où elle devient moins utile aux fonctions agronomiques (Gumiere, 2020).

Par ailleurs, les pratiques culturales de conservation et en l'occurrence le semis direct, favorisent une accumulation des formes solubles de phosphore à la surface du sol. Ce mécanisme est encore plus significatif en présence des résidus de cultures laissés à la surface du sol (Messiga, 2010). Ce qui prédispose à un transport sélectif des nutriments liés aux particules du sol.

2.4 Équation universelle des pertes de sol (USLE) : indice K et C

Plusieurs modèles de prédiction (empiriques ou déterministes) ont été utilisés et servent encore à l'estimation des pertes de sol par l'érosion hydrique à travers le monde et au Canada. Depuis le début 1990, plusieurs modèles dérivés et adaptés aux conditions morphoclimatiques du Québec et à différentes échelles spatiales ont été développés :

- AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution Model) (Young, 1989), appliqué à Lennoxville,

- GAMES (The Guelph Model for evaluating effects of Agricultural Management systems on Erosion and Sedimentation) (Cook et al., 1985), développé en Ontario sur les pratiques de gestion agricoles, l'érosion et la re déposition de la pollution diffuse,
- ANSWERS (Areal Non-Point Source Watershed Environmental Response Simulation) (Beasley et al., 1980) ayant servi à Rigaud/Montréal,
- BI-LAVSED-pour l'estimation de l'apport des charges solides par les tributaire du fleuve Saint-Laurent à la hauteur de Montréal) (Mabit et al., 2000),
- Rousseau et al. (2013) ont développé un système informatisé (GIBSI) intégrant plusieurs progiciels Hydrotel-RUSLE-EPIC-SWAT-QUAL2E afin d'évaluer autant les apports de charges par l'érosion que la qualité de l'eau découlant dans le bassin versant de la rivière Beaurivage.

La modélisation de l'érosion hydrique incluse dans ces modèles se fait généralement à partir de la USLE (Wischmeier et al., 1978) et celle-ci demeure l'équation la plus utilisée (Cassol et al., 2018). Sa forme actuelle est le résultat d'une intégration progressive d'un ensemble de facteurs empiriques issus d'une vaste banque de données (un peu plus de 22 années), tel que résumé par Michaud (1987). La forme finale et actuelle de l'équation prédictive des pertes de sol est :

Équation 2.1: Équation universelle des pertes de sol (Wischmeier et al., 1978)

$$A = R \cdot K \cdot (L \cdot S) \cdot (C \cdot P)$$

Où A est la perte potentielle de sol moyenne annuelle en t.(ha.an)⁻¹

R, l'érosivité de la pluie en MJ.mm. (ha.hr.an)⁻¹

aussi appelée facteur de pluviosité

K, l'érodabilité du sol en t.ha.hr.(ha.MJ.mm)⁻¹

(LS), le facteur de pente ou topographique

(CP), le facteur couvert et pratique de culture

Cette équation connaît une large application sur le plan géographique moyennant quelques adaptations selon chaque contexte agro climatique (Benavidez et al., 2018). La version révisée, à jour et adaptée au contexte canadien, RUSLEFAC, date de 1997 (Wall et al., 2002).

D'un point de vue pratique, l'équation ci-dessus sert entre autres à estimer :

- les pertes de sol et à établir des comparaisons (seuils agronomiquement acceptables selon les seuils de tolérance des régions concernées),
- estimer les valeurs des indices C et P des différents systèmes cultureux afin de proposer le meilleur aménagement (régie de culture et travail du sol) dans le but de limiter les pertes de sol encourues en dessous du seuil agronomiquement acceptable.

2.4.1 L'érosivité ou l'indice R ou EI_{30max} en $[MJ.mm. (ha.h.an)^{-1}]$

L'indice R est l'estimation du risque climatique sur l'érosion d'un sol à plus ou moins long terme (Gumiere, 2020). Ce terme dans l'équation permet d'intégrer la contribution de l'agressivité de la pluie à l'érosion hydrique des sols. Le terme EI_{30max} ou l'indice d'érosivité de Wischmeier (Wischmeier et al., 1958) a montré une meilleure corrélation ($r = 0.90$) avec l'érosion. Salehi et al. (1991) aboutissent à des résultats similaires à Lennoxville (Québec) avec $R^2 = 0.87$ et $r = 0.93$. L'indice R s'obtient selon :

Équation 2.2 : Érosivité potentielle de la pluie ou indice R (Lagacé, 2016)

$$EI_{30} = \sum_{j=1}^n I_{30j} \left[\sum_{i=1}^m (h(j,i) - h(j,i-1)) E_{j,i} \right]$$

Où

- $h(j,i) - h(j,i-1)$ correspond à la hauteur de la lame d'eau reçue ou tombée
- I_{30} , l'intensité maximale de pluie sur une période de 30 minutes consécutives dans un orage exprimée en $mm.h^{-1}$ en excluant les valeurs aux bornes de l'intervalle de temps considéré
- n , le nombre d'évènements de pluies ou orage
- m , nombre de portions ou de segments de pluie identiques à l'intérieur d'un orage donné
- $E_{j,i} = E_{ci}$ est l'énergie cinétique singulière calculée comme suit :

Équation 2.3 : Énergie cinétique de la pluie (Wischmeier, 1958, cité dans Lagacé, 2016)

$$E_{ci} = 0.1190 + 0.0379 \ln(I_i)$$

Lal (1988) précise que les pluies dont l'énergie totale (lame d'eau accumulée, $h_{j,i}$) est inférieure à 13 mm ne sont pas prises en compte puisqu'associées à une valeur de perte de sol de l'ordre de 0.02 t.ha^{-1} .

2.4.2 L'érodabilité ou l'indice K en $[\text{t.ha.h.}(\text{ha.MJ.mm})^{-1}]$

L'érodabilité est la réponse (réaction-comportement) d'un sol vis-à-vis de la pluie et du ruissellement (Sanchis et al., 2008). L'indice K est l'indice de susceptibilité-résistance d'un sol à l'érosion (érodabilité d'un sol). Il mesure la sensibilité d'un sol à l'action de la pluie. Il s'agit de l'érosion (t.ha^{-1}) par unité d'érosivité (R) de la pluie, qui varie dans le temps (année) et dans l'espace (géographie) et est exprimée en $\text{t.ha.h.}(\text{ha.MJ.mm})^{-1}$.

L'érodabilité se mesure sur une parcelle de référence de 22.1 m long sur 9 % de pente labourée dans le sens de la pente et maintenue en jachère en permanence. Sa détermination directe s'étant avérée difficile et coûteuse (Gumiere, 2020), Wischmeier et al. (1971) proposent un nomographe dont l'usage facilite la détermination de la valeur de K. Les quatre paramètres principaux supportant le nomographe sont : la texture du sol, la teneur en MO, la structure et la perméabilité du sol (Wall et al., 2002). L'équation ci-après représente la régression multiple à la base du nomographe de Wischmeier :

Équation 2.4 : Indice d'érodabilité ou d'érodabilité des sols (Wischmeier et al., 1971, cités dans Bernard, 1996)

$$K = 2.8 \cdot 10^{-7} (M)^{1.14} (12 - a) + 0.0043(b - 2) + 0.0033(c - 3)$$

Où M est le facteur granulométrique (% limon + % sable très fin) x (100 - % argile)

a, le pourcentage (%) de MO

b, la classe (code) de structure du sol concerné (classification : 1 - 4)

c, la classe (code) de perméabilité du sol (profil de perméabilité : 1 - 6)

Salehi et al. (1991) à Lennoxville (Québec) proposent les trois classes d'érodabilité ci-dessous à partir des données de dix séries de sols cultivés :

- $K \leq 0.026$: érodabilité faible
- $0.027 \leq K \leq 0.052$: érodabilité moyenne ou modérée

- $K \geq 0.053$: érodabilité élevée ou forte

Wall et al. (2002) proposent deux tables résumant des valeurs d'érodabilité en fonction de la classe texturale et du pourcentage de MO à partir des données d'un échantillon de 1600 séries de sols du sud de l'Ontario.

2.4.3 Facteur de déclivité ou topographique (L.S)

Le facteur L.S d'une parcelle donnée se détermine à partir d'une parcelle de référence ou standard au sens de la USLE, ce qui correspond à une « parcelle unitaire » de 22.13m de long et de 1.83 m de large sur une pente (S) de 9% (Wischmeier et al., 1978). La formule adaptée suivante a été développée pour tenir compte de la variabilité des sites pour une pente uniforme :

Équation 2.5 : Facteur topographique (Wall et al., 2002)

$$L.S = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m (65.41 \times \sin^2\theta + 4.56 \times \sin\theta + 0.065)$$

Où λ est la longueur de la pente du site (en mètre)

θ est l'inclinaison de la pente (en degrés)

m est un coefficient en exposant lié au rapport entre l'érosion en rigoles et l'érosion en inter rigoles

Lorsqu'il n'est pas déjà connu, la valeur du coefficient m peut se déduire à partir de :

Équation 2.6 : Coefficient m (fonction de la pente) (Mutchler et al., 1981)

$$m = 1.2 (\sin\theta)^{1/3}$$

D'autre part, Wischmeier et al. (1978) aux U.S.A, Salehi et al. (1991) à Lennoxville (sud du Québec), Wall et al. (2002) dans le sud de l'Ontario proposent des valeurs de « m » prédéterminées à utiliser en fonction de la pente (%) du site :

- 0.5 pour les pentes $\geq 5\%$
- 0.4 pour les pentes de 3.5 % - 4.5%
- 0.3 pour les pentes de 1% à 3%
- 0.2 pour les pentes $< 1\%$

(Toutes les pentes ayant été estimées à 0.5% près).

Par ailleurs, Wischmeier et al. (1978) proposent un abaque des valeurs de L.S en fonction de la valeur de la pente et de sa longueur.

L'on peut constater à partir de la formule de L.S ci-dessus que la force érosive du ruissellement ou le potentiel d'érosion croît avec l'augmentation de la pente et de sa longueur (du sommet vers le bas du versant) à cause de la concentration des écoulements, ce qui fait du terme (L.S) un facteur accélérant du processus d'érosion (Gumiere, 2020).

Cet effet amplificateur des pertes de sols avec la pente se vérifie jusqu'à la limite de 8%-10% au-delà de laquelle, les pertes de sol sont limitées par la disponibilité même des sédiments (Gumiere, 2020).

2.4.4 Facteur C

Le facteur C est « une mesure de l'efficacité relative des systèmes de gestion des sols et des cultures ». C'est la contribution de la régie des sols et de la séquence des cultures dans l'expression des pertes de sols (Lagacé, 2016).

Le facteur ou indice C intègre ou rend compte de l'effet du couvert végétal et se calcule comme suit :

Équation 2.7 : Facteur C (Wischmeier et al., 1978)

$$C = \frac{A(i)}{A(\text{trt. réf})}$$

Où $A_{(i)}$ est la perte effective de sol du traitement (i) établi sur la parcelle,

$A_{(trt.réf)}$, la perte effective de sol de la parcelle de sol nu considérée comme traitement de référence (Lal, 1988; Salehi et al., 1991).

L'indice C varie de 0.01 pour un sol couvert à 100% (prairie permanente) à 1 pour une jachère totalement nue (Wischmeier et al., 1978; Lal, 1994).

Si les indices R et K sont qualifiés d'extrinsèques (incontrôlables), l'indice C quant à lui est considéré comme intrinsèque (contrôlable). Il renseigne sur l'efficacité des pratiques de conservation mises en œuvre en permettant de comparer la perte de sol réellement obtenue à celle agronomiquement acceptable-tolérable dans une écorégion (Lal, 1988). L'indice C est d'un grand intérêt agronomique et environnemental. En effet, les pertes de sols sont fonction à la fois de l'érosivité des pluies, de l'érodabilité du sol mais aussi de l'état de surface du sol qui lui-même est défini par le couvert végétal (plantes et résidus), la succession des cultures, la durée de la saison de croissance, le travail de surface (Lal, 1994; Morsli et al., 2004).

Pour mieux pondérer la contribution de l'indice C dans le contrôle de l'érosion, une subdivision de l'ensemble du cycle végétatif en six périodes selon les stades de développement végétatif correspondant à un pourcentage de recouvrement du sol a été proposée (Wischmeier, 1960, cité dans Salehi et al., 1991) :

- stade F-jachère : du labour profond (retournement complet) jusqu'au second labour (superficiel-préparation lit de semis),
- stade lit de semis : de la fin du labour du lit de semis jusqu'au stade 10% de couvert de canopée,
- période 1-établissement : de la fin du semis à 50% de couvert de canopée (cotton 35%)
- période 2-croissance : fin de la période 1 jusqu'à 75% de couvert de canopée (cotton : 60%)
- période 3-maturation : fin de la période 2 jusqu'à la récolte
- période 4-résidus en champ : fin des récoltes (résidus ou chaume en champs) jusqu'au début du labour suivant.

En effet, l'indice C ainsi estimé intègre implicitement d'autres variables que sont : le couvert foliaire, le paillis (de surface), les résidus incorporés, le labour subséquent.

Lal (1988) a mis en évidence l'existence d'une relation curvilinéaire entre le pourcentage de couvert végétal saisonnier au sol et la fraction de perte de sol associée. Cette relation montre qu'un seuil de couvert végétal de 30% maintenu sur une parcelle peut contribuer à limiter les pertes de sol à un taux $\leq 20\%$ de la perte de sol totale issue d'une parcelle de sol nu. Lal (1988)

rapporte pour une forêt non perturbée, des pertes annuelles de sol jusqu'à un seuil de $0.5 \text{ t.ha}^{-1}\text{an}^{-1}$.

Les pratiques culturales telles que la rotation et l'association des cultures peuvent aussi influencer et conduire à la variation du taux de couverture du sol. Lal (1988) relève également qu'une rotation à base uniquement de maïs conduit à des pertes de sol beaucoup plus importantes comparativement à une rotation de type céréales suivi de plantes herbacées ou légumes. Une meilleure rotation en association avec des cultures serait donc plus avantageuse.

Laamrani et al. (2017) ont proposé une échelle en trois classes en fonction du pourcentage de couvert de résidus au sol au terme des travaux réalisés dans le Comté de Elgin (sud de l'Ontario) :

- couvert de résidus $\leq 29\%$: bas-faible
- couvert de résidus entre $30\% - 59\%$: moyen
- couvert de résidus $\geq 60\%$: couvert élevé

Wall et al. (2002) pour le RUSLFAC proposent des tables de valeurs de l'indice C pour le Québec.

2.4.5 Facteur P

Le facteur P mesure l'efficacité des pratiques d'aménagement de surface mises en place comme pratiques de conservation de sols dans le but de réduire le ruissellement et l'érosion (MENV, 2004).

La culture en contours, la culture en bandes perpendiculaires à la pente, la culture en terrasses constituent les différentes formes d'aménagement de surface.

La culture en terrasse est particulièrement efficace pour le contrôle de l'érosion. Elle a limité la perte de sol moyenne à moins de $0.4 \text{ t.ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ (sur 4 ans) en Iowa et au Nebraska aux EU (Wischmeier et al., 1978).

Dans la pratique, les facteurs C et P, réunis sous le terme [C.P], agissent ensemble et contribuent conjointement et à terme à moduler l'état de rugosité de surface qui elle-même a un impact à la fois sur l'infiltrabilité du sol en place et sur son ruissellement de surface (Gumiere, 2020).

2.5 Simulateur (SIM) de pluies

« Un simulateur de pluie est un appareil qui reproduit, sur une surface réduite, une averse dont les paramètres physiques sont les plus proches de ceux observés dans la nature : hauteur, intensité, diamètre et énergie cinétique des gouttes de pluie, répartition de la lame précipitée au sol » (Bernard, 1987). La variabilité des pluies naturelles a mis en évidence plusieurs inconvénients au niveau entre autres des variables : intensité, durée, exigence d'un grand nombre d'années d'observations (Bidon, 1994). Le besoin d'un meilleur contrôle de l'érosivité des pluies étudiées ainsi que du gain en temps lors de la collecte des données justifient le recours quasi généralisé aux simulateurs de pluie pour l'étude de l'érosion hydrique (Bidon, 1994).

La méthode d'estimation de l'érosion hydrique par des pluies simulées s'avère être beaucoup plus précise lors de la collecte directe des sédiments érodés (MES) transportés dans le ruissellement, comparativement aux méthodes semi-quantitatives consistant en l'installation de pieux-repères pour des mesures avant et après les pluies jugées approximatives et exigeantes en temps (Bidon, 1994).

Sur le plan historique, le recours aux simulateurs de pluies dans des études des processus de l'érosion hydrique des sols se résume autour des grandes dates ci-après :

- initiation aux États-Unis en 1917 lors des premières recherches sur l'érosion sous simulateur de pluie (Wischmeier et al., 1962),
- recours aux gicleurs de type irrigation dans les années 1930, mais il persistait des difficultés d'établir des similitudes (tailles des gouttes, vitesse de chute) avec des pluies naturelles,
- Laws et al. (1943), Marshall et al. (1948) établissent la relation ci-après entre le diamètre médian (D_{50}) des gouttes de pluie et l'intensité de la pluie selon Michaud (1987) :

Équation 2.8: Diamètre médian d'une goutte de pluie (Laws et al., 1943), (Marshall et al., 1948)

$$D_{50} = \alpha \cdot I^{\beta}$$

Où D_{50} est le diamètre médian (mm)

I est l'intensité moyenne de la pluie ($\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$)

α et β des paramètres déterminés selon chaque région

- développement de trois types de simulateurs de pluies dans les années 1960-1970

A la base, il existe deux grands modèles de simulateurs de pluies (Bernard, 1987; Tossell et al., 1990; Bidon, 1994; Pérez-Latorre et al., 2010) :

- les simulateurs à buses génératrices de gouttes de pluies. Ce modèle a l'avantage de générer des gouttes de pluies de tailles similaires. Son désavantage étant la difficulté d'évaluer l'énergie cinétique de la pluie simulée aux fins de comparaison à celle d'une pluie naturelle.
- les simulateurs à gicleurs sous pression permettant de reproduire des pluies aux caractéristiques (énergie cinétique, diamètre des gouttes de pluies, vitesse de chute des gouttes) beaucoup plus proches de celles d'une pluie naturelle.

Du point de vue fonctionnel, les simulateurs de pluies avec gicleurs se classent en deux grandes catégories :

- ceux à gicleurs **oscillants** avec contrôle automatique (Swanson, 1965; Moore et al., 1983; Esteves et al., 2000; Fister et al., 2012; cités dans Wilson *et al.*, 2014) déployés sur des parcelles et dont la gamme des intensités de pluies appliquées varie de 3.5–185 mm.hr⁻¹ avec un coefficient d'uniformité de 60% à 83.7%. Ce type de simulateur présente l'avantage d'un contrôle et opération faciles permettant de reproduire des gouttes de pluies aux caractéristiques (diamètre, vitesse de chute terminale, énergie cinétique et érosivité) proches de celles d'une pluie naturelle. Leur principal désavantage étant leur dépendance à l'automation (contrôle automatique) (Wilson et al., 2014).
- ceux à gicleurs **fixes** ou **stationnaires** avec un contrôle manuel. La principale limitation est leur coefficient d'uniformité (CU ≈ 60%) jugé relativement faible (Wilson et al., 2014). Ce modèle offre une variété de gicleurs. Le gicleur de type irrigation et précisément le «Senninger Wobbler» comportant un nombre variable (n) de déflecteurs est utilisé depuis les années 70 (Kincaid et al., 1996).

La mise au point d'un simulateur de pluie repose sur plus ou moins neuf (9) critères : (i) la distribution des fréquences de diamètres des gouttes, (ii) la vitesse de chute terminale, (iii) l'intensité et leur uniformité (Meyer, 1979), pour tenir compte à la fois de la capacité à provoquer l'érosion et de la probabilité d'occurrence, Michaud (1987) propose la plage d'intensité cible de 10 à 100 mm.hr⁻¹ lors des tests de simulation de pluie, (iv) l'application continue sur la parcelle, (v) l'angle de chute ou d'impact des gouttes par rapport à la verticale, (vi) la reproductibilité des orages simulées en temps et en intensité, (vii) la flexibilité d'opération du SIM, (viii) les coûts

(Moore et al., 1983) et (ix) la pression d'opération, elle est inversement proportionnelle au diamètre des gouttes et a un impact sur l'uniformité de la distribution spatiale des intensités (Clément et al., 1979, cités dans Afoua et al., 2017).

Il faut noter que les conditions de vent sur le site peuvent devenir une limitation-contrainte à l'utilisation du simulateur de pluie puisqu'il affecte l'uniformité de distribution de la pluie aussi bien naturelle que simulée. Il est donc fortement suggéré de prévoir un dispositif de contrôle (brise-vent) lorsque la vitesse du vent est $\geq$ à la valeur critique de 6 m.s^{-1} (21.6 km.hr^{-1}). Afoua et al. (2017) rapporte une baisse du CU de 73 % (vents de 1.6 m.s^{-1} , 5.76 km.hr^{-1}) à 63 % (vents de 3.6 m.s^{-1} , 12.96 km.hr^{-1}). Neff (1979) cité dans Wilson et al. (2014) précise qu'un CU de 75% est jugé de performance moyenne, alors qu'un CU de 80% est acceptable.

Enfin, Salehi et al. (1993) mentionnent l'absence d'un standard sur les aspects ci-après en rapport avec les simulateurs de pluie :

- la préparation du terrain-sol avant les tests de simulation de pluies,
- la taille idéale (dimensions) des parcelles, et
- la durée et l'intensité de pluie appliquée.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 Site d'étude

Le site d'étude est situé sur la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon (Lat. : 46°36'20", Long. : 71°10'17") dans le bassin versant de la rivière Etchemin (**Annexe 1**). L'altitude moyenne du site est de 115 m avec une pente moyenne de 4.5% (2.58°) variant entre 6.0% (3.43°) et 2.7% (1.53°) obtenue à partir des levées topographiques de trente-six (36) parcelles au moyen d'un théodolite (Nikon Automatic Level AE-7, 30x). Cette valeur de pente est considérée de très faible (classe 3) à faible (classe 4) selon la classification des sols du Canada (GTCS, 2002). L'ensemble des levées topographiques tel qu'effectuées se trouve à l'**Annexe 2**.

Le sol en place est de la série Le Bras correspondant à un gleysol humique avec un taux de MO variant de 2.4 % (0 cm – 10 cm profond) à 1.2 % (10 cm - 20 cm profond) et un indice de saturation en phosphore (ISP) de 5.1 % à 2.0% (Gasser et al., 2013).

La texture du sol en place est un mélange de loam et de loam sableux. La figure 46 à l'annexe 18 présente la répartition des parcelles dans les des deux groupes de blocs préalablement aux simulations de pluies. Cette répartition reflète l'état textural du site sous les conditions de climats actuel et futur.

La capacité d'échange cationique (C.E.C) moyenne est de 13.63 mEq/100g (E.T = 1.17 mEq/100g). Le pH_{moy.} est de 6.04, variant entre 5.42 et 7.32; et une valeur du ratio Ca/C.E.C_{moy.} de 61.41 correspondant à celui d'un site légèrement acide proche de la neutralité.

La température moyenne annuelle (2020) du site est de 6.0°C avec un maximum de 21.4°C et un minimum de -8.6°C. La moyenne mensuelle (2020) des précipitations liquides (pluies) enregistrées est de 67.4 mm (maximum de 158.9 mm enregistré en août et un minimum de 0.0 mm en février tel que présenté à l'**Annexe 3**.

3.2 Traitements agronomiques retenus et leur disposition

Les six systèmes culturaux ou traitements mis en place à raison d'un système cultural par parcelle secondaire sont :

- sol nu (S-Nu)
- culture de soya sans travail du sol (semis direct) et sans plante de couverture (SD-SPLC)
- culture de soya sans travail du sol (semis direct) et avec plante de couverture (SD-PLC)
- culture de soya sous travail réduit (chisel) et sans plante de couverture (Ch-SPLC)
- culture de soya sous travail réduit (chisel) et avec plante de couverture (Ch-PLC)
- prairie (P)

La culture principale (soya) et la culture intercalaire ou de couverture (trèfle) ont été semées en ligne dans le sens de la pente du terrain.

Le dispositif expérimental offrait deux niveaux de structuration ou de randomisation :

- six (6) blocs ou parcelles principales (18 m x 6 m) regroupés en deux classes ou conditions correspondant à deux états structuraux du sol différents et deux intensités de pluies,
- six (6) parcelles secondaires (6 m x 3 m) recevant les systèmes culturaux, disposées à l'intérieur de chaque bloc.

Les six (6) parcelles principales ou blocs ont été disposées en deux rangées et perpendiculairement à la pente. Les six (6) parcelles secondaires ont été disposées chacune suivant la pente du terrain et distribuées de façon aléatoire au sein de chaque bloc.

Les deux intensités de pluies simulées et les deux états structuraux du sol conjointement appliqués au niveau du bloc (parcelle principale) désignent l'effet des conditions agissant sous deux modalités :

- « conditions actuelles »/Cdt.Ac. se référant au climat actuel au sein de trois (3) blocs (ou 3 répétitions),

- « conditions futures »/Cdt.Fu. se référant au climat futur au sein des trois (3) autres blocs (ou 3 répétitions).

Le dispositif en parcelles divisées correspondant est représenté par la **Figure 3.1** et les parcelles secondaires (systèmes cultureux) illustrées par la **Figure 3.2** ci-dessous :



Figure 3.1: Dispositif expérimental, intensité de pluie à l'échelle du bloc et distribution aléatoire des systèmes cultureux comme parcelles secondaires au sein d'un même bloc

Légende :

- 1)- sol nu (S-Nu)
- 2)- culture de soya sans travail du sol (semis direct) et sans plante de couverture (Sy-SD-SPLC) ou (SD-SPLC)
- 3)- culture de soya sans travail du sol (semis direct) et avec plante de couverture (Sy-SD-PLC) ou (SD-PLC)
- 4)- culture de soya sous travail réduit (chisel) et sans plante de couverture (Sy-Ch-SPLC) ou (Ch-SPLC)
- 5)- culture de soya sous travail réduit (chisel) et avec plante de couverture (Sy-Ch-PLC) ou (Ch-PLC)
- 6)- prairie (P)

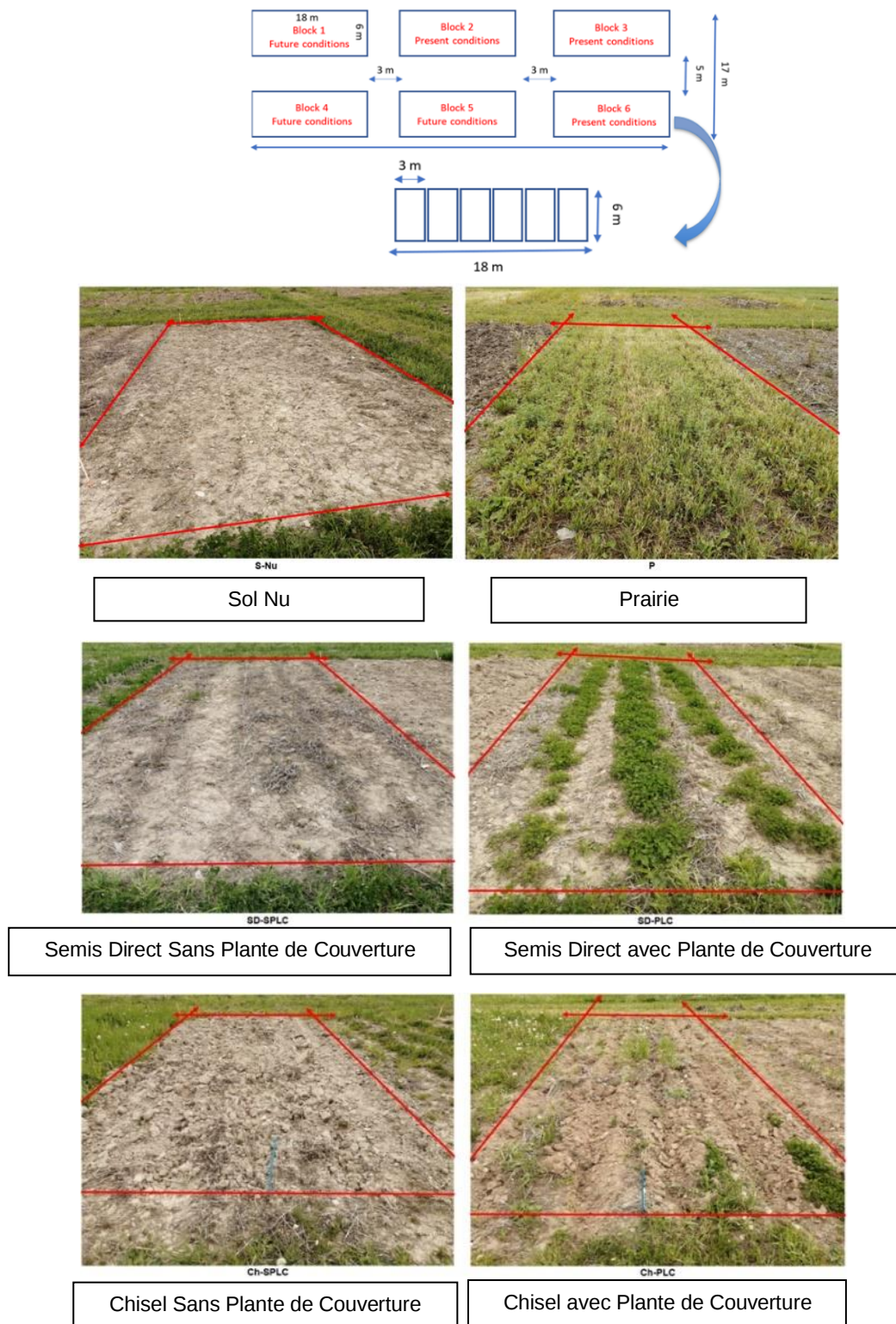


Figure 3.2: Parcelles secondaires (systèmes cultureux) dans une parcelle principale (bloc)

Le périmètre de chaque parcelle secondaire (système cultural ou traitement) a été entouré d'une plaque métallique (≈ 25 cm de haut) isolant une aire effective de 5 m x 2 m dont le ruissellement de surface dirigé vers une gouttière disposée en contrepente, a été recueilli dans un contenant (fût en PVC) d'une capacité de 280 L (vue de l'installation à l'**Annexe 4**).

Une bande tampon de 0.5 m de profondeur tout autour de chaque parcelle servait : (i) à réduire l'«effet de bordure» pouvant entraîner l'exportation croisée des sédiments entre des parcelles contiguës suite au «splash» des gouttes de pluie (Lal, 1988) et (ii) d'aire de collecte des échantillons de sols avant la simulation de pluie.

3.3 Prise en charge des changements climatiques

3.3.1 Travail préliminaire du sol

Préalablement au début de l'expérimentation, l'ensemble du site était sous couvert de prairie.

À l'été 2018, trois des six blocs (#1, #4, #5, sélectionnés de façon aléatoire) ont subi cinq séries de passages de rotoculteur visant à provoquer une déstructuration du sol afin de reproduire l'état structural du sol correspondant aux conditions sous le climat futur (Cdt.Fu.). Les trois autres blocs (#2, #3, #6) reproduisant l'état structural du sol sous le climat actuel (Cdt.Ac.) n'ont pas été travaillés.

En juin 2019, quatre (4) parcelles par bloc (excepté la prairie-P et le sol nu-S-Nu) ont reçu du soya (culture principale) en ligne à 30 pouces d'écartement et du Trèfle (culture de couverture).

Les parcelles de prairie (P) ont été ensemencées de luzerne cultivée à une densité de 20 kg/ha.

Au printemps 2020, deux (2) parcelles secondaires par bloc ont été labourées au chisel (travail réduit du sol) pour la préparation primaire du sol puis ont reçu des passages successifs d'un instrument à disque et du vibroculteur pour l'ameublissement (pulvérisation) du lit de semis dans l'hypothèse de simuler les mêmes conditions qu'un labour de printanier, l'objectif étant de reproduire l'ensemble des modes de travail du sol au cours d'une même saison de culture et d'effectuer des comparaisons.

Courant 2019 et 2020, le contrôle des mauvaises herbes a été assuré par des épandages d'herbicide (Round Up 540 g/L) y compris dans les parcelles de sol nu (S-Nu).

Des averses (faibles pluies) isolées et tardives survenues avant la période des simulations de pluies (**fin août-début septembre 2020**) ont favorisé la réinstallation des mauvaises herbes, ce qui a nécessité des séances de désherbage manuel à la binette biologique (afin de réduire au maximum la perturbation du sol) dans toutes les autres parcelles excluant les prairies (P).

La tonte des prairies et de la culture intercalaire (maintenue à moins de 15 cm de haut) a été complétée tardivement en fin août 2020, immédiatement avant la simulation des pluies (**septembre 2020**) afin de reproduire les conditions de printemps.

3.3.2 Couvert au sol

L'estimation du pourcentage de couvert au sol (variable explicative) dans chacune des 36 parcelles secondaires a été faite au moyen d'un dispositif adapté de la méthode Transects-Quadrats (Laamrani et al., 2017) précédemment utilisé dans un bassin versant agricole au sud-ouest de l'Ontario (Windsor, London, Kitchener, Guelph). L'estimation proprement dite du pourcentage de couvert (ratio de couverture du sol dans une grille du Quadrat) s'est fait selon (Fuchaka, 1993) à l'aide d'un Quadrat (1 m x 1 m) renfermant un réseau de 50 mailles de 10 cm x 20 cm (**Annexe 5**).

3.4 Simulation de pluie

3.4.1 Intensités de pluies cibles

L'intensité de pluie en climat actuel a été déterminée au moyen des courbes Intensité Durée Fréquence (IDF) des trois stations agro météo les plus proches du site ayant un historique représentatif de données de pluies selon Audet et al. (2012) : (i) St Augustin (Lat. 46.73; Long. -71.50; altitude 58 m), (ii) Vallée Jonction (Lat. 46.38; Long. -70.93; altitude 152 m), (iii) St Malachie (Lat. 46.55; Long. -70.82; altitude 221 m).

Ces trois stations quadrillent le site d'étude (Saint-Lambert-de-Lauzon : 115 m d'altitude) au sein d'un polygone d'une altitude moyenne de 143 m.

L'intensité de pluie du site expérimental en climat actuel pour une durée de 30 minutes et d'une récurrence de 1/20 ans (soit $I_{Ac.moy.} 61 \text{ mm.hr}^{-1}$) est une moyenne arithmétique des intensités de pluie des trois stations ci-dessus.

L'intensité de pluie en climat futur de l'ordre de $I_{Fu.moy.} 70 \text{ mm.hr}^{-1}$ (horizon 2040-2050) a été obtenue en appliquant un taux d'accroissement (majoration) de l'ordre de 15% sur la valeur du $I_{Ac.moy.}$ précédemment déterminée (Talbot, 2020). Ce coefficient de majoration est du même ordre de grandeur que le pourcentage d'augmentation moyen (13,8%, période de retour 25 ans) déterminé par Mailhot et al. (2007) dans une analyse du climat régional du Québec.

Les courbes IDF utilisées se trouvent à l'**Annexe 6**.

3.4.2 Conception, construction et calibration du simulateur de pluie, puis simulations de pluies au champ

Conception et construction

Compte tenu des contraintes logistiques (temps, coûts, flexibilité), le principe ayant guidé sa mise au point est la possibilité de simuler un même événement de pluie simultanément sur les six (6) parcelles secondaires d'une même parcelle principale (bloc).

Le simulateur de pluie mis au point, calibré et opéré est une version modulaire et stationnaire permettant de reproduire deux intensités de pluies fixes en fonction du nombre de modules montés en parallèle et mis en opération (5 ou 6 modules).

À défaut d'un standard dans la littérature, les critères de conception utilisés ont été sélectionnés de Meyer et al. (1958) cités dans Michaud (1987), ainsi que de Moore et al. (1983) cités dans Wilson et al. (2014) afin de pouvoir appliquer des pluies (simulées) aux caractéristiques proches de celles d'une pluie naturelle :

- la hauteur des gicleurs (vitesse de chute terminale)
- la pression d'opération (grosseur des gouttes, uniformité de distribution et énergie cinétique)
- le type de gicleur et de buse (débit et diamètre des gouttes)
- l'uniformité de distribution des pluies simulées (coefficient d'uniformité)
- le diamètre de recouvrement au sol (configuration du jet d'arrosage au sol).

Les composantes suivantes ont servi au montage physique du simulateur :

- des cadres triangulaires en bois de 2.0 m de haut servant de support du gicleur-Buse à 1.98 – 2.0 m de haut au-dessus de la parcelle
- des gicleurs de type irrigation, modèle I-WOB2 de Senninger à six déflecteurs (Standard Angle **6 Groove-Gray Small Droplet**)
- des buses de différents diamètres (dont le diamètre de l'orifice de sortie d'eau en millimètre influence directement la grosseur de la gouttelette de pluie)
- 1 vanne de régulation–maintien de pression en aval (valve Raphael équipée d'un pilote mécanique à ajustement manuel)
- 1 Pompe Gorman Rup 4.1 hp Honda (capacité 210 LPM, 60 psi mais variable)
- 2 manomètres à glycérine (0-30 psi)
- des sections de tuyauterie de type flat (2 pouces de diamètre) et rigide (PVC, 1 pouce ¼ de diamètre)
- 1 valve d'arrêt à la sortie de la valve Raphael pour un contrôle supplémentaire
- 1 valve d'arrêt (isolement) d'alimentation de chaque module du simulateur
- 1 Datalogger CR200X (512K) équipé d'un panneau solaire
- divers autres accessoires hydrauliques

Tous les modules ont été construits et assemblés sur place à Saint-Lambert-de-Lauzon.

Calibration

Un test préliminaire de simulation sous hangar avec un seul gicleur et buse dont le montage hydraulique se trouve à l'**Annexe 7** a permis de : (i) valider le diamètre effectif d'arrosage et, les débits délivrés en fonction des pressions d'opération, (ii) présélectionner le type de gicleur et de buse ainsi que (iii) déterminer l'uniformité de distribution.

Dans un second temps, les secteurs d'iso intensités déterminés lors du test préliminaire ont permis de définir la configuration (nombre de modules/gicleurs et équidistance entre modules/gicleurs) requise pour obtenir les intensités de pluies théoriques ciblées ainsi que le coefficient d'uniformité moyen au sein d'un bloc et ce à l'aide du logiciel WinSIPP3 3.2 de Senninger (**Annexe 8**) qui est utilisé en irrigation agricole.

Par la suite, des simulations avec le logiciel EPANET 2.0 (**Annexe 9**) ont permis de valider les aspects de l'hydraulique du simulateur (**Annexe 10**) : (i) diamètres et longueurs des sections de conduites, (ii) débit (demandes aux nœuds-gicleurs : 51.56 LPM), et (iii) plage de pression

optimale à la sortie des gicleurs (9-12 psi) selon le montage (disposition physique) tel que projeté sur le site (**Annexe 11**)

Enfin, la variation de la pression d'opération au cours de la dernière série des tests préliminaires s'est faite en champs, mais hors parcelles sous pluies simulées de 15 minutes et selon les deux configurations (5 et 6 modules) avec un seul type de gicleur I-WOB2 Standard Angle 6 Groove-Grey Small Droplet équipé de la Buse#26 (13/32 pouces, 10.32 mm), puis la Buse#22 (11/32 pouces, 8.73 mm). Ceci a servi de validation finale des trois principales variables d'opération à savoir la **pression**, l'**intensité** moyenne de pluie, le **coefficient d'uniformité moyen** pour chaque parcelle secondaire et par bloc (parcelle principale) (**Annexe 12**).

Coefficient d'uniformité des pluies simulées

Le coefficient d'uniformité (CU) de chaque pluie simulée a été estimé suivant :

Équation 3.1 : Coefficient d'uniformité (Christiansen, 1942, cité dans Wilson et al., 2014)

$$CU = 100 * \left(1 - \frac{[\sum(x-x_{moy})]}{N. x_{moy}} \right)$$

En considérant l'intensité de pluie moyenne théorique de 69.54 mm.hr⁻¹ (S, 25.37 mm.hr⁻¹) (tests préliminaires, **Annexe 7** et **Annexe 8**) et un écart absolu de +/-5 mm.hr⁻¹, le logiciel GPower a permis d'estimer un nombre échantillon de 150 pluviomètres par bloc, soit 25 pluviomètres par parcelle secondaire, à disposer systématiquement en grille de 1.0 m x 0.5 m tel qu'illustrés à l'**Annexe 13** (plan de disposition des pluviomètres).

