



RAPPORT FINAL

IMPACTS HYDROLOGIQUES DES SYSTÈMES CULTURAUX ET DE LA DÉGRADATION PHYSIQUE DES SOLS

Responsable scientifique : Simon RICARD, ing., Ph.D., Chercheur IRDA

Co-responsable : Marc-Olivier GASSER, agr., Ph. D.

Collaborateurs : Eduardo Chavez, Nyck Rochel Occéan, Jean-Benoît Mathieu, William Huertas, Arianne Blais-Gagnon, Colline Gombault, Neysa Mireille Sawadogo, Flora Umuhire, Mick Wu, Catherine Bossé.

Rapport présenté au MAPAQ

Juillet 2023

Projet IRDA #820600



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progressé** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Simon Ricard, ing., Ph.D.

Chercheur en hydrologie

Responsable scientifique et auteur principal

T : 418 64302380, poste 691

simon.ricard@irda.qc.ca

Auteurs du rapport	Équipe de réalisation
Simon Ricard, Marc-Olivier Gasser, Eduardo Chavez, Jean-Benoît Mathieu, Colline Gombault	Nyck Rochel Occéan, William Huertas, Arianne Blais-Gagnon, Neysa Mireille Sawadogo, Flora Umuhire, Mick Wu, Catherine Bossé.

Merci à notre partenaire financier

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

Ce rapport peut être cité comme suit :

Ricard, S., M.-O. Gasser, E. Chavez, C. Gombault, J. B. Mathieu, N. R. Occéan, A. Blais-Gagnon, W. Huertas, N. M. Sawadogo, F. Umuhire, M. Wu et C. Bossé. 2023. Impacts hydrologiques des systèmes culturaux et de la dégradation des sols. Rapport final. IRDA et partenaires. 148 pages.

TABLE DE MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
1. INTRODUCTION.....	1
2. RÉVISION DU PLAN DE TRAVAIL.....	2
3. EFFETS DE LA DÉGRADATION DU SOL SUR LA PRODUCTIVITÉ DES CULTURES, L’HYDROLOGIE ET LA QUALITÉ DE L’EAU AU SITE EXPÉRIMENTAL DE SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON.....	3
3.1 Pratiques agricoles implantées en dispositif expérimental.....	4
3.2 Dispositif en micro-bassins.....	6
3.3 Traitements dans les 12 micro-bassins et 48 parcelles expérimentales.....	8
3.3.1 Implantation du dispositif expérimental dans les 12 micro-bassins.....	8
3.3.2 Implantation du dispositif expérimental dans les 48 parcelles.....	11
3.3.3 Compaction du sol.....	15
3.4 Résultats agronomiques.....	20
3.4.1 Dispositif expérimental en 12 micro-bassins.....	20
3.4.2 Dispositif expérimental en 48 parcelles.....	22
3.5 Effets des pratiques agricoles sur les sols.....	24
3.5.1 Effets des pratiques agricoles sur les propriétés physiques du sol en profondeur.....	24
3.5.2 Effets des pratiques agricoles sur la chimie-fertilité du sol.....	28
3.5.3 Évaluer l’effet des pratiques agricoles sur la stabilité structurale à la surface du sol dans les deux dispositifs.....	28
3.6 Effets des pratiques agricoles sur la qualité de l’eau.....	30
4. EFFETS DES SYSTÈMES CULTURAUX ET DE LA DÉGRADATION DES SOLS SUR L’HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS VERSANTS AGRICOLES.....	35
4.1 Données météorologiques pour fin de modélisation.....	38
4.2 SIG à haute résolution suivant un protocole harmonisé.....	42
4.3 Modélisation.....	43
4.3.1 Sélection des bassins à modéliser.....	43
4.3.2 Description des bassins sélectionnés.....	43
4.3.3 Mise en œuvre des modèles.....	45
4.3.4 Paramétrisation.....	46
4.3.5 Scénarisation.....	49
4.3.6 Mise en place des 12 micro-bassins de Saint-Lambert-de-Lauzon.....	54

4.3.7	Optimisation	56
5.	ANALYSES.....	62
5.1	Évolution de deux propriétés physiques de sol dans le dispositif expérimental en 48 parcelles	62
5.2	Analyse des propriétés physico-chimiques des sols des dispositifs à Saint-Lambert-de-Lauzon	75
5.2.1	Indicateurs de chimie-fertilité	75
5.2.2	Stabilité des agrégats de sol	78
5.3	Rendements dans les deux dispositifs expérimentaux	79
5.4	Essai de fertilisation azotée dans le maïs-grain dans le dispositif en 12 micro-bassins.....	83
5.5	Impact des pratiques agricoles sur le régime hydrique	89
5.5.1	Impact des régies culturales sur les 12 micro-bassins	89
5.5.2	Impact des propriétés physiques des sols sur les 12 micro-bassins	93
5.5.3	Impacts des pratiques agricoles à l'échelle des bassins versants agricoles	96
6.	CONCLUSIONS.....	98
7.	ACTIVITÉS DE DIFFUSION	99
	ANNEXES.....	100
	ANNEXE A - Plan de travail modifié	101
	ANNEXE B - Analyses des biais pour la grille CaPA	102
	ANNEXE C - Détails des geotadabases et sources des données pour la modélisation SWAT	105
	ANNEXE D - Tableau comparatif des sols des cinq bassins	106
	ANNEXE E - Contour détaillé des bassins versants choisis pour la modélisation	107
	ANNEXE F - Fonctions de transferts pédologiques pour alimenter la table Usersoil du paramétrage SWAT ..	108
	ANNEXE G - Évolution de l'utilisation du sol lors des années de référence pour l'optimisation	111
	ANNEXE H - Dates des opérations agricoles scénarisées à partir des rapports sur l'état des cultures (FADQ)	113
	ANNEXE I - Résumé des spécificités des scénarios améliorés	114
	ANNEXE J - Interpolation du relevé topographique sur les 12 micro-bassins de Saint-Lambert-de-Lauzon	115
	ANNEXE K - Découpage des 12 micro-bassins.....	116
	ANNEXE L - Paramètres d'optimisation pour l'Hydrologie.....	117
	ANNEXE M - Disponibilité des données hydrologiques mesurées	118
	ANNEXE N - Bilans hydrologiques annuels simulés après calage	119
	ANNEXE O - Paramètres d'optimisation pour la qualité de l'eau.....	120
	ANNEXE P - Résultats de calage des bassins Brook, Brulée, Pot-Au-Beurre et Fourchette	121
	ANNEXE Q - Paramètres d'optimisation pour l'hydrologie des 12 micro-bassins.....	126

ANNEXE R - Bilans hydriques des 12 micro-bassins après calage	127
ANNEXE S - Simulations hydrologiques aux 12 micro-bassins	128
ANNEXE T - Résultats des analyses chimiques des sols.....	130
ANNEXE U - Résultats des analyses sur la stabilité structurale	132
ANNEXE V - Suivi hydrométrique à saint-Lambert sous forme de tableaux.....	133
ANNEXE W - Résistance à la pénétration mesurés sur les transects des 48 parcelles en octobre 2020	136
ANNEXE X - Modèle statistique complet décrivant la proportion du ruissellement à Saint-Lambert	137
ANNEXE Y - Évolution des charges totales à Saint-Lambert issue des modèles statistiques	139
ANNEXE Z - Bilan hydrologique simulées à l'échelle mensuelle.....	142
ANNEXE AA - Fiche synthèse sur la série Le Bras	143
RÉFÉRENCES.....	144

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Description des opérations et aménagements du dispositif expérimental de micro-bassins.....	6
Tableau 2.	Informations sur les semences et le semis des 12 micro-bassins.....	9
Tableau 3.	Doses des fertilisants minéraux utilisés dans les 12 micro-bassins.....	9
Tableau 4.	Description des opérations culturales et des suivis agronomiques réalisés sur les 12 micro-bassins.	10
Tableau 5.	Informations sur les semences et le semis des 48 parcelles.	12
Tableau 6.	Doses des fertilisants utilisées dans les 48 parcelles.....	12
Tableau 7.	Description des opérations culturales et des suivis agronomiques réalisés sur les 48 parcelles.....	13
Tableau 8.	Poids des essieux des tracteurs et du DM-AIR et de la citerne Houle mesurés lors de la compaction dans les deux dispositifs expérimentaux.	17
Tableau 9.	Proportion des zones compactées par rapport la surface totale de l'unité expérimentale dans les deux dispositifs expérimentaux.....	19
Tableau 10.	Les rotations des cultures et les récoltes réalisées dans les 12 micro-bassins.....	20
Tableau 11.	Les rotations des cultures et les récoltes réalisées dans les 48 parcelles.	22
Tableau 12.	Inventaire des bassins versants prioritaires pour les bases de données hydrométriques et météorologiques*.....	36
Tableau 13.	Correspondance entre les points de grille CaPA et les stations météorologiques du MELCCFP.....	39
Tableau 14.	Classes de pente (%) et superficies couvertes par ces classes pour chaque bassin.	45
Tableau 15.	Découpage des bassins en sous-bassins et Unités de Réponses Hydrologiques (URHs).....	45
Tableau 16.	Paramètres des propriétés physico-chimiques importantes pour les sols.....	47
Tableau 17.	Ratio P/N des matières fertilisantes animales par catégorie d'élevage.	48
Tableau 18.	Ratios N/P utilisés pour déterminer les apports en N en fonction des élevages prépondérants.	48
Tableau 19.	Besoins en N pour les grandes cultures simulés dans les cinq bassins.....	49
Tableau 20.	Proportion des régimes de travail de sol appliquée dans chaque bassin par rapport au % de sol travaillé (prairies exclues).	51
Tableau 21.	Spécificité des travaux de sol implémentés dans SWAT.....	52
Tableau 22.	Application de la fertilisation (en % des apport annuels).....	53
Tableau 23.	Paramétrisation et scénarisation des 12 micro-bassin pour l'optimisation des modèle SWAT.....	55
Tableau 24.	Sources de variation fixes du modèle mixte pour la MVA.....	63
Tableau 25.	Sources de variation fixes du modèle mixte pour la teneur en air volumique/porosité totale.	64

Tableau 26: Évolution de la MVA et de la TEA/porosité sous quatre types de rotations à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.	65
Tableau 27: Évolution de la MVA et de la TEA/porosité sous l'effet de la compaction à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.	66
Tableau 28: Évolution de la MVA et de la TEA/porosité pour deux types de travail de sol à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.	67
Tableau 29. Paramètres de chimie-fertilité des sols du dispositif en 12 micro-bassins.....	77
Tableau 30. Paramètres de chimie-fertilité des sols du dispositif en 48 parcelles.	77
Tableau 31. Effet des facteurs fixes sur le rendement en maïs-grain dans le dispositif en 12 micro-bassins.	79
Tableau 32. Effet des facteurs fixes sur le rendement en maïs-grain dans le dispositif en 48 parcelles (100 kg N/ha – 170 kg/ha).	80
Tableau 33. Rendements maximaux moyens et intervalles de confiance des différents traitements	85
Tableau 34. Doses d'azote nécessaire pour atteindre le rendement maximal et intervalles de confiance.	86
Tableau 35. Critère d'information AIC pour chaque modèle statistique évalué.....	90
Tableau 36. Conclusions issues de l'analyse statistique pour les charges de matières en suspension, phosphore total et nitrates.	93
Tableau 37. Propriétés physiques entre des sols cultivés et témoins issues des échantillons analysés dans l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec (Gasser et al., 2023)*.....	94
Tableau 38. Changements des composantes du bilan hydrologique simulés à partir des scénarios d'amélioration des propriétés physiques des sols pour les 12 micro-bassins à Saint-Lambert-de-Lauzon.....	95
Tableau 39. Composantes des bilans hydrologiques simulées à partir des scénarios de référence et alternatifs pour les bassins Castor et Pot-au-Beurre.	96
Tableau 40. Changements en termes de charges annuelles de matières en suspension (MES), phosphore total (P-total) et nitrates (N-NO ₃) simulés à partir des scénarios de référence et alternatifs pour le bassin Pot-au-Beurre.	97

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Dispositif expérimental des 12 micro-bassins dans les champs 17-18 de la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon.....	4
Figure 2. Dispositif expérimental des 48 parcelles dans le champ 19 de la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon.....	5
Figure 3. Plans de nivellement des 12 micro-bassins.....	7
Figure 4. Croquis des avaloirs installés.....	7
Figure 5. Réfection des avaloirs, des risbermes et des aires de captage.....	8
Figure 6. Disposition des doses variables de N utilisées pour le maïs en 2022 dans les 12 micro-bassins.....	11
Figure 7. Passage du DM-AIR sur les traitements de sol compacté dans les deux dispositifs expérimentaux.....	15
Figure 8. Passage de la citerne à lisier Houle (à droite) sur les traitements de sol compacté dans les deux dispositifs expérimentaux.....	15
Figure 9. Patron de circulation de la citerne Houle en 2020 sur les parcelles sous traitement de sol compacté dans le dispositif en 12 micro-bassins.....	16
Figure 10. Patron de circulation du DM-AIR en 2021 et 2022 sur les parcelles sous traitement de sol compacté dans le dispositif en 12 micro-bassins.....	16
Figure 11. Patron de circulation de la citerne Houle en 2020 sur les parcelles sous traitement de sol compacté dans le dispositif en 48 parcelles.....	17
Figure 12. Patron de circulation du DM-AIR en 2021 et 2022 2020 sur les parcelles sous traitement de sol compacté dans le dispositif en 48 parcelles.....	17
Figure 13. Tracteur et DM-AIR utilisés pour la compaction des sols dans les deux dispositifs expérimentaux.....	18
Figure 14. Dimensions des pneus du tracteur et du DM-AIR ainsi que les poids mesurés par pneu/essieu en 2022.....	18
Figure 15. Rendements des cultures dans les 12 micro-bassins en 2021.....	20
Figure 16. Moyennes des rendements à 15 % d'humidité (tm/ha) dans les 12 micro-bassins en 2022 (ordonnées par dose d'azote).....	21
Figure 17. Moyennes des rendements à 15 % d'humidité (tm/ha) dans les 12 micro-bassins en 2022 (ordonnées par traitement).....	21
Figure 18. Rendements du maïs-grain sous l'effet des traitements Compaction (C1 : sol non compacté et C2 : compacté) et Travail de sol (S1 conventionnel et S2 réduit) dans le dispositif de 48 parcelles en 2020.....	22
Figure 19. Rendements des cultures dans le dispositif de 48 parcelles en 2021.....	23
Figure 20. Rendements du maïs-grain et de la prairie dans le dispositif de 48 parcelles en 2022.....	23

Figure 21. Effets des systèmes de culture sur la masse volumique apparente (MVA), la proportion de la porosité totale occupée par l'eau et la teneur en air volumique (TAV) à six profondeurs.....	25
Figure 22. Effets de la compaction des sols sur la masse volumique apparente (MVA), la proportion de la porosité totale occupée par l'eau et la teneur en air volumique (TAV) à six profondeurs.....	26
Figure 23. Effets du système de travail de sol sur la masse volumique apparente (MVA), la proportion de la porosité totale occupée par l'eau et la teneur en air volumique (TAV) à six profondeurs.....	27
Figure 24. Moyennes des variables de la stabilité structurale mesurées en 2022 dans les 12 micro-bassins.	29
Figure 25. Moyennes des variables de la stabilité structurale mesurées en 2022 dans les 48 parcelles.	29
Figure 26. Précipitations mensuelles observées à Saint-Lambert-de-Lauzon (sources: IRDA, MELCCFP).	30
Figure 27. Hauteurs moyennes d'eau ruisselées (qruis) et drainées (qdrain) mesurées à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.	31
Figure 28. Charges en MES en ruissellement de surface (ruis) et à la sortie des drains (drain) mesurées à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.....	32
Figure 29. Charges en P-total en ruissellement de surface (ruis) et à la sortie des drains (drain) mesurées à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.....	33
Figure 30. Charges en N-NO ₃ en ruissellement de surface (ruis) et à la sortie des drains (drain) mesurées à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.....	34
Figure 31. En-tête du fichier numérique contenant les mesures de débit au pas de temps de 15 minutes.	37
Figure 32. En-tête du fichier numérique contenant les mesures de débit au pas de temps de 24 heures. Les autres champs disponibles sont également intégrés au fichier (ici, MES et P-total).....	37
Figure 33. Grille CaPA sur la région de la Montérégie Est, localisation des stations météorologiques du MELCCFP et les bassins versants (a) d'Ewing et (b) Aux Castors et (c) Walbridge Amont et (d) Walbridge Aval.	39
Figure 34. Biais annuels à la station de Laprairie et au point 15 de la grille CaPA, pour la période de 2000 à 2017.	40
Figure 35. Précipitations mensuelles totales à la station de Laprairie et au point 15 de la grille CaPA, pour la période de 2000 à 2017.....	41
Figure 36. Localisation des cinq bassins versants modélisés.	44
Figure 37. Périodes de mise en route, calage et validation pour les bassins A) Brulée, Brook, Pot-au-Beurre, et Fourchette et B) Castor.....	56
Figure 38. Résultats de calage du bassin Castor pour le débit total.	59
Figure 39. Résultats de calage du bassin Castor pour les MES et le Ptotal.....	59
Figure 40. Résultats de calage du bassin Castor pour les Nitrates (NO ₃).....	59

Figure 41. Résultats de calage des 12 micro-bassins de Saint-Lambert-de-Lauzon pour les lames d'eau total exportées.	61
Figure 42. Compilation des coefficients de ruissellement mensuels observés (obs) et simulés (sim) sur les 12 micro-bassins de Saint-Lambert-de-Lauzon (2020-2022).	61
Figure 43. Évolution de la MVA sous quatre types de rotations à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.	68
Figure 44. Évolution de la MVA sous l'effet de la compaction à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.	69
Figure 45. Évolution de la MVA pour deux types de travail de sol à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.	70
Figure 46. Évolution de la teneur en air volumique/porosité totale pour quatre types de rotations à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.	72
Figure 47. Évolution de la teneur en air volumique/porosité totale sous l'effet de la compaction à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.	73
Figure 48. Évolution de la teneur en air volumique/porosité totale pour deux types de travail de sol à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.	74
Figure 49 : Diamètre moyen pondéré des agrégats de sol du dispositif en 12 micro-bassins.	78
Figure 50. Rendement du maïs-grain avec 50 kg N/ha et 100 - 170 kg N/ha dans le dispositif à 12 micro-bassins.	81
Figure 51. Rendement du maïs-grain avec 100 - 170 kg N/ha au dispositif des 48 parcelles.	82
Figure 52. Exemple de courbe ($a = 3$, $b = 0.05$, $x_p = 200$).....	84
Figure 53. Courbe de réponse quadratique-plateau des rendements de maïs en fonction des doses d'azote	84
Figure 54. Degré d'incertitude associé au rendement maximal par traitement.....	85
Figure 55. Degré d'incertitude associé à la dose d'azote pour atteindre le rendement maximal (plateau)	87
Figure 56. Évolution de la portion de ruissellement (R) mesurée pour les 4 régies culturales.....	89
Figure 57. Évolution de la portion de ruissellement issue du modèle statistique supporté.....	92

1. INTRODUCTION

Le présent rapport décrit la réalisation du mandat confié à l'IRDA par le MAPAQ visant à évaluer l'impact des systèmes cultureux et de la dégradation physique des sols sur la réponse hydrologique à l'échelle des champs et des bassins versants. Le mandat se divise en deux principaux volets d'étude. Le premier volet est réalisé à la ferme expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon et permet, suivant un dispositif contrôlé en parcelles et micro-bassins instrumentés, de mesurer les effets de la dégradation du sol et du type de culture sur la productivité des récoltes, l'hydrologie de surface et souterraine, de même que sur la qualité de l'eau. Le second volet vise à projeter sous différentes conditions agroclimatiques, l'effet des systèmes cultureux et des pratiques de conservation des sols sur le régime hydrique et la qualité de l'eau de petits bassins versants agricoles (3-30 km²). Ce volet est réalisé par modélisation hydrologique à base physique et met à profit les mesures hydrométriques colligées par l'IRDA de 1997 à 2020. Ce rapport final décrit les activités de recherche menées dans le cadre des deux volets de l'étude, les mesures colligées lors des campagnes terrain, les principales variables simulées par modélisation, les analyses et conclusions scientifiques. La structure du document reflète le plan de travail des activités, tel que présenté dans les rapports d'étape produits en cours de projet.

2. RÉVISION DU PLAN DE TRAVAIL

Une modification au calendrier du projet a été déposée et entérinée par le MAPAQ à l'hiver 2022, car plusieurs facteurs ont fait en sorte qu'il n'était plus possible d'atteindre tous les livrables prévus dans les délais prescrits. Cette situation a été justifiée par une surcharge de travail découlant de la clôture de nombreux projets à l'automne 2021 et à l'hiver 2022, la difficulté à recruter des candidats possédant les qualités requises pour opérer les activités de modélisation et une période de transition due au départ à la retraite du chercheur responsable du projet. Il a été convenu que les différentes bases de données (hydrométrique, climatique, SIG, météorologique, hydro-pédologique) soient produites pour les 10 bassins versants les plus significatifs pour la réalisation du projet. Ces bassins ont été sélectionnés parmi les 14 sites pour lesquels des fiches descriptives étaient disponibles. Par la suite, cinq d'entre eux ont été sélectionnés pour l'étape de modélisation. Aussi, la modélisation hydrologique a été conduite en utilisant des données de précipitations issues de la réanalyse climatique CaPA, le protocole de l'analyse hydrologique a été simplifié à l'aide du comité aviseur et un seul article scientifique sera finalement rédigé, intégrant les deux volets du projet. Nous confirmons que ces modifications n'ont induit qu'un impact minimal sur les différentes analyses et livrables prévus au volet 2 et qu'ils n'ont nuit ni à la réalisation du projet ni à l'atteinte de ses objectifs. Les échéances revues proposées sont présentées à l'annexe A. Sur l'ensemble des objectifs fixés dans le plan de travail révisé, une portion des activités de modélisation ainsi que les activités liées à l'analyse de l'impact des systèmes cultureux et de la dégradation des sols n'ont pas pu être complétées. Une entente MAPAQ-IRDA a convenu que le rapport final sera remis fin août 2023. Le suivi hydrométrique sera poursuivi de janvier à mai 2023 pour assurer une continuité avec la seconde phase du mandat.

Aussi, l'ajout d'un essai de fertilisation a été proposé afin de valoriser les conditions exceptionnelles de cultures observées à l'automne 2021. Le comité aviseur du projet s'est montré favorable à la pertinence scientifique de cet essai. Ce dernier s'opérerait à même les fonds disponibles tels que définis dans le cadre de l'exercice de prévision budgétaire pour l'année en cours. La réalisation de l'essai de fertilisation azotée n'a occasionné aucun retard sur la réalisation des autres activités (volets 1 et 2) et a été conçu afin qu'il n'induisse aucun impact significatif sur les mesures de qualité d'eau de ruissellement et de drainage établi initialement par le protocole de recherche.

3. EFFETS DE LA DÉGRADATION DU SOL SUR LA PRODUCTIVITÉ DES CULTURES, L'HYDROLOGIE ET LA QUALITÉ DE L'EAU AU SITE EXPÉRIMENTAL DE SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON

Le premier volet d'étude a pour principal objectif de mesurer les effets de la dégradation des sols sur la productivité des cultures, l'hydrologie et la qualité de l'eau et vise les objectifs spécifiques suivants:

- I. Documenter l'effet de la dégradation de la structure du sol et de la compaction sur la productivité des cultures annuelles et pérennes;
- II. Comparer l'effet de différents systèmes de culture sur la capacité de rétention en eau du sol et l'enracinement des cultures (sensibilité à la sécheresse);
- III. Documenter l'effet de la dégradation de la structure du sol et de la compaction sur l'hydrologie et la qualité de l'eau du ruissellement de surface et des drains agricoles.

Les activités prévues au plan de travail se répartissent suivant sept tâches principales:

1. Définir les pratiques agricoles qui seront comparées en dispositif expérimental, selon les recommandations d'un comité d'orientation;
2. Remettre en état le dispositif expérimental de micro-bassins de la station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon;
3. Implanter les traitements dans le réseau des 12 micro-bassins et 48 parcelles expérimentales, suivant les scénarios de régie retenus;
4. Mesurer les effets des pratiques agricoles sur les sols, la qualité de l'eau, le rendement et la rentabilité des cultures durant trois ans;
5. Colliger les résultats dans des bases de données partagées, analyser et interpréter les résultats;
6. Paramétrer et caler le modèle hydrologique SWAT à l'échelle parcellaire, en valorisant les données historiques de suivi hydrométrique colligées antérieurement sur les sites (Gasser et al., 2018) et les données acquises en cours du présent projet;
7. Diffuser les résultats à l'ensemble des intervenants concernés par la qualité des sols et de l'eau.

Deux dispositifs ont été mis en place simultanément afin de répondre à ces objectifs spécifiques, soit un dispositif de mesures hydrométriques en 12 micro-bassins versants, destiné principalement au suivi hydrologique, de même qu'un dispositif en 48 parcelles expérimentales permettant de diversifier les traitements et la caractérisation physique du sol. Conformément au calendrier du plan de travail, l'ensemble des tâches ont été complétées. Suivant la définition des traitements des dispositifs en micro-bassins et en parcelles expérimentales, les sites ont été aménagés et l'ensemble des traitements et des dispositifs de mesures agronomiques et hydrométriques ont été mis en place. La caractérisation initiale des propriétés physiques des sols dans les deux dispositifs a également été complétée, et le suivi hydrométrique des micro-bassins est complètement opérationnel. Les sections suivantes décrivent les tâches réalisées.

3.1 PRATIQUES AGRICOLES IMPLANTÉES EN DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

La définition des traitements des dispositifs en micro-bassins et en parcelles expérimentales par l'équipe de projet a été présentée et validée par le comité avisé au projet à l'occasion de la première rencontre du comité le 13 août 2020.

Le dispositif expérimental en 12 micro-bassins présente une structure d'unités expérimentales en blocs complets (voir Figure 1) comprenant:

- Deux traitements de dégradation du sol (C1 : sol non compacté et C2 : compacté);
- Deux traitements de travail de sol/système de cultures (S1 : cultures annuelles en travail conventionnel et S2 : cultures annuelles avec trèfle intercalaire en travail réduit);
- Trois répétitions des traitements disposés en bloc.

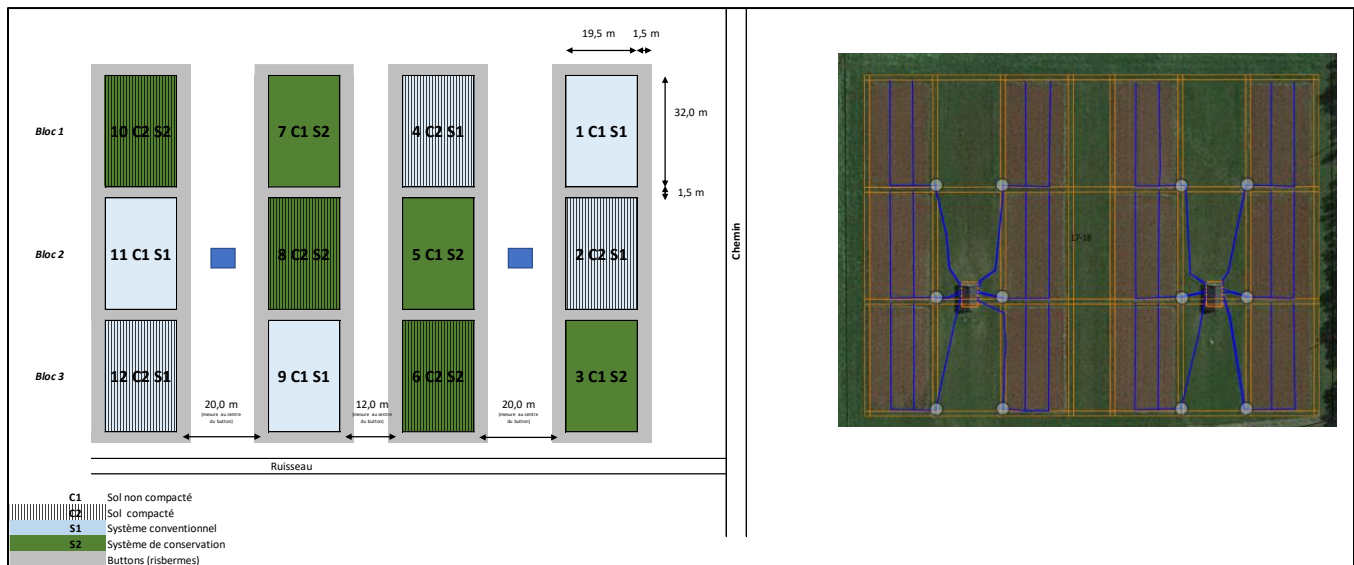


Figure 1. Dispositif expérimental des 12 micro-bassins dans les champs 17-18 de la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon.

Le dispositif expérimental en 48 parcelles présente une structure d'unités expérimentales en parcelles divisées (voir Figure 2):

- Quatre traitements de systèmes de cultures (cultures annuelles, cultures annuelles avec trèfle intercalaire, prairie continue ou prairie retournée en maïs) comme parcelle principale;
- Deux traitements de dégradation du sol (C1 : sol non compacté et C2 : compacté) comme parcelles secondaires;
- Deux traitements de travail de sol (S1 : travail conventionnel et S2 : travail réduit) comme parcelles secondaires;
- Quatre répétitions des traitements disposés en bloc.

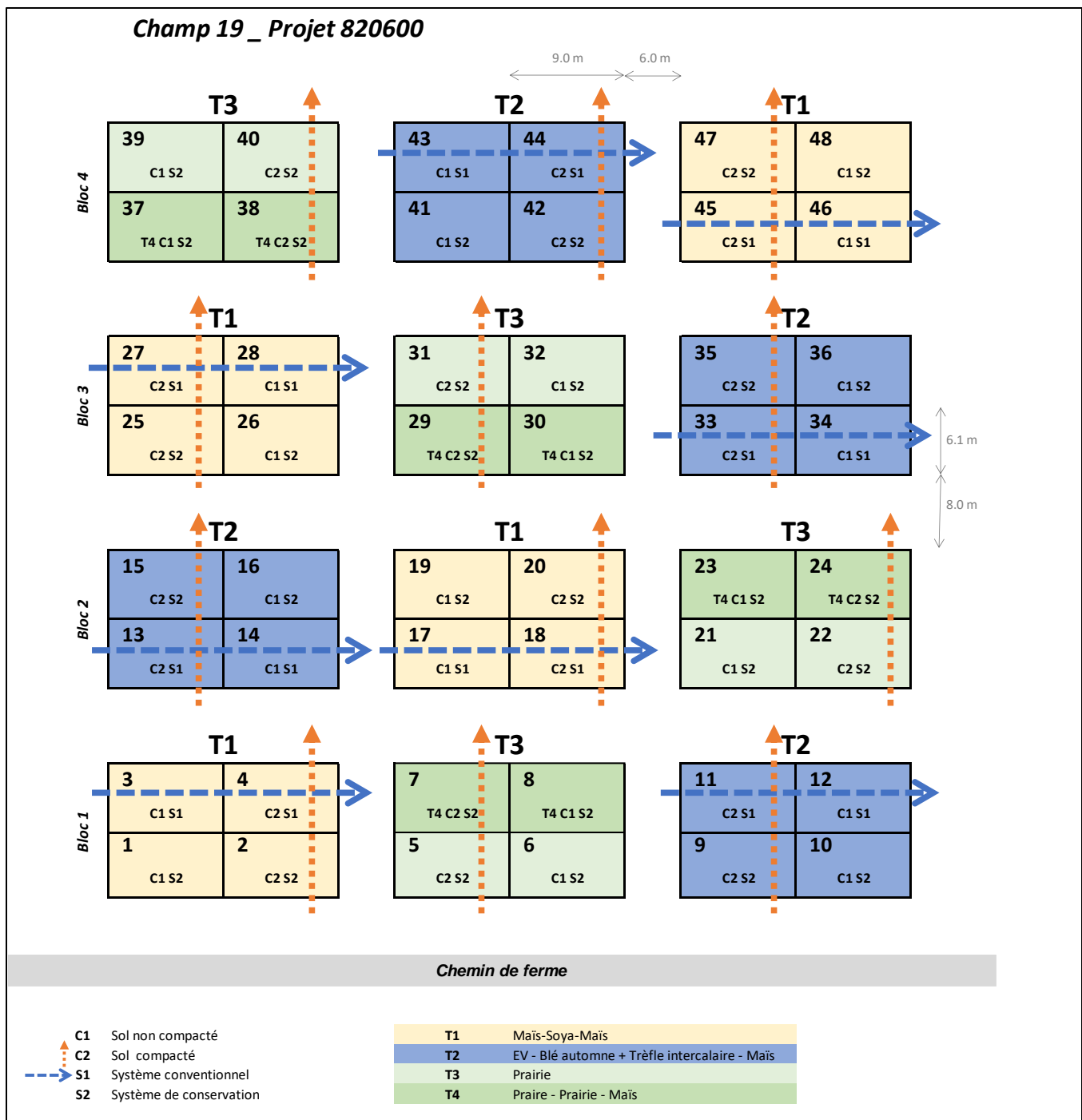


Figure 2. Dispositif expérimental des 48 parcelles dans le champ 19 de la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon.

3.2 DISPOSITIF EN MICRO-BASSINS

Le Tableau 1 collige l'ensemble des travaux et des aménagements réalisés sur les champs 17 et 18 où se trouve le dispositif des micro-bassins pour l'étude depuis le début du projet. L'ensemble des activités prévues a été réalisé au cours du printemps et de l'été 2020. Le nivellement de la surface des parcelles et le façonnement des risbermes entourant les parcelles ont été complétés suivant la réalisation de modèles numériques d'élévation (MNE) de précision (système de positionnement RTK) et de plans de nivellement spécifiques à chaque micro-bassin (Figure 3). La démarche a permis de procéder aux corrections des pentes afin d'assurer le cheminement du ruissellement vers les avaloirs. Les risbermes qui séparent chacune des parcelles ont été rehaussées avec du sol provenant de l'extérieur des parcelles afin d'assurer l'intégrité des profils de sol.

Tableau 1. Description des opérations et aménagements du dispositif expérimental de micro-bassins.

Date	Emplacement	Opération	Description
2020-06-16	Parcelles et cabanons	Inspection des équipements et état des lieux	Inventaire de l'état des avaloirs. Constat des réparations à effectuer
2020-07-02	Cabanons	Vérification avaloirs	Décompte des bascules engendrées en vidant 4 chaudières contenant 15 L d'eau chacune dans le trou de l'avaloir.
2020-06-30 au 2020-07-02	Cabanons	Nettoyage des cabanons	Nettoyage à la machine à pression des murs, augets, bacs et du plancher
2020-07-07	Cabanons	Calibration des augets	Première calibration en versant l'eau à la tasse à mesurer dans les augets pour obtenir une vingtaine de bascules, en notant le poids de l'eau requis.
2020-08-03 au 2020-08-27	Parcelles	Réfection des avaloirs	Creusage des avaloirs et remplacement du tuyau jusqu'au coude pour chaque avaloir. Changement de tutaux ABS 2po par de tuyaux carlon de 3po, réduction à 2po après le coude.
2020-08-27 au 2020-09-02	Parcelles	Réfection des risbermes	Réfection à la pelle mécanique
2020-09-03 au 2020-09-11	Parcelles	Nivellement des parcelles	Remaniement à la pelle mécanique
2020-09-11	Cabanons	Reparations électriques	Replacer les plinthes électriques et les prises de courant
2020-09-21 au 2020-10-06	Parcelles	Réparation des avaloirs	Pose d'une nouvelle membrane géotextile sur les avaloirs
2020-09-16	Parcelles	Semis des risbermes avec pelouse	Semis des butons avec un mélange de pelouse et prairie mélange B, avec le semoir manuel
2020-10-21 au 2020-10-28	Cabanons	Remise en état des augets	Remplacement des compteurs magnétiques. Réfection des branchements. Remplacement des aimants lorsque requis. Réparation des augets avec fuites. Réinstallation de l'auget 1D réparé (soudure)
2020-10-27	Cabanons	Calibration des augets	Deuxième calibration en versant l'eau à la tasse à mesurer dans les augets pour obtenir dix bascules, en notant le poids de l'eau requis.
2020-11-02	Cabanons	Début de la collecte d'eau	Branchement des tubes sur les bacs collecteurs d'eau. Début de l'échantillonnage.
2020-11-10	Cabanons	Changement d'une pompe	Installation d'une petite pompe neuve pour l'auget 6D.
2020-12-03	Cabanons	Échantillonnage	Prendre des échantillons d'eau pour chacun des bacs de recollection (eau de drainage et eau de ruissellement)
2020-12-26	Cabanons	Échantillonnage	Prendre des échantillons d'eau pour chacun des bacs de recollection (eau de drainage et eau de ruissellement)

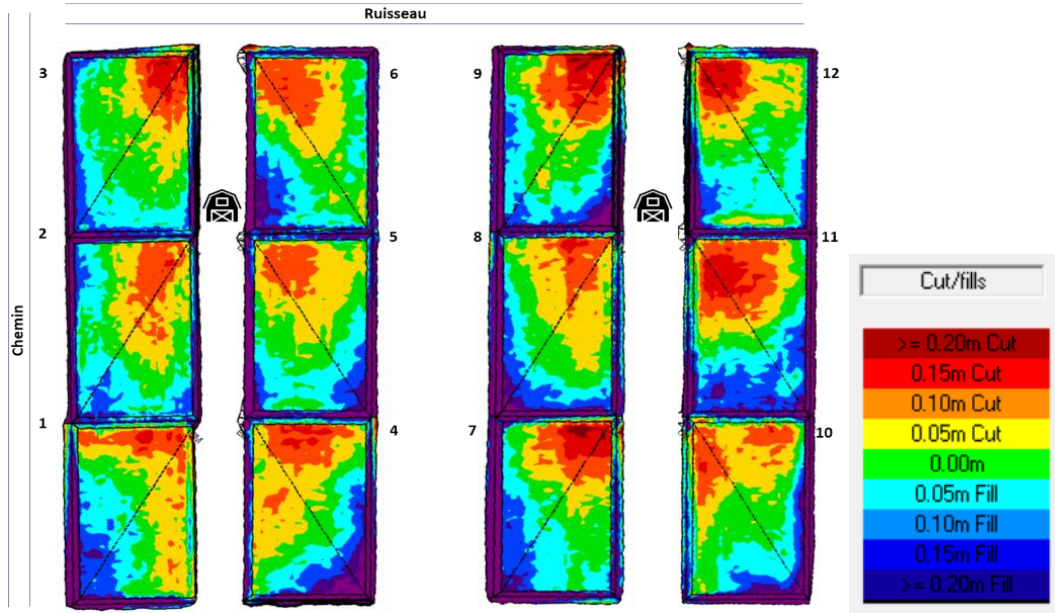


Figure 3. Plans de nivellement des 12 micro-bassins.

La remise en état des stations de mesures hydrométriques (cabanons) a inclus la réfection du réseau d'alimentation électrique, de même que la rénovation des augets basculants (dispositif de mesure des débits). L'équipe de projet a également procédé à la calibration « Bascules-volume d'eau » des augets basculants, pour établir le volume réel mesuré par chaque bascule d'auget. Le débit d'eau peut être calculé à chaque période de 10 minutes à partir du nombre de bascules et du volume d'eau calibré par bascule. Les avaloirs et conduites de captage des eaux de surface ont été refaits au cours de l'été afin d'augmenter la capacité du captage et d'assurer la durabilité des joints des conduites à l'action du gel-dégel, tel que présenté aux figures 4 et 5. Les toiles de géotextile recouvrant les avaloirs ont également été remplacées.

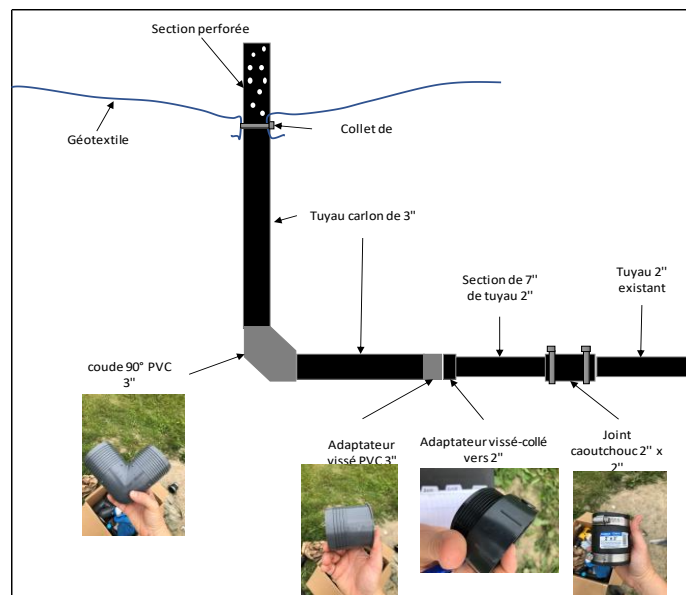


Figure 4. Croquis des avaloirs installés.



Figure 5. Réfection des avaloirs, des risbermes et des aires de captage.

3.3 TRAITEMENTS DANS LES 12 MICRO-BASSINS ET 48 PARCELLES EXPÉRIMENTALES

La série de sol présente dans les champs de la ferme expérimentale de l'IRDA correspond à la série « Le Bras ». Il s'agit d'un sol composé d'un matériau loameux-grossier (origine fluvio-lacustre) disposé sur un matériau limoneux-fin (origine lacustre), à drainage mauvais. La série Le Bras est un gleysol humique orthique (sous-groupe taxonomique).

3.3.1 Implantation du dispositif expérimental dans les 12 micro-bassins

L'implantation des essais dans les 12 micro-bassins a commencé en septembre 2020 avec un travail primaire au chisel (10 pouces de profondeur) pour préparer le lit de semences du blé d'automne. Le détail sur les cultures et les semis (dates des semis, densités de peuplement, provenance des semences et noms des cultivars utilisés) est rapporté au Tableau 2. Les doses d'engrais minéraux utilisées pour la fertilisation des cultures sont détaillées au Tableau 3. Un essai de fertilisation azotée a été aussi réalisé dans le maïs en 2022 en sous-parcelles (en split-plot) dans ce dispositif pour mesurer les effets de la compaction des sols et du retour de trèfles intercalaires sur la capacité du sol à fournir de l'azote à la culture. La dose optimale d'engrais N sans autre apport de N a été établie à 170 kg N/ha (CRAAQ, 2010). Un apport de 50 kg N/ha a été apporté au semis dans le démarreur. Quatre doses de N ont été essayées dans chaque traitement pour évaluer où se positionnait cet optimal en complétant la

fertilisation en post levée pour obtenir un total de 50, 140, 170 et 200 kg N/ha (Tableau 3). Un apport équivalent à 70 kg N/ha a été attribué au retour de trèfles intercalaires et les doses de N ont été ajustées à la baisse pour évaluer l'optimal avec un total de 50, 70, 100 et 130 kg N/ha. La distribution des doses variables d'azote dans les parcelles du dispositif est présentée dans la Figure 6. Le détail des opérations culturales (travail de sol, compaction des sols, fertilisation, échantillonnage des sols et récolte) effectuées au cours des années 2020, 2021 et 2022 dans les champs 17-18 est présenté au Tableau 4.

Tableau 2. Informations sur les semences et le semis des 12 micro-bassins.

Année	Culture	Cultivar	UTM	Provenance	Date de semis	Parcelles	Semoir	Taux de semis par surface	Taux de semis au poids
2020	Blé d'automne	UGRC Ring		Avantis Coop	21/09/2020	S2	Semoir Great Plain	450 plants/m ²	200 kg/ha
2021	Trèfles intercalaires	Mélange*		Synagri	19/04/2021	S2	Semoir Brillon		8 kg/ha
	Soya	Dekalb DKC 25-10	2500	Synagri	18/05/2021	S1	Semoir Great Plain	494 000 plants/ha	95 kg/ha
2022	Maïs	DKC29-89RIB VT2P	2275	Synagri	25/05/2022	S1 et S2	Semoir à semis direct John Deere	90 000 plants/ha	24 kg/ha

*Mélange composé de : 25% trèfle rouge 2 coupes, 25% trèfle Alsike, 25 % trèfle Huia et 25 % de luzerne vivace pur.

Tableau 3. Doses des fertilisants minéraux utilisés dans les 12 micro-bassins.

Année	Culture	Type de Parcelle	N			P (kg/ha P2O5)	K (kg/ha K2O)
			Démarrateur kg/ha N	Post levée kg/ha N	Total kg/ha N		
2020	Blé d'automne	S2				30	20
2021	Soya*	S1					
	Blé d'automne + Trèfles intercalaires	S2	110		110		
2022	Maïs	S1	50	0	50	70	60
			50	90	140		
			50	120	170		
			50	150	200		
		S2 (retour de trèfles**)	50	0	50		
			50	20	70		
			50	50	100		
			50	80	130		

* Aucune fertilisation n'a été apportée au soya en 2021, les teneurs de P et K dans le sol étaient suffisantes et les nodules suffisaient pour l'azote.

**Pour les parcelles S2 en 2022 (blé-trèfle intercalaire), un apport équivalent à 70 kg/ha de N a été attribué au retour de trèfles intercalaires.

Tableau 4. Description des opérations culturales et des suivis agronomiques réalisés sur les 12 micro-bassins.

Date	Culture	Parcelles	Opération	Appareil	Profondeur	Notes
15/09/2020	n/a	Toutes	Travail primaire	Chisel	~ 10 pouces	Travail dans le sens de la pente
16/09/2020	n/a	C2	Compaction	Citerne Houle 2800 gal		TRACTEUR : Essieu avant 1500 kg + Essieu arrière 4650 kg. CITERNE : Essieu avant 6330 kg + Essieu arrière 7340 kg. Poids total : 19 820 kg
19/10/2020	n/a	C2	Compaction	DM-AIR		TRACTEUR : Essieu avant 5 410 kg + Essieu arrière 5 790 kg. DM-AIR : Essieu 10 090 kg. Poids total : 21 290 kg
21/09/2020	n/a	S2	Travail secondaire	Vibroculteur	2 pouces	Travail dans le sens de la pente
21/09/2020	Blé d'automne	S2	Fertilisation	Semoir Great Plain	Disque d'engrais	Engrais utilisés pour la fertilisation P-K du blé d'automne (P = 0-46-0, K = 0-0-60)
19/04/2021	Blé d'automne + trèfles intercalaires	S2	Travail léger	Herse étrille (Peigne)	Surface	Un passage léger en surface
10/05/2021	Blé d'automne + trèfles intercalaires	S2	Fertilisation	Vicon	Surface	Engrais utilisés pour la fertilisation N du blé d'automne (N = 27-0-0)
16/05/2021	Soya	S1	Travail secondaire	Vibroculteur	2 pouces	Préparation du terrain pour le semis du soya
18/05/2021	Soya	S1	Semis du soya	Semoir Great Plain		Aucune fertilisation a été réalisée, les teneurs de P et K dans le sol étaient suffisantes et les nodules suffisaient pour N
03/08/2021	Blé d'automne	S2	Récolte grain	Batteuse Wintersteiger		Largeur de table 1,52 m x 9 m
03/08/2021	Blé d'automne + trèfles intercalaires	S2	Fauche et récolte des trèfles intercalaires	Tondeuse ORSI		1 ^e fauche
06/10/2021	Soya	S1	Récolte grain	Batteuse Wintersteiger		Largeur de table 1,52 m x 9 m
20/10/2021	Blé d'automne + trèfles intercalaires	S2	Fauche et récolte des trèfles intercalaires	Tondeuse ORSI		2 ^e fauche
01/11/2021	Soya, Blé d'automne + trèfles intercalaires	S1	Travail primaire	Chisel	~ 10 pouces	Passage dans le sens des drains
04/11/2021	Soya, Blé d'automne + trèfles intercalaires	C2	Compaction	DM-AIR		TRACTEUR : Essieu avant 7 060 kg + Essieu arrière 10 580 kg. DM-AIR : Essieu 8 000 kg. Poids total : 25 640 kg.
24/05/2022	Maïs	S1	Travail secondaire	Vibroculteur	2 pouces	Passage dans le sens des drains
26/05/2022	Maïs	S1 et S2	Fertilisation au démarrage	Vicon	Surface	Engrais utilisé au démarrage (N = 27-0-0, P = 0-46-0, K = 0-0-60)
06/07/2022	Maïs	S1 et S2	Échantillonnage des sols	Tarière	30 cm	Pour le test de Nitrate en post levée
06/07/2022	Maïs	S1 et S2	Fertilisation en post levée	Manuellement	Surface	Différentes doses appliquées. Voir la disposition des doses dans la figure 8
31/10/2022	Maïs	S1 et S2	Récolte grain	Batteuse Wintersteiger		Largeur de table 1,52 m x 9 m
09/11/2022	Maïs	C2	Compaction	DM-AIR		TRACTEUR : Essieu avant 6 900 kg + Essieu arrière 8 670 kg. DM-AIR : Essieu 8 180 kg. Poids total : 23 750 kg

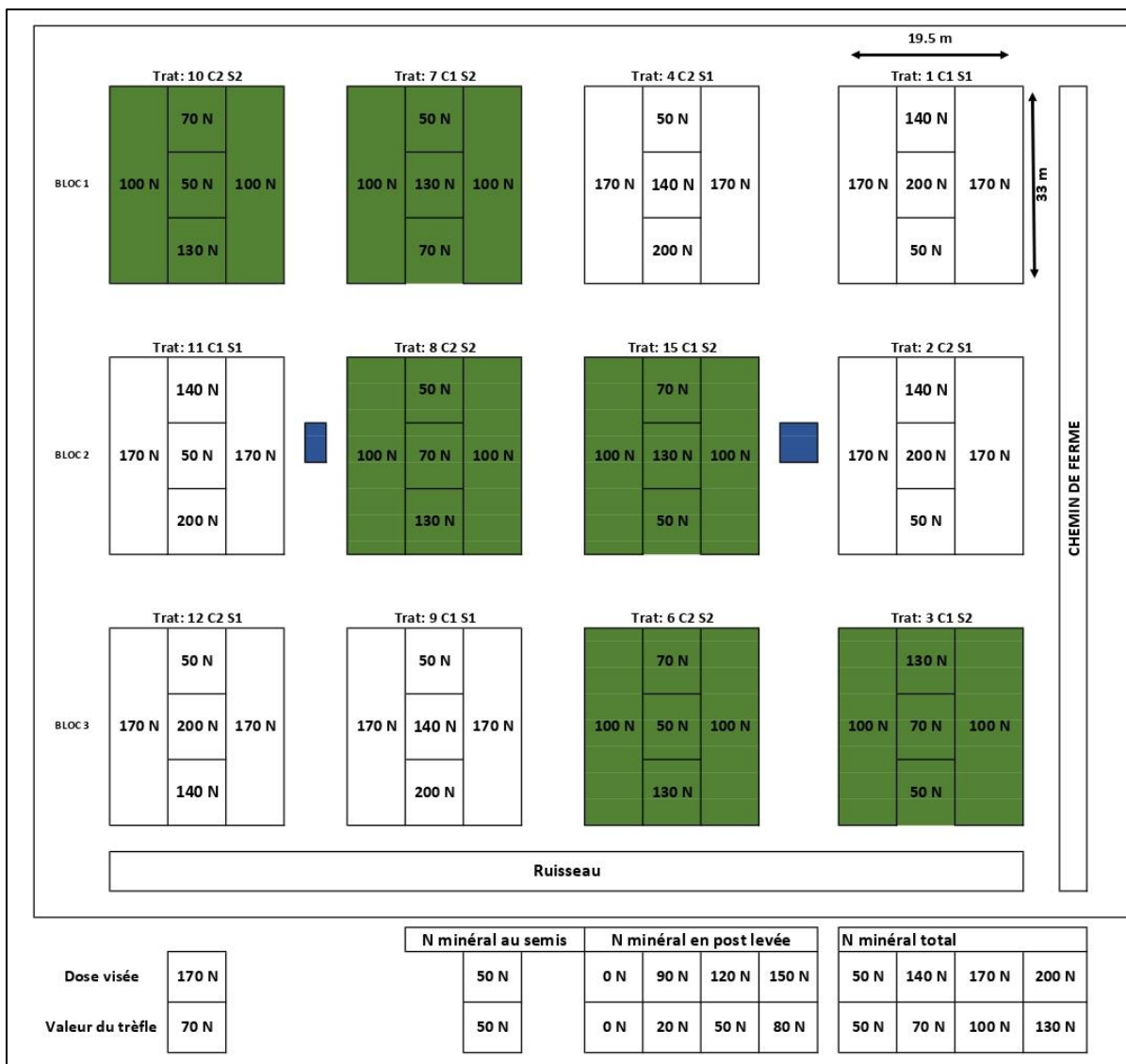


Figure 6. Disposition des doses variables de N utilisées pour le maïs en 2022 dans les 12 micro-bassins.

3.3.2 Implantation du dispositif expérimental dans les 48 parcelles

Au contraire du dispositif des 12 micro-bassins, l'implantation des expériences dans les 48 parcelles du champ 19 a commencé en mai 2020 avec un travail de sol en surface (2 pouces de profondeur) en utilisant un vibroculteur pour préparer le lit de semences pour le maïs (maïs-grain), les engrais verts et la prairie. Les spécifications des cultures et du semis (dates des semis, densités de peuplement, provenance des semences et noms des cultivars utilisés) sont détaillées au Tableau 5. Les doses d'engrais minéraux utilisées pour la fertilisation des cultures dans cette expérimentation sont détaillées au Tableau 6. Les détails des opérations culturales (travail de sol, compaction des sols, fertilisation, échantillonnage des sols et récolte) effectuées au cours des années 2020, 2021 et 2022 dans le champ 19 sont présentées au Tableau 7.

Tableau 5. Informations sur les semences et le semis des 48 parcelles.

Année	Culture	Cultivar	UTM	Provenance	Date de semis	Parcelles	Semoir	Taux de semis par surface	Taux de semis au poids
2020	Maïs	Hybride P7861AM	2250	Pioneer	25/05/2020	T1	Planteur John Deere 7000	85 251 plants/ha	22,5 kg/ha
	Engrais verts	Mélange engrais verts *		Avantis Coop	22/05/2020	T2	Semoir Great Plain		12 kg/ha
	Blé d'automne	UGRC Ring		Avantis Coop	21/09/2020	T2	Semoir Great Plain	450 plants/m ²	200 kg/ha
	Prairie	Mélange prairie **		Synagri	22/05/2020	T3 et T4	Semoir Great Plain		21 kg/ha
2021	Soya	Dekalb DKC 25-10	2500	Synagri	17/05/2021	T1	Semoir Great Plain	494 000 plants/ha	95 kg/ha
	Trèfles intercalaires †	Mélange de trèfles intercalaires** *		Synagri	19/04/2021	T2	Semoir Brillon		8 kg/ha
	Re-semis Prairie	Mélange engrais verts *		Synagri	15/04/2021	T3 et T4	Semoir Brillon		6 kg/ha
2022	Maïs	DKC29-89RIB VT2P	2275	Synagri	25/05/2022	T1, T2, T4	Semoir à semis direct John Deere	90 000 plants/ha	24 kg/ha
	Prairie	Parcelles 2021 ††				T3			

*Mélange engrais verts : Radis Daïkon + trèfle incarnat + ray-grass.

**Mélange prairie : LACTO-PLUS Luzerne BOOST HG 70 % + Fléole des prés TIFFANY 30 %.

***Mélange : 25% trèfle rouge 2 coupes, 25% trèfle Alsike, 25 % trèfle Huia et 25 % de luzerne vivace pur.

† Trèfles intercalaires dans le blé d'automne.

†† Les parcelles en prairie en 2022 ont été conservées à partir de la survie des parcelles en prairie en 2021.

Tableau 6. Doses des fertilisants utilisées dans les 48 parcelles.

Année	Culture	Type de Parcelle	N			P (kg/ha P2O5)	K (kg/ha K2O)
			Démarrateur kg/ha N	Post levée kg/ha N	Total kg/ha N		
2020	Maïs	T1	40	140	180	60	40
	Engrais verts	T2				50	50
	Prairie	T3				50	50
	Prairie	T4				50	50
	Blé d'automne†	T2				30	20
2021	Soya††	T1					
	Blé d'automne ††† +Trèfles intercalaires	T2	120		120		
2022	Maïs	T1, T4	50	120	170	70	60
		T2	50	50	100	70	60
	Prairie	T3					130

† Parcelles de blé d'automne semées en septembre 2020 mais récoltées en 2021.

†† Aucune fertilisation a été réalisée pour le soya en 2021, les teneurs de P et K dans le sol étaient suffisantes et les nodules suffisaient pour l'azote.

††† La fertilisation a été réalisée seulement pour le blé d'automne.

Tableau 7. Description des opérations culturales et des suivis agronomiques réalisés sur les 48 parcelles.

Date	Culture	Parcelles	Opération	Appareil	Profondeur	Notes
20/05/2020	Maïs, EV et Prairie	Toutes	Travail secondaire	Vibroculteur	2 pouces	Préparation pour le semis du Maïs, EV et Prairie
22/05/2020	EV et Prairie	T2, T3 et T4	Fertilisation	Semoir Great Plain	Disque d'engrais	Engrais utilisés (P = 0-46-0, K = 0-0-60)
25/05/2020	Maïs	T1	Fertilisation	Planteur John Deere 7000	Disque d'engrais	Engrais utilisé au démarrage (N = 27-0-0, P = 0-46-0, K = 0-0-60)
27/06/2020	Maïs	T1	Fertilisation en post levée	Manuellement	Surface	Engrais utilisé (N= 27-0-0)
14/07/2020	EV et Prairie	T2, T3 et T4	Fauche	Faucheuse		Stimuler l'établissement
20/08/2020	Prairie	T3 et T4	Fauche	Tondeuse à gazon		Coupe pour favoriser la survie en 2021
15/09/2020	EV	T2S1	Travail primaire	Chisel	~ 10 pouces	Seulement dans les parcelles avec EV
16/09/2020	n/a	C2	Compaction	Citerne Houle 2800 gal		TRACTEUR : Essieu avant 1500 kg + Essieu arrière 4650 kg. CITERNE : Essieu avant 6330 kg + Essieu arrière 7340 kg. Poids total : 19 820 kg
21/09/2020	EV	T2S1	Travail secondaire	Vibroculteur	2 pouces	Seulement dans les parcelles avec EV
21/09/2020	EV	T2	Fertilisation	Semoir Great Plain	Disque engrais	Engrais utilisés (P = 0-46-0, K = 0-0-60)
13/10/2020	Maïs	T1	Récolte	Batteuse Wintersteiger		Prise de rendement sur 2 rangs x 5 m par parcelle
13/10/2020	Maïs	T1S1	Travail de sol primaire	Chisel	~ 10 pouces	Passage dans le sens des drains
19/10/2020	Maïs, EV et Prairie	C2	Compaction	DM-AIR		TRACTEUR : Essieu avant 5 410 kg + Essieu arrière 5 790 kg. DM-AIR : Essieu 10 090 kg. Poids total: 21 290kg
29/10/2020	Maïs, EV et Prairie	Bloc 1,2,3,4	Échantillonnage	Giddings	0-60 cm	4 carottes par parcelle, le long d'un transect en diagonale. Carotte de 60 cm aux 10 cm
12/11/2020	Maïs, EV et Prairie	Toutes	Échantillonnage	Veris	0-60 cm et +	15 points par parcelle, espacés au 50 cm. Transect décalé de 30 cm de celui du Giddings
19/04/2021	Blé d'automne + Trèfles intercalaires	T2	Travail léger	Herse étrille (Peigne)	Surface	Un passage léger en surface
10/05/2021	Blé d'automne + Trèfles intercalaires	T2	Fertilisation	Épandeur manuel Scott	Surface	Engrais utilisé (N= 27-0-0)
16/05/2021	Soya	T1 S1	Travail secondaire	Vibroculteur	2 pouces	Préparation de semis pour le soya
17/05/2021	Soya	T1	Semis du soya	Semoir Great Plain		Aucune fertilisation a été réalisée, les teneurs de P et K dans le sol étaient suffisantes et les nodules suffisaient pour N
23/06/2021	Prairie	T3 et T4	Fauche	Récolteuse mobile		1 ^e coupe
03/08/2021	Blé d'automne	T2	Récolte grain	Batteuse Wintersteiger		Largeur de table 1,52 m x 9 m
05/08/2021	Blé d'automne + Trèfles intercalaires	T2	Fauche et récolte des trèfles intercalaires	Tondeuse ORSI		1 ^{er} fauche
10/08/2021	Prairie	T3	Fauche	Récolteuse mobile		2 ^e coupe
06/10/2021	Soya	T1	Récolte grain	Batteuse Wintersteiger		Largeur de table 1,52 m x 9 m

20/10/2021	Blé d'automne	T2	Fauche et récolte des trèfles intercalaires	Tondeuse ORSI		2° fauche
01/11/2021	Soya	T1S1	Travail primaire	Chisel	~ 10 pouces	Passage dans le sens des drains
04/11/2021	Soya, Blé d'automne + Trèfles intercalaires	C2	Compaction	DM-AIR		TRACTEUR : Essieu avant 7 060 kg + Essieu arrière 10 580 kg. DM-AIR : Essieu 8 000 kg. Poids total: 25 640 kg
24/05/2022	Maïs	T1S1 et T2S1	Travail de sol secondaire	Vibroculqueur	2 pouces	Passage dans le sens des drains
30/05/2022	Maïs	T1, T2 et T4	Fertilisation au démarrage	Manuellement	Surface	Engrais utilisé au démarrage (N = 27-0-0, P = 0-46-0, K = 0-0-60)
28/06/2022	Prairie	T3	Fauche	Récolteuse mobile		1° coupe
06/07/2022	Maïs	T1, T2 et T4	Échantillonnage des sols	Tarière	30 cm	Pour le test de nitrate en post levée
07/07/2022	Maïs	T1, T2 et T4	Fertilisation en post levée	Manuellement		50Kg/ha de N pour retour de prairie et 120 kg/ha pour retour de soya
07/07/2022	Prairie	T3	Fertilisation après la 1° coupe	Manuellement		Engrais utilisé (K = 0-0-60)
01/09/2022	Prairie	T3	Fauche	Récolteuse mobile		2° coupe
02/11/2022	Maïs	T1, T2 et T4	Récolte	Batteuse Wintersteiger		Largeur de table 1,52 m x 9 m
09/11/2022	Maïs	T1, T2 et T4	Compaction	DM-AIR		TRACTEUR : Essieu avant 6 900 kg + Essieu arrière 8 670 kg. DM-AIR : Essieu 8180 kg. Poids total : 23 750 kg

3.3.3 Compaction du sol

Un outil pour le travail du sol (DM-AIR) (Figure 7) et une citerne de 2800 gallons à lisier Houle (Figure 8) ont été utilisés pour effectuer la compaction des sols.



Figure 7. Passage du DM-AIR sur les traitements de sol compacté dans les deux dispositifs expérimentaux.



Figure 8. Passage de la citerne à lisier Houle (à droite) sur les traitements de sol compacté dans les deux dispositifs expérimentaux.

Les patrons et le nombre de passages réalisés par la citerne Houle et le DM-AIR au dispositif des 12 micro-bassins sont présentés aux Figure 9 et Figure 10 respectivement. Les patrons et nombre de passages pour le dispositif en 48 parcelles sont présentées aux Figure 11 et Figure 12 respectivement.

