

Rapport final

No projet : IA119525

Irrigation des plantes fourragères : outiller le milieu pour qu'il puisse prendre les bonnes décisions

Carl Boivin et Jérémie Vallée

Collaborateurs : Mick Wu et Paul Deschênes

Responsable scientifique : Carl Boivin

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

Décembre 2023

Section 1 - Chercheurs impliqués et responsable autorisé de l'établissement

Carl Boivin
Chercheur - Régie de l'eau en productions fruitière et maraîchère
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8
carl.boivin@irda.qc.ca
418 643-2380, poste 430

Vincent Pelletier
Directeur adjoint – Pratiques agricoles
IRDA
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8
vincent.pelletier@irda.qc.ca
418 643-2380, poste 630

Section 2 - Partenaires

- Direction régionale de la Capitale-Nationale et de Chaudière-Appalaches du MAPAQ
 - Philippe-Antoine Taillon, Diane Allard et France Bélanger
- Site d'essai principal
 - Ferme Jean-Claude Pouliot
 - Jean-Claude Pouliot
- Sites satellites
 - Anglo Acres, Ferme Barjo, Ferme Dubuc & Frères, Ferme Érilis, Ferme Fontabel 1996, Ferme Gérard Raby, Ferme Lamontagne, Ferme l'Oiseau Bleu, Ferme M.G. Lévesque et Fils et Ferme Rénile
- Université Laval
 - Dany Cinq-Mars
- Dubois Agrinovation
 - Mathieu Plante
- IRDA
 - Carl Boivin, Jérémie Vallée, Lélia Anderson, Paul Deschênes, Mick Wu, Antoine Lamontagne, Félix Lavoie-Lochet, Megann Desrochers et Francis-Olivier Lortie

Irrigation des plantes fourragères : outiller le milieu pour qu'il puisse prendre les bonnes décisions

Jérémie Vallée et Carl Boivin

No de projet : IA119525

Durée : 03/2021 – 06/2023

FAITS SAILLANTS

La saison 2020 (implantation) et celle de 2021 ont été propices à ce que la culture subisse un stress hydrique où respectivement 7, 6 et 1 épisodes d'irrigation ont été nécessaires en 2020, 2021 et 2022 pour maintenir une prairie de luzerne (90 %) et de mil (10 %) en situation de confort hydrique. L'objectif d'éviter un stress hydrique à la culture a permis d'obtenir un gain de rendement de 20 % (3,36 versus 2,79 t/ha) lors de la seule coupe de 2020 et de respectivement 9,4 et 5,2 % pour la 2^e et 3^e coupe en 2021. Quoique l'objectif « d'assurance récolte » ait généré moins d'irrigations, avec 3 épisodes en 2021, il n'a pas permis d'obtenir de différence significative pour le rendement. Les différents régimes hydriques n'ont pas eu d'impact significatif sur la qualité des fourrages et la proportion occupée par la luzerne, le mil et les mauvaises herbes au fil du temps. Maintenant, si la pertinence agronomique d'éviter un stress hydrique à la culture en ayant recours à l'irrigation est évidente, il en est autrement pour la pertinence économique. L'objectif généralement poursuivi avec la production de plantes fourragères n'est pas de générer des profits, mais plutôt de nourrir les animaux. Ainsi, minimiser le coût de production sans affecter la qualité demeure le principal objectif. Le scénario avec l'assurance récolte est le plus stable. Toutefois, ce scénario n'est pas aussi avantageux que l'achat de terre lorsqu'il y a peu ou pas de pertes (10 % et moins). Cela coûte même plus cher que de simplement couvrir les pertes par l'achat de fourrage. Cependant, lorsque les pertes deviennent plus importantes (25 à 50 %), le programme est plus avantageux que l'achat de fourrage et autant ou plus intéressant que l'irrigation et l'achat de terre.

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

- 1) Mesurer l'impact du stress hydrique sur le développement, le prélèvement en eau, le rendement et la qualité de plantes fourragères.
- 2) Définir les contextes (prix des terres, systèmes d'irrigation, prix du foin, etc.) où la rentabilité de l'irrigation peut s'exprimer, tout en y incluant les besoins de stockage en eau d'irrigation.
- 3) Produire un feuillet technique sur l'irrigation dans les plantes fourragères qui inclut une « charte » pour évaluer le degré du risque de stress hydrique auquel est exposée une entreprise.