3.4.3 Simulation de pluies (tests au champ), collecte des échantillons, conservation et analyses de laboratoire

Les simulations de pluies d'une durée de 30 minutes ont été menées de fin août 2020 au début septembre 2020 sous des conditions ensoleillées et en absence de vent; ce qui annulait l'exigence d'installer une toile brise vent tout autour du bloc au moment de la simulation. Les échantillons de sol et de ruissellement de surface issus de chacune des parcelles secondaires ont été collectés du 30 août au 04 septembre 2020, conservés et analysés selon Carter et al.

(2007) avec quelques adaptations selon les protocoles de l'IRDA. Des échantillons de sols ont été collectés avant chaque simulation de pluie afin de caractériser l'état de référence du sol en place.

Les échantillons de ruissellement de surface (mélange surnageant et sédiments érodés) d'un volume de 500 mL – 1 000 mL étaient prélevés du contenant principal (PVC de 280 L) après homogénéisation (1-2 minutes) au moyen d'une pompe submersible installée au fond du contenant.

Le volume total du ruissellement de surface de chaque parcelle secondaire a été obtenu à partir d'une relation de calibration hauteur - volume du contenant en PVC préalablement établie. Un échantillon de sol de surface (maximum 10 cm) était collecté dans le périmètre de chaque parcelle secondaire pour l'analyse de la stabilité structurale. Pour ce qui est de l'analyse de la masse volumique apparente (MVA), un cylindre en acier de volume standard (178.128 cm³) enfoncé jusqu'à ras bord servait à collecter les échantillons de chaque parcelle. Un échantillon de sol entier (VRAC) collecté à la pelle pour déterminer la texture et les autres propriétés du sol a permis de faire des analyses de : (i) la charge ionique complète, (ii) MO, (iii) taux d'humidité initiale ainsi que (iv) la granulométrie (des sables très grossiers aux argiles). Le ruissellement collecté a servi à la quantification des taux d'érosion (exportation de sédiments-MES). Tous les échantillons ont été conservés en chambre froide ($\approx 4^{\circ}\text{C}$) à l'IRDA à Sainte-Foy (Québec). Le résumé des protocoles des analyses effectuées se trouve à l'Annexe 14.

Une fraction supplémentaire du même échantillon de ruissellement de surface (érodats et surnageant) a servi à l'analyse de la granulométrie fine (argiles, limons, sables) des matières exportées afin d'apprécier le processus sélectif de l'érosion au moyen d'un compteur de particules (Granulomètre au Laser de l'INRS-ETE : Scattering Particle Size Distribution Analyser HORIBA LA-950 V2). Les étapes du protocole d'analyse se trouvent à l'Annexe 15. Quelques analyses en duplicata sur les mêmes échantillons, mais traités à l'hexametaphosphate de sodium 10% comme solution d'hydratation, ont été complétées aux fins de comparaison.

3.5 Analyses statistiques

Le plan en parcelles partagées («split-plot design») mis en place comporte deux niveaux de randomisation :

- deux intensités de pluies (I, mm.hr⁻¹) attribués de façon complètement aléatoire dans les parcelles principales (blocs),
- six (6) traitements (systèmes culturels) assignés de façon complètement aléatoire dans les parcelles secondaires à l'intérieur de chaque parcelle principale (bloc).

Le facteur intensité de pluie a été considéré comme une variable catégorielle à deux niveaux pour l'ANOVA puis comme covariable dans un modèle d'ANCOVA compte tenu d'une part de la variabilité naturelle de la pluie entre les deux catégories de blocs (I, climat actuel et I, climat futur) et d'autre part au sein d'un même bloc (uniformité/CUC). Au final le degrés de liberté (ddl) du protocole expérimental est de 35. Le Tableau ci-dessus fait la synthèse du plan et des effets :

Tableau 3.1: Description des effets pour l'ANOVA

Effets	ddl	Type d'effets
Intensité de pluie	1	fixe
Répétitions (Blocs) * Intensité de pluie (erreur A)	4	aléatoire
Traitement	5	fixe
Intensité * Traitement	5	fixe
Erreur expérimentale (erreur B)	20	aléatoire
Total	35	

Les Logiciels SAS (SAS Institute), JMP Pro 15 (SAS Institute) et Microsoft Excel 2019 ont été utilisés pour l'essentiel des analyses de différence des moyennes (comparaison multiple) : (i) ANOVA standard, (ii) ANCOVA avec SAS (Proc.Mixed) et (iii) ANCOVA avec JMP Pro15 (Moindre Carré Standard).

Enfin, les tests de comparaisons multiples des moyennes de Tukey Kramer ont permis de vérifier au préalable la significativité de la différence des moyennes au moyen des tests de Fisher (F) ou de Student (t) selon le cas.

L'analyse du degré de relation entre variables (relation prédictive entre la variable indépendante/I et les variables réponses ou d'intérêt) a été complétée par des régressions et corrélations avec Microsoft Excel et JMP Pro 15. Préalablement à toutes ces analyses, la normalité (homogénéité statistique) de la distribution des fréquences des intensités de chacune des deux pluies (61.8

mm.hr⁻¹ et 71.1 mm.hr⁻¹) a été vérifiée (test de Kolmogorov-Smirnov) compte tenu de son intérêt comme covariable.

3.6 Calcul des facteurs K et C

Les équations de Wischmeier et Smith ont servi à l'estimation de l'érodabilité (au nomographe) du sol en place de façon individuelle dans chaque parcelle. L'érodabilité mesurée ou effective quant à elle a été estimée suivant la relation ci-dessous déduite de la USLE :

Équation 3.2 : Érodabilité effective ou mesurée sur la parcelle de référence

$$K_{\text{mesuré.Bloc}(i)} = \left[\frac{A(i)(S - Nu)}{EI30 \max(S - Nu) \times LS(S - Nu)} \right]$$

$$(C \cdot P = 1)$$

Où $K_{\text{mesuré.Bloc}(i)}$ correspond à l'érodabilité de la parcelle de sol nue (S-Nu) considérée comme parcelle de référence dans chaque bloc(i) bien que n'ayant pas été travaillée régulièrement au sens strict d'une parcelle de référence standard.

Une fois l'érodabilité de la parcelle de S-Nu (référence) ainsi calculée et en première approximation correspondant à l'érodabilité moyenne du bloc (équation ci-dessus), la version révisée de l'équation universelle des pertes de sol adaptée au contexte du Canada (RUSLEFAC) a été utilisée pour l'estimation de l'indice cultural (C) de chaque système cultural selon :

Équation 3.3 : Indice cultural (parcelles individuelles-secondaires)

$$C(Trt(i)) = \left[\frac{A(i)(Trt(i))}{EI30 \max(i) (Trt(i)) \times K_{\text{mesuré.Bloc}(i)} \times LS(Trt(i))} \right]$$

Où le $LS_{(Trt(i))}$ dans la formule ci-dessus apparaît comme un facteur de pondération pour tenir compte de la variation de la topographie et ce pour $P = 1$.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Calibration du simulateur et caractéristiques des pluies simulées

Les paramètres du simulateur introduits au **Tableau 4.1** ont permis de reproduire les intensités moyennes de pluies attendues dans les parcelles secondaires (traitements ou systèmes culturaux) et dans les parcelles principales (blocs) ainsi que les CU correspondants :

Tableau 4.1: Paramètres d'opération du simulateur de pluie

Éléments	Description
Gicleur (ou diffuseur)	i-WOB2 de Senninger Standard Angle 6 Groove-Grey Small Droplet
Buse (UPS)	# 22, diamètre orifice 11/32 pouces (8.73 mm)
Pompe (Gorman-Rupp 6.5 hp honda) :	
pression (psi)	≥ 50-60 psi à la sortie de la pompe
Régulateur de pression (psi) :	
(Reg. modèle Raphael)	Pression à la sortie (aval) du Régulateur ≈ 9 psi (maximum)
Configuration 5 modules	5 Gicleurs à 4.0 m d'équidistance centre à centre (I : 61 mm.h ⁻¹)
Configuration 6 modules	6 Gicleurs à 3.5 m d'équidistance centre à centre (I : 71 mm.h ⁻¹)
Conduite refoulement pompe	2 pouces de diamètre (conduite flexible PVC type FLAT)
Conduite nourrice des Gicleurs	1 pouce de diamètre (sections flexibles transparentes + rigides PVC gris)
Hauteur de la pluie	1.98 m - 2.00 m

Les résultats des intensités de pluies moyennes par parcelle secondaire et par bloc des deux (2) pluies simulées sont consignés dans le **Tableau 4.2** ci-dessous :

Tableau 4.2 : Intensités moyennes de pluies (mm.hr⁻¹) par parcelle secondaire au sein d'une parcelle principale (bloc)

I-WOB2 Standard Angle 6 Groove-Grey Small Droplet				
Buse #22, 9 PSI	5 Gicleurs		6 Gicleurs	
# Parcelle	Intensité (mm.hr⁻¹)	C.U (%)	Intensité (mm.hr⁻¹)	C.U (%)
1	57.67	81.79	62.11	81.32
2	74.05	83.46	68.42	79.48
3	62.21	81.13	76.46	76.59
4	59.27	84.69	76.64	75.04
5	64.71	81.25	82.52	76.75
6	52.97	61.81	60.36	78.48
Moyenne	61.8	79.0	71.1	77.9
Ecart-type	7.2	8.5	8.9	2.3

Les intensités moyennes de pluies obtenues avec leurs intervalles de confiance autour de la moyenne à 95% sont de :

- climat actuel (Cdt.Ac.) :

$$I_{\text{moy.}} = 61.8 \text{ mm.hr}^{-1} (58.5 \text{ mm.hr}^{-1} \leq 61.8 \text{ mm.hr}^{-1} \leq 65.1 \text{ mm.hr}^{-1}; s=7.2 \text{ mm.hr}^{-1})$$

- climat futur (Cdt.Fu.) :

$$I_{\text{moy.}} = 71.1 \text{ mm.hr}^{-1} (67.0 \text{ mm.hr}^{-1} \leq 71.1 \text{ mm.hr}^{-1} \leq 75.2 \text{ mm.hr}^{-1}; s = 8.9 \text{ mm.hr}^{-1})$$

L'énergie cinétique ainsi que l'érosivité des deux pluies simulées sont présentées dans le **Tableau 4.3** ci-dessous :

Tableau 4.3 : Énergie cinétique (E_{ci}) et érosivité (R) des deux pluies simulées

Caractéristiques	I (mm.hr ⁻¹)	E_{ci} (MJ.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)	h (mm)	E_{tot} ($E_{ci} \times h$) (MJ.ha ⁻¹)	R ($E_{Tot} \times I_{30,max}$) (MJ.mm.ha ⁻¹ .hr ⁻¹)
Pluie simulée/climat actuel					
# Parcelle					
1	57.67	0.273	28.84	7.87	453.47
2	74.05	0.282	37.03	10.44	773.56
3	62.21	0.276	31.11	8.59	533.19
4	59.27	0.274	29.64	8.12	480.77
5	64.71	0.277	32.36	8.96	579.95
6	52.97	0.269	26.49	7.13	377.96
Moyenne.	61.81 (a)	0.275	30.91	8.52	533.15 (a)
E.T	7.21	0.004	3.61	1.13	136.50
Pluie simulée/climat futur					
# Parcelle					
1	62.11	0.275	31.06	8.54	531.28
2	68.42	0.279	34.21	9.55	653.46
3	76.46	0.283	38.23	10.82	828.31
4	76.64	0.283	38.32	10.85	832.57
5	82.52	0.286	41.26	11.80	974.59
6	60.36	0.274	30.18	8.27	499.88
Moyenne	71.09 (b)	0.281	35.54	9.97	720.02 (b)
E.T	8.87	0.005	4.43	1.41	188.53

(Les lettres a et b dans le Tableau 4.3 traduisent une différence significative des deux moyennes au seuil 5%)

Équation 4.1: Énergie cinétique d'un évènement de pluie (Wischmeier et al., 1958)

$$E_{ci} = 0.1190 + 0.0379 \cdot \ln I(i)$$

Équation 4.2 : Énergie totale d'une pluie (Lagacé, 2016)

$$E_{tot} = E_{ci} \times h(i)$$

Équation 4.3 : Érosivité de la pluie (Lagacé, 2016)

$$R = EI_{30max} = I(i) \times E_{tot}(i).$$

Où $I_{(i)}$ désigne l'intensité moyenne de pluie dans une parcelle secondaire

$h_{(i)}$ désigne la hauteur moyenne de pluie reçue dans la parcelle secondaire

$E_{\text{tot.}}$ est l'énergie totale de pluie reçue durant l'évènement de pluie (simulation)

R est l'érosivité de la pluie.

Les tests de différence des moyennes (α 5%) sur l'intensité moyenne de pluie reçue et l'érosivité moyenne correspondante tel que présentées dans le **Tableau 4.3** ci-dessus montrent :

- une absence de différence significative des valeurs d'érosivités moyennes entre les différentes parcelles aussi bien en climat actuel (Cdt.Ac. : p-value 0.720) qu'en climat futur (Cdt.Fu. : p-value 0.331), ce qui confirme,
- l'absence de l'effet position des parcelles secondaires à l'intérieur du bloc dans les mêmes conditions de climat,
- une différence significative (p-value < 0.010) entre les deux intensités moyennes de pluie (climat actuel, $I_{\text{moy.}} = 61.8 \text{ mm.hr}^{-1(a)}$; climat futur, $I_{\text{moy.}} = 71.1 \text{ mm.hr}^{-1(b)}$) et par conséquent,
- une différence significative (p-value 0.001) entre les érosivités moyennes des deux pluies ($R_{\text{moy.}}$ sous climat actuel, $R_{\text{moy.}}$ sous climat futur) ainsi : l'érosivité moyenne de la pluie sous climat actuel ($E.I_{30\text{max}} = 533.15 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{hr}^{-1(a)}$) est statistiquement différente de celle de la pluie sous climat futur ($E.I_{30\text{max}} = 720.02 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{hr}^{-1(b)}$).

Tel qu'attendu, les deux pluies simulées sont significativement différentes et statistiquement identiques d'une parcelle secondaire à une autre à l'intérieur d'un même bloc tel que le démontre l'analyse de la structure des deux pluies simulées à l'**Annexe 16**.

Le diamètre D_{50} théorique des gouttes de pluies a été estimé à partir d'une relation Intensité-Diamètre préétablie exprimé par la relation suivante de Laws et al. (1943) et de Marshall et al. (1948) : $D_{50} = \alpha . I^{\beta}$, (I en mm.hr^{-1}),

où 0.92 et 0.21 sont les valeurs de α et de β respectivement selon le contexte d'Ottawa (Canada) tel que déterminés par Atlas et al. (1953) cités dans Kathiravelu et al. (2014).

Les diamètres théoriques moyens D_{50} des gouttes des pluies simulées avec leurs intervalles de confiance à 95% (détail des calculs est à l'**Annexe 17**) sont de :

- $2.14 \text{ mm} \leq 2.19 (D_{50\text{moy.}}) \leq 2.23 \text{ mm}$ pour la pluie du climat actuel ($I_{\text{moy.}} 61.81 \text{ mm.hr}^{-1}$)
- $2.20 \text{ mm} \leq 2.25 (D_{50\text{moy.}}) \leq 2.30 \text{ mm}$ pour la pluie du climat futur ($I_{\text{moy.}} 71.09 \text{ mm.hr}^{-1}$) (horizon 2050).

Le $D_{50\text{moy.}}$ (calculé) du simulateur de Saint-Lambert-de-Lauzon est similaire à celui d'une pluie naturelle (**$D_{50} : 2.0 \text{ mm} - 2.5 \text{ mm}$**) tel que rapporté au Brésil par Sousa et al. (2017) sous une pluie simulée d'intensité variant de 40 mm.hr^{-1} à 182 mm.hr^{-1} (CU de 70%).

Ce D_{50} du simulateur croît (non significativement) avec l'intensité de la pluie simulée, mais reste compris dans l'intervalle du diamètre médian ($D_{\text{méd}}$) d'une pluie naturelle ($D_{\text{méd.}} : 1 \text{ mm} - 3 \text{ mm}$) selon Meyer (1988) cité dans Lal (1988).

Aussi, le D_{50} moyen ($2.19 \text{ mm} - 2.25 \text{ mm}$) est légèrement supérieur à celui obtenu du simulateur développé par Michaud (1987) ($D_{50} 2.06 \text{ mm}$) équipé d'un modèle de buse différent (MP156M, 3/8 Bete Fog Nozzle Inc) d'orifice de sortie (9.5 mm) presque identique à celle de la buse du simulateur de Saint-Lambert-de-Lauzon (8.73 mm) ; tous opérés à des pressions presque similaires; 8.12 psi pour celui de Michaud (1987) et 9 psi pour celui de Saint-Lambert-de-Lauzon.

Ce diamètre est également similaire aux D_{50} (2.12 mm) tel qu'obtenus en Australie en 2005 avec la Buse de modèle Veejet 80100, et au Brésil ($D_{50} = 2.1 \text{ mm}$) en 2011 avec la Buse de modèle 1/2SSHH40, diamètres déterminés dans les deux cas par la méthode des granules de farine (Flour Pellet Method) (Kathiravelu et al., 2014).

Enfin, le D_{50} moyen des deux pluies simulées à Saint-Lambert-de-Lauzon est similaire aux résultats de Kincaid *et al.* (1996) (D_{50} de 2.34 mm) ayant opéré avec le même modèle de gicleur (Senninger Wobbler 6 Groove) sous une pression de $69 \text{ kpa}/10 \text{ psi}$ similaire à celle du simulateur de Saint-Lambert-de-Lauzon (9 psi).

Ces résultats confirment l'estimation théorique du D_{50} moyen des pluies du simulateur utilisé à Saint-Lambert-de-Lauzon.

Les Coefficients d'Uniformité (CU) moyens à la grandeur du bloc (moyenne des moyennes parcellaires) obtenus des deux pluies simulées sont de 79% ($I_{\text{moy.Ac.}} 61 \text{ mm.hr}^{-1}$) et 78% ($I_{\text{moy.Fu.}} 71 \text{ mm.hr}^{-1}$). Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Wilson *et al.* (2014) dont les conditions de tests se rapprochent de celles de Saint-Lambert-de-Lauzon (CU de 76%, 65% et de 62% pour des intensités de pluies respectives de 62 mm.hr^{-1} , 43 mm.hr^{-1} et 32 mm.hr^{-1}).

L'énergie cinétique moyenne estimée pour chacune des deux pluies simulées à savoir $0.275 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ($I_{\text{moy.}} 61.81 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$) et $0.281 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ($I_{\text{moy.}} 71.09 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$) est comparable à celle du simulateur de Michaud (1987) $0.201 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ qui était équipé de buses de type Bete-MP156 M en acier avec orifice de sortie de 9.5 mm placée à 2.15 m au-dessus des parcelles de 2 m x 2 m; à toute fin utile comparable à la hauteur de pluie de celui de Saint-Lambert-de-Lauzon (2.00 – 1.98 m).

L'érosivité moyenne de la pluie sous climat actuel ($E\cdot I_{30\text{max}} = 533.15 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ et $I_{\text{moy.}} 61.81 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$) tel qu'obtenue est presque la moitié de l'érosivité annuelle précédemment déterminée par Madramootoo (1988) dans le contexte du Québec, conditions hivernales non prises en compte (voir cartes des lignes d'iso intensités à l' **Annexe 18**). Cette érosivité moyenne représente également la moitié des valeurs annuelles obtenues sous des pluies naturelles à Guelph (sud Ontario : $R = 1260 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) tel que rapporté par (Wall et al., 1988).

L'érosivité des pluies simulées à Saint-Lambert-de-Lauzon est similaire à celle de la pluie simulée à Lennoxville (Québec) par Salehi *et al.* (1993) ($R = 566 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$, $I = 63.5 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ pendant 30 min de simulation).

Les graphiques de projection des courbes d'iso-intensité des deux pluies à la grandeur du bloc (Figures : A.16.2 et A.16.3) ainsi que les analyses d'homogénéité de la distribution des fréquences des intensités moyennes de pluies reçues dans les mêmes conditions se trouvent à l'**Annexe 16**.

4.2 État des parcelles au moment des simulations de pluie

Cette section présente et analyse l'état de référence du sol en place dans les parcelles avant les simulations de pluies suite au travail préliminaire du sol entrepris dans le but de reproduire deux états structuraux différents du sol sur le site (état structural correspondant au climat actuel et état structural attendu sous climat futur). Le **Tableau 4.4** ci-dessous présente des tendances en termes des similitudes et différences intra blocs (effet traitement) et inter blocs (effet condition) afin de confirmer ou d'infirmer la prise en compte de l'aspect déstructuration du sol en place dans la suite de cette étude. Les échantillons de sol entier (VRAC) ont été collectés du 30-08-2020 au 04-09-2020, le résumé du protocole d'analyse se trouve à l'Annexe 14.

Tableau 4.4 : Variation des conditions initiales dans les blocs à l'issu des pré-traitements appliqués

Sol en place →	Hum. (%)	M.O (%)	MVA (g.cm ⁻³)	DMP (mm)	N-t. (%)	C/N	P-M ₃ (mg.kg ⁻¹)		
Blocs sous climat actuel (Cdt.Ac.)									
Traitements (Syst.cultureux)	(**)								
P	24.50	3.70	1.37	2.41	a	0.18	11.33	94.90	
Ch-PLC	25.43	3.64	1.43	1.36	b	0.16	11.83	100.60	
Ch-SPLC	25.37	3.21	1.39	1.56	b	0.14	11.73	92.97	
SD-PLC	24.53	3.57	1.38	2.46	a	0.15	11.60	109.83	
SD-SPLC	27.07	3.65	1.43	2.67	a	0.17	11.52	90.10	
S-Nu	23.63	3.13	1.49	2.10	a b	0.14	11.46	82.77	
Moy. Blocs	25.09 (A)	3.48 (B)	1.42 (C)	2.09 (D)		0.16 (E)	11.58 (F)	95.19 (G)	
E.T. Blocs	1.07	0.25	0.05	0.53		0.02	0.18	9.26	
C.V. Blocs	4.27	7.09	3.25	25.14		10.38	1.58	9.73	
Blocs sous climat futur (Cdt.Fu.)									
Traitements (Syst.cultureux)	(**)								
P	26.77	3.78	1.41	2.77	a b	0.17	11.07	41.58	
Ch-PLC	26.13	3.58	1.41	1.71		c	0.17	11.20	97.87
Ch-SPLC	25.90	3.57	1.39	1.55		<u>c</u>	0.16	11.13	105.03
SD-PLC	24.73	3.84	1.50	2.52	a b	0.18	11.20	94.77	
SD-SPLC	25.53	3.93	1.40	3.21	<u>a</u>	0.19	10.87	102.77	
S-Nu	26.10	3.53	1.42	2.41	a b	0.17	10.93	97.37	
Moy. Blocs	25.86 (A)	3.71 (B)	1.42 (C)	2.36 (D)		0.17 (E)	11.07 (F)	89.90 (G)	
E.T Blocs	0.68	0.17	0.04	0.63		0.01	0.14	23.97	
C.V Blocs	2.64	4.49	2.83	26.78		5.23	1.26	26.66	

(**) : significativité à 0.05 de l'effet Traitement au sein d'un même niveau de climat (pluies);

(a,b,c) : les traitements partageant la même lettre (a, b, c) au sein d'un même niveau de climat (pluies) démontrent une absence de différence significative à 0.05;

(A, B, C, D, E, F, G) : les lettres en majuscule désignent la comparaison statistique des deux moyennes (les deux niveaux de climat-pluies), indépendamment des Traitements (effet condition), ceci pour chaque paramètre de caractérisation de l'état du sol en place.

Le **Tableau 4.4** ci-dessus montre une absence de significativité (A, B, C, E, F, G) de l'effet condition (Cdt.Ac. - Cdt.Fu.) et de l'effet système cultural (traitement) sur l'humidité du sol, le pourcentage de matière organique (MO), la densité (MVA), l'azote total (N_t), le ratio C/N ainsi que sur le phosphore Mehlich 3 (P-M₃) dans le sol en place.

L'effet condition n'est pas plus significatif (D) sur l'évolution du diamètre moyen des particules (DMP) : c'est-à-dire, le DMP des agrégats issus des blocs sous Cdt.Ac. (2.09 mm, S 0.53 mm) n'est pas significativement différent (p-value 0.171) de celui des agrégats issus des blocs sous Cdt.Fu. (2.36 mm, S 0.63 mm).

Les graphiques à l'**Annexe 19** mettent en évidence la tendance à la restructuration progressive du sol ayant eu cours dans les blocs sous les conditions de climat futur (B#4, B#5, B#1) après les interventions de déstructuration antérieurement imposées lors des labours profonds au rotoculteur (A).

Cependant, sous les deux conditions climatiques, l'on observe une différence significative (**) du DMP des agrégats entre certains systèmes culturels (p-value Cdt.Ac. 0.040; et p-value Cdt.Fu. 0.003), ce qui suggère un examen approfondi de ce paramètre.

Indépendamment des conditions (toutes les conditions prises en compte), il y a une différence significative du DMP des agrégats entre les différents systèmes culturels (p-value < 0.0001, α 5%) (**Tableau 4.4**).

En effet, le DMP des agrégats des parcelles labourées au chisel (avec ou sans plante de couverture) est significativement différents (b, c) et plus bas que le DMP des agrégats issus des autres systèmes culturels à l'exception de la parcelle de S-Nu (Cdt.Ac.) (test Tukey-Kramer à l'**Annexe 19, C**).

Selon le niveau de climat, la différence du DMP entre les parcelles labourées au chisel (Ch-SPLC et Ch-PLC) et celles sous semis direct (SD-SPLC et SD-PLC) sous Cdt.Ac. d'une part, puis uniquement, entre les systèmes Ch-SPLC et SD-SPLC sous Cdt.Fu. met en évidence l'effet d'ameublissement du sol causé par le labour au chisel.

Dans les blocs sous climat futur (Cdt.Fu), l'association de plante intercalaire (couverture) augmente de 10% le DMP sous le labour au chisel (1.55 mm à 1.71 mm), alors que cette amélioration est de 27% sous le semis direct (2.52 mm à 3.21 mm). Cependant, cette tendance à l'augmentation dans les deux cas est statistiquement non significative : l'effet n'est donc pas significatif.

Sous climat actuel (Cdt.Ac), il y a absence de différence significative du DMP des agrégats entre les deux options du labour superficiel (Ch-PLC et Ch-SPLC : a) d'une part et entre les deux options du semis direct (SD-PLC et SD-SPLC : b) d'autre part, ce qui fait dire qu'il n'y a pas eu d'effet plantes de couverture sur le niveau d'agrégation du sol dans les conditions de Saint-Lambert-de-Lauzon. En somme, pour le climat actuel (Cdt.Ac), il n'y a pas d'effet plante de couverture, mais plutôt l'effet travail du sol. Pour le climat futur (Cdt.Fu), la seule différence est observée entre le chisel et le semis direct, les DMP aux extrêmes étant observés entre le Ch-SPLC (1.55 mm) et le SD-SPLC (3.21 mm).

Toutefois, le DMP des agrégats issus des deux conditions (climats) est resté > 2 mm (seuil de stabilité d'un sol), ce qui fait dire que l'ensemble du site est resté dans un état structural stable (Le Bissonnais et al., 1995, cités dans M'hamed, 2018) ceci malgré les différents prétraitements mis en place dans le but de reproduire deux états structuraux différents du sol censé refléter ou

correspondre à l'état structural du sol sous les conditions du climat actuel d'une part et à l'état structural du sol sous les conditions du climat futur d'autre part.

En somme, le travail réduit du sol (chisel/Ch) a favorisé la désagrégation («pulvérisation») du sol en réduisant la proportion des macro-agrégats (%ASE > 1 mm : 36% seulement) au profit des micro- et méso-agrégats (jusqu'à 64%) (courbe cumulative à l'**Annexe 20, (A)**). Cet état ameubli du sol le rend plus vulnérable à l'érosion hydrique subséquente.

Pour ce qui est de la texture du sol en place, le diagramme de synthèse à l'**Annexe 20 (B)**, montre que l'ensemble des 36 parcelles se regroupent dans deux états texturaux : loam et loam sableux.

La répartition des différentes fractions (sable, limon, argile) démontre l'homogénéité du site : absence de différence significative (a, b, c selon les Tableaux à l'**Annexe 20 (C)**) dans la répartition des pourcentages des fractions au niveau des deux groupes de blocs (blocs des Cdt.Fu. et les blocs des Cdt.Ac. : effet conditions) de même qu'entre les différents systèmes culturaux au sein des mêmes conditions (effet traitement) (lettres a, b, c).

Malgré la co-présence des deux groupes texturaux (loam et loam sableux), l'on peut conclure à l'homogénéité de l'ensemble du site (parcelles principales/blocs et secondaires).

L'état textural complet du site ainsi que la micro-texture du sol en place (l'ensemble des 36 parcelles au sein des 6 blocs) présentée selon les pourcentages des fractions fines (≤ 2 mm) sont résumés dans le Tableau 4.5 ci-dessous : l'état textural détaillé du site montre que les **sables moyens** (21.0%) et les **limons** (28.1%) constituent les fractions majoritaires.

Tableau 4.5 : État textural complet et détaillé par classes des fractions < 2 mm (36 parcelles-6 blocs)

Agrégats	Ventilation des fractions			Statistiques fractions totales (Argiles, Limons, Sables) en %						
	Classes Diam. (mm)	(%)	% cummulés	Moy.	Var.	E.T	C.V	Méd.	Max.	Min.
Argile (A)	≤ 0.002	17.67	17.67	17.67	11.20	3.35	18.94	17.00	25.00	12.00
Limon (L)	0.002-0.05	28.11	45.78	28.11	94.96	9.74	34.66	28.00	48.00	11.00
Sable très fin (STF)	0.05-0.10	7.72	53.50							
Sable fin (SF)	0.10-0.25	16.36	69.86							
Sable moyen (SM)	0.25-0.50	21.00	90.86	54.22	158.46	12.59	23.22	54.50	76.00	31.00
Sable grossier (SG)	0.50-1.0	6.72	97.58							
Sable très grossier (STG)	1.0-2.0	2.58	100.17							

Noms et classes des diamètres des fractions : tirés de «Le système canadien de classification des sols», 3^{éd}, 2002.

Compte tenu de la tendance exposée ci-dessus : absence de différence significative des DMP moyens, de la MO et de la MVA entre les différents blocs ainsi que l'absence de différence significative de la granulométrie de chaque fraction entre les blocs (Cdt.Ac. et Cdt.Fu.) au sein des deux groupes texturaux, le facteur état du sol n'est donc plus pris en compte dans l'effet condition dans la suite des analyses.

L'état du sol n'ayant pas varié (significativement), cette variable est exclue de l'effet condition et uniquement l'intensité de pluie va désigner l'effet conditions (Cdt. : climat actuel et climat futur) dans la suite de l'analyse.

4.3 Ruissellement et érosion

4.3.1 Niveaux de pluies (climat) en variable catégorielle (Cdt.Ac. et Cdt.Fu.)

Les **Tableau 4.6** et **4.7** résument les variations du ruissellement (L), du coefficient de ruissellement (%) et des pertes de sols (kg.ha^{-1}) liés à l'effet de chaque traitement (système cultural) individuel ainsi qu'aux effets principaux et croisés.

Tableau 4.6 : Ruissellement et pertes de sol, effet des traitements individuels

	Ruissellement (L)		Coeff. Ruissellement (%)		Perte de sol (kg. ha ⁻¹)		
<u>Pluie actuelle (Cdt.Ac.)</u>							
P	181	a b	49	b	300	b	c
Ch-PLC	186	a	62	b	740	a b	
Ch-SPLC	129	a b	44	a b	420	b	c
SD-PLC	78	b	25	a	230		c
SD-SPLC	162	a b	50	b	410	b	c
S-Nu	189	a	63	b	870	a	
Moyenne (écart type)	154 (43)		49 (14)		495 (254)		
<u>Pluie future (Cdt.Fu.)</u>							
P	158	a	42	a	110		c
Ch-PLC	218	a b	65	a b	783	b	
Ch-SPLC	269	b	69	b	1905	a	
SD-PLC	228	a b	66	a b	665	b	
SD-SPLC	258	a b	67	a b	400	b	c
S-Nu	229	a b	69	b	550	b	c
Moyenne (écart type)	227 (39)		63 (10)		733 (617)		
Les lignes (traitements) partageant la même lettre (a, b, c) n'ont aucune différence significative pour chaque variable réponse (L, %, kg.ha⁻¹) et dans les mêmes conditions							

Tableau 4.7 : Ruissellement et pertes de sol, effets principaux et croisés

	Ruissellement (L)	Coeff. Ruissellement (%)	Perte de sol (kg.ha⁻¹)
Pluie actuelle (Cdt.Ac.)	153	49	495
Pluie future (Cdt.Fu.)	226	63	733
Cdt.Fu./Cdt.Ac.	1.48 (****)	1.29 (**)	1.48 (*)
PLC	177	55	605
SPLC	205	58	783
SPLC/PLC	1.16	1.05	1.29
PLC-Cdt.Ac.	132	44	490
SPLC-Cdt.Ac.	146	47	420
[SPLC/PLC] Cdt.Ac.	1.11	1.07	0.86
PLC-Cdt.Fu.	223	65	724
SPLC-Cdt.Fu.	264	68	1151
[SPLC/PLC] Cdt.Fu.	1.18	1.05	1.59
PLC-Cdt.Ac.	132	44	485
PLC-Cdt.Fu.	223	65	724
PLC [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	1.69 (*)	1.48	1.49
SPLC-Cdt.Ac.	146	47	416
SPLC-Cdt.Fu.	264	68	((1362))
SPLC [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	1.81 (****)	1.48 (**)	2.77 (**)
Ch	201	60	963
SD	181	52	426
Ch/SD	1.11	1.15	2.26 (***)
Ch-Cdt.Ac.	158	53	582
SD-Cdt.Ac.	120	38	319
[Ch/SD] Cdt.Ac.	1.32	1.39	1.82 (*)
Ch-Cdt.Fu.	244	70	1344
SD-Cdt.Fu.	243	67	531
[Ch/SD] Cdt.Fu.	1.00	1.04	2.53 (**)
Ch-Cdt.Ac.	158	53	582
Ch-Cdt.Fu.	244	67	1344
Ch [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	1.54 (*)	1.26	2.31 (**)
SD-Cdt.Ac.	120	38	319
SD-Cdt.Fu.	243	67	531
SD [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	2.03 (****)	1.76 (****)	1.66 (*)
Significativité portée sur les ratios par soucis d'allègement du tableau Niveaux de significativité : * 0.1 ; ** 0.05 ; *** 0.01 ; **** < 0.01			

La comparaison des six traitements à l'intérieur de chaque niveau de climat (**Tableau 4.6**) révèle que :

- sous climat actuel (Cdt.Ac.), le SD-PLC est le système cultural le moins érosif.
- comparativement au sol nu (S-Nu), le SD-PLC permet d'atteindre des taux de réduction de 59% (volume de ruissellement), 60% (coefficient de ruissellement) et de 74% (exportations des sols) en Cdt.Ac.
- sous climat futur (Cdt.Fu.), le ruissellement et les pertes de sols associés au labour superficiel au chisel sans plante de couverture (Ch-SPLC) sont significativement plus élevés comparés à tous les autres systèmes culturaux.
- sous climat futur (Cdt.Fu.) et sous Ch-SPLC, une augmentation de 17% du volume de ruissellement par rapport au S-Nu entraîne 3.5 fois plus de terre exportée (1905 kg.ha^{-1} contre 550 kg.ha^{-1}).

Pour ce qui des effets principaux (**Tableau 4.7** : niveaux de climat, plante intercalaire, travail du sol) :

- le volume de ruissellement, le coefficient de ruissellement et les sédiments exportés présentent des accroissements significatifs respectivement de 48% (****), 29% (**) et 48% (*) sous les pluies du climat futur comparativement à celles du climat actuel,
- en considérant les effets principaux de façon individuelle, les pertes de sol associées au mode de travail du sol sont beaucoup plus significatives (Ch/SD : 2,26***) par rapport à celles associées aux niveaux de pluies (Cdt.Fu/Cdt.Ac. : 1.48*) ainsi qu'à celles liées à l'effet de plantes de couverture (SPLC/PLC : 1.29).
 - Cette situation pourrait s'expliquer par la différence significative du DMP des agrégats entre les parcelles sous labour superficiel (Ch-SPLC, Ch-PLC) et les parcelles sous semi direct (SD-SPLC, SD-PLC) (**Tableau 4.4** : lettres a et b ; c et ab) sous les deux conditions (Cdt.Fu. et Cdt.Ac.), démontrant ainsi que le labour au Ch aura contribué à la disponibilité des sédiments par l'ameublissement du sol en place dans les parcelles concernées.
- l'examen de l'efficacité des pratiques de conservation du sol (effet couverture du sol) avec l'évolution du climat (effets croisés); en absence de plante de couverture, la perte de sol est significativement (**) 2.77 fois plus élevée sous la pluie future que sous la pluie actuelle alors que cette augmentation se limite à 49% en présence de plante de couverture. La

même tendance est observée au niveau du labour superficiel au chisel (ratio de 2.31**) comparativement au semi direct (ratio de 1.66).

- l'examen du travail du sol avec l'évolution du climat montre que le labour au chisel cause une augmentation des pertes de sols de 1.82 fois plus élevées comparativement au semi direct en climat actuel, cette augmentation sera encore plus forte (plus de 2.53 fois) sous climat futur.
- les pertes de sol (kg.ha^{-1}) sont systématiquement et significativement plus élevées sous l'interaction travail du sol (Ch, SD) et niveaux de pluies (Cdt.Ac., Cdt.Fu.) ($1.82^* - 2.53^{**}$) comparativement à celles issues de l'effet croisé couvert au sol (PLC, SPLC) et les niveaux de pluies (Cdt.Ac., Cdt.Fu.) ($0.86 - 1.59$).
- néanmoins, l'absence de plante de couverture (SPLC) sous les pluies futures produit le ratio de perte significative de sol le plus élevé (2.77^{**}).
 - L'effet principal du couvert au sol mériterait donc une attention particulière surtout lorsque associé à l'évolution des pluies.

La matrice générale des corrélations montre un lien fort ($r = -0.602$) et de sens opposé entre le pourcentage de couverture du sol (variable explicative) et la perte des sols associée à titre de variable réponse de l'érosion hydrique des sols.

Les données d'érosion montrent que le pourcentage de couverture du sol (résidus culturaux, couvert végétal) est mieux corrélé avec l'érosion spécifique par érosivité de la pluie ($\text{g.m}^{-2}.\text{El}_{30\text{max}}^{-1}$) plutôt qu'avec les autres formes d'expression de l'érosion (t.ha^{-1} , g.m^{-2}).