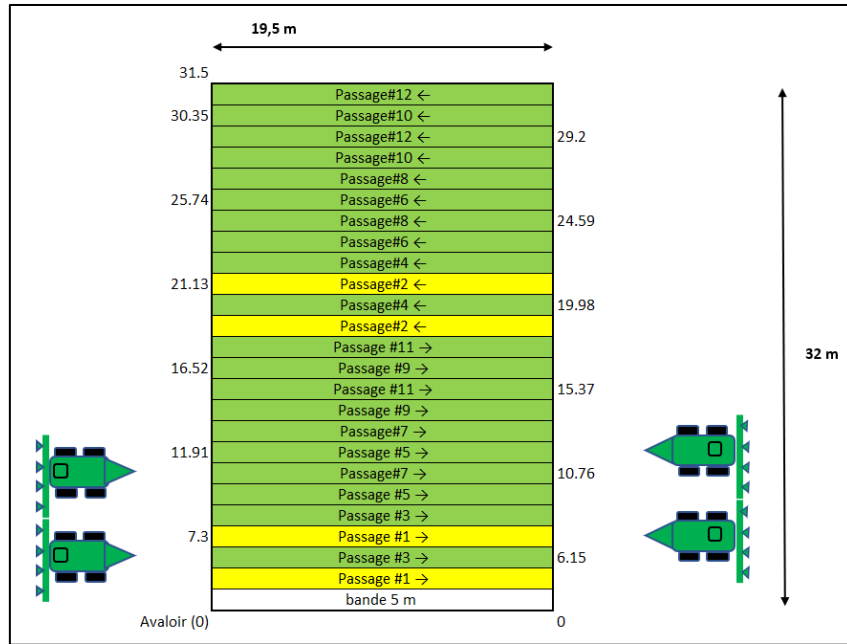


Figure 9. Patron de circulation de la citerne Houle en 2020 sur les parcelles sous traitement de sol compacté dans le dispositif en 12 micro-basins.

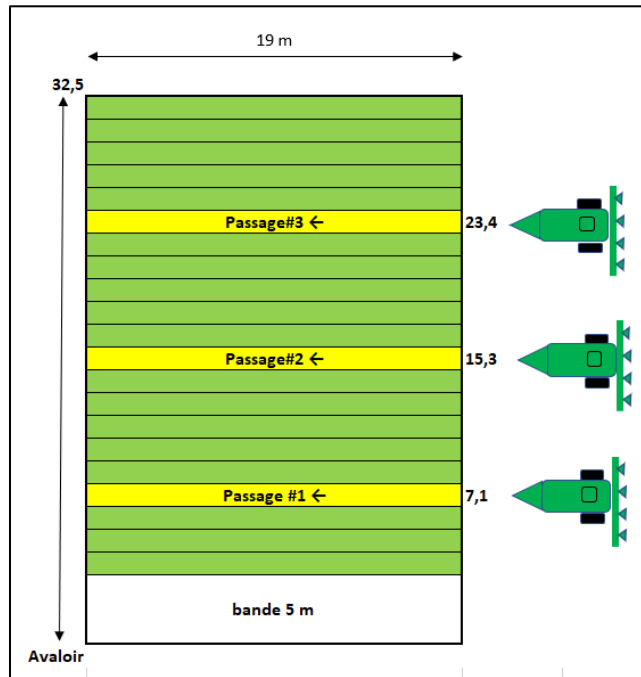


Figure 10. Patron de circulation du DM-AIR en 2021 et 2022 sur les parcelles sous traitement de sol compacté dans le dispositif en 12 micro-basins.

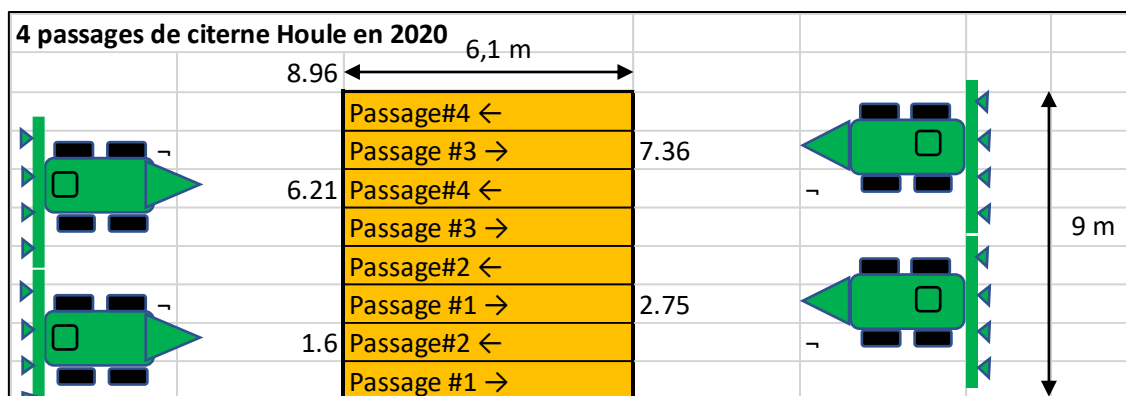


Figure 11. Patron de circulation de la citerne Houle en 2020 sur les parcelles sous traitement de sol compacté dans le dispositif en 48 parcelles.

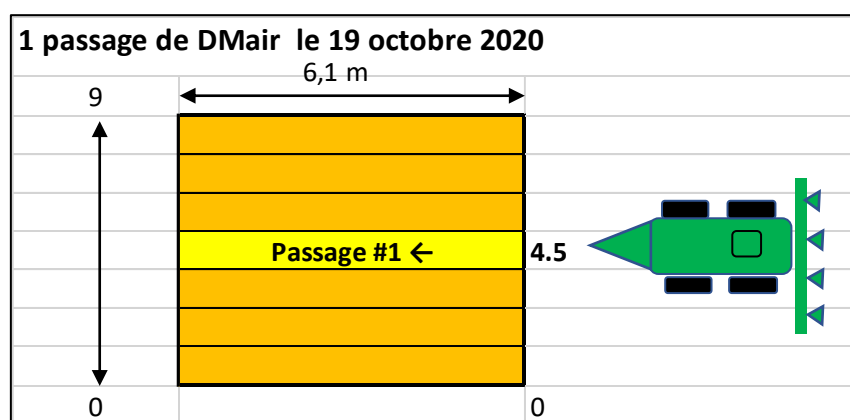


Figure 12. Patron de circulation du DM-AIR en 2021 et 2022 2020 sur les parcelles sous traitement de sol compacté dans le dispositif en 48 parcelles.

Le Tableau 8 ci-dessous résume les poids des roues de la citerne Houle remplie de 2800 gallons de lisier et du DM-AIR pour chaque opération de compaction réalisée en 2020, 2021 et 2022 dans les deux dispositifs expérimentaux. Les figures 13 et 14 présentent la machinerie utilisée ainsi que les dimensions des pneus et les masses exercées sous les roues du tracteur et du DM-AIR.

Tableau 8. Poids des essieux des tracteurs et du DM-AIR et de la citerne Houle mesurés lors de la compaction dans les deux dispositifs expérimentaux.

Année	Outil	Date	Outil	
			Roue à gauche (kg)	Roue à droite (kg)
2020	Citerne Houle	16/09/2020	Essieu avant : 6330	Essieu arrière : 7340
2020	DM-AIR	19/10/2020	5030	5060
2021	DM-AIR	04/11/2021	4110	3890
2022	DM-AIR	09/11/2022	4080	4100



Figure 13. Tracteur et DM-AIR utilisés pour la compaction des sols dans les deux dispositifs expérimentaux.

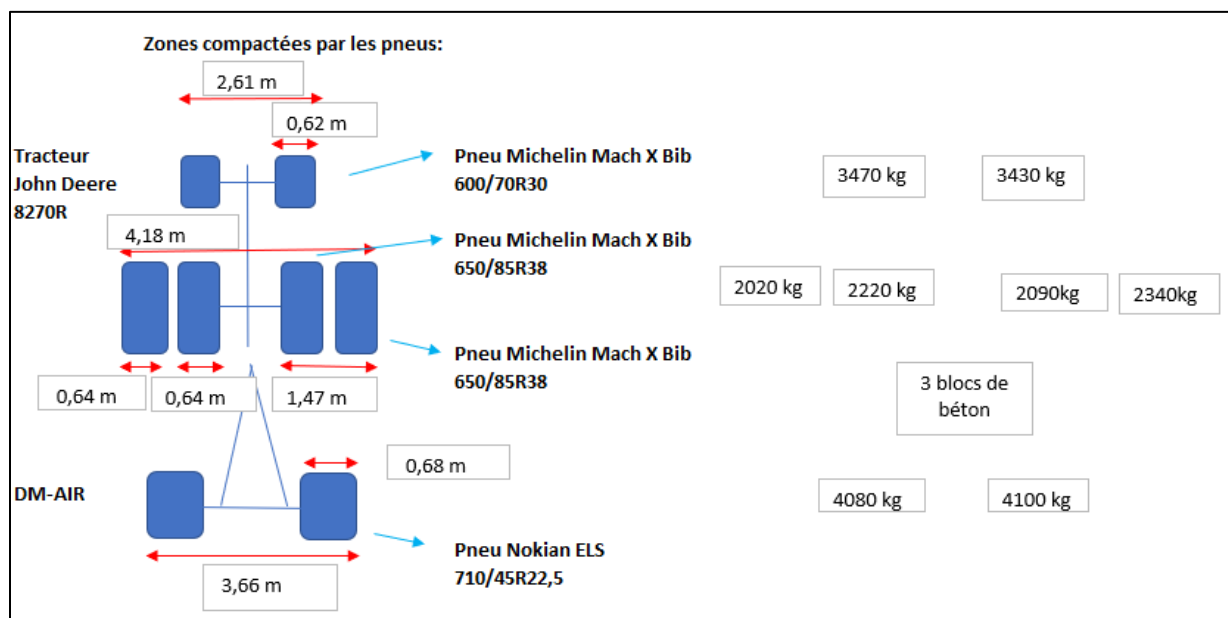


Figure 14. Dimensions des pneus du tracteur et du DM-AIR ainsi que les poids mesurés par pneu/essieu en 2022.

Concernant les surfaces des zones compactées en proportion aux surfaces des unités expérimentales (parcelles), le Tableau 9 ci-dessous résume les calculs effectués pour obtenir les surfaces compactées lors de la compaction dans les deux dispositifs expérimentaux. Ces calculs ont été effectués en suivant le nombre de passage dans chacun des dispositifs (voir les figures 9 et 10 pour le patron de circulation et le nombre de passages dans les 12 micro-bassins et les figures 11 et 12 pour le patron de circulation et le nombre de passages des 48 parcelles), les dimensions des parcelles (voir Figure 1 pour les 12 micro-bassins et Figure 2 pour les 48 parcelles) et finalement les dimensions des roues du tracteur (Figure 14). Les dimensions des pneus des outils utilisés pour faire la compaction ont été utilisés pour calculer la proportion de la surface compactée par rapport les surfaces des parcelles.

Tableau 9. Proportion des zones compactées par rapport la surface totale de l'unité expérimentale dans les deux dispositifs expérimentaux.

Dispositif expérimental	Outil	Zone compactée				Parcelle	Proportion (Surface Compactée/ Surface parcelle)
		Largeur roues *	Nombre de passages**	Largeur parcelle***	Surface compactée (m ²)	Surface (m ²)	
12 micro-bassins	Citerne Houle	1,10	12	19,5	257,4	624,0	41,25 %
48 parcelles		1,10	4	6,1	26,84	54,9	48,89 %
12 micro-bassins	DM-AIR	1,36	4	19,5	106,08	624,0	17,00 %
48 parcelles		1,36	1	6,1	8,30	54,9	15,11 %

*Largeur cumulée des roues de la citerne Houle (0,55 m *2) et du DM-AIR (0,68 m * 2).

** La Figure 9 et la Figure 12 présentent le nombre de passages établis dans chacun des dispositifs.

*** La Figure 1 et la Figure 2 présentent les dimensions des parcelles dans chacun des dispositifs.

3.4 RÉSULTATS AGRONOMIQUES

3.4.1 Dispositif expérimental en 12 micro-bassins

En raison des travaux de réfection, aucune culture annuelle n’a été récoltée en 2020 dans le dispositif en 12 micro-bassins. Cependant, le blé d’automne a été implanté dans les parcelles S2 en septembre 2020 et a été récolté en 2021. Aucun graphique de rendements n’est donc présenté pour le dispositif des 12 micro-bassins en 2020. Le Tableau 10 résume les cultures implantées et récoltées au cours des trois ans d’expérimentation.

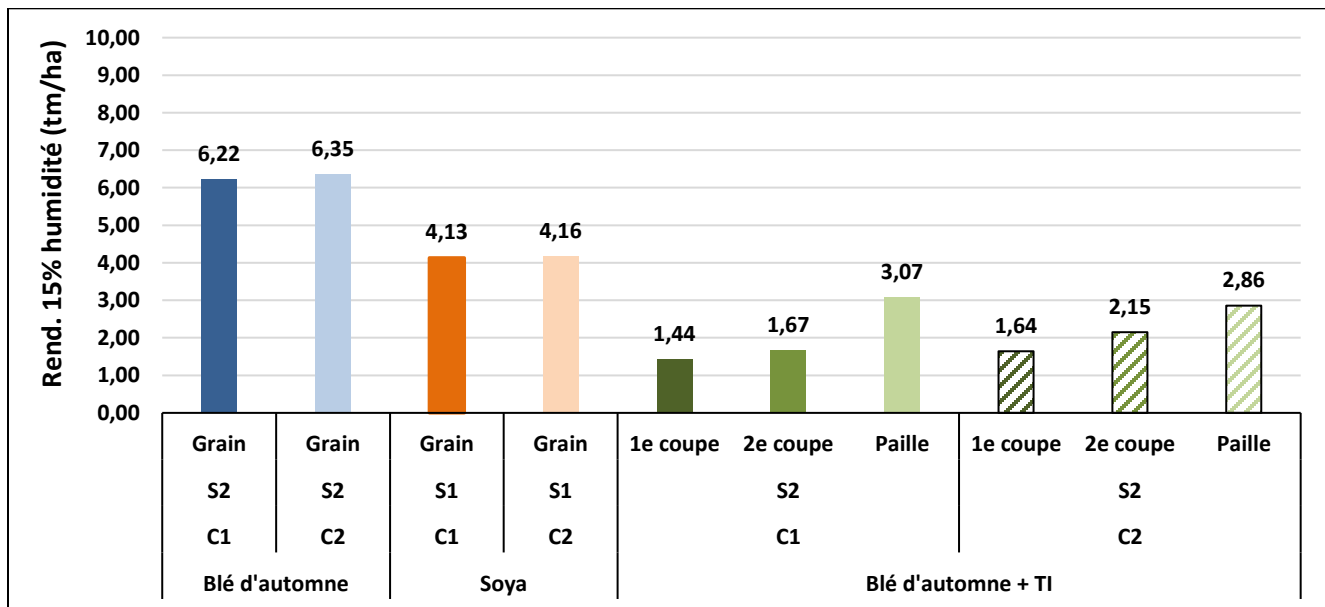
La Figure 15 montre les rendements obtenus en 2021 tandis que la Figure 16 et Figure 17 présentent les rendements obtenus en 2022. Ces dernières deux figures présentent les mêmes résultats, mais le regroupement est différent d’une figure à l’autre. Dans la Figure 16, les résultats sont regroupés par dose d’azote utilisée tandis que dans la Figure 17 les résultats sont présentés par traitements de compaction (C1 : sol non compacté et C2 : compacté) et par type de type de travail de sol/système de culture (S1 : cultures annuelles en travail conventionnel et S2 : cultures annuelles avec trèfle intercalaire en travail réduit).

Tableau 10. Les rotations des cultures et les récoltes réalisées dans les 12 micro-bassins.

Type de parcelle selon le système de culture	2020	2021	2022
S1	†	Soya	Maïs
S2	Blé d’automne††	Blé d’automne + Trèfle intercalaire	Maïs

† Aucune culture annuelle (parcelles S1) n’a été semée en 2020.

†† Dans les parcelles S2, le blé d’automne a été semé en septembre 2020, mais il a été récolté en 2021.



Pour Blé automne + TI (trèfles intercalaires) : 1e coupe = 1e coupe trèfle +paille, 2e coupe = 2e coupe trèfle.

Figure 15. Rendements des cultures dans les 12 micro-bassins en 2021.

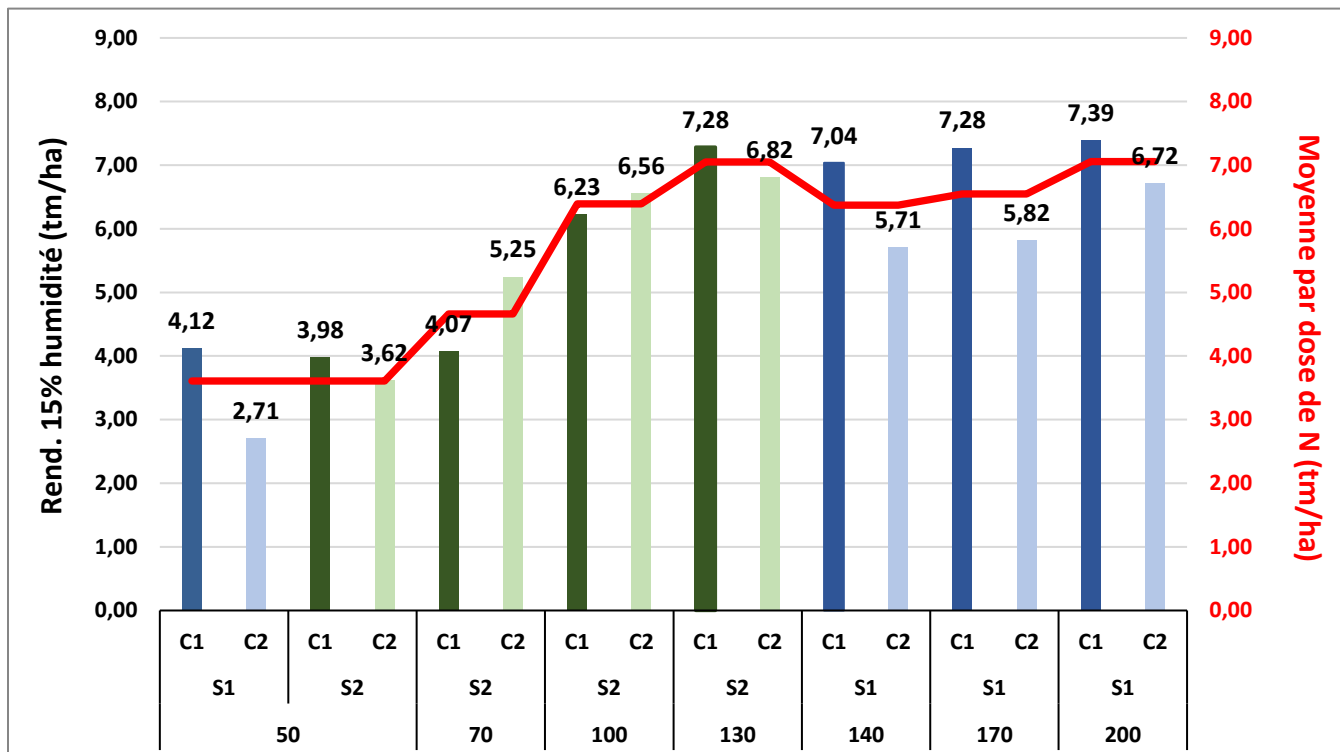


Figure 16. Moyennes des rendements à 15 % d'humidité (tm/ha) dans les 12 micro-bassins en 2022 (ordonnées par dose d'azote).

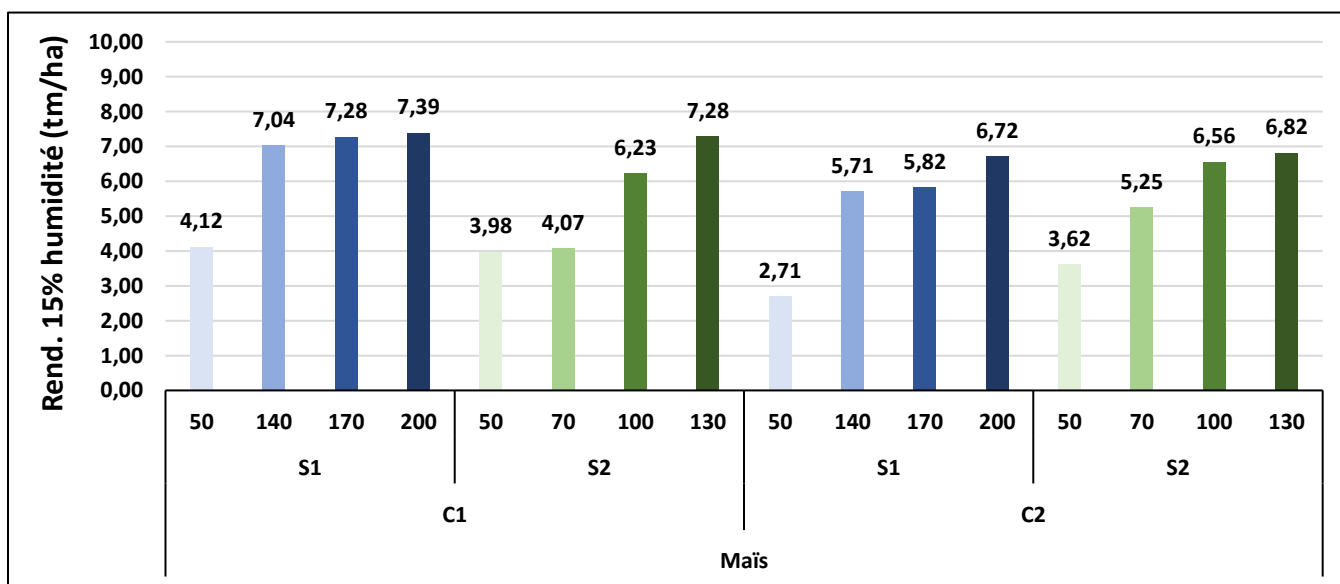


Figure 17. Moyennes des rendements à 15 % d'humidité (tm/ha) dans les 12 micro-bassins en 2022 (ordonnées par traitement).

3.4.2 Dispositif expérimental en 48 parcelles

Des quatre cultures implantées en 2020 dans les 48 parcelles, seulement le maïs a été récolté. Les engrais verts et la prairie n'ont pas été récoltés pour garantir un établissement adéquat pendant la saison 2020 et ainsi assurer la survie de ces parcelles en 2021. Le Tableau 11 résume les cultures implantées et récoltées au cours des trois ans d'expérimentation. Les Figure 18, Figure 19 et Figure 20 présentent les rendements obtenus pour les années 2020, 2021 et 2022 respectivement. Tous les rendements obtenus sont présentés en regroupant les traitements de compaction (C1 : sol non compacté et C2 : compacté) et par type de type de travail de sol/système de culture (S1 : cultures annuelles en travail conventionnel et S2 : cultures annuelles avec trèfle intercalaire en travail réduit).

Tableau 11. Les rotations des cultures et les récoltes réalisées dans les 48 parcelles.

Type de parcelles selon systèmes de cultures	2020	2021	2022
T1	Maïs	Soya	Maïs
T2	Engrais verts†	Blé d'automne + Trèfle intercalaire	Maïs
T3	Prairie†	Prairie	Prairie
T4	Prairie†	Prairie	Maïs

† Ces cultures n'ont pas été récoltées en 2020 pour garantir un établissement adéquat.

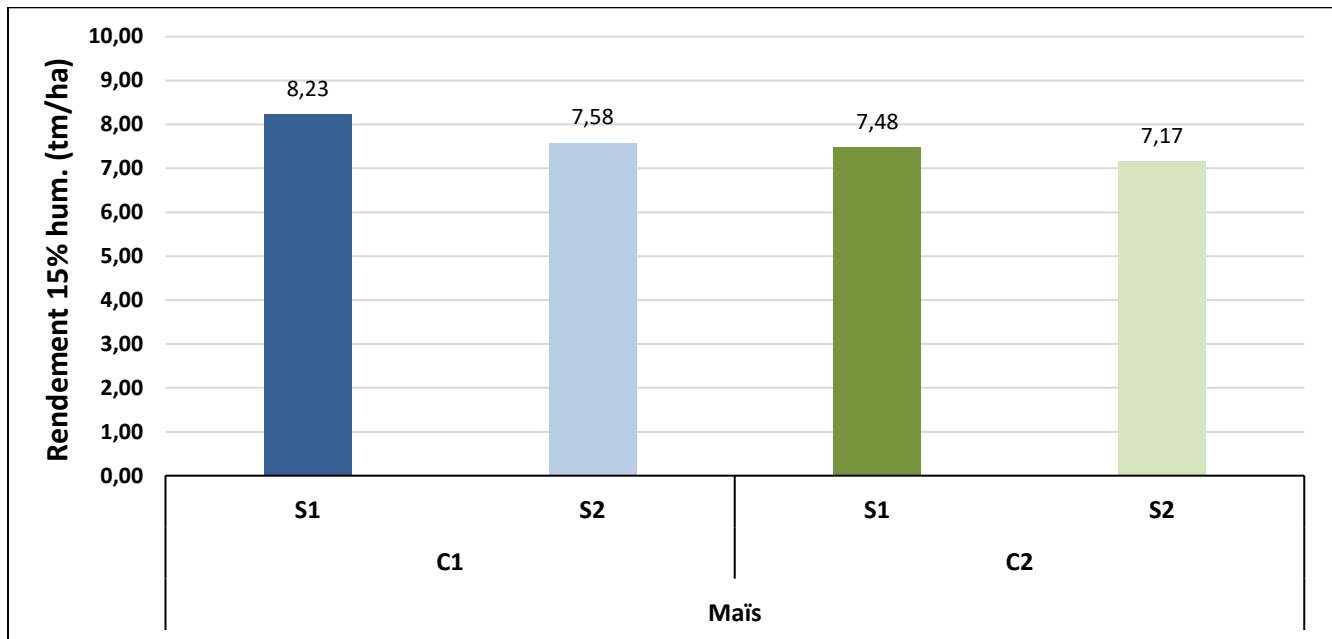
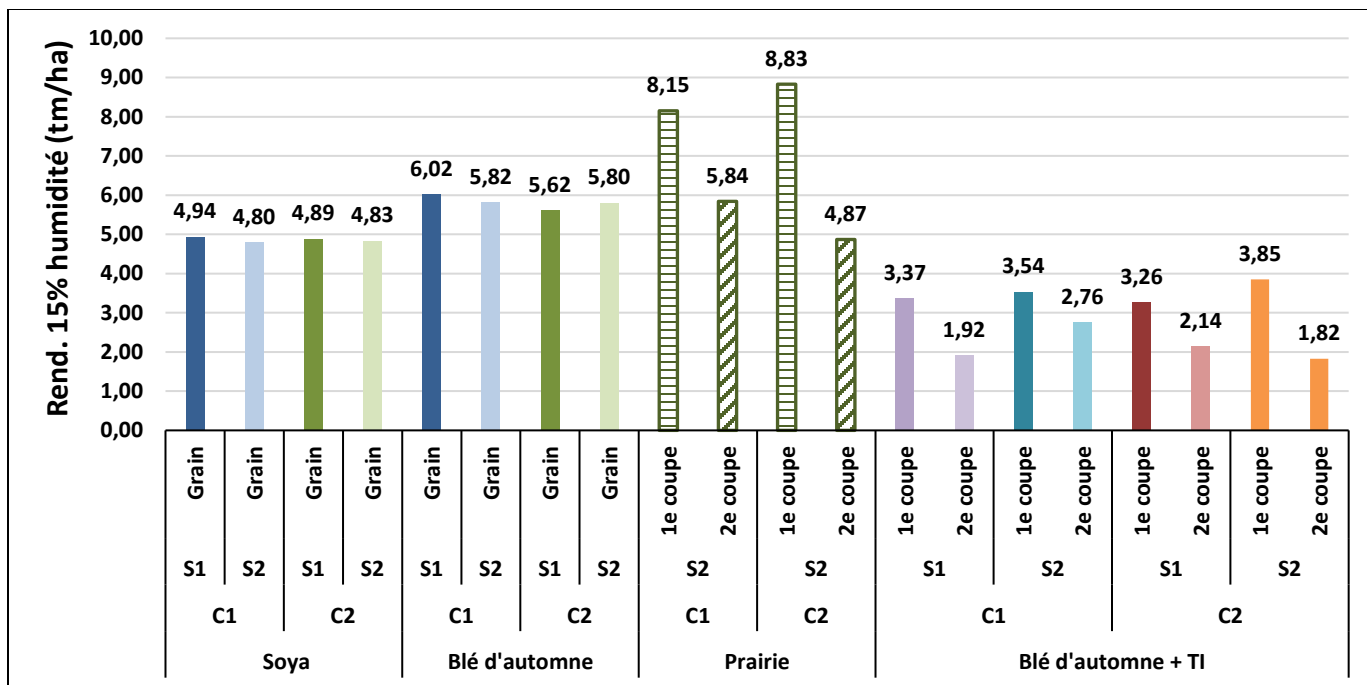


Figure 18. Rendements du maïs-grain sous l'effet des traitements Compaction (C1 : sol non compacté et C2 : compacté) et Travail de sol (S1 conventionnel et S2 réduit) dans le dispositif de 48 parcelles en 2020.



Pour Blé automne + TI (trèfles intercalaires) : 1e coupe = 1e coupe trèfle +paille, 2e coupe = 2e coupe trèfle.

Figure 19. Rendements des cultures dans le dispositif de 48 parcelles en 2021.

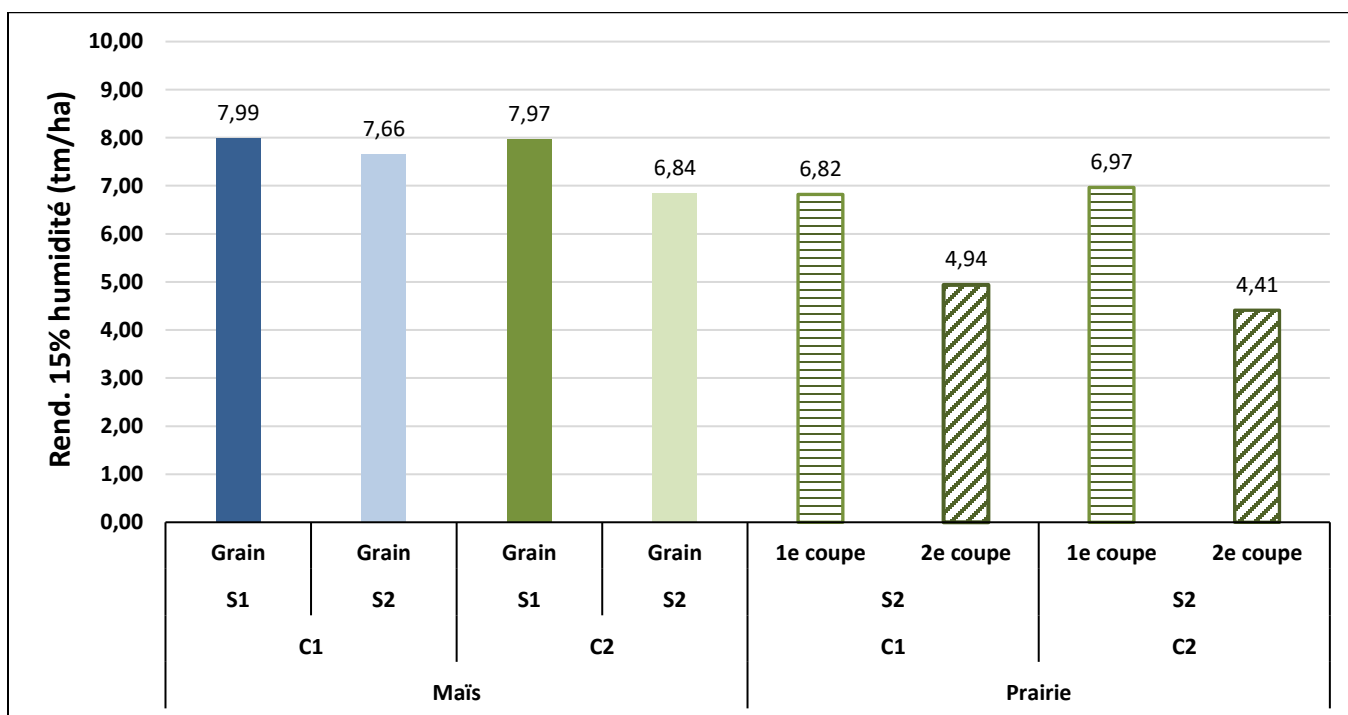


Figure 20. Rendements du maïs-grain et de la prairie dans le dispositif de 48 parcelles en 2022.

3.5 EFFETS DES PRATIQUES AGRICOLES SUR LES SOLS

3.5.1 Effets des pratiques agricoles sur les propriétés physiques du sol en profondeur

Des transects de sol ont été caractérisés à l'automne en début de projet (fin du mois octobre 2020) et en fin de projet (début du mois de novembre 2022) sur le dispositif des 48 parcelles pour qualifier la condition physique du sol en profondeur. Quatre carottes de sol ont été prélevées par parcelle avec un échantillonneur de sol de type Giddings monté sur un tracteur, à 2 m d'intervalle sur un transect de 6 m de long et découpées à six profondeurs (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40, 50, 50-60 cm). Chaque carotte était découpée en six cylindres de sol ensachés dans des sacs hermétiques et rapportés au laboratoire pour déterminer la masse volumique apparente (MVA) et la teneur en eau gravimétrique après séchage des échantillons à 105°C. La porosité totale a été estimée en utilisant une masse volumique réelle de 2,65 g/cm³ et la teneur en air volumique au champ a été estimée par différence entre la porosité totale et la teneur en eau volumique.

Après le prélèvement des carottes de sol à la fin du mois d'octobre 2020, un portrait de la résistance à la pénétration d'un cône, de la surface jusqu'à 80 cm de profondeur, a été réalisé à l'aide d'une sonde Veris le long d'un transect parallèle, à raison de 15 points par parcelles, espacés aux 50 cm. Les résultats de résistance à la pénétration sont présentés à l'annexe W. Ces résultats préliminaires ne permettaient pas de visualiser de façon marquée et systématique l'effet des passages de la citerne à lisier et de la déchaumeuse DM-AIR sur la compaction profonde dans le sol. La compaction profonde dans le sol semble varier de façon spatiale sur le dispositif, mais cette compaction ne semble pas liée systématiquement aux passages de la machinerie. Par exemple, un transect le long des parcelles 21, 23, 33, 35, 45 et 47 présente une résistance à l'enfoncement du cône plus élevées que le transect mitoyen des parcelles 22, 24, 34, 36, 46 et 48 qui se retrouve sur le bord de la planche, près d'un fossé et les traitements de compaction ne semblent pas reliés à ces effets deux fois sur six.

L'effet des systèmes de cultures est peu apparent en surface, tandis que les systèmes sous cultures annuelles, et le système maïs-soya en particulier semblent présenter des teneurs en eau inférieures et des meilleures teneurs en air volumique de 20 à 40 cm de profondeur en 2020, mais pas en 2022 (Figure 21). Il est possible que la culture de maïs ait asséché davantage les sols par rapport aux autres cultures présentes en 2020, mais cet effet n'a pas été détecté en 2022; les différences entre les systèmes de culture étaient quasiment imperceptibles en 2022. Il faut noter cependant que la teneur en air sous tous les systèmes de culture est inférieure à 10% (un critère sous lequel les échanges gazeux sont défavorisés) à plus de 10 cm de la surface du sol pour l'année 2020, et sous 25 cm de profondeur en 2022. Le sol a toutefois été échantillonné dans des conditions saturées en eau, alternant entre le gel et le dégel pour les deux années où les échantillons ont été prélevés, dû au court laps de temps disponible entre la fin des récoltes et le début de la saison hivernale.

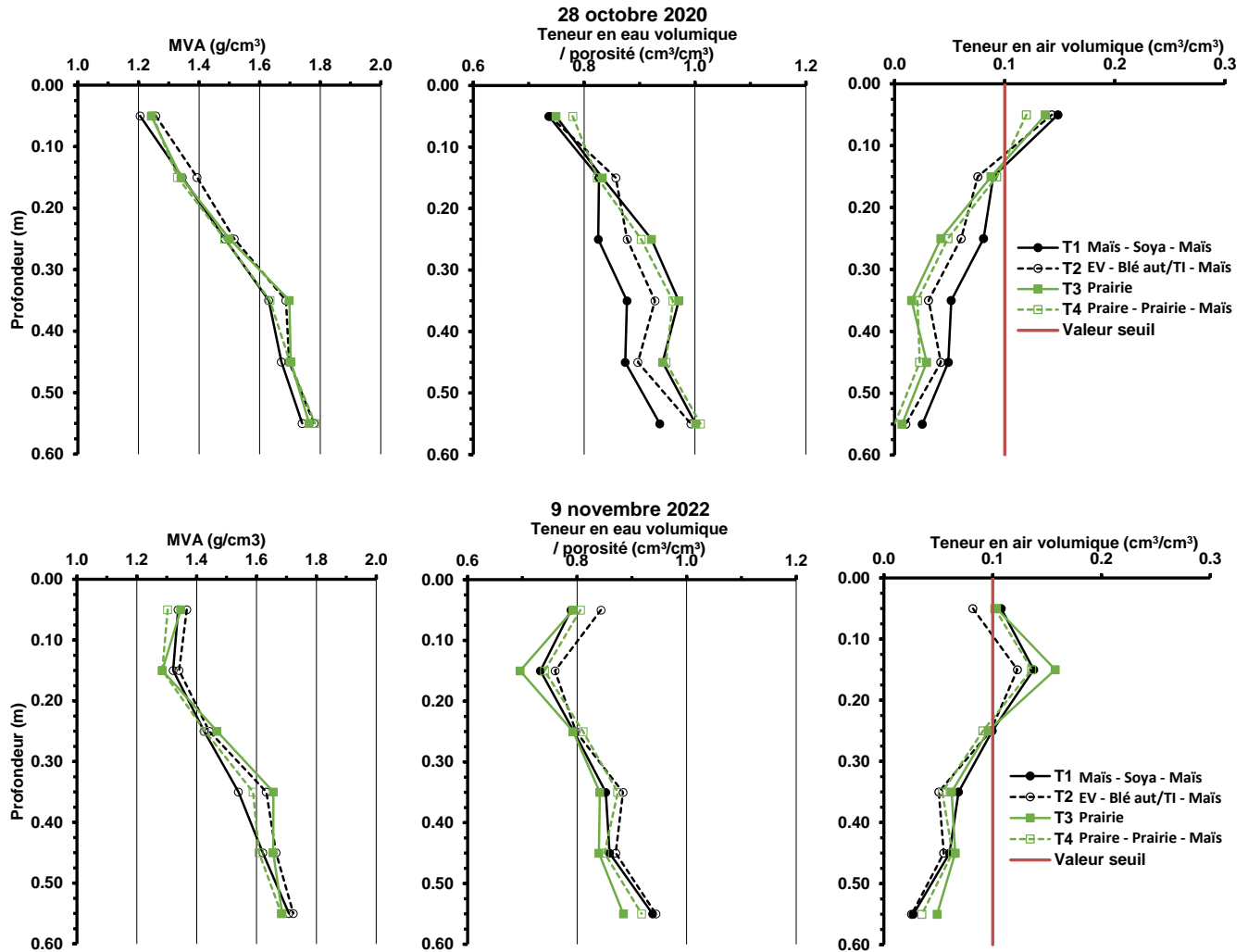


Figure 21. Effets des systèmes de culture sur la masse volumique apparente (MVA), la proportion de la porosité totale occupée par l'eau et la teneur en air volumique (TAV) à six profondeurs.

La compaction des sols a engendré un effet plus apparent sur les horizons de surface que tous les autres traitements (Figure 22). Les sols compactés semblent présenter des teneurs en eau volumique plus importantes de 0 à 20 cm de profondeur et des teneurs en air inférieures ou très proches du seuil critique de 0 à 10 cm de profondeur, et ce pour les deux années où des données sont disponibles. Les teneurs en air sont sous le seuil de 10 % à partir de 10 cm de profondeur pour l'année 2020 et à partir de 25 cm de profondeur pour l'année 2022, pour les sols compactés. Les sols non compactés ont une teneur en air volumique sensiblement plus élevée en surface, de 0 à 25 cm de profondeur, mais sont équivalents aux sols compactés sous 25 cm de profondeur. Malgré les tendances observées, une analyse statistique sera nécessaire pour estimer à quel degré ces différences sont significatives.

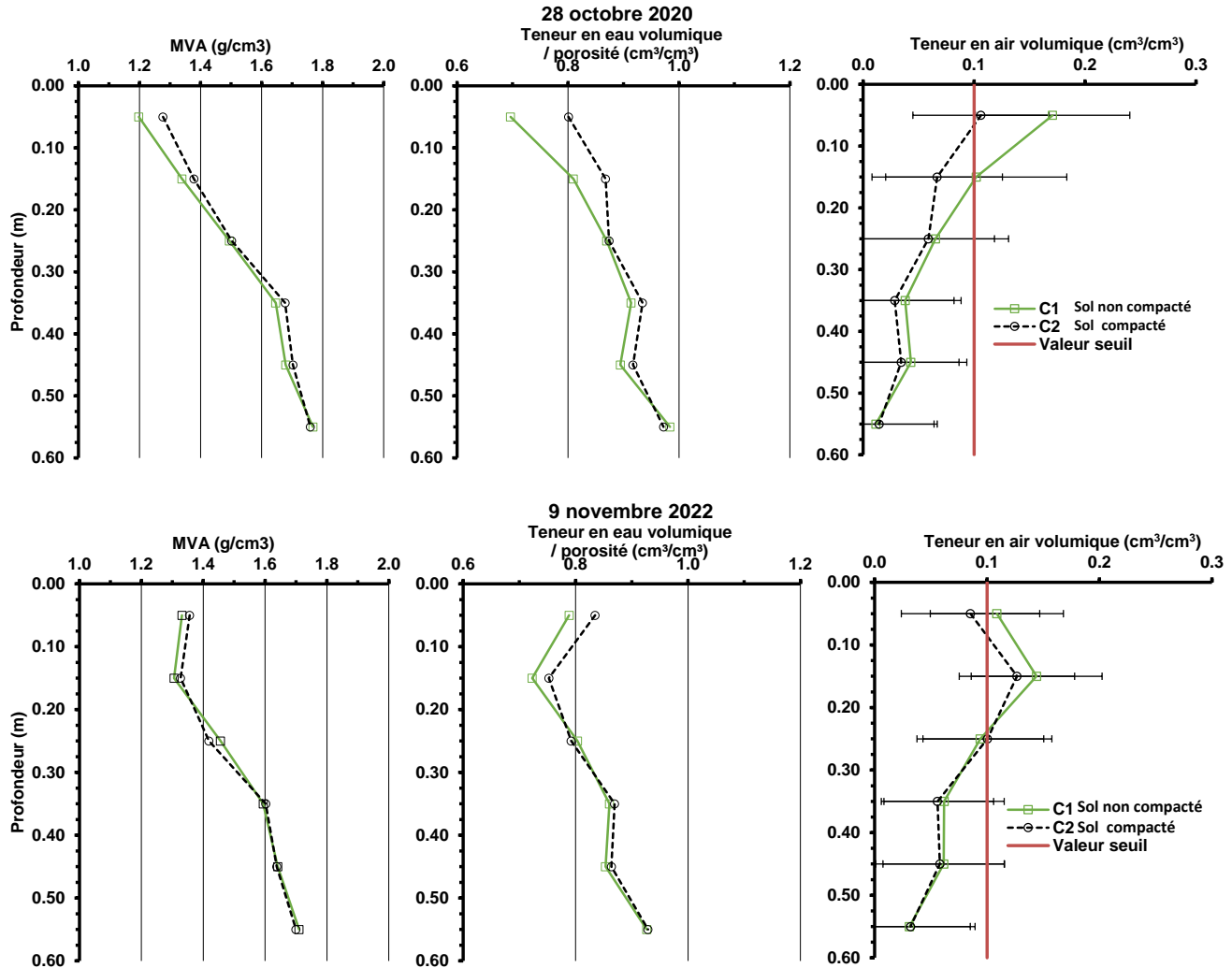


Figure 22. Effets de la compaction des sols sur la masse volumique apparente (MVA), la proportion de la porosité totale occupée par l'eau et la teneur en air volumique (TAV) à six profondeurs.

L'effet du système de travail de sol utilisé variant principalement sur les cultures annuelles ne semble pas avoir induit de grandes différences sur les propriétés physiques mesurées sur les profils de ces transects en début d'essai en automne 2020, ni en automne 2022 (Figure 23). Il faut noter qu'en général, la série présente à la station expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon, la série Le Bras, est un sol loam limoneux relativement compact en profondeur (présence de deux matériaux, le matériau sous-jacent étant plus lourd), avec une MVA qui dépasse 1,6 g/cm³ à plus de 30 cm de profondeur, laissant peu de place à la porosité, à la rétention en eau ou la présence d'air. La porosité était d'ailleurs saturée à près de 80 % en eau à 10 cm de la surface et à plus de 80 % dans le reste du profil en 2020. Ces conditions de saturation sont plus intéressantes pour échantillonner les sols avec un échantillonneur de type Giddings qui permet de prélever des carottes relativement uniformes. En 2022, la porosité était saturée à 80 % d'eau en surface dû aux conditions particulièrement humides lors de l'échantillonnage, mais se situait légèrement en dessous de 80 % de 10 à 25 cm de profondeur environ pour ensuite redépasser ce seuil plus en profondeur. En contrepartie, les teneurs en air sont souvent près du seuil critique.

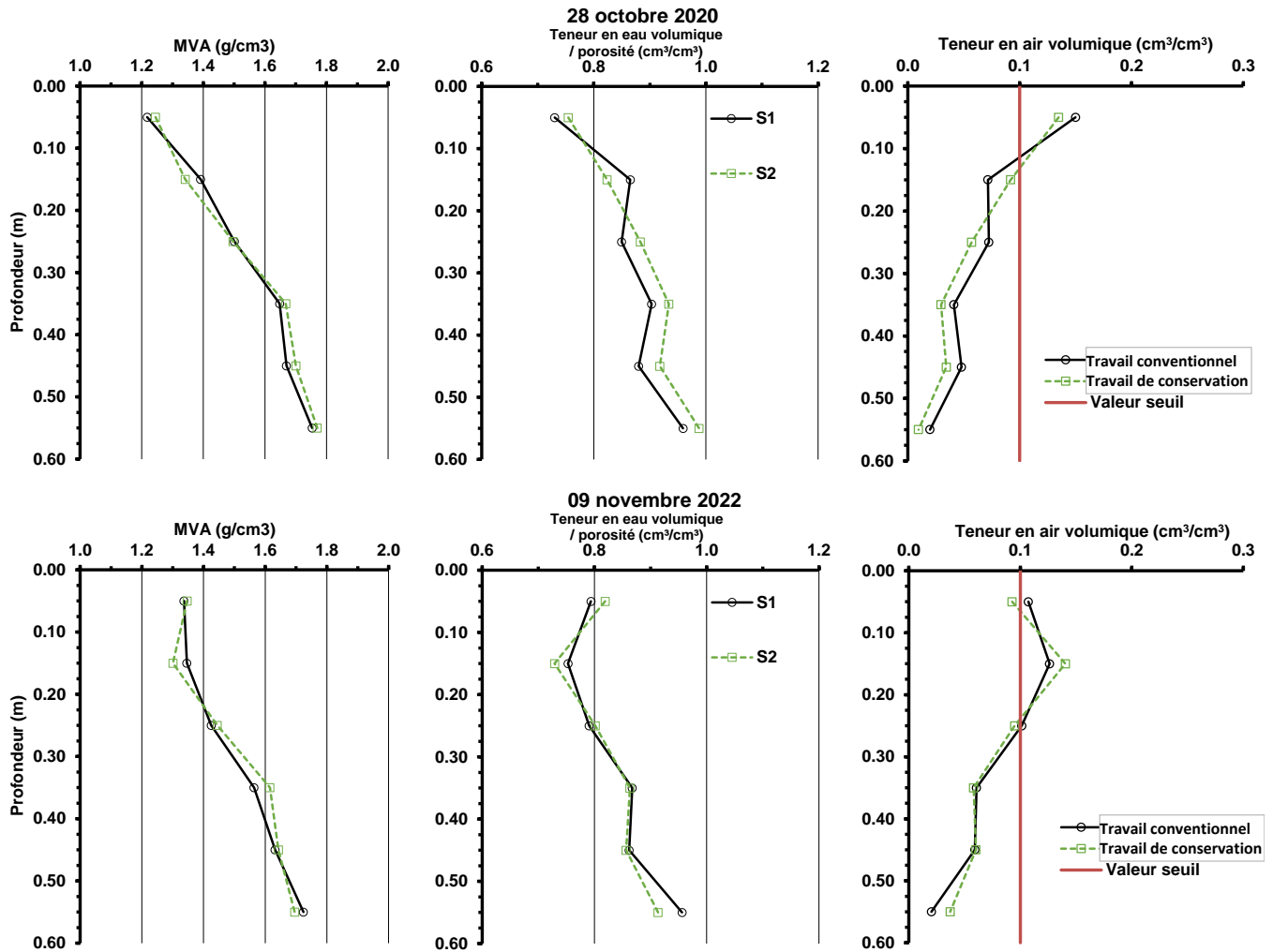


Figure 23. Effets du système de travail de sol sur la masse volumique apparente (MVA), la proportion de la porosité totale occupée par l'eau et la teneur en air volumique (TAV) à six profondeurs.

3.5.2 Effets des pratiques agricoles sur la chimie-fertilité du sol

Les sols ont été caractérisés en début de projet et suivis annuellement pour évaluer l'évolution de la chimie-fertilité des sols sous l'effet des différentes pratiques. La granulométrie des sols est caractérisée dans les 12 micro-bassins et dans 12 des 48 parcelles du dispositif à 48 parcelles, pour trois profondeurs (0-20, 20-40, 40-60 cm), pour un total de 72 échantillons. À la mi-novembre en 2022, des échantillons de sols ont été prélevés à la tarière hélicoïdale à six reprises sur chaque parcelle pour former des échantillons composites et soumis au laboratoire.

Le sol a été échantillonné en fin de cycle de rotation après la récolte du maïs afin d'évaluer les propriétés de chimie-fertilité dans les 12 micro-bassins et dans chacun des blocs du dispositif à 48 parcelles à trois profondeurs (0-10, 10-20, 20-40 cm), pour un total de 72 échantillons. Les échantillons de sols ont été prélevés à la tarière hélicoïdale à six reprises sur chaque parcelle pour former des échantillons composites et soumis au laboratoire. Les analyses effectuées sont le pH à l'eau et le pH SMP, les teneurs en C et N total Leco, les teneurs en P, K, Ca, Mg, Al, Fe, Cu, Mn et Zn extraits à la solution Mehlich-3. Les résultats des analyses effectuées au laboratoire sont présentés à l'annexe T.

3.5.3 Évaluer l'effet des pratiques agricoles sur la stabilité structurale à la surface du sol dans les deux dispositifs

La stabilité structurale du sol a été évaluée sur des mottes de sol prélevées à la surface du sol de 0 à 10 cm de profondeur de chaque parcelle sous la culture du maïs à la mi-septembre en 2022 dans les deux dispositifs, dans les 12 micro-bassins et dans les 48 parcelles pour un total de 60 échantillons. Un échantillon composite d'un volume de 500 ml de sol a été formé à partir de trois à quatre mottes de sol prélevées avec une truelle sur chaque parcelle et acheminé au laboratoire en prenant soin de ne pas compacter ou désagréger le sol. Les figures ci-dessous présentent les moyennes des variables mesurées au laboratoire qui expriment la stabilité structurale des sols soit: le pourcentage des agrégats stables à l'eau retenus dans le tamis regroupés en quatre dimensions (8-4 mm, 4-2 mm, 2-1 mm, 1-0.5 mm et 0.5-0.25 mm) et finalement le diamètre moyen pondéré (DMP) qui est calculé à partir des pondérations des agrégats stables à l'eau précédemment mentionnés. La Figure 24 présente les moyennes des résultats obtenus dans les 12 micro-bassins et la Figure 25 présente les moyennes des résultats obtenus dans les 48 parcelles. Les analyses brutes sont présentées dans l'annexe U.

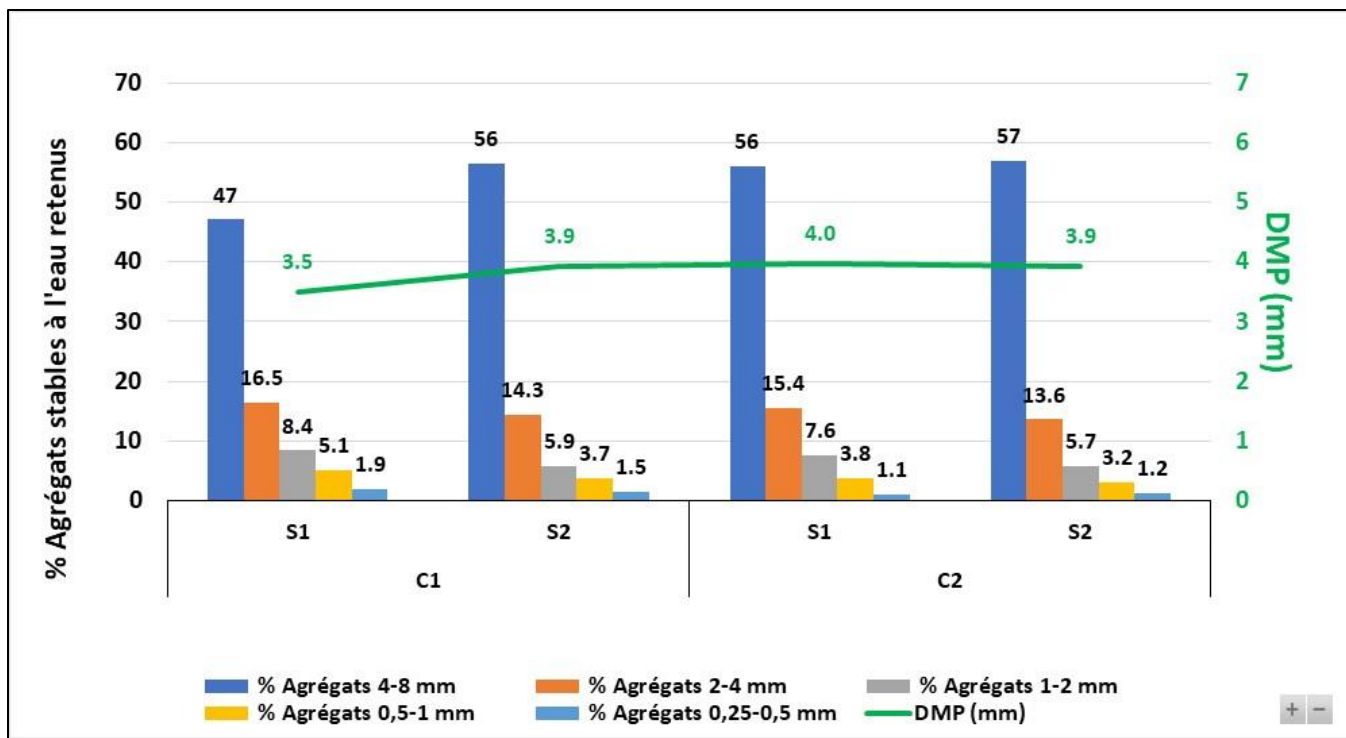


Figure 24. Propriétés de la stabilité structurale mesurées dans les 12 micro-bassins en 2022.

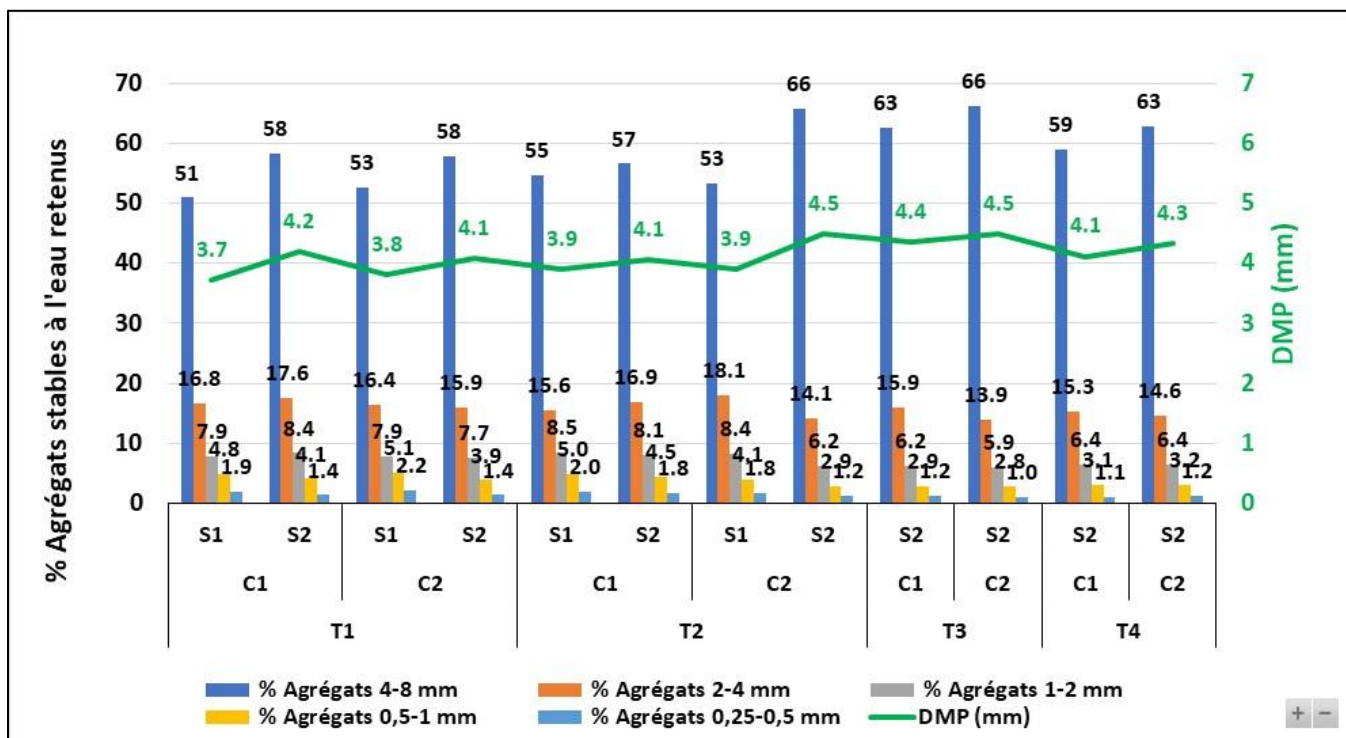


Figure 25. Propriétés de la stabilité structurale mesurées dans les 48 parcelles en 2022.

3.6 EFFETS DES PRATIQUES AGRICOLES SUR LA QUALITÉ DE L'EAU

Le suivi hydrométrique des eaux de drainage et du ruissellement dans les 12 micro-bassins a débuté le 2 novembre 2020. Le suivi des débits et matières en suspension (MES) a été maintenu en 2023 afin d'assurer la continuité avec la seconde phase du mandat. Le suivi du phosphore, des nitrates et des métaux n'a pas été maintenu au-delà du 1er janvier 2023, ce suivi n'ayant pas été financés par la seconde phase du mandat. À l'hiver 2023, il n'y a pas eu de redoux suffisamment marqué pour soutenir un échantillonnage. Les volumes d'eau collectés par les drains et par les avaloirs sont mesurés par des augets basculants connectés à un acquiiseur de données (*data logger*). Des aliquotes d'eau sont prélevés sous augets, une bascule sur deux. Ces aliquotes sont conservés dans un réservoir afin de constituer des échantillons composites, proportionnels au débit de l'eau collectée au cours de la période d'échantillonnage. Après un événement de ruissellement et de drainage important (un seuil de 10 000 bascules a été établi pour déclencher un échantillonnage), l'eau dans les réservoirs est brassée pour assurer l'homogénéité et échantillonnée pour être rapportée au laboratoire. Les réservoirs sont ensuite vidés. Depuis le début du suivi, 23 campagnes d'échantillonnages des eaux de ruissellement et de drainage ont été réalisées. Les paramètres analysés au laboratoire comprennent les matières en suspension (MES), la conductivité électrique, les teneurs en N-NH₄ et N-NO₃, le P total (persulfate), le P biodisponible (extrait au NaOH – EDTA), le P réactif (orthophosphate) et les éléments dissous P, K, Ca, Mg et Na dosés à l'ICP. Ainsi, les charges en sédiments et en différentes formes de N et de P présentes dans les eaux de ruissellement et de drainage ont pu être comptabilisées et comparées pour chaque traitement.

Les précipitations mensuelles par année sont présentées à la Figure 26. Les données proviennent d'une combinaison de sources afin de couvrir l'ensemble de la période, soit la station météorologique de l'IRDA localisée sur le site du dispositif expérimental, ainsi que les stations Scott et Beauséjour du MELCCFP. D'une part, il est possible d'observer que les précipitations ne présentent pas de fluctuations saisonnières marquées, la valeur moyenne des cumuls mensuels oscillant autour de 90 mm. D'autre part, les fluctuations interannuelles peuvent présenter des écarts notables pour un même mois. En juin par exemple, il est possible d'observer les valeurs minimale (23,2 mm en 2020) et maximale (214 mm en 2021) des cumuls observés sur l'ensemble de la période.

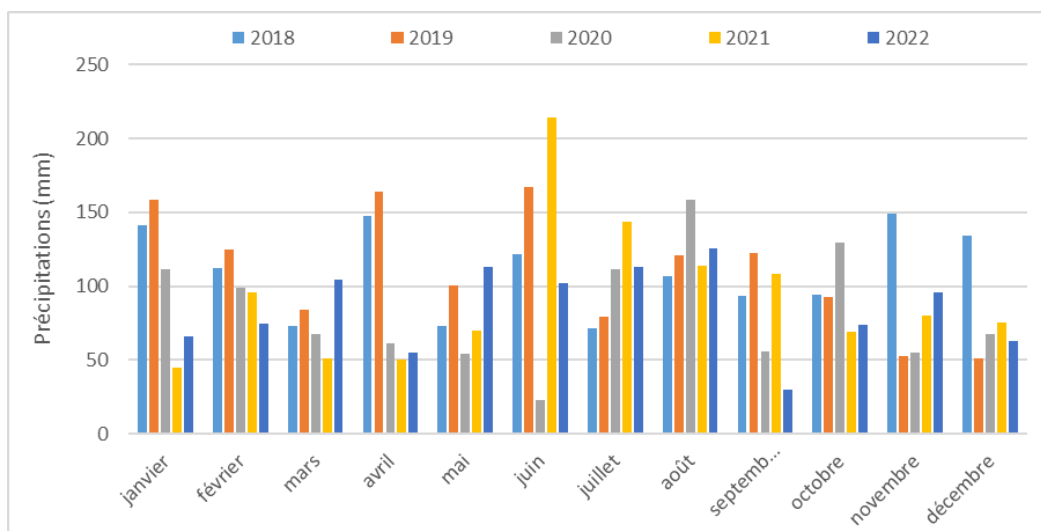


Figure 26. Précipitations mensuelles observées à Saint-Lambert-de-Lauzon (sources: IRDA, MELCCFP).

Le Figure 27 ci-dessous présente les volumes d'eau mesurés à la sortie des drains ainsi que ceux en ruissellement de surface. Les valeurs sont exprimées en mm par jour et estimées par la somme du nombre de bascules, multipliée par la capacité de chacun des augets et divisée par la superficie de la parcelle. Les valeurs sont classées pour chacun des dispositifs présentés à la section 2.1 (sol non compacté par rapport à sol compacté et système conventionnel par rapport à système de conservation). Il est possible d'y observer que les pointes (maxima annuels) des lames d'eau ruisselées (atteignant 38 mm par jour au printemps 2022) sont généralement supérieures à celles drainées. L'effet des traitements ne semblent pas a priori déterminant sur les volumes d'eau ruisselés et drainés, la variabilité de la réponse hydrologique observée d'un réplica à l'autre (micro-bassins identiques associés à une régie culturale donnée) semble a priori importante. Le suivi hydrométrique à Saint-Lambert est également présenté sous forme de tableau à l'annexe V.