Le moyen proposé par ce projet pour résoudre la problématique implique d'avoir recours à une gestion raisonnée de l'irrigation pour éviter que la culture subisse une contrainte de prélèvement en eau. Pour ce faire un dispositif expérimental a été implanté en 2020 à la Ferme Jean-Claude Pouliot (46.916795°, -70.939080°), une ferme spécialisée en production laitière située à Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans. Un mélange luzerne (90 %) et mil (10 %) a été semé sur un loam argileux graveleux. Trois traitements ayant trait à la régie d'irrigation ont été comparés. Un premier « après coupe » (AC), qui implique d'intervenir avec l'irrigation à la condition que la consigne de déclenchement soit atteinte et qu'une coupe ait été effectuée précédemment. Une seule irrigation peut être déclenchée à la suite d'une coupe. Le traitement irrigué en « tout temps » (TT), implique d'intervenir lorsque la consigne est atteinte, et ce, sans aucune autre condition ou limite en ce qui a trait au nombre d'épisodes. Ce traitement vise à maintenir la culture dans une situation de confort hydrique. Enfin, il y a un témoin « non Irrigué » (NI) où intervenir avec l'irrigation est impossible. La consigne pour déclencher l'irrigation a été déterminée avec la méthode du « Point tournant » et s'est avérée être de 25-30 kPa pour ce site. Un système d'irrigation par aspersion composé d'une ligne principale a été utilisé. Les gicleurs ont été fixés à une ligne d'irrigation constituée de 40 barres d'aluminium. Chacune des barres mesure 9,14 m de longueur et a un diamètre de 0,101 m. Ces dernières ont été déposées à la surface du sol. Un régulateur de pression à 43 PSI a été installé à la base de chacun des gicleurs pour assurer une pression constante et uniforme, peu importe la localisation des parcelles. Cette approche qui permet une gradation, en ce qui a trait au statut hydrique du sol, a été décrite

dans Hanks et coll. (1976). Bien qu'il ait été privilégié d'intervenir avec l'irrigation en absence de vent, il n'a pas toujours été possible d'irriguer dans de telles conditions. La vitesse et la direction du vent ont varié d'un épisode à l'autre et ont été mesurées par la station météo. La hauteur d'eau apportée par un épisode d'irrigation a été mesurée à une distance de 4, 8 et 12 m du centre de la parcelle. Les trois traitements (TT, AC, NI) ont été assignés à l'intérieur d'un plan en blocs aléatoires complets (4) avec mesures répétées. Pour chacun des traitements où intervenir avec l'irrigation est permis, le rayon couvert par le gicleur, de chaque côté de la ligne centrale formée par les barres d'aluminium, a été divisé en 3 zones égales (4, 8 et 12 m). Cette approche a aussi été utilisée pour le témoin NI. Le statut hydrique du sol, les conditions météorologiques, l'exportation en eau du système cultural, la proportion des espèces végétales, ainsi que le rendement en biomasse sèche et la qualité de celle-ci ont fait l'objet d'un suivi. Enfin, une analyse économique de type budget partiel a été réalisée où quatre solutions potentielles ont été comparées entre elles dans un contexte qui vise à minimiser les frais associés à la production de fourrage lors de stress hydrique, soit l'achat de fourrage, l'adoption de l'irrigation, l'achat de terres et l'assurance récolte.

Au site principal se sont ajoutés 10 sites satellites en 2021 et 2022. Ces derniers étaient situés à Baie St-Paul, Saint-Jean-Port-Joli, Weedon, Saint-Nicolas, Saint-Paul-de-Montminy, Saint-Chrysostome, Ange-Gardien, Sainte-Eulalie, Saint-Albert. L'ajout de ces sites avait comme objectifs de diversifier les contextes de productions à l'étude.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS POUR L'INDUSTRIE

En 2020, le traitement qui avait comme objectif de maintenir la culture en situation de confort hydrique (TT) a été irrigué les 10, 16, 18, 22 juin et les 3, 6 et 23 juillet. La hauteur brute des 4 premières irrigations a été de 10 mm afin de tenir compte du développement racinaire du moment. Les épisodes suivants visaient 15 mm. En 2021, le TT a été irrigué le 9 juin, le 6 juillet, les 1^{ers}, 7 et 24 août et le 2 septembre à raison de 20 mm par épisode. Le traitement AC, qui diffère du TT du fait qu'il ne pouvait être déclenché qu'après une coupe et pas plus d'une fois, même si la consigne était atteinte une deuxième fois, a été irrigué le 8 juin, le 1^{er} et le 24 août. En 2022, le système n'a été déclenché qu'une seule fois le 10 mai pour le TT, à ce moment, comme la 1^{re} coupe était à venir, le AC ne pouvait pas se qualifier pour un apport.