La forme exponentielle offre le meilleur ajustement selon une équation générale prenant en compte l'ensemble des conditions et des traitements et exprimée suivant un seuil de 30% de pourcentage de couverture du sol comme dans la **Figure 4.1** ci-dessous :

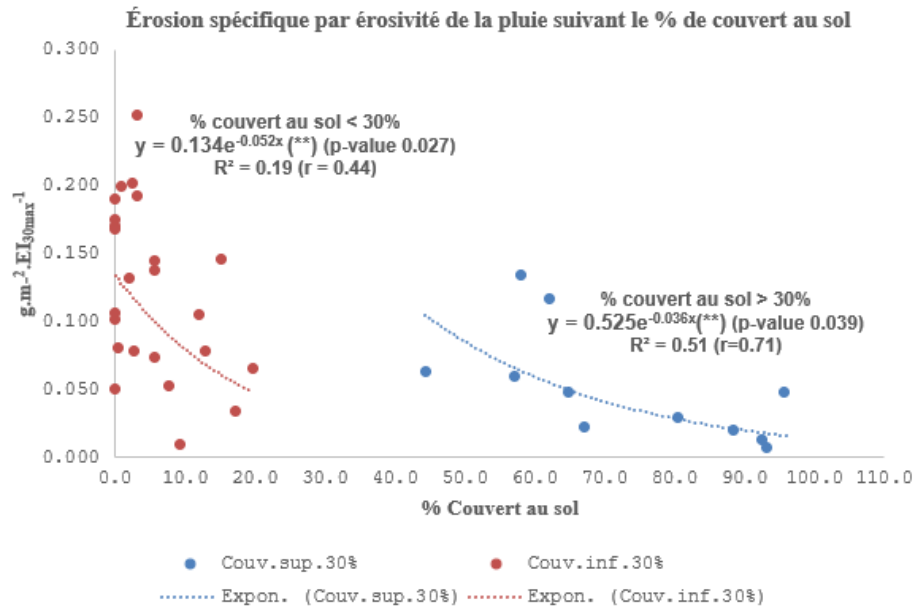


Figure 4.1 : variation de l'érosion spécifique par érosivité suivant le % de couverture au sol

La relation de décroissance exponentielle et significative (**) de l'érosion spécifique par érosivité de la pluie simulée ainsi obtenue renforce l'hypothèse selon laquelle le couvert au sol est un facteur conditionnel et contributif à la réduction de l'érosion hydrique des sols. Roose (1994), Koro et al. (1995) ont mis en évidence cette efficacité du couvert au sol (résidus culturaux maintenus à la surface du sol) sur le contrôle de l'érosion.

Le maintien d'un couvert au sol (plantes de couverture et résidus culturaux) contribue à réduire significativement les exportations de sols indépendamment des niveaux de pluies (climat actuel, climat futur). Cette pratique semble être avantageuse pour la conservation des sols dans un contexte d'intensification des pluies en climat futur. D'autres travaux portant sur l'érosion des sols ont antérieurement établi l'existence d'une telle relation entre le pourcentage de perte de sol et la variation saisonnière du couvert au sol (Lal, 1988).

4.3.2 Niveaux de pluie (climat) en covariable

En considérant l'intensité de pluie en covariable, l'ajustement linéaire des relations donne les prédictions ci-après du volume de ruissellement, du coefficient de ruissellement et des pertes de sol suivant l'évolution continue des niveaux de pluies (climat) (voir les graphiques de régression à l'**Annexe 21**) :

- Volume de ruissellement (L)

Tableau 4.8 : Variation du volume de ruissellement par système cultural suivant la variation de l'intensité de pluie

Vol. ruiss. (n = 35)			
Reg. Vol.ruiss. (Y) et Intensité de pluie (X)	Significativité	r ²	r
Y = -193.05 + 5.74 * X	(****)	0.431	0.657
pente (a)	(****)		
(b)	(**)		
Analyse des Effets (Interaction)			
Traitements (systèmes culturaux)	(**)		
Intensité pluie (I, mm.h ⁻¹)	(****)		
Traitement * Intensité			
Exclusion de l'effet Interaction :			
ANOVA	(****)	r ²	r
		0.646	0.804
Test des effets			
Traitements (systèmes culturaux)	(**)		
Intensité de pluie	(****)		
Équations : vol.ruiss (Y) fonction Intensité de pluie (X)		Volumes estimés	
Impact de la variation	Trts	Vol.ruiss. (L)(Cdt.Ac.)	Vol.ruiss. (L)(Cdt.Fu.)
Y (P) = -353.27 + 7.16 * X	P	89.1	155.6
Y (S-Nu) = -241.05 + 7.16 * X	S-Nu	201.2	267.9
Y (Ch-PLC) = -249.93 + 7.16 * X	Ch-PLC	192.4	259.0
Y (Ch-SPLC) = -289.63 + 7.16 * X	Ch-SPLC	152.7	219.3
Y (SD-PLC) = -313.59 + 7.16 * X	SD-PLC	128.7	195.3
Y (SD-SPLC) = -289.68 + 7.16 * X	SD-SPLC	152.7	219.2
ratio [moy.Cdt.Fu/moy.Cdt.Ac.]		1.44 (**)	
Niveaux de significativité : **** < 0.01; ** 0.05			

L'analyse ci-dessus confirme la différence significative (**) entre les volumes de ruissellement moyens sous pluies actuelles avec ceux obtenus sous pluies futures.

Un lien fort (r = 0.80) est noté entre le système cultural et le volume de ruissellement. La variation de l'intensité de pluie (covariable) explique 64% de la variation du volume de ruissellement (variable réponse) tel qu'observée au sein de chaque système cultural.

Sous climat futur, l'association de plantes de couverture dans le labour superficiel au chisel et dans le semis direct (Ch-PLC, SD-PLC) favorise une réduction de 25% du ruissellement.

Le système cultural SD-PLC est tout aussi efficace que la prairie (P) au regard du faible volume de ruissellement qui y en est issu.

• Coefficient de ruissellement (%)

Tableau 4.9: Variation du coefficient de ruissellement par système cultural suivant la variation de l'intensité de pluie

Coef. ruiss. (n = 35)			
Reg. Coef.ruiss. (Y) et Intensité de pluie (X)	Significativité	r ²	r
Y = - 0.422 + 0.846 * X	(**)	0.146	0.382
pente (a)	(**)		
(b)			
Analyse des Effets (Interaction)			
Traitements (systèmes culturaux)	(**)		
Intensité de pluie (I : mm.h ⁻¹)	(****)		
Traitement * Intensité de pluie			
Exclusion de l'effet Interaction :			
ANOVA	(****)	r ²	r
		0.459	0.678
Test des effets			
Traitements (systèmes culturaux)	(**)		
Intensité de pluie	(****)		
Équations : coef.ruiss. (Y) fonction Intensité de pluie (X)			
Impact de la variation	Trts	Coef.ruiss.(%) (Cdt.Ac.)	Coef.ruiss.(%) (Cdt.Fu)
Y (P) = - 48.40 + 1.28 * X	P	29.4	42.6
Y (S-Nu) = - 14.68 + 1.28 * X	S-Nu	63.1	76.3
Y (Ch-PLC) = - 17.80 + 1.28 * X	Ch-PLC	60.0	73.2
Y (Ch-SPLC) = - 31.52 + 1.28 * X	Ch-SPLC	46.3	59.5
Y (SD-PLC) = - 38.05 + 1.28 * X	SD-PLC	39.8	53.0
Y (SD-SPLC) = - 30.93 + 1.28 * X	SD-SPLC	46.9	60.1
ratio [moy.Cdt.Fu./moy.Cdt.Ac.]		1.28 (*)	
Niveaux de significativité : * 0.1 ; ** 0.05 ; *** 0.01 ; **** < 0.01			

Le coefficient de ruissellement présente une augmentation significative (*) de 28% sous les conditions de pluies futures. C'est-à-dire, les moyennes des coefficients de ruissellement sous climat futur et sous climat actuel sont statistiquement différentes. Le lien entre les deux variables est également fort (r = 0.68), le taux de ruissellement dépend donc en partie (46%) et tout aussi bien des variations de l'intensité de la pluie.

Sous les pluies futures et en association avec les plantes de couverture (PLC), le SD offre une réduction de 28% du coefficient de ruissellement comparativement au labour au chisel (Ch) (de 73% à 53%).

• Perte de sol (kg.ha⁻¹)

Tableau 4.10: Variation des pertes de sol (kg.ha⁻¹) par système cultural suivant la variation de l'intensité de pluie

Érosion kg.ha ⁻¹ (n = 35)			
Reg. perte.sol. kg.ha ⁻¹ (Y) et Intensité de pluie l mm.h ⁻¹ (X)	Significativité	r ²	r
Y = - 332.2 + 14.3 * X	(*)	0.063	0.251
pente (a)	(*)		
(b)			
Analyse des effets (Interaction)			
Traitements	(****)		
Intensité pluie	(***)		
Traitement * Intensité de pluie	(****)		
Exclusion de l'effet Interaction :			
ANOVA	(****)	r ² ajusté	r ajusté
		0.561	0.749
Test des effets			
Traitement	(****)		
Intensité	(****)		
Équations : kg.ha ⁻¹ (Y) fonction Intensité de pluie (X)			
Impact de la variation	Trts	kg.ha ⁻¹ (Cdt.Ac.)	kg.ha ⁻¹ (Cdt.Fu.)
Y (P) = - 1591.4 + 24.4 * I	P	n.d (hors limites)	143.44
Y (S-Nu) = - 825.2 + 24.4 * I	S-Nu	658.32	909.64
Y (Ch-PLC) = - 779.5 + 24.4 * I	Ch-PLC	704.02	955.34
Y (Ch-SPLC) = -504.7 + 24.4 * I	Ch-SPLC	978.82	1230.14
Y (SD-PLC) = - 1144.1 + 24.4 * I	SD-PLC	339.42	590.74
Y (SD-SPLC) = - 1301.6 + 24.4 * I	SD-SPLC	181.92	433.24
ratio [moy.Cdt.Fu/moy.Cdt.Ac.]		1.44	

La variation de l'intensité de pluie et du type de système cultural en présence explique 56 % de la variation des pertes de sol (kg.ha⁻¹). Les pertes de sol présentent une augmentation de près de 44% sous les pluies de climat futur. La comparaison des deux niveaux de climat montre que le labour superficiel au chisel sans plante de couverture (Ch-SPLC) occasionne 2 à 2.8 fois plus de pertes de sol sous pluies futures comparativement aux pratiques alternatives (semis direct avec ou sans plante de couverture, SD- PLC ou SD-SPLC). Ce résultat démontre une fois de plus l'inefficacité d'une telle combinaison de pratique (Ch-SPLC) sous le climat futur.

L'ANOVA sur les données brutes sans effet d'interaction montre que le volume de ruissellement est mieux corrélé avec l'intensification des pluies ($p\text{-value} < 0.0001$, $r = 0.657$) qu'à l'effet ou facteur système cultural. C'est l'inverse pour ce qui est des exportations des sédiments (pertes de sols) qui elles sont mieux corrélées avec l'effet du système cultural ($p\text{-value} 0.007$, $r = 0.638$) qu'aux variations de l'intensité des pluies. L'effet du système cultural étant d'exposer plus ou moins le sol aux précipitations et donc à favoriser l'érosion.

4.3.3 Exportation sélective des fractions de sables, de limons et d'argiles

La fraction des érodats passée à travers le compteur de particules de l'INRS (analyse granulométrique fine) a utilisé un tamisât $< 125\mu\text{m}$. La fraction de sol entier (VRAC) analysée à l'IRDA s'est faite sur une colonne de tamisage aux mailles de classes de taille $\leq 100\mu\text{m}$. En ramenant à 100% les fractions $\leq 0.1\text{ mm}$ du sol en place tel que présentées au **Tableau 4.5**, le **Tableau 4.11** présente les ratios entre la proportion des différentes fractions granulométriques dans les érodats et celle dans le sol d'origine selon les différents systèmes cultureux afin de dégager les niveaux d'enrichissement des érodats.

Tableau 4.11: Exportation sélective des fractions de sol

[Fractions ≤ 0.100 mm dans le sol en place (Vrac)] x (1/0.5350)			
Fractions et % dans échantillon analysé	% Argiles	% Limons	% Sables
	33.01	52.54	14.43
Fractions ≤ 0.125 mm dans les sédiments érodés (érodats)			
Syst.cultureux et climat.	% Argiles Tot.	% Limons Tot.	% Sables Tot.
Cdt.actuelle (Cdt.Ac.)			
P	2.55	85.55	11.90
S-Nu	2.20	83.53	14.33
Sy-Ch-PLC	2.30	85.70	11.93
Sy-Ch-SPLC	2.53	88.40	9.07
Sy-SD-PLC	2.37	85.30	12.47
Sy-SD-SPLC	2.60	86.13	11.27
Moyenne	2.43(a**)	85.77(a*)	11.83(a*)
Ratio enrich. moy.(Cdt.Ac.)	0.07	1.63	0.82
Cdt.Future (Fu.)			
P	2.00	83.87	14.13
S-Nu	1.57	78.70	19.77
Sy-Ch-PLC	1.93	85.40	12.63
Sy-Ch-SPLC	1.67	82.53	15.73
Sy-SD-PLC	2.37	82.30	15.30
Sy-SD-SPLC	2.33	86.83	11.10
Moyenne	1.98(b**)	83.27(b*)	14.78(b*)
Ratio enrich. moy.(Cdt.Fu.)	0.06	1.58	1.02
Sig. Cdt.Fu. versus Cdt.Ac.	(ab)	(ab)	(ab)
Seuil de significativité: (**) 0.05 ; (*) 0.1			

Ces résultats dévoilent que les érodats présentent :

- un appauvrissement à l'extrême en argiles (0.07 – 0.06) et un enrichissement net en limons (1.63 – 1.58). Pour ce qui est des sables, on observe un appauvrissement sous les pluies actuelles (0.82) et une tendance à l'équilibre (neutralité : 1.02) sous les pluies futures ;
- une absence de significativité de l'effet traitement (système cultural) sur l'exportation sélective de chacune des fractions (sables, limons et argiles) au sein des mêmes conditions (Cdt.Ac.; Cdt.Fu.), autrement dit, les systèmes cultureux n'ont pas affecté de manière significative le transport sélectif de chacune des fractions ;

- pour ce qui est de l'effet condition (niveau de pluies ou climat) : le taux d'enrichissement moyen de limons est plus important sous la pluie actuelle et l'inverse est vrai pour le sable. Cela indique qu'une pluie plus faible (climat actuel) entraîne préférentiellement les fractions fines (limons) alors qu'une pluie plus forte (climat futur) transporte un peu plus de sables.
- la très faible proportion des argiles transportées dans les érodâts (0.07 - 0.06) suggère qu'elles seraient restées liées au sol en place.

Cette situation contraste avec le portrait (profil) de mobilisation des argiles couramment rapporté dans la littérature (taux d'enrichissement (TE) des fractions argileuses > 1) tel que rapporté par Neal (1944) au New Jersey, Swanson (1965) au Nebraska, Swanson et al. (1967), Barnett et al. (1978) en Louisiane cités dans Sinukaban (1981). En effet, les données issues des pluies simulées de Saint-Lambert-de-Lauzon sont difficilement comparables avec la littérature puisque l'analyse a concerné uniquement la fraction allant des sables très fins à l'argile.

Cependant, Barnett et al. (1978), Gabriels et al. (1978), Young et al. (1978), Alberts et al. (1980) cités dans Sinukaban (1981) rapportent des TE des érodâts en fractions argileuses < 1 en Louisiane, au Iowa, en Indiana et au Minnesota. Ce qui pour ces auteurs pourrait s'expliquer par la séquestration possible des argiles à l'intérieur des micro-agrégats redéposés sur place à cause de la rugosité du sol (micro-dépressions à la surface de terrain, présence des résidus végétaux de surface) qui peut contribuer à rendre beaucoup plus complexe le mécanisme du ruissellement de surface.

Pour ce qui est du croisement des effets principaux tel qu'illustré au **Tableau 4.12** ci-dessous :

- l'interaction labour superficiel au Ch et niveau de pluie (climat) amplifie l'exportation sélective des sables : sous le labour au Ch, les pluies futures causent une augmentation de 35% de l'enrichissement des sédiments érodés (appauvrissement du sol en place) en fraction de sables,
- l'impact direct des PLC apparaît aléatoire quant à leur contribution au transport sélectif des différentes fractions : l'interaction entre l'effet couvert au sol et l'effet climat montre une tendance à l'augmentation (14% et 32%) des taux d'érosion sélective des sables sous les pluies futures,
- en effet, l'on enregistre un accroissement de 25% du TE (érosion sélective) des sables sous les pluies futures comparativement aux pluies actuelles,

- les données issues des pluies simulées ne permettent pas de parler de transport sélectif des argiles et des limons.

Tableau 4.12 : Effets croisés sur l'exportation sélective des fractions de sol

Taux d'enrichissement et ratios	T.E Argiles	T.E Limons	T.E Sables
Pluie actuelle (Cdt.Ac.)	0.07	1.63	0.82
Pluie future (Cdt.Fu.)	0.06	1.58	1.02
Cdt.Fu./Cdt.Ac.	0.82	0.97	1.25
PLC	0.07	1.61	0.91
SPLC	0.07	1.64	0.82
SPLC/PLC	1.02	1.02	0.90
PLC-Cdt.Ac.	0.07	1.63	0.85
SPLC-Cdt.Ac.	0.08	1.66	0.70
[SPLC/PLC] Cdt.Ac.	1.10	1.02	0.83
PLC-Cdt.Fu.	0.07	1.60	0.97
SPLC-Cdt.Fu.	0.06	1.61	0.93
[SPLC/PLC] Cdt.Fu.	0.93	1.01	0.96
PLC-Cdt.Ac.	0.07	1.63	0.85
PLC-Cdt.Fu.	0.07	1.60	0.97
PLC [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	1.00	0.98	1.14
SPLC-Cdt.Ac.	0.08	1.66	0.70
SPLC-Cdt.Fu.	0.06	1.61	0.93
SPLC [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	0.78	0.97	1.32
Ch	0.06	1.63	0.86
SD	0.07	1.62	0.87
Ch/SD	0.87	1.00	0.98
Ch-Cdt.Ac.	0.07	1.66	0.73
SD-Cdt.Ac.	0.08	1.63	0.82
[Ch/SD] Cdt.Ac.	0.97	1.02	0.88
Ch-Cdt.Fu.	0.05	1.60	0.98
SD-Cdt.Fu.	0.07	1.61	0.91
[Ch/SD] Cdt.Fu.	0.77	0.99	1.07
Ch-Cdt.Ac.	0.07	1.66	0.73
Ch-Cdt.Fu.	0.05	1.60	0.98
Ch [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	0.75	0.96	1.35
SD-Cdt.Ac.	0.08	1.63	0.82
SD-Cdt.Fu.	0.07	1.61	0.91
SD [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	0.95	0.99	1.11

4.4 Perte de nutriments

4.4.1 Niveaux de pluies (climat) en variable catégorielle (Cdt.Ac. et Cdt.Fu.)

Tel qu'il apparaît aux **Tableaux 4.13** et **4.14** ci-dessous,

Sous le climat actuel (Cdt.Ac) :

- les pertes moyennes de MO issues du SD-PLC sont statistiquement différentes (4.7 fois plus bas) de celles issues du S-Nu,
- le SD-PLC au même titre que la prairie (P) réduit significativement (4.33 fois plus bas) les pertes (exportations) en N_t comparativement au S-Nu,
- les exportations (pertes) de phosphore sous forme d'ortho-phosphates ($o-PO_4$) sous le SD-PLC sont 4.5 fois inférieures et statistiquement différentes de celles issues de la P.
- la moyenne des exportations de phosphore sous forme de phosphore biodisponible total ($P_{\text{bio.total}}$) sous le SD-PLC est statistiquement différente de celle issues du S-Nu soit 4.6 fois plus basse.

Sous le climat futur (Cdt.Fu) :

- le Ch-SPLC se distingue de tous les autres systèmes cultureux (traitements) et ceci pour tous les paramètres. Comparé au S-Nu, les pertes sous le Ch-SPLC sont de 3.25, 3.50, 1.34 et 2.79 fois plus importantes et respectivement pour la M.O, l' N_t , les $o-PO_4$ et le $P_{\text{bio.total}}$.

Au sein de chaque niveau de climat (pluies), l'effet traitement (système cultural) est significatif mais de manière comparée entre traitements et non de façon globale (**Tableau 4.13**).

Autant le SD-PLC participe à limiter les niveaux d'exportations de nutriments dans les conditions de climat actuel, autant le Ch-SPLC génère les taux d'exportations les plus élevés sous les pluies futures (Cdt.Fu) (Tableau 4.13). Par ailleurs, sous le travail au Ch-SPLC, les exportations de matière organique (MO), N_t , $o-PO_4$ et $P_{\text{bio.total}}$ augmentent respectivement de 6, 6.9, 2.7 et 5.4 fois sous les pluies futures par rapport aux pluies actuelles.

L'analyse des effets principaux dévoile que ceux-ci agissent sous forme d'un gradient suivant un ordre décroissant de leur propension ou « force » à moduler l'exportation des nutriments :

- l'effet travail du sol largement plus significatif : Ch/SD ayant des ratios d'exportations les plus élevés, de 2.40**- N_t , 2.38**-M.O et 2.36*** $P_{\text{bio.total}}$ (ligne A1 du **Tableau 4.14**) puis,

- l'effet condition ou niveaux de pluies avec des ratios d'exportation de niveau intermédiaire (Cdt.Fu./Cdt.Ac. : de 1.86-N_t à 1.42-o-PO₄) (ligne A2 du **Tableau 4.14**), et enfin,
- l'effet couvert au sol avec des ratios d'exportations les plus faibles (PLC/SPLC : 1.57 N_t à 1.18-o-PO₄) (ligne A3 du **Tableau 4.14**).

L'analyse des effets croisés (Tableau 4.14) révèle que :

- les pluies futures (Cdt.Fu) amplifient les niveaux d'exportations des nutriments tel que déjà initiés individuellement à l'échelle des effets principaux (travail du sol Ch/SD, lignes D1 et D2; couvert au sol SPLC/PLC, lignes E2 et E1 du **Tableau 4.14**),
- c'est le même constat au niveau de la résultante du croisement des alternatives (Ch/SD d'une part ; SPLC/PLC d'autre part) lorsque comparées sous les deux niveaux de pluies (climat) :
 - l'absence de PLC comparativement à leur présence conduit à des accroissements des exportations de 13% (o-PO₄), 87% (N_t) et plus de 100% (MO et P_{.bio.total}) sous les pluies futures par rapport aux pluies actuelles (lignes B1 et B2 du **Tableau 4.14**),
 - le Ch comparativement au SD contribue également à des augmentations des exportations de 27% (P_{.bio.total}), 57% (MO) et légèrement plus de 100% (N_t) sous les pluies futures par rapport aux pluies actuelles (lignes C1 et C2 du **Tableau 4.14**).

Tableau 4.13 : Perte des nutriments, effets des traitements individuels

Niveaux de climat et traitements	M.O. (g.m ⁻²)		N _t (mg.m ⁻²)		o-PO ₄ (mg.m ⁻²)		P _{bio.total} (mg.m ⁻²)	
<u>Pluie actuelle (Cdt.Ac.)</u>								
P	143	b c	4691	b	1.17	a	14	b
Ch-PLC	398	a b	14697	a b	0.72	a b	43	a
Ch-SPLC	195	b c	8260	a b	0.45	b	17	b
SD-PLC	103	c	4803	b	0.26	b	9	b
SD-SPLC	237	a b c	11077	a b	0.62	a b	21	b
S-Nu	479	a	20804	a	0.64	a b	41	a
Moyenne (écart type)	259 (148)		10722 (6246)		0.64 (0.31)		24 (14)	
<u>Pluie future (Cdt.Fu.)</u>								
P	57	b	2651	b	1.29		5	b
Ch-PLC	455	b	22069	b	0.68		40	b
Ch-SPLC	1180	a	56607	a	1.18		92	a
SD-PLC	353	b	14495	b	0.95		31	b
SD-SPLC	245	b	11904	b	0.84		21	b
S-Nu	363	b	16170	b	0.88		33	b
Moyenne (écart type)	442 (386)		20649 (18726)		0.97 (0.23)		37 (30)	
Pour chaque variable réponse et au sein d'un même niveau de climat, les traitements (lignes) avec la même lettre sont statistiquement non significatifs								

Tableau 4.14 : Perte des nutriments, effets principaux et croisés

		M.O. (g.m⁻²)	N.t. (mg.m⁻²)	o-PO₄ (mg.m⁻²)	P_{bio.total} (mg.m⁻²)
Pluie actuelle (Cdt.Ac.)		259	11077	0.684	24
Pluie future (Cdt.Fu.)		442	20644	0.968	37
Cdt.Fu./Cdt.Ac.	(A2)	1.71 (*)	1.86 (*)	1.42	1.53
PLC		327	14016	0.652	31
SPLC		464	21962	0.769	38
SPLC/PLC	(A3)	1.42	1.57	1.18	1.24
PLC-Cdt.Ac.		250	9750	0.489	26
SPLC-Cdt.Ac.		216	9669	0.532	19
[SPLC/PLC] Cdt.Ac.	(B1)	0.86	1.00	1.09	0.73
PLC-Cdt.Fu.		404	18282	0.814	35
SPLC-Cdt.Fu.		713	34256	1.010	56
[SPLC/PLC] Cdt.Fu.	(B2)	1.76	1.87 (*)	1.24	1.61
PLC-Cdt.Ac.		250	9750	0.489	26
PLC-Cdt.Fu.		404	18282	0.814	35
PLC [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	(E1)	1.62	1.88 (*)	1.66	1.36
SPLC-Cdt.Ac.		216	9669	0.532	19
SPLC-Cdt.Fu.		713	34256	1.010	56
SPLC [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	(E2)	3.30 (*)	3.54 (*)	1.90 (**)	2.97 (**)
Ch		557	25408	0.755	48
SD		234	10570	0.665	20
Ch/SD	(A1)	2.38 (**)	2.40 (**)	1.14	2.36 (****)
Ch-Cdt.Ac.		296	11479	0.580	30
SD-Cdt.Ac.		170	7940	0.441	15
[Ch/SD] Cdt.Ac.	(C1)	1.74 (*)	1.45	1.32	2.01 (*)
Ch-Cdt.Fu.		818	39338	0.931	66
SD-Cdt.Fu.		299	13200	0.890	26
[Ch/SD] Cdt.Fu.	(C2)	2.74 (**)	2.98 (**)	1.05	2.56 (**)
Ch-Cdt.Ac.		296	11479	0.580	30
Ch-Cdt.Fu.		818	39338	0.931	66
Ch [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	(D1)	2.76 (**)	3.43 (***)	1.61	2.20 (**)
SD-Cdt.Ac.		170	7940	0.441	15
SD-Cdt.Fu.		299	13200	0.890	26
SD [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	(D2)	1.76	1.66	2.02 (**)	1.72
Niveaux de significativité : * 0.1 ; ** 0.05 ; *** 0.01 ; **** < 0.01					

4.4.2 Niveaux de pluies (climat) en covariable

Les **Tableau 4.15, 4.16, 4.17, 4.18** ci-dessous présentent l'exportation des nutriments suivant l'évolution graduelle du climat vers des pluies de plus en plus érosives. De plus tel qu'introduit dans ces tableaux, un fois de plus, lorsqu'on considère l'intensité de pluie comme covariable, l'ajustement linéaire des relations donne des prédictions ci-après sur la variation des exportations de MO, N_{-t}, o-PO₄ et P_{bio.total} suivant l'évolution des niveaux de pluies (graphiques de régression à l'**Annexe 22**). Les pertes estimées avec les équations de régression indiquent des pertes plus importantes sous pluie future que celles sous pluie actuelle selon les ratios suivants :

o-PO₄ (1.64) > N_{-t} (1.63) > MO (1.54) > P_{bio.total} (1.48). L'intensification des pluies en climat futur contribue ainsi à l'accroissement des exportations de 48% pour le P_{bio.total} à 63% pour N_{-t} et 64% pour o-PO₄. Les modèles linéaires (ajustés) (**Annexe 22**) confirment que l'intensité de pluie et le système cultural modulent conjointement le mécanisme d'exportation des nutriments. Le SD avec PLC réduit de 2 à 3 fois les taux d'exportation des nutriments par rapport au Ch-SPLC.

Tableau 4.15: Variation des pertes de MO (kg.ha⁻¹) suivant la variation de l'intensité de pluie par système cultural

M.O exportée kg.ha ⁻¹ (n = 35)			
Reg. M.O kg.ha ⁻¹ (Y) et Intensité de pluie (X)	Significativité	r ²	r
Y = -3443 + 104.9 * X	(*)	0.082	0.286
pente (a)	(*)		
(b)			
Analyse des Effets (Interaction)			
Traitements (systèmes culturaux)	(****)		
Intensité pluie (I, mm.h ⁻¹)	(***)		
Traitement * Intensité	(****)		
Exclusion de l'effet Interaction :			
ANOVA	(****)	r ²	r
		0.533	0.730
Test des effets			
Traitements (systèmes culturaux)	(****)		
Intensité de pluie	(****)		
Équations : M.O (Y) fonction Intensité de pluie (X)		M.O (kg.ha ⁻¹) estimée	
Impact de la variation	Trts	M.O (kg.ha ⁻¹) (Cdt.Ac.)	M.O (kg.ha ⁻¹) (Cdt.Fu.)
Y _(P) = -11198 + 166.7 * X	P	n.a	654.4
Y _(S-Nu) = - 6276 + 166.7 * X	S-Nu	3859.4	5576.4
Y _(Ch-PLC) = - 6260 + 166.7 * X	Ch-PLC	3875.4	5592.4
Y _(Ch-SPLC) = -4513 + 166.7 * X	Ch-SPLC	5622.4	7339.4
Y _(SD-PLC) = -8578 + 166.7 * X	SD-PLC	1557.4	3274.4
Y _(SD-SPLC) = - 9228 + 166.7 * X	SD-SPLC	907.4	2624.4
ratio [moy.Cdt.Fu/moy.Cdt.Ac.]		1.54	

Tableau 4.16: Variation des pertes en N_t (mg.m^{-2}) suivant la variation de l'intensité de pluie par système cultural

N_t exportée (mg.m^{-2}) (n = 35)			
Reg. N_t (mg.m^{-2}) (Y) et Intensité de pluie (X)	Significativité	r^2	r
$Y = -21835 + 566 * X$	(*)	0.098	0.313
pente (a)			
(b)			
Analyse des Effets (Interaction)			
Traitements (systèmes culturaux)	(****)		
Intensité pluie (I, mm.h^{-1})	(***)		
Traitement * Intensité	(****)		
Exclusion de l'effet Interaction :			
ANOVA	(****)	r^2	r
		0.521	0.722
Test des effets			
Traitements (systèmes culturaux)	(****)		
Intensité de pluie	(****)		
Équations : N_t (Y) fonction Intensité de pluie (X)		N_t (g.m^{-2}) estimés	
Impact de la variation	Trts	N_t (mg.m^{-2}) (Cdt.Ac.)	N_t (mg.m^{-2}) (Cdt.Fu.)
$Y_{(P)} = -57860.5 + 844 * X$	P	n.a	2147.9
$Y_{(S-Nu)} = -34603.2 + 844 * X$	S-Nu	16712.0	25405.2
$Y_{(Ch-PLC)} = -34910 + 844 * X$	Ch-PLC	16405.2	25098.4
$Y_{(Ch-SPLC)} = -25224.6 + 844 * X$	Ch-SPLC	26090.6	34783.8
$Y_{(SD-PLC)} = -45332.9 + 844 * X$	SD-PLC	5982.3	14675.5
$Y_{(SD-SPLC)} = -47430.0 + 844 * X$	SD-SPLC	3885.2	12578.4
ratio [moy.Cdt.Fu/moy.Cdt.Ac.]		1.63	

Tableau 4.17: Variation des pertes en o-PO₄ (mg.m⁻²) suivant la variation de l'intensité de pluie par système cultural

o-PO₄ exportée (mg.m⁻²) (n = 35)			
Reg. o-PO ₄ (mg.m ⁻²) (Y) et Intensité de pluie (X)	Significativité	r ²	r
Y = -1.69 + 0.038 * X	(****)	0.333	0.577
pente (a)	(****)		
(b)	(**)		
Analyse des Effets (Interaction)			
Traitements (systèmes culturaux)			
Intensité pluie (I, mm.h ⁻¹)	(****)		
Traitement * Intensité	(*)		
Exclusion de l'effet Interaction :			
ANOVA	(****)	r ²	r
		0.465	0.682
Test des effets			
Traitements (systèmes culturaux)			
Intensité de pluie	(****)		
Équations : o-PO₄ (Y) fonction Intensité de pluie (X)		o-PO₄ (g.m⁻²) estimés	
Impact de la variation	Trts	o-PO₄ (mg.m⁻²) (Cdt.Ac.)	o-PO₄ (mg.m⁻²) (Cdt.Fu.)
Y _(P) = -0.999 + 0.034 * X	P	1.07	1.42
Y _(S-Nu) = - 1.386 + 0.034 * X	S-Nu	0.68	1.03
Y _(Ch-PLC) = - 1.452 + 0.034 * X	Ch-PLC	0.62	0.97
Y _(Ch-SPLC) = -1.516 + 0.034 * X	Ch-SPLC	0.55	0.90
Y _(SD-PLC) = - 1.615 + 0.034 * X	<u>SD-PLC</u>	<u>0.45</u>	<u>0.80</u>
Y _(SD-SPLC) = - 1.651 + 0.034 * X	<u>SD-SPLC</u>	<u>0.42</u>	<u>0.77</u>
ratio [moy.Cdt.Fu/moy.Cdt.Ac.]		1.64	

Tableau 4.18: Variation des pertes de phosphore biodisponible total (mg.m⁻²) suivant la variation de l'intensité de pluie par système cultural

P_{bio.total.} exporté (mg.m⁻²) (n = 35)			
Reg. P _{bio.total} (mg.m ⁻²) (Y) et Intensité de pluie (X)	Significativité	r ²	r
Y = -19.361 + 0.752 * X	(*)	0.064	0.253
pente (a)	(*)		
(b)			
Analyse des Effets (Interaction)			
Traitements (systèmes culturaux)	(****)		
Intensité pluie (I, mm.h ⁻¹)	(**)		
Traitement * Intensité	(****)		
Exclusion de l'effet Interaction :		r ²	r
ANOVA	(****)	0.527	0.726
Test des effets			
Traitements (systèmes culturaux)	(****)		
Intensité de pluie	(****)		
Équations : P_{bio.total} (Y) fonction Intensité de pluie (X)		P_{bio.total} (g.m⁻²) estimé	
Impact de la variation	Trts	P_{bio.total} (mg.m⁻²) (Cdt.Ac.)	P_{bio.total} (mg.m⁻²) (Cdt.Fu.)
Y _(P) = -0.875 + 0.0132 * X	P	n.a	0.06
Y _(S-Nu) = - 0.461 + 0.0132 * X	S-Nu	0.34	0.48
Y _(Ch-PLC) = - 0.421 + 0.0132 * X	Ch-PLC	0.38	0.52
Y _(Ch-SPLC) = -0.354 + 0.0132 * X	Ch-SPLC	0.45	0.58
Y _(SD-PLC) = - 0.661 + 0.0132 * X	<u>SD-PLC</u>	<u>0.14</u>	<u>0.28</u>
Y _(SD-SPLC) = - 0.714 + 0.0132 * X	SD-SPLC	0.09	0.22
ratio (moy.Cdt.Fu/moy.Cdt.Ac.)		1.48	

4.4.3 Érosion sélective des nutriments sous forme particulaire

La présente section examine l'effet des facteurs climat et systèmes culturaux sur la concentration des MES en divers nutriments. Il s'agit de vérifier si ces facteurs favorisent ou pas une érosion sélective des nutriments. Les **Tableau 4.19** et **4.20** ci-dessous résument les effets individuels (traitement et climat-niveaux de pluies) et les effets croisés respectivement.

Tableau 4.19 : Effet des traitements individuels sur le transport sélectif des nutriments selon les deux niveaux de pluies

Ratio [concentration de l'élément dans les sédiments érodés / concentration initiale de l'élément dans le sol entier en place-site]									
	M.O. (%)	P-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	K-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	Ca-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	Al-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	Mg-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	C.t. (%)	N.t. (%)	
Pluie actuelle (Cdt.Ac.)									
P	1.45	1.75	2.12	3.50	0.95	3.01	0.94	1.01	
Ch-PLC	1.54	1.30	1.08	2.93	1.00	2.06	1.22	1.29	
Ch-SPLC	1.56	1.20	1.09	3.16	1.01	2.04	1.39	1.49	
SD-PLC	1.30	1.20	1.75	3.93	1.18	2.95	1.29	1.45	
SD-SPLC	1.53	1.43	1.39	3.60	1.09	2.38	1.39	1.53	
S-Nu	1.76	1.27	1.02	2.99	0.99	1.91	1.61	1.74	
	1.52a	1.36a	1.41a	3.35a	1.04a	2.39a	1.31a	1.42a	
Moyenne (E.T)	(0.15)	(0.21)	(0.44)	(0.39)	(0.09)	(0.48)	(0.22)	(0.25)	
Pluie future (Cdt.Fu.)							(**)	(**) (	

Le **Tableau 4.19** ci-dessus montrent que :

- tous les ratios traduisant l'exportation sélective des nutriments sont ≥ 1 et ceci sous les deux niveaux de pluies et sous chacun des 6 systèmes culturaux étudiés,
- l'effet traitement (système cultural) n'est pas significatif à l'exception du carbone total (C_t) et de l'azote total (N_t) où :
 - l'absence de plante de couverture sur le labour au chisel (Ch-SPLC) entraîne 67% plus d'exportation de C_t et N_t sous les conditions du climat futur (Cdt.Fu.) comparativement au semi direct avec plante de couverture (SD-PLC) :
 - le SD-PLC et le Ch-SPLC se situant aux deux extrêmes,
- le Ca-M₃ (calcium Mehlich 3) et le Mg-M₃ (Magnésium Mehlich 3) présentent les moyennes des taux d'enrichissement (TE) les plus élevés pour l'ensemble des systèmes culturaux et sous les deux niveaux de pluies,

- c'est-à-dire sous les pluies futures, le Ca-M₃ et le Mg-M₃ sont beaucoup plus susceptibles à une exportation massive. Cette situation pourrait à terme accélérer la dégradation de la qualité des sols et compromettre le maintien des niveaux de fertilité des sols ainsi appauvris,
- globalement, l'effet condition (niveau de pluies) n'est pas significatif sur l'érosion sélective des nutriments à l'exception du Ca et du Mg pour lesquels l'enrichissement des MES est plus élevé sous la pluie actuelle que sous la pluie future,
- l'absence de plante de couverture sur le labour au chisel (Ch-SPLC) entraîne 68% plus d'exportations de C_t et N_t sous les conditions du climat futur comparativement au semis direct avec plante de couverture (SD-PLC) [(1.81_a, 1.08_b) ; (1.83_a, 1.09_b)],
- sous les pluies actuelles (Cdt.Ac.) et futures (Cdt.Fu.), l'introduction de plante de couverture sous les deux options de travail du sol (Ch et SD) contribue à réduire (non significativement) les exportations de C_t et d'N_t (en Cdt.Fu. : 18% sous le SD, 12 % sous le Ch; en Cdt. Ac. : 8 % sous le SD, 12% sous le Ch). Autrement dit, l'introduction de PLC aide à réduire les niveaux d'appauvrissement sélectif des sols affectés par l'érosion hydrique.
- l'association de plante de couverture avec le semis direct (SD-PLC) sous des pluies futures (Cdt.Fu.) réduit systématiquement la sélectivité des exportations de 13% (MO), 30% (P-M3), 19% (P-M3), 18% (Ca-M3), 25% (Al-M3), 13% (Mg-M3), 18% (C.t.), 20% (N.t.) comparativement au SD-SPLC. Cette tendance n'est pas aussi nette en ce qui concerne le labour au chisel sous le climat actuel comme sous le climat futur.