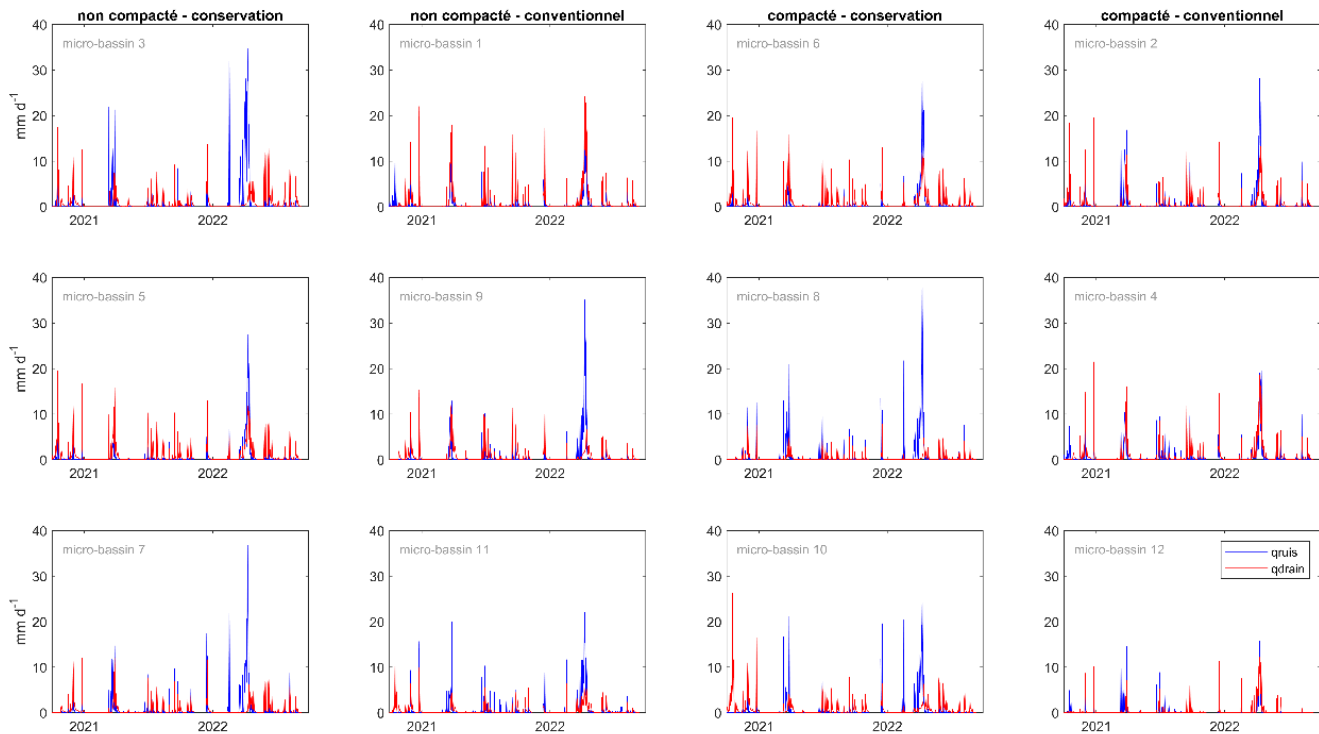


Figure 27. Hauteurs moyennes d'eau ruisselées (qruis) et drainées (qdrain) mesurées à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.

La Figure 28 ci-dessous présente les charges de matières en suspension (MES, exprimées en kilogrammes à l'hectare) mesurées à la sortie des drains et celle des avaloirs. Il est possible d'y observer une augmentation importante des charges en MES lors des événements de fortes pluies et de fonte du couvert neigeux. Aussi, les charges en MES observées en 2021 (atteignant 1402 kg/ha) sont sensiblement supérieures à celles observées en 2022. Les résultats suggèrent que le système conventionnel soit associé à de plus fortes charges en MES à l'été et à l'automne, tant pour les eaux drainées que ruisselées. L'impact de la compaction des sols sur les charges en MES semble à ce stade-ci plus difficile à identifier.

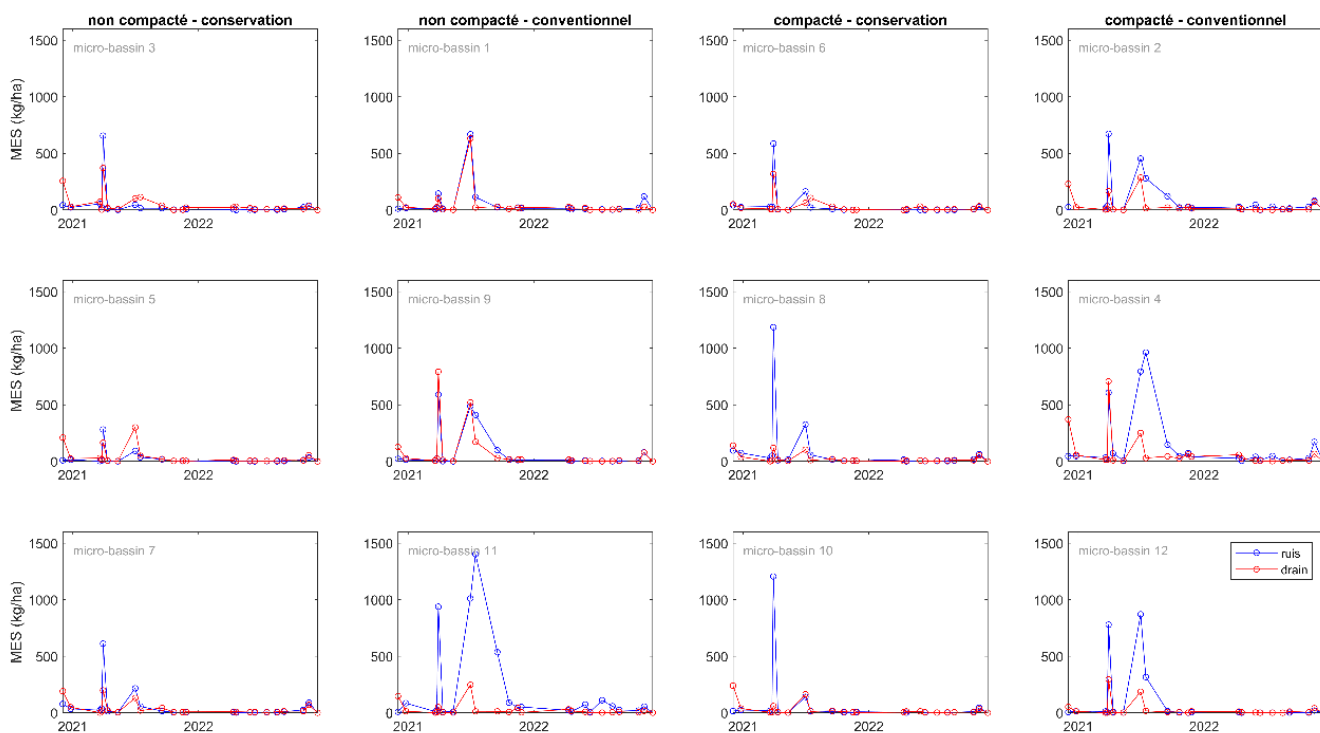


Figure 28. Charges en MES en ruissellement de surface (ruis) et à la sortie des drains (drain) mesurées à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.

La Figure 29 ci-dessous présente les charges de phosphore total (P-total, exprimées en kilogrammes à l’hectare) mesurées à la sortie des drains et à celle des avaloirs. Les charges en phosphore voyagent principalement par le ruissellement de surface. Aussi, les plus importantes charges en P-total sont observées lors la fonte du couvert neigeux, typiquement associé à l’exportation de sédiments. Cette observation est moins marquée pour l’année 2022 que pour l’année 2021. Comme pour les MES, les résultats suggèrent que le système conventionnel soit associé à de plus fortes charges en P-total à l’été et à l’automne, tant pour les eaux drainées que ruisselées. L’effet de la compaction des sols sur les charges en P-total semble à ce stade-ci plus difficile à identifier.

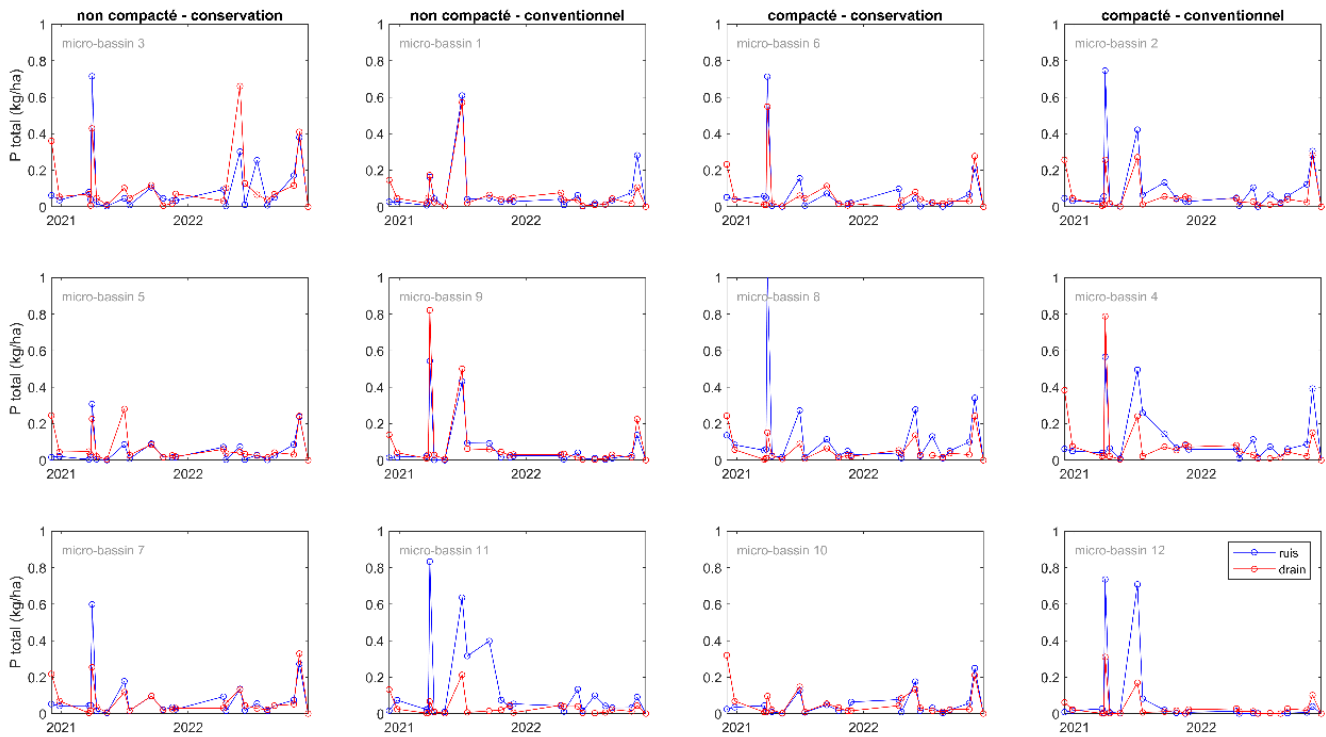


Figure 29. Charges en P-total en ruissellement de surface (ruis) et à la sortie des drains (drain) mesurées à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.

La Figure 30 ci-dessous présente les charges en nitrates ($N-NO_3$, exprimées en kilogrammes à l'hectare) mesurées à la sortie des drains et à celle des avaloirs. Les charges les plus importantes en nitrates sont typiquement observées à l'automne et à l'hiver, en période de récolte et de post-récolte. Contrairement aux charges en P-total, on observe que les nitrates migrent davantage via l'écoulement au drain. Comme pour les MES et le P-total, les résultats suggèrent que le système conventionnel soit associé à de plus fortes charges en nitrates, mais plus typiquement associées aux eaux de drainage qu'au eaux de ruissellement. L'effet de la compaction des sols sur les charges en $N-NO_3$ semble à ce stade-ci plus difficile à identifier.

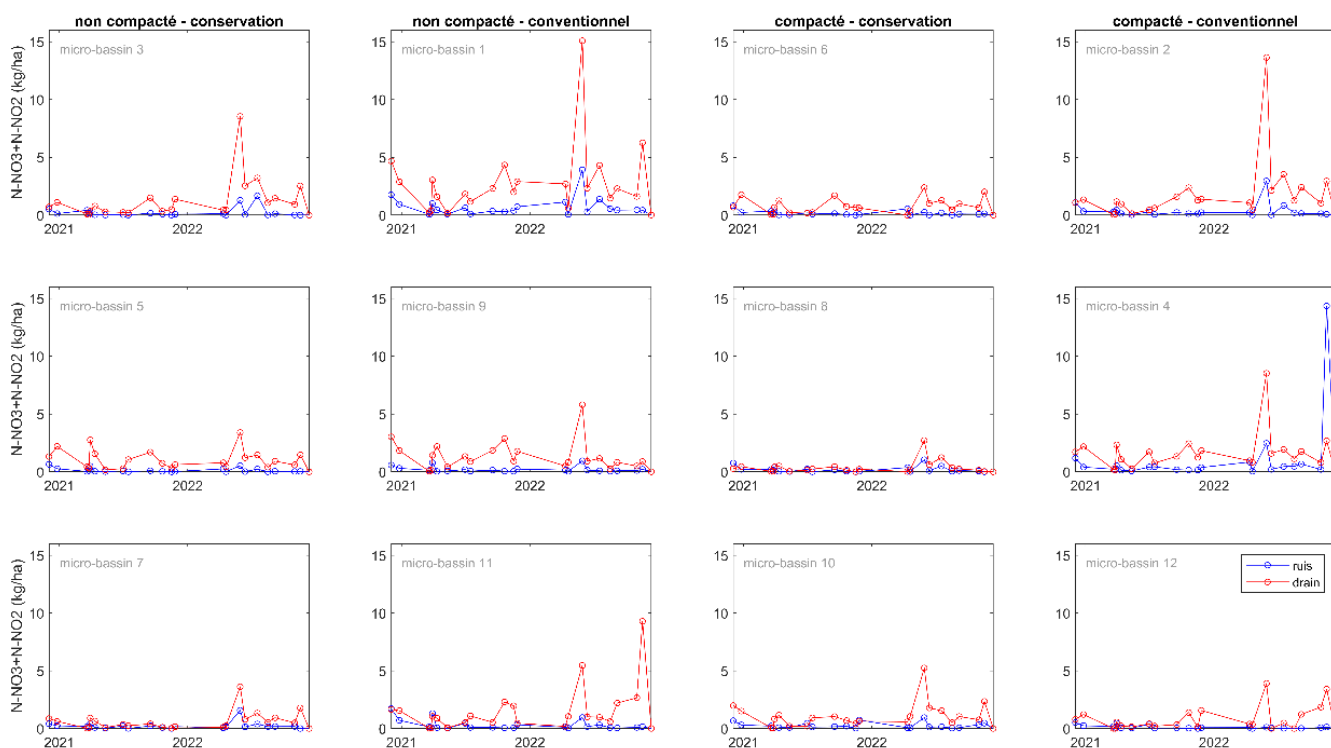


Figure 30. Charges en $N-NO_3$ en ruissellement de surface (ruis) et à la sortie des drains (drain) mesurées à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.

4. EFFETS DES SYSTÈMES CULTURAUX ET DE LA DÉGRADATION DES SOLS SUR L'HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS VERSANTS AGRICOLES

Le second volet de ce mandat vise à estimer l'effet des systèmes de culture et de la condition des sols sur la réponse hydrologique (quantité et qualité) à l'échelle de petits bassins versants agricoles présentant des conditions agroclimatiques variées. La démarche d'analyse s'appuie sur la mise en place du modèle hydrologique à base physique SWAT et la scénarisation de pratiques agricoles appliquées à l'échelle des bassins versants. Ce volet cherche aussi à valoriser les suivis hydrométriques historiques réalisés à l'IRDA au cours des 20 dernières années par la mise en place d'une base de données hydrométriques harmonisée et libre de droit.

Ce volet implique la réalisation des trois tâches suivantes :

1. Produire une base de données hydrométriques harmonisées à partir des mesures colligées par l'IRDA sur quatorze petits bassins versants agricoles du Québec (< 30 km²), incluant des séries temporelles à haute résolution (15 minutes) de données hydrométriques (débits et qualité de l'eau) et des bases de données géospatiales correspondantes au suivi hydrométrique incluant les caractéristiques d'occupation et de propriétés des sols des sous-bassins à haute résolution spatiale (1 m);
2. Mettre en place, caler et valider le modèle hydrologique SWAT sur cinq bassins versants en climat historique;
3. Projeter l'effet des scénarios de pratiques agricoles contrastées (dégradées vs conservation) sur les réponses hydrologiques des cours d'eau.

Il est à noter que deux tâches initialement prévues n'ont pas été réalisées. Cette décision est justifiée par un déficit de cohérence scientifique dans le libellé. Ces tâches sont les suivantes :

1. Analyser les réponses hydrologiques des sous-bassins de façon à détecter et distinguer les influences des systèmes cultureux et de l'occupation des sols, du climat et des propriétés géophysiques des sous-bassins;
2. Isoler pour chaque bassin versant des événements hydrologiques particuliers (fonte printanière, orages estivaux) qui serviront de base aux travaux de modélisation pour étudier les phénomènes de crue et les débits de pointe en rivières.

Dans un premier temps, nous jugeons qu'il est trop peu probable, considérant l'incertitude affectant les données disponibles décrivant ce phénomène, d'établir une relation significative entre les propriétés des hydrogrammes observés et les pratiques culturelles réalisées en amont. Dans un second temps, il ne nous apparaît pas cohérent d'isoler des événements hydrologiques considérant que l'exercice de modélisation s'opère sur une période où les observations sont essentiellement disponibles en continu. Base de données hydrométriques harmonisée. Les données des 14 sous-bassins présélectionnés ont été colligées dans des fichiers Excel et mis en forme selon les standards du Guide des pratiques hydrologiques de la *Commission Hydrologique de l'Organisation Météorologique Mondiale* (OMM, 2008). L'inventaire des bassins versants jugés prioritaires pour monter la base de données hydrométriques harmonisée est présenté au Tableau 12 ci-dessous.

Les données hydrométriques colligées aux exutoires des sous-bassins expérimentaux du réseau de l'IRDA comprennent :

- le débit au pas de temps de 15 minutes et journalier;
- le signal de conductivité électrique et l'estimation de la séparation géochimique de l'hydrogramme;
- la turbidité et sa conversion en taux de matières en suspension (MES), de même que le flux (charges journalières) de MES;
- le flux journalier de nitrates et phosphore dérivé de modèles concentration - débit.

La base de données hydrométriques est constituée d'un ensemble de fichiers Excel joint à ce document (livrable # 5, annexe A), dont le gabarit du ruisseau Ewing est présenté à titre d'exemple aux Figure 31 et Figure 32 ci-dessous. Les métadonnées générales des stations et des données sont fournies en entête de fichier. Les métadonnées plus précises sur la qualité des données n'ont cependant pu être retracées et ni incluses aux fichiers pour l'instant.

Tableau 12. Inventaire des bassins versants prioritaires pour les bases de données hydrométriques et météorologiques*.

Bassin	Aire drainage (ha)	Débits journaliers	Nbre années	Débits 15 minutes	Nbre années	Surface Souterrain	Nbre année	Sédiments
Castor	1 224	1 oct. 1997 - 15 avr. 2013 14 nov. 2019 - maintenant	18 ans	3 avr. 2001 - 15 avr. 2013 14 nov. 2019 - maintenant	14 ans	5 mai 2007 - 15 avr. 2013 14 nov. 2019 - maintenant	8 ans	X
Ewing	3 053	1 nov. 2001 - 31 déc. 2012	11 ans	3 nov. 2001 - 31 déc. 2014	13 ans	1 mai 2007 - 31 déc. 2012.	5 ans ^{1/2}	X
Walbridge (s)	630 ; 790	4 nov. 2001 - 21 mai 2003 1 oct. 2004 - 1 nov. 2006	3 ans	4 nov. 2001 - 21 mai 2003 1 oct. 2004 - 1 nov. 2006	3 ans	1 oct. 2004 - 1 nov. 2006	2 ans	X
Éperlab * (Boyer Sud)	400		3 ans	17 avr. 2019 - maintenant	3 ans	17 avr. 2019 - maintenant	3 ans	X
Fourchette (s)	250 ; 192	1 oct. 2001 - 31 mars 2015	13 ans	13 fév. 2002 - 31 mars 2015	13 ans	1 oct. 2004 - 31 déc. 2012	8 ans	X
Bellevue	1 612		5 ans ^{1/2}	1 juin 2009 - 19 nov. 2014	5 ans ^{1/2}	1 juin 2009 - 31 déc. 2010 15 mars 2012 - 19 nov. 2014	4 ans	X
Pot-au-Beurre	1 949		5 ans ^{1/2}	1 juin 2009 - 19 nov. 2014	5 ans ^{1/2}	1 juin 2009 - 31 oct. 2011 1 janv. 2013 - 19 nov. 2014	4 ans	X
Parent	514		2 ans ^{1/2}	21 nov. 2017 - 28 mai 2020	2 ans ^{1/2}	-	-	X
Noire	820		4 ans ^{1/2}	15 oct. 2009 - 22 nov. 2011 1 avr. 2013 - 27 nov. 2015	4 ans ^{1/2}	Conductivité		X
Brulée	959		4 ans ^{1/2}	15 oct. 2009 - 22 nov. 2011 1 avr. 2013 - 27 nov. 2015	4 ans ^{1/2}	Conductivité		X
Brook	582	23 sept. 2009 - 24 nov. 2015	4 ans ^{1/2}	23 sept. 2009 - 3 oct. 2011 1 avr. 2013 - 25 nov. 2015	4 ans ^{1/2}	23 sept. 2009 - 3 oct. 2011 1 avr. 2013 - 31 mars 2015	4 ans ^{1/2}	X
Cass	713	22 sept. 2009 - 25 nov. 2015	4 ans ^{1/2}	23 sept. 2009 - 3 oct. 2011 1 avr. 2013 - 25 nov. 2015	4 ans ^{1/2}	3 oct. 2011 - 22 sept. 2009 1 janv. 2013 - 30 nov. 2015	4 ans ^{1/2}	X

*Les bassins Walbridge et Fourchette sont constitués de deux sous-bassins versants jumeaux. Ce qui porte l'inventaire de 12 à 14 bassins versants.

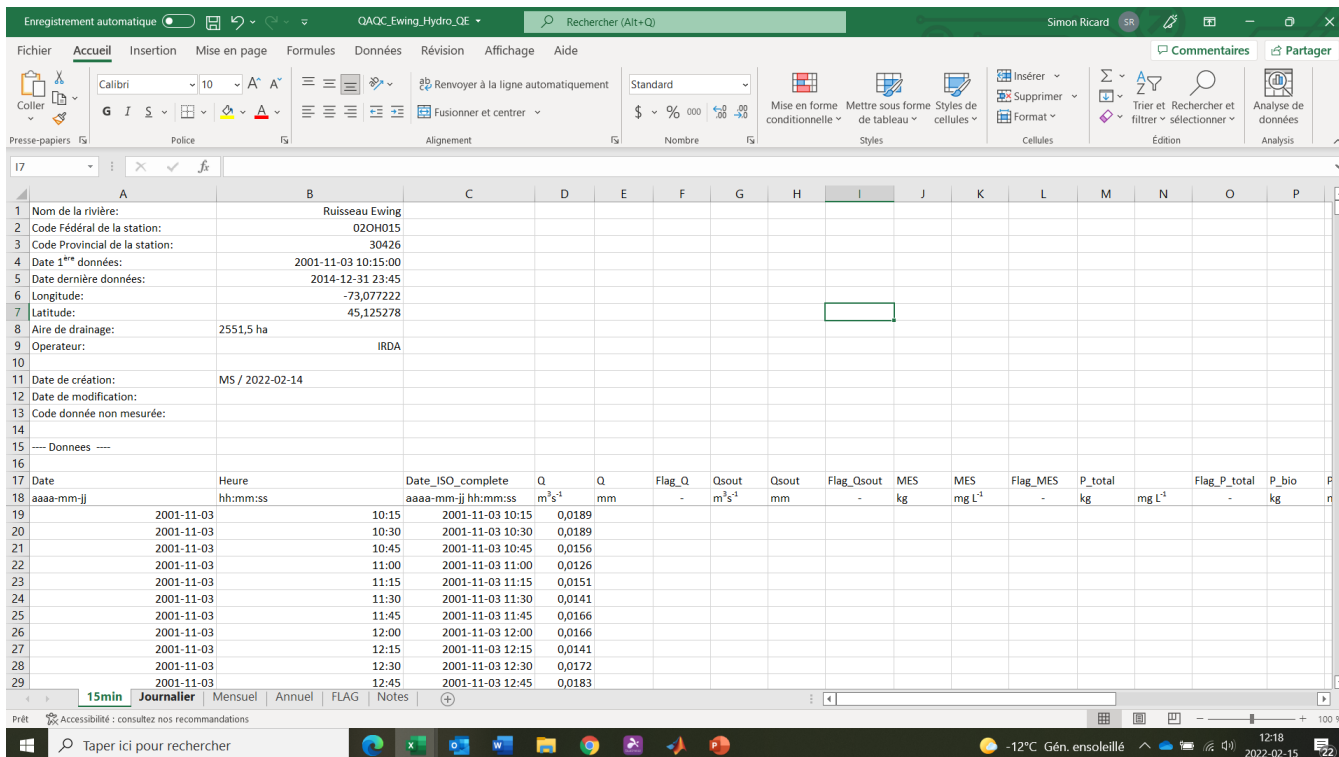


Figure 31. En-tête du fichier numérique contenant les mesures de débit au pas de temps de 15 minutes.

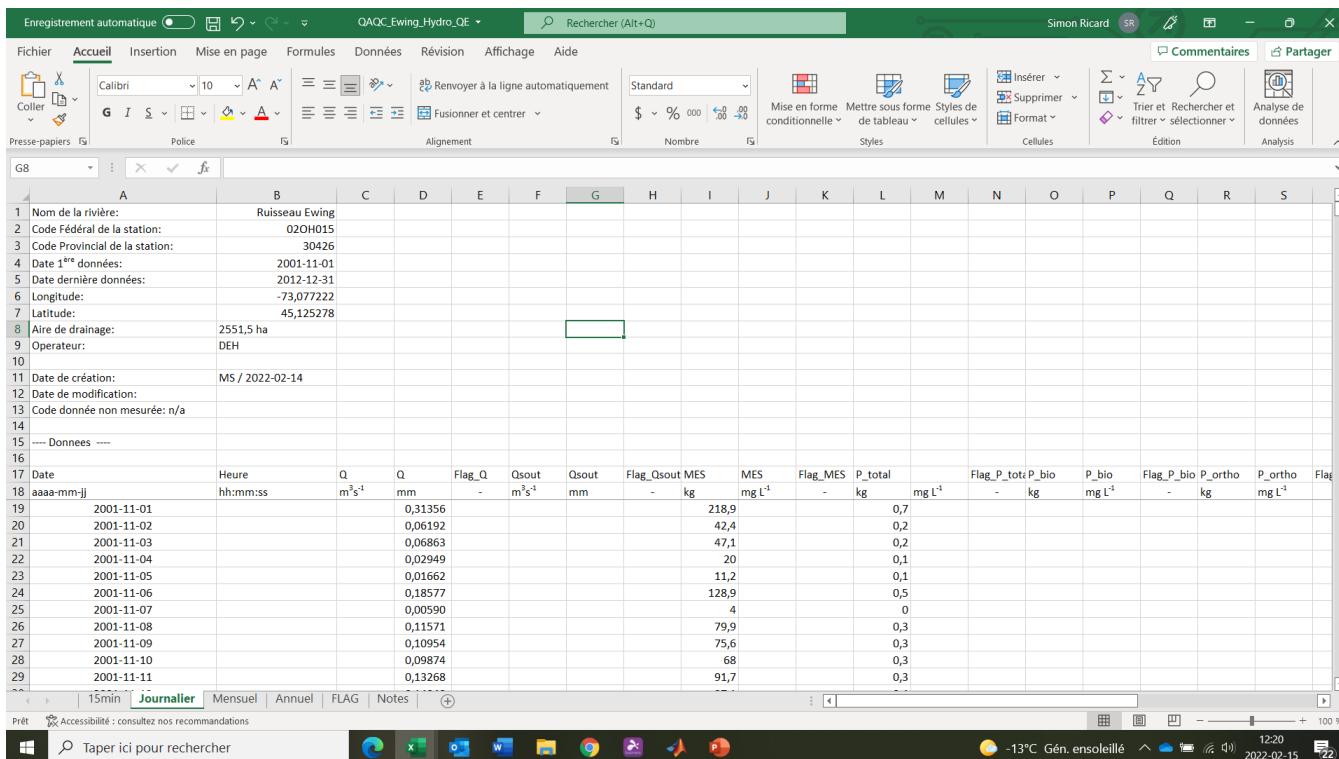


Figure 32. En-tête du fichier numérique contenant les mesures de débit au pas de temps de 24 heures. Les autres champs disponibles sont également intégrés au fichier (ici, MES et P-total).

4.1 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES POUR FIN DE MODÉLISATION

Une base de données météorologiques harmonisée a été développée à partir des données de précipitations du système CaPA (Lespinas et al., 2015) et des données de température interpolées du MELCCFP (Bergeron, 2017). Ces données disponibles sur une base horaire sont intégrées sur un pas de temps journalier. Les données de précipitations CaPA sont issues du modèle régional de climat canadien piloté par la réanalyse climatique RDRS v2.0, combinée à une technique d'interpolation optimale (Lespinas et al., 2015). Une réanalyse est un produit de données météorologiques combinant diverses sources de données historiques uniformisées et corrigées. On les utilise à des fins de prévision météorologique et d'études historiques. Les sources d'observation constituant la réanalyse pour CaPA sont diverses et comprennent les réseaux de stations, les satellites, les radio-sondes ou les données de l'aviation. CaPA est disponible de 2000 à 2017 sur une grille de 10 km et permet l'uniformisation des sources de données météorologiques utilisées comme intrants sur les bassins modélisés. Afin d'évaluer l'adéquation des données CaPA aux fins du projet, les données aux points de grilles CaPA des bassins de la Montérégie ont été comparées à celles des stations météorologiques les plus proches. L'analyse des biais entre ces deux jeux de données a permis de conclure à une adéquation variable des données CaPA, selon l'année ou la saison. Les différences entre les données CaPA et les observations peuvent affecter le bilan hydrique simulé par le modèle hydrologique SWAT. Les résultats de la modélisation hydrologique doivent donc être interprétés en tenant compte de ces biais, mais aussi en tenant compte du fait que les processus hydrologiques simulés à partir des données CaPA demeurent néanmoins cohérents.

L'analyse des biais a été effectuée pour la région de la Montérégie-Est. Cette zone comprend les bassins versants Ewing, Aux Castors et les deux bassins Walbridges (Amont et Aval). La

Figure 33 montre la grille CaPA téléchargée à partir du portail Caspar pour la région (Mai et al., 2019. <https://caspar-data.ca/>), ainsi que la localisation des bassins et des stations météorologiques du MELCCFP. Six stations situées à proximité de chaque bassin versant ont été identifiées : Farnham, Marieville, Sabrevois, Saint-Bernard-de-Lacolle, Granby et Laprairie. Le Tableau 13 montre la correspondance entre les points de grille CaPA et les stations d'observations météo. Les données de précipitations journalières simulées par CaPA sont comparées aux observations correspondantes sur un horizon temporel commun de 18 ans, soit de 2000 à 2017.

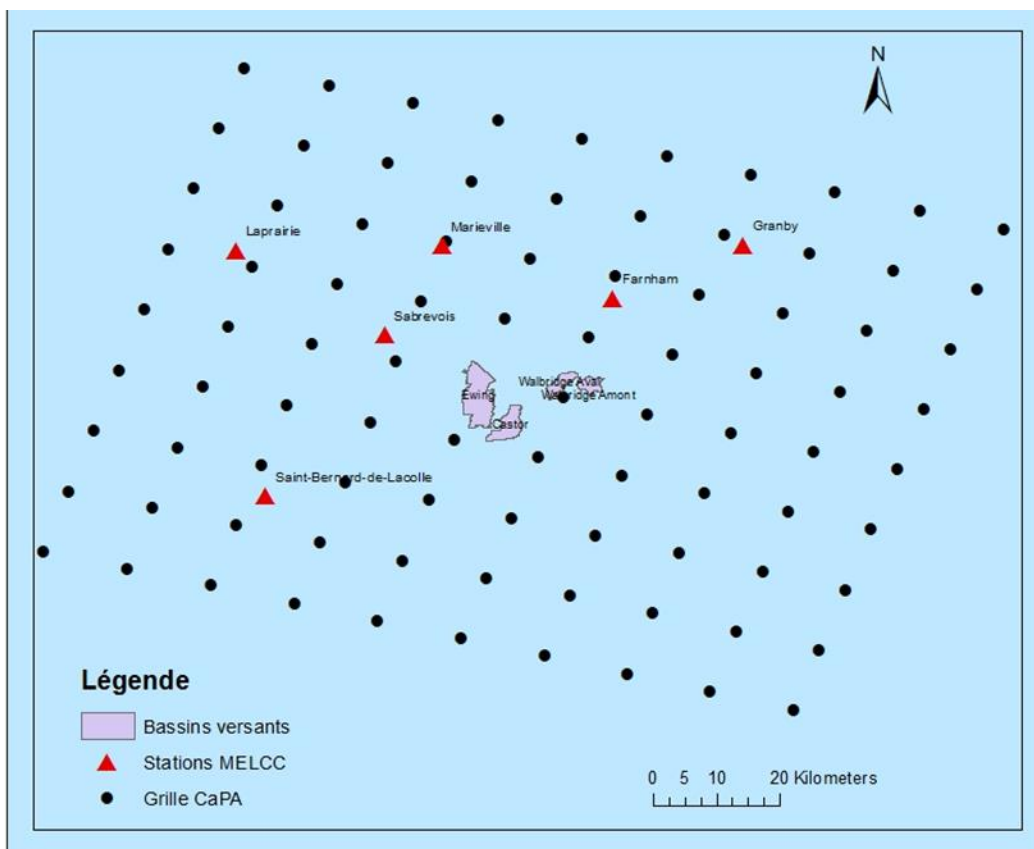


Figure 33. Grille CaPA sur la région de la Montérégie Est, localisation des stations météorologiques du MELCCFP et les bassins versants (a) d'Ewing et (b) Aux Castors et (c) Walbridge Amont et (d) Walbridge Aval.

Tableau 13. Correspondance entre les points de grille CaPA et les stations météorologiques du MELCCFP.

Stations	Point de grille CaPA
Farnham	Point 51
Marieville	Point 34
Sabrevois	Point 32
Saint-Bernard-de-Lacolle	Point 21
Granby	Point 62
Laprairie	Point 15

Dans un premier temps, le biais annuel entre chaque station et son point de grille le plus proche a été calculé tel que suit:

$$Biais = \Sigma P_{mesurée} - \Sigma P_{estimée} \quad (1)$$

Où $\Sigma P_{mesurée}$ est la somme des précipitations mesurées à la station sur une période donnée, tandis que $\Sigma P_{estimée}$, la somme des précipitations estimées par la réanalyse CaPA sur cette même période.

La Figure 34 montre les biais évalués sur une base annuelle aux six stations pour chaque année entre 2000 et 2017, excluant les périodes de données manquantes. À première vue, CaPA tend à surestimer les cumuls annuels de précipitations. L'évolution des biais d'une année à l'autre est cependant spécifique pour chaque station.

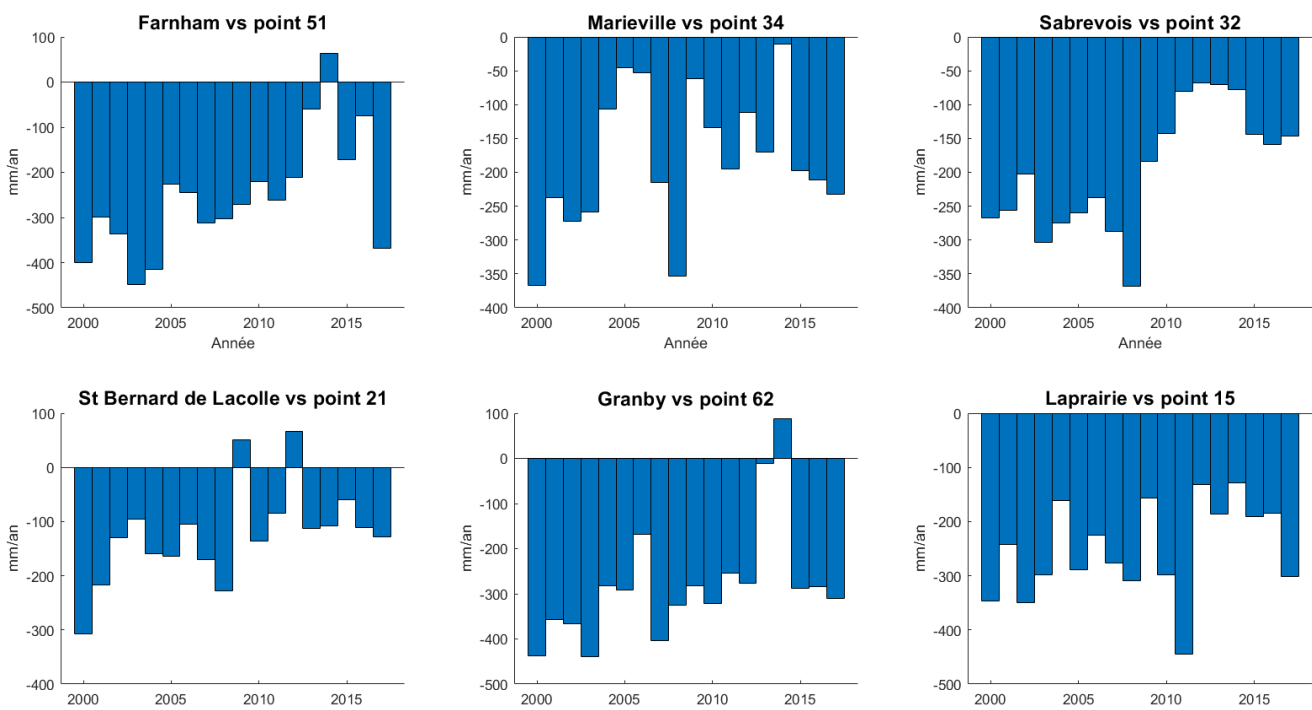


Figure 34. Biais annuels à la station de Laprairie et au point 15 de la grille CaPA, pour la période de 2000 à 2017.

L'analyse à l'échelle mensuelle tente d'évaluer plus précisément la nature des biais, notamment en ce qui a trait à l'incidence des cycles saisonniers. La Figure 35 compare les cumuls mensuels de précipitations simulées par CaPA aux observations de la station Laprairie. Les cinq autres stations sont présentées à l'annexe B. Les jours présentant des données manquantes aux stations ont été omis pour les fins de la comparaison. Il est possible d'observer que CaPA surestime les cumuls mensuels de précipitations pour les mois de janvier, février, mars et décembre, soit les mois de la saison hivernale. L'ampleur des écarts varie d'une année à l'autre, et d'une station à l'autre. Les écarts importants pendant l'hiver peuvent être expliqués par le processus de sous-captation des précipitations solides à la station. De plus, la période hivernale comporte beaucoup de données manquantes, rendant quelquefois la comparaison de certains mois plus hasardeuse. Pour la période estivale (mai-juillet), on constate fréquemment que CaPA sous-estime les précipitations observées. On peut expliquer cette observation par la résolution spatiale grossière à laquelle CaPA simule les précipitations, qui ne permet pas une représentation adéquate des processus

atmosphérique responsables des précipitations intenses et de courte durée. De façon générale, la comparaison des précipitations CaPA aux précipitations observées pour la période avril-novembre ne montre pas d'écarts significatifs par rapport à la période décembre-mars, ce qui est le cas pour les cinq autres stations. Dans une perspective de scénarisation des pratiques agricoles où un changement est évalué par rapport à un état agroclimatique de référence, nous concluons que les avantages à utiliser CaPA (données homogènes et continues pour l'ensemble des bassins modélisés) surpassent les désavantages découlant des biais décrits ci-dessus. La scénarisation permet d'utiliser des données modérément biaisées, puisque la comparaison des scénarios dégradés/alternatifs implique qu'ils sont affectés par les mêmes biais dont l'effet a tendance à s'annuler.

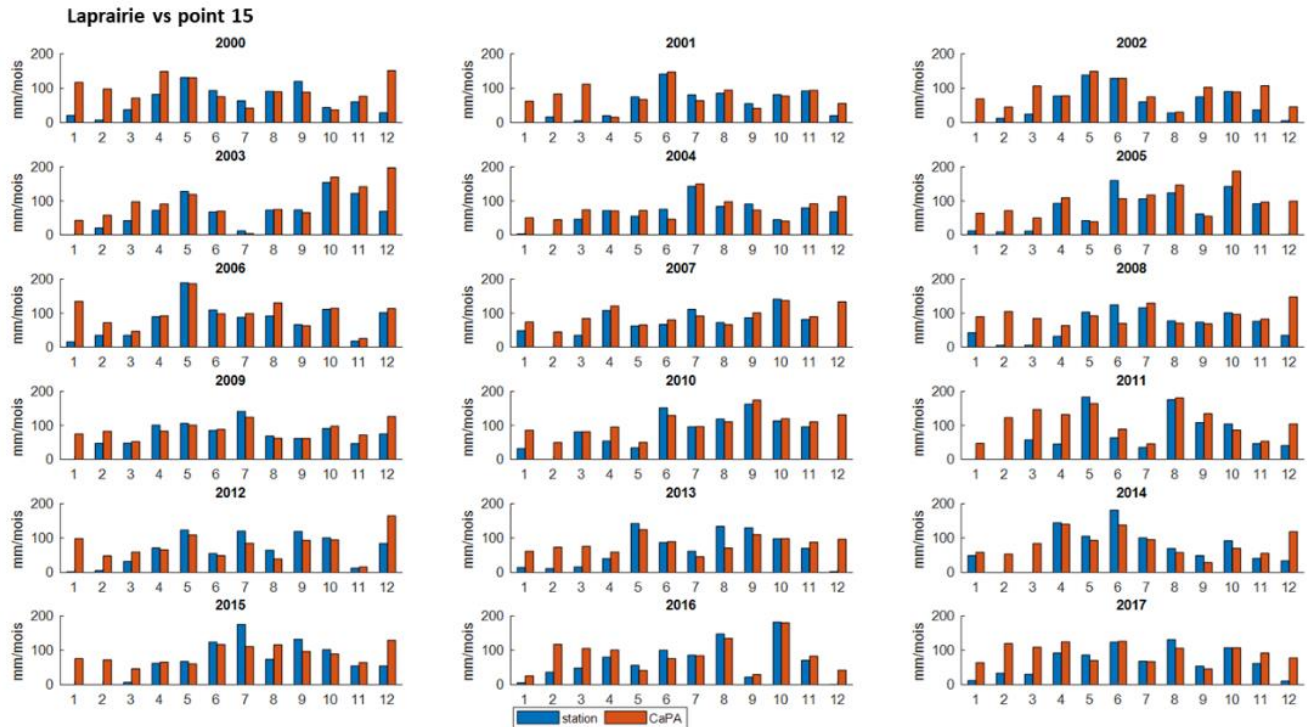


Figure 35. Précipitations mensuelles totales à la station de Laprairie et au point 15 de la grille CaPA, pour la période de 2000 à 2017.

4.2 SIG À HAUTE RÉOLUTION SUIVANT UN PROTOCOLE HARMONISÉ

Les données géophysiques des 14 bassins versants pré-sélectionnés pour la modélisation hydrologique ont été colligées et harmonisées dans des bases de données à référence spatiale sous forme de SIG et de géodatabases (ArcGIS 10.4). Pour chaque bassin, un minimum de deux géodatabases ont été montées, une pour les données raster et la seconde pour les données vectorielles (livrable #5, annexe A). Le travail d'harmonisation a mis une emphase particulière sur l'application d'une nomenclature et d'une structure de données standardisées communes pour toutes les géodatabases, ainsi que sur l'uniformisation des projections spatiales.

Ces géodatabases sont composées de sous-ensembles thématiques et se déclinent ainsi:

- Données vectorielles dans nom_bassin.gdb :
 - Jeu de données '*Hydrographie*'
 - Toutes les données hydrographiques géospatiales incluant le réseau hydrographique, les cours d'eau verbalisés de la MRC si existant, la délimitation des bassins et sous-bassins, la localisation des stations hydrométriques et des stations météorologiques.
 - Jeu de données '*Occupation du sol*'
 - Toutes les données permettant de créer la couche d'occupation du sol complète incluant les limites des parcelles agricoles et leur culture pour 2010, la couche écoforestière, les milieux humides, l'hydrographie de surface (lac) et le réseau routier.
 - Jeu de données '*Sol*'
 - La pédologie ou carte de sol
 - Jeu de données '*Intermédiaire*'
 - Assemblage de jeux de données intermédiaires ayant permis de constituer des couches en entrée de SWAT.
 - D'autres jeux de données utiles à la cartographie ou à la description du bassin tel que les '*Limites administratives*' ou '*Travaux*', etc.

- Données rasters nom_bassin_raster.gdb :
 - Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) à 1 mètre de résolution, initiaux et corrigés pour les obstacles;
 - La carte des pentes dérivée du MNT;
 - La rasterisation des ponts et ponceaux (appelés obstacles) pour la correction des MNTs;
 - La rasterisation de la couche d'occupation du sol en intrant à SWAT;
 - La rasterisation de la couche pédologique en intrant à SWAT.

De ces géodatabases, 10 fiches techniques (livrable #5, annexe A) ont été dérivées pour chaque bassin versant associé aux SIG. L'annexe C détaille les données de chaque jeu et leur source pour une base de données type.

4.3 MODÉLISATION

4.3.1 Sélection des bassins à modéliser

De concert avec le comité avisier du projet, le développement d'une grille décisionnelle à critères pondérés a permis de choisir les cinq bassins les plus pertinents pour l'exercice de modélisation. Ces bassins devaient, entre autres, couvrir des conditions agronomiques et biophysiques variées afin d'assurer une représentation juste du Québec agricole méridional. Ce sont donc les bassins Castor (Montérégie-Sud), Brook (Estrie), Brulée (Mauricie), Fourchette (Chaudière-Appalaches) et Pot-au-Beurre (Montérégie-Est) qui ont été sélectionnés sur la base des filtres de la grille décisionnelle. Les critères de sélection déterminant par ordre d'importance sont:

- la disponibilité des mesures en rivière de 5 ans et + pour l'hydrométrie, 4 et + pour la qualité de l'eau, ainsi que des mesures de conductivité permettant de séparer l'hydrogramme en écoulement (lent/souterrain) et en écoulement (rapide/ surface+drains);
- l'occupation agricole supérieure à 50 %, avec changement d'utilisation au cours du temps;
- une qualité de l'eau dégradée évaluée à partir des charges moyennes en sédiments, phosphore total et nitrates.

Ensuite, l'évaluation de la diversité bio-géophysique des bassins a permis de valider le choix des bassins à partir des critères de caractérisation suivants:

- l'absence ou la présence de milieux humides;
- l'homogénéité des cultures dans un même bassin;
- les types de sol et de drainage;
- la pente moyenne des bassins.

La grille et les résultats peuvent être consultés dans le fichier Excel joint au rapport (820600_Hydro_Sys_Caneva_decisionnel_bassins_2022_04_12.xlsx).

4.3.2 Description des bassins sélectionnés

Les cinq bassins se situent dans le sud agricole de la province de Québec, entre les parallèles 45°10' et 46°40'. En longitude, ils se situent tous à l'est de Montréal, avec les bassins Castor et Pot-au-Beurre les plus à l'ouest et le bassin Fourchette le plus à l'est au niveau du 70ième méridien (Figure 36). Les superficies totales des bassins sont relativement petites et varient entre 426 ha (Brulée) et 2 245 ha (Pot-au-Beurre).

Les bassins Brook en Estrie et Brulée en Mauricie sont similaires avec des régimes agricoles moins intensifs que les trois autres bassins. Ils ont en effet pour caractéristiques d'avoir d'importantes superficies en forêt en tête de bassin (60 % du bassin pour Brook et 41 % pour Brulée) et plusieurs milieux humides significatifs (11 % pour Brook et 6 % pour Brulée). Tous deux ont pour occupation du sol principale des prairies et des pâturages avec des élevages dominés par des troupeaux laitiers. Le bassin Brulée semble néanmoins accueillir un plus grand pourcentage en grande culture (Soya, 20 %) comparé à Brook (Céréales et Maïs ensilage, 2 %). Le bassin Brook est le plus vallonné des cinq bassins avec des pentes moyennes de 4,3 % et un dénivelé de 98 m entre les points

d'élévation le plus haut (347 m) et le plus bas (249 m). Bien que ce bassin se situe sur des loams bien drainés (annexe D), des observations de précédentes études relatent un mauvais égouttement des terres. Il serait donc plus susceptible au ruissellement de surface mais aussi à l'érosion des sols nus (Michaud et al., 2014b). Le relief du bassin Brulée est moins marqué avec des pentes moyennes de 2,1 % mais un dénivelé de 131 m (élevations entre 35 et 166 m). Cependant, le bassin Brulée se trouve sur des sols mal, voire très mal drainés avec une forte proportion de sol argileux ($\geq 77\%$) (annexe D), un aspect géophysique favorisant aussi le ruissellement de surface et l'érosion.

Les bassins Pot-au-Beurre, Castor et Fourchette ont pour leur part un régime agricole plus prononcé avec plus de 85 % de leurs terres cultivées (96 % Pot-au-Beurre, 98 % Castor et 87 % Fourchette). Les bassins Castor et Pot-au-Beurre accueillent des superficies en grandes cultures sur presque les 2/3 de leurs terres cultivées et Fourchette sur la moitié. Le reste des terres cultivées se répartissant entre les prairies, les pâturages, un peu de maraîchage et des terres à utilisation inconnue ou autour des bâtiments agricoles et des habitations. Seul le bassin Fourchette contient une zone urbanisée assez importante pour être inclus dans le modèle. L'ensemble des sols des bassins est composé d'argile et de sable (ou de loam pour le bassin Castor) et se classent dans les sols mal drainés et imparfaitement drainés (annexe D). L'annexe E représente les contours détaillés des cinq bassins, leur occupation de sol de référence et leur superficie.

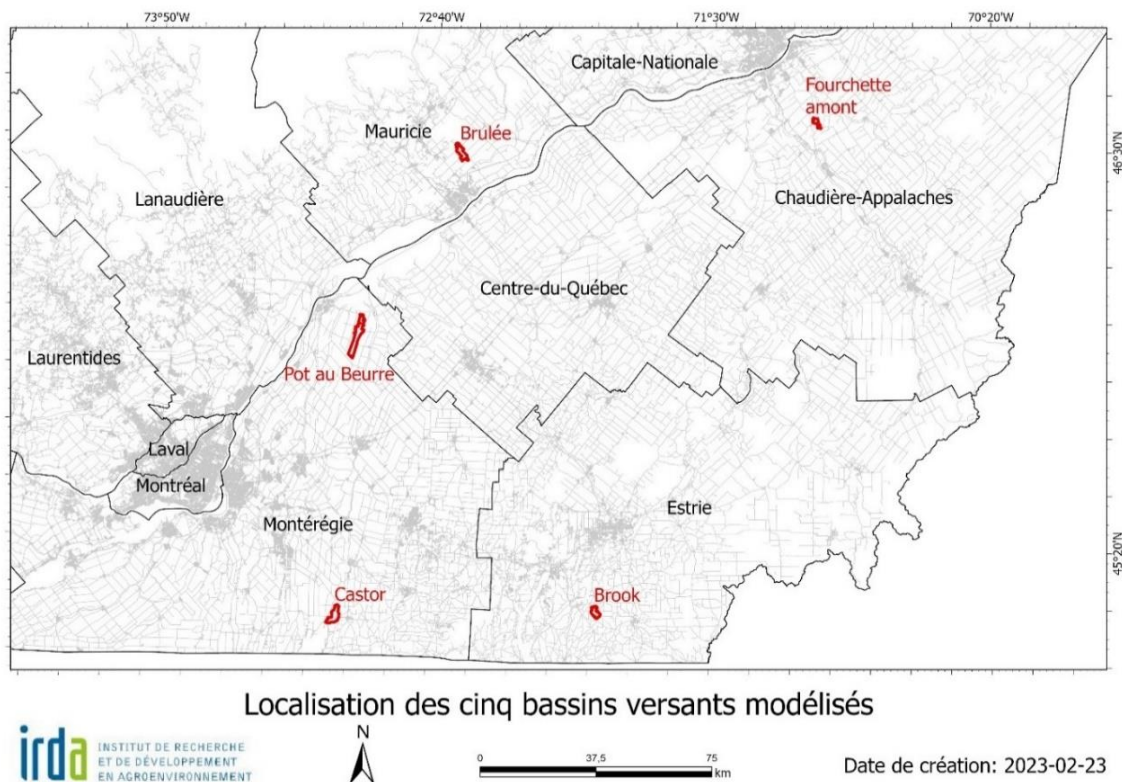


Figure 36. Localisation des cinq bassins versants modélisés.

4.3.3 Mise en œuvre des modèles

La mise en œuvre des cinq modèles a bénéficié des données structurées sous forme de géodatabases harmonisées. Dans un premier temps, les cinq bassins versants ont été délimités avec précision dans ArcSWAT sur la base du relief à partir du MNT de 1 mètre de résolution corrigé pour les ponts et ponceaux. Les exutoires des bassins ont été placés soit aux stations de mesures hydrométriques et de qualité de l'eau, soit un peu plus en aval à la confluence du prochain cours d'eau. À cette étape, le découpage des sous-bassins est aussi effectué à partir du relief, du réseau hydrométrique et un seuil de drainage et de densification de ce réseau. Les seuils par défaut proposés par le module de délimitation d'ArcSWAT ont procuré des découpages satisfaisants et n'ont pas été modifiés. La superposition des couches pédologiques et d'utilisation du sol au MNT a ensuite, toujours à partir du module ArcSWAT, permis de créer les Unités de Réponse Hydrologique (URH), unité à la base de tout calcul du modèle hydrologique SWAT. Les URHs sont des représentations d'une combinaison d'un type de sol, d'utilisation du sol et de classes de pentes moyennées pour lesquelles un type de gestion des opérations agricoles peut ensuite être attribué. Les classes de pentes utilisées pour chaque bassin peuvent être consultées au Tableau 14.

Tableau 14. Classes de pente (%) et superficies couvertes par ces classes pour chaque bassin.

Castor	Brook*	Brulée	Pot-au-Beurre	Fourchette
0-5 (1 001 ha)	0-3 (111 ha)	0-3 (277 ha)	0-3 (1 518 ha)	0-3 (205 ha)
5-15 (206 ha)	3-8 (313 ha)	3-8 (433 ha)	3-8 (631 ha)	3-8 (136 ha)
15 + (30 ha)	8-15 (175 ha)	8 + (243 ha)	8-15 (44 ha)	8 + (32 ha)
	15 + (86 ha)		15 + (52 ha)	

* Bassin abandonné.

Les classes de pentes ont été déterminées à partir de la carte des pentes dérivées du MNT selon l'histogramme de répartition des pixels. Trois ou quatre classes de pentes ont été choisies en fonction des cassures naturelles de l'histogramme (*natural break*). Finalement, afin de ne pas surcharger le modèle et de réduire les besoins en puissance de calcul, les plus petits URHs de surface (en proportion minimale par rapport à la surface de leurs sous-bassins) ont été agrégés aux autres URHs les plus proches à partir de seuils de détection. Un seuil de 3/5/3 a été choisi: les polygones d'occupation de sol inférieur à 3 % de la surface du sous-bassin sont agrégés à un autre polygone d'occupation du bassin, 5 % pour les polygones de sol et 3 % pour les polygones de classe de pentes. Le Tableau 15 présente les résultats des découpages de chaque bassin.

Tableau 15. Découpage des bassins en sous-bassins et Unités de Réponses Hydrologiques (URHs).

	Castor	Brook	Brulée	Pot-au-Beurre	Fourchette
Aire du bassin	1 237 ha	685 ha	953 ha	2 245 ha	374 ha
Seuils: Occupation/sol/pente	3/5/3	3/5/5	3/5/5	3/5/5	3/5/5
Nbre de sous bassins	16	7	7	12	10
Nbre de URH	358	177	184	577	247

Chaque combinaison URH est unique dans un sous-bassin donné et semi-distribuée spatialement. Une URH peut être en effet représentée spatialement par une multitude de petits polygones distinctement répartis dans le sous-bassin, mais elle est considérée dans le modèle comme une entité de calcul global partageant les mêmes caractéristiques. Les limites de cette mise en place inhérente au modèle résident dans la difficulté par la suite à simuler des changements ou des opérations agricoles différentes sur ces polygones.

4.3.4 Paramétrisation

Pédologie

Le paramétrage des sols se fait en joignant la carte de la Couverture pédologique québécoise (2022) à la table de données des propriétés physico-chimiques des sols de SWAT. Cette table appelée '*usersoil*' est montée à partir de trois sources de données pédologiques québécoises, soit la Base de Données Hydropédologiques du Québec de l'IRDA (BDHP, 2021) pour la première couche de sol, la table des propriétés Physico-Chimiques par couche de sol (PPC_parCoucheSol_1990) de l'*Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* de Tabi et ses collaborateurs (1990) pour les données manquantes de la BDHP et les couches de sol plus profondes, et finalement la table de couche sol SLT (*Soil Layer Table*) de la Base Nationale de Données sur les Sols (BNDS) d'AAC (Leblanc et Gagné, 2016). Les dernières données manquantes ont été complétées grâce à des fonctions de transfert pédologique (annexe F). Le Tableau 16 décrit ces paramètres compilés dans la table '*usersoil*' et nécessaires à SWAT pour simuler l'écoulement de l'eau dans le sol, et ainsi alimenter la base des calculs des écoulements de surface (ruissellement) et souterrain et des calculs de la recharge de la nappe. Il s'agit des paramètres importants afin de reproduire le cycle hydrologique d'un bassin dans SWAT. Si un polygone de sol est constitué de plusieurs types de sol, seules les propriétés du sol prépondérant sont considérées dans le modèle. Les données récentes produites dans le cadre de l'EESSAQ n'ont pu être utilisées, ces dernières n'étant pas disponibles au moment de produire le paramétrage des sols.

Chimie du sol

Les teneurs initiales en phosphore des sols peuvent être entrées dans le fichier de paramètre .chm. Par manque de données, ce fichier est maintenu avec les valeurs de SWAT par défaut. Ces données sont reliées à la saturation du sol et par conséquent aux exportations de phosphore total. Les deux années supplémentaires de simulations avant la période de calage et d'optimisation permettent au modèle d'équilibrer les réservoirs de nutriments entre les apports et les exportations. Cet équilibrage pallie en partie au manque de données de saturation ou de teneur des sols en P.

Occupation du sol

L'occupation du sol est la répartition des cultures, des forêts et des autres utilisations du territoire dans les bassins. Le paramétrage de l'occupation des sols dans SWAT consiste donc à joindre la carte d'occupation du territoire produite pour les géodatabases harmonisées avec la base de données des propriétés physico-chimiques des plantes de SWAT. À la différence de la table des sols, les propriétés des plantes mais aussi des surfaces anthropiques (urbanisées) sont déjà colligées par défaut dans SWAT. La carte d'occupation du sol est quant à elle créée à partir d'une fusion des couches géospatiales suivantes, à partir d'un logiciel SIG (Arcmap 10.4):

- La Base de Données des Parcelles et Productions Agricoles du Québec (BDPPAD, FAQ, 2010)
- Les couches des milieux humides (Canards Illimités, 2020)
- Le réseau hydrologique surfacique du Québec (GRHQ, 2016), incluant les plans d'eau.
- Le réseau routier sur lequel une zone tampon de trois (3) mètres a été créée (MNRF, 2018)

- La couche écoforestière (MFFP, 2020)

La couche est rastérisée et chaque pixel est associé à une classe d'occupation du sol correspondant à la base de données des plantes SWAT.

Tableau 16. Paramètres des propriétés physico-chimiques importantes pour les sols¹.

Paramètre	Description	Sources des données utilisées et listées par ordre de priorité
SOL_ZMX (mm)	Profondeur d'enracinement maximal du profil du sol	SLT, 2016
SOL_Z (m)	Profondeur de la surface du sol au bas de la couche	SLT, 2016
SOL_BD (mg/m ³)	Densité apparente	BDHP, 2022 et PPC_par couche, 1990
SOL_AWC	Capacité en eau disponible ou réserve en eau utile	BDHP, 2022 et SLT, 2016
SOL_K (mm/h)	Conductivité hydraulique saturée	BDHP, 2022 et PPC_par couche, 1990
SOL_CBN (% du poids total)	Teneur en carbone organique	BDHP, 2022 et PPC_par couche, 1990
SOL_CLAY, SOL_SILT, SOL_SAND, SOL_ROCK (%)	Teneur en argile, limon et sable, et en fragments rocheux	BDHP, 2022 et PPC_par couche, 1990 (et SLT,2016 pour les fragments)
SOL_ALB	Albédo du sol humide	BDHP, 2022 et SLT, 2016
USLE_K	Facteur d'érodabilité du sol	BDHP, 2022 et SLT, 2016
HYDGRP	Groupe hydrologique	BDHP, 2022

¹ La liste des paramètres du tableau doit être documentée pour chaque couche de sol pouvant, dans cette étude, aller jusqu'à 4 couches.

Fertilisation

La fertilisation est un aspect important de la modélisation SWAT. Elle entre dans le calcul des rendements des cultures (avec évaluation des stress nutritifs) et est un intrant aux différents réservoirs de phosphore et de nitrates du sol en lien avec la simulation des exportations des nutriments vers les plans d'eau. Afin d'appliquer les quantités de fertilisation les plus justes sur les parcelles, les données des bilans de P de l'année 2016 obtenues auprès du MELCCFP (2021) ont été distribuées spatialement à partir des centroïdes des entreprises agricoles des bassins en utilisant la méthode de Michaud et al. (2022). Ces données sont extraites des déclarations obligatoires des exploitants de lieux d'élevage et d'épandage du Règlement sur les Exploitations Agricoles du MELCCFP. Brièvement, un rayon d'impact calculé à partir de la superficie d'épandage du lieu d'élevage est appliqué aux centroïdes des entreprises. Les entreprises voisines situées dans un rayon de 5 kilomètres autour du bassin sont aussi considérées. Les rayons produits sont ensuite superposés à la carte d'occupation du sol. Chaque parcelle agricole intersectant le rayon ayant le taux d'apport le plus élevé se voit attribuer les charges de P minérales et organiques du centroïde. Les quantités de N organique sont ensuite déterminées à partir du ratio P/N de matière organique propre au type d'élevage prédominant dans chaque bassin (Tableau 17 et Tableau 18). Ces ratios ont été calculés à partir des valeurs de références pour les volumes et les concentrations d'éléments fertilisants dans les effluents d'élevage (CRAAQ, 2020). Les apports en N minéral ont ensuite été appliqués en fonction des besoins des cultures (Tableau 19).

Tableau 17. Ratio P/N des matières fertilisantes animales par catégorie d'élevage.