L'instrumentation en présence a permis d'estimer des coefficients culturaux de type « K_{c-TDR} ». Ces derniers sont entre autres utiles pour un suivi qui s'appuie sur le bilan hydrique et pour évaluer le risque que la culture subisse une contrainte de prélèvement en eau. Ces valeurs ont atteint des maximaux quotidiens de 1,8. Globalement, ces derniers diminuent après une coupe et lorsque la disponibilité de l'eau dans le sol ne permet plus de répondre au besoin. Ces valeurs sont plus élevées que celles généralement observées pour d'autres cultures, comme la pomme de terre par exemple.

En 2020, le rendement (sec) a respectivement été de 3,36 et 2,79 t/ha avec (TT) et sans irrigation (NI et AC). Dans ce contexte, l'absence de contrainte de prélèvement en eau pour la culture a engendré une augmentation significative du rendement de 0,57 t/ha ou de 20 %. Le rendement sec moyen de la 2^e coupe, en contexte irrigué (100 mm) a été supérieur de 9,4 % ou de 0,31 t/ha, comparativement à celui non irrigué (0 mm). À la 3^e coupe, l'augmentation a été de 5,2 % ou 0,12 t/ha.

Au semis, le mélange était composé de 90 % de luzerne et de 10 % de graminées. Cette proportion a évolué au fil des saisons. En 2020, la proportion de la luzerne oscillait entre 0,834 et 0,860 tandis que pour les graminées, elle s'élevait entre 0,034 et 0,075 selon les traitements. En 2022, ces proportions sont passées entre 0,594 et 0,679 pour la luzerne et entre 0,174 et 0,278 pour les graminées en 2022.

Quoique l'achat de terres soit la meilleure solution économique pour un scénario de 10 % de pertes de rendements, cette approche peut être difficile à concrétiser. De plus, il faut aussi considérer qu'en absence de pertes de rendements, il faut continuer à s'occuper de ces superficies qui deviennent alors excédentaires. L'assurance récolte suit de près la solution gagnante et s'empare du premier rang pour les scénarios à 25 et 50 % de pertes. De plus, ce programme couvre aussi les pertes pour le gel et certaines difficultés de récolte qui ne sont pas prises en compte dans l'analyse réalisée dans ce projet. Enfin, à 50 % de pertes, l'irrigation est une solution plus avantageuse que l'achat de terres.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE ET/OU SUIVI À DONNER

- Un stress hydrique peut diminuer le rendement d'une prairie composée de 90 % de luzerne et 10 % de mil.
- Une gestion raisonnée de l'irrigation est une pratique agricole efficace pour éviter un stress hydrique à la culture.
- D'un point de vue économique, l'assurance récolte est la solution la plus stable et l'achat de terre peut être intéressant pour un scénario de perte de rendements de 10 % et moins.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Nom du responsable du projet : Carl Boivin
418 643-2380, poste 430
carl.boivin@irda.gc.ca

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'Accord Canada-Québec de mise en œuvre du Partenariat canadien pour l'agriculture conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Ces travaux ont également été réalisés à l'aide d'une participation financière de la part de Dubois Agrinovation.

Section 4 - Activité de transfert et de diffusion scientifique

- Boivin, C. 2022. Stress hydrique et irrigation des prairies, Colloque sur les plantes fourragères – CRAAQ, (Plateforme Zoom) 16 février.

Section 5 - Activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs

Conférence

- Boivin, C. 2021. Irrigation des prairies : où en sommes-nous? Cultures fourragères biologiques du CETAB+, 3^e édition, (Plateforme Zoom). 12 janvier.
- Vallée, J. 2022. Irrigations en grandes cultures et plantes fourragères - Possibilités et essais en cours, Demi-journée du producteur du CARN, (Plateforme Zoom). 15 février.

Mention

- Rencontre conseillers grandes cultures MAPAQ, Complexe scientifique. 16 novembre 2022.
- Rencontre de la table sectorielle grandes cultures, (Plateforme Zoom). MAPAQ, 27 janvier 2022.