Tableau 4.20 : Effets principaux et croisés

	M.O. (%)	P-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	K-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	Ca-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	Al-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	Mg-M ₃ (mg.kg ⁻¹)	C-t (%)	N-t (%)
Pluie actuelle (Cdt.Ac.)	1.52	1.36	1.41	3.35	1.04	2.39	1.31	1.42
Pluie future (Cdt.Fu.)	1.57	1.26	1.43	2.34	1.25	1.88	1.47	1.53
Cdt.Fu./Cdt.Ac.	1.03	0.93	1.01	0.70(****)	1.20	0.79	1.12	1.08
PLC	1.44	1.13	1.26	2.76	1.10	2.07	1.29	1.38
SPLC	1.58	1.31	1.22	2.76	1.18	1.93	1.48	1.55
SPLC/PLC	1.10	1.16	0.97	1.00	1.07	0.93	1.15	1.12
PLC-Cdt.Ac.	1.42	1.25	1.42	3.43	1.09	2.51	1.26	1.37
SPLC-Cdt.Ac.	1.55	1.32	1.24	3.38	1.05	2.21	1.39	1.51
[SPLC/PLC] Cdt.Ac.	1.09	1.06	0.87	0.99	0.96	0.88	1.10	1.10
PLC-Cdt.Fu.	1.47	1.02	1.10	2.10	1.12	1.63	1.33	1.40
SPLC-Cdt.Fu.	1.62	1.30	1.20	2.13	1.32	1.65	1.57	1.59
[SPLC/PLC] Cdt.Fu. (A)	1.10	1.27(*)	1.09	1.01	1.18	1.01	1.18	1.14
PLC-Cdt.Ac.	1.42	1.25	1.42	3.43	1.09	2.51	1.26	1.37
PLC-Cdt.Fu.	1.47	1.02	1.10	2.10	1.12	1.63	1.33	1.40
PLC [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	1.04	0.82	0.77	0.61	1.03	0.65	1.06	1.02
SPLC-Cdt.Ac.	1.55	1.32	1.24	3.38	1.05	2.21	1.39	1.51
SPLC-Cdt.Fu.	1.62	1.30	1.20	2.13	1.32	1.65	1.57	1.59
SPLC [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	1.05	0.98	0.97	0.63	1.26	0.75	1.13	1.05
Ch	1.62	1.18	1.04	2.49	1.09	1.72	1.50	1.58
SD	1.40	1.27	1.44	3.03	1.19	2.28	1.27	1.35
Ch/SD	1.16(**)	0.93	0.72(**)	0.82	0.92	0.75	1.18	1.17
Ch-Cdt.Ac.	1.55	1.25	1.09	3.04	1.00	2.05	1.30	1.39
SD-Cdt.Ac.	1.42	1.32	1.57	3.77	1.14	2.66	1.34	1.49
[Ch/SD] Cdt.Ac.	1.09	0.95	0.69	0.81	0.88	0.77	0.97	0.93
Ch-Cdt.Fu.	1.70	1.10	0.98	1.94	1.18	1.39	1.70	1.77
SD-Cdt.Fu.	1.39	1.22	1.32	2.29	1.25	1.89	1.20	1.22
[Ch/SD] Cdt.Fu. (B)	1.22(**)	0.90	0.74	0.85	0.94	0.74(*)	1.42(****)	1.45(****)
Ch-Cdt.Ac.	1.55	1.25	1.09	3.04	1.00	2.05	1.30	1.39
Ch-Cdt.Fu.	1.70	1.10	0.98	1.94	1.18	1.39	1.70	1.77
Ch [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	1.10	0.88	0.90	0.64(****)	1.18(**)	0.68(*)	1.31(**)	1.27(**)
SD-Cdt.Ac.	1.42	1.32	1.57	3.77	1.14	2.66	1.34	1.47
SD-Cdt.Fu.	1.39	1.22	1.32	2.29	1.25	1.89	1.20	1.22
SD [Cdt.Fu./Cdt.Ac.]	0.98	0.92	0.84	0.61(*)	1.10	0.71	0.90	0.83

Niveaux de significativité : * 0.1 ; ** 0.05 ; *** 0.01 ; **** < 0.01

Le **Tableau 4.20** ci-dessus montre que la matière organique (MO), le carbone total (C-t) et l'azote total (N-t) présentent des profils (patrons) d'exportation sélective relativement bien définis :

- sous les pluies futures, le labour superficiel au chisel (Ch) occasionne des accroissements significatifs de 22% (**), 42% (****) et 45% (****) respectivement sur l'exportation sélective (appauvrissement du site) de la MO, du C-t et de l'N-t (ligne B du Tableau 4.20) comparativement au semis direct (SD).
- en l'absence de plante de couverture (SPLC) les taux d'enrichissement en climat futur varient de 9% à 27% selon le nutriment considéré. Autrement, l'introduction de plante de

couverture (PLC) en climat futur contribue à réduire les niveaux d'appauvrissement des parcelles.

4.4.4 Relation entre les pertes de matière organique et de nutriments

Les données de l'érosion sous pluies simulées à Saint-Lambert-de-Lauzon confirment les corrélations tel que documentées dans la littérature et surtout pour ce qui est du rôle prépondérant de la MO dans la fertilité des sols (capacité d'échanges des ions et le lien avec le phosphore) comme illustré au **Tableau 4.21** ci-dessous. Cette section expose l'impact des pertes de MO sur celles des diverses formes de phosphore en relation avec l'intensification des pluies.

Tableau 4.21: Effets principaux et croisés (impact des niveaux de climat/pluies)

Variables	Regression	ratio pentes	R ² (r)	Sig.reg.
Variation de la C.E.C sol en place (Y) suivant la variation de la M.O (%) des MES du sol en place.				

C.E.C (m.Eq.100g ⁻¹ sol) (Y)	6.603 + 1.96 * M.O(%)sol		0.811 (0.900)	*****
Exportation de la M.O (Y) des MES en fonction des pertes de sol (t.ha ⁻¹)(X) et suivant I (mm.hr ⁻¹). *****				
M.O _(MES) (g.m ⁻²) (Y)	-29.82 + 0.62 * X		0.921 (0.959)	(*****)
Cdt.Ac.	-2.98 + 0.52 * X	1.21	0.794 (0.891)	(*****)
Cdt.Fu.	- 17.79 + 0.63 * X		0.940 (0.970)	(*****)
Exportation du P-M ₃ (Y) en fonction des pertes de M.O _(MES) (kg.ha ⁻¹)(X) et suivant I (mm.hr ⁻¹). *****				
P- M ₃ (kg.ha ⁻¹)	- 0.00377 + 1.93*10 ⁻⁵ * X		0.923 (0.961)	(*****)
Cdt.Ac.	0.0140 + 1.56 * 10 ⁻⁵ * X	1.27	0.739 (0.859)	(*****)
Cdt.Fu.	-0.00111 + 1.99 * 10 ⁻⁵ * X		0.943 (0.971)	(*****)
Exportation des o-PO ₄ (Y) en fonction des pertes de M.O _(MES) (kg.ha ⁻¹)(X) et suivant I (mm.hr ⁻¹). *****				
o-PO ₄ (kg.ha ⁻¹) (Y)	-0.000613 + 1.37 * 10 ⁻⁶ * X		0.836 (0.929)	(*****)
Cdt.Ac.	- 0.000717 + 8.82 * 10 ⁻⁷ * X	1.64	0.481 (0.693)	(*****)
Cdt.Fu.	-0.000960 + 1.448 * 10 ⁻⁶ * X		0.876 (0.936)	(*****)
Exportation du P _{bio.total.} (Y) en fonction des pertes de M.O _(MES) (kg.ha ⁻¹)(X) et suivant I (mm.hr ⁻¹). *****				
P _{bio.total.} (kg.ha ⁻¹) (Y)	-0.0286 + 7.87 * 10 ⁻⁵ * X		0.946 (0.973)	(*****)
Cdt.Ac.	0.00718 + 9.02 * 10 ⁻⁵ * X	0.86	0.928 (0.963)	(*****)
Cdt.Fu.	0.0228 + 7.80 * 10 ⁻⁵ * X		0.950 (0.975)	(*****)
Exportation du P _{total.} (Y) en fonction des pertes de M.O _(MES) (kg.ha ⁻¹) (X) et suivant I (mm.hr ⁻¹).*****				
P _{total.} (kg.ha ⁻¹) (Y)	-0.0212 + 1.65 * 10 ⁻⁴ * X		0.9878 (0.993)	(*****)
Cdt.Ac.	0.0467 + 1.60 * 10 ⁻⁴ * X	1.04	0.968 (0.984)	(*****)
Cdt.Fu.	-0.000143 + 1.67 * 10 ⁻⁴ * X		0.990 (0.995)	(*****)
Exportation N _{t.} (Y) en fonction des pertes de M.O _(MES) (kg.ha ⁻¹) (X) et suivant I (mm.hr ⁻¹). *****				
N _{t.} (kg.ha ⁻¹) (Y)	- 13.532 + 0.0487 * X		0.973 (0.986)	(*****)
Cdt.Ac.	0.327 + 0.0416 * X	1.18	0.898 (0.948)	(*****)
Cdt.Fu.	- 10.962 + 0.0492 * X		0.983 (0.991)	(*****)
ratio pentes : (a Cdt.Fu.) / (a Cdt.Ac.) ; Sig ***** < 0.01				

La relation attendue entre la MO et la C.E.C pour les sols du Québec (Martel et al., 1976), entre la MO et la C.E.C dans les sols minéraux (en Saskatchewan en particulier) (St.Arnaud et al., 1972; Campbell, 1978; cités dans Mathur *et al.*, 1991), les exportations de MO associées aux pertes de sol, le lien étroit ($r > 0.86$) entre la MO et les nutriments (phosphore et azote) confirment le risque d'appauvrissement progressif des sols en place avec l'intensification des pluies en climat futur. Les ratios des pentes des relations ci-dessus ($[a.Cdt.Fu.] / [a.Cdt.Ac.] > 1$) traduisent la tendance à l'appauvrissement des terres agricoles (pertes P-M₃) et le risque de pollution des plans d'eau riverains par des apports massifs de P_{dissous} et du P_{particulaire} potentiellement

«relargable» dans l'environnement aquatique récepteur alimentant ainsi la production du phytoplancton et par le fait même leur eutrophisation.

Le labour superficiel au chisel en l'absence de plante couverture (Ch-SPLC) pourrait donc être préjudiciable sous les niveaux des pluies futures avec un ratio d'exportation sélective de la MO de 1.76 et de 1.83 pour l'azote total au regard des pentes de régression (Cdt.Ac. et Cdt.Fu.).

Les relations ci-dessus confirment également que tout système cultural démontrant une réduction des exportations (pertes) de sédiments et parallèlement de MO pourrait également contribuer à atténuer les pertes en P et en N comme l'ont démontré d'autres études antérieures (Walter et al., 1979, cités dans Rousseau Beaumier, 2012).

4.5 Détermination des facteurs K et C du sol en place

4.5.1 L'érodabilité (calculé/ $K_{\text{calculé}}$ ou au nomographe/ $K_{\text{nomo.}}$) du sol en place

L'érodabilité (K) du sol en place a été déterminée par le nomographe de Wischmeier et par calcul.

La méthode du nomographe de Wischmeier utilise les triangles des codes de structure et de perméabilité contenus dans le RUSLEFAC (Wall et al., 2002) :

- Figure K-2 : code de structure déduite de la classification texturale (à partir des résultats des analyses d'échantillons de sol prélevés du site),
- Figure K-3 : code de perméabilité obtenue de la classification texturale (résultats des analyses d'échantillons de sol du site).

Des valeurs d'érodabilité ont été obtenues par des projections manuelles directement sur le nomographe de Wischmeier ($K_{\text{nomo. Wisch/graphique}}$).

Par soucis d'auto-validation, l'équation de régression multiple ci-dessous (base du nomographe) a également été utilisée pour l'estimation des valeurs d'érodabilité calculées ($K_{\text{calculé}}$) :

Équation 4.4 : Régression multiple à la base de l'érodabilité au nomographe (Wischmeier et al., 1971)

$$K = 2.8 \cdot 10^{-7} \cdot (M)^{1.14} \cdot (12 - a) + 0.0043 \cdot (b - 2) + 0.0033(c - 3)$$

Où K exprimée en t.ha.h.(ha.MJ.mm)⁻¹

a est le % de matière organique,

b fait référence au code de structure (1- 4),

c désigne le code de perméabilité (1- 6)

M (paramètre textural) : (% Limon + % Sables Très Fins) x (100 - % Argiles)

Le taux moyen de matière organique (MO) dans les échantillons de sol de Saint-Lambert-de-Lauzon ($3.41\% \leq \mathbf{3.59\%} \leq 3.78\%$; n = 36, s = 0.54 %) est à l'intérieur de l'intervalle requis ($\%M.O._{moy} \leq \mathbf{4\%}$) par l'échelle de sensibilité relative à l'utilisation du nomographe de Wischmeier (Renard et al., 1996; Morgan, 2005; cités dans Cassol *et al.*, 2018).

L'érodabilité du sol en place (36 parcelles-6 blocs) est comprise entre $K_{(calculée).min} = \mathbf{0.007}$ t.ha.h.(ha.MJ.mm)⁻¹ et $K_{(calculée).max} = \mathbf{0.035}$ t.ha.h.(ha.MJ.mm)⁻¹ avec une érodabilité moyenne $K_{(calculée).moy.} = \mathbf{0.019}$ t.ha.h.(ha.MJ.mm)⁻¹ ($s_{moy.} = 0.008$ t.ha.h.(ha.MJ.mm)⁻¹) et une médiane $K_{(calculée).méd.} = \mathbf{0.017}$ t.ha.h.(ha.MJ.mm)⁻¹.

Tableau 4.22 : Érodabilité calculée (Kcalculée) en t.ha.h (ha.MJ.mm)⁻¹

à partir du nomographe de Wischmeier

Bloc-Parcelle (Cdt.-pluies Fu.)	Syst.cult.	% (L+STF)	%Sble (0.1 - 2.0 mm)	% M.O (a)	Cl. Struct.(b)	Cl. Perméa.(c)	% Argiles	M	K _(calculé)
B4P1	P	34	47	3.98	2	2	20	2720	0.015
B4P2	Ch-PLC	35	48	3.57	2	2	17	2905	0.017
B4P3	Ch-SPLC	33	51	3.95	2	2	17	2739	0.015
B4P4	SD-PLC	28	54	3.61	2	2	18	2296	0.012
B4P5	SD-SPLC	27	55	3.52	2	2	19	2187	0.012
B4P6	S-Nu	26	59	3.06	2	2	15	2210	0.013
B5P1	SD-PLC	38	45	3.78	2	2	17	3154	0.019
B5P2	Ch-PLC	42	41	3.34	2	3	17	3486	0.026
B5P3	Ch-SPLC	46	37	2.65	2	3	17	3818	0.031
B5P4	P	44	39	2.92	2	3	18	3608	0.029
B5P5	SD-SPLC	44	35	3.38	2	3	20	3520	0.026
B5P6	S-Nu	48	36	3.07	2	3	16	4032	0.032
B1P1	SD-SPLC	36	43	4.90	2	3	20	2880	0.017
B1P2	SD-PLC	39	41	4.12	2	3	21	3081	0.021
B1P3	P	39	37	4.44	2	3	24	2964	0.019
B1P4	S-Nu	37	43	4.47	2	3	21	2923	0.019
B1P5	Ch-SPLC	35	45	4.11	2	2	19	2835	0.016
B1P6	Ch-PLC	32	48	3.83	2	2	19	2592	0.014
Moyenne (Blocs Cdt.Fu.)									0.020(a)
Écart type (Blocs Cdt.Fu.)									0.006
Bloc-Parcelle (Cdt.-pluies Ac.)	Syst.cult.	% (L+STF)	%Sble (0.1 - 2.0 mm)	% M.O (a)	Cl. Struct.(b)	Cl. Perméa.(c)	% Argiles	M	K _(calculé)
B2P1	S-Nu	22	67	3.19	2	2	12	1936	0.010
B2P2	P	19	67	3.37	2	2	13	1653	0.008
B2P3	SD-PLC	19	67	3.90	2	2	13	1653	0.007
B2P4	Ch-PLC	21	66	3.74	2	2	13	1827	0.009
B2P5	SD-SPLC	24	65	3.17	2	2	12	2112	0.012
B2P6	Ch-SPLC	27	57	3.67	2	2	16	2268	0.012
B3P1	S-Nu	30	56	3.21	2	2	14	2580	0.016
B3P2	SD-SPLC	29	56	3.70	2	2	15	2465	0.014
B3P3	SD-PLC	28	55	4.18	2	2	16	2352	0.012
B3P4	Ch-SPLC	33	52	3.35	2	2	15	2805	0.017
B3P5	Ch-PLC	35	49	3.72	2	2	16	2940	0.017
B3P6	P	33	53	4.32	2	2	15	2805	0.015
B6P1	Ch-PLC	46	36	3.46	2	3	19	3726	0.028
B6P2	P	55	23	3.41	2	3	22	4290	0.033
B6P3	Ch-SPLC	50	28	2.61	2	3	22	3900	0.032
B6P4	SD-PLC	51	26	2.63	2	3	25	3825	0.032
B6P5	S-Nu	55	24	2.99	2	3	21	4345	0.035
B6P6	SD-SPLC	50	29	4.07	2	3	22	3900	0.027
Moyenne (Blocs Cdt.Ac.)									0.018(a)
Écart type (Blocs Cdt.Ac.)									0.009

Tableau 4.23 : Statistiques descriptives sur l'érodabilité calculé ou au nomographe

Statistiques sur $K_{\text{calculée/nomographe}}$ (ensemble du site)	
Moyenne	0.019
Écart type	0.0081
Médiane	0.017
Max.	0.035
Min.	0.007
Marge Erreur (M.E)	0.0014
n	36
I.C (95%) : $0.016 \leq K_{\text{calculée.moy.}} \leq 0.022$	

Les valeurs d'érodabilité de sol sous pluies simulées à Saint-Lambert-de-Lauzon sont contenues dans la classe inférieure de la plage des valeurs d'érodabilité obtenues de la série des 158 échantillons de sols du Québec déterminées au nomographe de Wischmeier (Bernard, 1996) ($K : 0.0072 - 0.0630 \text{ (ha.MJ.mm)}^{-1}$) où près de 66% des séries des sols utilisées s'est révélé d'une érodabilité $\leq 0.030 \text{ t.ha.h.(ha.MJ.mm)}^{-1}$. Dans cette étude beaucoup plus large géographiquement, Bernard (1996) rapporte une érodabilité de 0.0328 (Série Sainte-Marie) et de 0.0234 (Série Saint-Bernard), deux secteurs ou unités pédologiques compris dans le bassin versant de la rivière Etchemin tout comme Saint-Lambert-de-Lauzon.

Duchemin et al. (2001) rapportent des valeurs d'érodabilité similaires ($K_{\text{moy.}} 0.0236 \text{ t.ha.h.(MJ.ha.mm)}^{-1}$) dans le BV de la rivière Chaudière (riverain au BV de la rivière Etchemin) bien qu'ayant recouru à une approche d'estimation différente (géomatique, agrégation spatiale par polygones pédologiques) et utilisant une correction (Ks^*) selon Vold et al. (1985).

La susceptibilité à l'érosion hydrique du site de Saint-Lambert-de-Lauzon, telle que mesurée, peut donc être considérée comme étant faible selon l'échelle d'érodabilité proposée par Wall et al. (2002) dans le RUSLEFAC produite à partir des données d'une série de 1600 échantillons de sols collectés au sud de l'Ontario par l'institut des analyses pédologiques de l'Ontario (Table 3.2, $K : 0.007 - 0.03 \text{ t.ha.h.(ha.MJ.mm)}^{-1}$) et selon la classification proposée par Foster et al. (1981) aux États-Unis (faible : $K \leq 0.01 \text{ t.ha.h.(ha.MJ.mm)}^{-1}$; modérée : $K = 0.03 \text{ t.ha.h.(ha.MJ.mm)}^{-1}$; forte :

$K \geq 0.06 \text{ t.ha.h.}(\text{ha.MJ.mm})^{-1}$. Une échelle de classification similaire a également été proposée par Salehi et al. (1993) où une érodabilité $K \leq 0.026$ est considérée faible.

Une discrimination des valeurs de $K_{\text{moy.calculée}}$ (**Tableau 4.22**) suivant la variable catégorielle niveaux de pluies (Cdt.Ac. et Cdt.Fu.) produit les classes ci-après avec des intervalles de confiance à 95% :

$$K_{\text{moy.calculée.}(Cdt. Ac.)} = 0.018 : 0.013 \leq 0.018 \leq 0.023$$

$$K_{\text{moy.calculée.}(Cdt. Fu.)} = 0.020 : 0.017 \leq 0.020 \leq 0.023$$

Le rapport $K_{\text{moy.calculée.}(Cdt.Fu.)} / K_{\text{moy.calculée.}(Cdt.Ac.)}$ (1.11) montre un accroissement (non significatif : $F_{\text{cal.}} 0.344 < F_{\text{crit.}} 4.130$, p-value 0.56 à $\alpha 0.05$) de l'érodabilité moyenne de +11% avec l'intensification des pluies (climat futur). A ce niveau et dans ces conditions, il n'y a donc pas effet des pluie. Toutefois, l'on peut constater que l'érodabilité des blocs «pluies futures» est un peu plus élevé que celle des blocs «pluies actuelles».

Ce résultat vient (une fois de plus) confirmer que la série d'intervention de déstructuration du sol ayant ciblée les blocs #4, #5 et #1 n'a pas produit les effets escomptés (absence de différence statistique des DMP et des % A.S.E). De ce point de vue, le site dans l'ensemble est considéré comme homogène pour ce qui est de son érodabilité.

4.5.2 Facteur LS (pour estimation du facteur $K_{\text{mesuré}}$ et indice C)

L'équation ci-après a permis d'estimer le facteur L.S au niveau de chaque parcelle secondaire, la pente par parcelle étant considérée relativement uniforme :

Équation 4.5 : Facteur topographique sur pente homogène (Wischmeier et al., 1978)

$$L.S = \left[\frac{\lambda}{(22.13)^m} \right] x [(65.41 x \sin^2 \theta) + (4.65 x \sin \theta) + 0.065]$$

Où λ est la longueur de la pente en mètre

θ est l'inclinaison de la pente mesurée en % (ratio la dénivellation h sur la distance horizontale l) puis convertit en degré ou radian pour intégration dans l'Équation 4.5 ci-dessus,

m est un paramètre fixé selon Wischmeier et al. (1971) aux U.S.A, Salehi et al. (1991) à Lennoxville au sud du Québec et Wall et al. (2002) en Ontario.

Le **Tableau 4.24** ci-dessous présente les résultats des valeurs du facteur LS à partir des valeurs de pente et du paramètre ou coefficient « m » correspondant pour l'ensemble des 36 parcelles secondaires du site.

Tableau 4.24 : Facteur déclivité (topographique) LS selon les conditions du site

Blocs-(Cdt.Fu.)	Syst.cult.	l (m)	Pente (θ %)	m, f (θ %)	L	S	LS
B4P1	P	6	4.0	0.4	0.593	0.352	0.209
B4P2	Ch-PLC	6	4.6	0.4	0.593	0.411	0.244
B4P3	Ch-SPLC	6	5.4	0.5	0.521	0.503	0.262
B4P4	SD-PLC	6	4.9	0.4	0.593	0.447	0.265
B4P5	SD-SPLC	6	4.4	0.4	0.593	0.394	0.233
B4P6	S-Nu	6	4.7	0.4	0.593	0.420	0.249
B5P1	SD-PLC	6	4.8	0.4	0.593	0.438	0.260
B5P2	Ch-PLC	6	5.9	0.5	0.521	0.563	0.293
B5P3	Ch-SPLC	6	5.4	0.5	0.521	0.503	0.262
B5P4	P	6	5.6	0.5	0.521	0.522	0.272
B5P5	SD-SPLC	6	5.0	0.5	0.521	0.456	0.237
B5P6	S-Nu	6	3.5	0.4	0.593	0.305	0.181
B1P1	SD-SPLC	6	4.5	0.4	0.593	0.402	0.239
B1P2	SD-PLC	6	4.7	0.4	0.593	0.420	0.249
B1P3	P	6	4.9	0.4	0.593	0.447	0.265
B1P4	S-Nu	6	4.4	0.4	0.593	0.394	0.233
B1P5	Ch-SPLC	6	4.6	0.4	0.593	0.411	0.244
B1P6	Ch-PLC	6	5.0	0.5	0.521	0.456	0.237
Blocs-(Cdt.Ac.)	Syst.cult.	l (m)	Pente (θ %)	m, f (θ %)	L	S	LS
B2P1	S-Nu	6	5.3	0.5	0.521	0.493	0.257
B2P2	P	6	4.2	0.4	0.593	0.368	0.218
B2P3	SD-PLC	6	4.6	0.4	0.593	0.411	0.244
B2P4	Ch-PLC	6	4.7	0.4	0.593	0.420	0.249
B2P5	SD-SPLC	6	4.7	0.4	0.593	0.420	0.249
B2P6	Ch-SPLC	6	4.9	0.4	0.593	0.447	0.265
B3P1	S-Nu	6	4.4	0.4	0.593	0.394	0.233
B3P2	SD-SPLC	6	3.7	0.4	0.593	0.320	0.190
B3P3	SD-PLC	6	4.0	0.4	0.593	0.352	0.209
B3P4	Ch-SPLC	6	6.0	0.5	0.521	0.573	0.298
B3P5	Ch-PLC	6	3.7	0.4	0.593	0.320	0.190
B3P6	P	6	5.8	0.5	0.521	0.552	0.288
B6P1	Ch-PLC	6	4.0	0.4	0.593	0.352	0.209
B6P2	P	6	4.2	0.4	0.593	0.368	0.218
B6P3	Ch-SPLC	6	3.2	0.4	0.593	0.275	0.163
B6P4	SD-PLC	6	3.9	0.4	0.593	0.344	0.204
B6P5	S-Nu	6	3.0	0.4	0.593	0.261	0.155
B6P6	SD-SPLC	6	2.7	0.3	0.676	0.233	0.158

Le facteur de déclivité ou topographique moyen du site est de 0.234 ($S_{\text{moy.}} 0.034$), variant d'un minimum de 0.155 à un maximum de 0.298.

4.5.3 Érodabilité mesurée (effective) du site ($K_{\text{mesurée/effective}}$)

L'érodabilité d'un site représente la perte de sol (A) par unité d'érosivité de la pluie (R) et s'exprime comme suit :

Équation 4.6 : Érodabilité d'un sol par définition (Wischmeier *et al.*, 1978)

$$K_{\text{mesurée/effective}} = \frac{A}{R}$$

Elle est déterminée à partir des données réelles de pertes de sol (érosion hydrique) sous pluies simulées sur chaque parcelle secondaire de sol nu (S-Nu) considérée comme parcelle de référence au sein de chacun des parcelles principales (blocs).

Lors du calcul ($K_{\text{mesurée/effective}}$), l'on apporte une correction pour la topographie puisque le facteur [LS] varie légèrement d'une parcelle à une autre (hétérogénéité).

Le calcul de K ($K_{\text{mesurée/effective}}$) se fait selon l'équation universelle de pertes de sols, USLE, en tenant compte de l'érosivité des pluies simulées et de la déclivité du site :

$$A = R K(LS)(CP)$$

Où A, la perte de sol (t.ha^{-1}) effective sous pluie simulée

R ($\text{EI}_{30\text{max}}$), l'érosivité de la pluie : $\text{MJ.mm} \cdot (\text{ha.h})^{-1}$

K, l'érodabilité du sol, $\text{t.ha.h} \cdot (\text{ha.MJ.mm})^{-1}$

(LS), le facteur intégrant l'effet de la topographie du site (pente)

(CP), l'indice intégrant l'effet combinée de la rotation, des pratiques culturales et des aménagements de surface : [CP] = 1 (C = 1 pour sol nu; P = 1 puisque aménagement de surface, labour et semis, fait dans le sens de la pente).

Dès lors, l'érodabilité mesurée ou effective au sein d'un bloc est obtenue par :

Équation 4.7 : Érodabilité mesurée ou effective pondérée, adapté de Wischmeier *et al.* (1978)

$$K_{\text{mesurée. Bloc}(i, S - Nu)} = \frac{A(i)(S - Nu)}{E. I. 30 \max(S - Nu) \times [LS](S - Nu)}$$

Où chaque terme de l'équation est issu de la parcelle de référence (S-Nu) au sein de chaque bloc.

Le **Tableau 4.25** ci-dessous présente les valeurs d'érodabilité mesurée ($K_{\text{mesurée/effective}}$) telles qu'obtenues à partir des pertes de sols réelles (effectives) du site sous pluies simulées d'une part et d'autre part, la comparaison entre l'érodabilité calculée (au nomographe) et celle mesurée (effective) ainsi que la significativité statistique.

Tableau 4.25 : $K_{\text{mesurée/effective}}$ et comparaison avec K calculée/nomographe sous pluies simulées

Blocs- (Cdt.Fu.)	Parcelle de référence (i)	$K_{\text{(Nomo.) ou}}K_{\text{(calculée)}}$	LS	$A_i \text{ (t.ha}^{-1}\text{)}$	$R_i \text{ (EI}_{30\text{max}})_i$	$K_{\text{mesurée/effective-BLOC}}$
B4P6	S-Nu	0.013	0.249	0.51	500	0.0041
B5P6	S-Nu	0.031	0.181	0.25	500	0.0028
B1P4	S-Nu	0.018	0.233	0.89	833	0.0046
Moyenne (écart type)		0.020 - 0.021 (0.009)				0.0038^a (0.0009)

Bloc- (Cdt.Ac.)	Parcelle de référence (i)	$K_{\text{(Nomo.) ou}}K_{\text{(calculée)}}$	LS	$A_i \text{ (t.ha}^{-1}\text{)}$	$R_i \text{ (EI}_{30\text{max}})_i$	$K_{\text{mesurée/effective-BLOC}}$
B2P1	S-Nu	0.010	0.257	0.864	453	0.0074
B3P1	S-Nu	0.015	0.233	0.772	453	0.0073
B6P5	S-Nu	0.036	0.155	0.979	580	0.0109
Moyenne (écart type)		0.018 - 0.020 (0.014)				0.0085^b (0.0021)

Les lettres a et b en exposant traduisent la différence statistique au seuil 5%

Les résultats du **Tableau 4.25** montrent que l'érodabilité moyenne mesurée ou effective sous pluies simulées ($K_{\text{(mesurée/effective-bloc)}}$) varie de 0.0038 à 0.0085 respectivement sous les niveaux de pluies (climat) futures et actuelles.

Sous les pluies actuelles, l'érodabilité moyenne au nomographe de Wischmeier (K_{nomo} 0.018-0.020) est 2.1 à 2.4 fois supérieure à l'érodabilité effective ($K_{\text{mesurée}}$ 0.0085). Cet écart se creuse davantage sous les conditions des pluies futures où $K_{\text{nomo.}}$ (0.020-0.021) est 5.3 à 5.5 fois supérieure au $K_{\text{mesuré/effective}}$ (0.0038). Salehi et al. (1993) ont également rapporté de telles différences à Lennoxville (Québec).

L'évolution (accroissement) du DMP des agrégats dans nos parcelles conséquemment à la restructuration progressive du sol en place, la recolonisation des parcelles par des mauvaises herbes bien que fauchées par la suite ont progressivement éloignées nos parcelles des conditions de «parcelle standard» au sens de Wischmeier et al. (1978) : « ...une parcelle labourée et continuellement maintenue en jachère sans végétation pendant une période d'au moins deux ans... ». Ces conditions pourraient avoir rendu le site relativement moins érodables justifiant le fait que $K_{\text{mesurée/effective}}$ soit si éloigné du $K_{\text{calculé/nomo.}}$.

En effet, les tests de Wall et al. (1988) sur des parcelles de loam, d'argiles limoneuses et de loam limoneux à Guelph (sud-ouest de l'Ontario) ont démontré que l'érodabilité des sols concernés varie significativement avec la variation saisonnière des conditions du sol en place. Les valeurs de l'érodabilité en période de dégel (hivers-printemps) s'étant avéré être dix fois supérieure à l'érodabilité moyenne annuelle alors que l'érodabilité correspondant à la période estival (printemps-été) a été presque égale à la moyenne annuelle; l'amplitude de sa variation étant liée à l'état textural du sol pour une même saison (fonte printanière) :

- $K_{\text{moy. (mesurée).estival}} = 0.001$ et $K_{\text{nomo.}} = 0.007$ sur sol sableux (ratio de 7),
- $K_{\text{moy. (mesurée).estival.}} = 0.009$ et $K_{\text{nomo.}} = 0.090$ sur argile limoneuse (ratio de 10),
- $K_{\text{moy. (mesurée).estival.}} = 0.003$ et $K_{\text{nomo.}} = 0.04$ sur Limon limoneux (ratio de 13).

Les valeurs d'érodabilité mesurées ainsi obtenues sous pluies simulées à Saint-Lambert-de-Lauzon ($K_{\text{mesurée/effective}}$) sont en adéquation avec la littérature lorsqu'on tient compte de la période des simulations de pluies (début septembre 2020).

En effet, l'érodabilité obtenue au nomographe ($K_{\text{calculée/nomo.}}$) est une moyenne annuelle contrairement à l'érodabilité mesurée sous pluie simulée ($K_{\text{mesuré/effective}}$) qui est une mesure ponctuelle dans le temps. Les travaux de Wall et al. (1988) précédemment cités ont démontré que les plus fortes valeurs de l'érodabilité mesurée (effective) sont enregistrées pendant la période de dégel (mars), alors que nos simulations de pluies ont eu lieu en début septembre loin des conditions d'un sol soumis aux forces de fragmentation des agrégats suite au jeu du dégel et fonte.

4.5.4 Calcul de l'indice C

Le calcul de l'indice cultural (C) par système cultural utilise les valeurs de l'érodabilité mesurée par bloc ($K_{\text{mesuré/effective}}$) ainsi que la perte de sol effective de chaque parcelle secondaire individuelle. L'intégration de l'érosivité ($E.I._{30\text{max}}$)_i et du facteur topographique (LS)_i de chaque parcelle secondaire individuelle permet de normaliser le calcul.

En considérant la parcelle de sol nu (S-Nu) précédemment utilisée comme parcelle de référence au sein de chaque bloc lors l'estimation de l'érodabilité du sol, le calcul de l'indice cultural (C) se déduit ainsi que suit :

Équation 4.8 : Indice C par parcelle individuelle pondéré, adapté de (Wischmeier *et al.*, 1978)

$$C(Trt(i)) = \left[\frac{A(i)Trt(i)}{[E.I._{30\text{max}}(i) Trt(i) \times K_{\text{mesuré. BLOC}} \times LS(i)]} \right]$$

Où $C_{(Trt(i))}$ est l'indice cultural du système cultural ou traitement– $Trt(i)$ dans une parcelle secondaire considérée(i)

$A_{(i)(Trt(i))}$ la perte de sol effective sous pluies simulées dans la parcelle secondaire sous le traitement(i)

$E.I._{30\text{max}}(i)$ l'érosivité de la pluie reçue dans la parcelle secondaire (système cultural)(i) concernée

$LS(i)$ le facteur déclivité de la parcelle secondaire(i)

Les valeurs de l'indice ou du facteur cultural (C) par parcelle secondaire (système cultural individuel) sont consignées au **Tableau 4.26** ci-dessous :

Tableau 4.26 : Indice C des systèmes culturaux par parcelle secondaire (36) et par bloc (6)

Bloc-Parcelle (Cdt.Fu.)	Syst.cult.	LS _i	A _i (t.ha ⁻¹)	R _i (EI _{30max}) _i	K _{mesuré/effective} .BLOC	C _i (A _i ,R _i ,K _{mesuré} BLOC/L Si)
B4P1	P	0.209	0.04	531		0.09
B4P2	Ch-PLC	0.244	0.51	653		0.78
B4P3	Ch-SPLC	0.262	1.65	828		1.86
B4P4	SD-PLC	0.265	0.50	833		0.55
B4P5	SD-SPLC	0.233	0.09	975		0.10
B4P6	S-Nu	0.249	0.51	500	0.0041	1.00
B5P1	SD-PLC	0.260	0.62	531		1.62
B5P2	Ch-PLC	0.293	1.15	653		2.17
B5P3	Ch-SPLC	0.262	2.09	828		3.48
B5P4	P	0.272	0.11	833		0.18
B5P5	SD-SPLC	0.237	0.33	975		0.52
B5P6	S-Nu	0.181	0.25	500	0.0028	1.00
B1P1	SD-SPLC	0.239	0.77	531		1.33
B1P2	SD-PLC	0.249	0.87	653		1.17
B1P3	P	0.265	0.17	828		0.17
B1P4	S-Nu	0.233	0.89	833	0.0046	1.00
B1P5	Ch-SPLC	0.244	1.97	975		1.81
B1P6	Ch-PLC	0.237	0.69	500		1.27
Moyenne (E. T)			0.73	720	0.0038	1.14^a (0.95)

Bloc-Parcelle (Cdt.Ac.)	Syst.cult	LS _i	A _i (t.ha ⁻¹)	R _i (EI _{30max}) _i	K _{mesuré/effective} .BLOC	C _i (A _i ,R _i ,K _{mesuré} BLOC/L Si)
B2P1	S-Nu	0.257	0.86	453	0.0074	1.00
B2P2	P	0.218	0.23	774		0.18
B2P3	SD-PLC	0.244	0.26	533		0.27
B2P4	Ch-PLC	0.249	0.50	481		0.56
B2P5	SD-SPLC	0.249	0.43	580		0.40
B2P6	Ch-SPLC	0.265	0.20	378		0.27
B3P1	S-Nu	0.233	0.77	453	0.0073	1.00
B3P2	SD-SPLC	0.190	0.51	774		0.48
B3P3	SD-PLC	0.209	0.12	533		0.15
B3P4	Ch-SPLC	0.298	0.64	481		0.61
B3P5	Ch-PLC	0.190	0.85	580		1.06
B3P6	P	0.288	n.d	378		n.d
B6P1	Ch-PLC	0.209	0.88	453		0.85
B6P2	P	0.218	0.37	774		0.20
B6P3	Ch-SPLC	0.163	0.43	533		0.45
B6P4	SD-PLC	0.204	0.31	481		0.29
B6P5	S-Nu	0.155	0.98	580	0.0109	1.00
B6P6	SD-SPLC	0.158	0.30	378		0.46
Moyenne (E. T)			0.52	533	0.0085	0.45^b (0.26)

Les lettres a et b en exposant : différence statistiquement significative entre les deux C_{moy}, au seuil 0.05;
n.d = donnée non disponible; parcelle S-Nu non prise en compte dans le calcul de moyenne

Les valeurs extrêmes de l'indice C sous le labour au chisel obtenues dans le bloc 5 (C_{Ch-PLC} 2.17 et $C_{Ch-SPLC}$ 3.48) sous les pluies futures tel qu'elles apparaissant dans au Tableau 4.26 ci-dessus peuvent sembler élevées vis-à-vis de la littérature : de ≈ 0 à 1.5 (Lal, 1994); de 0.006 à 0.6 (Wall et al., 2002); de 0.02 à 0.7 (Salik, 2019). Cependant, Salehi et al. (1991) ont obtenu des valeurs similaires à Lennoxville (C : 1.18 à 1.73).

Les statistiques de comparaison des différents systèmes cultureux sous les différents niveaux de pluies sont présentées au **Tableau 4.27** ci-dessous :

Tableau 4.27: Indice C moyen par système cultural suivant les deux niveaux de climat (pluies)

C_{moy.} par syst.cult.			
Syst.cult.	Cdt.Ac.(**)	Cdt.Fu.(**)	I.C C_{moy/Syst.cult.} (95%)
P	0.19	0.15	$0.11 \leq 0.16 \leq 0.22$ (S = 0.04)
Ch-PLC	0.82	1.41	$0.52 \leq 1.12 \leq 1.71$ (S = 0.57)
Ch-SPLC	0.44	<u>2.38</u>	$0.13 \leq 1.41 \leq 2.70$ (S = 1.23)
SD-PLC	<u>0.24</u>	1.11	$0.06 \leq 0.68 \leq 1.29$ (S = 0.59)
SD-SPLC	0.45	0.65	$0.12 \leq 0.55 \leq 0.98$ (S = 0.41)
S-Nu			
C_{moy./niveau des pluies} (E.T)	0.45^a (0.26)	1.14^b (0.95)	
I.C (95%)	$0.29 \leq 0.45 \leq 0.60$	$0.61 \leq 1.14 \leq 1.67$	
a et b en exposant : différence statistique significative entre C _{moy.Cdt.Ac.} et C _{moy.Cdt.Fu.} au seuil 0.05 (effet conditions)			
(**) : différence significative entre les C _{moy.} des syst.cult. à l'intérieur d'un même niveau de pluies au seuil 0.05 (effet traitement)			

L'effet climat (conditions) ou niveaux de pluies est significatif (a, b : **Tableau 4.27**) sur la variation de l'indice cultural : dans l'absolu, l'indice C connaît une augmentation de 2.5 fois avec l'intensification des pluies sous climat futur. Ce qui suppose un risque d'érosion potentielle du sol sous climat futur comparable à un taux d'exposition du sol de près de 2.5 fois le niveau d'exposition actuelle.