Matière fertilisante	N (kg/ha)	P2O5 (kg/ha)	Ratio N/P
Lisier de porc	3,38	2,1	1,65
Laitier solide	5,7	3,6	1,58
Laitier liquide	3,1	1,5	2,07
Bovin	5,18	2,85	1,79

Ces ratios sont obtenus en moyennant les ratios des animaux de chaque catégorie. Ainsi, le lisier de porc tient compte des ratios pour les truies, porcelets, porcs, et cochettes; pour le laitier, les valeurs tiennent compte des matières fertilisante des taureaux, vaches, génisses et taures et pour la catégorie des bovins, 16 différents types d'animaux allant du veau de grain au taureau sont considérés. Le Tableau 18 présente les ratios utilisés pour chaque bassin, soit la moyenne des ratios des élevages prédominants dans les bassins rapportés dans les rapports de l'Observatoire sur la qualité de l'eau de l'IRDA et du MAPAQ (Michaud et al., 2016).

Tableau 18. Ratios N/P utilisés pour déterminer les apports en N en fonction des élevages prépondérants.

Bassin	Élevage prépondérant	Ratio utilisé
Castor	Porc, Laitier, Bovin	1,77
Brook*	Laitier	1,58
Brulée	Bovin et laitier	1,81
Pot-au-Beurre	Laitier et Porc	1,77
Fourchette	Porc, Laitier, Bovin	1,77

* Bassin abandonné.

Tableau 19. Besoins en N pour les grandes cultures simulés dans les cinq bassins.

Cultures	Apport en N (kg/ha)	Source
Maïs	180	Tremblay, G., 2020
Soya	0	Robert, L., 2010
Blé	80-130	Zebarth et al., 2007
Orge	70	Zebarth et al., 2007
Avoine	50	Zebarth et al., 2007
Pois	15	C. Landry et al., 2021a
Haricots	30	C. Landry et al., 2021b

Météo

SWAT attribue à chaque sous-bassin les précipitations et températures minimales et maximales journalières de la station météorologique la plus proche. Les données journalières des grilles des jeux de données CaPA pour les précipitations (Mai et al., 2020) et du MELCCFP pour les températures (MELCCFP, 2020) sont entrées dans le module météorologique de ArcSWAT (section 4.2). Chaque point de grille (centroïde de la grille de 10 km x 10 km) est considéré comme une station météorologique.

4.3.5 Scénarisation

La scénarisation permet d’attribuer à chaque URH un type de gestion des opérations agricoles. Pour la période de calage ou de référence, il est important que le scénario représente au mieux les pratiques agricoles du bassin, afin de reproduire le plus justement les bilans hydriques, l’évolution de la biomasse, les pertes de sols et la mobilité des nutriments. Une fois le modèle optimisé et les processus hydrologiques et agronomiques validés et raffinés aux conditions de chaque bassin, des scénarios alternatifs peuvent être simulés et comparés au scénario de référence. Un scénario de référence a donc été bâti et modulé pour les cinq bassins en fonction de leurs spécificités. Puis les cinq scénarios résultants ont été améliorés avec l’aide du comité aviseur du projet pour constituer les scénarios alternatifs. Dans un processus de scénarisation, la description des pratiques agricoles s’appuie sur la documentation disponible et l’évaluation d’acteurs ayant une connaissance des réalités locales. Il est donc possible que cette description soit plus ou moins représentative des pratiques réellement mis en œuvre par les producteurs à un moment précis. L’analyse des scénarios doit donc être nuancée en tenant compte de ces limitations, mais aussi de la confiance attribuée aux processus simulés par le modèle hydrologique (bilan hydrique, chronologie des évènements, etc.).

Scénario de référence

Les modèles des cinq bassins à l'étude sont optimisés sur les périodes 2010-2015, à l'exception du bassin Castor (2007-2013). Ces périodes sont choisies car cinq années consécutives en données hydrométriques pour les débits et la séparation de l'hydrogramme sont disponibles en plus des données de qualité de l'eau. Les superficies en forêt, usage agricole, milieux humides et zones urbaines sont considérées stables dans les cinq bassins étudiés pour ces périodes. On dénote quelques changements dans les superficies de culture sur les parcelles agricoles entre 2007-2013 pour le Castor et entre 2010-2015 pour les autres bassins (annexe G). Cependant, ces changements restent mineurs pour justifier une analyse plus poussée permettant d'implémenter des changements annuels d'utilisation du sol dans les scénarios de référence à l'optimisation. Le type et l'emplacement des cultures pour les scénarios de référence demeurent donc statiques et se réfèrent à la première année d'optimisation. Les pratiques agricoles sont quant à elles modulées lorsque possible selon :

- la quantité et le type de fertilisation (voir paramétrisation fertilisation);
- les dates d'opération en fonction des conditions météorologiques spécifiques à chaque année;
- le type de travail du sol;
- le nombre et type de récolte;
- les mesures de protection du sol et d'atténuation du ruissellement.

Les dates d'opération (annexe H) sont déterminées de façon cohérente selon les connaissances d'agronomes au sein de l'IRDA et les informations dans les rapports bimensuels sur l'État des cultures au Québec de la Financière Agricole du Québec (FADQ, 2007-2015). Les trois autres paramètres que sont le travail du sol, les récoltes et les mesures de protection du sol et d'atténuation du ruissellement sont aussi déterminés selon les connaissances d'agronomes de l'IRDA en fonction des pratiques connues et de projets antérieurs des observatoires hydroagricoles (Deslandes et al., 2007 ; Michaud et al., 2006 ; Michaud et al., 2012 a,b ; Michaud et al., 2014 a,b ; Michaud et al., 2016 ; Michaud et al., 2017).

Foin

Trois coupes de foin sont simulées à la mi-juin, en juillet ou en août et à la mi-septembre ou début octobre selon les informations indiquées dans les rapports sur l'État des cultures. Les prairies sont fertilisées par apports de fumier deux fois pendant la saison de croissance soit une fois après la première coupe, et une fois après la dernière coupe. Les quantités de fumier appliquées sont divisées également à chaque application. Le fumier n'est pas enfoui, la prairie reste en place l'hiver.

Maraîcher (Pois, Haricots, Concombres, etc.)

Il y a relativement peu de maraîcher dans les bassins modélisés à la première année de référence 2007 ou 2010. Seul le bassin Pot-au-beurre montre des superficies en concombres, cornichons, brocoli, choux, pois et haricots ($\leq 1,5$ % des superficies agricoles). Ces cultures sont généralement plantées début juin, récolté mi-août, et fertilisées selon les fiches de fertilisation de l'IRDA (Landry et al., 2021). Le travail du sol est en régime de conservation.

Grandes cultures (Soya, Céréales (orge, avoine, blé de printemps), Maïs grain, Maïs ensilage)

L'entrée au champ se fait au plus tôt à la troisième semaine d'avril avec les opérations d'épandage et de travail du sol. Il y a enfouissement dans les 48 heures après l'épandage selon le travail du sol et les conditions d'humidité indiquées dans les rapports sur l'État des cultures de la FADQ. Le sol peut être travaillé en système conventionnel, de conservation ou sans travail de sol sur les parcelles en culture.

Le régime de travail de sol conventionnel correspond à un hersage au printemps et un labour d'automne profond à la charrue. Un régime de conservation correspond à un travail réduit du sol regroupant toute une série d'outils de travail. Dans le cadre de ce projet, le travail réduit est représenté par un travail moins profond et avec une efficacité de mixage de la surface du sol moindre. Le CPVQ (2001) préconise de préparer le sol à l'automne avec un passage de chisel ou pulvérisateur à disque lourd et d'un ou deux passages de cultivateurs à dents rigides ou d'une herse à disque. Le passage d'automne s'applique particulièrement aux sols lourds (groupe hydrologique C et D de la BDHP) pour ameublir la première arable. Selon les rapports des Observatoires sur la qualité de l'eau de l'IRDA et du MAPAQ (Michaud et al., 2016), le sol n'est pas travaillé à l'automne en régime de conservation dans le bassin Fourchette et aucun travail secondaire au printemps n'est effectué en régime conventionnel. Le semis direct est quant à lui simulé par le passage du semoir dont l'effet de perturbation du sol se fait sur 25 mm avec un coefficient de retournement de 5 %. Le Tableau 21 détaille les caractéristiques des outils utilisés dans SWAT pour les travaux de sol, la profondeur de ces travaux, leur effet de retournement et le pourcentage de résidus laissé sur le sol après chaque passage. Notez que le bassin Castor a deux scénarios de référence pour les travaux de sol. En effet, l'optimisation a été effectuée avec les données issues de projet connu à l'IRDA datant des années 2000 (Tableau 20, en noir à partir de Michaud et al., 2004 et de Beaudin et al., 2006). Par manque de mise à jour sur ce bassin, un second scénario (Tableau 20, en gris) a été conçu à partir des données du bassin Pot-au-Beurre. Ce dernier scénario n'a cependant pas été utilisé pour l'optimisation du modèle, mais est utilisé à titre informatif et de comparaison supplémentaire.

Tableau 20. Proportion des régimes de travail de sol appliquée dans chaque bassin par rapport au % de sol travaillé (prairies exclues).

Type de travail de sol	Castor (Montérégie)	Brook* (Estrie)	Brulée (Mauricie)	Pot-au-Beurre (Centre-du-Québec /Montérégie)	Fourchette (Chaudière-Appalaches)
Conventionnel	88 % / 17 %	0 %	18 %	17 %	54 %
Conservation	4 % / 69 %	99 %	54 %	69 %	46 %
Semis direct	7 % / 14 %	1 %	28 %	14 %	0 %

* Bassin abandonné (voir section analyses hydrologiques).

Tableau 21. Spécificité des travaux de sol implémentés dans SWAT.

Type de travail	Nom du travail	Machinerie et code SWAT	Période d'application	Profondeur du travail (mm)	Effet de retournement (%)	Résidus laissés en surface
Conventionnel	Hersage	Cultivateur – field cultivator Ge15ft (#6)	Printemps	100	0,3	70 %
Sol Groupe A, B, C et D	Labour	Charrue à disque Ge23ft (#63)	Automne	250	0,95	5%
Travail réduit	Hersage	Cultivateur/herse à disque	Printemps	75	0,25	75 %
Sols A et B, puis C		Plow Gt15ft (#101)				
		Chisel – Pulverisateur ChPlgt (#57)	Automne	150	0,3	60-70%
Semis direct	∅	Zero till (#4)	Printemps	25	0,05	95 %
Sol A et B, puis C						

Les coefficients de Manning (OV_n) et les numéros de courbe SCS (CN) ont été adaptés aux différents régimes de travail du sol, tel que suggéré dans le manuel de SWAT (Arnold et al., 2011) afin : 1) de reproduire la rugosité du sol induite par les travaux de sol et les résidus; 2) de diminuer et ralentir le ruissellement de surface; 3) et de favoriser l'infiltration de l'eau. Ainsi pour chaque URH en travail réduit ou en pratiques de conservation, les CNs sont réduits d'une unité et les OV_n augmentent de 0,14 à 0,16. Pour chaque URH en semis-direct, les CNs sont diminués de deux unités et les OV_n augmentent de 0,14 à 0,2. Pour chaque URH en régime conventionnel, les OV_n diminuent de 0,14 à 0,09.

Les apports de fumier sont appliqués selon les quantités calculées à partir des bilans de P (section Fertilisation - Paramétrisation). Le soya n'est pas fertilisé (sauf sur le bassin Castor). Du phosphore minéral est appliqué au semis comme engrais de démarrage sur le maïs. De l'azote minéral est appliqué en complément à l'application de fumier de printemps et au stade V6 du maïs ou au tallage des céréales en post-levée. Les apports de fumier pour le maïs grain sont également répartis sur deux périodes, en pré-semis et à la levée, tel que discuté en comité avisé. Il en est de même pour les céréales dont la distribution des apports fertilisants se fait au pré-semis et en post-récolte. Pour le maïs ensilage, les quantités sont réparties entre la période de pré-semis (45 % des apports annuels), celle de la levée (40 % des apports) et celle en post-récolte (15 % des apports). Le maïs grain et le soya du premier scénario du bassin Castor, seulement, sont fertilisés en trois périodes : pré-semis, stade V6 et post-récolte, dans des proportions à 45 %, 40 % et 15 % respectivement des apports annuels. En régime de conservation, les apports sont cependant fragmentés en deux périodes distribuées également. Il n'y a, en effet, pas d'apport de fumier en travail réduit à l'automne pour éviter les épandages sans enfouissement et créer des pertes de nutriments en cas de pluie (effet antagoniste de bonnes pratiques). Cette précaution est uniquement appliquée sur la première version/scénario du Castor (ref. Travail du sol). Le Tableau 22 résume les périodes d'épandage en fonction des cultures et des pratiques, tel qu'observé dans les déclarations des fiches d'enregistrement des exploitations agricoles (Beaudin et al., 2006).

Tableau 22. Application de la fertilisation (en % des apports annuels).

Type d'occupation du sol	Printemps fumier (Après la première coupe pour le fumier)	Azote minéral de démarrage	P minéral de démarrage	Fumier post levé	Azote complément	Fumier automne (trv. conventionnel) (Après la seconde coupe pour fumier)
Pâturage	Déjection troupeau en continue					
Foin	50%	-	-	-	-	50%
Céréales	50%	-	100%	-	-	50%
Maïs Conventionnel	50%	50%	100%	50%	50%	-
Maïs réduit	50%	50%	100%	50%	50%	-
Soya	-	-	100%	-	-	-
Maraîchage, Maïs ensilage, Maïs sucré	-	50%	100%	-	50%	-

Après les dernières périodes de gel, les semis de céréales se font plus tôt que dans les autres cultures, puis c'est au tour du maïs et du soya. Les récoltes commencent avec les céréales à la fin août, la dernière coupe de foin se fait ensuite et les récoltes de maïs ensilage (avant le gel), de soya et maïs grain sont respectivement enclenchées. Les opérations se terminent avec l'épandage et le labour d'automne (si appliqué aux pratiques) mi-fin novembre pour les récoltes tardives.

Pâturage (relativement faible superficie)

Il y a peu d'information sur les pâturages et leurs superficies sont relativement faibles et donc avec un impact moindre. Le scénario est donc constitué sur des hypothèses généralisées. Seuls les troupeaux de génisses ou vaches laitières sont considérés et modélisés. Les troupeaux doivent sortir assez rapidement au printemps après la fonte des neiges, on assume une sortie en mai sur 10 % du rendement moyen annuel, valeur tirée du rapport sur les rendements de référence en assurance récolte de l'année par la FADQ. Les quantités de foin broutées et de déjections en kg/ha sont déterminées à partir des Guides du CRAAQ sur *Les valeurs références pour les volumes et les concentrations d'éléments fertilisants dans les effluents d'élevage*, ainsi que sur l'estimation de la consommation volontaire de matière sèche des vaches et génisses. SWAT requiert la date de sortie du troupeau, la quantité et le type de déjections (fonction du type d'animal), le nombre de jours au champ, la quantité d'herbe broutée et la quantité minimum de foin qui doit couvrir le sol en tout temps.

Inconnu/non assuré

Les superficies inconnues oscillent entre 20 et 200 ha selon l'année. Dans SWAT, il leur est attribué T le code grand culture en ligne, mais sont traitées comme du maïs grain ou du foin selon la région.

Terre agricole générique

Les terres agricoles génériques sont des superficies agricoles provenant de la couche écoforestière qui ne recoupent pas avec les parcelles déclarées de la BDPPAD. Une analyse visuelle par bassin a permis de déterminer que ces superficies constituaient généralement les aires autour des fermes, des boisés en terre agricole, des aires laissées à l'abandon ou des fossés. Elles sont simulées dans SWAT soit en résidentiel, soit en gazon coupé chaque mois d'été, soit en aires couvertes de graminées ou de broussailles selon le bassin et l'analyse visuelle effectuée.

Forêt mixte

Seule la tombée des feuilles est simulée par avec une opération de récolte (ou coupe) et en laissant les feuilles sur le sol (comme des résidus).

Urbain résidentiel

Seul le bassin Fourchette a quelques URHs considérés comme étant du résidentiel lors de la mise-en-œuvre du modèle par SWAT. Les valeurs par défaut de SWAT sont utilisées pour reproduire des surfaces imperméabilisées. La quantité et la qualité de l'eau de ruissellement sont estimées en utilisant les mécanismes d'accumulation et de lessivage intégrés à SWAT et similaires au modèle de gestion des eaux pluviales d'Huber et Dickinson (1988).

Scénarios alternatifs

Les scénarios alternatifs visent à améliorer les paramètres du scénario de référence. Trois interventions ont principalement été ciblées, soit 1) l'évolution des superficies en culture de couverture, 2) l'évolution des superficies des grandes cultures maïs, céréales, prairies, et 3) l'évolution des superficies travaillées en semis-direct, en régime de conservation ou en régime conventionnel. Les apports en fertilisants restent identiques mais les modes de fractionnement et d'enfouissement sont adaptés en cohérence avec les améliorations ou dégradations apportées. Des rotations de cultures intégrant les cultures de couverture d'hiver et le labour des prairies à l'automne sont aussi considérées dans ces scénarios. Les occupations de sol en forêt, résidentiel et milieux humides demeurent les mêmes. L'annexe I résume les spécificités des scénarios dégradés et améliorés pour les bassins Castor et Pot-au-Beurre. Les scénarios pour les autres bassins n'ont pu être implémentés dans le modèle SWAT.

4.3.6 Mise en place des 12 micro-bassins de Saint-Lambert-de-Lauzon

Le modèle hydrologique SWAT a été mis en place pour les 12 micro-bassins instrumentés de la ferme expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon. Les étapes de mise en œuvre du modèle sur ces bassins sont similaires à celles décrites aux sections précédentes pour les cinq bassins. Le MNT, pour la délimitation des bassins, est issu d'un relevé des élévations par GPS fait par l'IRDA à l'automne 2022. Le relevé a été pris avec une résolution moyenne de 0,5 mètres. Les méthodes d'interpolation de krigeage, d'Inverse Weighted Distance (IDW), du voisin le plus proche (Natural Neighbors) et topo-to-raster ont été testées pour créer le MNT (annexe J). L'interpolation avec la méthode des plus proches voisins produisait de meilleurs résultats quant à la délimitation du premier bassin test. C'est donc cette méthode qui a été retenue pour la délimitation des onze bassins restants et de leur URHs. La couverture pédologique indiquait qu'un seul type de sol couvrait les micro-bassins, soit la série Le Bras (loam). Les résultats des découpages des bassins peuvent être consultés à l'annexe K.

La scénarisation des bassins pour l'optimisation des modèles suit les opérations effectuées à la ferme et colligées dans le journal terrain du projet. Pour rappel, six bassins sont cultivés selon un régime de conservation, tandis que les six autres sont cultivés sous un régime conventionnel. Pour chaque régime, trois champs sur six reçoivent additionnellement un traitement de compaction. En 2020, c'est une prairie labourée à l'automne qui est implémentée sur tous les micro-bassins, avec l'ajout de blé d'automne (avec sa propre régie de fertilisation) sur les six bassins en conservation. Grâce aux données précises colligées dans les journaux terrain et le nombre limité de URHs sur chaque micro-bassin, il est ensuite possible de moduler les opérations sur chaque URHs pour chaque année du projet. Le Tableau 23 résume les opérations implantées entre 2020 et 2022 pour l'optimisation des modèles.

Tableau 23. Paramétrisation et scénarisation des 12 micro-bassin pour l'optimisation des modèle SWAT.

Année	Conservation (Bassins: 3, 5, 6, 7, 8, 10)	Conventionnel (Bassins: 1, 2, 4, 9, 11, 12)
2020	<ul style="list-style-type: none"> - Labour prairies sans résidu - Travail de sol primaire + secondaire automnale - Fertilisation: P minéral (30kg/ha) - Semis du blé d'automne 	<ul style="list-style-type: none"> - Labour des prairies sans résidu - Travail de sol primaire automnal + sol nu en hiver
2021	<ul style="list-style-type: none"> - Travail léger printanier - Fertilisation N minéral (110 kg/ha) - Récolte du grain (blé) - Fauche et récolte du foin (blé) - Semis du trèfle intercalaire* - Fauche engrais vert 	<ul style="list-style-type: none"> - Travail de sol secondaire printanier - Semis de Soya - Récolte - Travail de sol primaire automnal
2022	<ul style="list-style-type: none"> - Récolte et fin du trèfle intercalaire (arrachage)** - Travail secondaire printanier - Semis du maïs - Fertilisation N (50 kg/ha) et P (70 kg/ha) minéral au semis - Fertilisation N (120 kg/ha) minéral stade v6 - Récolte 	<ul style="list-style-type: none"> - Travail de sol secondaire printanier - Semis du maïs - Fertilisation N (50 kg/ha) et P (70 kg/ha) minéral au semi - Fertilisation N (120 kg/ha) minéral stade v6 - Récolte

* : L'engrais vert doit être implanté au printemps et pousser en même temps que la culture principale, mais il est techniquement impossible dans SWAT de cultiver deux variétés simultanément. Il a donc été choisi de les cultiver l'une après l'autre afin de pouvoir avoir une couverture d'hiver sur le sol. Cependant, afin de représenter au mieux ce qu'il se passait dans les champs, les paramètres CN et OV_n ont été adaptés dès le début de la saison de croissance pour 1) faciliter l'infiltration de l'eau dans le sol et diminuer le ruissellement (CN) que la couverture de surface amènerait par l'engrais vert et 2) représenter la rugosité du terrain augmentée par cette même couverture et diminuer/ralentir le ruissellement (OV_n). De plus, pour compenser au développement tardif de l'engrais vert puisque implanté en fin de saison, c'est une transplantation d'engrais mature qui a été simulé plus tôt qu'un semis, ceci afin d'avoir une couverture hivernal suffisante pour protéger le sol.

** : De façon similaire, l'engrais vert a dû être enlevé pour implanter la culture principale de maïs. Les paramètres CN et OV_n ont cependant été diminués tel qu'expliqué ci-dessus (*) afin de représenter l'effet de la couverture intercalaire qu'aurait amené l'engrais vert soit une augmentation de la rugosité de surface et une diminution ou un ralentissement du ruissellement favorisant une meilleure infiltration de l'eau, et une réduction de l'érosion et des pertes de P particulière.

4.3.7 Optimisation

L'optimisation d'un modèle hydrologique permet de réduire les incertitudes provenant des écarts entre les observations du terrain (débits et qualité de l'eau mesurés) et les représentations simulées par le modèle (ou sorties du modèle). Par cet exercice, on s'assure que le modèle reproduit de façon adéquate à la fois les processus hydrologiques des bassins mais aussi les quantités d'eau, de sédiments ou de nutriments exportés, et ce, sur différentes échelles de temps. Pour ce faire, un ensemble de paramètres de calage (annexe L), indépendants des paramètres de paramétrisation détaillés dans les sections précédentes, sont testés sur des plages de valeurs physiquement réalistes afin de contraindre les équations constituant le modèle aux réalités biogéographiques connues des bassins versants. Une fois le modèle optimisé sur une période de temps déterminée (la période de calage), l'ensemble des paramètres donnant le meilleur résultat constitue la *solution* au modèle. La solution de chaque bassin est ensuite fixée et vérifiée sur une période de temps indépendante pour valider l'ensemble des paramètres.

L'annexe M illustre les périodes de données hydrologiques disponibles des bassins à l'étude. La période 2010-2015 a été choisie pour le calage du modèle car disponible pour quatre bassins. Seul le bassin Castor est calé sur les années 2007-2013. Deux années d'entraînement précédent la période de calage sont aussi utilisées pour la mise en route du modèle (2004-2006 pour Castor et 2008-2009 pour les autres bassins). Les périodes 2004-2006 (pour les bassins Fourchette, Pot-au-Beurre et Brook), ainsi que 2019-2021 (pour le Castor) sont quant à elles utilisées pour la validation (Figure 37). La disponibilité de la séparation des hydrogrammes en écoulement souterrain et écoulement de surface grâce aux mesures de conductivités (Michaud et al., 2009 ; Michaud et al., 2012b) marque le choix de ces périodes.

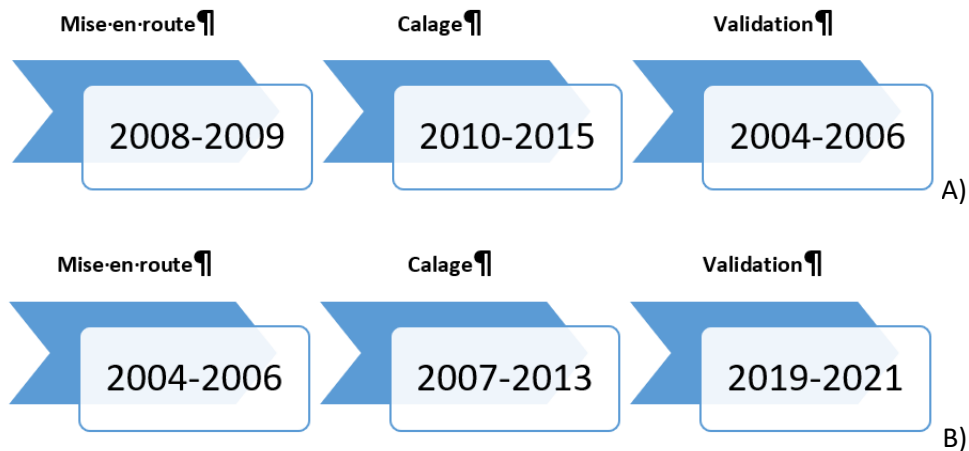


Figure 37. Périodes de mise en route, calage et validation pour les bassins A) Brulée, Brook, Pot-au-Beurre, et Fourchette et B) Castor.

Dans un premier temps, les bilans hydrologiques annuels sont vérifiés afin d'assurer une bonne répartition de l'eau à travers le cycle annuel. Plus spécifiquement, nous avons veillé à ce que les bilans de chaque bassin ferment et soient complets (pas de perte d'eau incohérente) et que la répartition entre l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'écoulement souterrain et les pertes par transmission dans l'aquifère profond correspondent à des valeurs moyennes connues pour la province ou mesurées sur les bassins (écoulement souterrain vs ruissellement de surface). Les résultats de la fermeture des bilans hydrologiques annuels peuvent être consultés en annexe N. Dans un second temps, les hydrogrammes journaliers simulés sont ajustés automatiquement aux hydrogrammes issus des observations à l'aide de l'algorithme Shuffle Complex Evolution (SCE) (Duan et al., 1993). L'algorithme SCE fait varier les paramètres de calage dans une fenêtre de valeurs plausibles propre à chacun des paramètres et assemble des jeux de valeurs pour trouver la *solution qui reproduit* le meilleur hydrogramme. Le nombre d'itérations ou de simulations pour tester les ensembles de valeurs ou solutions potentielles a été fixé à 4000 itérations, bien que la solution finale puisse être trouvée avant la fin des tests. La solution retenue est celle qui minimise au mieux le critère d'efficacité KGE de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009), c'est à dire pour laquelle le critère se rapproche le plus de 1.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (2)$$

où :

- r est la corrélation linéaire entre les observations et les simulations;
- σ_{obs} est l'écart-type des observations;
- σ_{sim} l'écart-type des simulations;
- μ_{sim} la moyenne des simulations;
- μ_{obs} la moyenne des observations.

D'autres critères de performance ont été ajoutés aux résultats. Le R (coefficient de corrélation de Pearson), le NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) et la différence PBIAS (Percentage bias) (Moriasi et al., 2007) évaluent la différence relative entre les débits observés et les débits simulés.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{mean}^{obs})(Q_i^{sim} - Q_{mean}^{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{mean}^{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_{mean}^{sim})^2}} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{mean}^{obs})^2} \right], NSE \leq 1 \quad (4)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \right] \quad (5)$$

où :

Q_i^{obs} est le débit observé au jour i (mm/jour);

Q_i^{sim} est le débit simulé au jour i (mm/jour);

Q_{mean}^{obs} est le débit moyen observé sur la période de calage (mm/jour);

Q_{mean}^{sim} est le débit moyen simulé sur la période de calage (mm/jour);

n est le nombre d'observations.

Le coefficient de corrélation est utilisé pour déterminer s'il y a une relation entre les débits simulés et les débits observés. La formule renvoie une valeur comprise entre -1 et 1, où 1 indique une forte relation positive, -1 indique une forte relation négative et 0 indique l'absence de toute relation. Le critère NSE représente l'erreur quadratique normalisée en fonction du débit moyen comme prédicteur de débit. Une valeur du critère égale à 1 indique une concordance parfaite entre les débits simulés et observés, alors qu'une valeur inférieure à zéro indique que les débits simulés ont une valeur prédictive inférieure à l'utilisation du débit moyen observé. Le pourcentage de biais (PBIAS) mesure la tendance moyenne des valeurs simulées à être plus grandes ou plus petites que les valeurs observées. La valeur optimale de PBIAS est de 0, les valeurs faibles indiquant une simulation précise du modèle. Les valeurs positives indiquent un biais de sous-estimation du modèle et les valeurs négatives un biais de surestimation du modèle.

Une fois l'ajustement sommaire des bilans hydriques annuels terminé, le processus de calage des hydrogrammes journaliers se fait en deux étapes successives. La première consiste à tester et à fixer les paramètres influençant les écoulements souterrains, soit l'écoulement de base à partir de 4000 itérations (temps de simulation \leq 3jours). La fonction objective cherche donc à minimiser la différence entre les valeurs mesurées des écoulements souterrains issues de la séparation des débits en écoulement souterrain et de surface et les sorties correspondantes du modèle. Les paramètres de ruissellement et de neige sont ensuite ajustés manuellement. Puis c'est au tour du calage des sédiments (souvent corrélés au ruissellement de surface), puis du phosphore total et des nitrates d'être optimisés en lançant à nouveau 4000 itérations pour chacun. Le tableau des paramètres de calage de qualité de l'eau et l'ensemble des valeurs finales peuvent être consultés à l'annexe O. Les Figure 38, Figure 39 et Figure 40 ci-dessous illustrent les résultats de calage du bassin Castor pour le débit total et la qualité de l'eau. L'annexe P contient les résultats de simulation pour les autres bassins.

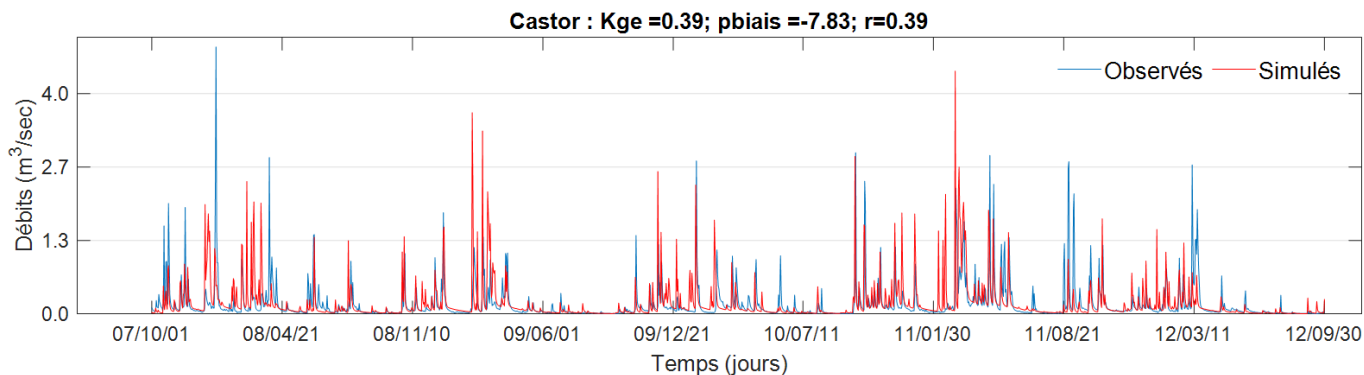


Figure 38. Résultats de calage du bassin Castor pour le débit total.

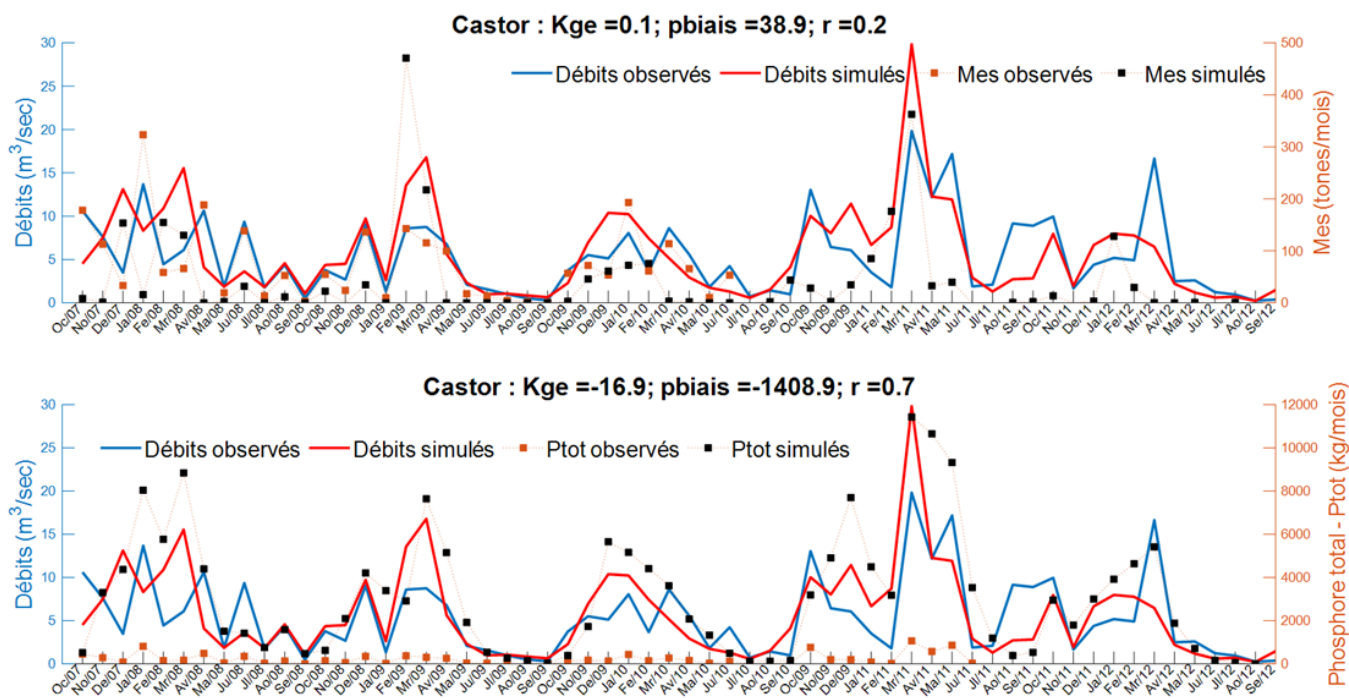


Figure 39. Résultats de calage du bassin Castor pour les MES et le Ptotal.

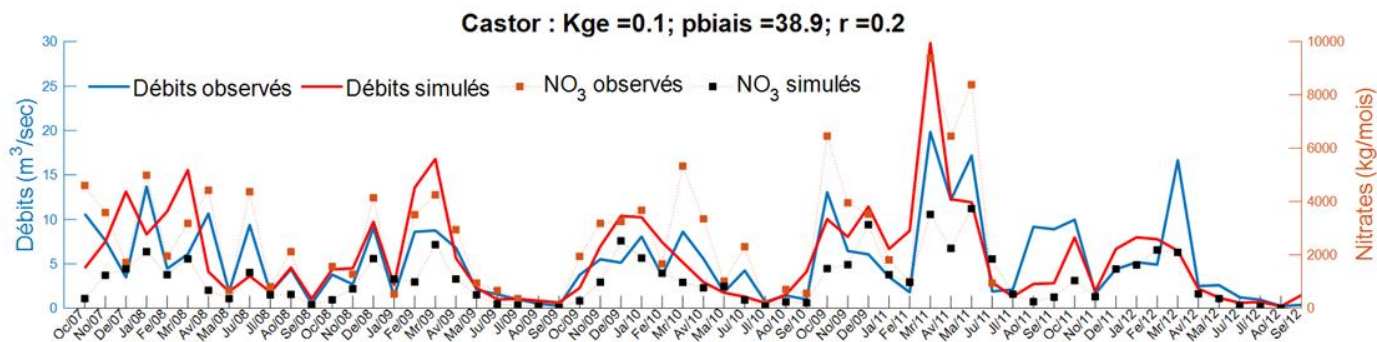


Figure 40. Résultats de calage du bassin Castor pour les Nitrates (NO₃).

L'optimisation des 12 micro-bassins s'est faite de façon similaire. Les données météorologiques proviennent cependant de la station météorologique de la ferme de Saint-Lambert-de-Lauzon. Ces données (précipitations liquides et températures) sont disponibles à partir de l'année 2020 jusqu'à aujourd'hui. La neige ne fondant pas dans les pluviomètres, les valeurs de précipitations totales de la station Scott du MELCCFP, située à 14 km, ont été substituées dans la série de données de Saint-Lambert-de-Lauzon lors des journées neigeuses. La station Beaugard, à 6 km de la ferme, a aussi permis de compléter les données lorsque ces dernières étaient manquantes pour la période de mise en route des modèles entre 2018 à 2019. Les propriétés de sol de la série LeBras ont été ajustés à partir de la mise à jour de l'inventaire de dégradation des sols du projet Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec 2017-2022 (Gasser et al., 2023).

Le calage s'est concentré dans un premier temps sur les exportations journalières des eaux de drainage, puis dans un second temps sur les eaux de ruissellement à partir des mesures décrites à la section 3.5. Le tableau des paramètres de calage peut être consulté à l'annexe Q. Quelques ajustements manuels ont aussi permis d'améliorer le bilan hydrique (annexe R). La Figure 41 compare les lames d'eau exportées totales (eau de ruissellement et de drainage) simulée à celles observées. L'annexe S détaille quant à elle les résultats spécifiques au drainage et au ruissellement de surface. Il est a priori difficile de conclure sur les forces et les faiblesses du modèle hydrologique à partir des hydrogrammes et des coefficients de performance. La Figure 42 présente les fonctions de distribution cumulative empiriques (ecdf) compilant l'ensemble des coefficients de ruissellement (ruissellement/lame d'eau total) mensuels observés et simulés sur les 12 parcelles. Cette figure permet de comprendre que le modèle hydrologique tend à sous-estimer les périodes de faible ruissellement mais à surestimer les périodes de fort ruissellement.

Les scores présentés aux Figures 41 et 42 indiquent des résultats de calibration peu performants. Les métriques utilisées, notamment KGE et R, demeurent sensibles aux amplitudes des événements simulés qui sont très difficiles à reproduire à l'échelle des petits bassins versants. Ceci laisse néanmoins supposer que les pratiques de modélisation déployées dans le cadre de ce projet sont perfectibles. L'analyse des résultats se fait en considérant les incertitudes liées au processus d'optimisation.

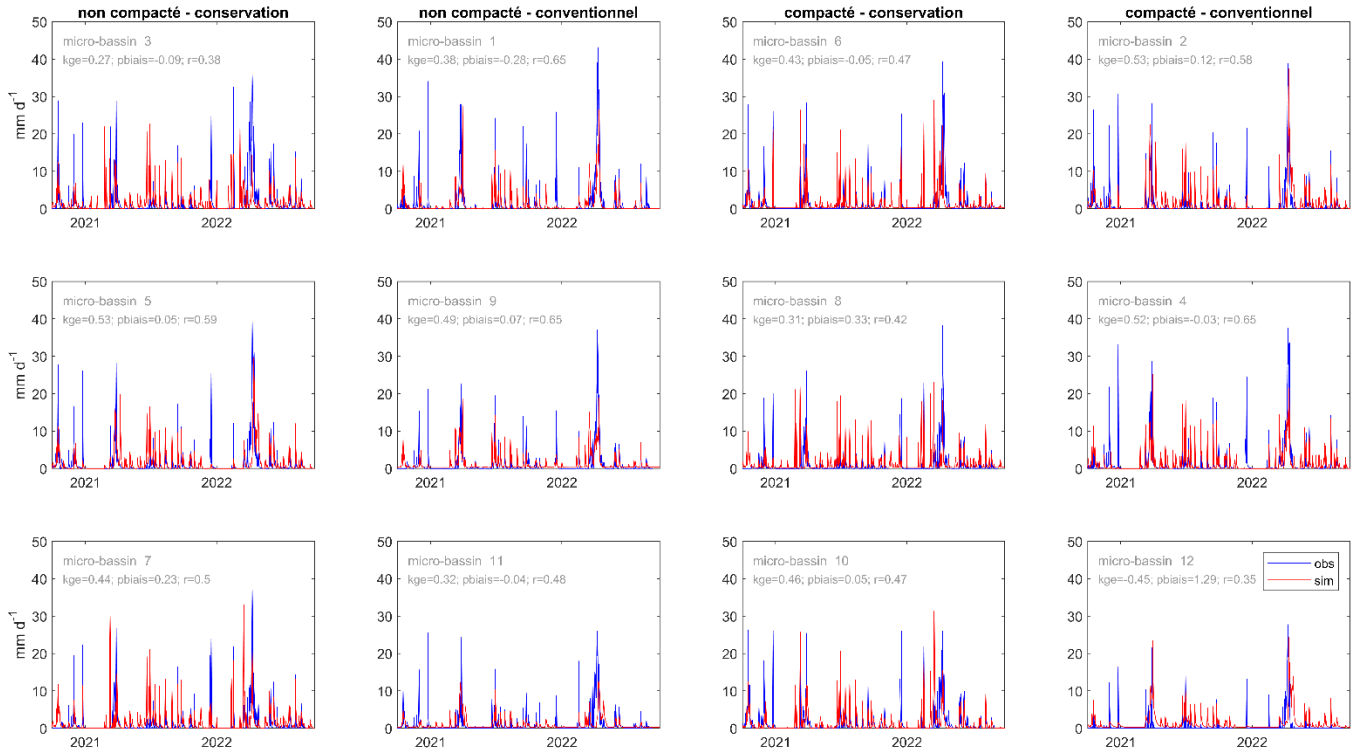


Figure 41. Résultats de calage des 12 micro-bassins de Saint-Lambert-de-Lauzon pour les lames d'eau total exportées.

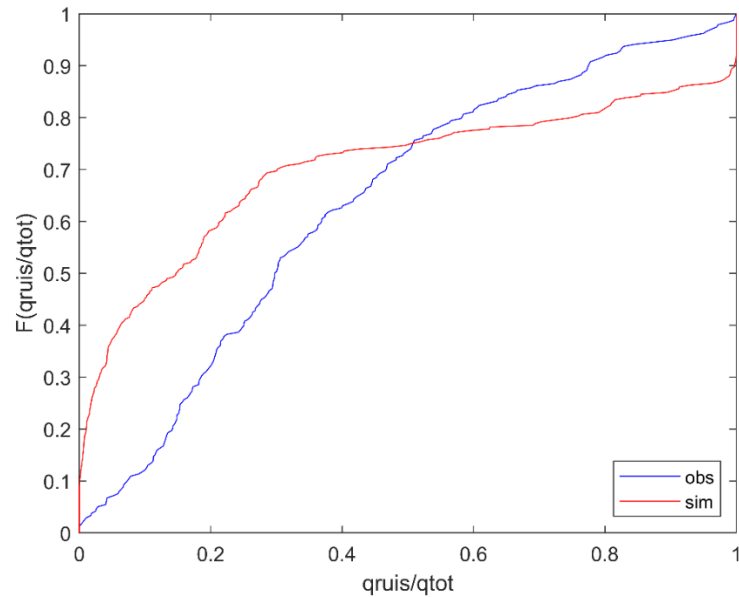


Figure 42. Compilation des coefficients de ruissellement mensuels observés (obs) et simulés (sim) sur les 12 micro-bassins de Saint-Lambert-de-Lauzon (2020-2022).

5. ANALYSES

5.1 ÉVOLUTION DE DEUX PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE SOL DANS LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL EN 48 PARCELLES

Quatre transects de sol ont été caractérisés sur le dispositif de 48 parcelles avec un échantillonneur de sol de type Giddings à six profondeurs (A : 0-10 cm, B : 10-20 cm, C : 20-30 cm, D : 30-40 cm, E : 40-50 cm, F : 50-60 cm) en automne en début de projet (2020) ainsi qu'en fin de projet (2022). Cet échantillonnage a permis de mesurer la masse volumique apparente et la teneur en eau gravimétrique. À partir de ces paramètres, il a été possible d'estimer la porosité totale, la teneur en eau volumique et la teneur en air volumique ainsi que les ratios entre les paramètres. Cette section rapporte l'évolution entre la première année et la dernière année d'expérimentation (de 2020 à 2022) de deux de ces propriétés physiques représentatives de la qualité physique des sols :

- la masse volumique apparente (MVA), comme mesure de la compaction du sol;
- la relation entre la teneur en air volumique par rapport à la porosité totale ($TEA_{vol}/\text{porosité totale}$), comme estimation de l'aération du sol.

Les analyses statistiques pour les deux paramètres précédemment mentionnés ont été réalisées avec un modèle linéaire à effets mixtes (*Generalized linear mixed model, GLMM*) avec le package « *glmmTMB* » dans le logiciel de programmation statistique R. Les facteurs année, profondeur, rotation, compaction, travail de sol ainsi que l'interaction entre les trois derniers avec la profondeur ont été utilisés comme facteurs fixes du modèle. Le Tableau 24 et le

Tableau 25 présentent les effets des facteurs fixes des modèles pour la MVA et pour la TEA_vol/porosité totale respectivement. Quant aux facteurs aléatoires du modèle, ils ont été estimés par le nombre de transects par parcelle en fonction du nombre de blocs du dispositif expérimental.

Tableau 24. Sources de variation fixes du modèle mixte pour la MVA.

Sources de variation	DDL1	DDL2	F.ratio	p.value	Signif.
Année	1	1764	0,098	0,7543	NS
Profondeur	5	1764	669,733	<0,001	***
Rotation	3	1764	7,793	<0,001	***
Compaction	1	1764	5,835	0,0158	*
Travail.Sol	1	1764	3,905	0,0483	*
Profondeur * Rotation	15	1764	1,006	0,4456	NS
Profondeur * Compaction	5	1764	7,172	<0,001	***
Profondeur * Travail.Sol	5	1764	3,13	0,0081	**

DDL1 : Degrés de liberté pour les niveaux de chaque facteur.

DDL2 : Degrés de liberté pour le nombre d'observations utilisées dans le modèle mixte.

*Signif. : <0.001 (***), <0.01 (**), <0.05 (*) et Non-significatif (NS).*

Tableau 25. Sources de variation fixes du modèle mixte pour la teneur en air volumique/porosité totale.

Sources de variation	DDL1	DDL2	F.ratio	p.value	Signif.
Année	1	1871	45,878	<0,001	***
Profondeur	5	1871	42,702	<0,001	***
Rotation	3	1871	5,824	<0,001	***
Compaction	1	1871	20,778	<0,001	***
Travail.Sol	1	1871	0,074	0,7853	NS
Profondeur * Rotation	15	1871	0,878	0,5896	NS
Profondeur * Compaction	5	1871	8,418	<0,001	***
Profondeur * Travail.Sol	5	1871	2,068	0,0667	NS

DDL1 : Degrés de liberté pour les niveaux de chaque facteur.

DDL2 : Degrés de liberté pour le nombre d'observations utilisées dans le modèle mixte.

Signif. : <0.001 (***), <0.01 (**), <0.05 (*) et Non-significatif (NS).

Concernant les comparaisons proprement dites, l'évolution des deux paramètres a été étudiée en comparant les valeurs des paramètres mesurés ou estimés en 2020 par rapport aux valeurs des paramètres mesurés ou estimés en 2022. Les comparaisons post-hoc « un à un » pour les niveaux des facteurs rotation (T1, T2, T3, T4), compaction (C1, C2) et travail de sol (S1, S2) ont été faites pour chacune des six profondeurs. Les comparaisons post-hoc ont été réalisées avec les bibliothèques *emmeans* et *multcomp* en précisant la *méthode d'ajustement de Tukey*. é

Les figures 43, 44 et 45 présentent l'évolution de la MVA par profondeur pour les niveaux des facteurs rotation, compaction et travail de sol respectivement. Les résultats de ces évolutions sont présentés au Tableau 26, Tableau 27 et au Tableau 28. De façon unanime, les valeurs de MVA n'ont pas évolué significativement entre 2020 et 2022 pour les mêmes niveaux des trois facteurs. Cependant, il est possible de détecter des différences entre certains niveaux des facteurs compaction et travail de sol. Pour la compaction, aux profondeurs 0-10 cm et 10-20 cm, les parcelles en C2 (traitement compacté) ont présenté des valeurs de MVA supérieures et significativement différentes par rapport aux parcelles en C1 (traitement non compacté) en 2020 et en 2022. Pour l'effet du travail de sol, dans la profondeur 0-10 cm, les parcelles en S2 (travail réduit) ont présenté des valeurs de MVA supérieures et significativement différentes par rapport aux parcelles en S1 (travail conventionnel) en 2020 et en 2022.

L'évolution nulle de la MVA pour tous les traitements peut être expliquée principalement par le temps réduit d'expérimentation (3 ans). En fait, ce constat est semblable à celui démontré par les recherches faites par N'Dayegamiye et Mehuys (2008) en sols loam sableux de l'Assomption (Québec), où la MVA n'a pas évolué de façon significative sous les effets du travail réduit ou du travail conventionnel après 10 ans d'expérimentation. En conclusion, en trois ans d'expérimentation, les effets de quatre types de rotations, deux niveaux de compaction et deux systèmes de travail de sol n'engendrent pas de modifications significatives aux conditions initiales de la MVA jusqu'à 60 cm de profondeur.

Année	Rotation	Profondeur	MVA	TEA/porosité
2022	T1	0-10	1.26 a	0.25 bfg hklop
2020	T1	0-10	1.27 a	0.22 acdeijmn
2022	T2	0-10	1.3 a	0.24 ceghmnop
2020	T2	0-10	1.3 a	0.21 abdfijkl
2022	T3	0-10	1.26 a	0.26 defhlnp
2020	T3	0-10	1.27 a	0.23 abcgikmo
2022	T4	0-10	1.25 a	0.24 ijklmnop
2020	T4	0-10	1.26 a	0.21 abcdefgh
2022	T1	10-20	1.31 a	0.25 efkl
2020	T1	10-20	1.32 a	0.22 abcdghij
2022	T2	10-20	1.34 a	0.24 bdefijkl
2020	T2	10-20	1.35 a	0.21 acgh
2022	T3	10-20	1.33 a	0.25 cdfhjl
2020	T3	10-20	1.33 a	0.23 abegik
2022	T4	10-20	1.31 a	0.24 ghijkl
2020	T4	10-20	1.31 a	0.21 abcdef
2022	T1	20-30	1.44 a	0.22 dfhj
2020	T1	20-30	1.45 a	0.19 abcegi
2022	T2	20-30	1.46 a	0.22 efij
2020	T2	20-30	1.46 a	0.19 abcdgh
2022	T3	20-30	1.46 a	0.2 bghij
2020	T3	20-30	1.46 a	0.17 acdef
2022	T4	20-30	1.42 a	0.19 cdefghij
2020	T4	20-30	1.42 a	0.16 ab
2022	T1	30-40	1.61 a	0.19 g
2020	T1	30-40	1.61 a	0.16 abcdef
2022	T2	30-40	1.65 a	0.16 befg
2020	T2	30-40	1.65 a	0.13 acd
2022	T3	30-40	1.63 a	0.17 dfg
2020	T3	30-40	1.64 a	0.14 abce
2022	T4	30-40	1.59 a	0.15 cdefg
2020	T4	30-40	1.59 a	0.12 ab
2022	T1	40-50	1.63 a	0.18 cdijkl
2020	T1	40-50	1.63 a	0.15 abefgh
2022	T2	40-50	1.66 a	0.19 bdghkl
2020	T2	40-50	1.66 a	0.16 acefij
2022	T3	40-50	1.61 a	0.2 fhjl
2020	T3	40-50	1.61 a	0.18 abcdegik
2022	T4	40-50	1.64 a	0.17 efghijkl
2020	T4	40-50	1.65 a	0.14 abcd
2022	T1	50-60	1.68 a	0.15 cdghi
2020	T1	50-60	1.69 a	0.12 abef
2022	T2	50-60	1.69 a	0.15 bdfhi
2020	T2	50-60	1.69 a	0.12 aceg
2022	T3	50-60	1.67 a	0.18 i
2020	T3	50-60	1.67 a	0.16 abcdefgh
2022	T4	50-60	1.69 a	0.13 efghi
2020	T4	50-60	1.69 a	0.1 abcd

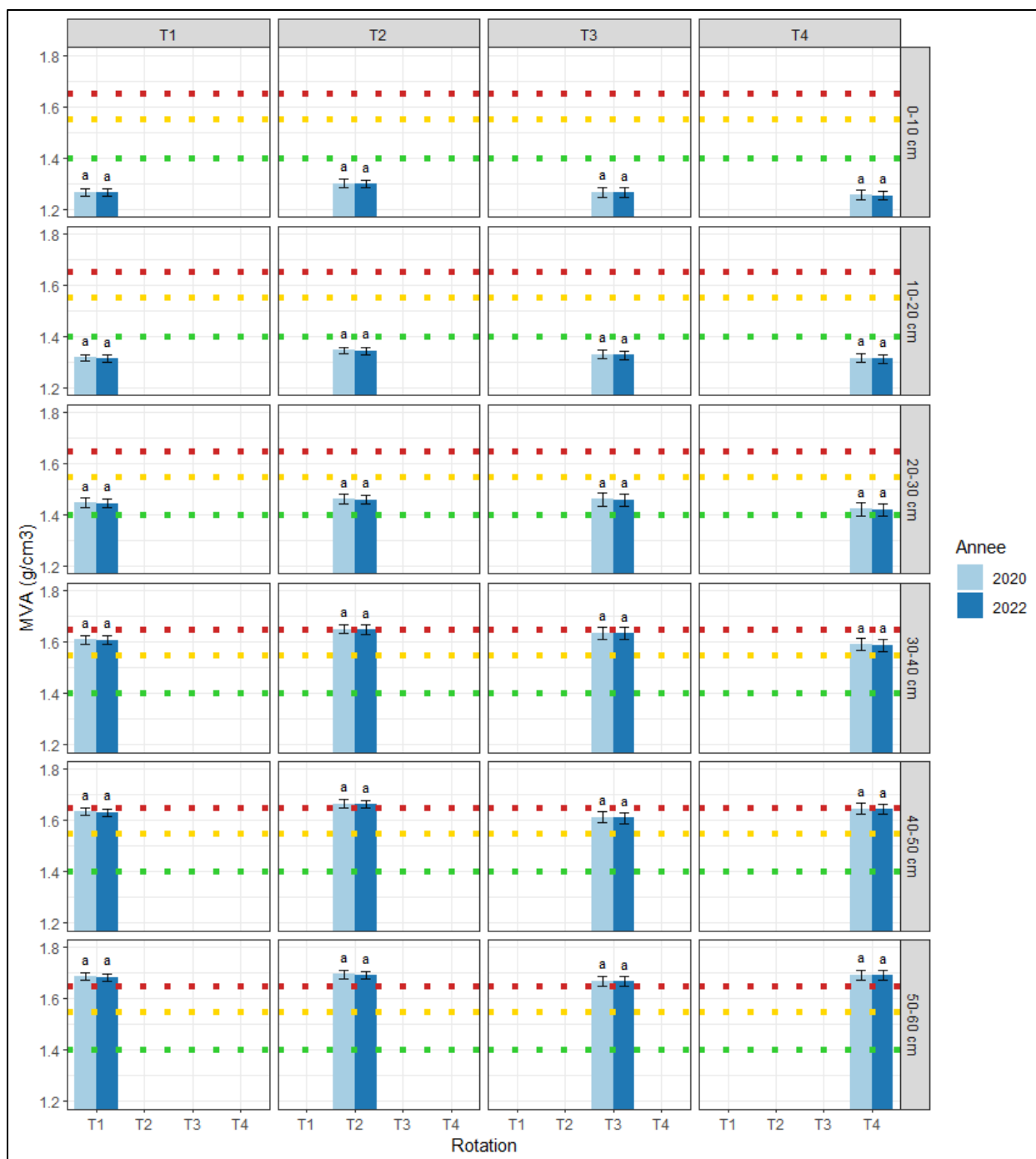
Tableau 26: Évolution de la MVA et de la TEA/porosité sous quatre types de rotations à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.

Année	Traitement	Profondeur	MVA	TEA/porosité
2020	C1	0-10	1.25 a	0.25 c
2022	C1	0-10	1.24 a	0.28 d
2020	C2	0-10	1.3 b	0.19 a
2022	C2	0-10	1.3 b	0.22 b
2020	C1	10-20	1.3 a	0.24 b
2022	C1	10-20	1.3 a	0.27 c
2020	C2	10-20	1.35 b	0.19 a
2022	C2	10-20	1.34 b	0.22 b
2020	C1	20-30	1.45 a	0.18 ab
2022	C1	20-30	1.45 a	0.21 c
2020	C2	20-30	1.45 a	0.18 a
2022	C2	20-30	1.44 a	0.21 bc
2020	C1	30-40	1.63 a	0.14 ab
2022	C1	30-40	1.62 a	0.17 c
2020	C2	30-40	1.62 a	0.14 a
2022	C2	30-40	1.61 a	0.16 bc
2020	C1	40-50	1.64 a	0.16 ab
2022	C1	40-50	1.64 a	0.19 c
2020	C2	40-50	1.64 a	0.16 a
2022	C2	40-50	1.63 a	0.18 bc
2020	C1	50-60	1.69 a	0.12 a
2022	C1	50-60	1.68 a	0.15 bc
2020	C2	50-60	1.68 a	0.13 ab
2022	C2	50-60	1.68 a	0.16 c

Tableau 27: Évolution de la MVA et de la TEA/porosité sous l'effet de la compaction à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.

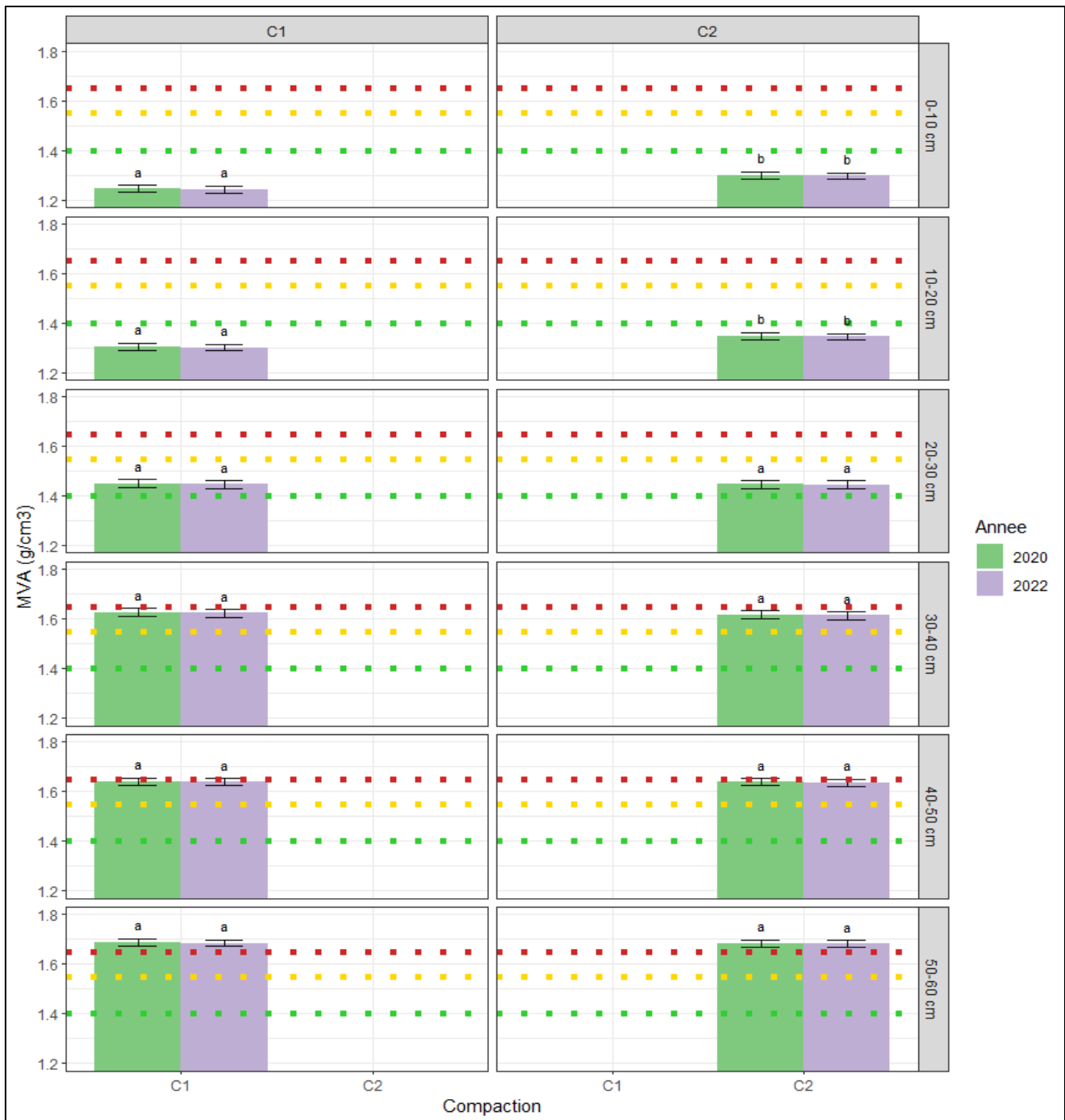
Année	Travail de sol	Profondeur	MVA	TEA/porosité
2022	S1	0-10	1.25 a	0.26 c
2020	S1	0-10	1.25 a	0.23 ab
2022	S2	0-10	1.29 b	0.23 bc
2020	S2	0-10	1.29 b	0.2 a
2022	S1	10-20	1.33 a	0.23 bc
2020	S1	10-20	1.34 a	0.2 a
2022	S2	10-20	1.31 a	0.26 c
2020	S2	10-20	1.32 a	0.23 ab
2022	S1	20-30	1.44 a	0.21 c
2020	S1	20-30	1.44 a	0.18 ab
2022	S2	20-30	1.46 a	0.21 bc
2020	S2	20-30	1.46 a	0.18 a
2022	S1	30-40	1.61 a	0.17 c
2020	S1	30-40	1.62 a	0.14 ab
2022	S2	30-40	1.62 a	0.17 bc
2020	S2	30-40	1.63 a	0.14 a
2022	S1	40-50	1.63 a	0.19 c
2020	S1	40-50	1.63 a	0.16 ab
2022	S2	40-50	1.65 a	0.18 bc
2020	S2	40-50	1.65 a	0.15 a
2022	S1	50-60	1.68 a	0.15 cd
2020	S1	50-60	1.69 a	0.12 ab
2022	S2	50-60	1.68 a	0.16 bd
2020	S2	50-60	1.69 a	0.13 ac

Tableau 28: Évolution de la MVA et de la TEA/porosité pour deux types de travail de sol à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.



Rotations = T1 : Maïs – Soya – Maïs; T2 : EV – Blé d'automne + TI – Maïs; T3 : Prairie continue; T4 : Prairie – Prairie – Maïs.
 Ligne verte pointillée : < 1.4 (g/cm³), MVA idéale pour le développement racinaire.
 Ligne jaune pointillée : 1.55 (g/cm³), MVA qui affecte la croissance racinaire.
 Ligne rouge pointillée : > 1.65 (g/cm³), MVA qui restreint complètement la croissance racinaire.
 Valeurs de MVA pour les sols loam limoneux, tirées de « Soil quality indicators » (NRCS - USDA, 2019).

Figure 43. Évolution de la MVA sous quatre types de rotations à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.



Compaction = C1 = Sol non compacté; C2 = Sol compacté.