Section 6 – Grille de transfert des connaissances

1. Résultats Présentez les faits saillants (maximum de 3) des principaux résultats de votre projet.	2. Utilisateurs Pour les résultats identifiés, ciblez les utilisateurs qui bénéficieront des connaissances ou des produits provenant de votre recherche.	3. Message Concrètement, quel est le message qui devrait être retenu pour chacune des catégories d'utilisateurs identifiées? Présentez un message concret et vulgarisé. Quels sont les gains possibles en productivité, en rendement, en argent, etc.?	4. Cheminement des connaissances a) Une fois le projet terminé, outre les publications scientifiques, quelles sont les activités de transfert les mieux adaptées aux utilisateurs ciblés? (conférences, publications écrites, journées thématiques, formation, etc.) b) Selon vous, quelles pourraient être les étapes à privilégier en vue de maximiser l'adoption des résultats par les utilisateurs.
Un stress hydrique peut diminuer le rendement d'une prairie composée de 90 % de luzerne et 10 % de mil.	Producteurs et conseillers	L'irrigation ne permet pas de gains en rendements, mais permet plutôt de se protéger d'une baisse de rendement conséquent à un statut hydrique du sol contraignant pour la culture.	a) Conférence, Vidéo, Balado. b) Poursuivre ce type d'essai avec un plus grand nombre de contextes pédologiques. Un peu comme les essais de fertilisation en cours pour conduire à la révision des grilles de référence en fertilisation.
Une gestion raisonnée de l'irrigation est efficace pour éviter un stress hydrique à la culture.	Producteurs et conseillers	Pour être efficace, la gestion de l'irrigation se doit d'être raisonnée. Cela implique entre autres d'intervenir au bon moment et avec un volume d'eau qui considère la capacité de rétention en eau du système cultural colonisé par les racines.	a) Formations, Conférences, Vidéo, Balado. b) Maintenir le type de support financier comme celui qui était offert par la mesure 4304 du Programme Prime-Vert du MAPAQ.
L'achat de terres peut être intéressant pour un scénario de perte de rendements de 10 % et moins, alors que l'assurance récolte est plus avantageuse pour des pertes de 25 et 50 %.	Producteurs et conseillers	D'un point de vue économique, l'assurance récolte est la solution la plus stable. De plus, elle couvre aussi les pertes pour le gel qui ne sont pas considérées dans cette analyse.	a) Formations, Conférences, Vidéo, Balado.

Section 7 - Contribution et participation de l'industrie réalisées

La contribution et la participation de l'industrie sont conformes à la demande.

Section 8 - Rapport scientifique et/ou technique

[Tapez ici]

[Tapez ici]

[Tapez ici]

Rapport final

No projet : IA119525

Irrigation des plantes fourragères : outiller le milieu pour qu'il puisse prendre les bonnes décisions

Jérémie Vallée et Carl Boivin
Collaborateur : Mick Wu et Paul Deschênes

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

Décembre 2023

PARTENAIRE FINANCIER ET DE RÉALISATION

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'Accord Canada-Québec de mise en œuvre du Partenariat canadien pour l'agriculture conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Ces travaux ont également été réalisés à l'aide d'une participation financière de la part de Dubois Agrinovation.

RÉSUMÉ

Les producteurs laitiers et de bovins de boucherie s'appuient grandement sur les fourrages pour l'alimentation des animaux. Dans les dernières années, plusieurs de ces entreprises ont dû composer avec des rendements largement insuffisants en fourrages avec les conséquences économiques que cela a engendrées. Depuis 2018, pas moins de 240 M\$ ont été réclamés auprès de la Financière agricole du Québec. L'approvisionnement en fourrage de qualité et en quantité suffisante devient une priorité pour les marchés de l'alimentation animale. Le moyen proposé par ce projet pour résoudre la problématique implique d'avoir recours à une gestion raisonnée de l'irrigation pour éviter que la culture subisse une contrainte de prélèvement en eau due au statut hydrique du sol. Plus spécifiquement, les objectifs de ce projet sont : 1) Mesurer l'impact du stress hydrique sur le développement, le prélèvement en eau, le rendement et la qualité de plantes fourragères; 2) Définir les contextes (prix des terres, systèmes d'irrigation, prix foin, etc.) où la rentabilité de l'irrigation peut s'exprimer, tout en y incluant les besoins de stockage en eau d'irrigation; et 3) Produire un feuillet technique sur l'irrigation dans les plantes fourragères qui inclura une « charte » pour évaluer le degré du risque de stress hydrique auquel est exposée une entreprise.