Il y a également une différence significative (**) entre les indices C_{moy.} des différents systèmes cultureux au sein d'un même niveau des pluies. Les différents systèmes cultureux présentent des niveaux d'efficacité différents quant à la protection du sol face à l'érosivité des pluies. Le SD-PLC a la plus faible valeur de l'indice C sous climat actuel. Sous climat futur, l'indice C sous Ch-SPLC connaît une augmentation de 5 fois sa valeur sous le niveau des pluies actuelles, ce qui

confirme le fait que le labour superficiel au chisel et sans plante de couverture offre la plus faible protection du sol et est donc moins efficace dans la perspective d'une agriculture de conservation des sols.

L'indice C moyen par système cultural (traitement) a varié de 0.19 (sous prairie-P) à 0.82 (sous chisel, Ch-PLC) dans les conditions des pluies actuelles (Cdt.Ac.) et de 0.15 (sous prairie-P) à 2.38 (sous Ch-SPLC) sous les conditions des pluies futures (Cdt.Fu.) (Tableau 4.27).

Le semis direct (SD-PLC, SD-SPLC) offre les plus faibles valeurs de l'indice C sous les deux conditions de climat, et c'est l'inverse pour ce qui est du labour superficiel au chisel (Ch).

Lorsque toutes les conditions et tous les systèmes culturaux sont pris en compte, l'indice C moyen sous pluies simulées à Saint-Lambert-de-Lauzon est de $C_{(\text{moy.sept2020})}$ 0.80 en excluant la parcelle de référence (S-Nu). Cette valeur est presque le double de la valeur annuelle ($C_{(\text{annuel})}$ 0.41) sous culture de maïs et sous labour conventionnelle tel qu'obtenu à Lennoxville (Québec) (Salehi et al., 1991) mais reste néanmoins < 1 .

Plusieurs facteurs explicatifs peuvent justifier cette différence à savoir le type et le nombre de systèmes culturaux installés, le nombre d'évènements de pluies simulés (répétitions), le stade de croissance des cultures installées et donc l'effet de couverture au sol qui en est résulté, le type d'érosion ayant prévalu pendant les simulations de pluies :

Effet nombre d'évènements de pluies simulés (répétitions)

- à Saint-Lambert-de-Lauzon, six systèmes culturaux allant de prairie (P) à sol nu (S-Nu), seulement 3 événements (répétitions) de pluies pour chacune des deux intensités (niveaux) de pluies simulées (soit un total de 6 pluies), aucune variabilité temporelle (pluies de 30 minutes simulées au cours d'une même journée au mois de septembre 2020);
- à Lennoxville, trois systèmes culturaux (maïs en semi direct, maïs sous culture conventionnelle et prairie permanente), 40 événements (répétitions) de pluies reçus, variabilité temporelle (déroulement des tests étalé sur cinq mois de mai à sept);

Effet stade de croissance des cultures installées (i.e., couverture au sol)

- à Saint-Lambert-de-Lauzon, l'expérience a couvert une seule saison de culture; une grande variabilité du taux de couverture du sol d'une parcelle à une autre au sein du bloc et aléatoirement d'un bloc à un autre. Les parcelles de S-Nu, Ch-PLC, Ch-SPLC et SD-SPLC ont des pourcentages de couverture anormalement faible variant de 0% à moins

de 12%, le passage du chisel (Ch) ayant involontairement et de façon inattendue introduit une grande variabilité dans l'effet couverture du sol;

- en ce qui concerne le stade de croissance des cultures en présence, à Lennoxville, les parcelles (maïs et prairies) ont bénéficié d'un effet de couverture relativement plus important (mais non estimé) puisque les cultures en place ont été considérées être rendues au stade (cycle végétatif) de développement-maturation;

Effet type d'érosion ayant prévalu

- le passage du chisel dans les parcelles le 8 juin 2020, date relativement rapprochée de la simulation des pluies (30 août au 04 septembre 2020) a mis en place les conditions non prévues et favorable à une possible «sur-érosion» dans ces parcelles (DMP et %ASE significativement différent de ceux issus des autres systèmes culturaux);
- enfin, la réaction du sol face à l'hétérogénéité relative de la pluie simulée a favorisé un écoulement concentré en filets plutôt qu'un écoulement en nappe.

Les plus fortes valeurs de l'indice C ont été obtenues sous les deux variantes du labour superficiel au chisel et sous les deux niveaux de climat (0.82 en Cdt.Ac. et 2.38 en Cdt.Fu. **Tableau 4.27**). Ces valeurs de l'indice C chevauchent la plage des valeurs de Salehi et al. (1991) à Lennoxville ayant eux aussi obtenu quelques valeurs de l'indice C > 1 (1.73 en mai ; 1.18 en juin) avec du maïs sous labour conventionnel en automne suivi du passage de rotoculteur pour l'enlèvement des racines provoquant ainsi la déstructuration du sol en place. Certaines parcelles du site de Saint-Lambert-de-Lauzon ont aussi subi un labour superficiel au chisel au printemps 2020 suivi des passages du vibroculteur pour l'ameublissement du lit de semis à une date beaucoup plus rapprochée des simulations de pluie prédisposant ainsi les traitements (parcelles) concernées à une sur érosion.

Compte tenu de l'importance du couvert au sol comme facteur régulateur de l'érosion hydrique des sols et qui transcende les traitements, l'analyse des résultats de l'indice cultural (C) sous pluies simulées tels qu'obtenus à Saint-Lambert-de-Lauzon (l'ensemble des effets conditions et traitement pris en compte) révèle l'existence d'une relation inverse (ajustée, n=26 parcelles-observations sur un total de 36 parcelles initiales) et significative (p-value < 0.0001) entre **l'indice cultural C** et le taux de couverture du sol tel qu'illustrée dans a **Figure 4.2** ci-dessous :

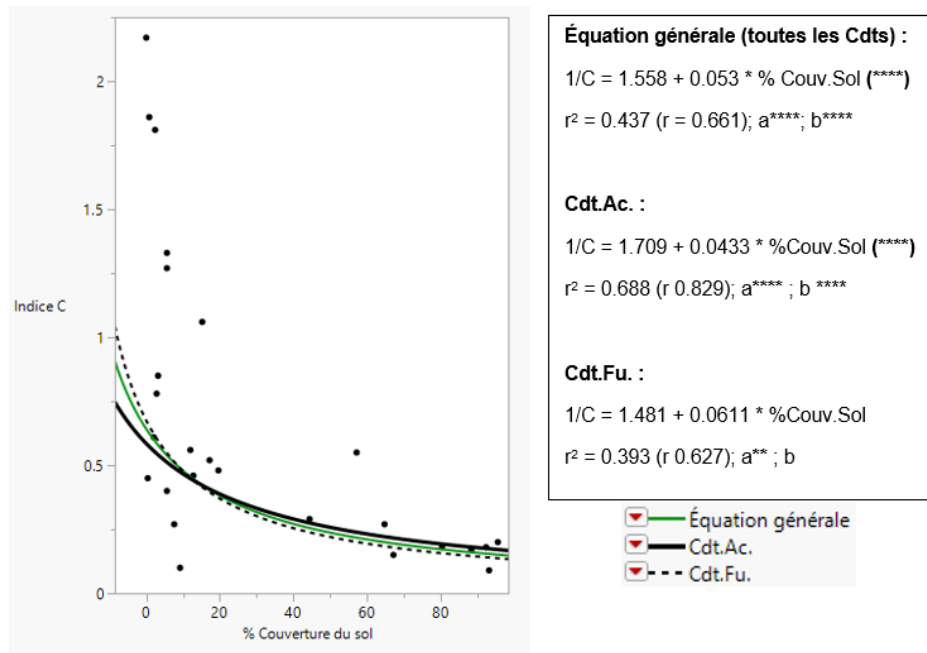


Figure 4.2 : Indice cultural C (CP) et pourcentage (%) de couverture du sol

La relation générale est forte ($r = 0.661$) et similaire à celle de Salehi et al. (1991) à Lennoxville.

La Figure 4.2 ci-dessus est superposable à la Figure 4.1 précédemment exposée présentant la variation de **l'érosion spécifique par érosivité de la pluie** ($\text{g.m}^{-2}.\text{EI}_{30\text{max}}^{-1}$) suivant l'évolution du pourcentage de couverture du sol (%).

Les données obtenues sous pluies simulées à Saint-Lambert-de-Lauzon permettent de mettre en relation ces deux variables aux extrêmes à savoir **l'indice cultural C** et **l'érosion spécifique par érosivité de la pluie** telle qu'illustrée à travers le graphique ci-dessous :

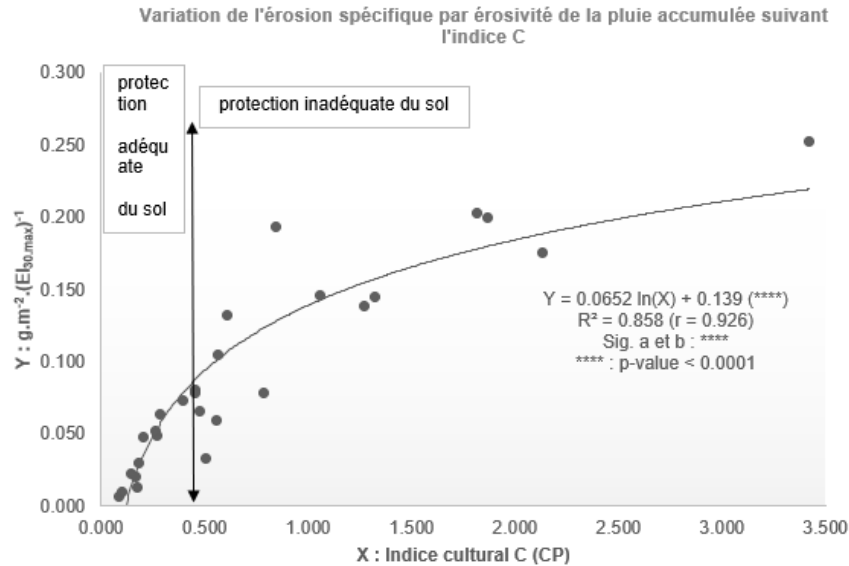


Figure 4.3 : Érosion spécifique par érosivité de la pluie reçue et indice cultural C

Selon la **Figure 4.3** ci-dessus, les faibles valeurs de C (protection adéquate du sol) correspondent à une faible érosion. Cependant, ces faibles valeurs sont contenues dans un intervalle à fort taux de variation (forte sensibilité de l'érosion spécifique par érosivité de la pluie reçue).

Des valeurs élevées de l'indice cultural ($C > 1$) traduisent une faible couverture (protection) du sol contre la force érosive des gouttes de pluies et conséquemment à un faible contrôle de l'érosion hydrique du sol par la pratique culturale concernée. Plusieurs expérimentations en contexte agricole québécois ont démontré que plus le couvert (résidus et plantes vivantes) est important, plus le ruissellement et les pertes qui en découlent diminuent (Koro et al., 1995; Ball-Coelho et al., 2000; Mabit et al., 2000). En effet, plus le facteur C est élevé, plus l'association culture et pratique culturale mise en place expose le sol à l'agressivité de la pluie le rendant encore plus vulnérable à l'érosion hydrique. Cette hypothèse se vérifie dans la relation ci-dessus déduite des données obtenues des conditions des pluies simulées de Saint-Lambert-de-Lauzon.

La **Figure 4.3** ci-dessus démontre également qu'au-delà d'une valeur « critique » de l'indice C (autour de 0.50), le sol ne bénéficie plus d'un taux de couverture suffisant pouvant assurer une protection adéquate contre l'érosion spécifique par érosivité de la pluie reçue, à tel point qu'au-delà de cette valeur critique, toute estimation des pertes de sol proportionnellement à l'érosivité de la pluie reçue est entachée d'une incertitude non négligeable autour de la ligne de meilleure estimation (dispersion des données autour de la courbe de régression).

Selon la **Figure 4.4** ci-dessous, le semis direct (SD) démontre un niveau d'efficacité de protection du sol contre l'érosion hydrique similaire à celui de la prairie sous les deux conditions de climats (pluies actuelles et pluies futures). Le labour superficiel au chisel (Ch) quant à lui révèle une large variabilité (hétérogénéité) ce qui pourrait traduire une incertitude quant à la contribution effective de cette pratique culturale à la réduction de la force érosive des pluies futures sur les sols dans un scénario d'intensification des pluies (CC).

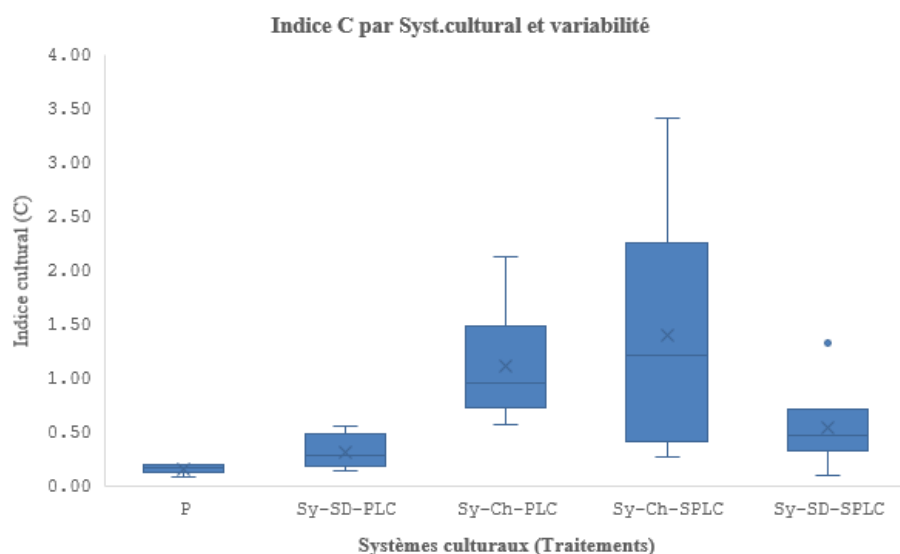


Figure 4.4 : Érosion spécifique par érosivité de la pluie reçue et indice cultural C

Sous les deux niveaux de pluies, une combinaison soya avec plante de couverture sous semis direct (SD-PLC) ($C_{\text{moy.}}$ 0.55 – 0.68, **Tableau 4.27** plus haut) au printemps assure une protection adéquate du sol au même titre que la prairie.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La collecte et l'analyse des données sur l'érosion hydrique du sol sous deux intensités de pluies simulées sur six systèmes culturaux à la station de recherche de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon a permis de dégager une série de résultats préliminaires applicables aux conditions du Québec pour les systèmes culturaux étudiés.

Effets principaux :

A1- intensification des pluies (pluies futures versus pluies actuelles) :

- les pluies futures ont montré un accroissement significatif du volume (L) et du coefficient de ruissellement (%), ainsi que des exportations de sédiments ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) de 47%, 29% et 48% respectivement par rapport aux pluies actuelles ;
- les pourcentages d'exportations hors parcelles de M.O et d' N_t présentent des accroissements significatifs respectivement de 71% et de 86% sous les conditions du climat futur. Cependant, les exportations d' o-PO_4 et de $\text{P}_{\text{bio.total}}$ n'ont quant à elles présenté qu'une simple tendance à l'augmentation de l'ordre de 42% et 53% sous les pluies futures ;
- sous les deux niveaux de pluie, l'exportation sélective des particules fines dans les érodats présente un profil similaire : un appauvrissement à l'extrême en argiles (0.07 – 0.06) et un enrichissement net en limons (1.63 – 1.58), contre une tendance à l'équilibre (neutralité : 1.02) pour ce qui est des sables ;
- la comparaison des deux niveaux de climat (ratio) montre que les pluies futures présentent un accroissement de l'ordre de 25% sur le taux d'exportation sélective des sables comparativement aux pluies actuelles ;
- pour ce qui est du transport sélectif des éléments d'intérêt agronomique (P-M_3 , K-M_3 , Ca-M_3 , Al-M_3 , Mg-M_3 , C_t , N_t), les résultats obtenus n'ont pas permis de pouvoir dégager un profil unique. Seuls l' Al-M_3 et le C_t présentent une tendance à de légères augmentations de l'ordre de 20% et 12% respectivement sous le climat futur.

A2- travail du sol (labour au chisel versus semis direct) :

- le travail réduit du sol au chisel (Ch) a favorisé une exportation significative des sédiments ayant atteint le double du taux d'érosion généré par la pratique alternative à savoir le

semis direct ($Ch/SD = 2.26^{***}$) et ceci malgré le faible accroissement du ruissellement de surface (11% - 15%) issus du labour au chisel comparé au semis direct ;

- les taux d'exportation de la M.O, de l' N_t et du $P_{bio.total}$ enregistrés sous le labour au chisel ont été supérieurs au double de ceux produits par le semis direct (ratio de 2.40^{**}) et 1.14 fois supérieurs à ceux des $o-PO_4$;
- le labour au chisel et le semis direct n'ont eu aucun effet sur l'exportation sélective des fractions fines (argiles, limons et sables) ;
- pour ce qui est du transport sélectif des autres nutriments, l'on a observé deux effets :
 - des accroissements de l'ordre de 16%, 18% et 17% respectivement au niveau de la M.O, du C_t et de l' N_t liés au labour au chisel par rapport au semis direct ; et
 - des ratios de l'ordre de 0.72 à 0.93 pour le P-M₃, le K-M₃, le Ca-M₃, l'Al-M₃ et le Mg-M₃ entre le labour au chisel et le semis direct (Ch/SD).

A cet effet, l'on observe que le labour superficiel au chisel, pulvérisation de la structure de la surface du sol, expose et disponibilise davantage la M.O, le C_t et l' N_t au mécanisme de l'érosion facilitant ainsi leur exportation hors parcelles contrairement aux autres nutriments plus ou moins enfouis.

A3- couvert au sol (sans PLC versus présence de plantes de couverture/PLC)

- l'effet plante de couverture n'est pas significatif sur le ruissellement malgré la réduction de l'ordre de 29% sur les pertes de sols et de 16% sur le volume de ruissellement enregistrés suite à l'introduction des PLC ;
- les données de simulations des pluies ont montré l'existence d'une relation exponentielle décroissante et significative entre le pourcentage de couvert au sol et l'érosion spécifique par érosivité de la pluie reçue mettant ainsi en évidence le caractère prépondérant de cette variable (explicative) dans le mécanisme de l'érosion hydrique des sols agricoles ;
- aucun effet couvert au sol n'a été observé au niveau de l'exportation sélective des argiles, des limons et des sables présents dans le sol en place ;
- c'est le même constat au niveau des différents éléments Mehlich 3 cités plus haut ;
- enfin pour ce qui est des pertes (exportations) de la M.O, de l' N_t , des $o-PO_4$ et du $P_{bio.total}$, l'effet couvert au sol bien que non significatif a quand même permis la réduction de leur taux d'exportation à des pourcentages de l'ordre de 18% jusqu'à 57% ;
- de cette synthèse sur les effets principaux, il en ressort que la dynamique des exportations a obéi à deux «gradients décroissants de forces» :

- [le travail du sol, suivi du niveau des pluies, suivi des plantes couvre sol] jouent un rôle prépondérant dans les pertes de sol, de $P_{\text{bio.total}}$ (phosphore particulaire), d' N_{t} et de M.O ; alors que,
- [le niveau des pluies, suivi des plantes couvre sol et du travail du sol] quant à eux jouent un rôle prépondérant dans le ruissellement et les pertes d'o-PO₄ (ortho-phosphates).

Effets croisés :

B1- Climat et travail du sol

La combinaison des niveaux des pluies futures et le labour au chisel a amplifié les taux de ruissellement, les pertes de sol, les exportations de M.O. et de nutriments (N_{t} , o-PO₄, $P_{\text{bio.total}}$) ainsi que l'exportation sélective de la M.O. (%), du C_{t} et de l' N_{t} . Cette combinaison n'a aucun effet sur le transport sélectif des nutriments Mehlich 3. Le ratio des pertes de sols sous le labour au chisel et sous le semis direct (Ch/SD) augmente significativement de 1.82(*) sous les conditions des pluies actuelles à 2.53(**) sous les conditions des pluies futures. L'évolution des taux d'exportation de M.O., d' N_{t} , d'ortho-phosphates et de $P_{\text{bio.total}}$ sous le labour au chisel et entre les deux niveaux de pluies [Ch (Cdt.Fu./Cdt.Ac.)] a clairement établi une tendance à la «sur-exportation» de la M.O.(2.76**), de l' N_{t} (3.43***), des o-PO₄(1.6) et du $P_{\text{bio.total}}$ (2.20**) sous l'effet combiné pluies futures-labour au chisel.

B2- Climat et plantes de couverture

L'intensification des pluies (Cdt.Fu./Cdt.Ac.) a significativement exacerbé les taux d'érosion d'un ratio de 1.49 sous un système cultural avec PLC à un ratio de 2.77(**) sous le système de gestion alternatif (SPLC).

L'effet intensification des pluies (Cdt.Fu./Cdt.Ac.) sous un système agricole en l'absence de plantes intercalaires [(SPLC) (Cdt.Fu./Cdt.Ac.)] a confirmé l'hypothèse d'une tendance à l'augmentation des exportations de M.O.(3.30*), d' N_{t} (3.54*), d'o-PO₄(1.90*) et de $P_{\text{bio.total}}$ (2.97**).

B3- Travail du sol et plante de couverture

La comparaison des extrêmes à savoir le SD-PLC et le Ch-SPLC met en évidence le risque accru de pertes (exportations) sous le climat futur comparativement au climat actuel selon :

- $\left(\frac{Ch-SPLC}{SD-PLC}\right) Cdt. Ac. :$ 420/230 (perte de sol, kg.ha⁻¹ : **1.83 fois**), 195/103 (M.O, g.m⁻² : **1.89 fois**), 8260/4803 (N_t, mg.m⁻² : **1.72 fois**), 0.45/0.26 (o-PO₄, mg.m⁻² : **1.73 fois**), 17/9 (P_{bio.total}, mg.m⁻² : **1.89 fois**), contre,
- $\left(\frac{Ch-SPLC}{SD-PLC}\right) Cdt. Fu. :$ 1905/665 (perte de sol, kg.ha⁻¹ : **2.86 fois**), 1180/353 (M.O, g.m⁻² : **3.34 fois**), 56607/14495 (N_t, mg.m⁻² : **3.90 fois**), 1.18/0.95 (o-PO₄, mg.m⁻² : **1.24 fois**), 92/31 (P_{bio.total}, mg.m⁻² : **2.97 fois**).

Ce profil de résultats permet d'identifier le système de gestion semis direct avec plantes intercalaires (SD-PLC) comme une pratique de gestion bénéfique avec un impact favorable sur la réduction des pertes de sol et des exportations des charges (M.O, azote et phosphore) comparativement au travail réduit du sol au chisel sans plantes intercalaires (Ch-SPLC).

L'utilisation de la variation de l'intensité de pluie comme covariable a permis de réduire le niveau du biais introduit par l'hétérogénéité de la pluie reçue par les parcelles individuelles à l'intérieur d'un même bloc et d'améliorer le lien (r^2) entre l'effet principal système cultural ou traitements en tant que variable indépendante et les variables réponse ou d'intérêt pour l'étude. Elle ressort l'influence effective des systèmes culturaux sur les moyennes ajustées du ruissellement, des pertes de sol et de nutriments lorsqu'on supprime la variabilité intra bloc (inter-parcelles) des intensités de pluies. Autrement, un meilleur coefficient d'uniformité des pluies simulées (> 90%) permettrait de mieux ressortir la différence des moyennes des variables réponse entre les différents traitements ou systèmes culturaux, ce qui renforcerait davantage cette première série de tendance-observations établissant l'avantage du semis direct (SD-PLC) sur le labour au chisel (Ch-SPLC).

Les données obtenues sous pluies simulées ont permis d'établir des régressions fortement significatives et positives entre la M.O exportée (kg.ha⁻¹) et le P-M₃ ($R^2 = 0.94$), et le P_{bio.total}. ($R^2 = 0.95$) aussi bien en climat actuel qu'en climat futur, ce qui confirme une fois de plus tout l'intérêt agronomique et environnemental de l'étude malgré son caractère prospectif.

Facteurs K, LS et C

L'érodabilité moyenne et médiane du site sont respectivement de $0.019 \text{ t.ha.h.}(\text{ha.MJ.mm})^{-1}$ et de $0.017 \text{ t.ha.h.}(\text{ha.MJ.mm})^{-1}$.

En discriminant l'érodabilité du site, le rapport $K_{\text{calculée.moy.}(\text{Cdt.Fu.})} / K_{\text{calculée.moy.}(\text{Cdt.Ac.})}$ est de 1.11 : une variation statistiquement non significative.

L'érodabilité moyenne mesurée (bloc) sous pluies simulées ($K_{\text{(mesurée/effective par Bloc)}}$) varie de 0.0038 à 0.0085 respectivement pour les conditions de climat futur et celles de climat actuel. Cette érodabilité est 2 à 5 fois inférieure à l'érodabilité moyenne obtenue par le nomographe de Wischmeier (0.018 en Cdt. Ac. – 0.020 en Cdt. Fu.).

Le facteur topographique moyen calculé sous pluie simulée sur l'ensemble du site ($LS_{\text{moy.}}$) est de 0.234 variant de 0.155 à 0.298.

Indépendamment des conditions, l'indice cultural moyen sous pluies simulées ($C_{\text{moy.}}$ 0.800) à Saint-Lambert-de-Lauzon varie de 0.15 – 0.19 (Prairie) à 0.44 – 2.38 (Ch-SPLC). Suivant les deux niveaux de climat et indépendamment des systèmes cultureux, l'indice $C_{\text{moy.}}$ varie de 0.45 (sous climat actuel) à 1.14 (sous climat futur), une différence statistiquement significative.

Sous climat futur (Cdt.Fu.) et même en l'absence de plante de couverture (SPLC), le SD limite déjà (positivement et significativement) l'indice C à 0.65, valeur 3.7 fois inférieure à celle de l'indice C sous le labour au chisel sans plante de couverture (Ch-SPLC : 2.38). Sous climat actuel, l'indice C sous SD-PLC (0.24) est 3.4 fois inférieure à la valeur de l'indice C sous Ch-PLC (0.82). Le ratio avec PLC (3.4) étant légèrement inférieur au même ratio mais sans PLC (3.7) suggère une tendance à la prépondérance du facteur travail du sol (et particulièrement le SD) sur le facteur couvert au sol (avec ou sans plantes de couverture) sur le contrôle de l'érosion hydrique du sol : intuitivement, puisque le travail du sol modifie-affecte le taux de couverture du sol.

Les résultats de l'indice cultural tels qu'obtenus à Saint-Lambert-de-Lauzon (conditions et traitements) montrent :

- une relation de décroissance progressive et significative de l'érosion spécifique par érosivité de la pluie avec l'augmentation du pourcentage de couvert au sol ($r = 0.44$ p-value 0.03; $r = 0.71$ p-value 0.04),
- une relation inverse entre l'indice C et le pourcentage de couverture au sol ($r_{\text{Cdt.Ac.}} = 0.829$; $r_{\text{Cdt.Fu.}} = 0.627$),

- une relation logarithmique significative entre l'érosion spécifique par érosivité de la pluie et l'indice C ($r = 0.911$ et $p\text{-value} < 0.0001$).

Tel qu'anticipé, le semis direct (SD) procure une efficacité comme pratique anti érosive tout aussi comparable à celle d'une prairie (P) et nettement supérieure à celle du labour au chisel (Ch).

Limites de l'étude - perspectives

Bien que le sol en place ce soit restructuré (Annexe 19 A) après le passage du rotoculteur (conditionnement du sol prévu reproduire les conditions futures, mais infructueux en définitive), le labour superficiel au chisel simulant un labour printanier à défaut de l'avoir fait en automne comme initialement prévu a introduit un effet significatif (DMP) et confondu à l'effet de la variable intensité de pluie.

Ce passage «tardif» du chisel et quelque temps seulement (trois mois) avant les simulations de pluie peut avoir accentué le biais au niveau des résultats des traitements Ch-SPLC et Ch-PLC surtout en climat futur.

Il y a eu répétition des précipitations à l'échelle des parcelles principales (blocs). Cependant, compte tenu de la distribution aléatoire des parcelles secondaires (traitements) au sein des blocs et du niveau d'uniformité des pluies simulées ($< 80\%$), il en résulte qu'il n'y a pas eu une véritable répétition des pluies pour les mêmes traitements au sens strict et comme cela aurait pu être le cas si la simulation de pluie se produisait à l'échelle de chacune des parcelles secondaires.

Les parcelles de sol nu (S-Nu) bien que répondant au critère d'absence permanente de couvert (ce qui a favorisé l'installation d'une croûte de battance) aurait dû bénéficier d'un travail régulier (en continu). Cet état de faits oblige à relativiser les résultats individuels du facteur C tel qu'obtenus ici. En effet, les valeurs de $C > 1$ obtenus ici devraient uniquement traduire le fait que la pratique cultural en question est loin de garantir une protection adéquate du sol dans les conditions de nos simulations de pluies.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Abiven S (2004) Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol. Thèse de doctorat en Biologie et Agronomie. Sciences de la Terre. (Agrocampus-Ecole nationale supérieure d'agronomie de Rennes). 263pp.
- Afoua M & Elies HM (2017) Évaluation Expérimentale de l'Irrigation par Aspersion Non Mécanisée dans le Contexte Tunisien. *Agriculture* 8(1):39-48.
- Al-Durrah M & Bradford J (1982) The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. *Soil Science Society of America Journal* 46(5):1086-1090.
- Alberts EE, Moldenhauer WC & Foster G (1980) Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill flow. *Soil Science Society of America Journal* 44(3):590-595.
- Anderson D, Gregorich E & Verity G (1985) Erosion and cultivation effects on the loss of organic matter from prairie soils. *Soils and Crops Workshop*. 8pp.
- Andreu V, Imeson A & Rubio JL (2001) Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. *Catena* 44(1):69-84.
- Angers D & Carter M (2020) Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils. *Structure and organic matter storage in agricultural soils*, CRC Press. p 193-211.
- Anonyme (1985) Les terres agricoles et les ressources hydrauliques au Canada : situation et perspectives. . Doc. No. A22-108/1985.
- Atlas D & Plank VG (1953) Drop-Size History during a Shower. *Journal of Atmospheric Sciences* 10(4):291-295.
- Audet R, Côté H, Bachand D & Mailhot A (2012) Atlas agroclimatique du Québec/Évaluation des opportunités et des risques agroclimatiques dans un climat en évolution. CRAAQ-Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 105pp.
- Bakker MM, Govers G & Rounsevell MD (2004) The crop productivity–erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena* 57(1):55-76.
- Ball-Coelho B, Roy R & Swanton C (2000) Tillage and cover crop impacts on aggregation of a sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science* 80(2):363-366.
- Barnett A, Dooley A & Smith G (1978) Soil erosion and sediment movement under sugarcane culture on the flat lands of southern Louisiana. *Transactions of the ASAE* 21(6):1144-1150.
- Basche AD, Kaspar TC, Archontoulis SV, Jaynes DB, Sauer TJ, Parkin TB & Miguez FE (2016) Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management* 172:40-50.
- Beasley D, Huggins L & Monke a (1980) ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE* 23(4):938-0944.
- Beaudet R (1999) Les eaux souterraines. Consultation publique sur la gestion de l'eau au Québec, Document de soutien à l'atelier de travail de la Commission du 3.
- Bélanger G & Bootsma A (2002) Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Québec. 65e congrès de l'Ordre des Agronomes du Québec. Changements climatiques :

comprendre pour mieux agir. Disponible en ligne: [http://www. agrireseau. qc. ca/agroenvironnement/documents/Belanger.pdf](http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Belanger.pdf) (consulté le 8 mai 2012)

Benavidez R, Jackson B, Maxwell D & Norton K (2018) A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R) USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(11):6059-6086.

Bernard A (1987) Le simulateur de pluie 2ème génération: note technique.

Bernard C (1996) Estimation de l'érodabilité des principales séries de sol du Québec, à l'aide du nomographe de Wischmeier. *Agrosol* 9(2):6-12.

Bidon S (1994) Etude de l'érodibilité par simulation de pluie de trois sols viticoles méditerranéens. Mémoire d'ingénieur. ORSTOM-Institut de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération & ESAP-École Supérieure d'Agriculture de Purpan. 149 pp.

Bilotta G & Brazier R (2008) Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water research* 42(12):2849-2861.

Blais S (2002) La problématique des cyanobactéries (algues bleu-vert) à la baie Missisquoi en 2001. *Agrosol* 13(2):103-110.

Blanco-Canqui H, Gantzer CJ, Anderson SH, Alberts EE & Thompson AL (2003) Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus losses. (University of Missouri-Columbia). *Soil Science Society of America Journal*. 10 pp.

Boiffin J (1984) La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. (Institut National Agronomique Paris Grignon). 104pp.

Bootsma A, Anderson D & Gameda S (2004) Potential impacts of climate change on agroclimatic indices in southern regions of Ontario and Quebec. *Technical Bulletin ECORC Contribution* (03-284):69-92.

Bootsma A, Gameda S, McKenney D, Schut P, Hayhoe H, de Jong R & Huffman E (2001) Adaptation de la production agricole au changement climatique dans le Canada atlantique. Rapport final de l'équipe du projet A214 du Fonds d'action pour le changement climatique. Disponible en ligne: [http://onerc. developpementdurable. gouv. fr/system/files/Adaptation% 20de% 20la% 20production% 20agricole% 20au% 20changemen 20](http://onerc.developpementdurable.gouv.fr/system/files/Adaptation%20de%20la%20production%20agricole%20au%20changemen20).

Campbell C (1978) Soil organic carbon, nitrogen and fertility. *Developments in soil science*, Elsevier, Vol 8. p 173-271.

Carpenter M, Nagell K, Tomasello M, Butterworth G & Moore C (1998a) Social cognition, joint attention, and communicative competence from 9 to 15 months of age. *Monographs of the society for research in child development* :i-174.

Carpenter SR, Caraco NF, Correll DL, Howarth RW, Sharpley AN & Smith VH (1998b) Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological applications* 8(3):559-568.

Carter MR (2002) Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy journal* 94(1):38-47.

- Carter MR & Gregorich EG (2007) Soil sampling and methods of analysis. CRC press. Canadian Society of Soil Science. 198pp.
- Carter MR & Stewart BA (1995) Structure and organic matter storage in agricultural soils. CRC press. 488pp.
- Casenave A & Valentin C (1989) Les états de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration, éd. ORSTOM. 231pp.
- Cassol EA, Silva TSd, Eltz FLF & Levien R (2018) Soil erodibility under natural rainfall conditions as the K factor of the universal soil loss equation and application of the nomograph for a subtropical Ultisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42. 12p.
- Chow T, Rees H & Monteith J (2000) Seasonal distribution of runoff and soil loss under four tillage treatments in the upper St. John River valley New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Soil Science* 80(4):649-660.
- Christiansen J (1942) Irrigation by Sprinkling. Bulletin n. 670. University of California, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, Berkeley, California, USA. *Journal of Water Resources and Protection*, Vol.(6(11)). 124p.
- Clément R & Galand A (1979) Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression. Eyrolles. 182p.
- Cook D, Dickinson W, Rudra R & Wall G (1985) A microcomputer model for evaluation of conservation systems. Microfiche collection.
- Corak S, Kaspar T & Meek D (1993) Evaluating methods for measuring residue cover. *Journal of soil and water conservation* 48(1):70-74.
- Dabney SM (1998) Cover crop impacts on watershed hydrology. *Journal of Soil and Water Conservation* 53(3):207-213.
- Dubé A (1975) L'eau et l'érosion des sols. *Ressources* 6(4):8-15.
- Duchemin M, Rousseau AN, Lamontagne L & Villeneuve J-P (2001) Utilisation des technologies géomatiques pour spatialiser le facteur K d'érodabilité des sols du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec. *Canadian journal of soil science* 81(4):423-437.
- Elustondo J, Laverdière M, Angers D & N'dayegamiye A (1990) Etude comparative de l'agregation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs ou en prairie. *Canadian Journal of Soil Science* 70(3):395-402.
- Emerson W (1967) A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Soil Research* 5(1):47-57.
- Esteves M, Planchon O, Lapetite JM, Silvera N & Cadet P (2000) The 'EMIRE' large rainfall simulator: design and field testing. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group* 25(7):681-690.
- Farres P (1987) The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena* 14(1-3):119-130.
- Fister W, Iserloh T, Ries JB & Schmidt R-G (2012) A portable wind and rainfall simulator for in situ soil erosion measurements. *Catena* 91:72-84.
- Foster G, McCool D, Renard K & Moldenhauer W (1981) Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation* 36(6):355-359.

- Franzluebbers A & Arshad M (1996) Water-stable aggregation and organic matter in four soils under conventional and zero tillage. *Canadian Journal of Soil Science* 76(3):387-393.
- Friedrich T, Derpsch R & Kassam A (2012) Overview of the global spread of conservation agriculture. *Field Actions Science Reports. The journal of field actions* (Special Issue 6). 8p.
- Fuchaka PW (1993) Evaluation and calibration of field techniques to quantify crop cover. (University of Nairobi).108pp. Master of science thesis. University of Nairobi. 108pp.
- Gabriels D & Moldenhauer W (1978) Size distribution of eroded material from simulated rainfall: Effect over a range of texture. *Soil Science Society of America Journal* 42(6):954-958.
- Gasser M, Dufour-L'Arrivée C, Grenier M & Perron M (2013) Bandes végétatives de saule et de graminées en baissières pour réduire les charges polluantes diffuses et produire de la biomasse dédiée. Rapport final déposé au MAPAQ-Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire. Inst. Rech. Agroalimentaire, Villeneuve-d'Ascq, France . 61pp.
- Gasser M, Tremblay M, Belzile L & Patry A (2017) L'aménagement de risbermes et de baissières pour augmenter l'efficacité des bandes végétatives filtrantes autour des enclos d'hivernage. Rapport final IRDA. Inst. Rech. Agroalimentaire, Villeneuve-d'Ascq, France.56pp.
- Giroux M, Duchemin M, Michaud A, Beaudin I, Landry C, Enright P, Madramootoo C & Laverdière M (2008) Relation entre les concentrations en phosphore particulaire et dissous dans les eaux de ruissellement et les teneurs en P total et assimilables des sols pour différentes cultures. (French.) *Agrosolutions* 19:4-14.
- Gombault C, Madramootoo C, Michaud A, Beaudin I, Sottile M, Chikhaoui M & Ngwa F (2015) Impacts of climate change on nutrient losses from the Pike River watershed of southern Québec. *Canadian Journal of Soil Science* 95(4):337-358.
- Gregorich E, Carter M, Angers D, Monreal C & Ellert B (1994) Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian journal of soil science* 74(4):367-385.
- GTCS (2002) Le système canadien de classification des sols, 3^{ème} éd. Agriculture et Agroalimentaire Canada et les Presses scientifiques du CNRC. 196pp.
- Gumiere SJ (2020) Revue Bibliographique sur les Modèles d'Érosion et Pratiques Anti-Érosifs. Notes de cours. 63pp.
- Haygarth PM & Jarvis SC (2002) Agriculture, hydrology, and water quality. Institute of Grassland and Environmental Research, North Wyke Research Station, Devon, UK. CABI Publishing. 499pp.
- Kaspar T, Radke J & Laflen J (2001) Small grain cover crops and wheel traffic effects on infiltration, runoff, and erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* 56(2):160-164.
- Kathiravelu G, LUCKE T, WHITE R & NICHOLS PW (2014) Review on design requirements of a rainfall simulator for urban stormwater studies. *Proceedings of the 2014 Stormwater Queensland Conference, Townsville, Australia.* p 6-8.
- Kavian A, Hoseinpoor Sabet S, Solaimani K & Jafari B (2017) Simulating the effects of land use changes on soil erosion using RUSLE model. *Geocarto International* 32(1):97-111.
- Ketcheson JW (1980) Long-range effects of intensive cultivation and monoculture on the quality of southern Ontario soils. *Canadian journal of soil science* 60(3):403-410.