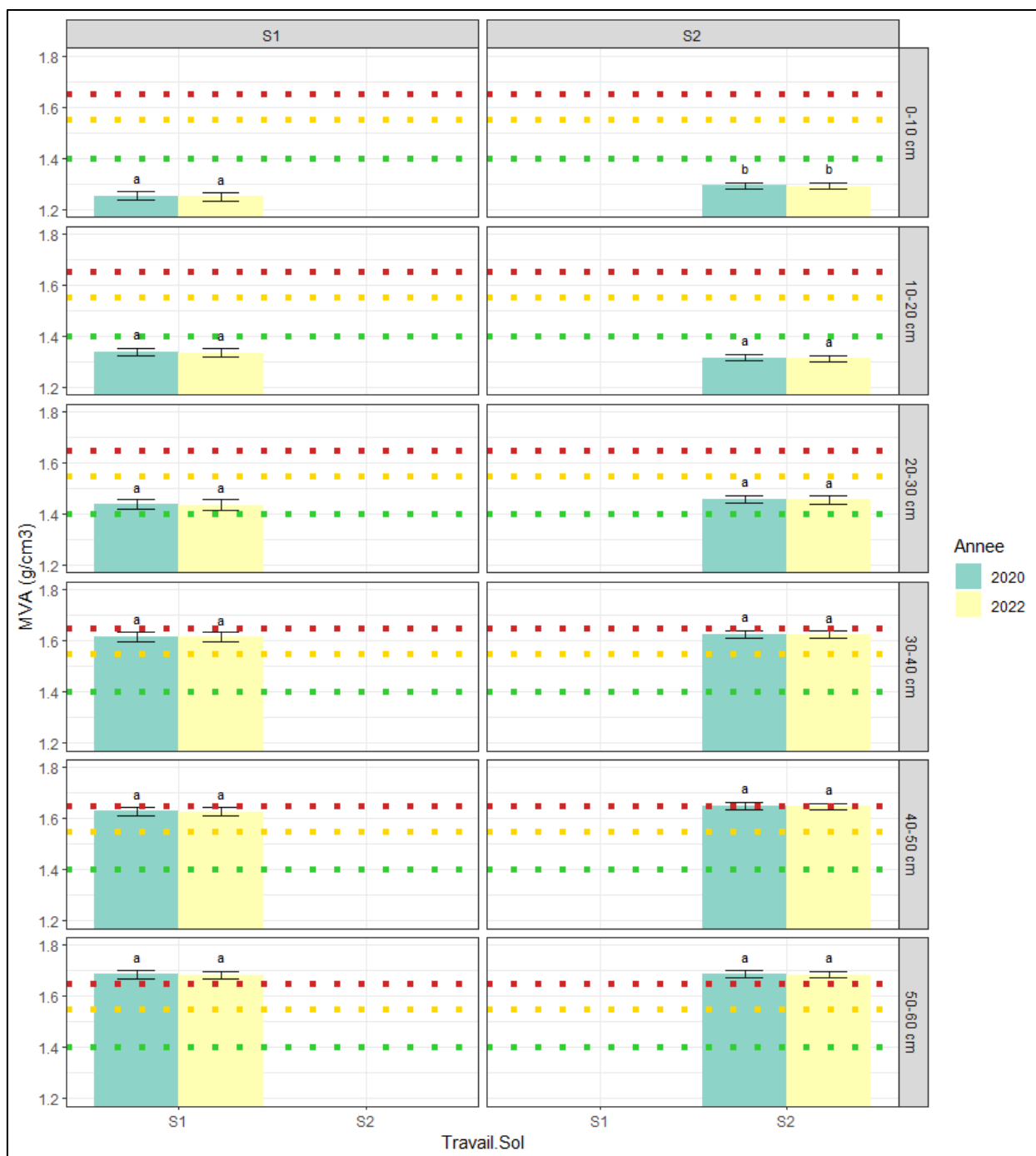
Ligne verte pointillée : < 1.4 (g/cm³), MVA idéale pour le développement racinaire.

Ligne jaune pointillée : 1.55 (g/cm³), MVA qui affecte la croissance racinaire.

Ligne rouge pointillée : > 1.65 (g/cm³), MVA qui restreint complètement la croissance racinaire.

Valeurs de MVA pour les sols loam limoneux, tirées de « Soil quality indicators » (NRCS - USDA, 2019).

Figure 44. Évolution de la MVA sous l'effet de la compaction à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.



S1 = Travail conventionnel; S2 = Travail réduit.

Ligne verte pointillée : < 1.4 (g/cm³), MVA idéale pour le développement racinaire.

Ligne jaune pointillée : 1.55 (g/cm³), MVA qui affecte la croissance racinaire.

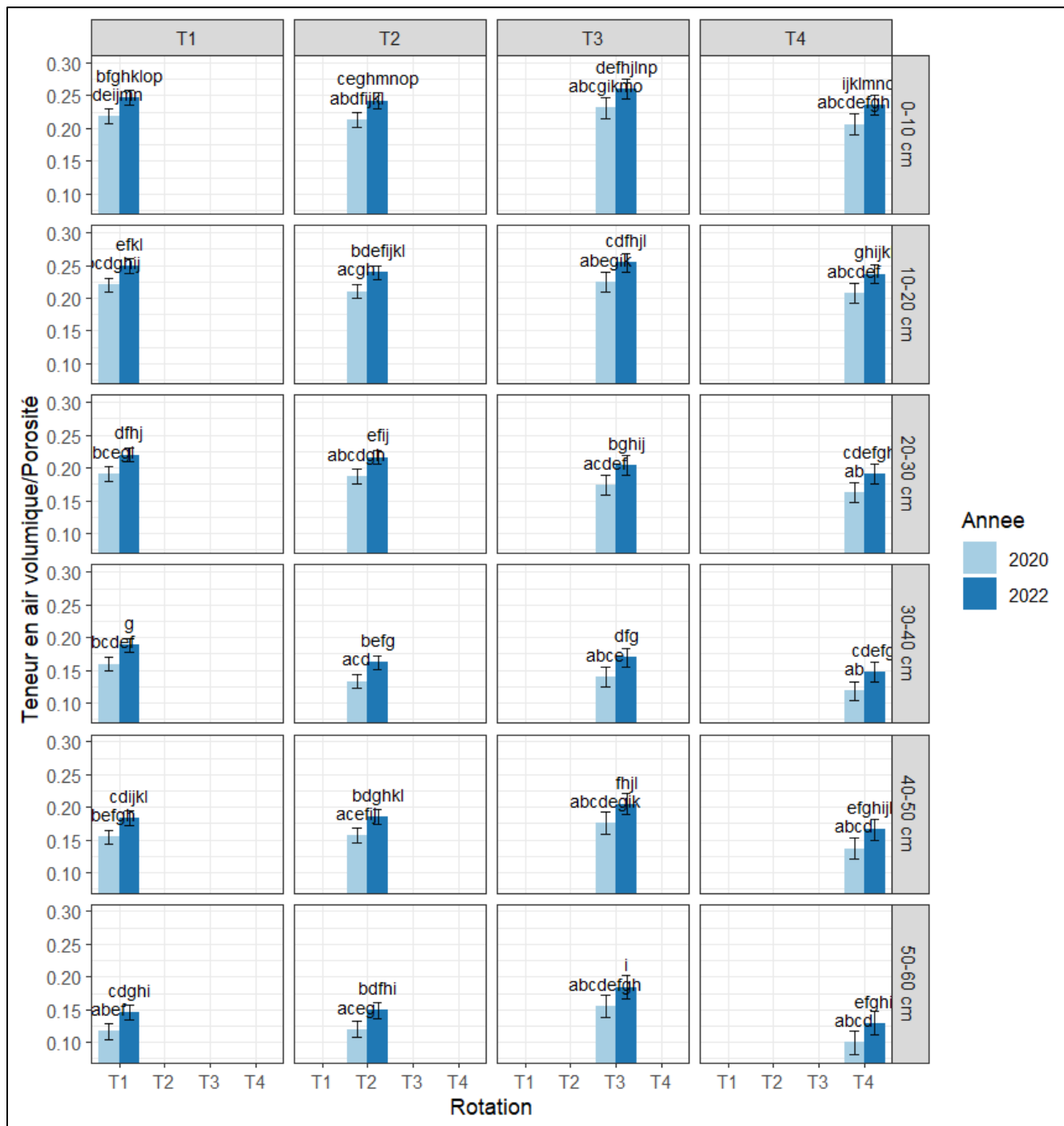
Ligne rouge pointillée : > 1.65 (g/cm³), MVA qui restreint complètement la croissance racinaire.

Valeurs de MVA pour les sols loam limoneux, tirées de « Soil quality indicators » (NRCS - USDA, 2019).

Figure 45. Évolution de la MVA pour deux types de travail de sol à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.

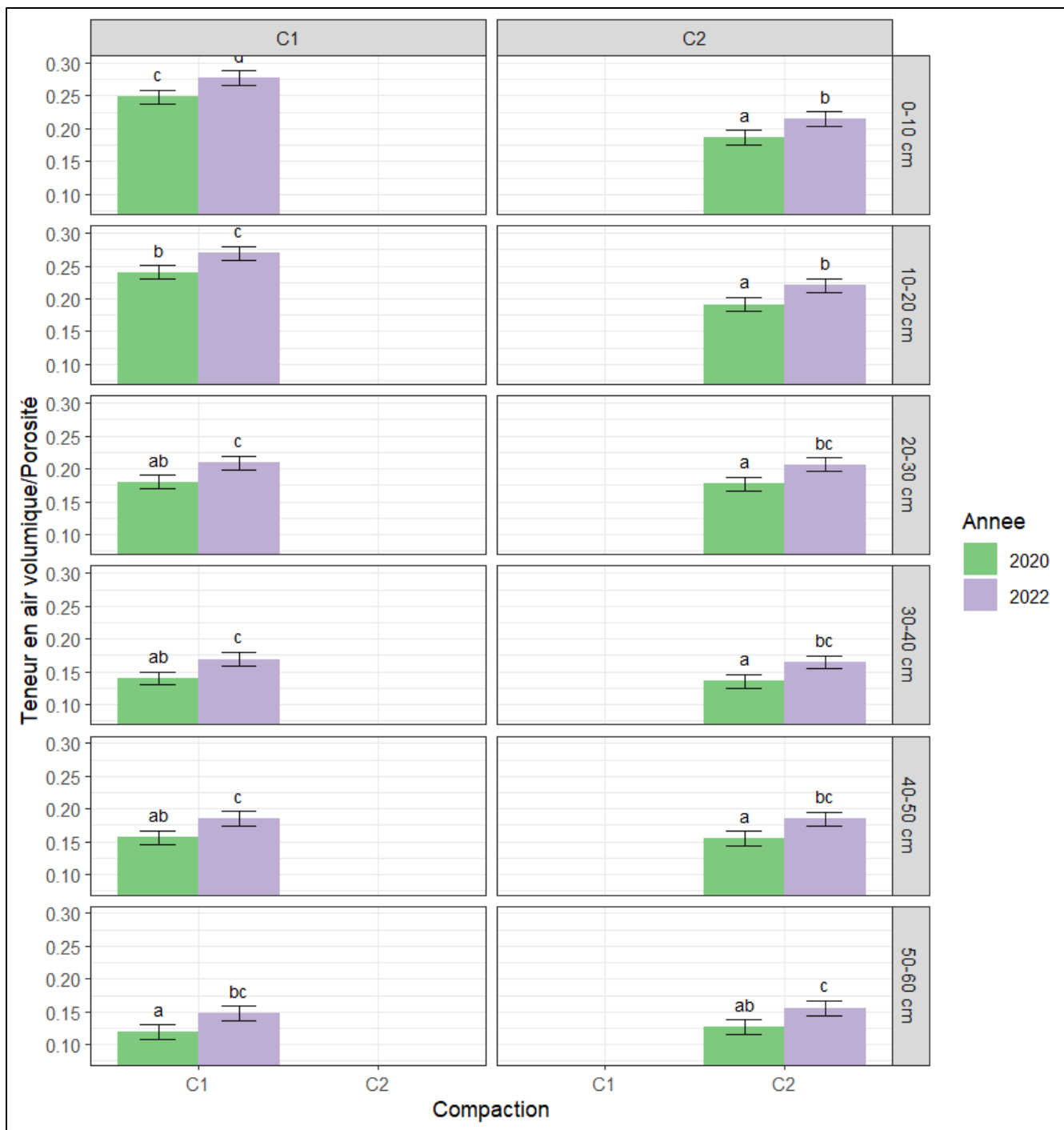
Les Figure 46, 47 et 48 présentent l'évolution de la TEA_vol/porosité totale pour les facteurs : rotation, compaction et travail de sol respectivement. À la différence de la MVA, la TEA_vol/porosité totale présente une évolution significative pour tous les niveaux des trois facteurs. Dans tous les scénarios et profondeurs, la TEA_vol/porosité totale est significativement supérieure en 2022 par rapport à 2020. Cependant, il est possible de détecter des différences entre certains niveaux des facteurs rotation et compaction. Pour le facteur rotation, à la profondeur de 30-40 cm, la rotation T1 présente une TEA_vol/porosité totale supérieure et significativement différente par rapport la rotation T4 en 2020 et en 2022; à la profondeur 50-60 cm, la rotation T3 présente une TEA_vol/porosité totale supérieure et significativement différente par rapport la rotation T4 en 2020 et en 2022. Pour le facteur compaction, aux profondeurs 0-10 cm et 10-20 cm, les parcelles sans compaction en C1 ont présenté une TEA_vol/porosité totale significativement inférieure aux parcelles compactées en C2 en 2020 ainsi qu'en 2022.

L'augmentation significative de la TEA_vol/porosité totale aux six profondeurs en trois ans d'expérimentation pour tous les facteurs et leurs niveaux souligne que l'effet que cette mesure est sensible à la teneur en eau dans le sol au moment de l'échantillonnage. La teneur en eau volumique (calculée à partir de la teneur en eau gravimétrique) apparait effectivement plus élevée en 2022 par rapport à 2020 dans les premiers 20 cm de profondeur et plus faible dans les horizons inférieures (voir les figures Figure 21, Figure 22 et Figure 23). À l'automne 2022, la présence du maïs et les précipitations plus faibles que la normale ont conduit à un assèchement du sol en profondeur, tandis que les précipitations importantes juste après la récolte et avant l'échantillonnage du sol ont conduit à cette augmentation de la teneur en eau en surface. Cet effet important de la teneur en eau sur la teneur en air du sol fait ressortir l'importance de plutôt comparer l'évolution relative des propriétés entre traitements que des considérer les variations absolues entre années.



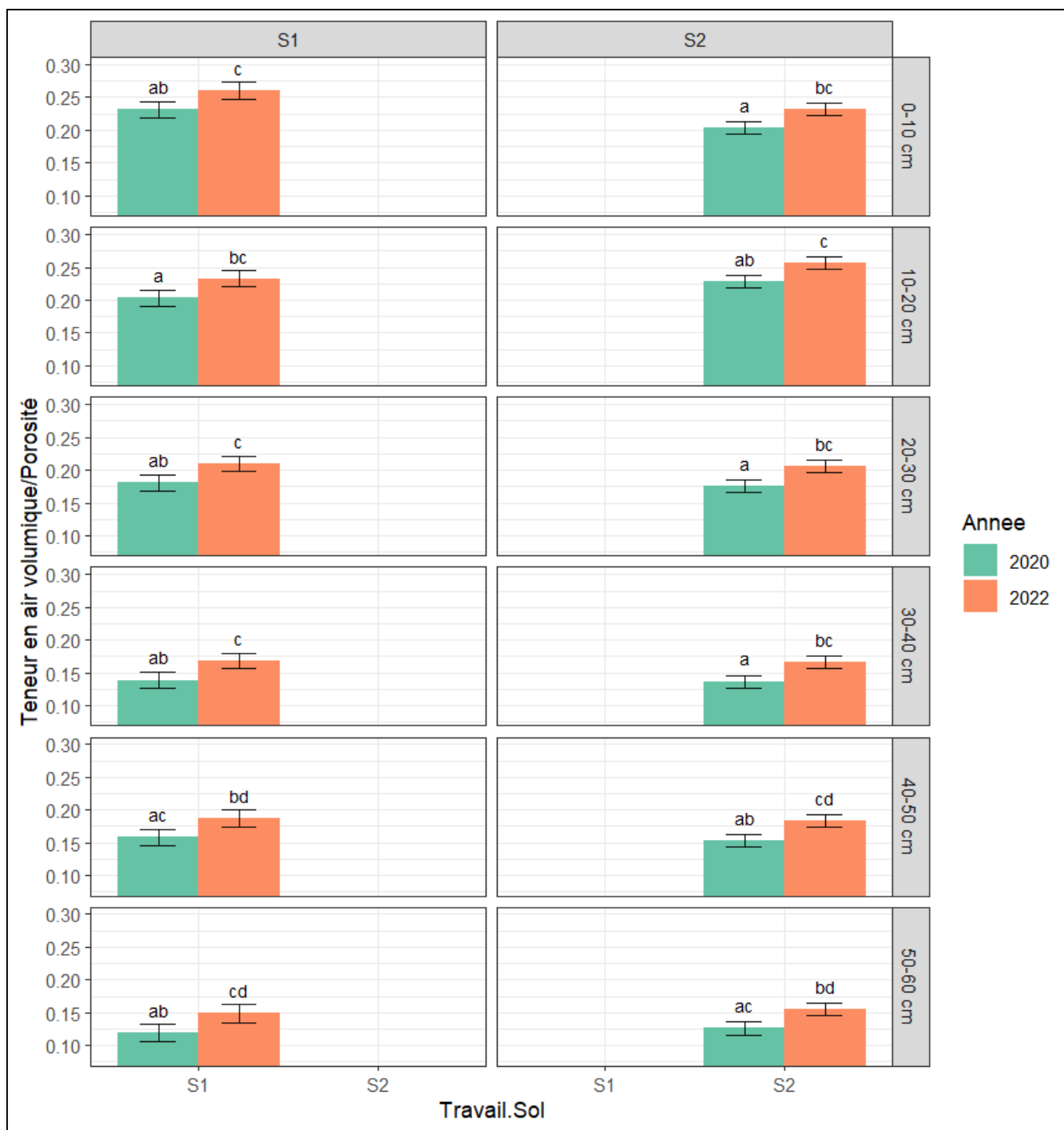
Rotations = T1 : Maïs – Soya – Maïs; T2 : EV – Blé d’automne + TI – Maïs; T3 : Prairie continue; T4 : Prairie – Prairie – Maïs.

Figure 46. Évolution de la teneur en air volumique/porosité totale pour quatre types de rotations à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.



Compaction = C1 = Sol non compacté; C2 = Sol compacté.

Figure 47. Évolution de la teneur en air volumique/porosité totale sous l'effet de la compaction à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.



S1 = Travail conventionnel; S2 = Travail réduit.

Figure 48. Évolution de la teneur en air volumique/porosité totale pour deux types de travail de sol à six profondeurs dans le dispositif expérimental en 48 parcelles.

5.2 ANALYSE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS DES DISPOSITIFS À SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON

Tel que mentionné précédemment, l'ensemble des parcelles des 12 micro-bassins a été échantillonné afin d'évaluer l'effet de la compaction et du système de conservation des sols sur la chimie-fertilité des sols à trois profondeurs (0-10, 10-20, 20-40 cm). Dans le dispositif à 48 parcelles, un échantillon composite a été formé et analysé à partir d'échantillons provenant des quatre traitements en sous-parcelles de Compaction (C1 et C2) et de Travail de sol (S1 et S2) pour évaluer seulement l'effet des systèmes de culture (T1 et T2) en parcelles principales sur la chimie-fertilité des sols. Cette formation d'échantillons composites a été réalisée pour des raisons budgétaires et d'un effet moindre de la compaction ou du travail de sol sur la chimie-fertilité des sols. Par ailleurs, les échantillons des traitements T3 (prairie 3 ans) et T4 (Prairie-Prairie-Maïs) ont été regroupés en un seul composite dénommé traitement T3 et classifiés comme ayant au moins deux années de prairie dans la rotation.

L'analyse statistique a été réalisée avec un modèle linéaire généralisé à effets mixtes (*Generalized linear mixed model*, GLMM) avec le package `glmmTMB` dans le logiciel de programmation statistique R. Dans le cas du dispositif en micro-bassins, les variables de chimie-fertilité ont été comparées entre les sols compactés (C2) et non compactés (C1) ainsi qu'entre système conventionnel et système de conservation, incluant les interactions entre ces traitements. Dans le dispositif à 48 parcelles, les trois différentes rotations ont été comparées entre elles.

5.2.1 Indicateurs de chimie-fertilité

De manière générale, les effets de la compaction et du travail du sol sur les indicateurs de chimie-fertilité sont assez restreints, alors que les systèmes de culture ont un impact légèrement plus significatif (Tableau 29 et Tableau 30). Ce constat était attendu, puisqu'il est rare d'observer des changements marqués dans la chimie du sol après une rotation de seulement trois ans, un suivi à plus long terme étant dans la plupart du temps nécessaire.

Dans le dispositif en 48 parcelles, les sols sous système de culture en conservation du sol avec blé d'automne et trèfle intercalaire (T2) et sous prairies (T3) sont significativement plus acides que sols sous système conventionnel sous rotation maïs-soya (T1), et ce à toutes les profondeurs. Cet impact est cependant relativement marginal, le contraste le plus marqué étant entre le traitement T3 (pH = 5,89) et T1 (pH = 6,14) à 10-20 cm de profondeur.

Il ne semble pas y avoir d'effet de la compaction ou du travail du sol sur la teneur en P à toutes les profondeurs du profil dans le dispositif en 12 micro-bassins, mais il y a significativement moins de phosphore dans les parcelles T2 en profondeur (10-20 cm et 20-40 cm) dans le dispositif en 48 parcelles qui était sous cultures de blé d'automne avec trèfle intercalaire avec un pH légèrement plus acide. L'effet de cette fertilisation n'est en revanche pas mesuré en surface, où les teneurs en P ne sont pas significativement différentes. Le P aurait-il migré dans le profil pour s'y accumuler ou résultent-ils des conditions différentes sous le blé d'automne par rapport au soya? Les sols ne sont pas plus saturés en phosphore pour autant, puisque les valeurs de l'indice de saturation en P (ISP), calculé en divisant les teneurs en phosphore par les teneurs en aluminium ($P/Al*100$), ne sont pas significativement différentes à toutes les profondeurs, bien qu'elles soient légèrement inférieures dans les parcelles T2.

Il n'y a pas d'effet de la compaction ni du travail sur les teneurs en K du sol à toutes les profondeurs dans le dispositif en 12 micro-bassins, cependant les parcelles T3 avec prairies dans le dispositif en 48 parcelles ont significativement moins de K que les parcelles T1 et T2 à partir de 10 cm de profondeur, même si elles ont reçu deux fois plus d'engrais potassique que les parcelles T1 et T2. Les plantes pérennes sont capables d'exporter plus de potassium avec un système racinaire plus développé en profondeur que les plantes annuelles. Les teneurs en magnésium ne sont pas influencées par les systèmes de cultures, mais sont significativement plus élevées dans les sols non compactés sous travail conventionnel de 0 à 20 cm (C1S2) dans le dispositif en 12 micro-bassins. Aucune différence n'est perceptible au-delà de 20 cm de profondeur. Le calcium et le sodium évoluent très peu en fonction de la compaction et du travail, mais ils évoluent inversement en fonction du système de culture; les teneurs en calcium étant plus élevées dans les parcelles T1 dans tout le profil, alors que les teneurs en Na sont plus importantes dans les parcelles T3 de 10 à 20 cm et T2 de 20 à 40 cm.

L'aluminium semble légèrement influencé par le travail du sol de 10 à 20 cm, les sols sous système conventionnel (T1) ayant des teneurs plus élevées que les sols sous système de conservation (T2). Les parcelles sous maïs-soya (T1) ont également des teneurs significativement plus élevées en Al que les parcelles avec prairies de 20 à 40 cm (T3). Les différences étant relativement faibles, il serait cependant hasardeux de conclure qu'il s'agisse uniquement d'un effet exclusif du travail ou de la rotation.

Les résultats des Tableau 29 et Tableau 30 concernant les teneurs en fer, en cuivre, en zinc et en manganèse indiquent quelques différences significatives entre traitements de compaction, de travail et de rotation, mais les modèles statistiques ne sont pas spécialement robustes et ne permettent pas, à notre avis, de tirer des interprétations concluantes, la variabilité des résultats au sein même des parcelles étant trop élevée. Une évaluation des phénomènes après deux cycles de rotations permettrait potentiellement d'observer de plus grandes différences entre traitements ou du moins de diminuer la variabilité, permettant d'en tirer des conclusions plus éclairées.

Les résultats concernant les teneurs en carbone peuvent sembler *a priori* surprenants, puisqu'il n'y a pas de différence significative entre traitements de compaction ou de travail du sol. Il est probable que la période d'essai de trois ans ne soit pas suffisante pour conduire à des changements importants de teneur en C dans le sol, d'autant plus que les teneurs initiales sont relativement faibles dans ces sols compacts de la série Le Bras. Il est aussi étonnant de remarquer qu'il n'y a pas de différences significatives entre les systèmes de culture pour l'horizon de surface, alors qu'il est reconnu que les plantes pérennes ont une bien meilleure capacité à stocker le carbone dans les sols que les cultures annuelles (Bolinder et al., 2012). Il se peut que le fait d'avoir combiné les traitements T3 (prairie 3 ans) et T4 (Prairie-Prairie-Maïs) ait dilué l'effet exclusif des prairies, puisqu'une bonne partie du carbone accumulé pendant les deux premières années de l'essai dans les parcelles T4 a probablement été minéralisé lorsque ces dernières ont été remises en culture de maïs en 2022. En profondeur dans le sol, les parcelles T2 avait des teneurs en carbone plus faibles que les parcelles T1 et T3. Cet effet va à l'inverse de ce qu'on devrait s'attendre d'un retour de blé d'automne avec trèfle intercalaire dans les parcelles T2, par rapport au retour de soya en T1. Plus d'un cycle de rotation risque d'être nécessaire pour capter l'effet de ces systèmes de culture.

Les résultats sont plus contrastés pour le rapport C/N. Dans le dispositif en 12 micro-bassins, il n'y a pas de différences significatives entre traitements de compaction et de travail de sol dans les deux premiers horizons,

mais il y a une différence entre les systèmes conventionnels et de conservation en profondeur (20 -40 cm) dans les sols non compactés (C1S1 vs C1S2); le rapport C/N étant plus élevé dans le système de conservation. Ce constat semble relié à une teneur en C plus élevée dans ce traitement en profondeur (20 -40 cm). À l'inverse, les teneurs en C tendent à être plus faibles dans l'horizon supérieur (10-20 cm), tandis que le rapport C/N tend être plus faible. L'apport de paille et des résidus de trèfle intercalaire devraient augmenter les teneurs en C et N dans les traitements en S2, mais les effets sont mitigés à date.

Un phénomène similaire est observé dans le dispositif de 48 parcelles, les cultures annuelles avec blé d'automne et trèfle intercalaire T2 ont des teneurs en C et un rapport C/N significativement moins élevés que les cultures annuelles en T1 en profondeur (10-20 cm et 20-40 cm). Des mesures prises dans ces dispositifs à la fin d'un deuxième cycle de rotation devraient permettre de vérifier si les mêmes tendances se maintiennent ou si la présence de pailles de céréales et de cultures de couverture permettent de renverser la situation.

Tableau 29. Paramètres de chimie-fertilité des sols du dispositif en 12 micro-bassins.

Traitement	Profondeur	pH	P	ISP	K	Mg	Ca	Na	Al	Fe	Cu	Zn	Mn	C	C/N
C1S1	0-10	6,2 a	42,7 a	3,4 a	111,6 a	168 ab	1131,6 a	7,5 a	1237,7 a	244,7 a	4,2 a	2,3 a	23,5 a	1,94 a	10,9 a
C1S2	0-10	6,42 a	34,9 a	3,2 a	95 a	192,3 b	1193,4 a	9,2 a	1099 a	269 a	3,7 a	2,2 a	41,3 a	1,46 a	10,5 a
C2S1	0-10	6,16 a	43,3 a	3,6 a	86,4 a	178 ab	1079,9 a	8,5 a	1190,3 a	259,7 a	3,6 a	1,9 a	26,1 a	1,67 a	11,1 a
C2S2	0-10	6,13 a	34,4 a	3 a	103,5 a	160,3 a	1066,7 a	8 a	1168,7 a	262 a	3,9 a	2 a	24,6 a	1,75 a	10,8 a
C1S1	10-20	6,22 a	25,8 a	2,1 a	58,8 a	159 a	1070 a	10 a	1207,3 b	226,7 a	2,7 a	1,3 a	18,5 a	1,45 a	10,7 a
C1S2	10-20	6,72 a	22 a	2,2 a	59,2 a	195,3 b	1218,7 a	13,3 b	976,3 a	262,7 a	2,4 a	1,5 a	41,9 b	0,88 a	9,9 a
C2S1	10-20	6,25 a	29,7 a	2,7 a	63,1 a	171 ab	1110,7 a	9,8 a	1087 ab	237,7 a	3 a	1,6 a	23,4 ab	1,48 a	10,6 a
C2S2	10-20	6,37 a	28,7 a	2,4 a	81,4 a	169 ab	1150,3 a	10,1 ab	1145,3 ab	254,3 a	3,3 a	1,7 a	25,6 ab	1,5 a	10,9 a
C1S1	20-40	6,59 a	16,5 a	1,8 a	55,9 a	229,3 a	1111 a	15,4 a	939,3 a	224 a	1,3 a	0,9 a	45,3 a	0,53 a	8,2 a
C1S2	20-40	6,57 a	20,2 a	2,2 a	67,6 a	214,7 a	1117,3 a	12,5 a	969,7 a	243,7 b	2,5 a	1,5 a	42,9 a	0,97 a	9,8 b
C2S1	20-40	6,38 a	15,2 a	1,6 a	54,8 a	214 a	892 a	14,4 a	961 a	224,7 a	1,2 a	0,9 a	42,8 a	0,63 a	8,9 ab
C2S2	20-40	6,73 a	15,5 a	1,5 a	67,3 a	206,3 a	1113,3 a	13,7 a	990,3 a	227,7 ab	1,5 a	1 a	36,9 a	0,65 a	8,9 ab

C1 = Sol non compacté; C2 = Sol compacté; S1 = Système conventionnel; S2 = Système de conservation

Tableau 30. Paramètres de chimie-fertilité des sols du dispositif en 48 parcelles.

Rotation	Profondeur	pH	P	ISP	K	Mg	Ca	Na	Al	Fe	Cu	Zn	Mn	C	C/N
T1	0-10	6,05 b	42,5 a	2,7 a	88,6 a	107,7 a	1056,7 b	7,2 a	1412,5 a	240,7 a	1,8 b	1,5 a	16,8 a	1,9 a	12 b
T2	0-10	5,86 a	41,9 a	3 a	127,8 b	109,9 a	1004,5 a	8,6 b	1396,3 a	264 ab	1,6 a	1,5 a	20 ab	1,9 a	11,1 a
T3	0-10	5,86 a	42,4 a	2,9 a	89,2 a	112,8 a	965 a	9,5 c	1410,3 a	285,8 b	1,9 b	1,6 a	20,6 b	2,2 a	12 ab
T1	10-20	6,14 b	37 b	2,5 a	73,9 b	104,9 a	1081 c	8,7 a	1382 a	220,3 a	1,7 b	1,5 b	14 a	1,9 b	11,9 b
T2	10-20	5,99 a	25,4 a	1,9 a	70,7 b	101,3 a	1023 b	10,4 b	1342 a	238,5 ab	1,5 a	1,2 a	14,8 a	1,7 a	11,3 a
T3	10-20	5,89 a	32,5 ab	2,3 a	60,2 a	97,9 a	946 a	10,3 b	1362,8 a	251,5 b	1,8 b	1,4 ab	15,2 a	2,1 ab	12,1 ab
T1	20-40	6,05 b	30,8 b	2,4 a	61,3 b	119,8 a	926,8 b	10,7 a	1323,8 b	231,5 a	1,4 b	1,2 c	12,3 a	1,5 b	11,8 b
T2	20-40	5,96 a	22,7 a	1,8 a	61,3 b	158,1 a	790,2 a	12,9 c	1251,5 ab	247,8 a	1 a	0,9 a	21,4 b	0,9 a	9 a
T3	20-40	5,93 a	30,9 b	2,3 a	47,6 a	127,3 a	760,3 a	12 b	1253,5 a	249,5 a	1,4 b	1 b	12,8 a	1,4 b	11,5 b

T1 = Rotation Maïs – Soya – Maïs; T2 = Rotation EV – Blé d'automne + T1 – Maïs; T3 = Prairie continue et Prairie – Prairie – Maïs (T3 et T4).

5.2.2 Stabilité des agrégats de sol

Les traitements de compaction ont influencé de manière significative le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats dans le dispositif des 12 micro-bassins (Figure 49), mais pas dans le dispositif des 48 parcelles. Les sols sous système de conservation (C1S2 et C2S2) ont un DMP significativement plus élevé que les sols non compactés sous système conventionnel (C1S1), mais non différents des sols compactés sous système conventionnel (C2S1). Le travail de sol moins intensif et l'inclusion de blé d'automne et de trèfle intercalaire a donc une influence sur l'agrégation du sol, un travail profond et régulier détruisant plus les agrégats que le semis-direct, ce qui concorde avec les résultats obtenus dans la dernière étude portant sur l'état de santé des sols du Québec (Gasser et al., 2023). Par contre et contrairement à ce qui est attendu, en sol compacté en travail conventionnel, le DMP est plus élevé qu'en sol non compacté. Les traitements de travail de sol et de compaction n'ont pas influencé de manière significative le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats dans le dispositif en 48 parcelles (résultats non présentés). Il se peut que les conditions moins optimales pour la compaction du sol (temps relativement sec à l'automne et au printemps lors du passage du DM-Air) n'aient pas permis d'influencer suffisamment le sol pour affecter le DMP.

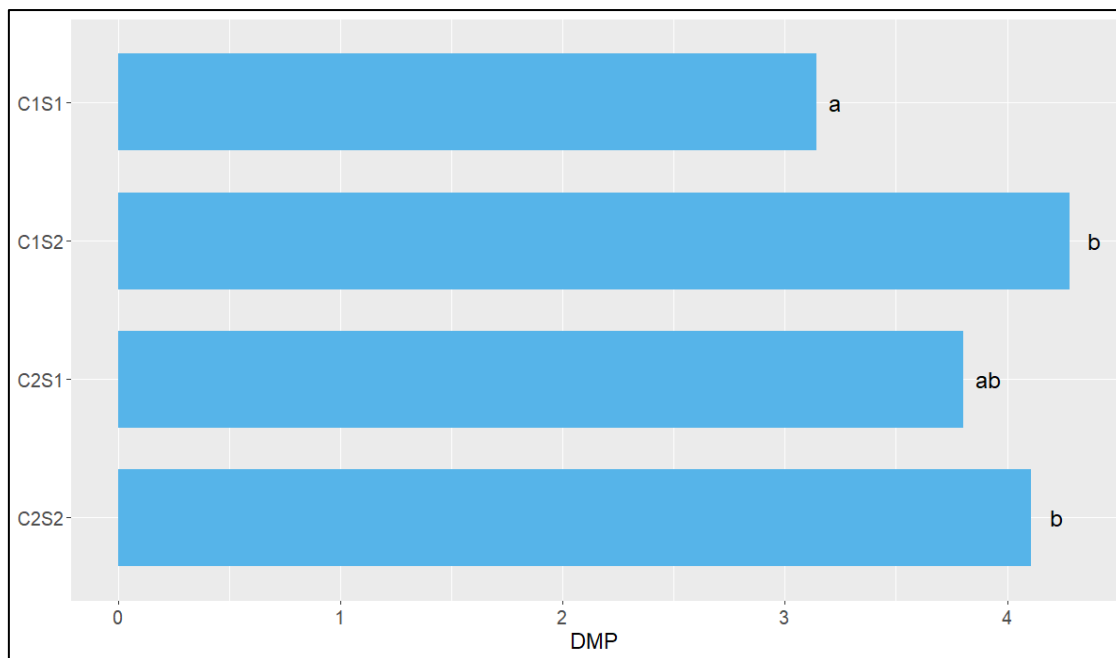


Figure 49. Diamètre moyen pondéré des agrégats de sol du dispositif en 12 micro-bassins.

5.3 RENDEMENTS DANS LES DEUX DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

La comparaison des rendements de maïs-grain obtenus en 2022 en fin de cycle de rotation sur trois ans dans les deux dispositifs devrait permettre d'évaluer les effets des systèmes de culture, du travail de sol et de la compaction sur la productivité des cultures. Les analyses statistiques n'ont pas été réalisées sur les cultures de blé, de soya et de foin en 2021 puisqu'il est attendu que les effets des traitements ne soient pas significatifs après une seule année d'expérimentation. Dans le dispositif en 12 micro-bassins, un essai de fertilisation azotée a été effectué en sous-parcelles en utilisant quatre doses d'azote minéral (50, 140, 170 et 200 kg N/ha). Un apport équivalent à 70 kg N/ha a été attribué aux parcelles avec un retour de trèfle intercalaire et les doses d'azote ont été ajustées à la baisse (50, 70, 100 et 130 kg N/ha) pour rendre les comparaisons possibles. La distribution des doses variables d'azote dans les parcelles du dispositif est présentée à la Figure 6. Toutefois, pour la comparaison des rendements dans ce dispositif, seulement deux doses d'azote ont été utilisées : 50 kg N/ha et 100 kg N/ha – 170 kg N/ha; ces deux doses ont été analysées séparément. Pour le dispositif en 48 parcelles, la dose optimale d'engrais minéral d'azote a été établie à 170 kg N/ha (CRAAQ, 2010) dans le système de culture conventionnel T1 et à 100 kg N/ha dans le système de conservation avec trèfle intercalaire T2 et dans la rotation T4 sur retour de deux ans de prairie, en attribuant un apport en équivalent engrais minéral azoté de 70 kg de N/ha au retour de trèfle intercalaire et de deux ans prairie, comme dans le dispositif en 12 micro-bassins.

Les analyses statistiques ont été réalisées avec un modèle linéaire à effets mixtes (Generalized linear mixed model, GLMM) avec le package « glmmTMB » dans le logiciel de programmation statistique R. Dans le dispositif en 12 micro-bassins, les facteurs compaction et système de culture/travail de sol, ainsi que l'interaction entre ces deux facteurs ont été traités comme facteurs fixes. Dans le dispositif en 48 parcelles, seulement les effets simples des facteurs systèmes de culture, compaction et travail de sol ont été considérés comme effets fixes. Dans les deux dispositifs, le facteur bloc a été utilisé comme effet aléatoire. Les tableaux 31 et 32 présentent les effets des facteurs fixes des modèles pour le rendement du dispositif en 12 micro-bassins pour les doses de (50 kg N/ha), (100 kg N/ha – 170 kg/ha) et le rendement du dispositif des 48 parcelles (100 kg N/ha – 170 kg/ha) respectivement.

Tableau 31. Effet des facteurs fixes sur le rendement en maïs-grain dans le dispositif en 12 micro-bassins.

Dose de N	Sources de variation	DDL1	DDL2	F.ratio	Valeur P	Signif.
50 kg N/ha	Compaction	1	17	8,754	0,0088	**
	Système de cultures/Travail sol	1	17	0,980	0,3361	NS
	Compaction x Sys./Travail sol	1	17	0,451	0,5108	NS
100-170 kg N/ha	Compaction	1	17	8,754	0,2146	NS
	Système de cultures/Travail sol	1	17	0,980	0,1513	NS
	Compaction x Sys./Travail sol	1	17	0,451	0,5678	NS

DDL1 : Degrés de liberté pour les niveaux de chaque facteur.

DDL2 : Degrés de liberté pour le nombre d'observations utilisées dans le modèle mixte.

Signif. : <0.001 (***) , <0.01 (**), <0.05 (*) et Non-significatif (NS).

Tableau 32. Effet des facteurs fixes sur le rendement en maïs-grain dans le dispositif en 48 parcelles (100 kg N/ha – 170 kg/ha).

Sources de variation	DDL1	DDL2	F.ratio	p.value	Signif.
Système de cultures	2	71	8,754	<0,001	***
Compaction	1	71	0,980	0,0054	**
Travail de sol	1	71	0,451	0,0723	NS

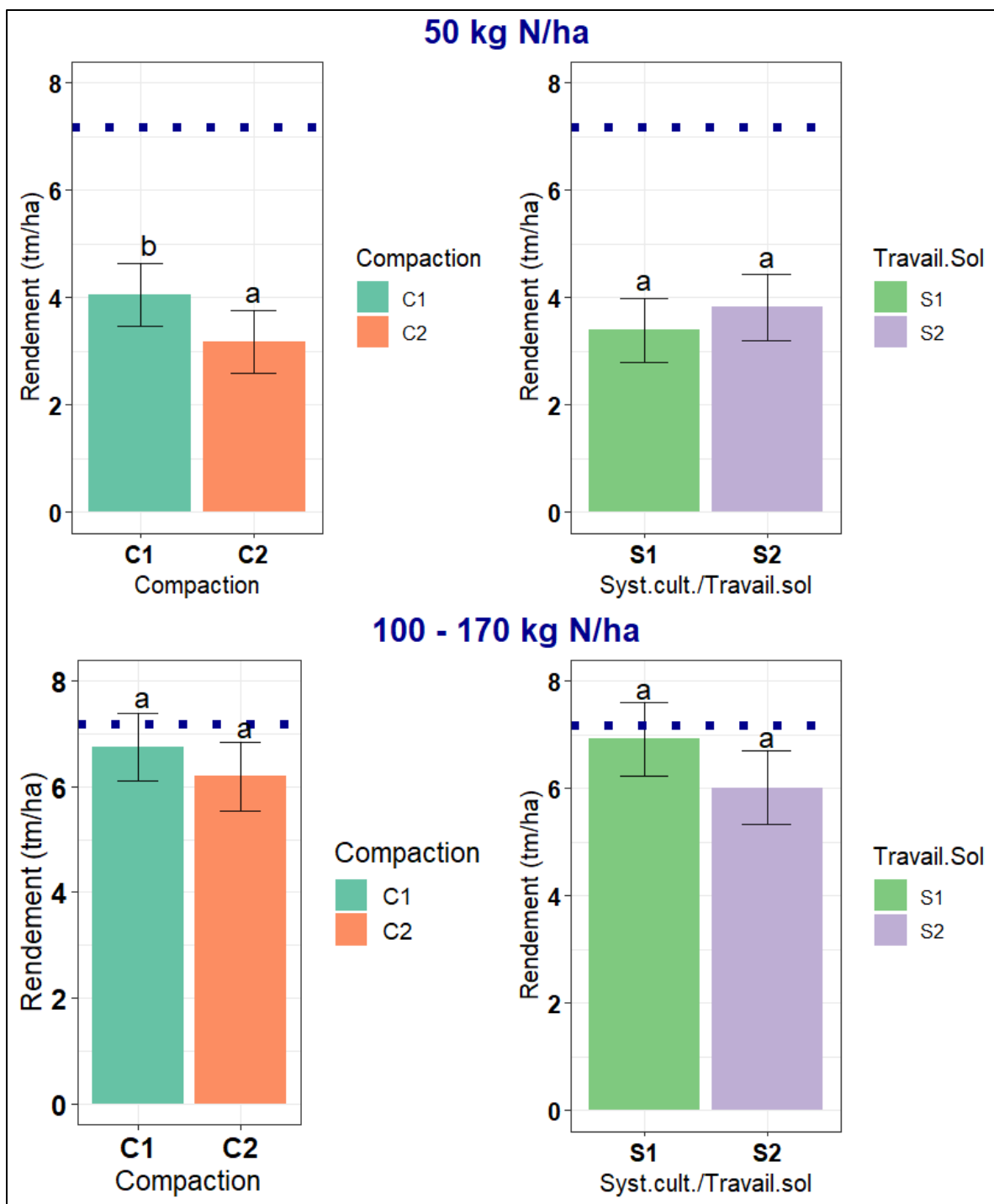
DDL1 : Degrés de liberté pour les niveaux de chaque facteur.

DDL2 : Degrés de liberté pour le nombre d'observations utilisées dans le modèle mixte.

*Signif. : <0.001 (***), <0.01 (**), <0.05 (*) et Non-significatif (NS).*

Figure 50 présente les rendements de maïs-grain obtenus dans le dispositif des 12 micro-bassins avec 50 kg N/ha et 100 – 170 kg N/ha. Les parcelles non compactées (C1) qui ont reçu 50 kg N/ha présentent un rendement supérieur et significativement différent à celles qui ont été compactées (C2). Même s'il n'y a pas de différences significatives de rendement entre les deux systèmes de culture/travail de sol conventionnel S1 et conservation S2, il y a une tendance à l'augmentation sous système de conservation S2. En moyenne, la dose de 50 kg N/ha permet d'obtenir environ 50% du rendement de référence (7,2 tm/ha), rendement de référence de 2022 pour l'assurance collective de la Financière agricole du Québec dans la zone où se trouve la ferme expérimentale de St-Lambert-de-Lauzon (Gouvernement du Québec, La Financière agricole du Québec, 2022). Dans les parcelles qui ont reçu une dose de 100 ou 170 kg N/ha, les rendements obtenus sous les effets des deux niveaux de compaction ne présentent pas de différences significatives. De la même façon, les deux systèmes de culture/travail de sol ne produisent pas de différences significatives de rendement. D'ailleurs, les rendements obtenus dans les parcelles avec une dose de 100 et 170 kg N/ha sont proches du rendement de référence 2022 (7,2 tm/ha) de la Financière agricole du Québec.

Figure 51 présente les rendements de maïs-grain obtenus dans le dispositif des 48 parcelles avec 100 – 170 kg N/ha. Les systèmes de cultures incluant des cultures annuelles (T1 et T2) présentent des rendements supérieurs en maïs grain et significativement différents de ceux de parcelles sur retour de prairie T4. Quant au facteur compaction, les parcelles non compactées C1 présentent un rendement supérieur et significativement différent par rapport aux rendements des parcelles compactées C2. Finalement, le type de travail de sol conventionnel (S1) ou réduit (S2) n'a pas d'effet sur les rendements. Comme pour les rendements dans le dispositif en 12 micro-bassins, les rendements obtenus dans le dispositif en 48 parcelles sont égaux ou supérieurs au rendement de référence 2022 (7,2 tm/ha) de la Financière agricole du Québec.

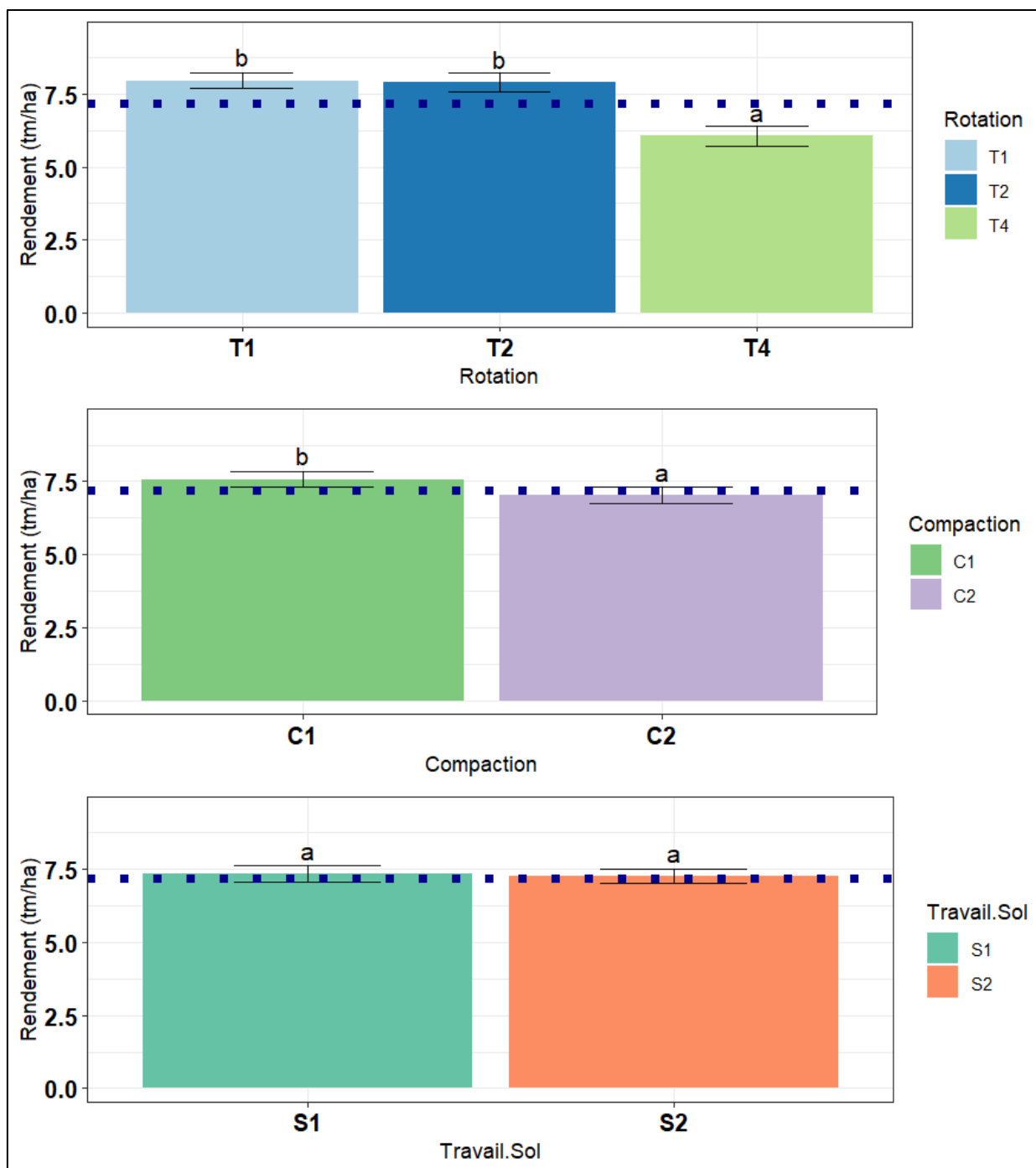


Compaction : C1 = Sol non compacté; C2 = Sol compacté.

Travail de sol : S1 = Système de cultures/travail de sol conventionnel; S2 = Système de cultures/travail de sol de conservation.

Ligne bleu pointillée : 7,2 (tm/ha), rendement de référence pour le maïs-grain pour la Région 2 - Zone 2 en 2022 selon la Financière agricole du Québec (Gouvernement du Québec, La Financière agricole du Québec, 2022).

Figure 50. Rendement du maïs-grain avec 50 kg N/ha et 100 - 170 kg N/ha dans le dispositif à 12 micro-bassins.



Rotations = T1 : Maïs – Soya – Maïs; T2 : EV – Blé d’automne + T1 – Maïs; T3 : Prairie continue; T4 : Prairie – Prairie – Maïs
 Compaction : C1 = Sol non compacté; C2 = Sol compacté.
 Travail de sol : S1 = Travail conventionnel; S2 = Travail réduit.
 Ligne bleu pointillée : 7,181 (tm/ha), rendement de référence pour le maïs-grain pour la Région 2 - Zone 2 en 2022 selon la Financière agricole du Québec (Gouvernement du Québec, La Financière agricole du Québec, 2022).

Figure 51. Rendement du maïs-grain avec 100 - 170 kg N/ha au dispositif des 48 parcelles

5.4 ESSAI DE FERTILISATION AZOTÉE DANS LE MAÏS-GRAIN DANS LE DISPOSITIF EN 12 MICRO-BASSINS

Un essai de fertilisation azotée a été conduit dans le dispositif en 12 micro-bassins pour évaluer la réponse du maïs-grain à la fertilisation azotée en fonction des effets de la compaction et du système de cultures/travail du sol. Il a été assumé que le maïs -grain ne répondrait pas à une dose supérieure à 200 kg N/ha dans les conditions du sol et de la région et que dans le système de cultures/travail de sol de conservation (S2) la présence du mélange de trèfles intercalaires dans le blé d'automne fournirait un apport de 70 kg/ha de N en équivalent engrais minéral à la culture de maïs-grain. Il est à noter que dans le système de cultures/travail de sol conventionnel (S1), la culture de soya en 2021 a pu apporter de l'azote qui n'a pas été considérée.

Par conséquent, les doses utilisées pour conduire l'essai étaient de 50, 140, 170, 200 kg N/ha dans le système de cultures/travail de sol de conventionnel (S1) et de 50, 70, 100, 130 kg N/ha dans le système de cultures/travail de sol de conservation.

La réponse à l'azote a été modélisée à l'aide d'une fonction quadratique - plateau, communément utilisée et qui ne requiert que trois paramètres. Un exemple de fonction quadratique - plateau est fourni à la Figure 52. Dans ce modèle, la forme de la relation est conditionnelle à la dose (x) :

$$\text{Dose N} < \text{plateau} (x < x_p): \text{rendement} = a + bx + cx^2$$

$$\text{Dose N} > \text{plateau} (x > x_p): \text{rendement} = a + bx_p + cx_p^2$$

où : x = dose N

x_p = dose N lorsque le plateau de rendement est atteint

a = intercept

b = pente

c = pente du terme quadratique = $-0.5 * b/x_p$

Le modèle a été paramétré pour chaque combinaison de traitement de compaction (C1 et C2) et de système de cultures/travail de sol (1 et S2). En raison du nombre de doses et de données restreintes et du fait que dans certaines situations les doses les plus élevées ne suffisaient pour atteindre le rendement maximal, une approche bayésienne a été utilisée pour fournir de l'information aux modèles *a priori* sur les rendements maximaux prévisibles. Plus de 10000 itérations par modèle ont été générées.

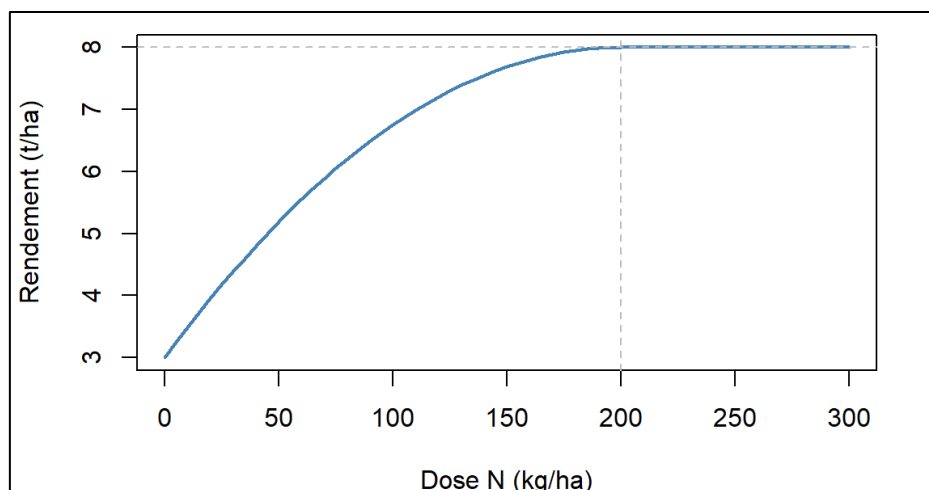


Figure 52. Exemple de courbe ($a = 3$, $b = 0.05$, $x_p = 200$)

Les résultats de la modélisation des rendements de maïs-grain en fonction des doses d'azote sont présentés à la Figure 53. Les observations mesurées dans chaque parcelle sont présentées afin de vérifier que leur comportement par rapport au modèle et l'inverse.

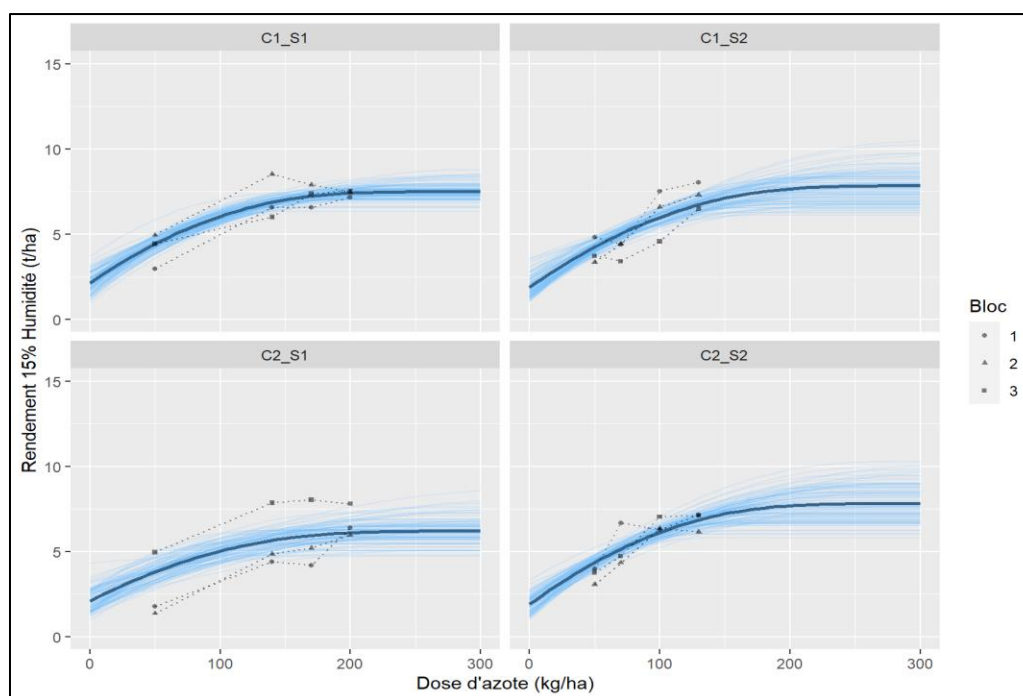


Figure 53. Courbe de réponse quadratique-plateau des rendements de maïs en fonction des doses d'azote

La variance expliquée par les modèles (R^2) varie considérablement selon les traitements, la variance expliquée étant de 69% pour le C1S1, de 60% pour le C2S2, 47% pour le C1S2 et de 26% pour le C2S1, indiquant que ce

dernier modèle est beaucoup moins robuste. Cette variance est faiblement expliquée dans le traitement C1S2 en raison du comportement de la réponse à l'azote dans la parcelle du bloc 3 qui était différent des autres parcelles.

Les rendements maximaux par traitement (rendements plateau estimés en fonction des courbes générées précédemment) ont ensuite été calculés avec leur intervalle de confiance respectif et sont présentés au Tableau 33. *A priori*, les résultats semblent cohérents, les meilleurs rendements maximaux étant obtenus sur les sols non compactés sous système de conservation (7,80 t/ha), alors que les rendements maximaux les plus faibles ont été obtenus sur les sols compactés sous système conventionnel (6,19 t/ha). Les intervalles de confiance sont cependant très larges et indiquent qu'il y a une grande variabilité dans les résultats. Une comparaison plus approfondie des différences entre traitements est donc nécessaire.

Tableau 33. Rendements maximaux moyens et intervalles de confiance des différents traitements

Traitement	Rendement maximal moyen (t/ha)	Intervalle de confiance inférieur	Intervalle de confiance supérieur
C1S1	7,47	6,77	8,49
C1S2	7,80	6,16	9,89
C2S1	6,19	5,02	7,54
C2S2	7,77	6,36	9,70

Le graphique présenté à la Figure 54 présente la probabilité d'atteindre le plateau maximal de rendement, plus la courbe étant compacte, moins il y a d'incertitude quant au rendement maximal. À prime abord, le traitement C1S1 est celui où le modèle arrive aux conclusions les plus fiables, alors que le C1S2 comporte le plus d'incertitude.

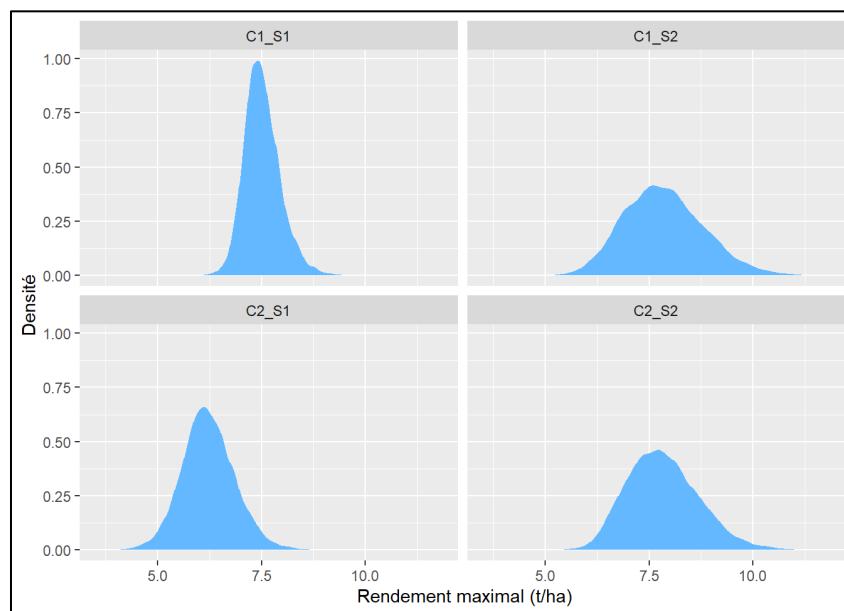


Figure 54. Degré d'incertitude associé au rendement maximal par traitement

La différence de rendement maximal entre les différents traitements a ensuite été calculée en prenant en considération les intervalles de confiance afin de déterminer si ces différences sont à l'extérieur de ces intervalles et donc significatives. Le rapport de cotes (*odds ratio*) a été généré pour chaque scénario de différence pour vérifier la probabilité que le scénario retenu se produise. Les résultats sont fournis sous forme de points saillants dans les lignes suivantes :

Rendement maximal :

- Il n'existe pas d'effet global de la compaction sur les rendements maximaux de maïs dans l'ensemble des deux systèmes de cultures/travail de sol, les intervalles de confiance étant bien supérieurs à la différence entre C1 et C2. La probabilité que les rendements de C1 soient supérieurs à C2 est de 2,7 contre 1, donc probablement dû au hasard.
- **Il existe un effet probable de la compaction des sols dans le système de cultures/travail de sol conventionnel, les rendements ayant tendance à être supérieurs sur les sols non compactés que sur les sols compactés. Cette probabilité est de 19,2 contre 1.**
- Il n'existe pas d'effet de la compaction sur les rendements de maïs dans le système de cultures/travail de conservation (probabilité de 1 contre 1, donc nulle).
- Il n'existe pas d'effet global du système de cultures/travail du sol sur les rendements de maïs dans l'ensemble des deux traitements de compaction (probabilité de 1 contre 3,5, donc très faible).
- Il n'existe pas d'effet du système de cultures/travail du sol sur le rendement maximal dans les sols non compactés (Probabilité de 1 contre 1,6, donc quasi nulle).
- **Il semble exister un effet du système de cultures/travail du sol dans les sols compactés, les rendements maximaux étant légèrement supérieurs dans les parcelles en conservation. Cette probabilité est de 1 contre 15,6.**

Dose plateau :

Le même exercice a été exécuté pour calculer la dose à laquelle le rendement atteint le plateau maximal. Les résultats sont présentés au Tableau 34 et les graphiques d'incertitudes à la Figure 55.

Tableau 34. Doses d'azote nécessaire pour atteindre le rendement maximal et intervalles de confiance.