Dans le cadre de ce projet, un dispositif expérimental a été implanté en 2020 à la Ferme Jean-Claude Pouliot, une ferme spécialisée en production laitière située à Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans. Un mélange luzerne (90 %) et mil (10 %) a été semé sur un loam argileux graveleux. Trois traitements ayant trait à la régie d'irrigation ont été comparés. Un premier « après coupe » (AC), qui implique d'intervenir avec l'irrigation à la condition que la consigne de déclenchement soit atteinte et qu'une coupe ait été effectuée précédemment. Une seule irrigation peut être déclenchée à la suite d'une coupe. Le traitement irrigué en « tout temps » (TT), implique d'intervenir lorsque la consigne est atteinte, et ce, sans aucune autre condition ou limite en ce qui a trait au nombre d'épisodes. Ce traitement vise à maintenir la culture dans une situation de confort hydrique. Enfin, il y a un témoin « non Irrigué » (NI) où intervenir avec l'irrigation est impossible. La consigne pour déclencher l'irrigation a été déterminée avec la méthode du « Point tournant » et s'est avérée être de 25-30 kPa pour ce site.

La saison 2020 (implantation) et celle de 2021 ont été propices à ce que la culture subisse un stress hydrique où respectivement 7, 6 et 1 épisodes d'irrigation ont été nécessaires en 2020, 2021 et 2022 pour maintenir une prairie de luzerne (90 %) et de mil (10 %) en situation de confort hydrique. L'objectif d'éviter un stress hydrique à la culture a permis d'obtenir un gain de rendement de 20 % (3,36 versus 2,79 t/ha) lors de la seule coupe de 2020 et de respectivement 9,4 et 5,2 % pour la 2^e et 3^e coupe en 2021. Quoique l'objectif « d'assurance récolte » ait généré moins d'irrigations, avec 3 épisodes en 2021, il n'a pas permis d'obtenir de différence significative pour le rendement. Les différents régimes hydriques n'ont pas eu d'impact significatif sur la qualité des fourrages et la proportion occupée par la luzerne, le mil et les mauvaises herbes au fil du temps. Maintenant, si la pertinence agronomique d'éviter un stress hydrique à la culture en ayant recours à l'irrigation est évidente, il en est autrement pour la pertinence économique. L'objectif généralement poursuivi avec la production de plantes fourragères n'est pas de générer des profits, mais plutôt de nourrir les animaux. Minimiser le coût de production sans affecter la qualité demeure le principal objectif. Quoique l'achat de terres soit la meilleure solution économique pour un scénario de 10 % de pertes de rendements, cette approche peut être difficile à concrétiser. De plus, il faut aussi considérer qu'en absence de pertes de rendements, il faut continuer à s'occuper de ces superficies qui deviennent alors excédentaires. L'assurance récolte suit de près la solution gagnante et s'empare du premier rang pour les scénarios à 25 et 50 % de pertes. De plus, ce programme couvre aussi les pertes pour le gel et certaines difficultés de récolte qui ne sont pas prises en compte dans l'analyse réalisée dans ce projet. Enfin, à 50 % de pertes, l'irrigation est une solution plus avantageuse que l'achat de terres.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction et contexte	1
2	Objectifs	2
3	Équipe de réalisation	2
4	Faits saillants	3
5	Méthodologie.....	4
5.1	Sites.....	4
5.1.1	Site principal	4
5.1.2	Sites satellites	4
5.2	Régie de culture.....	5
5.3	Traitements.....	6
5.4	Dispositif expérimental et analyses statistiques.....	7
5.5	Analyses statistiques.....	9
5.6	Paramètres mesurés.....	10
5.6.1	pH, détritux, matière organique, granulométrie et texture	10
5.6.2	Statut hydrique.....	10
5.6.3	Conditions météorologiques et évapotranspiration potentielle (ET_p).....	10
5.6.4	Exportation en eau du système cultural et coefficient cultural « TDR » (K_c -TDR).....	11
5.6.5	Hauteur et biomasse des plants	12
5.6.6	Qualité	12
5.6.7	Composition du mélangeur fourrager	12
5.6.8	Analyse économique.....	13
6	Résultats	14
6.1	Analyses physico-chimiques	14
6.2	Gestion des irrigations	15
6.3	Conditions météorologiques.....	16
6.3.1	Pluviométrie	16
6.3.2	Évapotranspiration potentielle (ET_p)	21
6.4	Statut hydrique des traitements.....	25
6.5	Exportation en eau du système cultural et coefficient cultural « TDR » (K_c -TDR)	31
6.6	Rendement de la biomasse aérienne.....	35
6.6.1	Évaluation des modèles statistiques.....	35
6.6.2	Rendement estimé selon le modèle sélectionné.....	36
6.6.3	Rendements mesurés aux sites satellites.....	40
6.7	Hauteur des plants.....	41
6.8	Composition du mélangeur fourrager	42
6.9	Qualité	43
6.10	Analyse économique.....	44
7	Analyse et discussion selon les objectifs	45
7.1	OBJECTIF 1. Mesurer l'impact du stress hydrique sur le développement, le prélèvement en eau, le rendement et la qualité de plantes fourragères	45
7.1.1	Site principal	45
7.1.2	Sites satellites	47
7.2	OBJECTIF 2. Définir les contextes (prix des terres, systèmes d'irrigation, prix foin, etc.) où la rentabilité de l'irrigation peut s'exprimer, tout en y incluant les besoins de stockage en eau d'irrigation ...	50
7.2.1	Volet économique	50
7.2.2	Besoins en stockage	50
7.3	OBJECTIF 3. Produire un feuillet technique sur l'irrigation dans les plantes fourragères qui inclut une «charte» pour évaluer le niveau du risque de stress hydrique auquel est exposée une entreprise....	51
8	Conclusion	54
9	Références.....	55