- Kincaid DC, Solomon KH & Oliphant JC (1996) Drop size distributions for irrigation sprinklers. Transactions of the ASAE 39(3):839-845.
- Koro N, Bernard C & Laverdière MR (1995) Contrôle du ruissellement, de l'érosion et des pertes de phosphore par les résidus de culture, sous pluie simulée. Étude Gestion Sols 2:173-181.
- Laamrani A, Joosse P & Feisthauer N (2017) Determining the number of measurements required to estimate crop residue cover by different methods. Journal of Soil and Water Conservation 72(5):471-479.
- Lagacé R (2016) Aménagement des cours d'eau et conservation des sols. (Cours GAE-3005). Université Laval. Département des sols et de génie agroalimentaire. 344pp.
- Lal R (1988) Soil erosion research methods Book, R.Lal 1st. ed. Soil and Water Conservation Society.
- Lal R (1994) Soil erosion research methods. R.Lal 2nd. ed. Soil and Water Conservation Society. 352pp.
- Lal R, Delgado J, Groffman P, Millar N, Dell C & Rotz A (2011) Management to mitigate and adapt to climate change. Journal of Soil and Water Conservation 66(4):276-285.
- Langdale G, Blevins R, Karlen D, McCool D, Nearing M, Skidmore E, Thomas A, Tyler D & Williams J (1991) Cover crop effects on soil erosion by wind and water. Cover crops for clean water :15-22.
- Larson W & Pierce F (1991) Conservation and enhancement of soil quality. Evaluation for sustainable land management in the developing world: proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai, Thailand, 15-21 September 1991. [Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management, 1991].
- Lavee H, Sarah P & Imeson A (1996) Aggregate stability dynamics as affected by soil temperature and moisture regimes. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 78(1):73-82.
- Laws JO & Parsons DA (1943) The relation of raindrop-size to intensity. Eos, Transactions American Geophysical Union 24(2):452-460.
- Le Bissonnais Y (1988) Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. (Thèse de doctorat de science de la terre). Université d'Orléans. 205pp.
- Le Bissonnais Y & Le Souder C (1995) Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Etude et Gestion des sols 2(1):43-56.
- Le Bissonnais YI (1996) Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. European Journal of soil science 47(4):425-437.
- Lemmen DS, Warren F, Lacroix J, Bush E & Lemmen W (2008) Vivre avec les changements climatiques au Canada. Gouvernement du Canada Ottawa. 452pp.
- Lloyd DS, Koenings JP & Laperriere JD (1987) Effects of turbidity in fresh waters of Alaska. North American Journal of Fisheries Management 7(1):18-33.
- M'hamed C (2018) L'agriculture de conservation comme alternative pour améliorer la résistance des sols à l'érosion hydrique dans le Nord de la Tunisie. Annales de l'INRAT, Vol.9. 13pp.
- Mabit L, Bernard C & Laverdière M (2000) L'étude de l'érosion hydrique au Québec. Vecteur environnement 33(200):34-43.

- Madramootoo CA (1988) Rainfall and runoff erosion indices for eastern Canada. Transactions of the ASAE 31(1):107-0110.
- Mailhot A, Duchesne S, Caya D & Talbot G (2007) Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). Journal of hydrology 347(1-2):197-210.
- MAPAQ (2019) Profil Regional de l'Industrie Bioalimentaire au Québec (Estimation pour l'année-2019). Gouvernement du Québec. 100pp.
- www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/md/statistiques/Pages/donneesregionales.aspx (2020)
- Marshall JS & Palmer WMK (1948) THE DISTRIBUTION OF RAINDROPS WITH SIZE. Journal of Atmospheric Sciences 5(4):165-166.
- Martel Y & Laverdière M (1976) Facteurs qui influencent la teneur de la matière organique et les propriétés d'échange cationique des horizons Ap des sols de grande culture du Québec. Canadian Journal of Soil Science 56(3):213-221.
- Mathur S & Wang C (1991) Soil quality in the Canadian context-1988 discussion papers.
- Mehdi B, Lehner B, Gombault C, Michaud A, Beaudin I, Sottile M-F & Blondlot A (2015) Simulated impacts of climate change and agricultural land use change on surface water quality with and without adaptation management strategies. Agriculture, Ecosystems & Environment 213:47-60.
- Mehdi BB (2014) Scenarios and implications of land use and climate change on water quality in mesoscale agricultural watersheds. McGill University (Canada). 247pp.
- Mehuys G (1981) L'érosion par l'eau. Conseil des Productions Végétales du Québec, Agdex 572.
- MENV (2004) Interprétation du cadre écologique de référence pour l'aménagement du territoire de la MRC de la Matapédia. Document de travail Août 2004. 61pp.
- Messiga AJNA (2010) Transferts du phosphore dans les sols de grandes cultures. Thèse de doctorat (PhD) en sols et environnement. Université Laval. 240pp
- Meyer L (1979) Methods for attaining desired rainfall characteristics in rainfall simulators. Agricultural Reviews and Manuals ARM W.
- Meyer L (1988) Rainfall simulators for soil conservation research. In "Soil erosion research methods" R. Lal, editor. Soil & Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA.
- Meyer LD & McCune DL (1958) Rainfall simulator for runoff plots. Agricultural engineering 39(10):644-648.
- Michaud A, Beaudin I, Deslandes J, Bonn F & Madramootoo C (2007) SWAT-predicted influence of different landscape and cropping system alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of south-western Québec. Canadian journal of soil science 87(3):329-344.
- Michaud A, Gombault C, Cyr J-F & Côté H (2012) Implications des scénarios climatiques futurs sur la gestion des sols et de l'eau à la ferme. CRAAQ. 20pp.
- Michaud A, Seydoux S, Beaudin I & Gombault C (2008) Beneficial management practices and water quality: Hydrological modelling of two basins in the Montérégie Region (Québec). National Agri-Environmental Standards Initiative Technical Series Report (4-65):129.

- Michaud AR (1987) Soil erodibility indices for southern Québec soils derived under variable intensity rainfall simulation. Master of Science thesis. McGill University. 144pp.
- Mohamadi MA & Kavian A (2015) Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. *International soil and water conservation research* 3(4):273-281.
- Montgomery DR (2007) Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(33):13268-13272.
- Moore I, Hirschi M & Barfield B (1983) Kentucky Rainfall Simulator [suitable for both large-and small-scale studies of the erosion, infiltration, and runoff processes]. *Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural and Biological Engineers]*. Vol.26(4). 1085-1089.
- Morgan RPC (2005) *Soil Erosion and Conservation*, 3rd edition. Blackwell Publishing, Oxford, 2005. x + 304 pp. . *European Journal of Soil Science* 56(5):686-686.
- Morsli B, Mazour M, Mededjel N, Hamoudi A & Roose E (2004) Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie. *Sécheresse* 15(2):96-104.
- Mutchler C & McDowell L (1990) SOIL LOSS FROM COTTON WITH WINTER COVER CRO P. *Transactions of the ASAE* 33(2):432-0436.
- Mutchler C & Murphree C (1981) Prediction of erosion on flatlands. Soil conservation problems and prospects:[proceedings of Conservation 80, the International Conference on Soil Conservation, held at the National College of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, UK, 21st-25th July, 1980]/edited by RPC Morgan. Chichester [England], Wiley, c1981.
- Neal O (1944) Removal of nutrients from the soil by crops and erosion. *Journal of the American Society of Agronomy*, vol.36(7) : 601-607.
- Nearing M, Jetten V, Baffaut C, Cerdan O, Couturier A, Hernandez M, Le Bissonnais Y, Nichols M, Nunes J & Renschler C (2005) Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena* 61(2-3):131-154.
- Neff EL (1979) Why rainfall simulation. *Proceedings of rainfall simulator workshop, Tucson, Az. USDA-SEA ARM-W-10. p 3-7.*
- Ouranos (2015) *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos. 415p.
- Pérez-Latorre FJ, de Castro L & Delgado A (2010) A comparison of two variable intensity rainfall simulators for runoff studies. *Soil and Tillage Research* 107(1):11-16.
- Perfect E & Kay B (1990) Relations between aggregate stability and organic components for a silt loam soil. *Canadian journal of soil science* 70(4):731-735.
- Pesant A (1984) Les dangers de la culture du maïs dans les régions à topographie accidentée.
- Pesant A, Dionne J & Genest J (1987) Soil and nutrient losses in surface runoff from conventional and no-till corn systems. *Canadian journal of soil science* 67(4):835-843.
- Poirier V (2007) Séquestration du carbone dans un sol agricole du Québec: influence du travail du sol et de la fertilisation des cultures. Mémoire M.Sc. en sols et environnement. Université Laval. 166p.
- Prosdocimi M, Tarolli P & Cerdà A (2016) Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. *Earth-Science Reviews* 161:191-203.

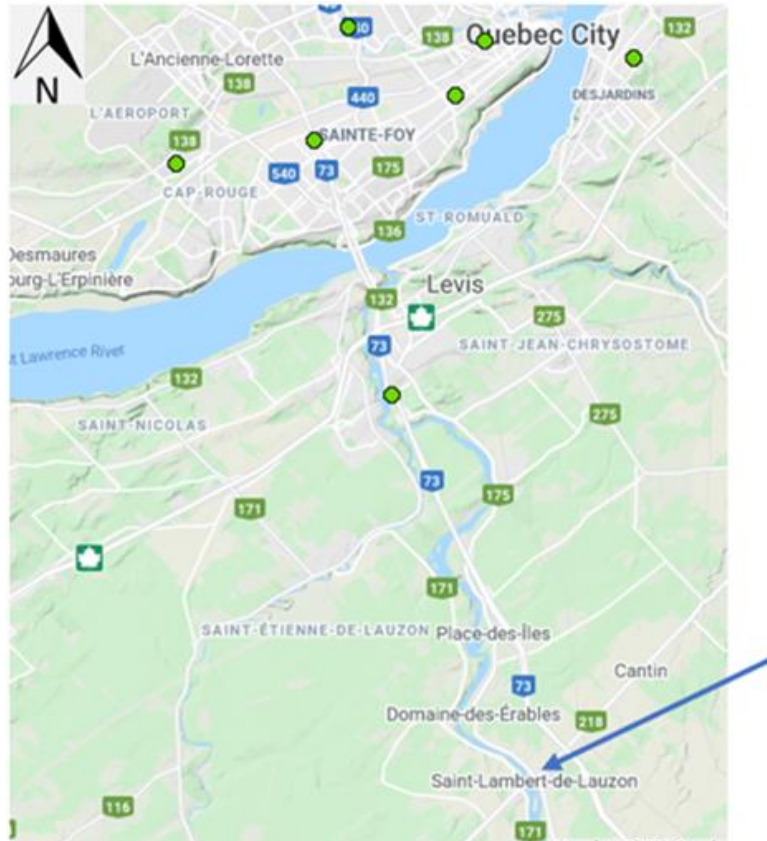
- Quilbé R & Rousseau AN (2007) GIBSI: an integrated modelling system for watershed management—sample applications and current developments. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(6):1785-1795.
- Renard K, Foster G, Weesies G, McCool D & Yoder D (1996) Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture handbook* 703:25-28.
- Roose E (1994) Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique de la FAO* (70). IRD (ex-ORSTOM). 442p.
- Rousseau AN, Quilbé R, Savary S, Ricard S, Moquet J-S & Garbouj MS (2007) Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques: étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée: rapport final. 374pp.
- Rousseau AN, Savary S, Hallema DW, Gumiere SJ & Foulon É (2013) Modeling the effects of agricultural BMPs on sediments, nutrients, and water quality of the Beaurivage River watershed (Quebec, Canada). *Canadian Water Resources Journal* 38(2):99-120.
- Rousseau Beaumier T (2012) Impact des pratiques de gestion bénéfiques sur la qualité de l'eau d'un bassin versant agricole (Rivière des Envies, Canada). (Université du Québec à Trois-Rivières). 127pp.
- Salehi F, Pesant A, Berard A & Lagace R (1993) Preliminary estimates of the erodibility of ten. *Canadian Agricultural Engineering* :157.
- Salehi F, Pesant A & Lagace R (1991) Validation of the universal Soil Loss Equation for Three cropping systems under natural rainfall in Southeastern Quebec. *Canadian Agricultural Engineering CAEOAI* 33(1).
- Salik AW (2019) The Application of Universal Soil Loss Equation (USLE) for Predicting the Soil Erosion: A review. *Kabul University. Scientific Journal of Research in Natural Science*, Vol(2). Pp 234-242.
- Sanchis MS, Torri D, Borselli L & Poesen J (2008) Climate effects on soil erodibility. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group* 33(7):1082-1097.
- Schaller FW & Bailey GW (1983) *Agricultural management and water quality*. Iowa State University Press, Ames, IA, U.S.A. 472pp.
- Sinukaban N (1981) Erosion selectivity as affected by tillage-planting systems. PhD thesis on Soil science. University of Wisconsin-Madison. P 1-34.
- Six J, Elliott E & Paustian K (1999) Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal* 63(5):1350-1358.
- Sousa SFd, Mendes TA & Siqueira EQd (2017) Development and calibration of a rainfall simulator for hydrological studies. *RBRH* 22.
- St. Arnaud R & Sephton G (1972) Contribution of clay and organic matter to cation-exchange capacity of chernozemic soils. *Canadian Journal of Soil Science* 52(1):124-126.
- Swanson N & Dedrick A (1967) Soil particles and aggregates transported in water runoff under various slope conditions using simulated rainfall. *Transactions of the ASAE* 10(2):246-0247.

- Swanson NP (1965) Rotating-boom rainfall simulator. Transactions of the ASAE 8(1):71-0072.
- Tabi M, Tardif L, Carrier D, Laflamme G & Rompré M (1990) Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec : Région agricole 10 nord de Québec, rapport synthèse. Gouvernement du Québec, Service des sols. 107pp.
- Talbot G (2020) Communication personnelle.
- Tiessen H, Stewart J & Bettany J (1982) Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon, nitrogen, and phosphorus in grassland soils 1. Agronomy journal 74(5):831-835.
- Tossell R, Wall G, Dickinson W, Rudra R & Groenevelt P (1990) The Guelph Rainfall Simulator II: Part 1-simulated rainfall characteristics. Canadian Agricultural Engineering 32(2):205-213.
- Trapnell C, Webster R & Hesse P (1986) Microaggregates in red earths and related soils in East and Central Africa, their classification and occurrence. Journal of soil science 37(1):109-123.
- Verity G & Anderson D (1990) Soil erosion effects on soil quality and yield. Canadian Journal of Soil Science 70(3):471-484.
- Vold T, Sondheim M & Nagpal N (1985) Computer assisted mapping of soil erosion potential. Canadian journal of soil science 65(3):411-418.
- Wall G, Coote D, Pringle E & Shelton I (2002) Revised universal soil loss equation for application in Canada: a handbook for estimating soil loss from water erosion in Canada. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Canada.
- Wall G, Dickinson W, Rudra R & Coote D (1988) Seasonal soil erodibility variation in southwestern Ontario. Canadian Journal of Soil Science 68(2):417-424.
- Walter MF, Steenhuis TS & Haith DA (1979) Nonpoint source pollution control by soil and water conservation practices. Transactions of the ASAE 22(4):834-0840.
- Warkentin BP (1995) The changing concept of soil quality. Journal of soil and water conservation 50(3):226-228.
- Wendt R & Burwell R (1985) Runoff and soil losses for conventional, reduced, and no-till corn. Journal of Soil and Water Conservation 40(5):450-454.
- Wilson T, Cortis C, Montaldo N & Albertson J (2014) Development and testing of a large, transportable rainfall simulator for plot-scale runoff and parameter estimation. Hydrology and Earth System Sciences 18(10):4169-4183.
- Wischmeier WH (1960) Cropping-management factor evaluations for a universal soil-loss equation. Soil Science Society of America Journal 24(4):322-326.
- Wischmeier WH, Johnson C & Cross B (1971) Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation, Vol.26(5), pp 5189
- Wischmeier WH & Smith D (1962) Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. International Association of Scientific Hydrology Publication 59:148-159.
- Wischmeier WH & Smith DD (1958) Rainfall energy and its relationship to soil loss. Eos, Transactions American Geophysical Union 39(2):285-291.
- Wischmeier WH & Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. U.S Department of Agriculture, Agriculture Handbook No 537. 69pp.

- Yagouti A, Boulet G, Vincent L, Vescovi L & Mekis E (2008) Observed changes in daily temperature and precipitation indices for southern Québec, 1960–2005. *Atmosphere-Ocean* 46(2):243-256.
- Young A (1989) A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Jour. of Soil and Water Conservation* 44(2):121-132.
- Young R & Onstad C (1978) Characterization of rill and interrill eroded soil. *Transactions of the ASAE* 21(6):1126-1130.
- Yu SL, Kuo J-T, Fassman EA & Pan H (2001) Field test of grassed-swale performance in removing runoff pollution. *Journal of Water Resources Planning and Management* 127(3):168-171.
- Zhang X, Brown R, Vincent L, Skinner W, Feng Y & Mekis E (2010) Tendances climatiques au Canada, de 1950 à 2007. Biodiversité canadienne: état et tendances des écosystèmes en 2010. Rapport technique thématique numéro 5. Conseil canadien des ministres des ressources. 28pp.
- Zhu J, Gantzer C, Anderson S, Alberts E & Beuselinck P (1989) Runoff, soil, and dissolved nutrient losses from no-till soybean with winter cover crops. *Soil Science Society of America Journal* 53(4):1210-1214.

7 ANNEXE

Annexe 1 : Localisation du site d'étude



<https://www.environnement.gouv.qc.ca>

(MELCC) (consulté en mars 2021)

Annexe 2 : Pente des parcelles Levés topographiques et pentes correspondantes des 36 parcelles des 6 blocs

	BLOC#1						BLOC#2						BLOC#3					
(cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Haut parcelle	101	99.5	100	104	102.5	101	100	103.5	102	103	103	103.5	104.5	104	100	87	99	84
Bas parcelle	128	127.5	129.5	130.5	130	131	132	128.5	129.5	131	131	133	131	126	124	123	121	119
l = 6 m	BLOC#4						BLOC#5						BLOC#6					
(cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Haut parcelle	146	142	141	143	144.5	146	144	138.5	143	142.5	143	148	146	141.5	145	140.5	141	139
Bas parcelle	170	169.5	173.5	172.5	171	174	173	174	175.5	176	173	169	170	166.5	164	164	159	155
600	BLOC#1						BLOC#2						BLOC#3					
(l = 600 cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
ratio (h/l)	0.045	0.047	0.049	0.044	0.046	0.050	0.053	0.042	0.046	0.047	0.047	0.049	0.044	0.037	0.040	0.060	0.037	0.058
pente (%)= %ratio	4.5	4.7	4.9	4.4	4.6	5.0	5.3	4.2	4.6	4.7	4.7	4.9	4.4	3.7	4.0	6.0	3.7	5.8
(Angle) θ °	2.577	2.672	2.815	2.529	2.624	2.862	3.053	2.386	2.624	2.672	2.672	2.815	2.529	2.100	2.291	3.434	2.100	3.338
	BLOC#4						BLOC#5						BLOC#6					
(l = 600 cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
ratio (h/l)	0.040	0.046	0.054	0.049	0.044	0.047	0.048	0.059	0.054	0.056	0.050	0.035	0.040	0.042	0.032	0.039	0.030	0.027
pente (%)= %ratio	4.0	4.6	5.4	4.9	4.4	4.7	4.8	5.9	5.4	5.6	5.0	3.5	4.0	4.2	3.2	3.9	3.0	2.7
(Angle) θ °	2.29	2.62	3.10	2.81	2.53	2.67	2.77	3.39	3.10	3.20	2.86	2.00	2.29	2.39	1.81	2.24	1.72	1.53
	Moy: 4.5% (2.58dég.)						Max : 6.0% (3.43 dég.)						Min : 2.7% (1.53 dég.)					
(Angle) θo (Degrès) = ATAN(ratio h/l)*180/3.14																		

Annexe 3 : Station météo Scott (#7027840) Données climatiques 2020 de la station météo Scott

(Lat. : 46° 29' 52" ; Long. : 71° 04' 37" ; altitude moyenne 157 m)

Station météo Scott : moyennes mensuelles données climatiques 2020						
Mois	Précipitations			Température		
	Pluie (mm)	Neige (cm)	Total (mm)	Max (° C)	Moy (° C)	Min (° C)
Janvier	31.3	80.0	102.5	-4.1	-7.9	-11.6
Février	0.0	98.6	75.2	-3.0	-8.6	-14.2
Mars	44.3	29.8	94.3	2.8	-2.1	-7.1
Avril	51.1	7.0	61.5	7.6	2.8	-2.1
Mai	55.9	5.0	53.3	17.5	11.4	5.2
Juin	62.8	0.0	46.7	24.3	17.8	11.2
Juillet	145.6	0.0	115.6	27.0	21.4	15.7
Août	158.9	0.0	160.1	23.5	18.5	13.5
Septembre	54.3	0.0	55.6	18.7	13.4	8.0
Octobre	133.6	0.0	124.4	11.2	7.0	2.8
Novembre	46.3	17.0	63.3	7.0	2.7	-1.6
Décembre	24.8	49.6	71.4	-0.5	-4.0	-7.4
Moy	67.4	23.9	85.3	11.0	6.0	1.0
Min	0.0	0.0	46.7	-4.1	-8.6	-14.2
Max	158.9	98.6	160.1	27.0	21.4	15.7

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/sommaire.asp>

(https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/sommaire.asp?cle=7027840&date_selection)

(MELCC) (mars 2021)

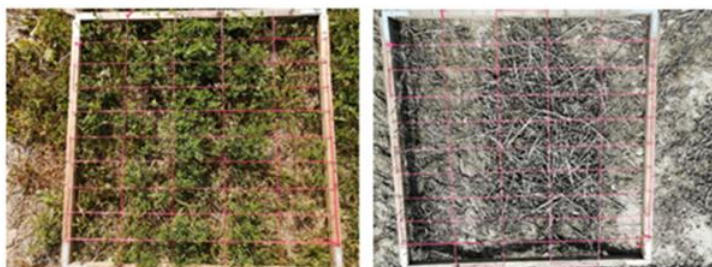
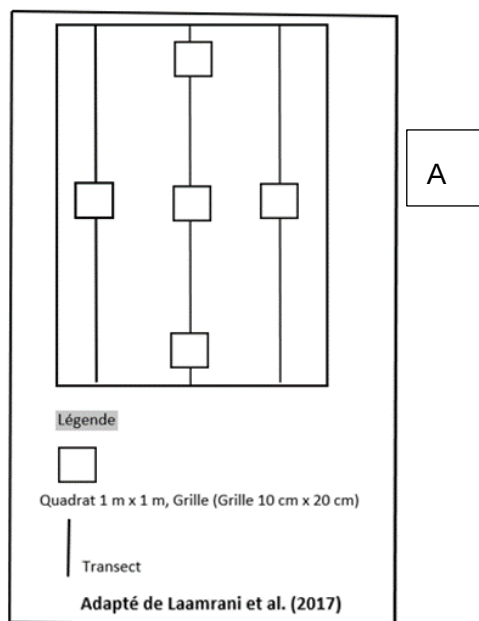
NB : Les données utilisées sont celles de la station météo Scott, station la plus proche de Saint-Lambert-de-Lauzon.

Annexe 4 : Simulateur de pluie et dispositif de collecte du ruissellement de surface tel que sur site



Photo du 03 juillet 2020

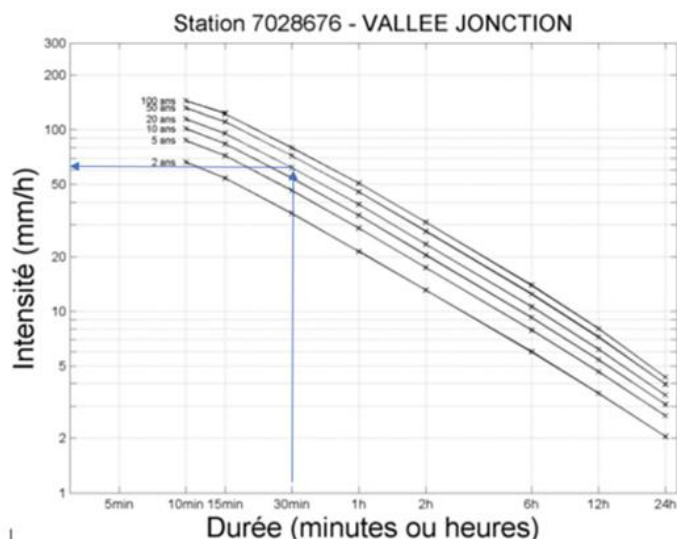
Annexe 5 : Estimation du taux de couverture du sol (A : plan de disposition des grilles quadrats; B : a,b,c photos des grilles sur les parcelles secondaires)



B

Photo : Grille quadrat pour évaluation du taux de couverture du sol (septembre 2020)

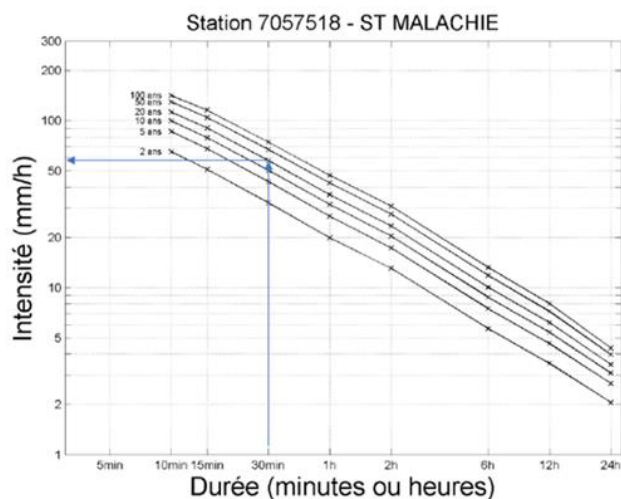
Annexe 6 : Courbes IDF (climat actuel) préparées par Alain Mailhot et Guillaume Talbot (INRS-ETE)



Intensité de pluie par période de retour (mm/heure) avec intervalle de confiance de 95% (entre crochets)

Durée	Temps de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
10 minutes	66.4 [58.8,74.9]	87.6 [77.6,98.7]	101.4 [89.5,114.2]	114.6 [100.7,129.1]	131.4 [114.5,148.2]	143.9 [124.4,162.7]
15 minutes	54.2 [47.9,61.5]	71.9 [63.4,81.5]	83.9 [73.7,95.0]	95.6 [83.6,108.1]	110.9 [96.2,125.4]	122.7 [105.5,138.8]
30 minutes	34.5 [30.5,39.3]	46.2 [40.7,52.5]	54.1 [47.4,61.3]	61.8 [53.9,70.0]	71.9 [62.3,81.3]	79.6 [68.5,89.9]
1 heure	21.4 [18.8,24.5]	28.7 [25.2,32.9]	33.8 [29.5,38.6]	38.8 [33.8,44.2]	45.5 [39.2,51.8]	50.7 [43.4,57.7]
2 heures	13.1 [11.6,14.9]	17.4 [15.3,19.8]	20.4 [17.9,23.2]	23.5 [20.5,26.7]	27.6 [23.9,31.3]	30.9 [26.5,35.1]
6 heures	6.0 [5.3,6.8]	7.9 [7.0,9.0]	9.2 [8.1,10.5]	10.6 [9.2,12.0]	12.4 [10.8,14.1]	13.9 [11.9,15.7]
12 heures	3.5 [3.1,4.0]	4.6 [4.1,5.2]	5.4 [4.8,6.1]	6.2 [5.4,7.0]	7.2 [6.3,8.1]	8.0 [6.9,9.0]
24 heures	2.0 [1.8,2.3]	2.7 [2.4,3.0]	3.1 [2.7,3.4]	3.5 [3.1,3.9]	4.0 [3.5,4.5]	4.3 [3.8,4.9]

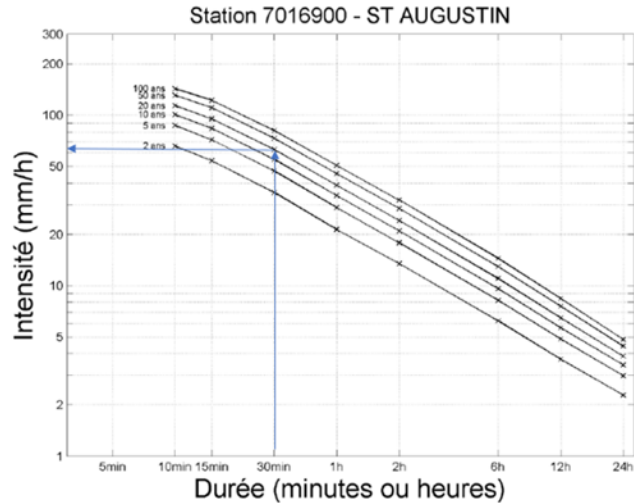
http://www.agrometeo.org/atlas/idf_station/VALLEE_JONCTION/Vallee-Jonction/7028676/



Intensité de pluie par période de retour (mm/heure) avec intervalle de confiance de 95% (entre crochets)

Durée	Temps de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
10 minutes	65.4 [56.0,76.5]	86.3 [73.7,101.1]	99.9 [85.3,117.0]	112.9 [95.9,132.0]	129.5 [109.3,151.5]	141.8 [119.0,166.0]
15 minutes	51.1 [43.6,60.2]	67.9 [57.7,79.9]	79.2 [67.2,93.0]	90.2 [76.2,105.8]	104.7 [87.9,122.7]	115.8 [96.6,135.5]
30 minutes	32.3 [27.3,38.3]	43.2 [36.4,51.1]	50.6 [42.5,59.7]	57.8 [48.3,68.1]	67.2 [55.9,79.0]	74.4 [61.4,87.6]
1 heure	19.9 [16.9,23.6]	26.8 [22.7,31.7]	31.5 [26.6,37.2]	36.1 [30.4,42.6]	42.4 [35.3,49.7]	47.2 [39.1,55.3]
2 heures	13.1 [11.2,15.4]	17.3 [14.8,20.4]	20.3 [17.3,23.9]	23.4 [19.8,27.4]	27.5 [23.1,32.2]	30.8 [25.7,36.0]
6 heures	5.7 [4.9,6.7]	7.5 [6.4,8.8]	8.8 [7.5,10.3]	10.1 [8.6,11.8]	11.8 [10.0,13.9]	13.2 [11.0,15.5]
12 heures	3.5 [3.0,4.1]	4.6 [4.0,5.4]	5.4 [4.6,6.3]	6.2 [5.2,7.2]	7.2 [6.1,8.4]	8.0 [6.7,9.3]
24 heures	2.1 [1.8,2.4]	2.7 [2.3,3.1]	3.1 [2.7,3.6]	3.5 [3.0,4.0]	4.0 [3.4,4.6]	4.4 [3.7,5.1]

http://www.agrometeo.org/atlas/idf_station/ST_MALACHIE/St-Malachie/7057518/



Intensité de pluie par période de retour (mm/heure) avec intervalle de confiance de 95% (entre crochets)

Durée	Temps de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
10 minutes	66.1 [57.0,76.7]	87.2 [75.1,101.0]	101.0 [86.7,116.7]	114.2 [97.5,131.6]	130.9 [111.2,151.3]	143.4 [121.0,165.9]
15 minutes	54.1 [46.6,62.9]	71.9 [61.7,83.5]	83.8 [71.8,97.2]	95.5 [81.4,110.6]	110.9 [93.8,128.4]	122.6 [103.2,141.8]
30 minutes	35.3 [30.3,41.1]	47.2 [40.4,55.0]	55.2 [47.1,64.3]	63.1 [53.6,73.3]	73.4 [61.9,85.2]	81.2 [68.2,94.4]
1 heure	21.4 [18.4,25.1]	28.8 [24.7,33.7]	33.8 [28.9,39.6]	38.9 [33.1,45.4]	45.6 [38.5,53.1]	50.8 [42.6,59.1]
2 heures	13.5 [11.7,15.7]	17.9 [15.4,20.8]	21.0 [18.0,24.4]	24.1 [20.6,28.0]	28.4 [24.0,32.9]	31.8 [26.7,36.8]
6 heures	6.2 [5.4,7.2]	8.2 [7.1,9.6]	9.6 [8.2,11.2]	11.0 [9.4,12.8]	13.0 [10.9,15.0]	14.5 [12.1,16.8]
12 heures	3.7 [3.2,4.3]	4.9 [4.2,5.6]	5.7 [4.9,6.6]	6.5 [5.5,7.5]	7.6 [6.4,8.7]	8.4 [7.1,9.7]
24 heures	2.3 [2.0,2.6]	3.0 [2.6,3.4]	3.4 [3.0,3.9]	3.9 [3.3,4.4]	4.4 [3.8,5.1]	4.8 [4.1,5.6]

http://www.agrometeo.org/atlas/idf_station/ST_AUGUSTIN/St-Augustin/7016900/ #

Tableau A6.1 : Intensités de pluie moyenne (I , mm.hr⁻¹) des stations représentatives des conditions de Saint Lambert de Lauzon

Stations	I (mm.h ⁻¹)	
	Actuel (2011-2020)	Horizon (2040-2050) (+15%)
Vallée-Jonction	61.8	71.1
Saint-Malachie	57.8	66.5
Saint-Augustin	63.1	72.6
Moyenne	61.0	70.1

Annexe 7 : Montage hydraulique du dispositif des tests préliminaires de simulation de pluie pour la sélection du type de gicleur

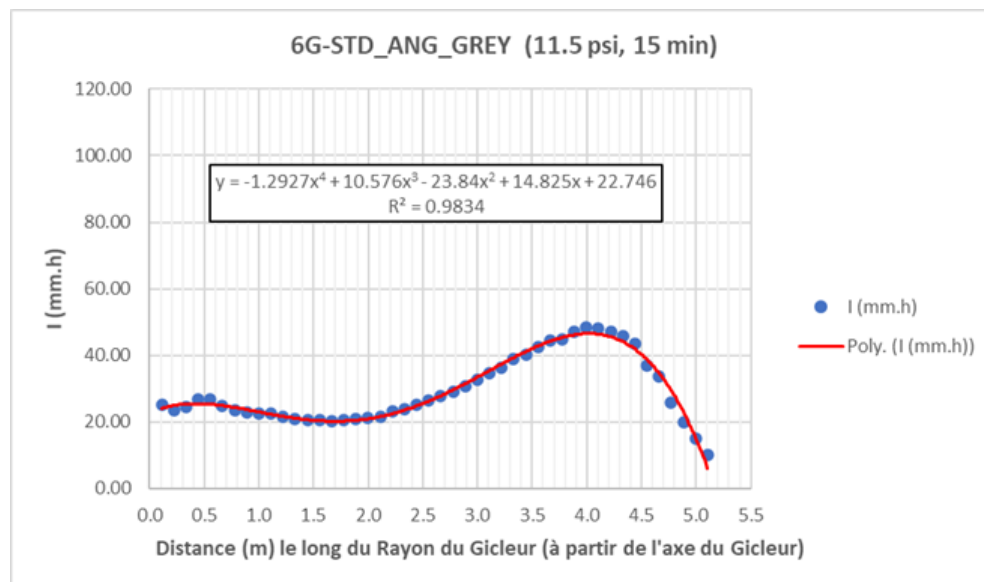
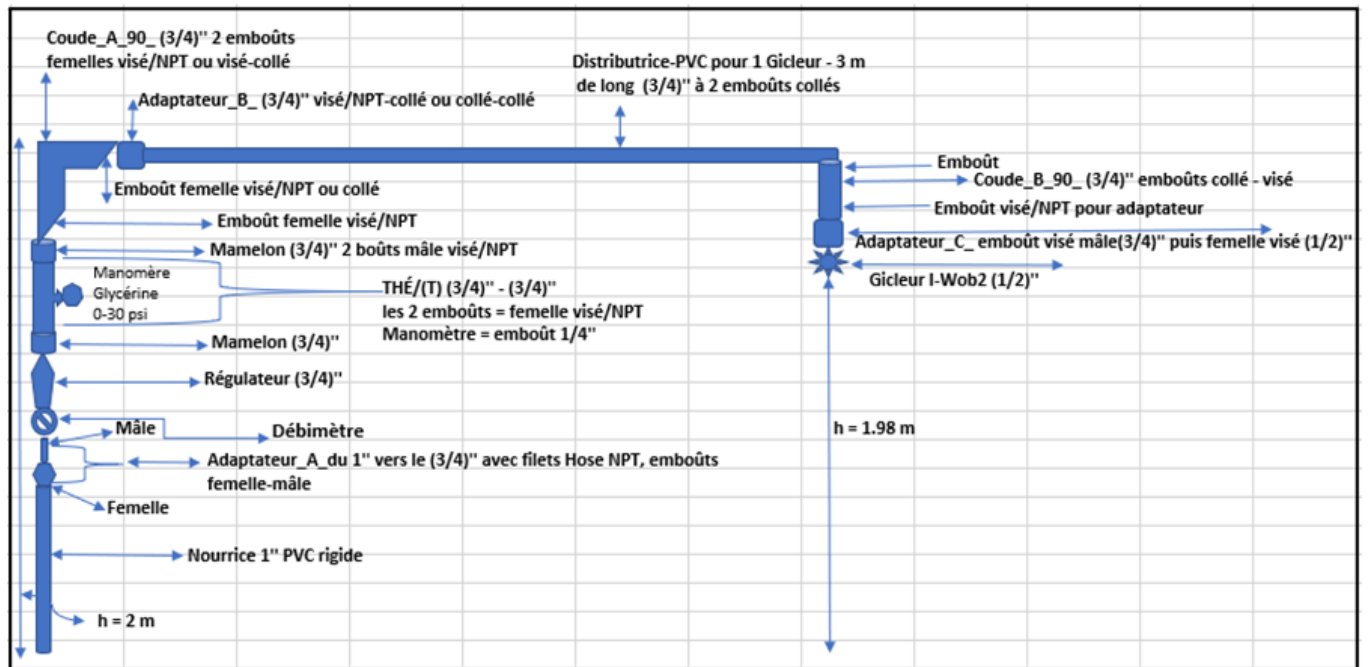
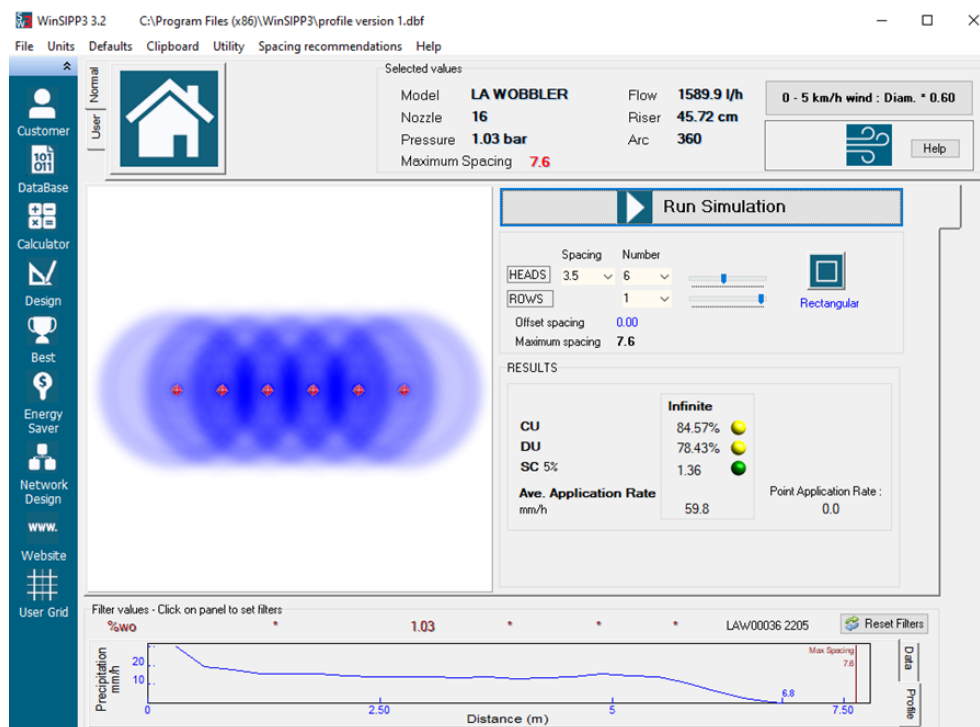


Figure A7.1: profil des intensités de pluies au sol (mm.hr^{-1}) le long d'un rayon de recouvrement du gicleur

Annexe 8 : Exemple de simulateur avec WinSIPP3 3.2 pour (A) la sélection du modèle de gicleur, la pression d'opération et la configuration du recouvrement au sol et (B) les intensités résultantes par secteur