Traitement	Dose plateau moyenne (kg/ha)	Intervalle de confiance inférieur	Intervalle de confiance supérieur
C1S1	208	146	292
C1S2	225	150	309
C2S1	217	134	305
C2S2	213	142	299

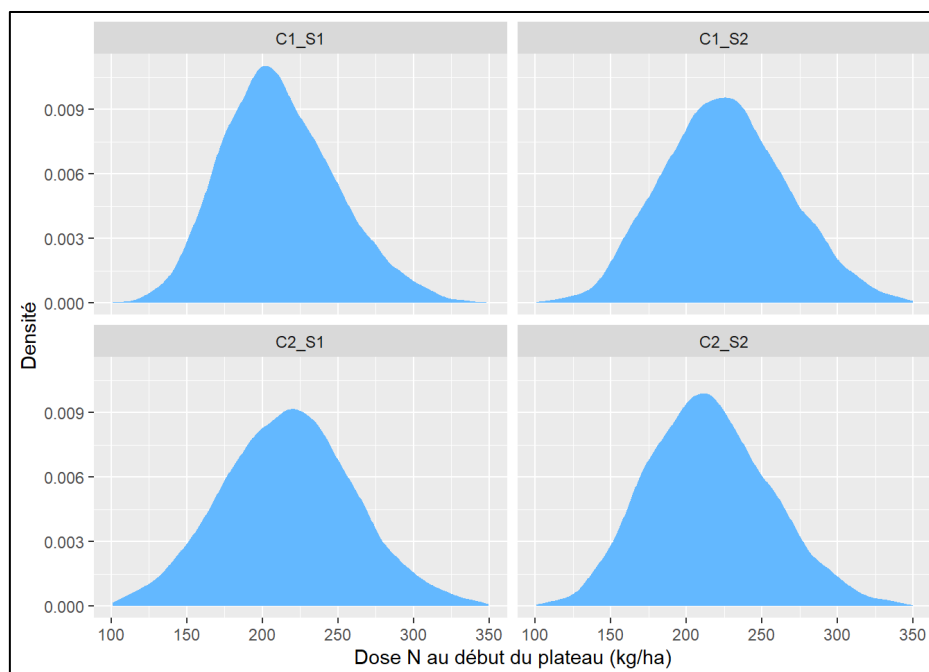


Figure 55. Degré d'incertitude associé à la dose d'azote pour atteindre le rendement maximal (plateau).

- Il n'existe pas d'effet global de la compaction sur la dose d'azote nécessaire pour atteindre le plateau du rendement maximal, ni d'effet de la compaction dans les sols à la fois sous travail conventionnel et de conservation. Les probabilités se situent toutes en deçà de 1 contre 1,2, donc nulles.
- Le même constat s'applique pour l'effet du travail du sol, puisqu'il n'y a ni un effet global, ni un effet sur les sols compactés et les sols non compactés. Les probabilités se situent en deçà de 1 contre 1,5, encore une fois quasi nulles.

L'incertitude obtenue sur le rendement maximal et les doses maximales nécessaires pour l'obtenir est relativement importante en raison des trop faibles doses maximales essayées (130 et 200 kg N/ha). Si une dose économique optimale avait été calculée, elle pourrait être plus proches de ces doses appliquées et l'incertitude pourrait diminuer quelque peu. En revanche, un plus grand choix de doses à des niveaux plus importants (supérieures à 130 kg N/ha) aurait été nécessaire dans le traitement de conservation avec trèfles intercalaires pour mieux établir le rendement maximal ainsi que la dose pour l'attendre qui semblait même supérieure à 200 kg N/ha.

En conclusion, les effets des traitements de compaction et de système de cultures/travail de sol sur la réponse du maïs aux différentes doses d'azote appliqués ne sont pas statistiquement importants, même si certaines tendances sont observées. Ce constat n'est, encore une fois, pas surprenant, considérant le fait qu'il s'agisse que de la fin d'un premier cycle d'une rotation relativement courte et que les indicateurs physico-chimiques des sols n'ont pas grandement évolué depuis la mise en place du dispositif, tel que présenté à la section 5.2 du présent document. Les premières tendances dégagées sont tout de même cohérentes, et semblent indiquer que les sols sous de systèmes de travail en conservation produisent de meilleurs rendements maximaux dans les sols compactés, et que les sols non compactés produisent de meilleurs rendements maximaux que les sols compactés

dans les sols sous travail conventionnel. Un deuxième cycle de rotation permettra probablement d'accentuer les phénomènes et de dégager des constats plus clairs, et pourraient permettre d'approfondir les connaissances sur les effets des systèmes de cultures, du travail de sol et de la compaction, ainsi que de leurs interactions sur les propriétés du sol, la productivité des cultures et la réponse aux engrais; des effets qui sont apparus relativement mitigés après un premier cycle de rotation seulement.

5.5 IMPACT DES PRATIQUES AGRICOLES SUR LE RÉGIME HYDRIQUE

5.5.1 Impact des régies culturales sur les 12 micro-bassins

L'impact des quatre régies culturales mises en place à la ferme expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon sur le régime hydrique (quantité et qualité) est évalué avec un modèle statistique généralisé additif mixte de type *Generalized Additive Mixed Model* (GAMM). Les régies culturales impliquent une comparaison entre des sols compactés et non compactés, ainsi que des systèmes de pratiques agricoles conventionnelles et de conservation, ces conditions étant répétées trois fois (Section 3.4.1). L'évaluation du régime quantitatif porte sur la proportion de ruissellement de surface (R) définie comme le ratio entre le volume d'eau ruisselé (V_{Ruis}) et le volume total d'écoulement (V_{Tot}) :

$$R = \frac{V_{Ruis}}{V_{Tot}} \quad (6a)$$

V_{Tot} est posé comme la somme de V_{Ruis} et du volume d'eau écoulé au drain (V_{Drain}) tel que :

$$V_{Tot} = V_{Ruis} + V_{Drain} \quad (6b)$$

La Figure 56 ci-dessous illustre l'évolution de la proportion de ruissellement (R) pour les quatre régies culturales sur la période de mesure et pour les trois répétitions. Les volumes sont agrégés par période d'échantillonnage d'octobre 2020 à décembre 2022. La grosseur des points informe sur le volume total d'écoulement (V_{Tot}) observé à chaque période.

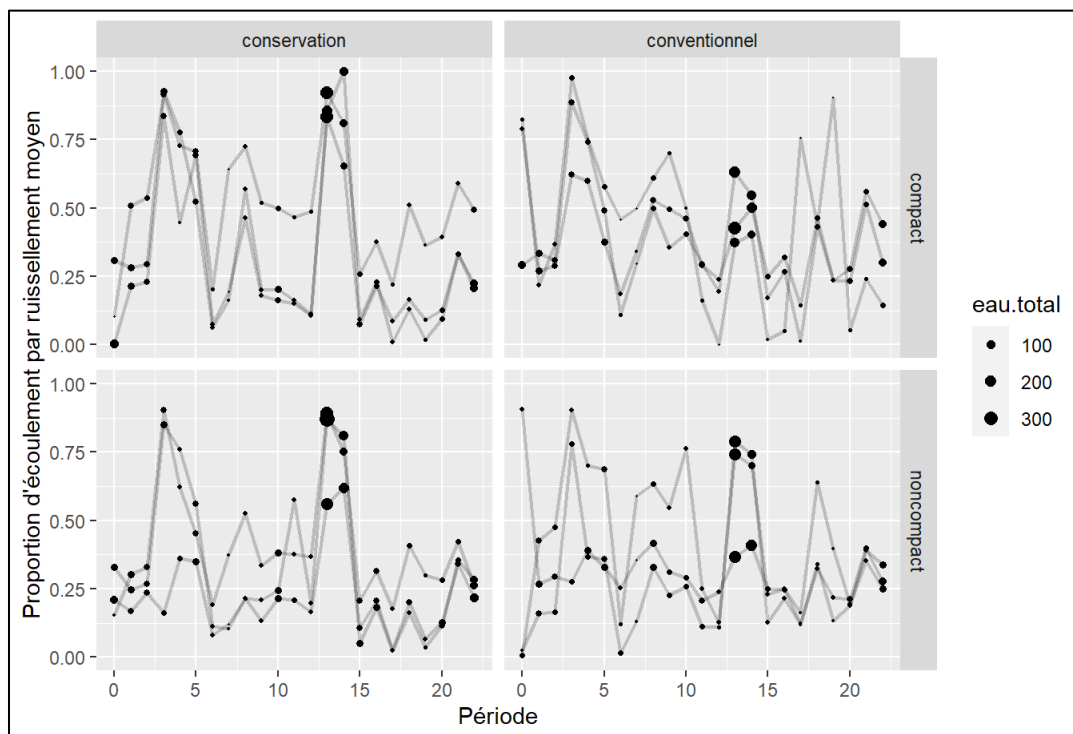


Figure 56. Évolution de la portion de ruissellement (R) mesurée pour les 4 régies culturales.

L'approche *Generalized Additive Mixed Model* (GAMM) permet de modéliser directement les proportions (à l'aide d'une distribution beta avec transformation logit), les relations non linéaires et les effets aléatoires. Le changement (non linéaire) dans le temps est modélisé avec un lissage (*smoothing splines - Gaussian process*) et l'effet des traitements en effets fixes. Les différences entre parcelles sont modélisées avec un effet aléatoire (distribution normale). Afin de vérifier la validité des modèles, la distribution des résidus (différence entre les valeurs observées et estimées) est analysée. Pour déterminer si un effet lié à une régie culturale est significatif, on compare le modèle statistique à des modèles simplifiés et à un modèle nul (sans effet de traitement). On compare les modèles à l'aide du critère d'information AIC (*An information criterion*, Akaike, 1974), décrivant la correspondance des données observées à celles produites par le modèle. Le critère AIC constitue une mesure de l'information inexploitée avec une pénalité imputée pour la complexité du modèle. Un modèle parcimonieux (peu de paramètres) reproduisant adéquatement les observations a un plus petit AIC qu'un modèle plus complexe, ou représentant moins bien les observations. Une différence de deux ou plus ($\Delta AIC > 2$) entre deux modèles est généralement considérée comme une différence suffisante. On considère qu'il y a un effet du traitement (ou régie culturale) si le critère AIC du modèle avec traitement est plus petit que celui du modèle nul ($\Delta AIC > 2$).

Les paramètres du modèle complet (ID =1, Tableau 35) sont d'abord estimés. Ce dernier inclut: (1) une évolution temporelle différente pour chaque combinaison de traitement (condition), (2) une moyenne différente pour chaque combinaison de régies et une moyenne différente pour chaque micro-bassin (effet aléatoire). On compare le modèle complet à des modèles simplifiés (jusqu'au modèle nul) pour tester l'effet des traitements sur la moyenne et la tendance temporelle. Ici, le modèle qui représente le mieux les données est celui avec un effet système de pratiques culturales (ID = 9, $AIC \approx -190.6$). L'effet des pratiques culturales est significatif puisque le modèle nul a un AIC nettement plus élevé ($\Delta AIC \approx 20$). Les modèles plus compliqués ne sont pas supportés, le candidat le plus près étant le modèle équivalent incluant un effet de la compaction sur la proportion moyenne (ID = 5, ≈ -190.3). La description du modèle statistique complet est présentée à l'annexe X.

Tableau 35. Critère d'information AIC pour chaque modèle statistique évalué.

ID	Description	AIC	Note
1	mod.pRuiss.full	-186.2170	Modèle complet
2	mod.pRuiss.full2	-186.4894	
3	mod.pRuiss.full3	-169.7885	
4	mod.pRuiss.full4	-169.8531	
5	mod.pRuiss.full5	-190.3282	Modèle équivalent
6	mod.pRuiss.full6	-156.7676	
7	mod.pRuiss.compact	-156.3675	
8	mod.pRuiss.compact2	-169.5992	
9	mod.pRuiss.systcult	-190.5568	Modèle le mieux supporté
10	mod.pRuiss.systcult2	-170.1766	
11	mod.pRuiss.null	-169.9134	Modèle nul

La Figure 57 présente l'évolution de la proportion de ruissellement (R) estimée par le modèle statistique «*mod.pRuiss.systcult*» (ID = 9, Tableau 35), ce dernier expliquant environ 60% de la variation temporelle de R . Il est possible d'observer des variations saisonnières marquées (les périodes 5 et 15 correspondent aux printemps 2021 et 2022 respectivement) pour le système de conservation par rapport au système conventionnel. Les régies culturales n'induisent cependant aucun effet sur la valeur moyenne. La compaction du sol n'induit non plus aucun impact sur l'évolution de R .

L'accentuation des variations saisonnières du ruissellement de surface associée aux régies de conservation est évidemment un effet non souhaité. Nous expliquons ce phénomène par l'absence de travail du sol effective dans le cadre de la régie de conservation qui peut potentiellement induire un écoulement préférentiel en surface. Nous posons l'hypothèse que cette condition sera effective à court terme et éventuellement mitigée par une amélioration des conditions physiques des sols découlant des pratiques de conservation. Ce dernier peut aussi s'expliquer par le caractère naturellement compact de la série Le Bras et le délai nécessaire aux pratiques de conservation pour améliorer les propriétés physiques de cette série de sol. Ce constat met en lumière le fait que la mise en place de pratiques de conservation des sols peut avoir un impact indésirable à court terme (accentuation saisonnière du ruissellement de surface) et que l'incidence positive de ces pratiques ne pourront s'observer qu'à moyen ou long terme.

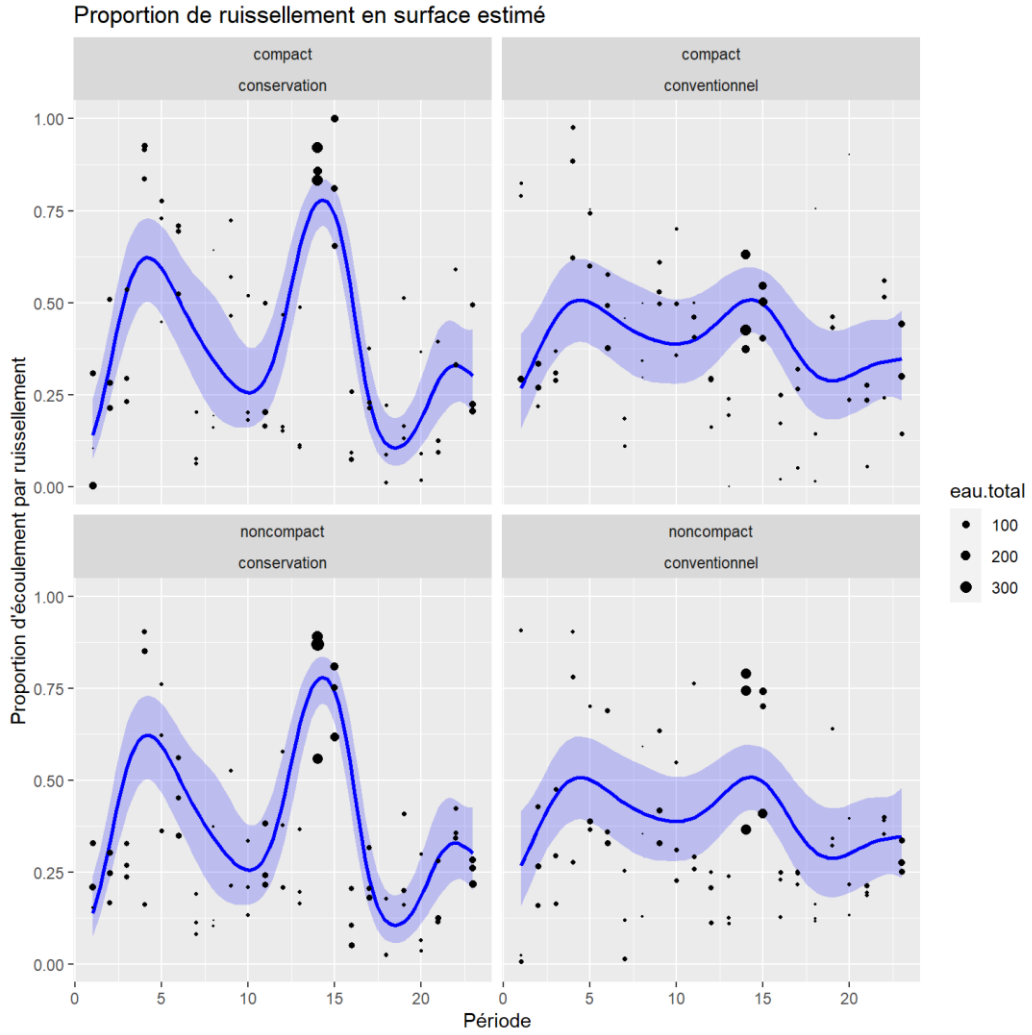


Figure 57. Évolution de la portion de ruissellement issue du modèle statistique supporté.

L'évaluation du régime qualitatif (qualité de l'eau) porte sur les paramètres suivants : matières en suspension (MES), phosphore total (P-total) et nitrates (N-NO₃). Les charges sont compilées par période d'échantillonnage et spécifiées par volume d'eau ruisselé en surface (V_{Ruis}), écoulé au drain (V_{Drain}) et total (V_{Tot}) respectivement. L'analyse se développe selon la même approche décrite précédemment pour la proportion de ruissellement de surface (R). Le Tableau 36 ci-dessous synthétise les conclusions obtenues pour l'ensemble des paramètres de qualité. L'évolution des charges totales issues des modèles statistiques supportés est présentée à l'annexe Y.

Tableau 36. Conclusions issues de l'analyse statistique pour les charges de matières en suspension, phosphore total et nitrates.

Variable	Ruissellement surface	Écoulement au drain	Écoulement total
MES	Charges plus élevées pour le système conventionnel, surtout durant quelques épisodes.	La tendance temporelle diffère entre les systèmes. La charge moyenne ne diffère pas.	La charge est légèrement plus élevée pour le système conventionnel.
P-total	La tendance temporelle diffère entre les systèmes. La moyenne ne diffère pas.	La tendance temporelle diffère entre les systèmes. La charge moyenne est très légèrement plus élevée pour le système de conservation.	Les fluctuations ne se produisent pas au même moment. La charge moyenne ne diffère pas entre les systèmes.
N-NO ₃	La charge est légèrement plus élevée pour la régie conventionnelle.	La tendance temporelle diffère entre les régies. La moyenne ne diffère pas.	La charge est plus élevée pour la régie conventionnelle.

5.5.2 Impact des propriétés physiques des sols sur les 12 micro-bassins

Un scénario visant à simuler l'impact de l'amélioration des propriétés physiques des sols sur la réponse hydrologique a été développé sur les 12 micro-bassins à Saint-Lambert-de-Lauzon. Ce scénario est bâti à partir des données mesurées lors de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec (Gasser et al., 2023) sur de nombreuses séries de sols pour les horizons Ap1(~0-10cm), Ap2(~10-25cm) et B(~25-35cm), pour des surfaces cultivées et des surfaces témoins non cultivées (p.ex. bord de champs, haie brise-vent). Le scénario ici proposé pose l'hypothèse que les sols témoins présentent des propriétés physiques généralement améliorées par rapport aux sols cultivés. L'amélioration (changement relatif d'une condition cultivée par rapport à une condition témoin) est d'abord quantifiée en comparant les propriétés des sols témoins et cultivés mesurées par l'EESSAQ, puis appliquée aux paramètres de sols imposés en entrée au modèle hydrologique SWAT (section 4.3.6). Ces derniers ont été mesurés sur les 12 micro-bassins en juin 2022 dans le cadre du présent projet. Les paramètres retenus pour simuler l'amélioration physique des sols sont la masse volumique apparente (MVA), la conductivité hydraulique (SOL_K, mesurée aux profondeurs 10-25 cm et 35-50 cm) et la réserve en eau utile (SOL_AWC). La réserve en eau utile n'étant pas mesurée dans l'EESSAQ, la teneur en eau à 10 kPa (TE₁₀) est utilisée comme proxy de la teneur en eau 33 kPa (équation 7a), soit la capacité au champ (TECC). Considérant la définition ci-dessous (équation 7b), on pose l'hypothèse que la teneur en eau à 1500 kPa (au point de flétrissement, TEF) demeure constante et que l'amélioration de la réserve en eau utile (SOL_AWC) est approximée par le changement de la teneur en eau à 10 kPa (ΔTE_{10} , équation 7c) :

$$\text{TECC} \sim \text{TE}_{10} \quad (7a)$$

$$\text{SOL_AWC} \sim \text{TE}_{10}\text{-TEF} \quad (7b)$$

$$\text{si TEF} = \text{cte} \rightarrow \Delta\text{SOL_AWC} \sim \Delta\text{TE}_{10} \quad (7c)$$

Le Tableau 37 présente les valeurs médianes des trois propriétés physiques de sol citées ci-dessus (MVA, SOL_K, TE₁₀) pour la série de sol Le Bras associée au site de Saint-Lambert-de-Lauzon (fiche synthèse disponible à l'annexe AA). Selon la propriété de sol, environ 16 mesures sont disponibles pour les sols cultivés, et 8 pour les sols témoins. Les valeurs médianes sont estimées pour les horizons AP2 et B indépendamment, mais aussi à partir du regroupement des valeurs mesurées sur les deux horizons (AP2+B). Pour chaque propriété, une valeur quantitative de changement est choisie considérant qu'elle propose un scénario à la fois réaliste (physiquement cohérent) et contrasté (valeur suffisamment élevée d'amélioration pour percevoir un effet sur la réponse hydrique simulée). Cette amélioration est ensuite appliquée aux propriétés initialement attribuées aux deux premières couches de sols représentées dans le modèle SWAT, correspondant respectivement aux profondeurs 0-23 et 23-43 cm.

Tableau 37. Propriétés physiques entre des sols cultivés et témoins issues des échantillons analysés dans l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec (Gasser et al., 2023)*.

Propriété	Horizon	Cultivé (n~16)	Témoin (n~8)	Changement (%)
Masses Volumiques Apparentes (MVA, g/cm ³)	AP2 (10-20 cm)	1,36	1,3	-4,53**
	B (20-40 cm)	1,73	1,67	-3,61
	AP2+B (10-40 cm)	1,51	1,47	-2,73
Conductivité hydraulique (SOL_K, cm/h)	AP2 (10-20 cm)	0,22	0,38	+75,24**
	B (20-40 cm)	0,09	0,15	+71,36
	AP2+B (10-40 cm)	0,15	0,31	+111,11
Teneur en eau à 10 kPa (TE ₁₀ , -)	AP2 (10-20 cm)	0,4	0,41	+2,24
	B (20-40 cm)	0,32	0,31	-3,71
	AP2+B (10-40 cm)	0,35	0,37	+5,05**

* Valeurs médianes.

** Écarts retenus pour la scénarisation de l'amélioration des propriétés physiques des sols.

Le Tableau 38 présente les valeurs de changements (médianes et maximales) des composantes du bilan hydrologique découlant d'un scénario simulant l'amélioration des propriétés physiques des sols pour les 12 micro-bassins à Saint-Lambert-de-Lauzon. Il est possible d'observer que le ruissellement de surface observerait, sous des conditions de sol améliorées, une réduction du ruissellement de surface de l'ordre de -5%. Il est également possible d'observer une augmentation marquée de l'évapotranspiration, de l'ordre +16%. Le modèle SWAT traduit également le scénario d'amélioration des conditions physiques des sols par une augmentation notable de l'écoulement latéral (contribution des couches superficielles de sol aux écoulements hydriques totaux), au détriment des processus sous-jacents. En effet, l'écoulement au drain, l'écoulement souterrain, la recharge des aquifères et la percolation dans les sols observent tous une diminution sous le scénario amélioré. Quoique cohérente avec le fait que le matériau de surface repose sur un matériau plus lourd et plus dense l'ampleur de l'augmentation de l'écoulement par la couche superficiel de sol (+279%) est à considérer avec prudence et retenue considérant le caractère simplifié des processus modélisés par SWAT.

Les résultats présentés au Tableau 38 correspondent à un changement des composantes du bilan hydrique à l'échelle de parcelles agricoles découlant d'une amélioration scénarisée des propriétés physiques des sols. Le bilan hydrique est simulé par modélisation et l'amélioration des conditions physiques des sols établie à partir des données colligées dans l'EESSAQ. Nous expliquons les résultats par la création d'un écoulement horizontal préférentiel dans les couches superficielles de sol. Ces résultats sont valides, mais il faut les mettre perspectives des limitations et simplifications découlant des pratiques de modélisation et de scénarisation proposées pour produire ces simulations. Le modèle SWAT présente effectivement une représentation simplifiée des écoulements souterrains, ce qui limite la confiance attribuée aux conclusions proposées. Les résultats et conclusions demeurent aussi spécifiques aux conditions locales du site de Saint-Lambert (climat, sol, pratiques culturales...) et difficilement régionalisables.

Tableau 38. Changements des composantes du bilan hydrologique simulés à partir des scénarios d'amélioration des propriétés physiques des sols pour les 12 micro-bassins à Saint-Lambert-de-Lauzon.

Composante du bilan hydrologique	Valeur médiane de changement	
	Relatif (%)	Absolu (mm)
Ruissellement de surface ¹	-5,17	-15,5
Écoulement au drain ²	-55,7	-112
Écoulement souterrain ³	-30,3	-29,5
Recharge des aquifères ⁴	-30,1	-47,2
Production hydrique ⁵	-7,11	-47,0
Évapotranspiration	+16,3	+76,7

¹ Portion des précipitations qui s'écoule à la surface du sol; ² portion des précipitations qui s'écoule via les drains; ³ portion des précipitations qui s'écoule via les drains; ⁴ portion des précipitations qui percole du sol vers les aquifères (peu profond et profond); ⁵ portion des précipitations contribuant à l'écoulement en rivière, correspond à la somme du ruissellement de surface, de l'écoulement au drain et aux écoulements souterrains à laquelle il faut soustraire les pertes par transmission (non présentées ici).

5.5.3 Impacts des pratiques agricoles à l'échelle des bassins versants agricoles

Le Tableau 39 ci-dessous synthétise l'impact sur le bilan hydrologique des scénarios agricoles à l'échelle des deux bassins versants Castor et Pot-au-Beurre (Section 4.3.5). Pour chaque bassin, les composantes du bilan hydrologique sont présentées pour les scénarios de référence et améliorés. Les valeurs de changement, associées à l'impact hydrologique de l'amélioration des pratiques agricoles, sont exprimées en valeur absolue (mm/an) et relative (pourcentage). Il est possible d'observer que les résultats diffèrent d'un bassin à l'autre. L'impact anticipé des mesures de conservation sur le bilan hydrique est généralement plus marqué pour le bassin Castor que pour le bassin Pot-au-Beurre. Ceci suggère que l'analyse de l'impact des mesures de conservation sur le bilan hydrique est sensible aux spécificités des conditions et des pratiques culturelles locales. En conditions améliorées, les deux bassins observent une augmentation modérée du ruissellement de surface (+6,7% et +2,5%) et de l'écoulement au drain (+24% et +2,5%). Le bassin Castor présente cependant une augmentation notable de l'écoulement souterrain (+30%), de la percolation dans le sol (+33%), de la recharge de l'aquifère (+30%) et de la productivité hydrique (+21%). La présentation des composantes du bilan hydrologique à l'échelle mensuelle pour le bassin Castor (Annexe Z) indique que l'augmentation de productivité hydrologique s'observerait principalement à l'été et à l'automne, périodes typiquement propices aux étiages. La hausse du ruissellement observé sur le bassin Castor s'explique notamment par une réduction notable de l'évapotranspiration (ET) au printemps observable à l'annexe Z, ce qui affecte aussi les composantes du bilan hydrologique. Nous ne sommes malheureusement pas en mesure d'expliquer ce comportement du modèle et ne pouvons exclure, à ce stade-ci, une possible erreur dans l'attribution des paramètres.

Tableau 39. Composantes des bilans hydrologiques simulées à partir des scénarios de référence et alternatifs pour les bassins Castor et Pot-au-Beurre.

Bassins versants modélisés	Composante du bilan hydrologique	Scénario de référence (mm/an)	Scénario amélioré (mm/an)	Changement (mm/an)	Changement (%)
Castor	Ruissellement de surface	134	143	+9	+6,7
	Écoulement au drain	211	262	+51	+24
	Écoulement souterrain	132	171	+39	+30
	Recharge des aquifères	265	344	+79	+30
	Production hydrique	474	572	+98	+21
Pot-au-Beurre	Ruissellement de surface	209	230	21	+10
	Écoulement au drain	122	125	3	+2,5
	Écoulement souterrain	13	9	-4	-30
	Recharge des aquifères	259	259	0	0
	Production hydrique	310	322	+12	+3,9

Le Tableau ci-dessous synthétise l'impact des scénarios agricoles sur les charges annuelles moyennes de matières en suspension (MES), phosphore total (P-total) et nitrates (N-NO₃) pour le bassin Pot-au-Beurre. Pour chaque bassin, les charges annuelles sont simulées pour les scénarios de référence et alternatifs. Les valeurs de changement, associées à l'impact hydrologique de l'amélioration des pratiques agricoles, sont exprimées en pourcentage. Il est possible d'observer une réduction systématique des charges en MES et en phosphore total (-46% et -36% respectivement, changement évalué sur la période entière) pour le scénario amélioré. Nous expliquons la réduction des charges en P dans le scénario amélioré par les réductions de l'occupation du territoire dédiée aux cultures annuelles, ce qui réduit les charges à l'échelle du bassin pour une gestion équivalente des apports en fertilisant. En effet, les surfaces en cultures annuelles sont réduites et donc l'apport globale en kg est moindre pour un taux d'apport (kg/ha) par culture qui demeure inchangé entre les scénarios de référence et amélioré. Aussi, il faut tenir compte de la fertilisation des prairies qui reçoivent d'apport. Le scénario amélioré prévoit un changement du calendrier d'application pour éviter les épisodes de ruissellement (printemps/automne) et améliorer l'assimilation des fertilisants par la culture. L'impact des pratiques de conservations sur les charges en nitrates est moins concluant, présentant une réduction en 2010 et 2012, puis une augmentation les années suivantes (2012 à 2014). L'interprétation de ces résultats doit être nuancé par la faible performance des charges simulées par le modèle SWAT (Figure 40 et annexe P).

Tableau 40. Changements en termes de charges annuelles de matières en suspension (MES), phosphore total (P-total) et nitrates (N-NO₃) simulés à partir des scénarios de référence et alternatifs pour le bassin Pot-au-Beurre.

Bassin	Année	Matières en suspension (MES)	Phosphore total (P-total)	Nitrates (N-NO ₃)
Pot-au-Beurre	2010	-24,9	-17,3	-27,8
	2011	-30,3	-20,4	-23,4
	2012	-83,9	-79,5	+13,2
	2013	-76,2	-68,9	+61,6
	2014	-12,4	3,8	+57,3
	Période entière	-46,0	-36,3	+31,1

6. CONCLUSIONS

Le présent rapport décrit la réalisation du mandat confié à l'IRDA par le MAPAQ visant à évaluer l'impact des systèmes culturaux et de la dégradation physique des sols sur la réponse hydrologique à l'échelle des champs et des bassins versants. Sur la base des travaux réalisés à la ferme expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon et sur un exercice de modélisation à l'échelle du champ et du bassin versant, il a été possible de démontrer que :

- Les régies de conservation peuvent favoriser à court terme le ruissellement en surface au printemps (confiance élevée dans le contexte du dispositif de Saint-Lambert, analyse statistique significative basée sur des observations).
- Les charges en MES sont plus élevées pour le système conventionnel, surtout pour le ruissellement de surface. La charge moyenne en phosphore total associée à l'écoulement total (surface + drain) ne diffère cependant pas entre les deux systèmes (conservation et conventionnel). La charge nitrate liée à l'écoulement total est finalement plus élevée pour la régie conventionnelle (confiance élevée dans le contexte du dispositif de Saint-Lambert, analyse statistique significative basée sur des observations).
- L'accroissement du ruissellement de surface associée aux régies de conservation ne serait persistant puisque la scénarisation de l'amélioration des propriétés physiques des sols a démontré une réduction du ruissellement de surface de l'ordre de -5% annuellement, favorisant la contribution hydrique (écoulement latéral) de la couche superficielle de sol et l'évapotranspiration (confiance modérée, analyse basée sur une modélisation hydrologique à base physique simplifiée, validation sur des observations collectées à l'échelle d'un seul site expérimental).
- L'adoption des pratiques de conservation pourraient affecter positivement le bilan hydrique à l'échelle du bassin versant, favorisant la percolation de l'eau dans les sols, la recharge des aquifères et les apports hydriques en période d'étiage (confiance limitée : comportement difficilement explicable du modèle hydrologique sur le bassin Castor, scénarisation simplifiée des pratiques agricoles, variabilité notable d'un bassin versant à l'autre).
- L'adoption des pratiques de conservation des sols réduirait les charges en MES et en phosphore total (confiance limitée, analyse basée sur une modélisation hydrologique fortement biaisée, scénarisation simplifiée des pratiques agricoles).

Nous reconnaissons que la portée des analyses demeurent limitées. À ce stade-ci du protocole expérimental, nous jugeons qu'il s'agit du meilleur compromis évitant de se compromettre à des conclusions scientifiques potentiellement invalides. Le mandat sera reconduit sur trois ans. Dans cette perspective, nous recommandons : (1) de reconduire les analyses des rendements, de la compaction du sol, de l'hydrologie et de la qualité de l'eau au dispositif de Saint-Lambert en intégrant un second cycle de culture; (2) de raffiner les techniques de modélisation en valorisant les observations colligées au dispositif de Saint-Lambert; (3) d'appliquer la scénarisation de l'amélioration des propriétés physiques des sols à l'échelle des bassins versants; (4) de conduire une analyse de modélisation en contexte de changements climatiques pour confirmer si les pratiques de conservation des sols s'avère un mécanisme d'adaptation potentiellement efficace pour limiter la vulnérabilité des usages de l'eau.

7. ACTIVITÉS DE DIFFUSION

Les activités suivantes ont été réalisées :

- Présentation aux pépinières forestières publiques du MFFP (15 mars 2022, 30 participants)
- Présentation à la table sectorielle en grandes cultures (21 avril 2022, 40 participants)
- Présentation au centre Biopterre (17 novembre 2022, 30 participants)
- Présentation à 60 étudiants en agronomie de l'Université Laval (7 octobre 2022, 20 participants)

Les activités suivantes sont prévues :

- Dépôt du rapport final sur le site web de l'IRDA en septembre 2023
- Présentation à la conférence Adaptation Futures en octobre 2023 (<https://adaptationfutures.com/fr/>)
- Présentation à la table sectorielle en grandes cultures à l'automne 2023
- Production et dépôt d'un article scientifique en décembre 2023
- Présentation au regroupement CentrEau (<https://centreau.org/>) à l'hiver 2024
- Présentation à l'assemblée générale de l'*European Geoscientist Union* (EGU) en avril 2024

ANNEXES

ANNEXE A - PLAN DE TRAVAIL MODIFIÉ

OBJECTIFS	INDICATEURS DE RÉSULTATS	ÉCHÉANCIER	RÉALISATION
1. Établir le plan de travail	Plan de travail déposé (volets1 et2) (oui/non)	Mai 2020	Oui
2. Établir le plan de travail révisé du volet 2	Plan de travail déposé (oui/non)	Février 2022	Oui
3. Réaliser les essais en dispositifs micro-bassins et parcellaire (volet 1)	Nombre d'essais réalisés	Novembre 2022	Oui
4. Modélisation hydrologique à l'échelle des micro-bassins Étape 4 b	Modélisation complétée (oui/non)	Juillet 2022	Oui
5. Produire la base de données hydrologiques à l'échelle des bassins versants expérimentaux.	Dépôt de la Base de données produite	Juin 2022	Oui
6. Modélisation hydrologique à l'échelle des bassins versants Projection: effets de scénarios de régies et des propriétés physiques des sols	Niveau de précision du modèle Dépôt du Modèle hydrologique en bassins versants	Février 2023	Oui
7. Rédaction des documents et suivi du projet	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de rencontres avec le Comité d'orientation • Dépôt de rapports d'étape (volets 1 et 2) • Coûts du projet 	Mars 2023	Oui
	<ul style="list-style-type: none"> • Dépôt d'un rapport final • Clarté du rapport final • Qualité scientifique • Dépôt du rapport financiers et respect du budget • Rédaction d'une fiche synthèse 	Août 2023	Oui
8. Diffusion des résultats	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de conférences pour présenter les résultats (volets 1 et 2) • Nombre de participants par conférence et au total (volets 1 et 2) • Nombre de visites des parcelles de Saint- Lambert (volet 1) • Liste des participants avec leur employeur (volet 1) • Article scientifique 	Décembre 2023	3 conférences (30 participants par conférence). 2 visites des parcelles. Plan diffusion proposé à la section 5.

ANNEXE B - ANALYSES DES BIAIS POUR LA GRILLE CAPA

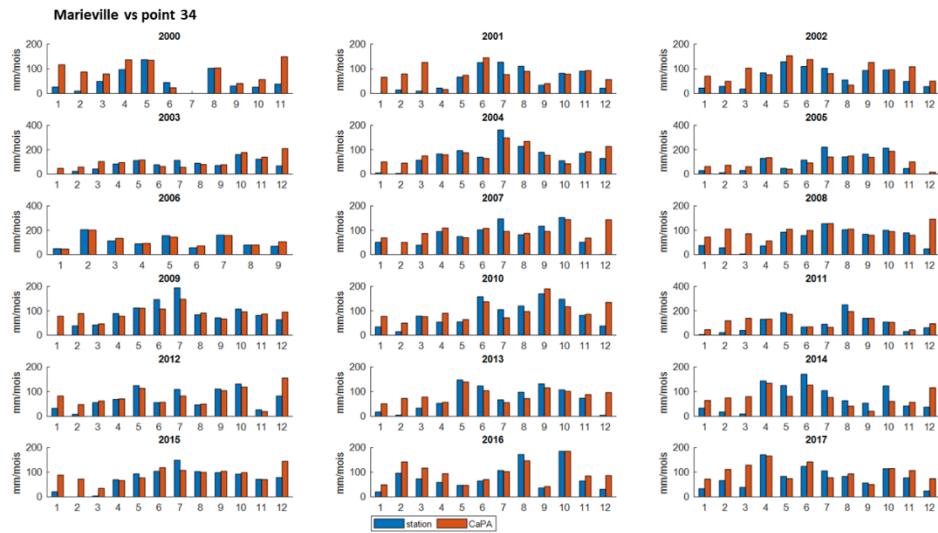


Figure B1. Les précipitations mensuelles totales à la station de Marieville et au point 34 de la grille CaPA, pour la période de 2000 à 2017.

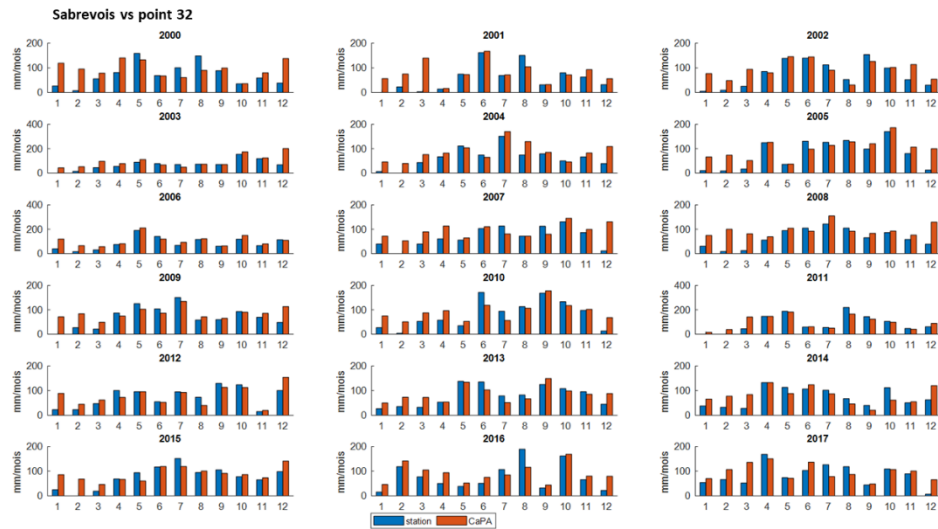


Figure B2. Les précipitations mensuelles totales à la station de Sabrevois et au point 32 de la grille CaPA, pour la période de 2000 à 2017.

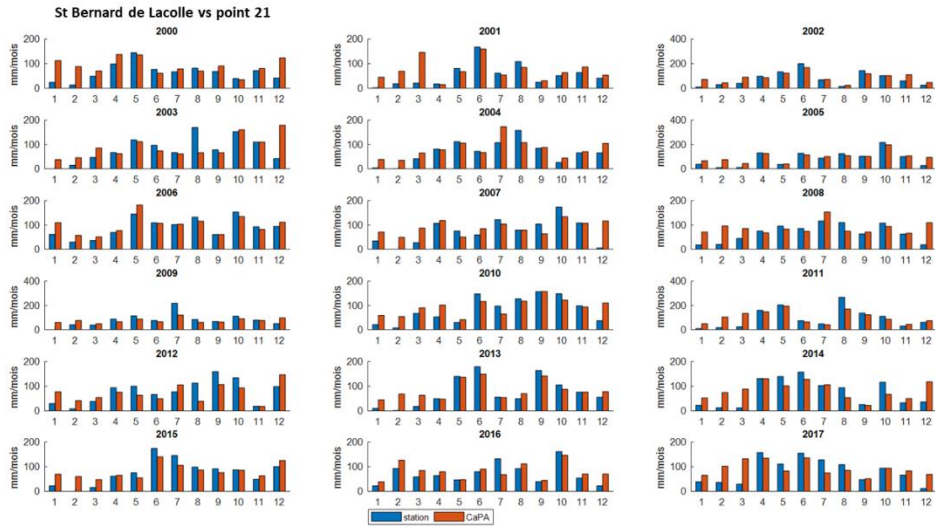


Figure B3. Les précipitations mensuelles totales à la station de Saint-Bernard-de-Lacolle et au point 21 de la grille CaPA, pour la période de 2000 à 2017.

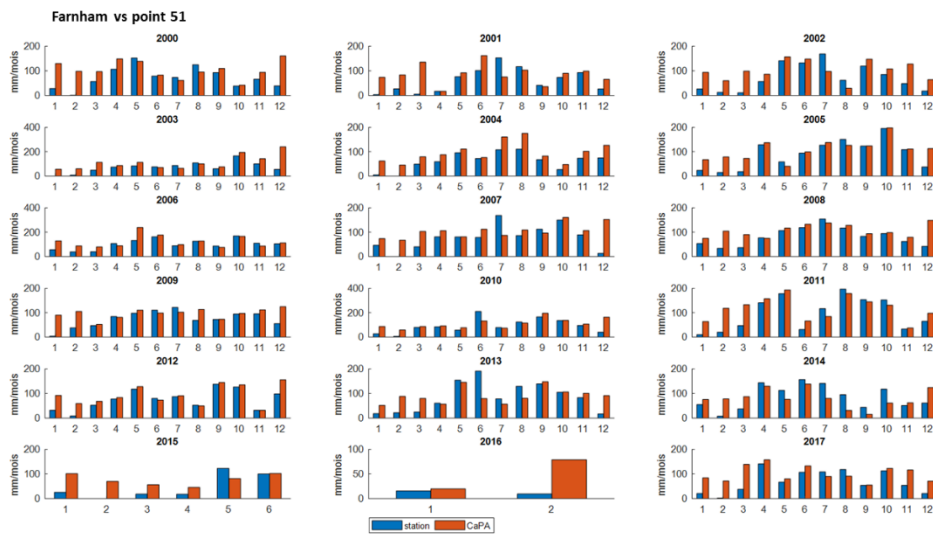


Figure B4. Les précipitations mensuelles totales à la station de Farnham et au point 51 de la grille CaPA, pour la période de 2000 à 2017.

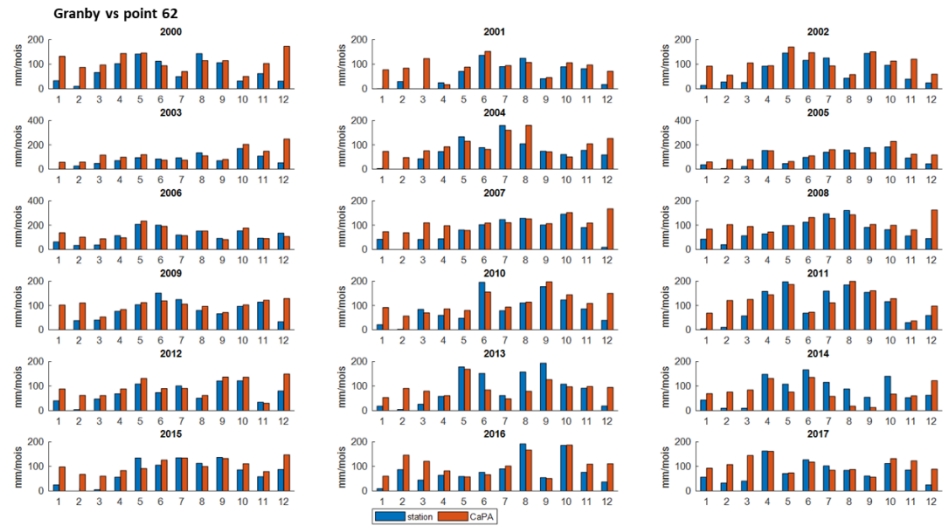


Figure B5. Les précipitations mensuelles totales à la station de Granby et au point 62 de la grille CaPA, pour la période de 2000 à 2017.

ANNEXE C - DÉTAILS DES GEOTADABASES ET SOURCES DES DONNÉES POUR LA MODÉLISATION SWAT

- Jeu de données '*Hydrographie*'
 - *cadre_etude* ; cadre délimité manuellement pour le découpage des données et leur entrée dans SWAT
 - *hydro_l* ou *ce_verb* : cours d'eau linéaire extrait de la GRHQ (2016) ou cours d'eau verbalisé de la MRC.
 - *bassin* : délimité par SWAT sur la base du MNT 1 m et du réseau hydrographique
 - *sous_bassins* : délimité par SWAT sur la base du MNT 1 m et du réseau hydrographique
 - *stations_hydro* : Irda. 2020. Données hydro-agricoles sur petits bassins versants.
 - *stations_meteo*: point de grille *CaPA* (Mai et al., 2020) et du MELCCFP (2020)
- Jeu de données '*Occupation du sol*'
 - *bdppad_2010*
 - *ecoforesterie*
 - *milieux_humides*
 - *hydro_s*
 - *reseau_routier*
 - *occupation_sol_2010*
- Jeu de données '*Sol*'
 - *Pedologie*
- *Jeu de données 'Intermediaire'*
- Données rasters *nom_bassin_raster.gdb*
 - L'occupation du sol de la banque de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD_FADQ), ou d'autres sources pour chaque année de suivi hydrologique
 - La couverture pédologique et la base de données hydro-pédologique
 - La couverture écoforestière (SIEF_MNRF)
 - Les réseaux routier (BDTQ)
 - Le réseau hydrométrique et les milieux humides (BDTQ)
 - Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une résolution de 1m, dérivée de données Lidar (Données_Québec)

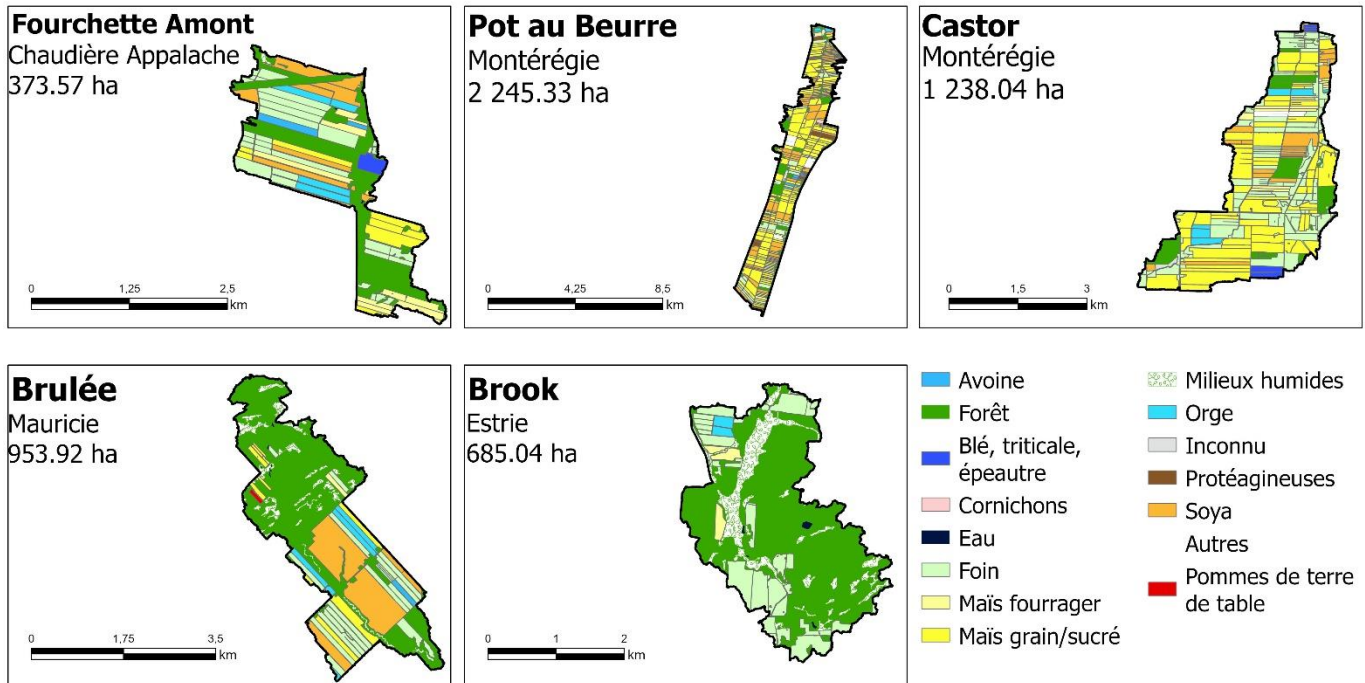
ANNEXE D - TABLEAU COMPARATIF DES SOLS DES CINQ BASSINS

Proportion (%) des classes de drainage des sols pour les cinq bassins modélisés

Drainage	Castor	Brook*	Brulée	Pot-au-Beurre	Fourchette
Très rapidement drainé		4.7	3.7		
Rapidement drainé					17.8
Bien drainé	21	60.4	8.6	2.4	2.9
Modérément bien drainé					
Mal drainé		34.7	4.1	93.4	58.5
Imparfaitement drainé	79		77.7	1.4	20.8
Très mal drainé					
Ne s'applique pas		0.2	5.9	2.8	

Source: Base de données des sols du Québec. Table PPSD. Tabi et al. 1990. Inventaire de la dégradation des sols du Québec.

ANNEXE E - CONTOUR DÉTAILLÉ DES BASSINS VERSANTS CHOISIS POUR LA MODÉLISATION



ANNEXE F - FONCTIONS DE TRANSFERTS PÉDOLOGIQUES POUR ALIMENTER LA TABLE USERSOIL DU PARAMÉTRAGE SWAT

Le fichier source pour la construction de la usersoil.xlsx témoigne de la complexité d'assembler la table de paramètres des sols *usersoil* au Québec. Les paramètres manquants parmi les sources existantes sont pour certains sols SOL_AWC (Réserve en eau utile), USLE_K2 (le facteur d'érodabilité K), et SOL_ALB (Albédo du sol). Pour chacun des paramètres plusieurs fonctions de pédo-transfert ont été utilisées puis moyennées (moyenne des valeurs min et max) pour calculer les valeurs manquantes. Le tableau ci-dessous résume les fonctions utilisées, les formules et les variables mesurées entrant dans les formules.

1. **SOL_AWC:** $(= \theta_{33} - \theta_{1500})$ en cm cm^{-1}

Variables calculées :

θ_{33} = teneur en eau du sol à la capacité au champ

θ_{1500} = teneur en eau du sol au point de flétrissement

Variables des BD sols utilisées:

C = % argile

T = % limon

OC = % carbone organique

S = % sable

ρ_b = masse volumique apparente (g cm^{-3})

Fonctions et sources	Équations
Petersen <i>et al.</i> ⁸³	$\theta_{33} = 0,1183 + 0,0096 * C - 0,00008 * C^2$
	$\theta_{1500} = 0,0174 + 0,0076 * C - 0,00005 * C^2$
Hall <i>et al.</i> ⁸⁴	$\theta_{33} = 0,2081 + 0,0045 * C + 0,0013 * T - 0,0595 * \rho_b$
	$\theta_{1500} = 0,0148 + 0,0084 * C - 0,000055 * C^2$
Gupta & Larson ⁸⁵	$\theta_{33} = 0,003075 * S + 0,005886 * T + 0,008039 * C + 0,001284 * OC - 0,1434 * \rho_b$
	$\theta_{1500} = 0,000059 * S + 0,001142 * T + 0,005766 * C + 0,001326 * OC + 0,02671 * \rho_b$
Rawls <i>et al.</i> ⁸⁶	$\theta_{33} = 0,2576 - 0,002 * S + 0,0036 * C + 0,0299 * OC$
	$\theta_{1500} = 0,0260 + 0,005 * C + 0,0158 * OC$
Rawls <i>et al.</i> ⁸⁷	$\theta_{33} = 0,3486 - 0,0018 * S + 0,0039 * C + 0,0228 * OC - 0,0738 * \rho_b$
	$\theta_{1500} = 0,0854 - 0,0004 * S + 0,0044 * C + 0,0122 * OC - 0,0182 * \rho_b$
Rajkai et Varallyay ⁸⁸	$\theta_{33} = 0,3862 - 0,0000479 * S - 0,000019 * (S/T)^2$
	$\theta_{1500} = 0,0139 + 0,0036 * C + 0,006508 * OC^2$
Canarache ⁸⁹	$\theta_{33} = 0,01 * \rho_b * (2,65 + 1,105 * C - 0,01896 * C^2 + 0,0001678 * C^3 + 15,12 * \rho_b - 6,745 * \rho_b^2 - 0,1975 * C * \rho_b)$

	$\theta_{1500} = 0,01 * \rho_b * (0,2805 * C + 0,0009615 * C^2)$
Batjes ⁹⁰	$AWC = 0,000976 * C + 0,001875 * T + 0,004694 * OC$
	$AWC = 0,001082 * C + 0,001898 * T + 0,007705 * OC$
Tomasella & Hodnet ⁷²	$\theta_{33} = 0,04046 + 0,00426 * T + 0,00404 * C$
	$\theta_{1500} = 0,0091 + 0,00150 * T + 0,00396 * C$
Rawls et al . ⁹¹	$x = -0,837531 + 0,430183 * OC$
	$y = -1,40744 + 0,0661969 * C$
	$z = -1,51866 + 0,0393284 * S$
	$\theta_{33} = 0,297528 + 0,103544 * (0,0461615 + 0,290955 * x - 0,0496845 * x^2 + 0,00704802 * x^3 + 0,269101 * y - 0,176528 * x * y + 0,0543138 * x^1 * y^98 * 0,060699 * y^3 - 0,320249 * z - 0,0111693 * x^2 * z + 0,14104 * y * z + 0,0657345 * x * y * z - 0,102026 * y^2 * z - 0,04012 * z^2 + 0,160838 * x * z^2 - 0,121392 * y * z^2 - 0,0616676 * z^3)$
	$\theta_{1500} = 0,142568 + 0,0736318 * (0,06865 + 0,108713 * x - 0,0157225 * x^2 - 0,017059 * y^2 + 0,00102805 * x^3 + 0,886569 * y - 0,223581 * x * y + 37 * 2^2 + 0,011^0,013526 * x * y^2 - 0,0334434 * y^3 - 0,0535182 * z - 0,0354271 * x * z - 0,00261313 * x^2 * z - 0,154563 * y * z - 0,0160219 * x * y * z - 0,0400606 * y^2 * z - 0,104875 * z^2 + 0,0159857 * x * z^2 - 0,0671656 * y * z^2 - 0,0260699 * z^3)$
Saxton et Rawls ⁹²	$\beta = -0,00251 * S + 0,00195 * C + 0,0064 * OC + 0,000035 * S * OC - 0,00016 * C * OC + 0,0000452 * S * C + 0,299$
	$\gamma = -0,00024 * S + 0,00487 * C + 0,0035 * OC + 0,00029 * S * OC - 0,0000756 * C * OC + 0,0000068 * S * OC + 0,031$
	$\theta_{33} = \beta + (1,283 * \beta^2 - 0,374 * \beta - 0,015)$
	$\theta_{1500} = \gamma + (0,14 * \gamma - 0,02)$
Aina & Periaswamy ⁹³	$\theta_{33} = 0,0055 * (C + T) - 0,0013 * S * \rho_b + 0,1288$
	$\theta_{1500} = 0,0031 * C + 0,0213$
Djerman ⁹⁴	$\theta_{33} = 0,3697 - 0,0035 * S$
	$\theta_{1500} = 0,0074 + 0,0039 * C$
Arruda et al . ⁹⁵	$\theta_{33} = [0,0029 * (C + T) + 0,0993] * \rho_b$
	$\theta_{1500} = [0,0027 * (C + T) + 0,0107] * \rho_b$

2. **USLE_K:** (= $E_s * E_{C-T} * E_{OC} * E_{HS}$) en cm jour⁻¹

Une seule fonction utilisée: Williams ³⁰

Variables des BD sols utilisées:

S = % sable

T = % limon

C = % argile

OC = % carbone organique.

Équations des variables de la fonction

$$E_s = 0,2 + 0,3 \cdot \exp[-0,256 \cdot S \cdot (1 - T/100)]$$

$$E_{C-T} = [T/(C + T)]^{0.3}$$

$$E_{CO} = 1 - (0,25 \cdot OC / (OC + \exp(0,72 - 2,95 \cdot OC)))$$

$$E_{HS} = 1 - \{0,7 \cdot (1 - S/100) / [(1 - S/100) + \exp(-5,51 + 22,9 \cdot (1 - S/100))]\}$$

3. SOL_ALB:

Calculé à partir de θ_{33} (voir calcul SOL_AWC)

Fonctions et sources	Équations
Wang <i>et al.</i> 102	Albédo = $0,1807 + 0,1019 \cdot \exp(-3,53 \cdot \theta_{33})$
Gascoin <i>et al.</i> 103	Albédo = $0,15 + 0,31 \cdot \exp(-12,7 \cdot \theta_{33})$
Sugathan <i>et al.</i> 104	Albédo = $0,26 + 0,1068 \cdot \exp(-4,9 \cdot \theta_{33})$

ANNEXE G - ÉVOLUTION DE L'UTILISATION DU SOL LORS DES ANNÉES DE RÉFÉRENCE POUR L'OPTIMISATION

Pot-au-Beurre	Superficie en ha (BDPPAD, exclus la forêt, les milieux humides et les zones urbaines)							Évolution des proportions (en % du total)						
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2019	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2019
Utilisation du sol														
Non cultivé/jachère	0,00	0,00	0,00	16,08	6,09	0,77	0,77	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↑ 0,8%	↓ 0,3%	↓ 0,0%	↓ 0,0%
Pâturage	10,96	3,16	2,63	5,70	5,70	0,00	0,00	↑ 0,6%	↓ 0,2%	↓ 0,1%	⇒ 0,3%	↓ 0,3%	↓ 0,0%	↓ 0,0%
Maraîcher	11,96	5,34	2,18	5,34	8,86	0,00	5,34	↑ 0,6%	⇒ 0,3%	↓ 0,1%	⇒ 0,3%	⇒ 0,5%	↓ 0,0%	⇒ 0,3%
Maïs sucré	20,04	68,33	49,95	42,34	44,25	26,19	26,19	↓ 1,0%	↑ 3,5%	⇒ 2,6%	⇒ 2,2%	⇒ 2,3%	↓ 1,4%	↓ 1,3%
Maïs fourrager	37,55	37,46	77,65	54,80	116,33	74,74	46,16	↓ 1,9%	↓ 1,9%	⇒ 4,1%	↓ 2,8%	↑ 6,0%	⇒ 3,9%	↓ 2,4%
Céréales	50,89	22,28	44,43	92,06	29,07	109,60	64,13	↓ 2,6%	↓ 1,1%	↓ 2,3%	↑ 4,8%	↓ 1,5%	↑ 5,7%	⇒ 3,3%
Légumineuse	93,49	95,91	38,40	83,02	23,25	102,47	21,85	↑ 4,8%	↑ 4,9%	↓ 2,0%	⇒ 4,3%	↓ 1,2%	↑ 5,3%	↓ 1,1%
Inconnu	109,79	98,31	143,73	117,32	154,00	126,83	200,98	↓ 5,6%	↓ 5,0%	⇒ 7,5%	↓ 6,1%	⇒ 8,0%	↓ 6,6%	↑ 10,3%
Foin	140,62	199,38	148,09	144,04	87,39	81,26	55,14	⇒ 7,2%	↑ 10,2%	⇒ 7,8%	⇒ 7,5%	↓ 4,5%	↓ 4,2%	↓ 2,8%
Soya	400,01	226,97	257,67	261,17	577,34	424,56	536,48	⇒ 20,5%	↓ 11,6%	↓ 13,5%	↓ 13,5%	↑ 29,8%	⇒ 22,0%	↑ 27,6%
Maïs grain	1080,18	1193,62	1143,15	1109,16	882,49	985,75	985,75	⇒ 55,2%	↑ 61,2%	⇒ 59,9%	⇒ 57,4%	↓ 45,6%	⇒ 51,0%	⇒ 50,7%
Total	1955,51	1950,77	1907,88	1931,02	1934,78	1932,18	1942,79	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Castor	Superficie en ha (BDPPAD, exclus la forêt, les milieux humides et les zones urbaines)							Évolution des proportions (en % du total)						
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Utilisation du sol														
Non cultivé/jachère	0,00	5,00	4,20	4,20	4,20	1,90	1,90	↓ 0,0%	↑ 0,4%	↑ 0,3%	↑ 0,3%	↓ 0,3%	⇒ 0,1%	⇒ 0,1%
Légumineuse	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	0,00	0,00	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↑ 0,9%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%
Soya	11,80	112,20	199,10	138,30	240,20	171,80	161,60	↓ 0,9%	⇒ 8,4%	⇒ 14,9%	⇒ 10,4%	↑ 17,9%	⇒ 12,5%	⇒ 11,6%
Inconnu	23,30	50,29	59,30	121,60	171,90	44,70	76,80	↓ 1,7%	↓ 3,8%	⇒ 4,4%	⇒ 9,1%	↓ 12,8%	↓ 3,2%	⇒ 5,5%
Maraîcher	37,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	↑ 2,8%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%
Pâturage	49,10	42,40	31,70	31,70	28,10	36,80	36,80	↑ 3,7%	⇒ 3,2%	↓ 2,4%	↓ 2,4%	↓ 2,1%	↓ 2,7%	↓ 2,6%
Maïs fourrager	56,90	46,40	56,00	80,70	39,40	60,50	42,70	⇒ 4,3%	↓ 3,5%	⇒ 4,2%	↑ 6,0%	↓ 2,9%	⇒ 4,4%	↓ 3,1%
Céréales	72,00	82,90	100,20	84,90	42,70	99,50	66,90	⇒ 5,4%	⇒ 6,2%	⇒ 7,5%	⇒ 6,4%	↓ 3,2%	↑ 7,2%	⇒ 4,8%
Foin	227,50	195,30	197,10	231,20	242,80	211,60	281,80	⇒ 17,0%	↓ 14,6%	↓ 14,7%	⇒ 17,3%	↓ 18,1%	↓ 15,4%	↑ 20,2%
Maïs grain	857,00	799,90	691,90	631,20	569,30	751,70	726,30	⇒ 64,2%	↑ 59,9%	⇒ 51,7%	⇒ 47,3%	↓ 42,5%	⇒ 54,5%	⇒ 52,1%
Total	1334,90	1334,39	1339,50	1335,80	1338,60	1378,50	1394,80	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Brulée	Superficie en ha (BDPPAD, exclus la forêt, les milieux humides et les zones urbaines)							Évolution des proportions (en % du total)						
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2020	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2020
Utilisation du sol														
Non cultivé/jachère														
Légumineuse														
Maraîcher	2,37	3,13	8,60	0,00	0,00	7,01	9,18	⇒ 0,6%	⇒ 0,7%	↑ 2,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	⇒ 1,7%	↑ 2,2%
Maïs fourrager	4,52	5,06	0,00	8,20	0,00	0,00	0,07	⇒ 1,1%	⇒ 1,2%	↓ 0,0%	↑ 1,9%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%
Pâturage	15,17	16,57	16,57	11,59	11,59	11,59	11,59	⇒ 3,6%	↑ 3,9%	⇒ 3,9%	↓ 2,7%	↓ 2,8%	↓ 2,8%	↓ 2,7%
Inconnu	33,61	21,13	17,89	50,51	38,43	117,48	53,57	↓ 7,9%	↓ 4,9%	↓ 4,2%	⇒ 11,7%	⇒ 9,1%	↓ 28,0%	⇒ 12,6%
Céréales	37,74	132,75	40,66	0,00	95,55	46,82	212,87	⇒ 8,8%	⇒ 31,1%	↓ 9,5%	↓ 0,0%	⇒ 22,7%	⇒ 11,1%	⇒ 49,9%
Maïs grain	50,64	95,32	113,73	177,38	42,92	138,99	10,40	⇒ 11,9%	⇒ 22,3%	⇒ 26,6%	⇒ 41,0%	⇒ 10,2%	⇒ 33,1%	↓ 2,4%
Foin	106,76	112,70	107,97	75,99	71,17	71,25	107,20	↑ 25,0%	↑ 26,4%	↑ 25,3%	↓ 17,6%	↓ 16,9%	↓ 17,0%	↑ 25,1%
Soya	176,52	40,66	121,91	108,56	160,48	27,03	21,49	↑ 41,3%	↓ 9,5%	⇒ 28,5%	⇒ 25,1%	↓ 38,2%	↓ 6,4%	↓ 5,0%
Total	427,33	427,33	427,33	432,23	420,14	420,17	426,36	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Brook	Superficie en ha (BDPPAD, exclus la forêt, les milieux humides et les zones urbaines)							Évolution des proportions (en % du total)						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Utilisation du sol														
Légumineuse														
Maraîcher														
Non cultivé/jachère	0,00	0,00	0,00	4,51	0,00	0,00	0,35	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↑ 2,1%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,2%
Maïs grain	0,00	0,00	0,00	0,00	4,28	4,28	0,00	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↑ 2,0%	↑ 2,0%	↓ 0,0%
Soya	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,55	4,28	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 12,3%	↓ 2,2%
Inconnu	0,00	39,47	39,47	56,52	88,76	89,42	88,76	↓ 0,0%	⇒ 20,1%	⇒ 20,1%	⇒ 25,9%	↑ 40,7%	↑ 41,3%	↑ 45,4%
Céréales	3,49	8,20	0,32	38,43	27,24	0,12	6,53	↓ 1,8%	⇒ 4,2%	⇒ 0,2%	↑ 17,6%	⇒ 12,5%	↓ 0,1%	↓ 3,3%
Maïs fourrager	8,21	14,04	6,33	0,00	0,00	0,00	0,00	↑ 4,3%	↑ 7,1%	⇒ 3,2%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%	↓ 0,0%
Pâturage	59,35	37,30	43,34	39,08	36,10	34,04	40,17	↑ 31,4%	⇒ 19,0%	⇒ 22,1%	↓ 17,9%	↓ 16,6%	↓ 15,7%	⇒ 20,5%
Foin	118,25	97,50	106,91	79,54	61,72	61,93	55,44	↑ 62,5%	⇒ 49,6%	⇒ 54,4%	⇒ 36,5%	↓ 28,3%	↓ 28,6%	↓ 28,4%
Total	189,30	196,51	196,37	218,09	218,09	216,33	195,53	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fourchette amont	Superficie en ha (BDPPAD, exclus la forêt, les milieux humides et les zones urbaines)							Évolution des proportions (en % du total)						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Utilisation du sol														
Légumineuse														
Maraîcher														
Non cultivé/jachère														
Pâturage	4,49	4,49	4,14	4,63	1,31	1,31	0,00	↑ 1,5%	↑ 1,5%	↑ 1,4%	↑ 1,6%	↓ 0,4%	↓ 0,4%	↓ 0,0%
Maïs fourrager	34,20	49,80	16,10	21,48	35,00	30,20	0,00	↔ 11,6%	↑ 17,0%	↔ 5,5%	↔ 7,4%	↔ 12,0%	↓ 10,3%	↓ 0,0%
Maïs grain	35,42	18,02	37,67	42,78	24,59	7,79	27,66	↔ 12,0%	↑ 6,2%	↑ 12,9%	↑ 14,7%	↔ 8,4%	↓ 2,7%	↔ 9,5%
Céréales	36,00	14,64	45,30	20,34	24,90	16,78	3,96	↔ 12,2%	↔ 5,0%	↑ 15,5%	↔ 7,0%	↔ 8,5%	↔ 5,7%	↓ 1,4%
Soya	48,29	51,87	45,98	31,77	75,74	76,73	96,07	↔ 16,4%	↔ 17,7%	↓ 15,8%	↔ 10,9%	↔ 25,9%	↔ 26,2%	↑ 32,8%
Inconnu	52,63	64,04	68,04	75,56	39,40	46,39	163,66	↓ 17,9%	↓ 21,9%	↔ 23,3%	↔ 25,9%	↓ 13,5%	↓ 15,8%	↑ 55,9%
Foin	83,40	90,02	74,54	95,19	91,21	113,56	1,22	↔ 28,3%	↔ 30,7%	↔ 25,5%	↑ 32,6%	↑ 31,2%	↑ 38,8%	↓ 0,4%
Total	294,43	292,88	291,76	291,76	292,13	292,77	292,57	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

La gradation de couleur du jaune vers le vert indique une augmentation de la superficie de la culture à travers les années et vice-versa. Les flèches appliquées sur les % de superficie indiquent une tendance à l'augmentation, la stagnation ou la diminution des superficies en considérant l'ensemble des années. Attention, même si certaines tendances ressortent, il faut noter la présence de la catégorie « inconnu » qui brouille l'analyse. Cette catégorie pouvant être selon le bassin ou l'année des cultures à rang faiblement espacé, des prairies, des espaces non cultivés ou un mélange de catégories.