10	Annexe 1. Sites satellites	56
10.1	Ange-Gardien.....	56
10.2	Baie Saint-Paul1	61
10.3	Baie Saint-Paul2	66
10.4	Saint-Albert	71
10.5	Saint-Jean-Port-Joli.....	76
10.6	Saint-Nicolas.....	81
10.7	Saint-Paul-de-Montminy.....	86
10.8	Sainte-Eulalie.....	91
10.9	Weedon	96
11	Annexe 2. Analyses de la qualité des fourrages.....	101
12	Annexe 3. Analyse économique.....	102

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Années d'implantation et composition du mélange fourrager, sites satellites 2021-2022.	5
Tableau 2. Localisation et caractérisation (élévation (m) et distance (km)) des stations météorologiques retenues à des fins comparatives, selon le site.....	11
Tableau 3. Caractérisation physico-chimique du sol, selon le site.	14
Tableau 4. Épisodes d'irrigation selon le traitement, la date et la hauteur d'eau apportée (mm) selon la distance du gicleur et de l'orientation par rapport à la ligne principale.	15
Tableau 5. Précipitations mensuelles cumulatives mesurées (mm) et normales climatiques 1981-2010 (mm) selon le site et l'année.	17
Tableau 6. Évapotranspiration mensuelle cumulative mesurée (mm) et moyennes mensuelles selon la période 2011-2022 (mm) selon le site et l'année.	21
Tableau 7. Comparaison des modèles testés, degré de liberté ainsi que le critère d'information AIC, selon l'année.....	35
Tableau 8. Rendement sec (t/ha), valeurs minimale et maximale selon un intervalle de confiance de 95 % et valeurs minimale et maximale prédites pour les coupes 2 et 3, saison 2021.	38
Tableau 9. Rendement sec (t/ha), valeurs minimale et maximale selon un intervalle de confiance de 95 % et valeurs minimale et maximale prédites pour la coupe 1, saison 2022.....	39
Tableau 10. Rendements en base sèche (t/ha) mesurés aux sites satellites, selon la coupe et l'année.	40
Tableau 11. Hauteur maximale moyenne de la luzerne (cm) selon l'année et le traitement d'irrigation.....	41
Tableau 12. Proportion occupée par les graminées, la luzerne et les mauvaises herbes dans la composition des parties aériennes selon le traitement d'irrigation.	42
Tableau 13. Analyse de la variance ayant trait aux variables utilisées pour mesurer la qualité des fourrages (analyse chimique).	43
Tableau 14. Résultats de l'analyse de la qualité du fourrage pour 8 paramètres (contenu en %) selon le traitement d'irrigation (analyse chimique).	43
Tableau 15. Paramètres analysés pour déterminer la qualité du fourrage selon les traitements et la saison.	101