A



Autre approche d'estimation des intensités de pluie résultantes

B

selon le recouvrement simulé (6 gicleurs, équidistance de 3.5 m centre à centre)

$$Imoy\ p1\ (0.50 - 3.00) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=2.00}^{0.50} (Ii) \sum_{j=2.00}^{4.50} (Ij) \right)$$

n = nombre de lignes d'iso intensité de pluies dans l'intervalle [0.50 m – 3.00 m]

$$\underline{\underline{58.88\ mm.h^{-1}}}$$

$$Imoy\ p2\ (3.25 - 6.00) = \frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=2.75}^{2.25} (Ii) \sum_{j=1.25}^{1.75} (Ij) \right) + \left(\sum_{i=5.00}^{3.00} (Ii) \sum_{j=1.00}^{1.00} (Ij) \sum_{q=3.00}^{5.00} (Iq) \right) \right]$$

n = nombre de lignes d'iso intensité de pluies dans l'intervalle [3.25 m – 6.00 m]

$$\underline{\underline{84.00\ mm.h^{-1}}}$$

$$Imoy\ p3\ (6.25 - 9.00) = \frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=2.75}^{1.25} (Ii) \sum_{j=1.25}^{2.75} (Ij) \right) + \left(\sum_{i=4.00}^{3.00} (Ii) \sum_{j=0.00}^{1.00} (Ij) \sum_{q=4.00}^{5.00} (Iq) \right) \right]$$

n = nombre de lignes d'iso intensité de pluies dans l'intervalle [6.25 m – 9.00 m]

$$\underline{\underline{67.62\ mm.h^{-1}}}$$

$$Imoy\ p4\ (9.25 - 12.00) = \frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=5.00}^{4.25} (Ii) \sum_{j=1.00}^{0.25} (Ij) \sum_{q=3.00}^{4.00} (Iq) \right) + \left(\sum_{i=2.75}^{1.25} (Ii) \sum_{j=1.25}^{2.75} (Ij) \right) + (I3.00 + I1.00 + I5.00) \right]$$

n = nombre de lignes d'iso intensité de pluies dans l'intervalle [9.25 m – 12.00 m]

$$\underline{\underline{63.85\ mm.h^{-1}}}$$

$$Imoy\ p5\ (12.25 - 15.00) = \frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=5.00}^{3.00} (Ii) \sum_{j=1.00}^{1.00} (Ij) \sum_{q=3.00}^{5.00} (Iq) \right) + \left(\sum_{i=2.00}^{1.25} (Ii) \sum_{j=2.00}^{2.75} (Ij) \right) \right]$$

n = nombre de lignes d'iso intensité de pluies dans l'intervalle [12.25 m – 15.00 m]

$$\underline{\underline{81.78\ mm.h^{-1}}}$$

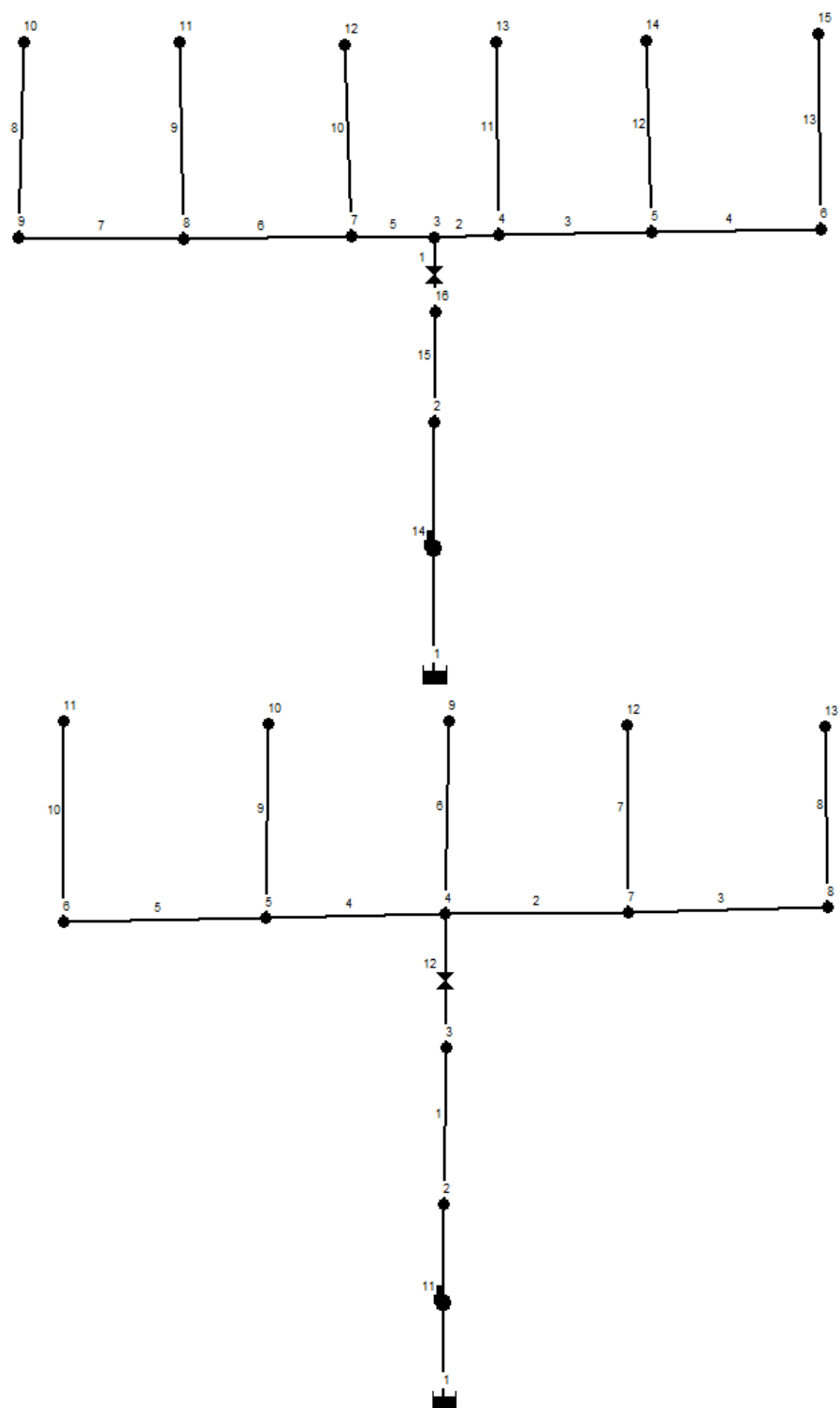
$$Imoy\ p6\ (15.25 - 17.00) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=4.50}^{2.25} (Ii) \sum_{j=0.50}^{1.75} (Ij) \right)$$

n = nombre de lignes d'iso intensité de pluies dans l'intervalle [12.25 m – 17.50 m]

$$\underline{\underline{59.48\ mm.h^{-1}}}$$

$$\text{soit } I_{moy.BLOC} = 69.54\ mm.h^{-1}$$

Annexe 9 : Simulateur de pluie sous EPANET 2.0

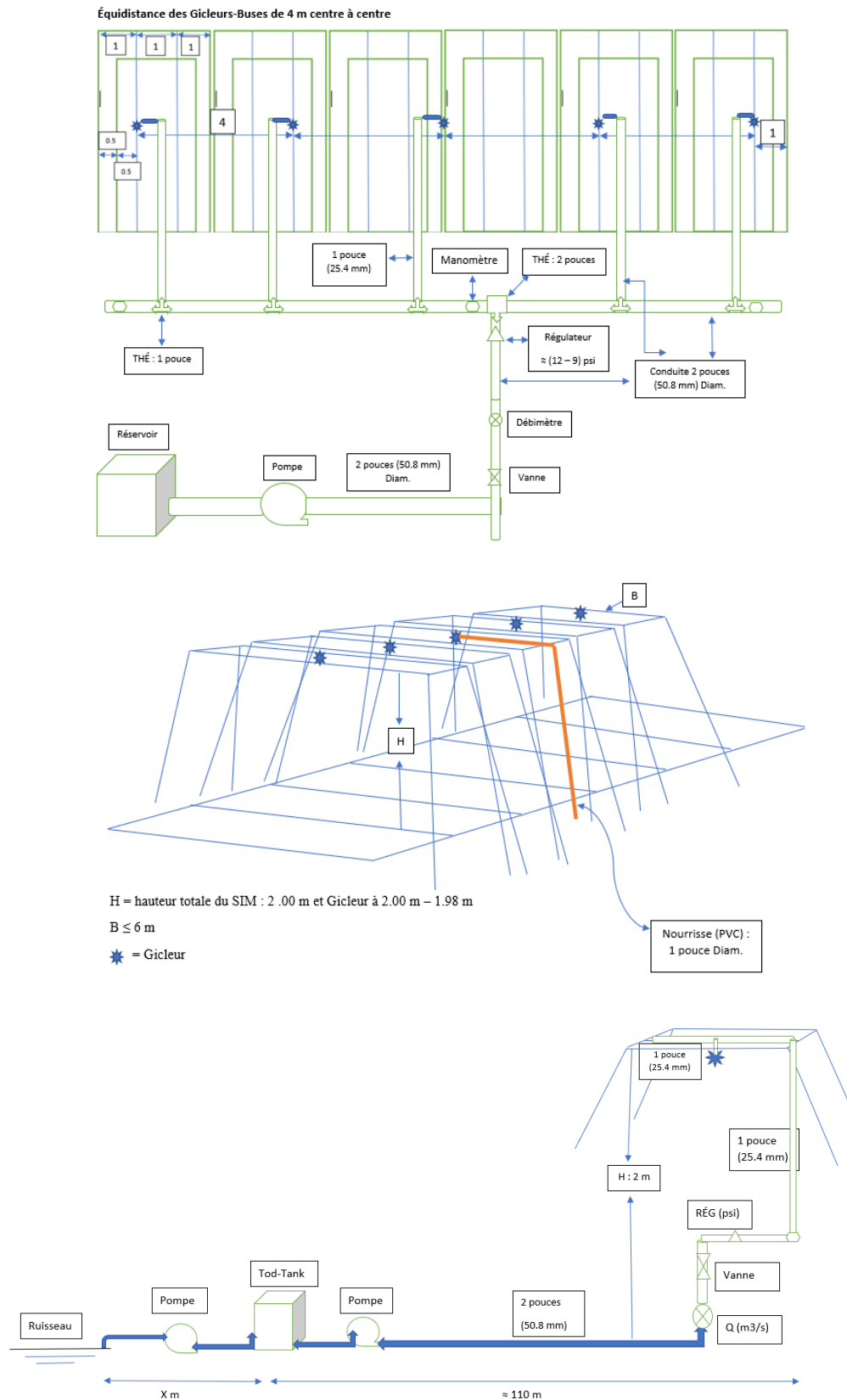


Annexe 10 : Propriétés physiques (hydrauliques) du simulateur de pluie (EPANET 2.0)

Simulateur de pluie : configuration 5 Gicleurs (Intensité de pluie moyenne en climat actuel 61 mm.h ⁻¹)								
# Nœud	Altitude (m)	Demande (LPM)	Pression (psi)	# Section Conduite	Q (LPM)	Longueur (m)	Diam. (mm)	Nature
1 (réservoir)	0.00	-257.80		1	257.80	100.00	50.80	Flexible pvc
11 (pompe)	0.00	257.80		2	103.12	4.00	50.80	pvc rigide
2	0.15	0.00	41.95	3	51.56	4.00	50.80	pvc rigide
3	0.30	0.00	33.39	4	103.12	4.00	50.80	pvc rigide
(12) (valve.Raphael) (50.8 mm Diam.)	0.30	257.80	22.59	5	51.56	4.00	50.80	pvc rigide
4	0.30	0.00	10.50	6	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
5	0.30	0.00	10.44	7	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
6	0.30	0.00	10.42	8	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
7	0.30	0.00	10.44	9	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
8	0.30	0.00	10.42	10	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
9	1.98	51.56	8.17					
10	1.98	51.56	8.11					
11	1.98	51.56	8.09					
12	1.98	51.56	8.11					
13	1.98	51.56	8.09					

Simulateur de pluie : configuration 6 Gicleurs (Intensité de pluie moyenne en climat futur 71 mm.h ⁻¹)								
# Nœud	Altitude (m)	Demande (LPM)	Pression (psi)	# Section conduite	Q (LPM)	Longueur (m)	Diam. (mm)	Nature
1 (réservoir)	0.00	-309.36		15	309.36	100.00	50.80	Flexible pvc
14 (pompe)	0.00	309.36		2	154.68	1.75	50.80	pvc rigide
2	0.15	0.00	35.14	3	103.12	3.50	50.80	pvc rigide
16	0.15	0.00	23.08	4	51.56	3.50	50.80	pvc rigide
(12) (valve.Raphael) (Diam. : 50.8 mm)	0.15	309.36	12.28	5	154.68	1.75	50.80	pvc rigide
3	0.30	0.00	10.50	6	103.12	3.50	50.80	
4	0.30	0.00	10.44	7	51.56	3.50	50.80	pvc rigide
5	0.30	0.00	10.38	8	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
6	0.30	0.00	10.37	9	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
7	0.30	0.00	10.44	10	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
8	0.30	0.00	10.38	11	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
9	0.30	0.00	10.37	12	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
10	1.98	51.56	8.04	13	51.56	5.00	25.40	pvc rigide
11	1.98	51.56	8.06					
12	1.98	51.56	8.11					
13	1.98	51.56	8.11					
14	1.98	51.56	8.06					
15	1.98	51.56	8.04					

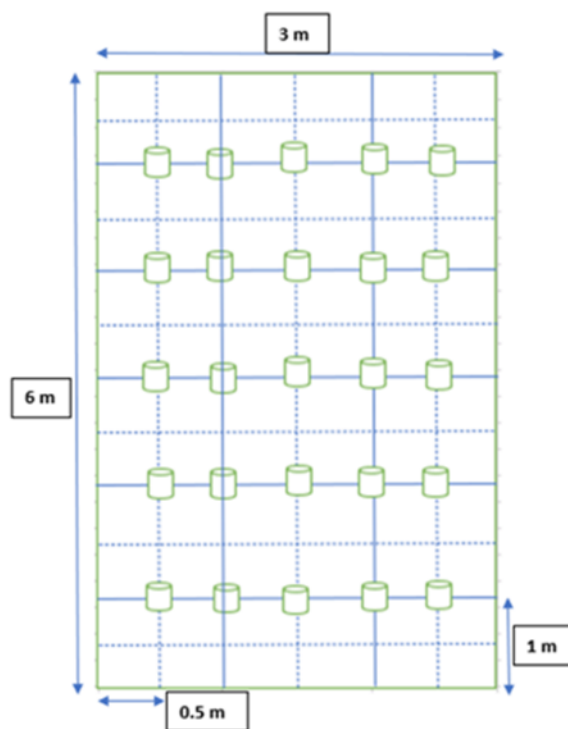
Annexe 11 : Schéma du simulateur de pluie (vue en plan et de profil)



Annexe 12 : Résumé des tests de simulation de pluie en champ pour la validation de la pression, de l'intensité de pluie et du coefficient de ruissellement

I-WOB2 Standard Angle 6 Groove-Grey Small Droplet			
PSI	I (mm.h⁻¹)	5 GIC (4 m.équ.)	6 GIC (3.5 m équ.)
BUSE #26 BRONZE (13/32", 10.32 mm)			
	Moy.	82.8	97.6
	E.T	15.5	20.5
	CUC (%)		
	Moy.	79.3	76.3
	E.T	5.6	3.1
	Moy.	X	95.2
	E.T	X	17.9
	CUC (%)		
	Moy.	X	81.4
	E.T	X	7.6
	Moy.	82	X
	E.T	13	X
	CUC (%)		
	Moy.	73.4	X
	E.T	5.9	X
BUSE #22 MARON (11/32", 8.73 mm)			
	Moy.	66	X
	E.T	9.8	X
	CUC (%)		
	Moy.	82.2	X
	E.T	5.6	X
	Moy.	X	76.3
	E.T	X	11.3
	CUC (%)		
	Moy.	X	77.9
	E.T	X	3
	Moy.	61.8	71.1
	E.T	7.2	8.9
	CUC (%)		
	Moy.	79	77.9
	E.T	8.5	2.3
Total : plus de 8 tests (configurations) (150 pluviomètres par test)			

Annexe 13 : Plan de disposition des pluviomètres pour l'estimation de l'intensité de pluie moyenne par parcelle secondaire (système cultural-traitement)



**Plan de disposition de 25 pluviomètres
par parcelles (grille de 1.0 m x 0.5 m)**

Annexe 14 : Résumé des protocoles des analyses de sol au laboratoire de l'IRDA

121	Humidité	Un échantillon de sol humide est pesé. L'échantillon est ensuite séché au four à 105 ° C et repesé. L'humidité du sol est définie comme le rapport de la masse perdue, attribué à l'eau initialement présente dans l'échantillon, à la masse totale du sol entièrement séché. Référence externe: Soil Sampling and Methods of Analysis, 2nd Ed., Canadian Society of Soil Science, CRC Press, 2008
201	pH eau	L'échantillon est séché à l'air libre et tamisé au travers un tamis de 2 mm. Le pH est déterminé avec un pH mètre qui mesure l'activité de l'ion hydrogène. Le potentiel (voltage) développé par une électrode sensible à l'ion hydrogène varie en fonction de l'activité des ions hydrogène en suivant l'équation de Nernst. Le potentiel développé par cette électrode est comparé à celui d'une autre électrode dite de référence. La détermination du pH est effectuée dans une suspension sol : eau déminéralisée dans un rapport massique 1:1. Dans le cas des sols organiques, le rapport massique devient 1:2 et quelquefois une pâte de sol amenée à saturation peut être utilisée. Référence : Conseil des Productions Végétales du Québec. AGDEX 533. 1988. Méthode PH-1. Détermination du pH à l'eau. ISBN 2-551-12019-5.
202	pH tampon SMP	La méthode est basée sur la réaction quantitative entre le tampon et l'acidité du sol qui peut être neutralisée par la chaux agricole (CaCO_3). Le pH initial du tampon est pré ajusté à 7,5 et diminue au fur et à mesure que l'acidité du sol augmente. Puisque le tampon réagit proportionnellement à l'acidité du sol qui peut être neutralisée par la chaux, le pH du mélange sol : tampon peut être calibré directement en besoin en chaux.

		Le pH au tampon SMP est mesuré sur la suspension sol : eau ayant servi à la détermination du pH à l'eau. En présence de sols acides, le besoin en chaux est déterminé par la méthode au tampon SMP. Le pH est déterminé avec un pH mètre qui mesure l'activité de l'ion hydrogène. Le potentiel (voltage) développé par une électrode sensible à l'ion hydrogène varie en fonction de l'activité des ions hydrogène en suivant l'équation de Nernst. Le potentiel développé par cette électrode est comparé à celui d'une autre électrode dite de référence. Référence : Conseil des Productions Végétales du Québec. AGDEX 533. 1988. Méthode PH-2. Détermination du besoin en chaux par la méthode SMP. ISBN 2-551-12019-5.
203	Matière organique (MO) par perte au feu à 375° C	L'échantillon est séché à l'air libre et tamisé au travers un tamis de 2 mm. La détermination directe de la teneur en matière organique des sols par perte au feu (PAF) consiste en un simple processus de séchage et d'incinération de l'échantillon de sol à une température donnée pendant un intervalle de temps déterminé. L'échantillon est séché à 105°C, pesé puis calciné à 375°C. Le % de matière organique est déterminée par la perte de masse entre ces deux températures. Cette méthode a l'avantage d'être peu dispendieuse à utiliser et elle présente peu de risques pour l'environnement, celle-ci ne nécessitant pas l'utilisation de réactifs toxiques. Référence : Conseil des Productions Végétales du Québec. AGDEX 533. 1988. Méthode MA-2. Détermination de la matière organique par incinération.
209	Éléments Mehlich 3	L'échantillon est séché à l'air libre et tamisé au travers un tamis de 2 mm. Dans la solution d'extraction Mehlich 3, le nitrate d'ammonium et l'acide nitrique déplacent les cations échangeables comme le potassium, le calcium, le magnésium et le sodium. L'action combinée de l'acide acétique et du fluorure

		d'ammonium, déplace le phosphore assimilable principalement sous la forme de phosphate de calcium, de fer et d'aluminium. L'agent chélatant EDTA forme des complexes solubles avec plusieurs ions métalliques en solution ce qui permet l'extraction des oligo-éléments (Al, Cu, Zn, Mn, Fe) et autres éléments traces métalliques, (Cd, Cr, Ni, Pb, Co) Après extraction du sol et filtration, l'extrait Mehlich 3 est analysé en spectrométrie d'émission au plasma d'argon (ICP-OES Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy). Injecté dans le plasma d'argon, les éléments contenus dans l'échantillon analysé subissent des transitions électroniques vers des états énergétiques supérieurs, qui lors du retour vers les états inférieurs émettent des photons d'énergie à des longueurs d'onde caractéristiques des éléments ionisés et avec des intensités proportionnelles aux concentrations. L'analyse est réalisée en poids / volume (3g/30ml). Les résultats sont exprimés en mg/Kg. Trois niveaux d'analyse sont disponibles. Référence : Soil Sampling and Methods of Analysis, 2nd Edition, Canadian Society of Soil Science, 2008, Chapter 7: Mehlich3 -Extractable Elements, pp.81-88.
220	Phosphore total	L'échantillon de sol (séché à l'air, tamisé <2mm et broyé <150 µm) est digéré à l'acide nitrique concentré et au peroxyde d'hydrogène. Le mélange est ensuite chauffé à reflux dans l'acide chlorhydrique concentré pour solubiliser les métaux extractibles totaux. La détermination des métaux lourds est effectuée par spectrométrie d'émission au plasma d'argon (ICP-OES Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy). Référence externe : U.S. Environmental Protection Agency. SW-846 Manual. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods. Method 3050B. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils. Revision 2. December 1996.

223	Estimation Capacité échange cationique Mehlich 3 (CEC) (Calcul)	Calcul
227	Phosphore soluble à l'eau (méthode Sissingh 1971)	Une portion représentative de sol est pesée et humidifiée avec environ 0,50 ml d'eau déminéralisée. L'échantillon est alors placé en attente pendant 22 heures à la température pièce. Le volume d'eau requis pour l'extraction est ajouté, l'échantillon est ensuite agité pendant une heure, puis filtré, centrifugé et dosé en colorimétrie automatisée selon la méthode à l'acide ascorbique proposée par Murphey Riley. Le phosphore soluble sous forme d'anion ortho phosphate présent en solution réagit avec le molybdate d'ammonium en milieu acide pour former l'acide phospho-molybdique. Celui-ci est réduit par l'acide ascorbique et forme un complexe bleu de molybdène dont l'absorbance à 800 nm est proportionnelle à la concentration de phosphore. Les résultats transmis sont exprimés en ppm ou (µg/g) de phosphore dans l'échantillon. Références : Sissingh, H.A. (1971). Analytical technique of the PW method used for the assessment of the phosphate status of arabe soils in the Netherlands. Plant and Soil, 34, p. 483-486. Murphey, J. & J. Riley. 1962. A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Waters. Analytica. Chim. Acta 27:31-36.0.
241	Carbone total / Azote total par LECO	L'échantillon de sol (séché à l'air, tamisé <2mm et broyé <150 µm) est pesé dans une capsule d'étain ou encapsulé dans une feuille d'étain et placé dans le chargeur. Une séquence d'analyse entièrement automatisée transfère l'échantillon dans une chambre de purge scellée, où le gaz atmosphérique est éliminé. L'échantillon purgé est transféré automatiquement dans un creuset en céramique réticulé à l'intérieur du four. Pour assurer une combustion (oxydation) complète et rapide de l'échantillon, l'environnement du four est composé d'oxygène pur avec un flux d'oxygène secondaire dirigé vers l'échantillon dans un creuset réticulé via une lance en quartz. Les gaz de combustion sont balayés du four à travers un refroidisseur thermoélectrique pour éliminer l'humidité, et sont collectés dans un volume de ballast contrôlé par thermostat. Les gaz s'équilibrent et se mélangent

		dans le ballast avant qu'une aliquote représentative du gaz soit extraite et introduite dans un courant de gaz inerte pour analyse. Le gaz aliquote est ensuite transporté vers une cellule infrarouge non dispersive (NDIR) pour la détection du carbone (sous forme de dioxyde de carbone) et une cellule de conductivité thermique (TC) pour détecter l'azote (N₂). Référence externe : Analyseur LECO CN828 – Manuel d'instruction Version 2.8 Avril 2019
252	Granulométrie par hydrométrie et tamisage des sables (méthode Bouyoucos)	Méthode hydrométrique : Une portion d'échantillon sec est mélangée à un volume d'eau contenant un agent de dispersion, laquelle est ensuite introduit dans un cylindre. La densité du mélange est mesurée à l'aide d'un hydromètre à divers intervalles de temps. La densité obtenue en fonction du temps de sédimentation permet d'obtenir la proportion de sable, limon et argile. Tamisage des sables : La suspension de l'échantillon est séparée à l'aide d'une série de tamis superposés. Par la suite, le contenu de chaque tamis est séché et pesé. La fraction d'échantillon recueillie par tamis est rapportée sur la quantité d'échantillon totale. Référence : AGDEX 533, 1988.
254	Stabilité des agrégats - sol entier 0-8 mm	Cette méthode permet détermination de la résistance à la désagrégation des agrégats dans le sol et d'obtenir les agrégats stables dans l'eau après une agitation mécanique et le tamisage sur différents tamis. Référence : Method of soil analysis, 1986. American Society of Agronomy Inc. Publisher, Madison, Wisconsin, U S A., chap 17. Aggregate stability and size distribution, pp 511-519.
256	Masse volumique apparente	La densité apparente est le rapport du poids du sol sec(g) sur le volume total de l'échantillon(cm³). Elle représente la masse volumique du sol sec.

		Référence : Cully, J.L.B. 1993. Density and compressibility. Chapter 50 In soil sampling and methods of analysis. M.R. Carter, editor. Canadian Society of Soil Science.
425	Phosphore biodisponible extrait au NaOH 0.1N/EDTA 0.02M	Une portion de sol séché et homogénéisé est mise en présence d'une solution de NaOH 0,11N + EDTA 0,02 M. La suspension est ensuite agitée horizontalement durant une période de 17 heures. Les ortho phosphates faiblement liés aux sédiments se retrouvent alors en solution au même titre que les ortho phosphates dissous. L'agitation est suivie d'une centrifugation, le phosphore est dosé avec un système d'analyse automatisé Seal Analytical AA3 par colorimétrie à 660 nm d'un complexe bleu formé par la réduction avec l'acide ascorbique de l'acide molybdophosphorique formé entre le phosphore de l'échantillon et le molybdate d'ammonium. Référence: Sharpley, Andrew, N., W., Troeger and S.J. Smith. The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. Published in J' Environ. Quality 20. p. 235-238 (1991).

Analyses de l'eau :

401	pH	La détermination du pH est effectuée directement dans le milieu, soit l'échantillon liquide préalablement amené à la température pièce. Le pH de ces milieux est déterminé par la méthode électrométrique, c'est à dire l'utilisation d'un système à deux électrodes, une indicatrice et une autre de référence, nous pouvons également utiliser une électrode combinée. Référence: Standard Methods for Examination of Waste and Waste Water, 21th Edition 2005, Edited by: Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri and Andrew D. Eaton, ISBN 0-87553-047-8, p. 4-90, No: 4500-H⁺. pH value.
402	Solides en suspension totaux (MES) (sur 0.45µm)	Un volume d'échantillon est mesuré puis homogénéisé par agitation. Ensuite, une filtration sur un papier filtre de 0.45µm permet de recueillir un résidu solide. Celui-ci est séché à 103-107 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

		L'augmentation du poids du filtre représente la quantité de matières en suspension. Cette méthode permet une estimation de la quantité de matières en suspension présente dans l'échantillon. Référence : STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WASTE AND WASTEWATER, 21th Edition 2005, Prepared and published jointly by: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Joint Editorial Board: Andrew D. Eaton, Lenore S. Clesceri, Eugene W. Rice, Arnold E. Greenberg, No : 2540 D, Total Suspended Solids Dried at 103-105°C), p. 2-58. ISBN 0-87553-047-8.
404	Azote minéral - N-NH4 et N-NO3 sur le filtrat	Les diverses formes d'azote minéral sont dosées par colorimétrie avec un système à flux continu de type FIA. L'intensité de la couleur des complexes formés avec des réactifs spécifiques est proportionnelle à la concentration de l'ion analysé. Les ions ammonium sont dosés selon une méthode colorimétrique dans laquelle une couleur vert émeraude est formée par la réaction de l'ion ammonium avec le salicylate de sodium, le nitroprusside de sodium et l'hypochlorite de sodium (solution chlorée), dans un tampon alcalin (pH 12,8 à 13,0). L'intensité de la couleur du complexe formé est mesurée à 660 nm et est proportionnelle à la concentration de l'ion ammonium en solution. Le dosage des nitrates débute par la réduction de ceux-ci en nitrites par le passage sur une colonne de cuivre-cadmium. Par la suite, les nitrites provenant des nitrates de l'échantillon ainsi que les nitrites naturellement présents dans l'échantillon sont dosés sur le second canal par colorimétrie à 520 nm d'un complexe coloré rose pourpre formé en milieu acide avec la sulfanilamide et le dihydrochlorure de N-1 naphthyl-éthylènediamine. Références: Standard Methods for Examination of Waste and WasteWater, 18th Edition 1992, Edited by: Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri and Andrew D. Eaton, ISBN 0-87553-207-1, p. 4-84, No: 4500-NH₃ H. Automated Phenate Method. p. 4-91, No: 4500-NO₃⁻ F. Automated Cadmium Reduction Method.
406	Phosphore soluble (ortho-phosphate) sur le filtrat	Pour la détermination du phosphore soluble, l'anion ortho phosphate présent en solution réagit avec le molybdate d'ammonium en milieu acide pour former l'acide phospho-molybdique. Celui-ci est réduit par l'acide ascorbique et

		forme un complexe bleu de molybdène dont l'absorbance à 660 nm est proportionnelle à la concentration de phosphore. Référence: Standard Method for The Examination Of Water And Wastewater, 18th Edition 1992, Edited by: Arnold E. Greenberg, Lenore S. Cleseri, Andrew D. Eaton, p.4-108, 4500-P, Phosphorus p.4-108 à 4-117, 4500-P F. Automated Ascorbic Acid Reduction Method, 4-116, ISBN 0-87553
412	Conductivité électrique (25°C)	La conductivité est définie comme étant la mesure de la capacité d'un extrait liquide à conduire le courant électrique, elle est directement reliée à la concentration et à la nature des substances dissoutes. La détermination de la conductivité est effectuée directement dans le milieu, soit l'échantillon liquide préalablement amené à la température pièce et lue sur un conductivimètre. Référence: Standard Methods for Examination of Waste and WasteWater, 18th Edition 1992, Edited by: Arnold E. Greenberg, Lenore S. Cleseri and Andrew D. Eaton, ISBN 0-87553-207-1, p. 2-43-46, No: 2510, CONDUCTIVITY

Source : Bernard Montminy, Chimiste, M.Sc., Responsable de laboratoire (2021-01-0

Annexe 15 : Granulométrie au laser

Sommaire du protocole d'analyse de la granulométrie fine (dans les érodâts) au compteur de particules

- 1- Sédimentation
 - 2- Extraction du surnageant
 - 3- Séchage des sédiments (décantât) à 130°F pendant +/- 48 heures sans calcination
 - 4- Ameublissement (« broyage ») du « pain » de sédiments séché sorti du séchoir
 - 5- Tamisage au travers d'une colonne classique (8 mm – 125 µm)
 - 6- Collecte du tamisât (<125 µm) et mouillage d'une fraction avec de l'eau déminéralisée
 - 7- Paramétrage de l'appareil : sélection de la valeur 1.55 du « Réfraction Index » avec sédiments comme matrice ou matériaux
 - 8- Vidange-passage de l'échantillon dans le granulomètre Laser
- NB : vérifier que la Transmittance lors de l'analyse reste entre 80% - 90% idéalement.
- 9- Les fichiers csv générés sont convertis sous forme Excel puis analyses supplémentaires (fournissent les pourcentages des fractions fines suivant diverses classes de diamètres ainsi qu'un sommaire de statistiques descriptives)
 - 10- Utilisation du Programme GRADISTAT version 4.0 (Blott, 2000) à accès libre en ligne pour générer les statistiques sur les classes texturales (%Argiles, %Limons, %Sables).

Annexe 16 : Analyse de l'homogénéité des pluies reçues, effet position de la parcelle secondaire au sein du bloc (parcelle principale), lignes d'iso-intensités de pluie

Intensités moyennes de pluie par traitement (parcelle secondaire) par niveau de pluie (Ac et Fu)

Actuelles (État.Struct et I mm.h⁻¹)(Blocs : #2, #3, #6)		Futures (État.Struct et I mm.h⁻¹) (Blocs : # 1, #4, #5)	
# Traitement (Parcelle #)	I moy. (mm.h ⁻¹)	# Traitement (Parcelle #)	I moy. (mm.h ⁻¹)
1-S.Nu (P1, P1, P5)	60.02	1-S.Nu (P4, P6, P6)	65.79
2-SD.SPLC (P2, P5, P6)	63.91	2-SD.SPLC (P1, P5, P5)	75.71
3-SD.PLC (P3, P3, P4)	61.23	3-SD.PLC (P1, P2, P4)	69.06
4-Ch.SPLC (P3, P4, P6)	58.15	4-Ch.SPLC (P3, P3, P5)	78.48
5-Ch.PLC (P1, P4, P5)	60.55	5-Ch.PLC (P2, P2, P6)	65.74
6-P (P2, P2, P6)	67.02	6-P (P1, P3, P4)	71.74
I moy. (mm.h⁻¹) Blocs Cdt.Ac.	61.81	I moy. (mm.h⁻¹) Blocs Cdt.Fu.	71.09
Trt#4 : risque de «sous-érosion»		Trt#1 : risque de «sous-érosion»	
Trt#6 : risque de «sur-érosion»		Trt4 : risque de «sur-érosion»	

Notes :

- Le traitement appliqué aux parcelles 1 à 6 au sein du bloc varie d'un bloc à l'autre
- L'intensité de pluie reçue dépend de la position de la parcelle et non du traitement
- Le Tableau ci-dessus complète l'information du Tableau 4.2 (résultats)
- Le Tableau ci-dessus résume les intensités de pluie moyenne par traitement selon les deux conditions ou niveaux de pluie

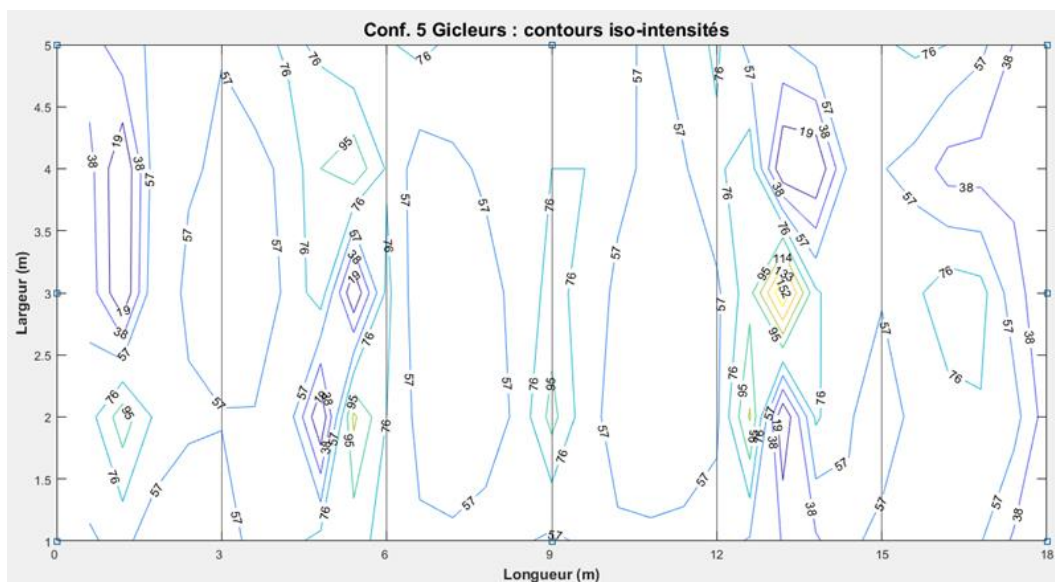


Figure A16.2 : lignes d'iso-intensités de pluie (Cdt.Ac. 61.8 mm.hr⁻¹)

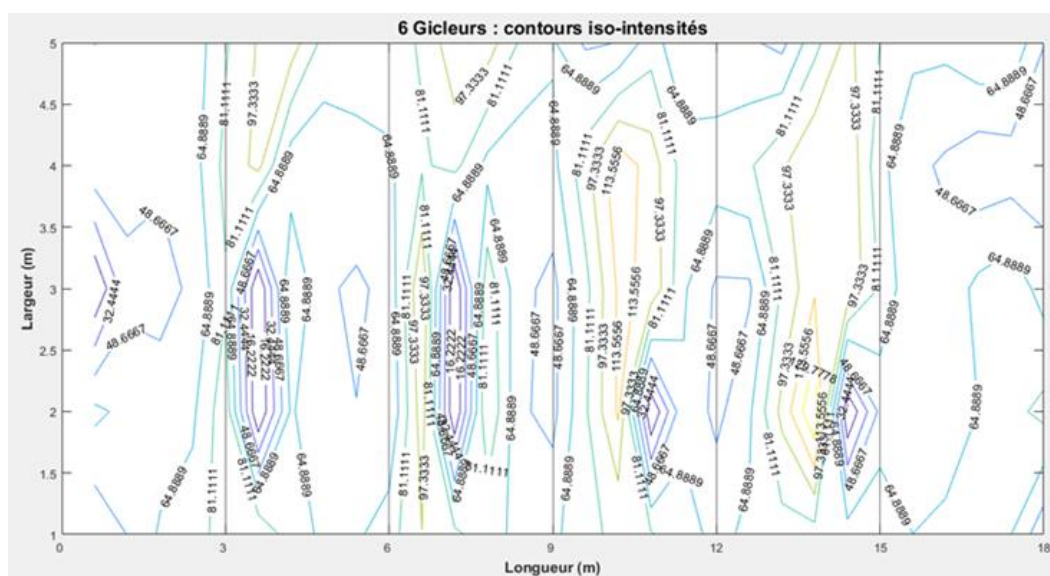


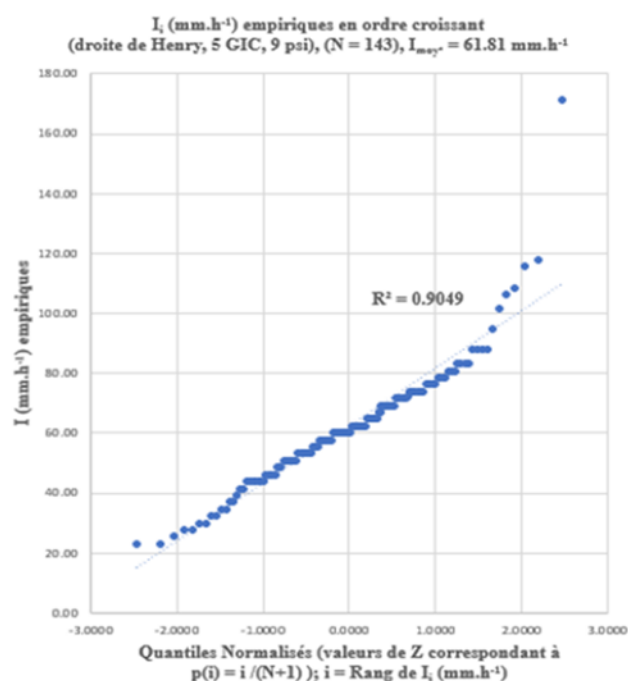
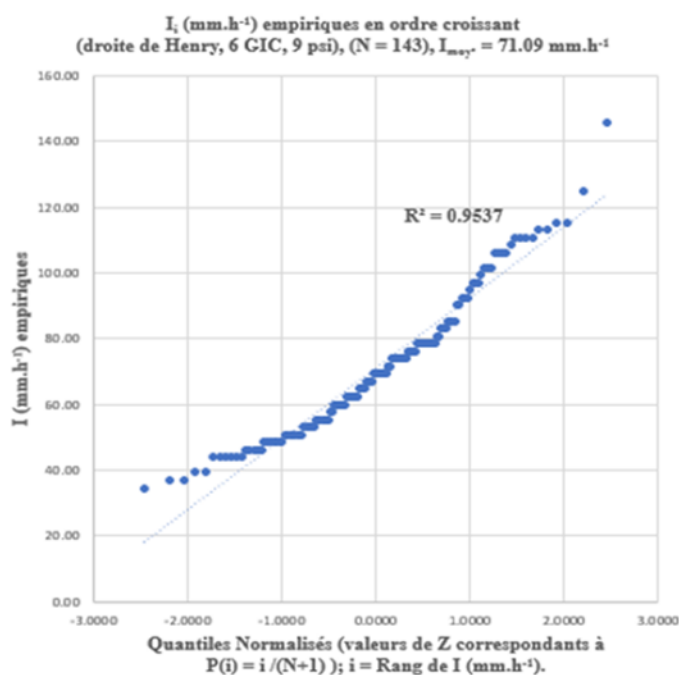
Figure A16.3 : lignes d'iso-intensités de pluie (Cdt.Fu. 71.1 mm.hr⁻¹)

Test d'homogénéité des intensités de pluies intra bloc et de différence inter blocs

Les données (tableaux, histogrammes et graphiques) ci-dessus montrent une relative hétérogénéité intra bloc des pluies telle que reçues (dans les parcelles secondaires-systèmes culturaux-). Les graphiques des secteurs et des contours d'iso intensités de pluie révèlent une variabilité inter parcelles (intra bloc) des intensités de pluie (mm.h^{-1}).