ANNEXE H - DATES DES OPÉRATIONS AGRICOLES SCÉNARISÉES À PARTIR DES RAPPORTS SUR L'ÉTAT DES CULTURES (FADQ)

Castor- Montérégie

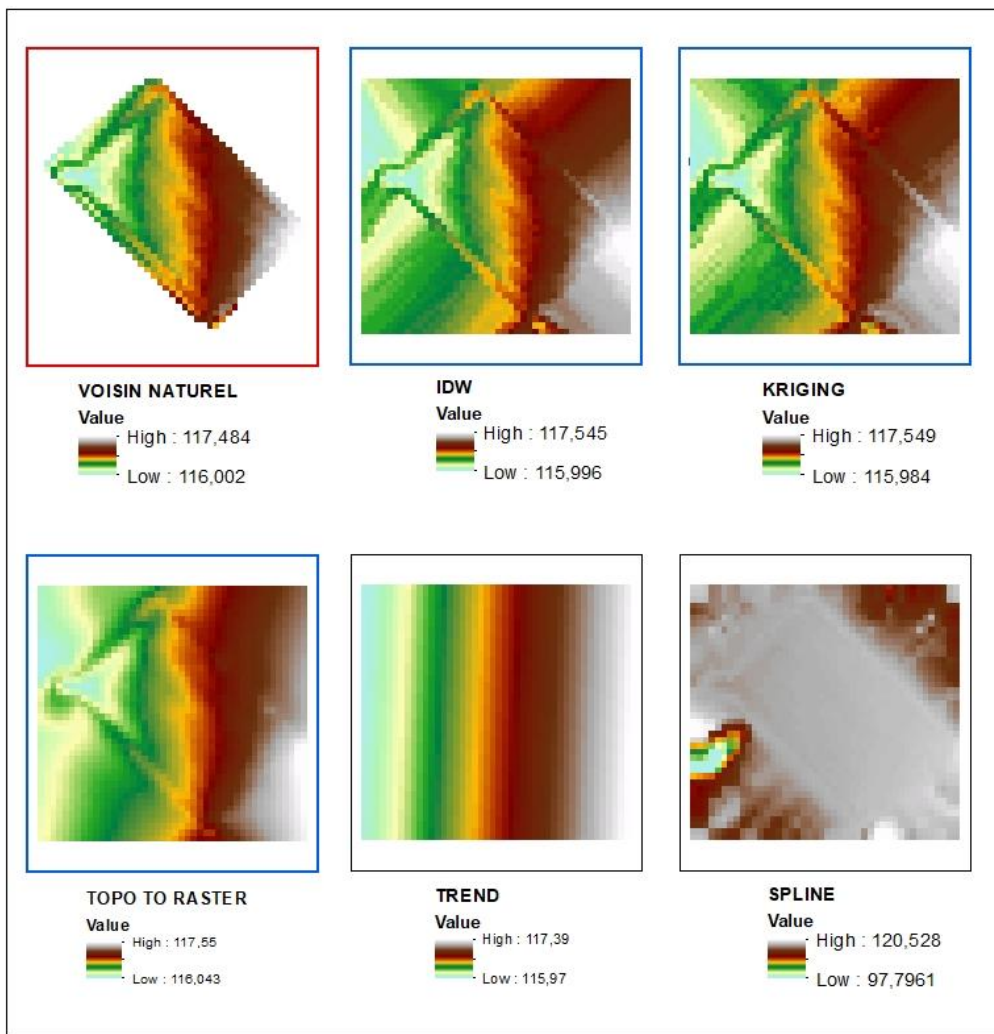
	Culture	Année	Apport de fumier printanier (45%) - N et P	N minéral (50%)	Travail du sol secondaire	Semis et P minéral (100%)	Récolte de foin #1	Apport de fumier sur foin (50%) - N et P	Complément de N minéral (50%)	Récolte de foin #2	Apport de fumier (50%) - (N et P)	Récolte du foin #3	Récolte des cultures	Apport de fumier automnal (15%) - N et P	Travail de sol primaire
Foin	2007	May 5,				Jun 12,	Jul 13,		Jul 24,	Jul 25,	Sep 18,				
	2008	Apr 22,				Jun 26,	Jun 27,		Aug 16,	Aug 17,	Sep 23,				
	2009	Apr 16,				Jun 23,	Jun 24,		Aug 15,	Aug 16,	Sep 7,				
	2010	Apr 24,				Jul 5,	Jun 6,		Aug 12,	Aug 13,	Sep 19,				
	2011	May 9,				Jul 15,	Jul 16,		Aug 12,	Aug 13,	Oct 6,				
Soya	2007			May 12,	May 25,							Oct 4,		Oct 18,	
	2008			May 2,	May 11,							Oct 6,		Oct 19,	
	2009			Apr 27,	May 19,							Oct 18,		Oct 27,	
	2010			May 12,	May 24,							Oct 11,		Oct 19,	
	2011			Jun 3,	Jun 7,							Oct 10,		Oct 27,	
Céréales	2007	May 5,	May 5,	May 12,	May 25,			Jun 26,				Aug 28,	Sep 4,	Sep 13,	
	2008	Apr 22,	Apr 22,	May 2,	May 11,			Jun 25,				Aug 21,	Aug 29,	Sep 5,	
	2009	Apr 16,	Apr 16,	Apr 27,	May 4,			Jun 6,				Aug 26,	Sep 3,	Sep 11,	
	2010	Apr 24,	Apr 24,	May 2,	May 13,			Jul 4,				Aug 19,	Aug 29,	Sep 5,	
	2011	May 9,	May 9,	Jun 3,	Jun 7,			Jul 14,				Aug 18,	Sep 1,	Sep 10,	
Maïs grain	2007	May 5,	May 5,	May 12,	May 25,		Jun 26,	Jun 26,				Nov 3,	Nov 3,	Nov 4,	
	2008	Apr 22,	Apr 22,	May 2,	May 11,		Jun 25,	Jun 25,				Nov 1,	Nov 1,	Nov 5,	
	2009	Apr 16,	Apr 16,	Apr 27,	May 12,		Jun 6,	Jun 6,				Nov 7,	Nov 7,	Nov 9,	
	2010	Apr 24,	Apr 24,	May 12,	May 20,		Jul 4,	Jul 4,				Nov 3,	Nov 3,	Nov 11,	
	2011	May 9,	May 9,	Jun 3,	Jun 7,		Jul 14,	Jul 14,				Oct 28,	Oct 28,	Oct 31,	
Maïs ensilage	2007	May 5,	May 5,	May 12,	May 25,							Nov 3,	Nov 3,	Nov 4,	
	2008	Apr 22,	Apr 22,	May 2,	May 20,							Oct 5,	Oct 11,	Oct 15,	
	2009	Apr 16,	Apr 16,	Apr 27,	May 12,							Oct 30,	Nov 7,	Nov 9,	
	2010	Apr 24,	Apr 24,	May 12,	May 20,							Oct 19,	Oct 29,	Oct 30,	
	2011	May 9,	May 9,	Jun 3,	Jun 7,							Oct 18,	Oct 20,	Oct 22,	

Les dates des quatre autres bassins sont fournies dans le fichier : Dates des opérations agricoles pour SWAT_2023_02.xlsx

ANNEXE I - RÉSUMÉ DES SPÉCIFICITÉS DES SCÉNARIOS AMÉLIORÉS

Année d'optimisation Pratiques	2007-2013		2010-2015	
	Castor		Pot-au-Beurre	
	Référence	Amélioré	Référence	Amélioré
Fertilisation (% agricole)				
Épandage automnale ; Applicable sur les céréales, prairies/pâturage, maïs ensilage. Pas d'épandage sur le soya et le maïs grain.	91%		15%	0%
Enfouie 48h00 ; Culture annuelle maïs, soya, cereales.	3%		51%	
Non enfouie ; Prairies + semi-direct.	97%		19%	
Travail du sol (% semé ou travaillée, prairie exclus - cultures annuelles)				
Travail conventionnel (labour): secondaire printemps (30%) ; primaire automne (95%)	88%	50%	17%	10%
Labour des prairies à l'automne: (% des prairies)	oc.s statique pas de labour	50%	oc.s statique pas de labour	50%
Travail réduit: secondaire printemps (25%); primaire automne (30%)	4%	40%	69%	65%
Conservation: semi-direct; pas de travail de sol (5%) Sur soya et maïs (Sol GrH A,B)	7%	10%	14%	25%
Utilisation du sol (% agricole)				
Cultures annuelles (maïs/soya)	Statique; 2007: 72%		Statique; 2010: 77% 40%	
Céréales	Statique; 2007: 6%		Statique; 2010: 2% 15%	
Prairies	Statique; 2007: 21%		Statique; 2010: 9% 35%	
Protection du sol (% superficie agricole)				
Couverture hivernale ; Céréales automne, prairie, pâturage, autre couverture hivernale	22%		19%	60%
Couverture intercalaire ; sur maïs et soya (trèfle)	0%		5%	40%
Couverture en rive	-	-	-	-
<p>Note: % agricole signifie que le % des cultures est calculé sur le % de l'utilisation agricole. Les forêts, villes, milieux humides et autres occupations non agricoles ne sont pas considérées dans le calcul du %.</p> <p>oc.s = occupation du sol</p>				

ANNEXE J - INTERPOLATION DU RELEVÉ TOPOGRAPHIQUE SUR LES 12 MICRO-BASSINS DE SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON



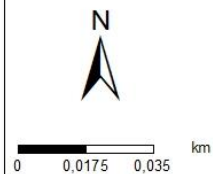
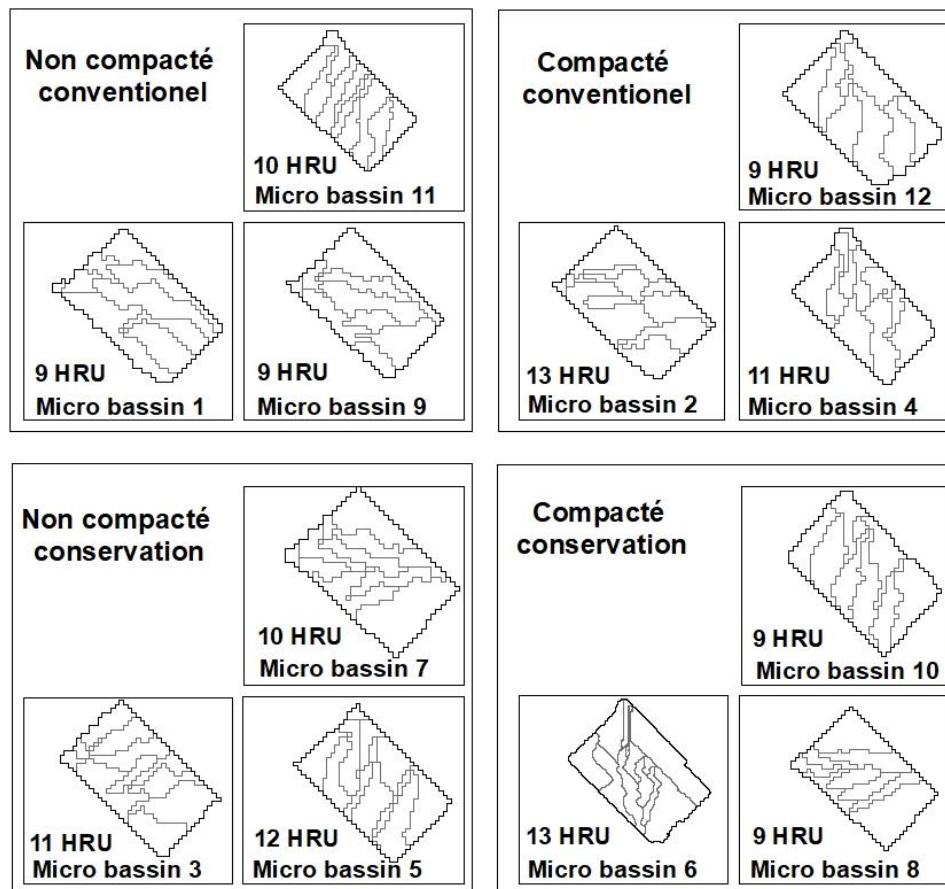
Techniques d'interpolation testées

- Interpolation retenue
- Test de délimitation effectué
- Interpolation non retenues



Date de création: 2023-27-02

ANNEXE K - DÉCOUPAGE DES 12 MICRO-BASSINS



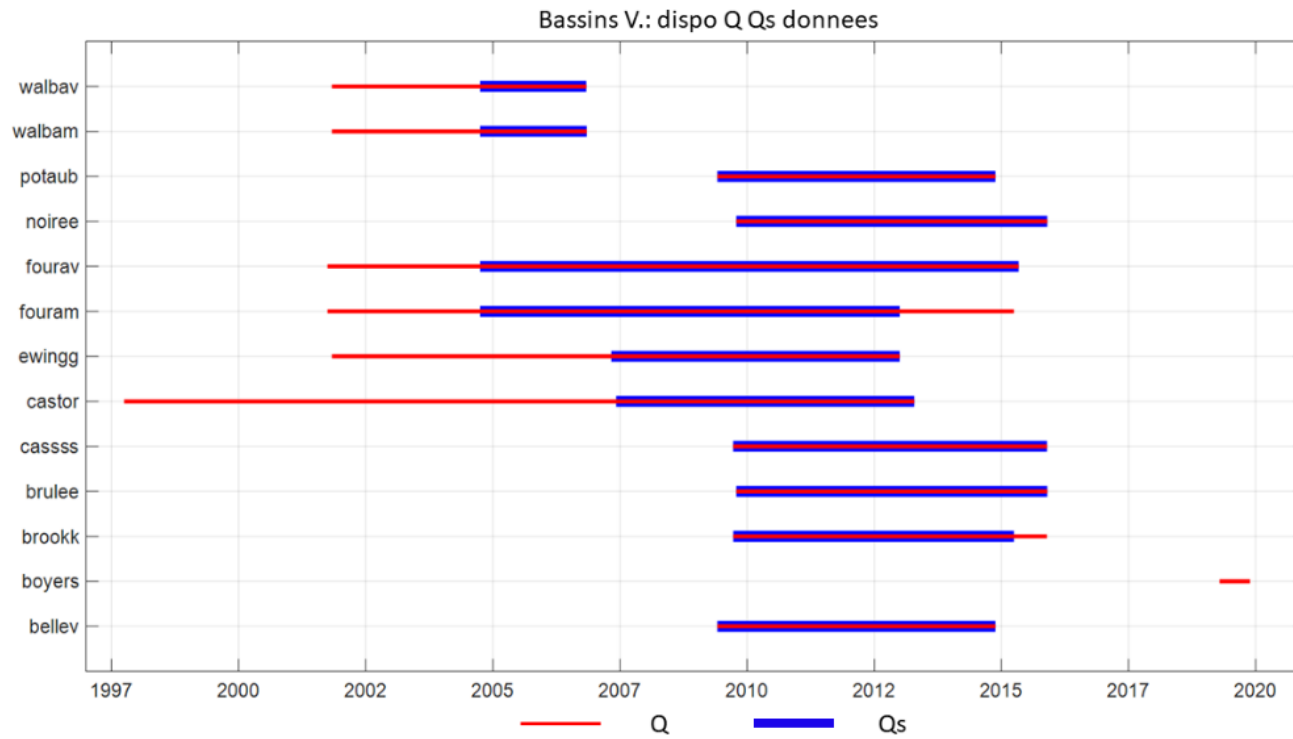
irda INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGRICULTURE

Date de création:
2023-27-02

ANNEXE L - PARAMÈTRES D'OPTIMISATION POUR L'HYDROLOGIE

Paramètres		Castor	Brûlée	Brook	Pot-au-Beurre	Fourchette
Fonte de neige (basins.bsn)	SFTMP (°C)	-1,88	0,15	-0,71	-3,78	-3,09
	SMTMP (°C)	-7,99	0,50	2,76	3,68	3,02
	SMFMX (mm _{H2O} /day-°C)	3,32	4,49	4,46	7,48	5,37
	SMFMN (mm _{H2O} /day-°C)	2,28	1,47	1,40	5,29	4,42
	TIMP	0,16	0,29	0,92	0,91	0,21
	SNOCOVMX (mm _{H2O})	78,77	200,02	400,66	125,42	91,15
	SNO50COV (fraction)	0,13	0,41	0,01	0,01	0,28
	SURLAG (jours)	4,00	4,00	4,00	4,00	10,00
Ruissellement (*.mgt)	CN	(+)12%	(-)19%	(+)12%	(-)20%	(-)19%
Evaporation (*.hru)	ESCO	0,24	0,75	0,37	0,30	1,00
	EPCO	0,71	0,93	0,65	0,83	0,19
Souterrain (*.gw)	GW_DELAY (jours)	31,89	86,65	2,08	30,57	30,95
	ALPHA_BF	0,73	0,93	0,75	0,01	0,68
	GWQMN (mm)	93,42	300,12	161,25	1000,00	143,73
	GW_REVAP	0,20	0,18	0,08	0,20	0,18
	REVAPMN (mm)	100,28	250,32	241,19	108,01	80,40
	RCHRG_DP	0,50	0,25	0,2	0,5	0,7508
Drain (*.sol)	SOL_EC	0,10	0,44	0,10	0,04	0,06
Pertes de transmission (*.rte)	CH_K2 (mm/hr)	14,31	14,31	0,02	16,31	0,00
Pertes de transmission (*.sub)	CH_K1 (mm/hr)	12,18	12,18	0,02	14,18	0,00

ANNEXE M - DISPONIBILITÉ DES DONNÉES HYDROLOGIQUES MESURÉES



ANNEXE N - BILANS HYDROLOGIQUES ANNUELS SIMULÉS APRÈS CALAGE

	Castor	Brulee	Brook	Pot-au-Beurre	Fourchette
	mm/année	mm/année	mm/année	mm/année	mm/année
Précipitations	1241	1163	1275	1154	1330
Neige	266	377	262	200	304
Fonte de neiges	257	357	261	200	308
Sublimation	2	27	11	11	15
Écoulement de surface	134	166	216	224	270
Écoulement latéral	30	38	21	14	67
Écoulement total des drains	211	117	59	191	210
Écoulement souterrain (aquifère peu profonde)	132	231	338	367	104
Revap (aquifère peu profonde)	81	118	50	59	122
Recharge de l'aquifère profonde	133	89	84	0	312
Recharge total de l'aquifère	265	357	422	367	416
Rendement total hydrique	474	522	633	725	651
Percolation dans le sol	230	328	422	297	414
Évapotranspiration (ET)	629	505	568	435	381
Évapotranspiration potentielle (PET)	737	673	651	729	671
Pertes de transmission	33	30	0	70	0

ANNEXE O - PARAMÈTRES D'OPTIMISATION POUR LA QUALITÉ DE L'EAU

Paramètres		Castor	Brûlée	Brook	Pot-au-Beurre	Fourchette
Sediments (*.sol)	USLE_K	2,84	3,25	2,15	1,75	2,00
Sediments (basins.bsn)	ADJ_PKR	0,76	0,50	0,940	0,915	0,72
	PRF	1,203	0,65	1,63	1,79	1,65
	SPCON	0,047	0,08	0,0803	0,0830	0,01
	SPEXP	1,309	1,27	1,46	1,39	1,07
	CH_COV1	0,180	0,57332	0,291	0,473	0,06
Sediments (*.rte)	CH_COV2	5,470	1,09156	5,173	9,456	3,92
Phosphore (*.gw)	GWSOLP	0,103	0,503	0,80	0,2035	0,80
Phosphore (*.hru)	ERORG_P	1,905	0,97085	1,006	1,530	0,70
Phosphore (basins.bsn)	P_UPDIS	46,043	20,164	30,747	23,535	12,699
	PPERCO	14,070	16,5558	13,088	13,482	16,850
	PHOSKD	146,179	186,04	116,698	127,006	163,236
	PSP	0,508	0,02	0,700	0,054	0,077
	NPERCO	1,000	0,94	1,00	1,00	0,65
Nitrate (basins.bsn)	N_UPDIS	63,632	20,08	17,88	23,535	47,95
	CMN	0,001	0,003	0,003	0,00103	0,002

ANNEXE P - RÉSULTATS DE CALAGE DES BASSINS BROOK, BRULÉE, POT-AU-BEURRE ET FOURCHETTE

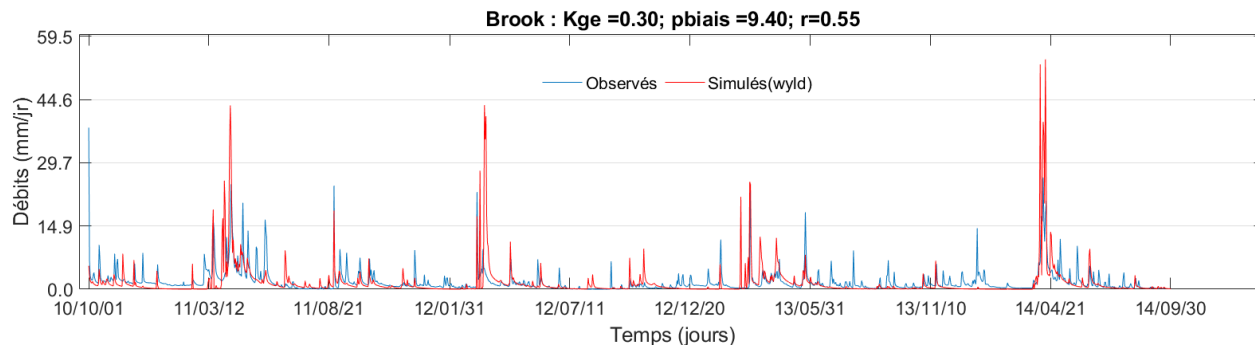


Figure P1 – Hydrogrammes observé et simulé à l'exutoire du bassin Brook de 2010 à 2014.

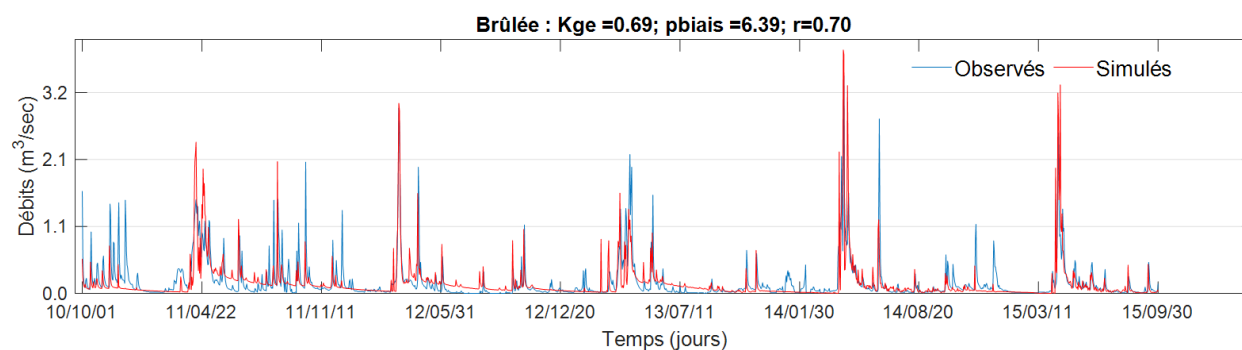


Figure P2 – Hydrogrammes observé et simulé à l'exutoire du bassin Brulée de 2010 à 2015.

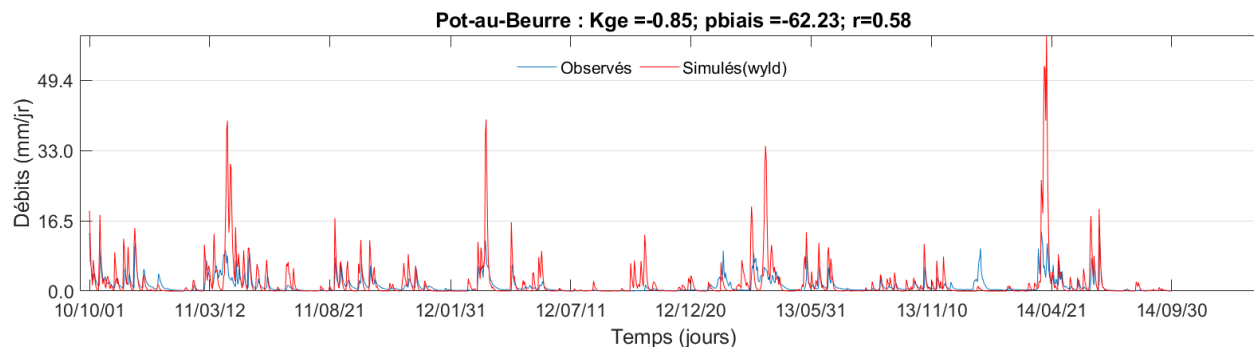


Figure P3 – Hydrogrammes observé et simulé à l'exutoire du bassin Pot-au-Beurre de 2010 à 2014.

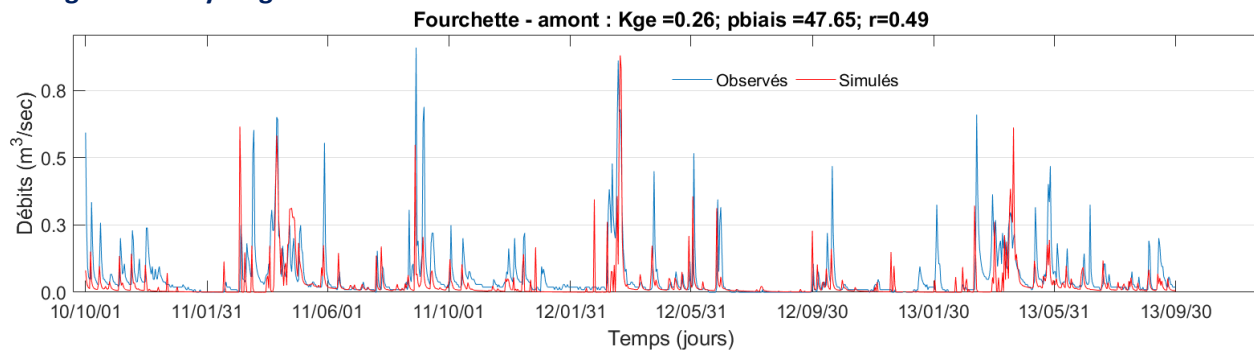


Figure P4 – Hydrogrammes observé et simulé à l'exutoire du bassin Fourchette de 2010 à 2013.

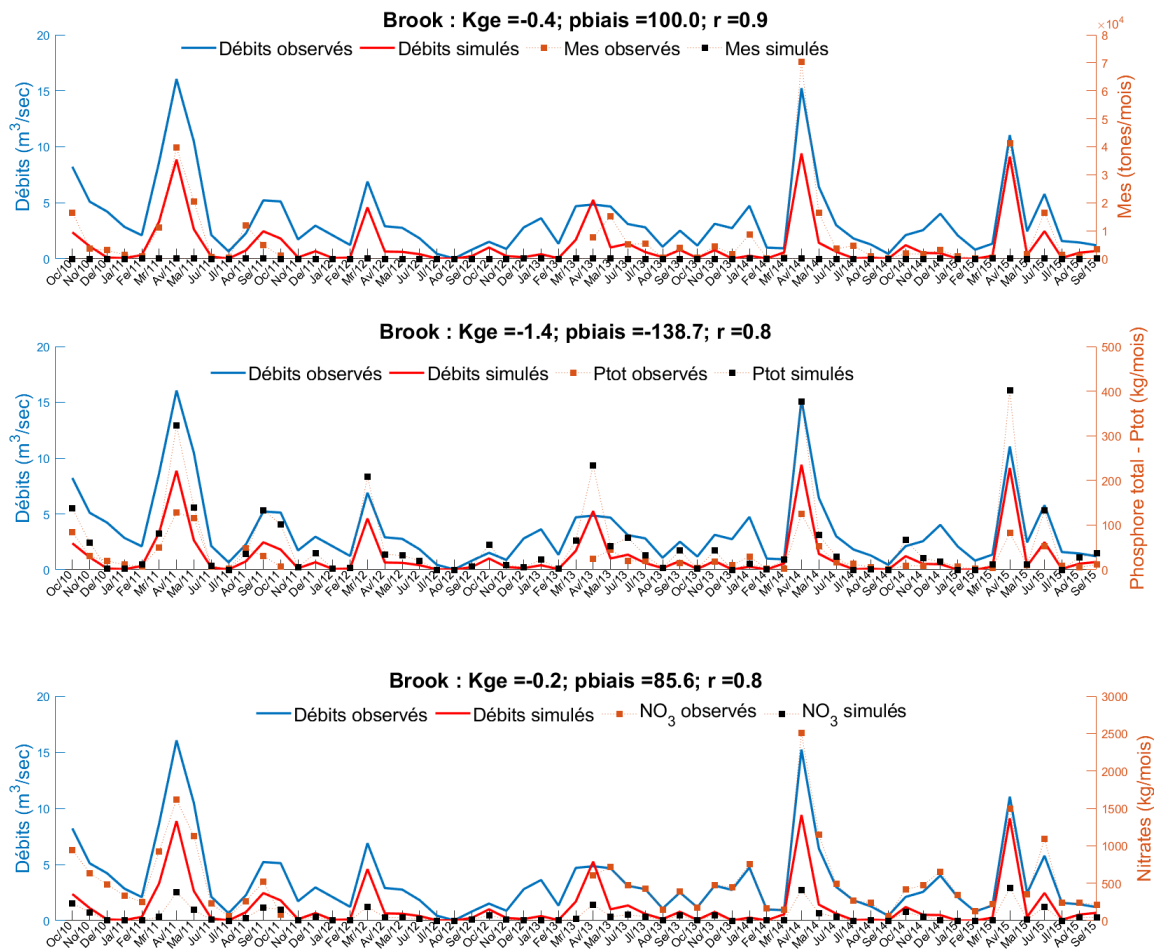


Figure P5 – Charges en MES, phosphore total et nitrates simulées pour le bassin Brook de 2010 à 2015.

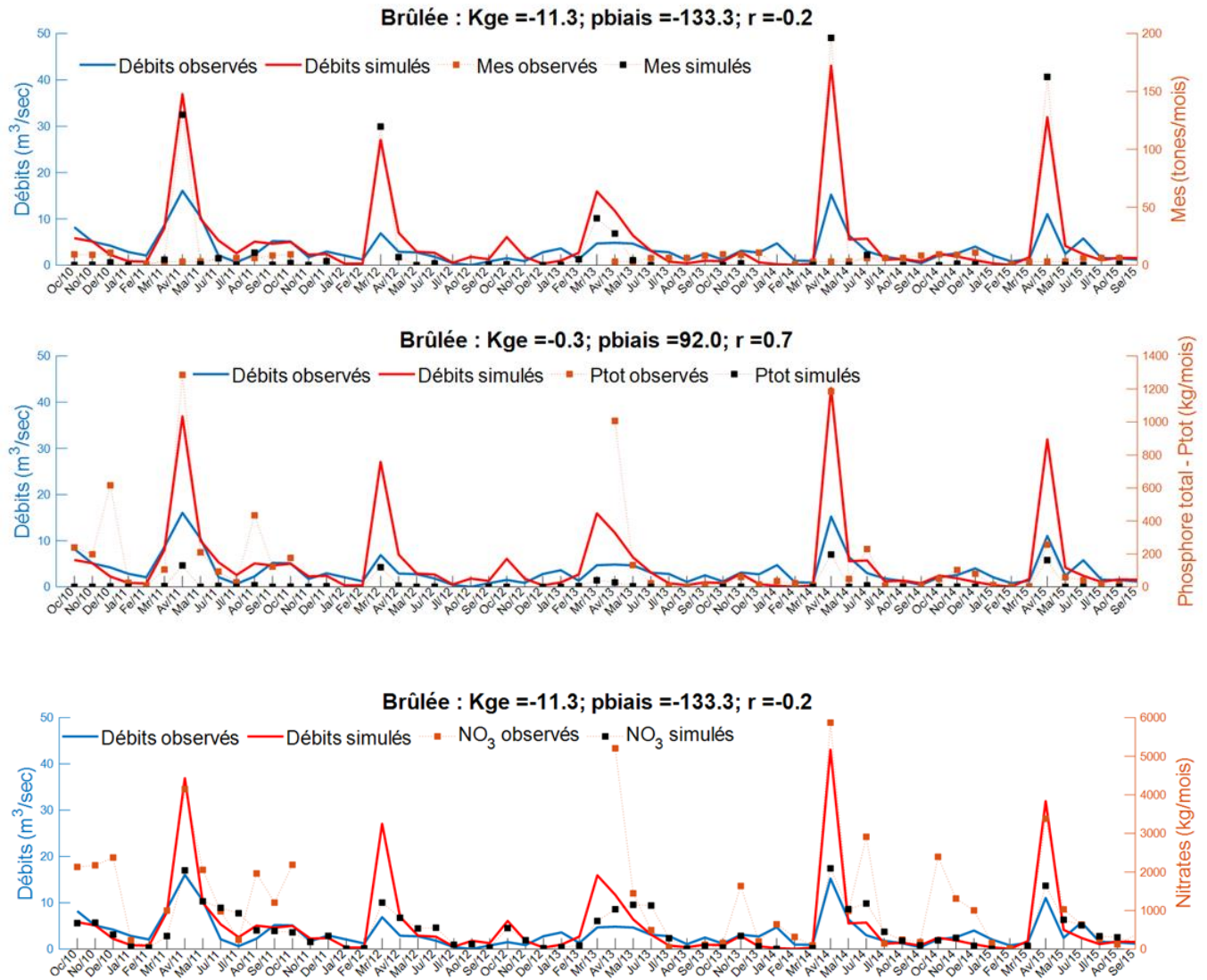


Figure P6 – Charges en MES, phosphore total et nitrates simulées pour le bassin Brulée de 2010 à 2015.

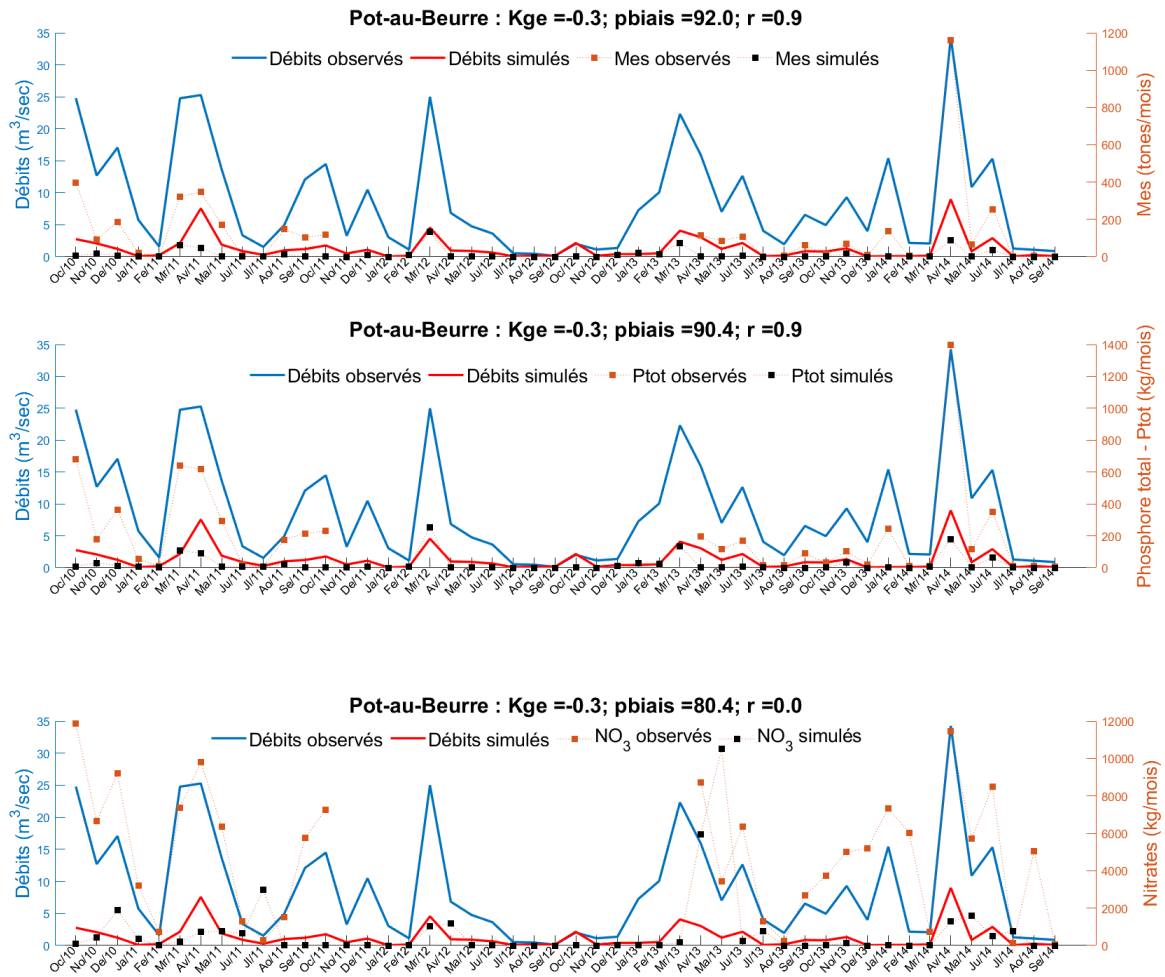


Figure P7 – Charges en MES, phosphore total et nitrates simulées pour le bassin Pot-au-Beurre de 2010 à 2014.

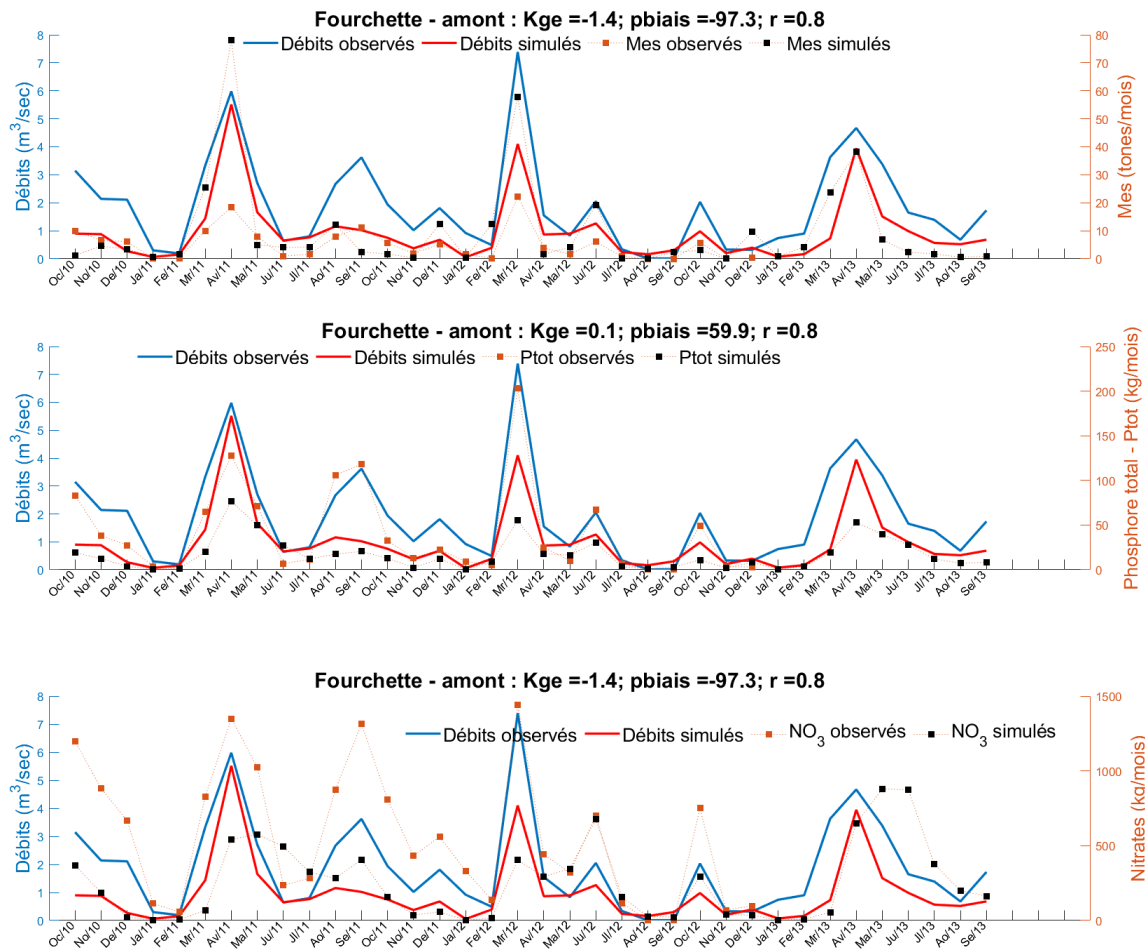


Figure P8 – Charges en MES, phosphore total et nitrates simulées pour le bassin Fourchette de 2010 à 2013.

ANNEXE Q - PARAMÈTRES D'OPTIMISATION POUR L'HYDROLOGIE DES 12 MICRO-BASSINS

Paramètres	C1S1 non-compacté conventionnel			C2S1 compacté conventionnel			C1S2 non-compacté conservation			C2S2 compacté conservation			
	parcelle1	parcelle9	parcelle11	parcelle2	parcelle4	parcelle12	parcelle3	parcelle5	parcelle7	parcelle6	parcelle8	parcelle10	
Fonte de neige (basins.bsn)	SFTMP (°C)	-0,40	-0,86	-4,71	2,64	-0,77	4,85	-2,75	0,09	0,61	4,20	-2,65	-1,57
	SMTMP (°C)	2,20	-0,63	5,00	3,11	-0,19	2,61	-4,97	3,91	-1,24	0,96	-2,56	-2,49
	SMFMX (mm _{H2O} /d)	8,55	3,63	5,58	7,05	6,52	5,82	5,95	5,22	6,22	4,26	4,83	8,74
	SMFMN (mm _{H2O} /c)	2,88	2,19	2,55	4,20	0,04	2,93	4,13	4,62	5,52	3,07	6,85	0,72
	TIMP	0,79	0,70	0,60	0,64	0,89	0,61	0,60	0,56	0,63	0,84	0,79	0,99
	SNOCOVMX (mm _t)	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	139,48	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
	SNOSOCOV (fracti)	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,01	0,25	0,32	0,25	0,32	0,32	0,32
Ruissellement (*.mgt)	SURLAG (jours)	0,21	0,48	0,42	0,81	0,88	0,10	4,23	0,31	1,92	0,72	2,95	0,97
	CN	-5%	(-)2%	(-)1%	(+)	(-)20%	(+)	(-)18%	(-)2%	(+)	(-)7%	(-)8%	(-)11%
Evaporation (*.hru)	ESCO	0,50	0,18	0,41	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,74	1,00	0,51
	EPCO	0,25	0,34	0,75	0,76	0,08	0,65	1,00	0,84	0,69	0,96	0,85	1,00
Souterrain (*.gw)	GW_DELAY (jours)	0,08	40,17	50,00	0,84	0,15	30,33	41,11	0,00	43,14	47,44	50,00	9,30
	ALPHA_BF	1,00	0,00	0,00	0,73	1,00	0,00	0,03	0,46	0,35	0,00	0,00	0,00
	GWQMN (mm)	133,57	200,00	66,49	127,94	86,21	127,99	102,03	79,46	17,61	92,09	194,95	93,20
	GW_REVAP	0,17	0,14	0,14	0,06	0,03	0,07	0,13	0,19	0,14	0,12	0,07	0,07
	REVAPMN (mm)	297,65	36,14	98,14	250,42	116,34	86,30	235,04	264,67	140,19	156,70	177,03	151,93
	RCHRG_DP	0,00	0,20	0,20	0,20	0,00	0,18	0,20	0,20	0,13	0,20	0,20	0,19
Drain (*.sol)	SOL_EC	0,02	0,41	0,50	0,50	0,37	0,18	0,28	0,50	0,35	0,19	0,34	0,34

ANNEXE R - BILANS HYDRIQUES DES 12 MICRO-BASSINS APRÈS CALAGE

	C1 S1 - non compacté conventionnel						C2 S1 - compacté conventionnel					
	microbv1		microbv9		microbv11		microbv2		microbv4		microbv12	
	mm/année	%	mm/année	%	mm/année	%	mm/année	%	mm/année	%	mm/année	%
Précipitations	1086		1098		1086		1122		1098		1128	
Neige	219	20%	292	27%	219	20%	436	40%	294	27%	471	42%
Fonte de neige	221	20%	299	28%	210	19%	448	41%	310	28%	489	43%
Sublimation	13	1%	16	1%	26	2%	25	2%	15	1%	19	2%
Ruisselement de surface	286	26%	299	28%	218	20%	267	25%	326	30%	250	22%
Écoulement latéral	26	2%	31	3%	9	1%	48	4%	32	3%	75	7%
Écoulement total des drains	146	13%	182	17%	157	14%	196	18%	173	16%	223	20%
Écoulement souterrain (aquifère peu profond)	160	15%	144	13%	141	13%	159	15%	161	15%	103	9%
Revap (aquifère peu profonde)	181	17%	152	14%	146	13%	132	12%	68	6%	118	10%
Recharge de l'aquifère profond	6	1%	26	2%	46	4%	40	4%	0	0%	32	3%
Recharge total de l'aquifère	166	15%	196	18%	229	21%	198	18%	161	15%	160	14%
Écoulements hydriques totaux (wtyld)	618	57%	656	60%	524	48%	670	62%	691	63%	651	58%
Percolation dans le sol	166	15%	196	18%	228	21%	198	18%	161	15%	159	14%
Évapotranspiration (ET)	502	46%	432	40%	516	48%	462	43%	452	41%	470	42%
Évapotranspiration potentielle (PET)	907	83%	900	83%	883	81%	884	81%	903	82%	894	79%
Pertes de transmission	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
Cloture bilan : Pcp-(Evap+Écoulements totaux+Aquifère profond+Pertes)	-41	-3,8%	-16	-1,5%	-1	-0,1%	-50	-5%	-45	-4,1%	-25	-2,2%
Drainage artificiel vs. écoulements totaux	146	24%	182	28%	157	30%	196	29%	173	25%	223	34%
Ruisselement de surface vs écoulements totaux*	286	46%	299	46%	218	42%	267	40%	326	47%	250	38%
Ruisselement souterrain vs écoulements totaux	333	54%	357	54%	307	58%	403	60%	365	53%	401	62%

* Les pertes par transmission sont soustraites au ruissellement de surface

	C1 S2 – non-compacté conservation						C2 S2 – compacté conservation					
	microbv3		microbv5		microbv7		microbv6		microbv8		microbv10	
	mm/année	%	mm/année	%	mm/année	%	mm/année	%	mm/année	%	mm/année	%
Précipitations	1093		1104		1110		1126		1110		1096	
Neige	263	24%	326	30%	365	33%	458	41%	365	33%	280	26%
Fonte de neige	267	24%	336	30%	370	33%	467	42%	369	33%	294	27%
Sublimation	3	0%	24	2%	8	1%	23	2%	16	1%	8	1%
Ruisselement de surface	255	23%	208	19%	315	28%	300	27%	323	29%	305	28%
Écoulement latéral	9	1%	31	3%	15	1%	141	12%	116	10%	70	6%
Écoulement total des drains	317	29%	216	20%	333	30%	154	14%	141	13%	300	27%
Écoulement souterrain (aquifère peu profond)	8	1%	206	19%	0	0%	126	11%	87	8%	5	0%
Revap (aquifère peu profonde)	177	16%	164	15%	22	2%	154	14%	152	14%	128	12%
Recharge de l'aquifère profond	2	0%	23	2%	0	0%	37	3%	27	2%	1	0%
Recharge total de l'aquifère	10	1%	228	21%	0	0%	185	16%	137	12%	6	1%
Écoulements hydriques totaux (wtyld)	589	54%	661	60%	663	60%	720	64%	667	60%	679	62%
Percolation dans le sol	10	1%	228	21%	0	0%	186	16%	137	12%	6	1%
Évapotranspiration (ET)	518	47%	465	42%	479	43%	391	35%	432	39%	441	40%
Évapotranspiration potentielle (PET)	928	85%	879	80%	914	82%	881	78%	898	81%	917	84%
Pertes de transmission	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
Cloture bilan : Pcp-(Evap+Écoulements totaux+Aquifère profond+Pertes)	-16	-1%	-45	-4%	-32	-3%	-23	-2%	-16	-1%	-25	-2%
Drainage artificiel vs. écoulements totaux	317	54%	216	33%	333	50%	154	21%	141	21%	300	44%
Ruisselement de surface vs écoulements totaux*	255	43%	208	31%	315	48%	300	42%	323	48%	305	45%
Ruisselement souterrain vs écoulements totaux	334	57%	453	69%	348	52%	420	58%	343	52%	375	55%

* Les pertes par transmission sont soustraites au ruissellement de surface

ANNEXE S - SIMULATIONS HYDROLOGIQUES AUX 12 MICRO-BASSINS

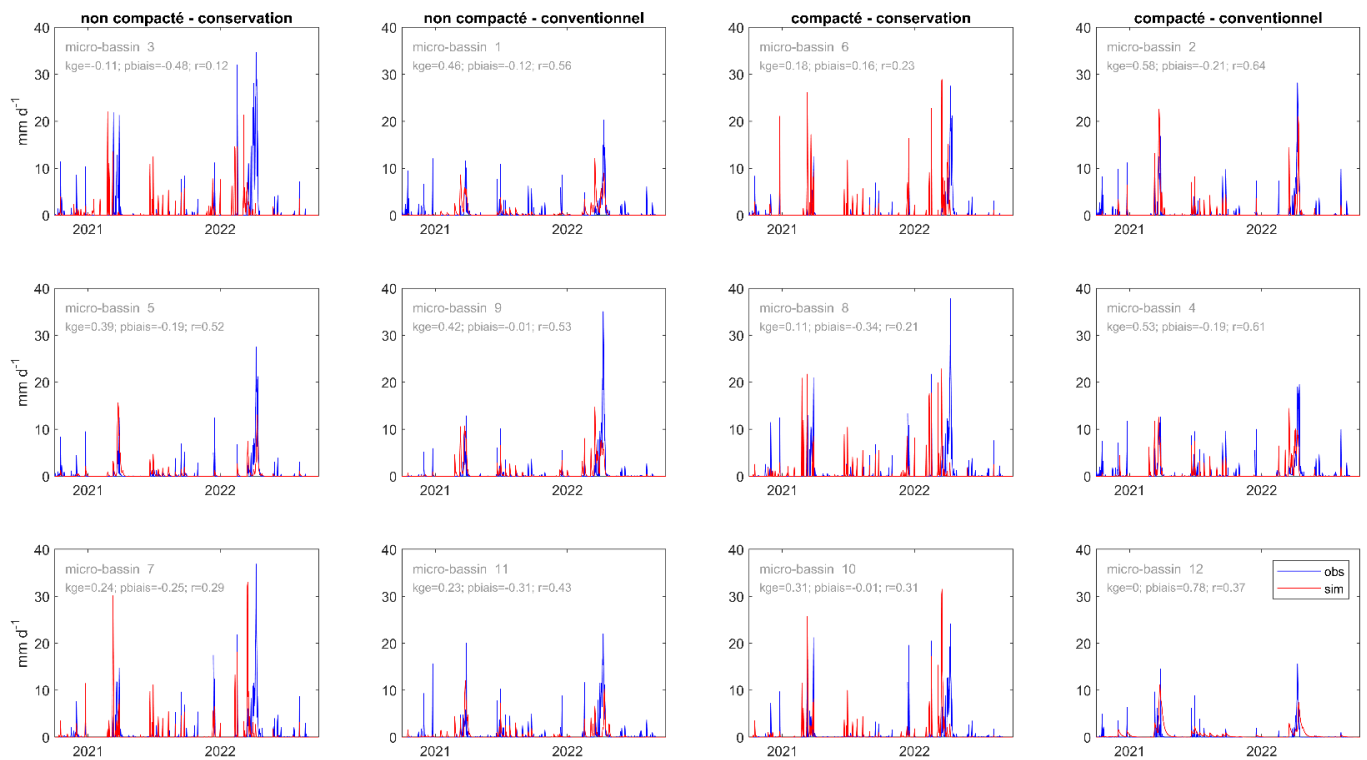


Figure S1 - Hauteurs moyennes d'eau ruisselées observées (obs) et simulées (sim) à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.

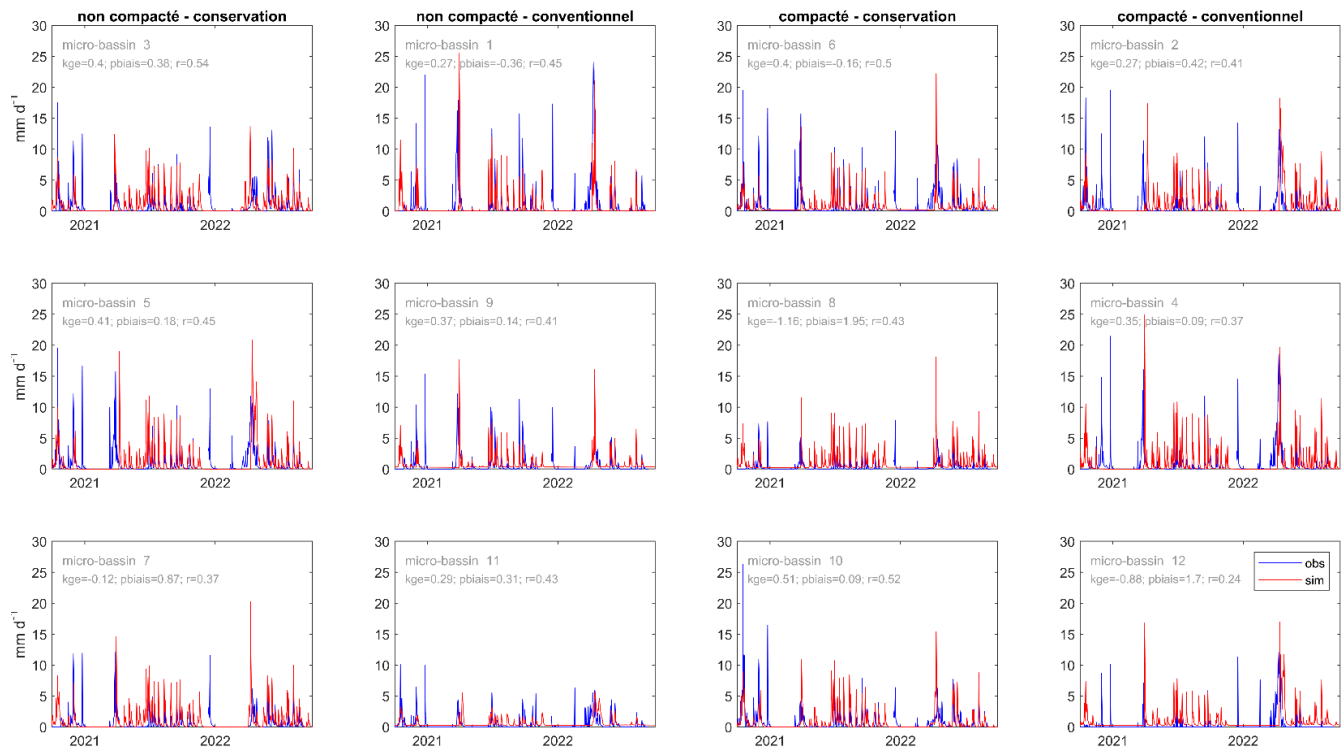


Figure S2 - Hauteurs moyennes d'eau drainées (q_{drain}) observées (obs) et simulées (sim) à chaque exutoire de micro-bassin du site expérimental de Saint-Lambert-de-Lauzon.