La distribution des fréquences en histogrammes des intensités de pluies est obtenue à partir d'un échantillon de 150 pluviomètres disposés en grille (1 m x 0.5 m) dans un bloc.

L'analyse de l'hypothèse de normalité de chacune des distributions des intensités des deux pluies simulées donne les droites de Henry ci-dessous :



L'allure générale des histogrammes des intensités de pluies suggère une distribution normale des deux (2) pluies simulées.

Les coefficients de détermination [(5 gicleurs, $I_{\text{moy.}} 61 \text{ mm.hr}^{-1}$: $R^2 = 0.91$) et (6 gicleurs, $I_{\text{moy.}} 71 \text{ mm.hr}^{-1}$: $R^2 = 0.95$)] des droites de Henry soutiennent davantage l'hypothèse d'une distribution normale des fréquences des intensités de pluies pour chacun des deux niveaux de climat-pluies.

Le test de Kolmogorov-Smirnov (KS) avec Microsoft Excel sur la normalité de distribution des intensités de pluies confirme la validité de l'hypothèse nulle (H_0) de la distribution normale au sein d'un même bloc :

- conditions actuelles (climat actuel), $I_{\text{moy.}} \mathbf{61.81 \text{ mm.hr}^{-1}}$:

La statistique de test KS_{cal} ou KS_{stat} (0.16) est < la valeur critique ou tabulée KS_{crit} ou KS_{tab} (1.36) avec $N = 143$ (> 50, seuil minimal de validité) à $\alpha = 5\%$,

- conditions futures (climat futur), $I_{\text{moy.}} \mathbf{71.09 \text{ mm.hr}^{-1}}$:

La statistique de test KS_{cal} ou KS_{stat} (0.26) est < la valeur critique ou tabulée KS_{crit} ou KS_{tab} (1.36) avec $N = 143$ (> 50, seuil minimal de validité) à $\alpha = 5\%$.

Le tableau 4.2 présente la distribution des intensités de pluies par parcelle secondaire et par niveau de climat-pluies. L'ANOVA des intensités moyennes de pluies suivant les différentes positions au sein du bloc s'est révélée non significative (p-value 0.72 en conditions actuelles ; p-value 0.33 en conditions futures).

L'interaction Position (parcelles secondaires) * Conditions (niveau de pluie) selon l'analyse des effets en Modèle Mixte (JMP Pro.15) n'est pas significative (p-value 0.48), seul l'effet condition (Intensité moyenne de pluie) est significatif (p-value = 0.0013).

En définitive, il n'y a pas assez de données pour conclure à l'existence d'un effet position de la parcelle secondaire au sein du bloc sur l'intensité de pluie reçue.

C'est-à-dire, dans les mêmes conditions (climat actuel, climat futur), la différence des intensités moyennes de pluies reçues entre les différentes parcelles secondaires au sein d'un même bloc n'est pas statistiquement significative.

L'hypothèse H_0 de l'homogénéité de la distribution des intensités de pluies pour chacune des deux pluies simulées au sein d'un même bloc (parcelle principale) est acceptée.

Ce résultat valide l'indépendance des observations (intensités de pluies reçues singulièrement par les différents systèmes culturels au sein d'un même bloc et d'un bloc à un autre).

Annexe 17 : Diamètre D₅₀ théorique des gouttes des pluies simulées

$$D_{50} = 0.92 \times I^{0.21}$$

structure des diamètres théoriques (D₅₀) des gouttes des pluies simulées

I-WOB2 Standard Angle 6 Groove-Grey small Droplet				
Buse#22, 9 PSI		5 gicleurs		6 gicleurs
Parcelle	Intensité	D ₅₀ (Théo.)	Intensité	D ₅₀ (Théo.)
	(mm.h ⁻¹)		(mm.h ⁻¹)	
1	57.67	2.16	62.11	2.19
2	74.05	2.27	68.42	2.23
3	62.21	2.19	76.46	2.29
4	59.27	2.17	76.64	2.29
5	64.71	2.21	82.52	2.32
6	52.97	2.12	60.36	2.18
Moyenne	61.81	2.19	71.09	2.25
Ecart-type Corr.	7.21	0.05	8.87	0.06
CV(%)	11.67	2.41	12.48	2.64
$\alpha =$	0.92			
$\beta =$	0.21			
Niveau de confiance : 95%			0.95	0.5
Nombre de données (n)		6		6
Cote Z		1.96		1.96
Marge d'Erreur		0.0421		0.0476
IC 95% :				
Inf. (mm)		2.14		2.20
Sup. (mm)		2.23		2.30

Annexe 18 : Lignes d'iso-érosivité des pluies à travers le Québec selon Madamootoo (1987-1988)

Conditions hivernales non incluses

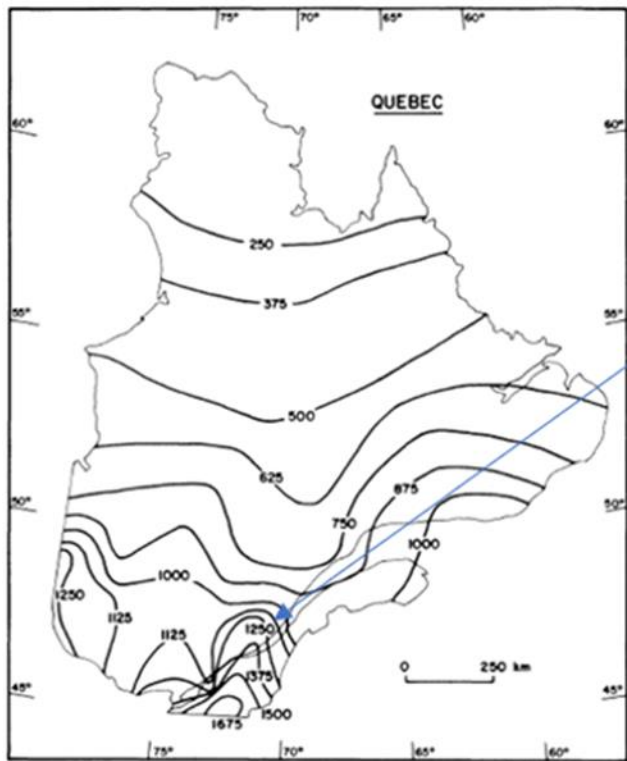


Fig. 3—Erosivity indices, winter conditions included, for Quebec (MJ.mm/ha.h).

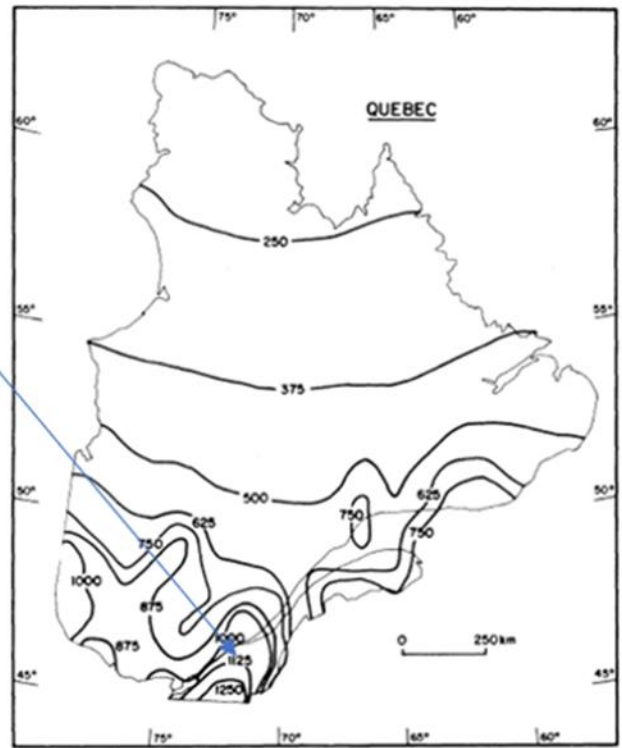
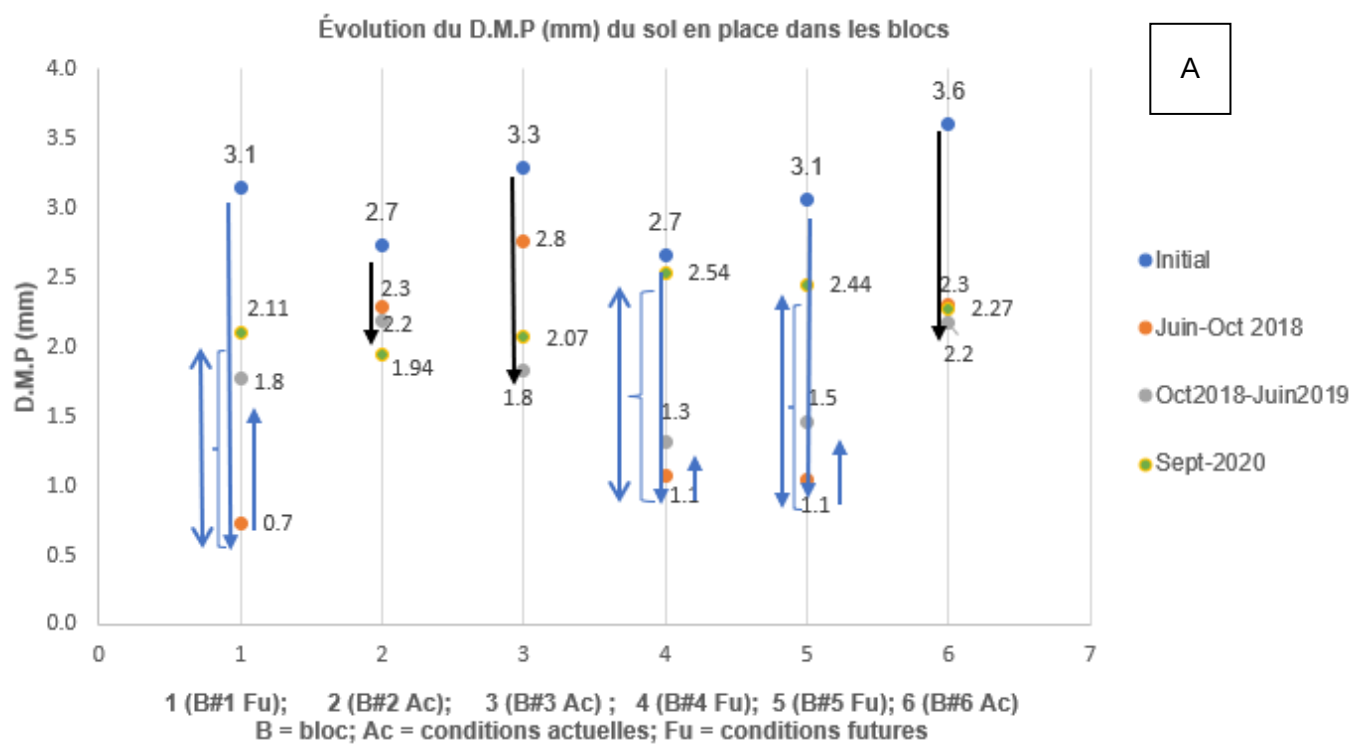


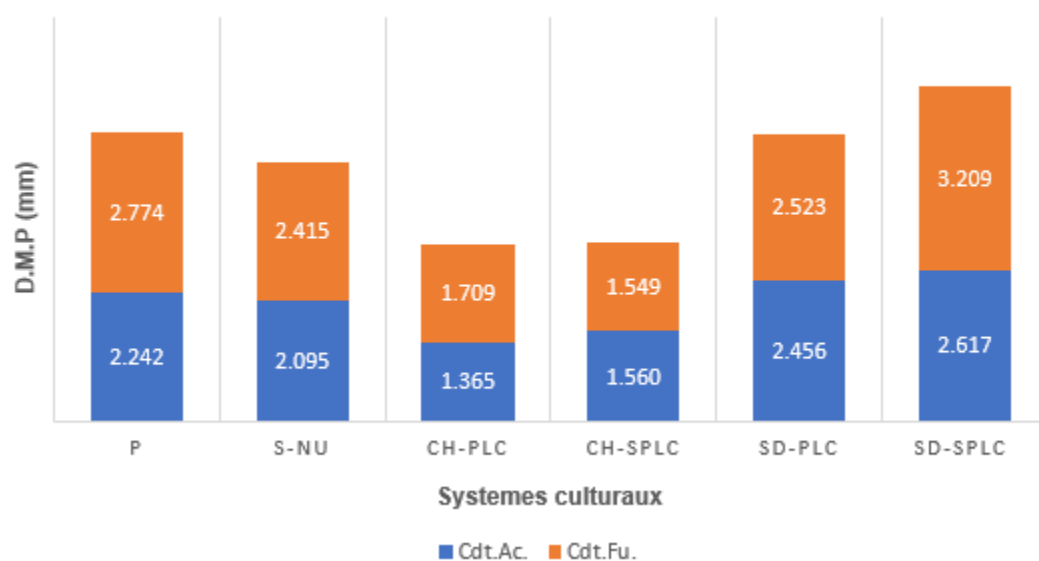
Fig. 1—Erosivity indices, winter conditions not included, for Quebec (MJ.mm/ha.h).

Source: Madramootoo, 1987-1988. Rainfall and Runoff Erosion Indices for Eastern Canada. ESAE.

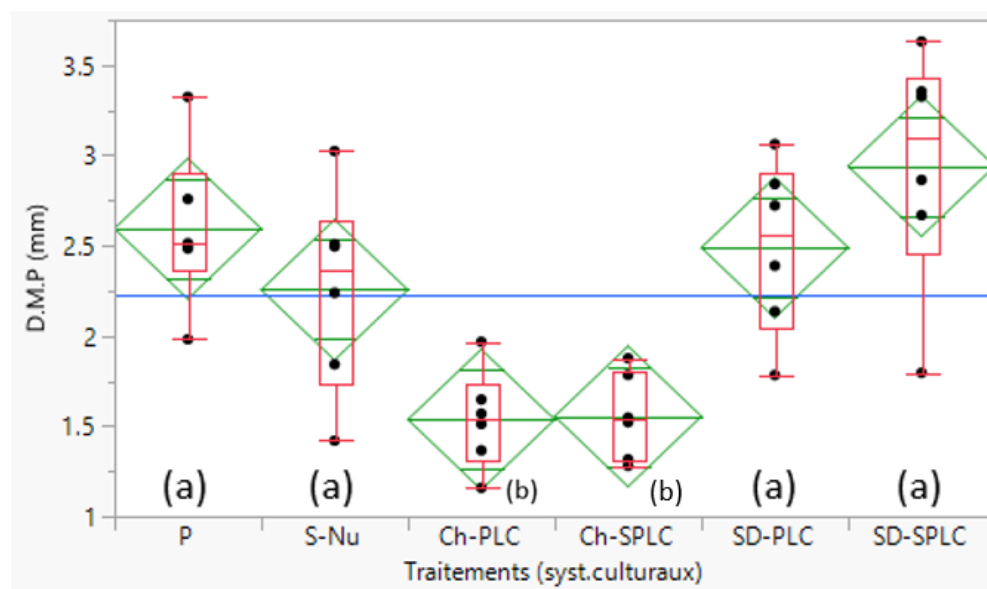
Annexe 19 : Évolution du DMP dans les blocs sous les deux conditions (Cdt.Ac et Cdt.Fu) (A), conditions-systèmes cultureux (B) et différence statistiques (C)



D.M.P du sol en place par système cultural (sept2020)



B



C

Test de Tukey-Kramer (α 5%) :

Les syst.cult. partageant la même lettre (a, b) traduisent une diff. non sig.

Annexe 20 : Courbe cumulative (A), Diagramme de répartition des blocs et des parcelles suivant les deux textures (loam et loam sableux)(B), Analyse de Texture suivant les conditions et les systèmes culturaux du sol en place (C)

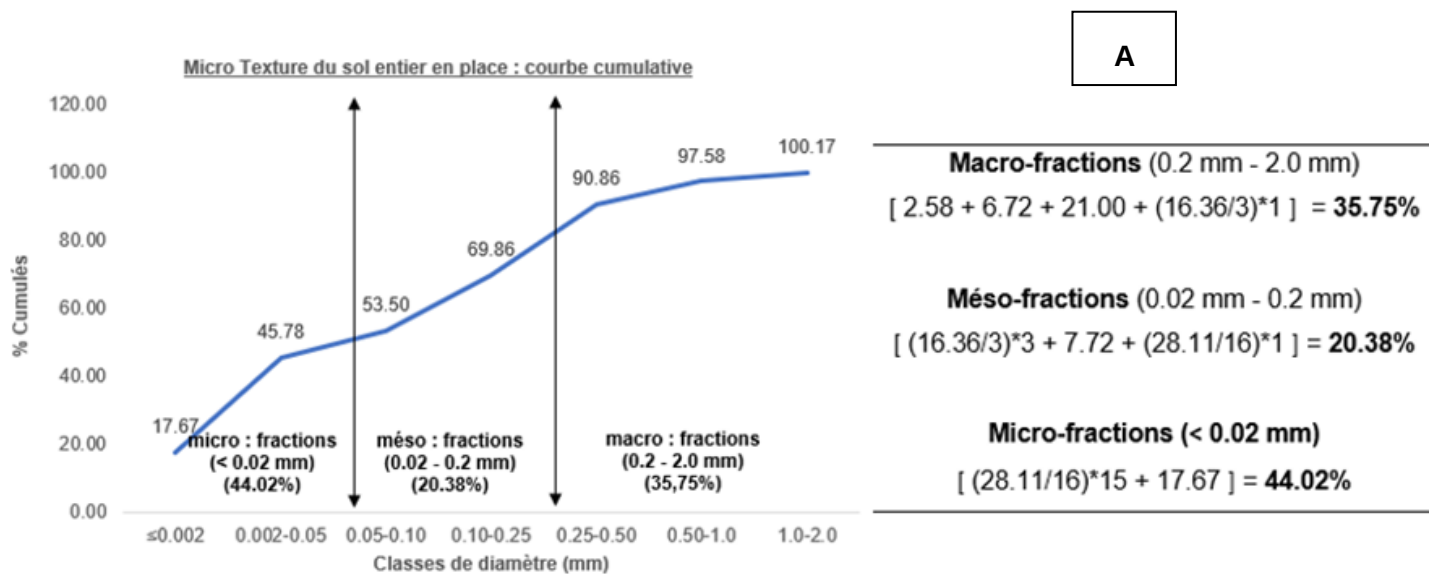
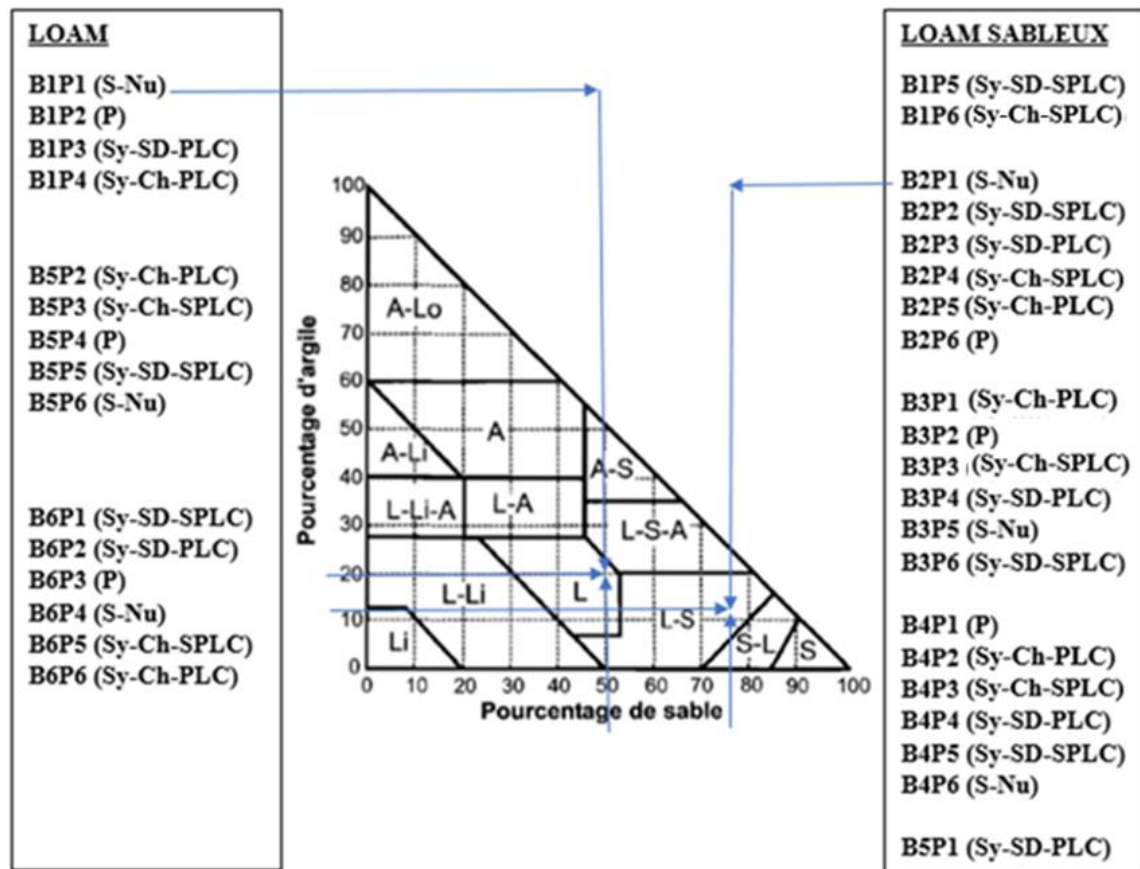


Figure A20.4 : Courbe cumulative et répartition des fractions ≤ 2.0 mm du sol en place



Triangle de texture : selon *Le Système canadien de classification des sols*, 3^{éd}, 2002.

(Agriculture et Agroalimentaire Canada).

Figure A20.5 : Répartition des parcelles (systèmes cultureux) dans les deux classes texturales du sol

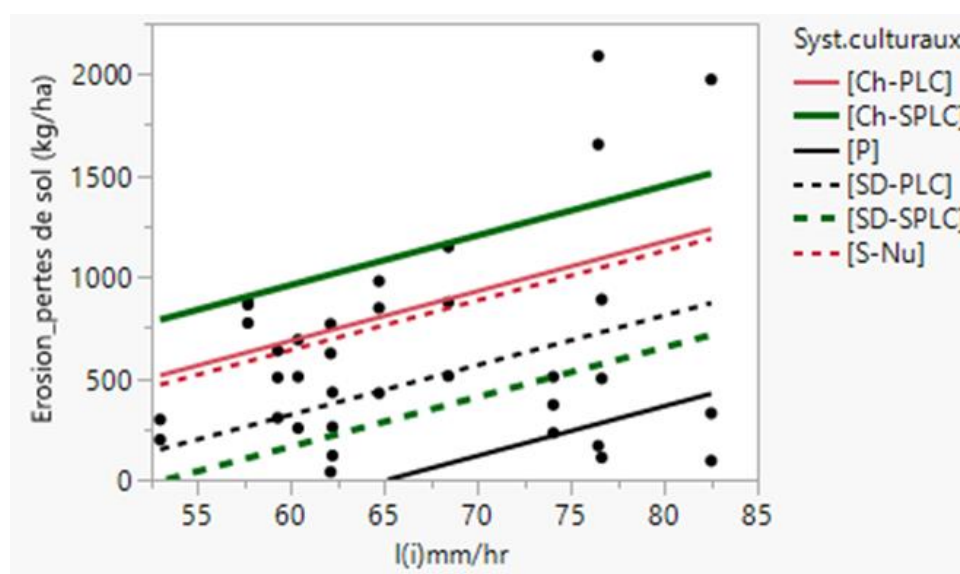
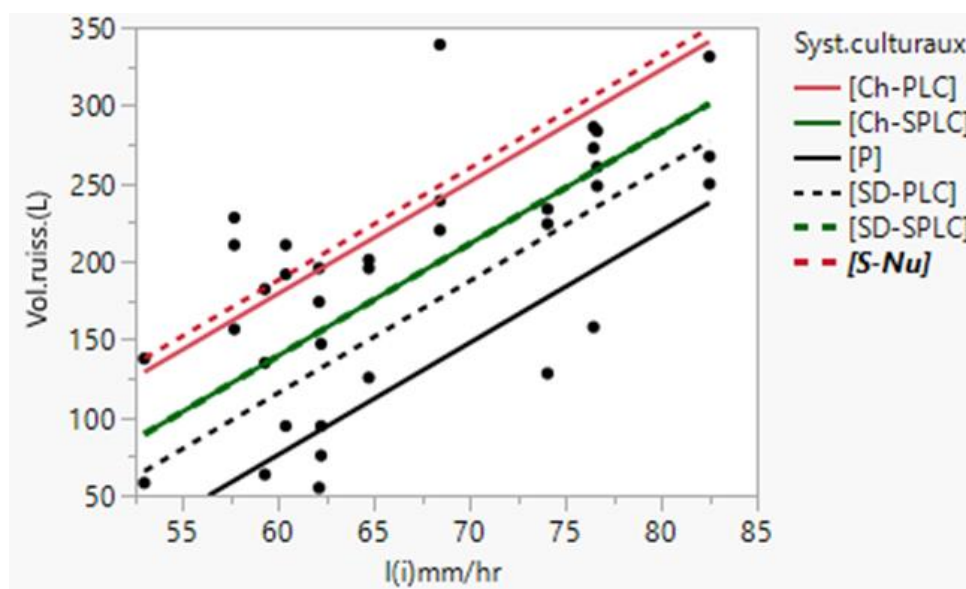
Texture du sol en place dans les deux blocs (Cdt.Ac. et Cdt.Fu.)

État textural du sol en place dans les deux groupes de blocs (effet condition)			
Stat	% Sables Totaux	% Limons Totaux	% Argiles Totales
Cdt.Ac.		Actuelle	
Moy.	55.90 (a)	27.40 (b)	16.72 (c)
E.T	16.97	13.10	4.06
Cdt.Fu.		Future	
Moy.	52.56 (a)	28.83 (b)	18.61 (c)
E.T	5.70	4.78	2.17
sig. à 0.05	(a) : diff. non sig.	(b) : diff. non sig.	(c) : diff. non sig.

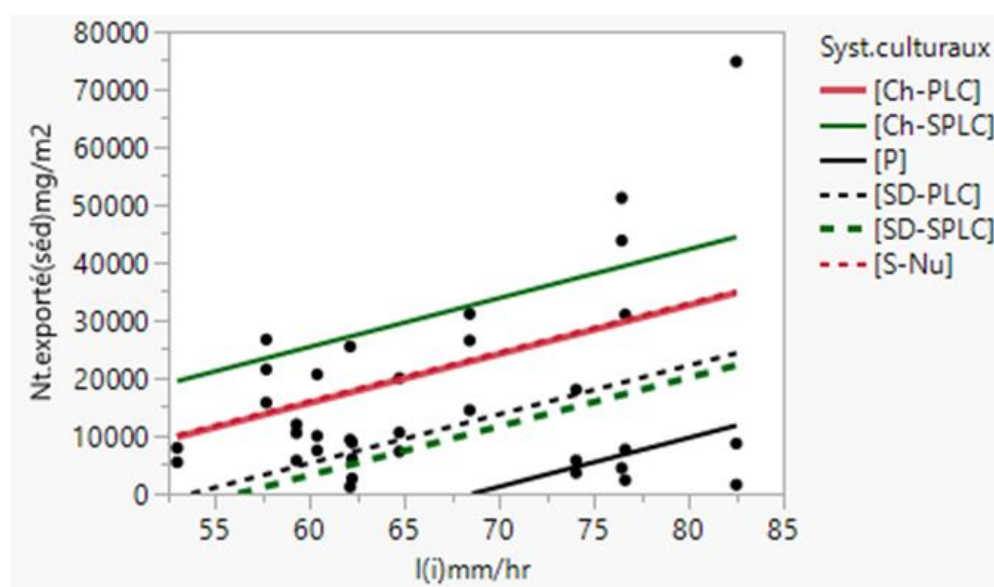
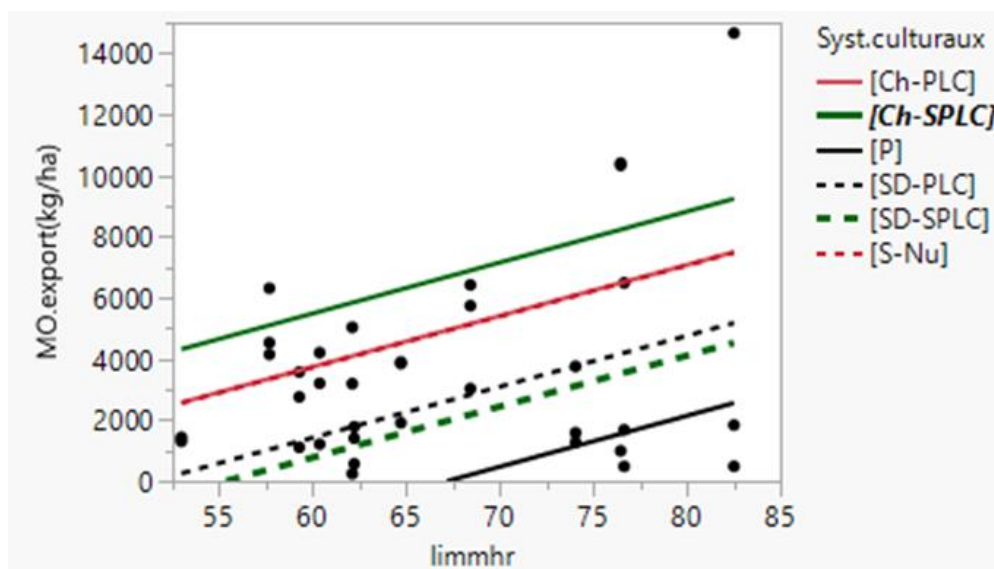
Texture du sol en place à travers les différents systèmes cultureux

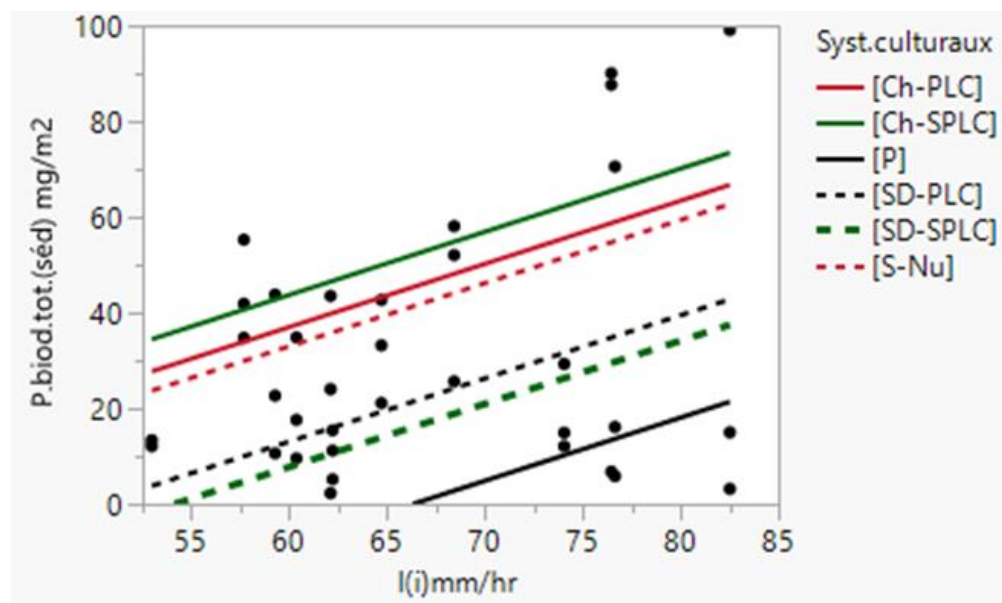
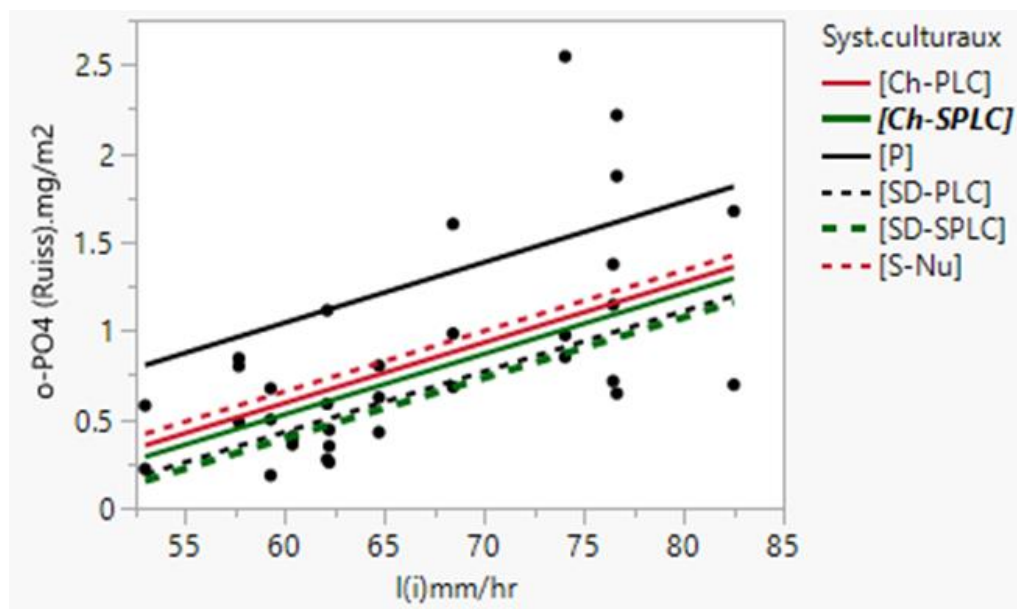
Texture moyenne du sol en place par traitement (système cultural)			
Traitements	% Sables Totaux	% Limons Totaux	% Argiles Totales
P	51.83 (a)	29.50 (b)	18.67 (c)
S-Nu	55.00 (a)	28.50 (b)	16.50 (c)
Ch-PLC	55.50 (a)	27.67 (b)	16.83 (c)
Ch-SPLC	53.00 (a)	29.33 (b)	17.67 (c)
SD-PLC	55.33 (a)	26.33 (b)	18.33 (c)
SD-SPLC	54.67 (a)	27.33 (b)	18.00 (c)
Sig. à 0.05	(a) : diff. non sig.	(b) : diff. non sig.	(c) : diff. non sig.

Annexe 21 : Évolution des variables réponse (ruissellement et pertes de sol) selon les systèmes culturaux en fonction de la variation de l'intensité de pluie (covariable)

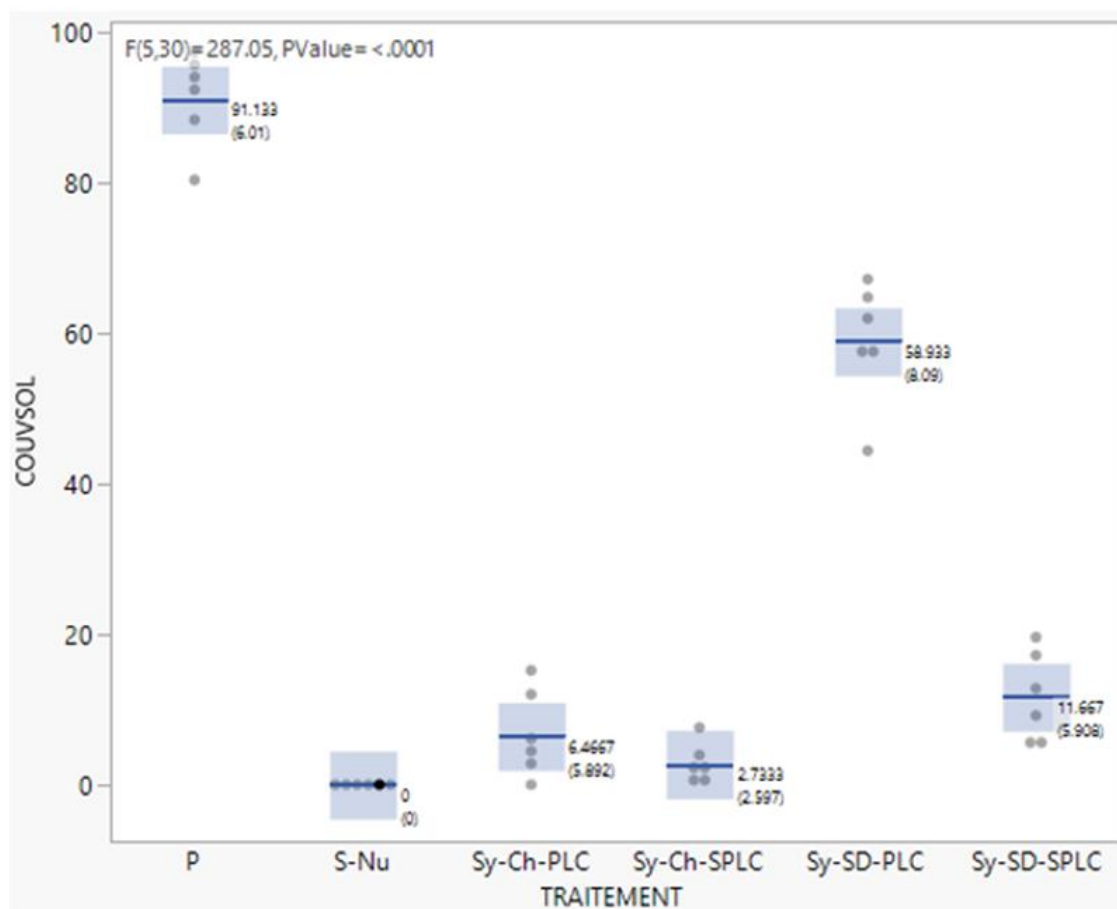


Annexe 22 : Évolution des variables réponse (MO, N-t, Phosphore) selon les systèmes culturaux en fonction de la variation de l'intensité de pluie (covariable)





Annexe 23 : Variation du pourcentage de couvert au sol suivant les différents systèmes culturaux



Variation (significative 5%) du %couvert au sol entre les différents systèmes culturaux

Figure A23.6 : significativité du % de couvert au sol entre les différents systèmes

Annexe 24 : Photos du site



Systèmes cultureux, tonte de la culture intercalaire, installation du simulateur de pluie (SIM) et du réseau de collecte du ruissellement de surface



Simulateur de pluie (hors parcelles et au champ)



Ruissellement localisé