ANNEXE T - RÉSULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES SOLS

Tableau T1. Résultats des propriétés granulométriques des parcelles dans les deux dispositifs

Dispositif	Parcelle	Prof.	M.O. (%)	Limon gros (%)	Limon moyen (%)	Limon fin (%)	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Texture
12 micro-bassins	1	0-20	3.62	16.4	20.0	13.6	25.7	50.0	24.3	Loam
12 micro-bassins	1	20-4	2.24	17.6	21.5	14.2	17.6	53.3	29.1	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	1	40-6	0.77	18.8	24.5	16.3	8.2	59.6	32.2	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	2	0-20	3.96	15.7	18.4	13.9	27.6	48.1	24.4	Loam
12 micro-bassins	2	20-4	2.22	16.3	20.1	14.2	18.9	50.6	30.5	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	2	40-6	0.75	14.7	25.4	17.6	6.95	57.7	35.3	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	3	0-20	3.01	16.8	18.3	12.0	29.8	47.0	23.1	Loam
12 micro-bassins	3	20-4	1.88	18.1	20.6	10.2	25.2	48.9	25.9	Loam
12 micro-bassins	3	40-6	0.84	14.7	22.5	14.0	17.5	51.2	31.3	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	4	0-20	3.56	17.2	22.4	13.8	19.7	53.4	26.9	Loam Limoneux
12 micro-bassins	4	20-4	2.12	16.2	21.5	15.0	20.2	52.8	27.0	Loam Limoneux
12 micro-bassins	4	40-6	2.21	17.6	20.2	14.2	18.9	52.0	29.2	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	5	0-20	3.56	19.1	20.5	14.4	20.6	53.9	25.5	Loam Limoneux
12 micro-bassins	5	20-4	2.44	15.0	21.3	15.5	18.4	51.8	29.9	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	5	40-6	1.86	15.9	22.6	15.9	12.8	54.4	32.7	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	6	0-20	3.85	17.8	17.6	13.3	26.8	48.7	24.4	Loam
12 micro-bassins	6	20-4	2.04	18.8	20.2	13.3	23.1	52.2	24.7	Loam Limoneux
12 micro-bassins	6	40-6	1.10	17.4	21.2	14.0	21.1	52.6	26.3	Loam Limoneux
12 micro-bassins	7	0-20	4.03	17.2	20.6	14.5	23.3	52.3	24.4	Loam Limoneux
12 micro-bassins	7	20-4	2.44	16.2	20.3	14.2	21.3	50.8	27.9	Loam Argileux
12 micro-bassins	7	40-6	1.52	18.8	20.0	12.4	20.8	51.2	28.1	Loam Argileux
12 micro-bassins	8	0-20	3.24	16.5	20.7	13.2	23.2	50.4	26.4	Loam Limoneux
12 micro-bassins	8	20-4	2.14	16.4	20.8	15.3	17.3	52.5	30.2	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	8	40-6	1.05	18.7	19.9	14.0	18.5	52.7	28.8	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	9	0-20	4.23	16.4	21.2	12.2	24.0	49.8	26.2	Loam
12 micro-bassins	9	20-4	1.74	16.1	20.6	11.9	22.1	48.6	29.3	Loam Argileux
12 micro-bassins	9	40-6	1.53	16.2	20.0	14.2	19.3	50.3	30.3	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	10	0-20	3.68	19.2	20.5	14.4	18.9	54.1	27.0	Loam Limoneux
12 micro-bassins	10	20-4	2.42	19.0	22.4	13.1	17.2	54.5	28.3	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	10	40-6	1.53	16.8	22.0	14.7	16.3	53.5	30.1	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	11	0-20	4.56	17.8	20.8	12.8	23.5	51.4	25.1	Loam Limoneux
12 micro-bassins	11	20-4	2.48	17.0	22.9	14.2	16.7	54.1	29.2	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	11	40-6	2.10	15.6	22.3	13.0	19.6	50.9	29.5	Loam Limono-Argileux
12 micro-bassins	12	0-20	3.87	15.7	19.6	10.7	30.1	46.0	23.9	Loam
12 micro-bassins	12	20-4	3.19	15.1	18.3	12.1	28.5	45.5	25.9	Loam
12 micro-bassins	12	40-6	1.36	16.1	22.4	12.6	20.9	51.1	28.0	Loam Argileux
48 parcelles	1	0-20	3.17	16.2	20.5	12.6	26.2	49.2	24.6	Loam
48 parcelles	1	20-4	2.52	17.5	22.4	13.1	20.0	53.0	27.0	Loam Argileux
48 parcelles	1	40-6	0.75	17.7	24.4	13.8	10.7	55.9	33.3	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	2	0-20	3.66	16.5	20.6	12.7	24.1	49.8	26.2	Loam
48 parcelles	2	20-4	2.76	16.9	21.6	12.6	23.0	51.1	25.9	Loam Limoneux
48 parcelles	2	40-6	1.09	18.1	22.5	14.0	14.0	54.7	31.3	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	3	0-20	3.23	15.8	24.5	13.5	18.6	53.7	27.7	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	3	20-4	2.15	17.0	23.9	13.7	16.7	54.5	28.8	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	3	40-6	0.90	17.5	24.6	14.6	13.3	56.7	30.0	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	4	0-20	4.27	16.4	21.2	12.2	25.2	49.9	24.9	Loam
48 parcelles	4	20-4	2.26	10.4	24.1	12.6	24.6	47.1	28.4	Loam Argileux
48 parcelles	4	40-6	1.50	13.3	18.8	11.5	31.4	43.6	25.1	Loam
48 parcelles	5	0-20	4.23	16.1	19.4	12.7	25.6	48.1	26.2	Loam
48 parcelles	5	20-4	3.49	13.6	20.6	13.6	25.8	47.7	26.5	Loam
48 parcelles	5	40-6	2.40	16.3	22.9	15.1	16.2	54.3	29.6	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	6	0-20	4.33	16.0	23.4	13.7	18.9	53.1	28.0	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	6	20-4	3.48	16.5	23.2	14.4	18.8	54.2	27.0	Loam Limoneux
48 parcelles	6	40-6	1.13	14.8	27.2	14.7	11.8	56.8	31.5	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	7	0-20	5.08	16.1	20.9	14.7	20.9	51.7	27.4	Loam Argileux
48 parcelles	7	20-4	4.02	17.9	20.9	14.2	19.8	53.1	27.1	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	7	40-6	1.86	17.7	23.5	16.5	11.1	57.6	31.3	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	8	0-20	4.39	16.6	21.0	14.2	22.4	51.8	25.9	Loam Limoneux
48 parcelles	8	20-4	3.24	16.4	21.8	15.2	17.9	53.5	28.6	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	8	40-6	1.02	14.7	22.5	14.9	17.5	52.1	30.4	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	9	0-20	4.84	16.0	20.9	13.8	23.6	50.8	25.6	Loam Limoneux
48 parcelles	9	20-4	4.59	18.7	24.1	14.1	17.3	56.8	25.9	Loam Limoneux
48 parcelles	9	40-6	1.57	18.9	22.7	13.3	15.4	54.9	29.8	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	10	0-20	5.55	14.2	21.6	16.0	19.7	51.7	28.6	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	10	20-4	4.26	14.7	23.3	15.5	14.8	53.5	31.8	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	10	40-6	1.12	18.3	23.6	15.2	12.2	57.2	30.7	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	11	0-20	3.22	15.8	23.1	14.4	17.3	53.2	29.5	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	11	20-4	2.40	15.0	23.2	15.7	15.9	53.9	30.2	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	11	40-6	0.80	16.3	25.1	15.8	10.3	57.3	32.4	Loam Limono-Argileux
48 parcelles	12	0-20	4.48	13.7	21.1	12.5	27.9	47.2	24.9	Loam
48 parcelles	12	20-4	3.74	16.4	19.5	13.3	21.6	49.2	29.2	Loam Argileux
48 parcelles	12	40-6	2.37	15.7	20.5	14.0	19.1	50.3	30.7	Loam Limono-Argileux

Tableau T2. Analyses des échantillons des sols dans les deux dispositifs.

Dispositif	Parcelle	Prof.	MVA	pH	pH SMP	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na	C	N	C/N
A	1	0-10	2880	6.19	6.69	61.2	120	1183	166	1235	0.26	4.54	282	28.1	2.91	7.29	2.17	0.19	11.5
A	1	10-20	3090	6.10	6.65	37.3	52.0	1060	154	1237	0.11	3.06	253	17.2	1.57	9.54	1.68	0.15	11.6
A	1	20-40	3260	6.32	6.98	19.0	53.0	879	295	883	0	1.03	220	51.1	0.83	15.4	0.35	0.05	7.17
A	2	0-10	2790	6.10	6.63	50.9	79.3	1037	168	1339	0.15	3.15	284	24.2	1.76	8.46	1.73	0.15	11.4
A	2	10-20	3070	6.33	6.75	36.1	72.5	1137	166	1161	0.18	3.22	257	24.1	1.98	9.15	1.56	0.14	11.1
A	2	20-40	3050	6.91	7.10	12.3	63.3	1063	322	853	0	1.51	236	72.0	1.21	16.5	0.48	0.06	7.93
A	3	0-10	3110	6.65	7.03	36.5	118	1249	182	894	0.20	3.64	252	62.0	2.56	6.78	1.25	0.12	10.6
A	3	10-20	3400	7.42	7.28	11.8	75.5	1576	230	742	0	1.92	216	68.1	1.42	11.8	0.49	0.06	8.36
A	3	20-40	3300	7.07	7.13	25.8	84.9	1329	171	855	0.19	3.58	242	65.0	2.17	8.73	1.05	0.10	10.2
A	4	0-10	2900	6.30	6.74	50.8	120	1170	193	1172	0.17	4.44	253	31.4	2.19	6.82	1.62	0.15	11.1
A	4	10-20	3180	6.33	6.75	31.3	72.7	1111	176	1097	0.12	3.17	234	23.1	1.40	9.12	1.39	0.13	10.8
A	4	20-40	3270	6.04	6.69	18.0	58.4	704	153	1093	0	0.95	223	19.1	0.74	12.5	0.71	0.07	9.57
A	5	0-10	3080	6.53	6.80	20.6	59.9	1216	222	1061	0.08	2.39	269	40.6	1.56	13.2	1.09	0.11	9.75
A	5	10-20	2870	6.37	6.70	39.0	49.8	1230	163	1177	0.13	4.23	324	28.2	2.14	11.8	1.84	0.16	11.2
A	5	20-40	3280	6.34	6.84	15.3	52.5	1006	295	926	0	1.48	259	39.1	1.10	17.8	0.73	0.09	8.57
A	6	0-10	2940	6.08	6.67	33.1	113	1140	167	1073	0.22	4.51	283	31.0	2.60	6.73	1.71	0.16	10.5
A	6	10-20	3150	6.57	6.90	18.7	81.6	1290	166	987	0.14	3.06	253	36.7	1.81	8.12	1.20	0.11	10.5
A	6	20-40	3390	7.18	7.14	9.4	67.4	1198	194	890	0	1.21	225	52.3	1.13	11.9	0.39	0.05	7.63
A	7	0-10	2790	6.08	6.56	47.7	107	1118	173	1342	0.18	4.94	286	25.2	2.42	7.69	2.04	0.18	11.3
A	7	10-20	3300	6.37	6.81	15.2	52.4	849	193	1010	0	1.12	248	33.7	0.81	16.3	0.64	0.06	10.1
A	7	20-40	3230	6.31	6.73	19.6	65.4	1016	178	1128	0.06	2.54	230	28.4	1.22	11.1	1.00	0.10	10.5
A	8	0-10	3090	6.17	6.65	32.2	94.6	960	154	1183	0.10	3.17	239	21.0	1.48	8.43	1.50	0.14	11.0
A	8	10-20	3160	6.34	6.70	27.7	77.2	996	177	1161	0.11	2.82	236	20.9	1.45	11.2	1.37	0.12	11.1
A	8	20-40	3360	6.72	6.90	15.2	63.5	1120	245	1001	0	1.18	234	35.9	0.89	15.4	0.54	0.06	9.63
A	9	0-10	3000	6.09	6.60	35.8	139	988	169	1176	0.20	4.02	257	24.8	2.15	6.97	1.87	0.17	10.9
A	9	10-20	3170	6.16	6.68	19.1	66.5	990	160	1124	0.10	2.54	239	23.4	1.23	10.0	1.30	0.13	9.99
A	9	20-40	3340	6.81	6.98	14.7	56.2	1320	197	931	0	1.29	232	45.3	0.90	15.1	0.49	0.06	8.33
A	10	0-10	2940	6.14	6.56	38.0	103	1100	160	1250	0.17	4.00	264	22.6	1.90	8.77	1.92	0.17	11.0
A	10	10-20	2800	6.21	6.65	39.8	85.5	1165	164	1288	0.17	3.98	274	20.8	1.75	10.9	1.84	0.17	11.0
A	10	20-40	3210	6.28	6.81	21.9	71.1	1022	180	1080	0.08	2.13	224	25.1	1.04	13.7	1.02	0.11	9.55
A	11	0-10	3020	6.32	6.71	31.2	75.7	1224	169	1302	0.22	3.89	195	17.1	1.88	8.37	1.78	0.17	10.4
A	11	10-20	3100	6.41	6.78	21.0	58.0	1160	163	1261	0.13	2.52	188	15.3	1.15	10.5	1.38	0.13	10.5
A	11	20-40	3270	6.65	6.94	15.8	58.6	1134	196	1004	0	1.71	220	38.2	0.98	15.7	0.82	0.09	9.12
A	12	0-10	3130	6.09	6.68	28.3	60.0	1030	173	1060	0.17	3.16	242	20.7	1.86	10.2	1.63	0.15	10.9
A	12	10-20	3200	6.09	6.75	21.6	44.0	1085	171	1003	0.11	2.74	222	22.1	1.51	11.1	1.47	0.15	10.0
A	12	20-40	3340	6.20	6.90	15.3	42.8	910	167	937	0	1.25	215	36.8	0.88	14.2	0.71	0.08	9.23
B	1	0-10	3040	6.22	6.74	52.2	92.4	1050	106	1212	0.13	1.93	259	24.7	1.41	7.81	1.54	0.14	11.0
B	1	10-20	3060	6.34	6.79	48.4	80.1	1108	106	1199	0.09	1.84	239	23.2	1.32	8.49	1.40	0.13	10.5
B	1	20-40	3220	6.28	6.82	36.9	69.9	977	134	1075	0	1.39	246	21.3	1.13	10.1	1.10	0.11	10.4
B	2	0-10	2830	5.93	6.60	44.2	75.7	918	93.7	1313	0.07	1.78	293	24.0	1.57	9.56	1.70	0.16	10.6
B	2	10-20	3060	6.03	6.64	27.9	57.0	886	89	1245	0.07	1.54	239	19.3	1.41	10.3	1.46	0.14	10.8
B	2	20-40	3310	6.09	6.75	23.7	48.2	807	111	1093	0	1.17	235	18.3	1.01	11.5	1.05	0.11	9.78
B	3	0-10	2970	6.15	6.73	39.5	107	1022	106	1179	0.11	1.44	266	26.8	1.09	9.68	1.56	0.16	9.90
B	3	10-20	2870	6.36	6.77	28.1	65.9	1144	106	1218	0.09	1.54	279	21.5	1.12	12.4	1.48	0.15	10.2
B	3	20-40	3120	6.29	6.92	18.2	60.8	929	286	899	0	1.05	259	41.1	0.95	15.0	0.47	0.07	6.43
B	4	0-10	2800	5.97	6.50	56.0	123	1021	92.1	1508	0.14	1.5	262	13.9	1.68	7.88	2.05	0.17	12.0
B	4	10-20	2970	5.99	6.49	34.3	69.0	969	81.4	1456	0.07	1.33	215	8.86	1.20	9.68	1.92	0.16	12.0
B	4	20-40	2950	6.00	6.60	29.9	71.4	687	69.5	1562	0	0.86	195	7.31	0.94	11.0	1.25	0.12	10.6
B	5	0-10	2810	5.96	6.53	37.6	80.0	998	83.9	1479	0.15	1.66	262	16.3	1.47	5.48	1.83	0.15	11.9
B	5	10-20	3080	6.03	6.59	35.9	68.9	1000	80.1	1359	0.14	1.51	216	12.3	1.59	6.02	1.79	0.15	11.9
B	5	20-40	2980	5.99	6.53	32.4	62.0	988	72.1	1415	0.07	1.42	231	9.49	1.12	8.57	1.77	0.15	12.1
B	6	0-10	2650	6.10	6.64	28.1	82.5	1051	121	1510	0.10	1.34	251	20.7	1.29	8.96	1.69	0.16	10.9
B	6	10-20	2810	6.18	6.61	20.3	60.7	1052	102	1472	0.09	1.22	218	13.3	1.09	9.12	1.70	0.15	11.3
B	6	20-40	3180	6.39	6.77	15.9	49.1	976	214	1169	0	0.97	199	14.7	0.89	12.1	0.81	0.09	9.17
B	7	0-10	2760	6.09	6.55	48.1	101	1236	137	1409	0.14	2.02	243	14.4	1.56	6.86	2.58	0.20	13.2
B	7	10-20	2920	6.18	6.53	36.8	81.4	1197	120	1380	0.11	1.95	223	11.2	1.43	8.76	2.63	0.19	13.5
B	7	20-40	2840	6.07	6.50	28.2	58.1	911	98.9	1478	0	1.42	240	8.21	1.20	11.8	2.10	0.15	13.8
B	8	0-10	2740	5.85	6.45	31.0	90.6	977	115	1387	0.12	1.86	294	21.3	1.56	10.1	2.26	0.19	11.8
B	8	10-20	2980	5.86	6.46	20.1	42.3	915	90.6	1267	0	1.61	259	14.3	1.06	11.7	1.99	0.17	11.5
B	8	20-40	3060	5.75	6.50	17.0	36.6	629	72.2	1261	0	1.1	285	11.3	0.87	11.3	1.27	0.11	11.2
B	9	0-10	2590	5.74	6.39	32.0	145	1077	116	1699	0.16	1.39	236	16.5	1.43	8.21	2.36	0.20	12.1
B	9	10-20	2950	5.90	6.49	12.2	65.2	1098	108	1495	0.10	1.25	185	11.1	1.04	10.0	2.08	0.18	11.8
B	9	20-40	2670	5.91	6.58	18.1	50.3	786	117	1488	0	0.76	250	7.84	0.73	12.8	1.06	0.10	10.5
B	10	0-10	2720	5.55	6.22	66.6	109	914	120	1431	0	2.56	305	15.7	1.84	9.26	2.96	0.20	14.5
B	10	10-20	2660	5.51	6.20	64.3	82.5	931	109	1467	0	2.67	290	14.0	2.04	10.2	3.18	0.21	14.9
B	10	20-40	2760	5.48	6.18	70.9	57.4	629	93.9	1491	0	2.27	279	8.07	1.21	13.0	2.66	0.17	15.9
B	11	0-10	2890	5.57	6.54	43.4	136	898	128	1199	0.06	1.95	292	24.1	1.63	8.64	1.59	0.15	10.3
B	11	10-20	2950	5.70	6.54	31.4	83.6	881	112	1199	0.06	1.91	275	19.5	1.45	9.81	1.56	0.14	11.1
B	11	20-40	3140	5.65	6.67	26.2	62.8	759	163	1057	0	1.41	287	36.8	1.02	12.9	0.78	0.09	8.64
B	12	0-10	2830	5.92	6.47														

ANNEXE U - RÉSULTATS DES ANALYSES SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE

Dispositif	Parcelle	Système cultures	Compaction	Travail sol/Système cultures	%Agréats 8-4 mm	%Agréats 4-2 mm	%Agréats 2-1 mm	%Agréats 1-0.5 mm	%Agréats 0.5-0.25 mm	D.M.P. mm
12 micro-bassins	1		C1	S1	37.63	16.55	9.33	6.02	2.76	2.95
12 micro-bassins	2		C2	S1	53.48	15.15	7.87	4.28	1.53	3.82
12 micro-bassins	3		C1	S2	57.20	15.82	5.38	2.35	0.98	4.01
12 micro-bassins	4		C2	S2	61.32	12.64	5.46	2.84	0.69	4.16
12 micro-bassins	5		C1	S1	57.10	16.37	7.31	3.47	0.92	4.06
12 micro-bassins	6		C2	S1	52.49	17.94	8.88	4.31	0.91	3.86
12 micro-bassins	7		C1	S2	72.20	12.36	3.99	2.00	0.23	4.78
12 micro-bassins	8		C2	S2	61.11	15.12	5.68	2.31	1.26	4.23
12 micro-bassins	9		C1	S1	46.49	16.56	8.58	5.73	2.16	3.47
12 micro-bassins	10		C2	S1	62.22	13.23	6.10	2.72	0.92	4.25
12 micro-bassins	11		C1	S2	39.74	14.75	8.23	6.78	3.32	3.01
12 micro-bassins	12		C2	S2	48.28	13.09	6.05	4.39	1.74	3.42
48 parcelles	1	T1	C1	S2	63.67	15.81	5.59	2.66	0.50	4.40
48 parcelles	2	T1	C2	S2	62.82	15.46	7.12	3.18	1.24	4.37
48 parcelles	3	T1	C1	S1	47.35	14.95	5.79	2.99	1.51	3.40
48 parcelles	4	T1	C2	S1	62.25	14.21	5.72	3.03	1.27	4.27
48 parcelles	5	T3	C2	S2	66.48	14.38	5.37	2.91	0.85	4.53
48 parcelles	6	T3	C1	S2	64.16	14.60	5.18	2.63	0.79	4.39
48 parcelles	7	T4	C2	S2	50.68	14.18	6.44	4.32	1.51	3.60
48 parcelles	8	T4	C1	S2	45.67	13.94	5.23	2.97	1.66	3.26
48 parcelles	9	T2	C2	S2	74.93	9.01	3.92	1.53	0.53	4.84
48 parcelles	10	T2	C1	S2	64.98	15.51	5.63	2.07	0.83	4.47
48 parcelles	11	T2	C2	S1	69.18	13.97	6.44	2.73	0.84	4.69
48 parcelles	12	T2	C1	S1	69.07	12.65	4.95	2.50	0.95	4.62
48 parcelles	13	T2	C2	S1	53.87	15.84	8.66	5.33	2.11	3.89
48 parcelles	14	T2	C1	S1	37.53	19.66	12.95	8.43	3.53	3.11
48 parcelles	15	T2	C2	S2	58.68	16.57	9.15	4.53	1.68	4.20
48 parcelles	16	T2	C1	S2	46.76	18.44	9.56	6.14	2.36	3.56
48 parcelles	17	T1	C1	S1	57.86	16.47	7.20	4.11	1.45	4.11
48 parcelles	18	T1	C2	S1	58.08	16.52	7.05	3.64	1.39	4.12
48 parcelles	19	T1	C1	S2	61.39	17.07	8.17	4.03	1.13	4.35
48 parcelles	20	T1	C2	S2	50.89	17.70	10.17	5.42	2.05	3.78
48 parcelles	21	T3	C1	S2	55.33	18.08	7.23	3.34	2.00	4.00
48 parcelles	22	T3	C2	S2	60.63	14.62	7.46	3.73	1.10	4.22
48 parcelles	23	T4	C1	S2	69.39	10.50	3.29	1.82	0.41	4.54
48 parcelles	24	T4	C2	S2	65.61	14.57	7.32	3.33	1.24	4.51
48 parcelles	25	T1	C2	S2	63.91	15.03	7.01	3.41	1.18	4.42
48 parcelles	26	T1	C1	S2	56.28	18.61	9.54	4.41	1.60	4.12
48 parcelles	27	T1	C2	S1	44.37	17.79	9.40	8.07	3.03	3.41
48 parcelles	28	T1	C1	S1	47.32	17.75	10.32	7.46	2.68	3.59
48 parcelles	29	T4	C2	S2	68.08	14.17	5.33	1.96	1.01	4.61
48 parcelles	30	T4	C1	S2	59.80	17.72	8.79	3.88	1.07	4.28
48 parcelles	31	T3	C2	S2	67.91	13.23	5.61	2.10	1.22	4.58
48 parcelles	32	T3	C1	S2	67.83	14.58	6.04	3.02	1.08	4.62
48 parcelles	33	T2	C2	S1	45.62	24.39	10.89	4.29	2.46	3.67
48 parcelles	34	T2	C1	S1	52.37	16.14	10.35	5.79	2.17	3.83
48 parcelles	35	T2	C2	S2	60.80	17.66	7.36	3.70	2.11	4.32
48 parcelles	36	T2	C1	S2	44.82	20.07	11.74	7.10	3.18	3.53
48 parcelles	37	T4	C1	S2	60.86	19.08	8.37	3.83	1.21	4.38
48 parcelles	38	T4	C2	S2	67.04	15.34	6.65	3.02	1.04	4.61
48 parcelles	39	T3	C1	S2	63.08	16.42	6.32	2.79	1.09	4.40
48 parcelles	40	T3	C2	S2	69.49	13.51	5.36	2.53	0.77	4.68
48 parcelles	41	T2	C1	S2	69.80	13.73	5.27	2.81	0.78	4.70
48 parcelles	42	T2	C2	S2	68.86	13.24	4.53	1.68	0.45	4.61
48 parcelles	43	T2	C1	S1	59.33	13.98	5.60	3.26	1.29	4.09
48 parcelles	44	T2	C2	S1	44.21	18.27	7.45	3.98	1.65	3.35
48 parcelles	45	T1	C2	S1	45.49	17.24	9.55	5.76	3.04	3.44
48 parcelles	46	T1	C1	S1	51.21	17.84	8.34	4.70	1.95	3.78
48 parcelles	47	T1	C2	S2	53.43	15.46	6.43	3.59	1.17	3.80
48 parcelles	48	T1	C1	S2	52.14	18.73	10.37	5.41	2.33	3.89

C1 : sol non compacté - C2 : sol compacté.

Dans les 12 micro-bassins : S1 : cultures annuelles en travail conventionnel - S2 : cultures annuelles avec trèfle intercalaire en travail réduit.

Dans les 48 parcelles : S1 : travail de sol conventionnel - S2 : travail réduit.

ANNEXE V - SUIVI HYDROMÉTRIQUE À SAINT-LAMBERT SOUS FORME DE TABLEAUX

Tableau V1 : Volumes d'eau mesurés à la sortie des drains ainsi qu'en ruissellement de surface.

	Traitement	2020 - 2021				2021 - 2022				2023
		Hiver	Dégel	Croissance	Somme	Hiver	Dégel	Croissance	Somme	Hiver
Drainage (mm)	C1 S1 Non compac - convent	206,45	244,74	309,08	760,27	177,42	424,52	186,03	787,97	152,44
	C1 S2 Non compac - conserv	220,11	220,97	286,90	727,97	239,72	307,36	398,38	945,46	201,97
	C2 S1 Compac - convent	187,73	161,94	214,93	564,59	152,60	518,55	170,46	841,61	132,97
	C2 S2 Compac - conserv	198,16	131,18	232,86	562,20	174,74	129,61	277,98	582,33	154,39
	Moyenne	203,11	189,71	260,94	653,76	186,12	345,01	258,21	789,34	160,44
Ruissellement (mm)	C1 S1 Non compac - convent	86,53	179,09	161,44	427,06	60,66	632,10	61,75	754,51	61,39
	C1 S2 Non compac - conserv	76,93	224,91	118,39	420,23	79,46	940,33	80,70	1100,49	69,05
	C2 S1 Compac - convent	80,01	235,60	163,06	478,67	71,76	484,59	65,15	621,50	68,48
	C2 S2 Compac - conserv	96,70	277,99	113,58	488,26	63,13	776,58	62,99	902,71	61,54
	Moyenne	85,04	229,40	139,12	453,56	68,75	708,40	67,65	844,80	65,11
Total (mm)	C1 S1 Non compac - convent	292,97	423,84	470,52	1187,33	238,08	1056,62	247,78	1542,48	213,83
	C1 S2 Non compac - conserv	297,03	445,88	405,29	1148,21	319,18	1247,69	479,08	2045,94	271,02
	C2 S1 Compac - convent	267,73	397,54	377,99	1043,26	224,37	1003,13	235,61	1463,11	201,45
	C2 S2 Compac - conserv	294,86	409,17	346,44	1050,46	237,87	906,20	340,98	1485,04	215,93
	Moyenne	288,15	419,10	400,06	1107,31	254,87	1053,41	325,86	1634,14	225,56

Tableau V2 : Charges en MES mesurées à la sortie des drains et en ruissellement de surface.

	Traitement	2020 - 2021				2021 - 2022				2023
		Hiver	Dégel	Croissance	Somme	Hiver	Dégel	Croissance	Somme	Hiver
Drainage (kg/ha)	C1 S1 Non compac - convent	74,66	86,25	114,47	275,38	11,15	44,48	4,41	60,03	12,04
	C1 S2 Non compac - conserv	126,71	76,10	55,97	258,77	9,72	17,96	8,44	36,12	22,83
	C2 S1 Compac - convent	124,10	101,81	60,38	286,29	14,40	52,67	4,69	71,75	23,42
	C2 S2 Compac - conserv	87,28	46,13	36,59	170,00	6,77	4,27	8,28	19,32	16,01
	Moyenne	103,19	77,57	66,85	247,61	10,51	29,84	6,45	46,81	18,58
Ruissellement (kg/ha)	C1 S1 Non compac - convent	26,37	148,43	325,05	499,85	19,76	61,40	24,71	105,87	34,77
	C1 S2 Non compac - conserv	33,35	143,64	34,91	211,89	12,19	14,34	3,92	30,45	16,84
	C2 S1 Compac - convent	27,47	188,08	269,44	484,99	24,18	48,43	18,30	90,91	39,04
	C2 S2 Compac - conserv	45,93	263,20	52,28	361,42	8,65	25,71	3,29	37,66	16,00
	Moyenne	33,28	185,84	170,42	389,54	16,20	37,47	12,56	66,22	26,66
Total (kg/ha)	C1 S1 Non compac - convent	101,04	234,68	439,51	775,23	30,91	105,88	29,11	165,90	46,81
	C1 S2 Non compac - conserv	160,05	219,73	90,88	470,66	21,91	32,30	12,36	66,57	39,67
	C2 S1 Compac - convent	151,57	289,89	329,82	771,28	38,58	101,10	22,99	162,66	62,45
	C2 S2 Compac - conserv	133,21	309,33	88,87	531,42	15,43	29,98	11,57	56,97	32,01
	Moyenne	136,47	263,41	237,27	637,15	26,71	67,31	19,01	113,03	45,23

Tableau V3 : Charges en P-total mesurées à la sortie des drains et en ruissellement de surface.

	Traitement	2020 - 2021				2021 - 2022				2023
		Hiver	Dégel	Croissance	Somme	Hiver	Dégel	Croissance	Somme	Hiver
Drainage (kg/ha)	C1 S1 Non compac - convent	0,09	0,10	0,12	0,31	0,03	0,10	0,01	0,14	0,05
	C1 S2 Non compac - conserv	0,17	0,10	0,07	0,34	0,06	0,06	0,11	0,23	0,16
	C2 S1 Compac - convent	0,14	0,12	0,07	0,33	0,04	0,11	0,02	0,16	0,10
	C2 S2 Compac - conserv	0,16	0,08	0,05	0,29	0,04	0,04	0,05	0,13	0,09
	Moyenne	0,14	0,10	0,08	0,32	0,04	0,08	0,05	0,16	0,10
Ruissellement (kg/ha)	C1 S1 Non compac - convent	0,03	0,14	0,26	0,43	0,04	0,12	0,03	0,19	0,08
	C1 S2 Non compac - conserv	0,04	0,16	0,05	0,25	0,07	0,25	0,04	0,36	0,14
	C2 S1 Compac - convent	0,04	0,19	0,22	0,45	0,06	0,09	0,03	0,18	0,12
	C2 S2 Compac - conserv	0,06	0,19	0,06	0,32	0,05	0,23	0,04	0,32	0,12
	Moyenne	0,04	0,17	0,15	0,36	0,05	0,17	0,04	0,26	0,11
Total (kg/ha)	C1 S1 Non compac - convent	0,12	0,25	0,38	0,74	0,06	0,22	0,05	0,33	0,13
	C1 S2 Non compac - conserv	0,20	0,26	0,12	0,58	0,13	0,32	0,15	0,59	0,30
	C2 S1 Compac - convent	0,18	0,32	0,29	0,78	0,09	0,20	0,05	0,34	0,22
	C2 S2 Compac - conserv	0,22	0,27	0,11	0,60	0,09	0,27	0,09	0,45	0,21
	Moyenne	0,18	0,27	0,23	0,68	0,09	0,25	0,08	0,43	0,21

Tableau V4 : Charges en N-NO3 mesurées à la sortie des drains et en ruissellement de surface.

	Traitement	2020 - 2021				2021 - 2022				2023
		Hiver	Dégel	Croissance	Somme	Hiver	Dégel	Croissance	Somme	Hiver
Drainage (kg/ha)	C1 S1 Non compac - convent	2,60	0,92	1,44	4,96	1,40	1,99	3,34	6,74	4,56
	C1 S2 Non compac - conserv	1,13	0,66	0,51	2,31	0,52	0,64	2,31	3,47	1,91
	C2 S1 Compac - convent	1,38	0,57	0,94	2,89	0,93	1,92	3,01	5,86	2,94
	C2 S2 Compac - conserv	1,11	0,42	0,47	2,01	0,40	0,40	1,69	2,49	1,82
	Moyenne	1,56	0,64	0,84	3,04	0,81	1,24	2,59	4,64	2,81
Ruissellement (kg/ha)	C1 S1 Non compac - convent	1,00	0,37	0,18	1,55	0,11	0,80	0,72	1,64	0,26
	C1 S2 Non compac - conserv	0,37	0,19	0,07	0,63	0,01	0,44	0,26	0,72	0,07
	C2 S1 Compac - convent	0,62	0,24	0,17	1,03	0,61	0,55	0,59	1,76	0,18
	C2 S2 Compac - conserv	0,50	0,17	0,13	0,80	0,05	0,87	0,20	1,11	0,19
	Moyenne	0,62	0,24	0,14	1,00	0,20	0,67	0,44	1,31	0,18
Total (kg/ha)	C1 S1 Non compac - convent	3,60	1,28	1,62	6,51	1,52	2,79	4,06	8,37	4,83
	C1 S2 Non compac - conserv	1,50	0,86	0,58	2,94	0,53	1,08	2,57	4,18	1,98
	C2 S1 Compac - convent	2,00	0,81	1,11	3,92	1,55	2,47	3,60	7,62	3,12
	C2 S2 Compac - conserv	1,61	0,60	0,60	2,81	0,44	1,27	1,89	3,60	2,01
	Moyenne	2,18	0,89	0,98	4,04	1,01	1,90	3,03	5,94	2,98

ANNEXE W - RÉSISTANCE À LA PÉNÉTRATION MESURÉS SUR LES TRANSECTS DES 48 PARCELLES EN OCTOBRE 2020

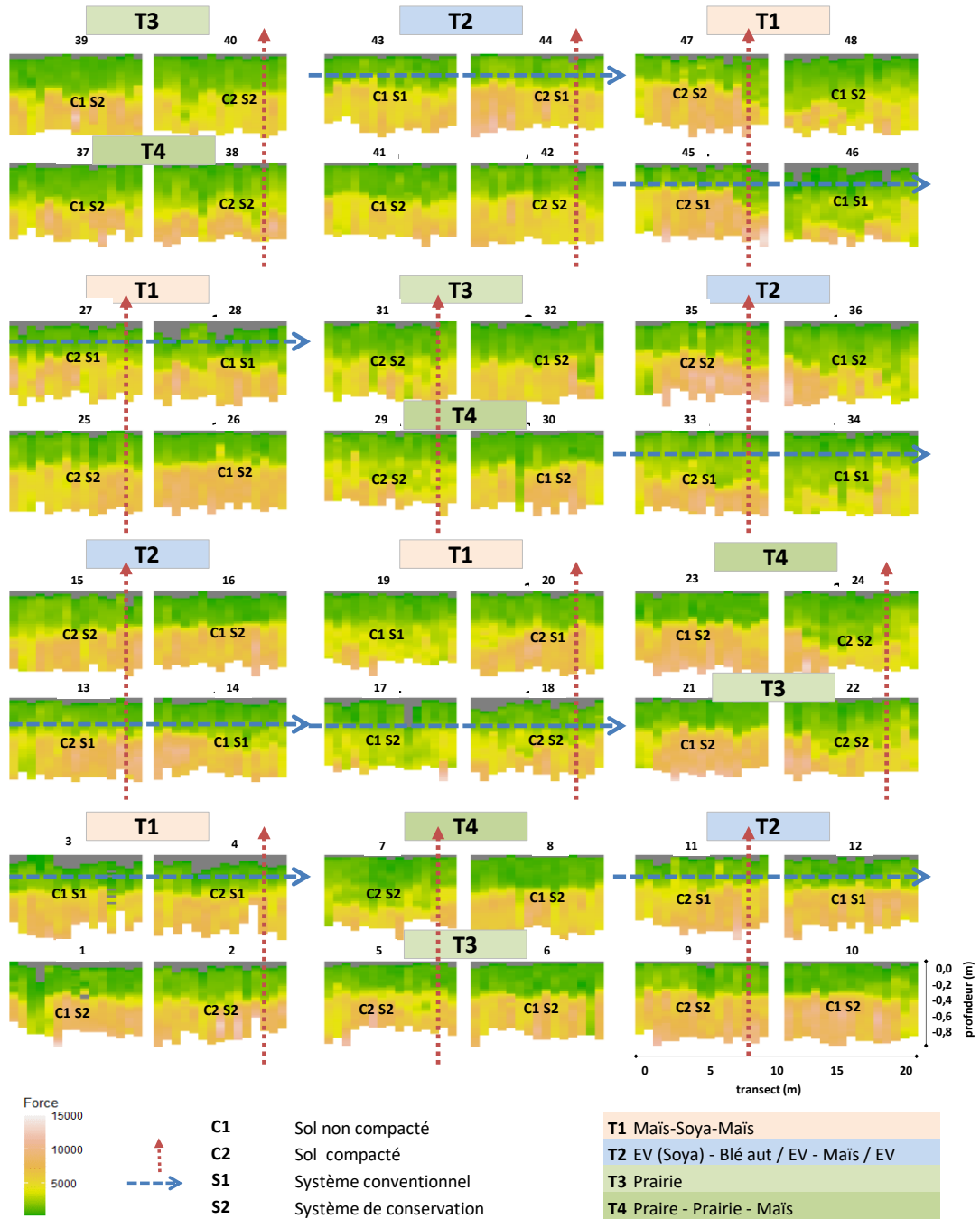
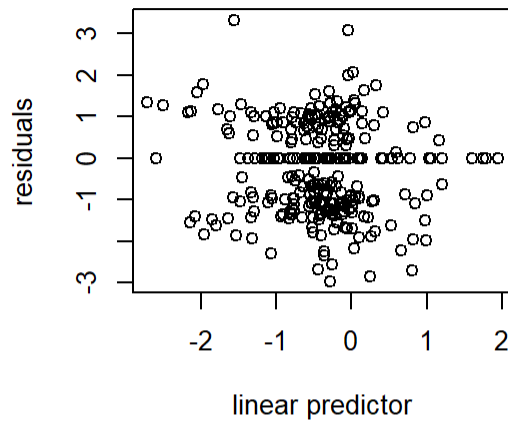
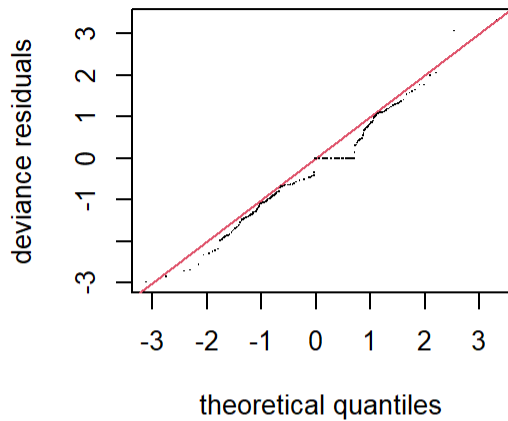


Figure W1. Résistance à la pénétration mesurée sur les transects des 48 parcelles expérimentales en octobre 2020.

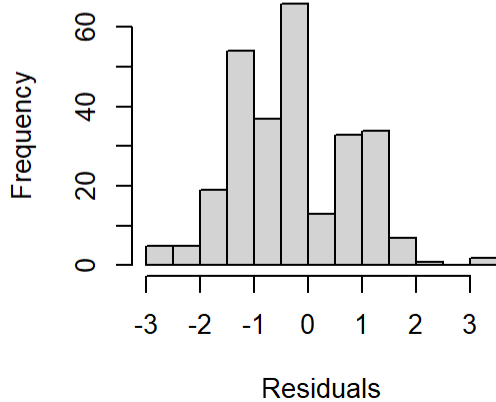
ANNEXE X - MODÈLE STATISTIQUE COMPLET DÉCRIVANT LA PROPORTION DU RUISSELLEMENT À SAINT-LAMBERT

```
mod.pRuiss.full <- gam(eau.pRuiss2 ~ s(numPeriode, by = cond, bs = "gp") +  
  compact + systcult + compact:systcult +  
  s(id.mb, bs = "re"),  
  family = betar(link = "logit"),  
  weights = wts, data = datp)
```

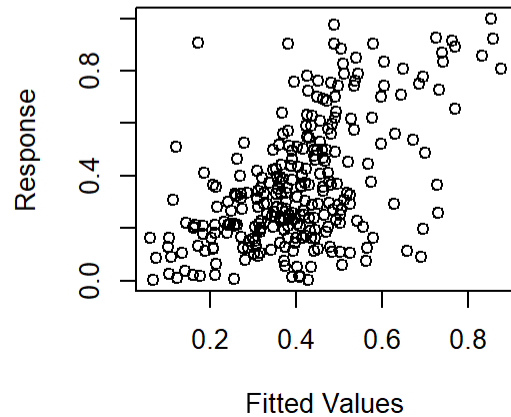
Resids vs. linear pred.



Histogram of residuals



Response vs. Fitted Values



```

##
## Method: REML   Optimizer: outer newton
## full convergence after 12 iterations.
## Gradient range [-0.0002384147,1.965688e-06]
## (score -63.32082 & scale 1).
## Hessian positive definite, eigenvalue range [2.36388e-05,135.4395].
## Model rank = 60 / 60
##
## Basis dimension (k) checking results. Low p-value (k-index<1) may
## indicate that k is too low, especially if edf is close to k'.
##
##
##
##          k'   edf k-index p-value
## s(numPeriode):condcompact_conservation    11.00  8.08   0.54 <2e-16 ***
## s(numPeriode):condcompact_conventionnel    11.00  1.00   0.54 <2e-16 ***
## s(numPeriode):condnoncompact_conservation  11.00  7.35   0.54 <2e-16 ***
## s(numPeriode):condnoncompact_conventionnel 11.00  5.26   0.54 <2e-16 ***
## s(id.mb)                                   12.00  6.28    NA      NA
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

ANNEXE Y - ÉVOLUTION DES CHARGES TOTALES À SAINT-LAMBERT ISSUE DES MODÈLES STATISTIQUES

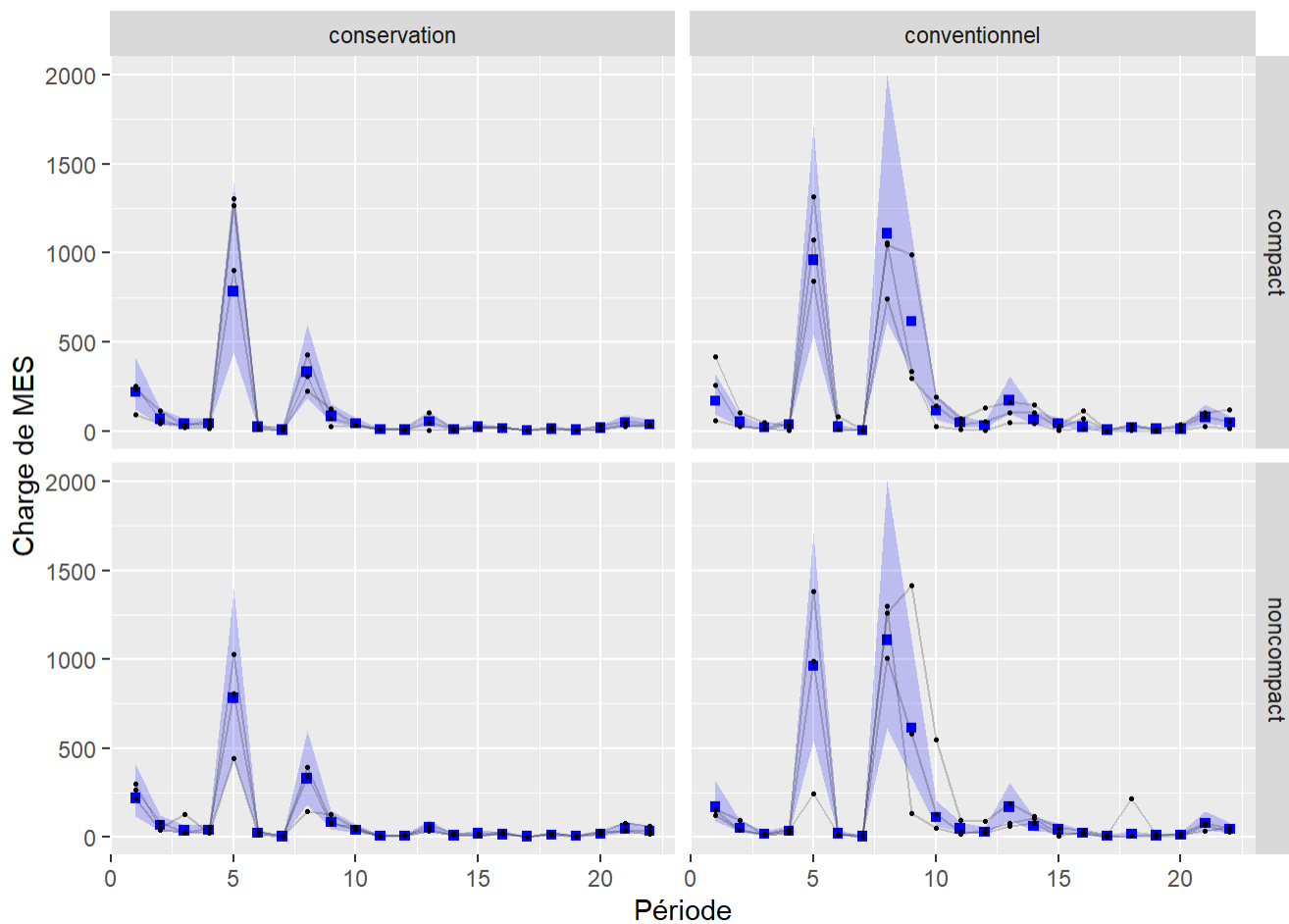


Figure Y1. Évolution de la charge totale de matière en suspension (MES) issue du modèle statistique supporté.

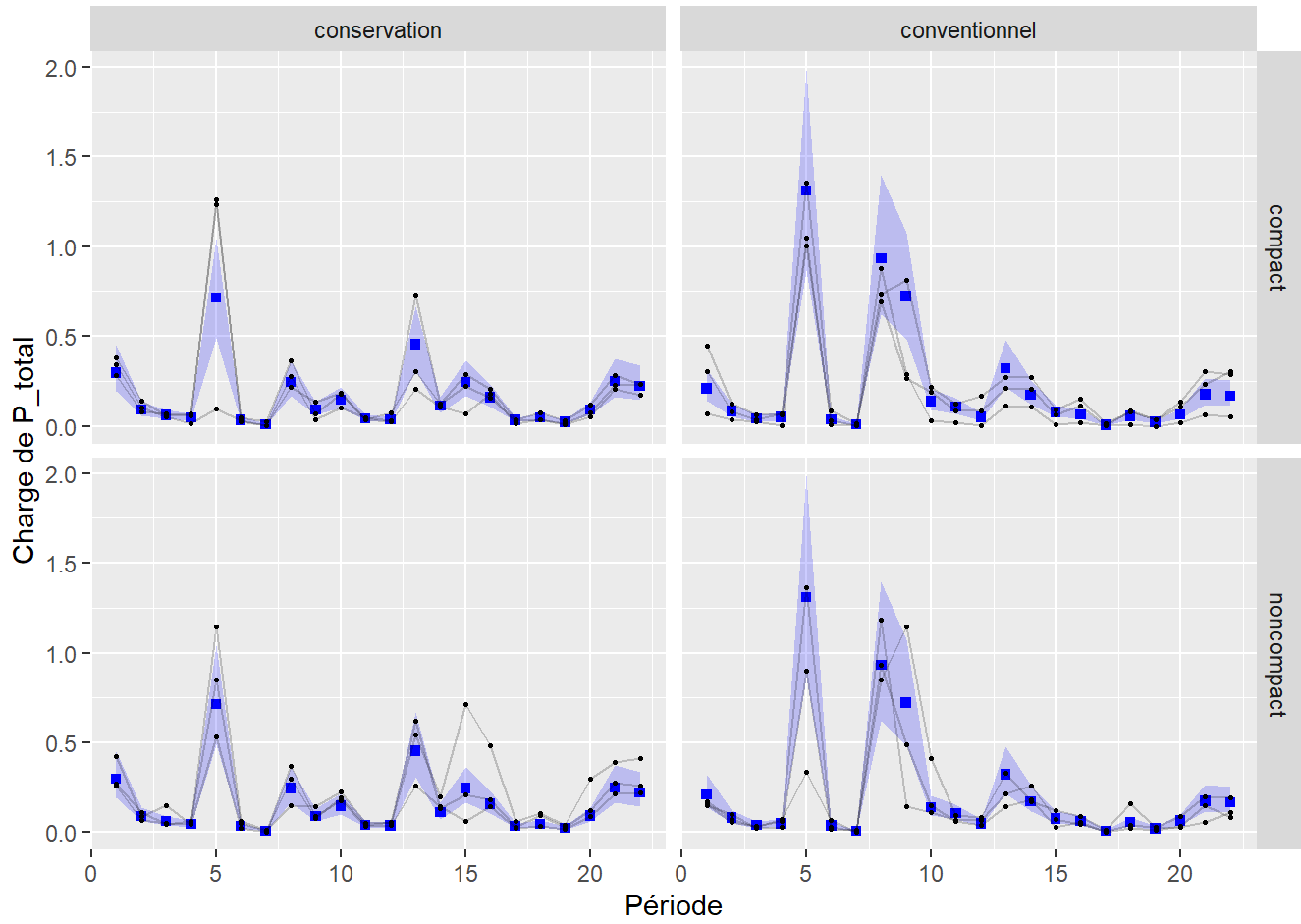


Figure Y2. Évolution de la charge totale de phosphore total (P-total) issue du modèle statistique supporté.

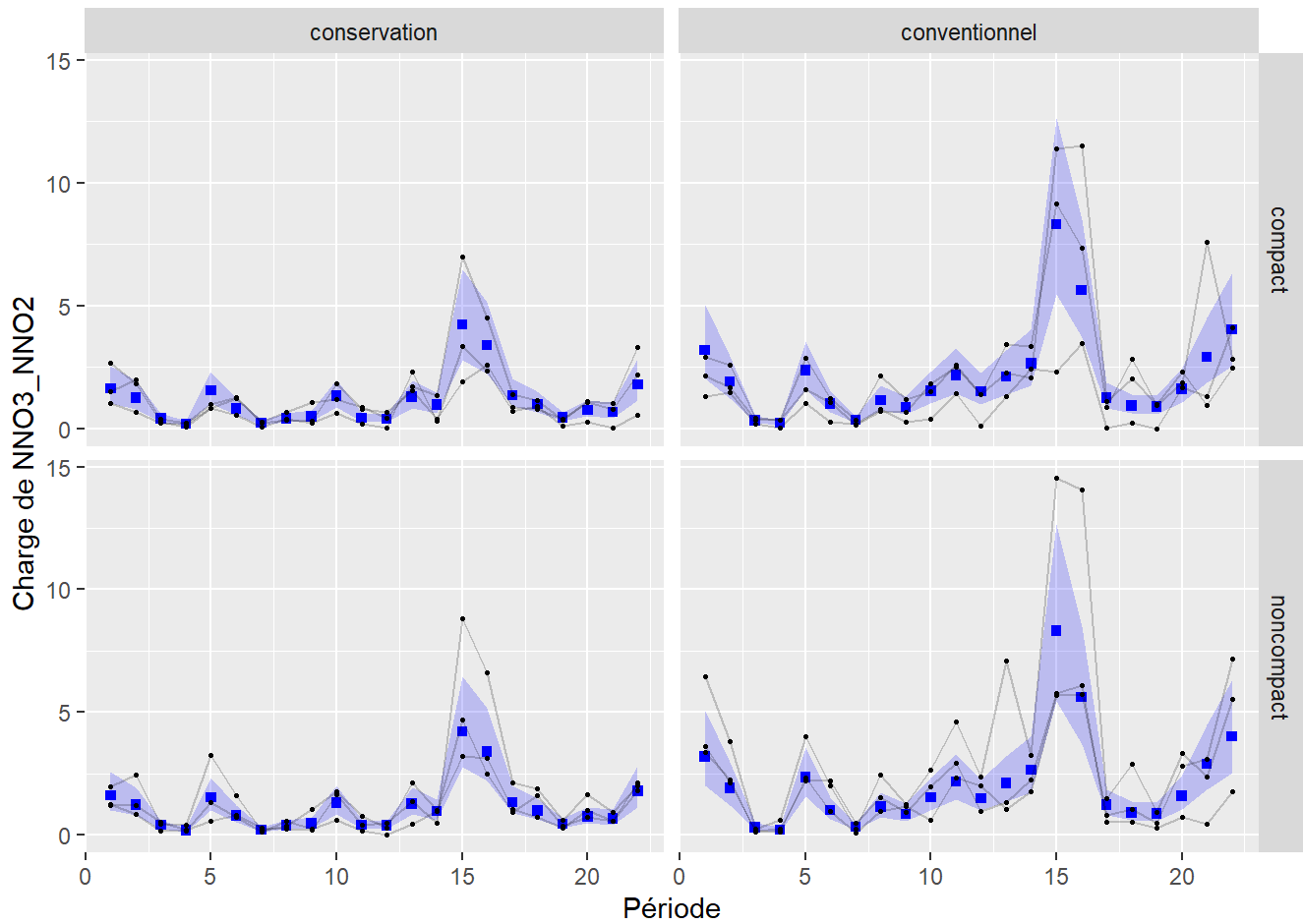


Figure Y3. Évolution de la charge totale de nitrates (N-NO3) issue du modèle statistique supporté.

ANNEXE Z - BILAN HYDROLOGIQUE SIMULÉES À L'ÉCHELLE MENSUELLE



Figure Z1. Composantes du bilan hydrologique simulées à l'échelle mensuelle pour le bassin Castor.

ANNEXE AA - FICHE SYNTHÈSE SUR LA SÉRIE LE BRAS

SÉRIE DE SOLS

LE BRAS

GLEYSOL HUMIQUE ORTHIQUE
Classification taxonomique (sous-groupe)

www.irda.qc.ca

FICHE DE DESCRIPTION
ET D'INTERPRÉTATION
DES SÉRIES DE SOLS
DU QUÉBEC

Matériau et réaction
Loameux-grossier sur loameux-fin à limoneux-fin, neutre

Drainage	Perméabilité	Eau utile	Ruissellement
Très rapide	Très lente	Très basse	Très rapide
Rapide	Lente	Basse	Rapide
Bon	Modérée	Modérée	Modéré
Modérément bon	Rapide	Élevée	Lent
Imparfait	Très rapide	Très élevée	Très lent
Mauvais			Nul (stagnant)
Très mauvais			

Profil cultivé typique	Horizon	Texture et qualificatif	Couleur	Marbrures	Structure	Consistance
COUCHE DE SURFACE	Ap	L, LS, LLi	Brun grisâtre foncé à brun	Absentes	Granulaire à poly. sub., fine à moyenne, modéré	Très friable
SOUS-SOL (PARTIE SUPÉRIEURE)	Bg	L, LS, LLi	Brun grisâtre	Nombreuses	Poly. sub., moyenne, modéré à lenticulaire	Très friable à friable
SUBSTRATUM	Cg, IICg, IICkkg	LA, LLiA, LLi	Brun grisâtre à gris	Nombreuses	Amorphe ou lenticulaire (lamellaire)	Friable

Série de sols Le Bras à Saint-Lambert-de-Lauzon

Travaux d'aménagement requis
Épierreage
Drainage superficiel
Drainage souterrain
Fertilisation et chaulage
Conservation de l'eau et irrigation

Problèmes liés aux travaux de drainage
Instabilité des berges
Remontée de fragments
Colmatage physique
Colmatage ferrique

Types de dégradation à surveiller sous une utilisation intensive
Compaction
Battance
Perte de matière organique
Acidification
Érodibilité
Érosion hydrique
Érosion éolienne

● Faible
● Moyen
● Élevé

CLASSE DE POSSIBILITÉ D'UTILISATION AGRICOLE

3W

RÉFÉRENCES

- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6), 716-723.
- Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., S.L. Neitsch. 2011. Soil and Water Assessment Tool. Input/Output File Documentation. Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory – Agricultural Research Service Blackland Research Center – Texas AgriLife Research.
- Azarnia, S. 2017. Évaluation hydrologique de jeu de données de précipitations et températures journalières issues du modèle régional de climat "CROQ". Mémoire, Ecole de Technologie supérieure Université du Québec.
- BDHP. 2022. Base de Données Hydropédologiques du Québec pour l'horizon de surface des sols agricoles du Québec. 2nde version. IRDA. Québec.
- Beaudin, I., Deslandes, J., Michaud, A.R., Bonn, F., Madramootoo, C.A. 2006. Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec. Partie I. Paramétrage, calibrage, et validation du modèle SWAT. *Agrosolutions* 2006. Vol17. N1.
- Bergeron, O (2017). Grilles climatiques quotidiennes du Réseau de surveillance du climat du Québec, Version 2 - Guide d'utilisation, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de l'information sur le milieu atmosphérique, ISBN 978-2-550-77885-1 (PDF), 27 p.
- Bolinder, M.A., Kätterer T., Andrén O., Parent L.E. 2012. Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. *Can J Soil Sci*, 92:821–833. <https://doi.org/10.1139/CJSS2012-036>
- Canards Illimités Canada. 2020. Assemblage des données milieux humides de la cartographie détaillée pour les secteurs habités du sud du Québec (2009-2021). Canards Illimités Canada et ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques. Québec.
- Couverture pédologique québécoise. (2022). Couverture pédologique de la province du Québec. 2nd version numérique. Couverture complète. Échelle 1:20 000. Produit par AAC, MAPAQ, et IRDA. Distribuée par l'IRDA. Québec, Québec.
- CPVQ. 2001. Guide des Pratiques de conservation en grandes cultures. Le travail réduit - Module 2 – Travail du sol – Feuille 2-B. Conseil des productions végétales du Québec Inc.
- CRAAQ. (2020). Guide. Valeurs de références pour les volumes et les concentrations d'éléments fertilisants dans les effluents d'élevage. <https://oaq.qc.ca/communications/agro-express/nouveau-guide-valeurs-references-pour-les-volumes-et-les-concentrations-delements-fertilisants-dans-les-effluents-delevage/>
- Duan, Q. Y., Gupta, V. K. et S. Sorooshian. 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76, pp. 501–521

- Gallichand, J. 2012. Données de suivi hydrologique du ruisseau Bélair. Communication personnelle.
- GRHQ. 2016. Géobase du réseau hydrographique du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles.
- Huber, W. C. and R. E. Dickinson. 1988. Storm water management model, version 4: user's manual U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- IRDA. 2020. Données hydro-agricoles sur petits bassins versants.
- Gasser, M.-O., Bossé C., Clément, C.C., Bernard, C., Mathieu, J.-B., Tremblay, M.-E. 2023. Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : État de santé des principales séries de sols cultivées. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 186 pages.
- Gasser, M.-O., Clément, C.C., Mathieu, J.-B., Chavez, E., Bossé C., Bernard, C., Tremblay, M.-E. 2023. Rapport 2 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : Effets des pratiques agricoles et des conditions biophysiques sur la santé des sols et la productivité des cultures. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 54 pages.
- Gouvernement du Québec, La Financière agricole du Québec. 2022. Assurance récolte - Rendements de référence. <https://www.fadq.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/rendements-de-reference>
- Gupta, V., Kling, H., Yilmaz, K. K. et G. F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377 (1–2), pp. 80-91.
- Landry, C., S. Houde, J. Forest-D, C.-A. Joseph et M. Grenier. 2021a. Fertilisation du pois. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 03 : Pois. Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 49 pages.
- Landry, C., J. Forest-D, S. Houde, C.-A. Joseph et M. Grenier. 2021b. Fertilisation du haricot frais. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 02 : Haricot frais. Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 53 pages.
- Leblanc et Gagné. 2016. Modification of Soil name table in order to assure compliance with CanSIS standard. Rapport décrivant les travaux effectués et recommandations pour assurer la disponibilité des données pédologiques du Québec. CRAAQ. Québec, Québec.
- Lespinas, F., V. Fortin, G. Roy, P. Rasmussen, and T. Stadnyk. 2015. Performance evaluation of the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). *Journal of Hydrometeorology*, no 16, p. 2045-2064.
- Mai, J., Kornelsen, K. C., Tolson, B. A., Fortin, V., Gasset, N., Bouhemhem, D., Schaefer, D., Leahy, M., Anctil, F., and Coulibaly, P. 2020. The Canadian Surface Prediction Archive (CaSPAR): A Platform to Enhance Environmental Modeling in Canada and Globally. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 101, E341–E356.

- Mallakpour, I. & Villarini, G. 2016. A simulation study to examine the sensitivity of the Pettitt test to detect abrupt changes in mean, *Hydrological Sciences Journal*, 61:2, 245-254, DOI: 10.1080/02626667.2015.1008482
- MELCCFP. 2020. Données du Réseau de surveillance du climat du Québec, Direction de la qualité de l'air et du climat, Québec.
- MELCCFP. 2021. Données des déclarations de bilans de phosphore. Base de données contenant les déclarations obligatoires des exploitants de lieux d'élevage et d'épandage en application du *Règlement sur les exploitations agricoles*. Gouvernement du Québec.
- MFFP. 2020. Carte écoforestière à jour. Direction des inventaires forestier. Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/carte-ecoforestiere-avec-perturbations>
- Michaud, A.R., Lauzier, R., Laverdière, M.R. 2004. Temporal and Spatial Variability in Non-Point Source Phosphorus in relation to Agricultural Production and Terrestrial Indicators: The Beaver Brook Case Study, Pike River Basin, Québec.
- Michaud, A.R., Deslandes, J., Desjardins, J. 2009. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final. Irda. Québec. 150p
- Michaud, A.R., A. Drouin, A. Mailhot, G. Talbot, D. Huard, S. Biner, R. Lagacé, N.-R. Rocha et G. Gagné. 2012a. Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques. Projet réalisé dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec et en collaboration avec Ressources naturelles Canada. Consortium de recherche OURANOS. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada. 168 pages et annexes.
- Michaud, A.R., Desjardins, J., Coté, N., Beaudin, I., Drouin, A., Seydoux, S., et Saint-Laurent, I. 2012b. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. 2009-2001. IRDA. Québec. 111p.
- Michaud, A. R., A. Drouin, A. Mailhot, G. Talbot, D. Huard, S. Biner, R. Lagacé, N.-R. Rocha et G. Gagné. 2013. « Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques ». IRDA. Projet réalisé dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec et en collaboration avec Ressources naturelles Canada. Consortium de recherche OURANOS. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada. 168 p. et annexes.
https://irda.blob.core.windows.net/media/2339/michaud-et-al-2013_rapport_conception_aha_changements_clim.pdf
- Michaud, A. R., N.-R. Rocha Medrano, R. Lagacé et A. Drouin. 2014a. « Développement et validation de méthodes de prédiction du ruissellement et des débits de pointe en support à l'aménagement hydro-

agricole ». Rapport final présenté au CDAQ dans le cadre du PCAA. IRDA. 142 p.
https://irda.blob.core.windows.net/media/2342/michaud-et-al-2014_rapport_prediction_ruissellement_ouvrages_hydro-agricoles.pdf

Michaud, A.R., Desjardins, J., Coté, N., Drouin, A., et Beaudin, I. 2014b. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport annuel pour la période d'évaluation 2013-2014. Institut de Recherche et Développement en Agroenvironnement, IRDA. Québec, Québec. 99p.

Michaud, A. R., Desjardins, J., Dubuc, M., Drouin, A., Grenier, M. 2016. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles: portrait de la Baie de Lavallière en période d'évaluation 2013-2014. Rapport de recherche. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA). Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Québec, Canada. 49 pages plus annexes.

Michaud, A. R., Sawadogo, M. N, et Niang, M. A. 2022. Développement d'un outil de gestion du bilan de masse du phosphore: application au bassin versant transfrontalier de la rivière de la Roche. Rapport scientifique final. IRDA, OBVBM, Lake Champlain Program. 40 p + annexe.

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., et T. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885-900.

MNRF. 2018. Adresses Québec. AQReseau +. Direction de la référence géographique. Service de la cartographie. Québec.

N'Dayegamiye, A., et G. Mehuys. 2008. Évaluation des effets à long terme du semis direct et du labour sur les propriétés du sol et les rendements des cultures. Institut de Recherche et Développement en Agroenvironnement et Université McGill, Québec, Canada.

NRCS - USDA. 2008. Soil Quality Indicators. USDA - Natural Resources Conservation Service.

Organisation Météorologique Mondiale (OMM), Commission Hydrologique. Guide des pratiques hydrologiques, Volume I - Hydrologie – De la mesure à l'information. 2008.

Pettitt, A. N. 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. Applied Statistics, 28(2), 126-135.
<https://doi.org/10.2307/2346729>

Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G., Rompré, M. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. MAPAQ, Québec, Québec.

Tremblay, G. 2020. Toujours plus d'azote. <https://www.agrireseau.net/grandescultures/blogue/103417>

Zebarth, B., Karemandigo, C., Scott, P., Savoie, D., Brown, W. 2007. Gestion de l'azote pour les céréales: Recommandations générales. Fiche technique. Programme d'atténuation des gaz à effet de serre (GES). AAC et Ministère de l'Agriculture et de l'Aquaculture du Nouveau-Brunswick.