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma du dispositif expérimental.	7
Figure 2. Géolocalisation des 12 parcelles et de la station météorologique.	8
Figure 3. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2020 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2020.	18
Figure 4. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2021.....	19
Figure 5. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2022.....	20
Figure 6. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Laurent entre 2011 et 2020 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2020.....	22
Figure 7. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Laurent entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2021.....	23
Figure 8. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Laurent entre 2011 et 2022 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2022.....	24
Figure 9. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur, parcelle 4, bloc 2, traitement TT, saison 2020.....	25
Figure 10. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur, parcelle 6, bloc 2, traitement NI, saison 2020.	26
Figure 11. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur, parcelle 4, bloc 2, traitement TT, saison 2021.....	27
Figure 12. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur, parcelle 5, bloc 2, traitement AC, saison 2021.	28
Figure 13. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur, parcelle 6, bloc 2, traitement NI, saison 2021.	29
Figure 14. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur, parcelle 4, bloc 2, traitement TT, saison 2022.....	30
Figure 15. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur, parcelle 6, bloc 2, traitement NI, saison 2022.	30
Figure 16. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitement TT, saison 2020.	31
Figure 17. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitements AC et NI combinés, saison 2020.	31
Figure 18. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitement TT, saison 2021.	32
Figure 19. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitement AC, saison 2021.....	32
Figure 20. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitement NI, saison 2021.	33
Figure 21. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitement TT, saison 2022.	34

Figure 22. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitements AC et NI combinés, saison 2022.	34
Figure 23. Rendement sec (t/ha) estimé selon le modèle sélectionné (mod2020) avec et sans irrigation pour la 1 ^{re} et unique coupe de 2020 (moyennes estimées avec intervalles de confiance à 95 %).....	36
Figure 24. Rendement sec (t/ha) estimé selon le modèle sélectionné (mod2021.meme) selon l'irrigation (mm), par coupe, saison 2021.	37
Figure 25. Rendement sec (t/ha) estimé selon le modèle sélectionné (mod2022) selon l'irrigation, coupe 1, saison 2022.....	39
Figure 26. Chronique du sommaire précipitations – évapotranspiration potentielle (P-ET _p), période avec ou sans contrainte de prélèvement en eau, traitement NI, saison 2020.....	45
Figure 27. Chronique du sommaire précipitations – évapotranspiration potentielle (P-ET _p), période avec ou sans contrainte de prélèvement en eau, traitement NI, saison 2021.....	46
Figure 28. Évaluation du stress hydrique potentiel selon l'impact individuel des principaux critères d'intérêt.	53
Figure 29. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Ange-Gardien, saison 2021.	56
Figure 30. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Farnham F entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Ange-Gardien, saison 2021.	56
Figure 31. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm ³ eau / cm ³ sol) selon la profondeur au site Ange-Gardien, saison 2021.....	57
Figure 32. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET _c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET _p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie-ET _p (P-ET _p) (mm), site Ange-Gardien, saison 2021.	57
Figure 33. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Ange-Gardien, saison 2021.....	58
Figure 34. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Ange-Gardien, saison 2022.	58
Figure 35. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Farnham F entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Ange-Gardien, saison 2022.	59
Figure 36. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm ³ eau / cm ³ sol) selon la profondeur au site Ange-Gardien, saison 2022.....	59
Figure 37. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET _c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET _p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie-ET _p (P-ET _p) (mm), site Ange-Gardien, saison 2022.	60
Figure 38. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Ange-Gardien, saison 2022.....	60
Figure 39. Pluviométrie cumulative (mm) mesurée au site, précipitations minimale et maximale à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul1, saison 2021.....	61
Figure 40. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Baie-Saint-Paul entre 2011 et 2021 (mm), site Baie Saint-Paul1, saison 2021.....	61

Figure 41. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Baie Saint-Paul1, saison 2021..... 62

Figure 42. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Baie Saint-Paul1, saison 2021..... 62

Figure 43. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Baie Saint-Paul1, saison 2021..... 63

Figure 44. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul1, saison 2022..... 63

Figure 45. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Baie-Saint-Paul entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul1, saison 2022..... 64

Figure 46. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Baie Saint-Paul1, saison 2022..... 64

Figure 47. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Baie Saint-Paul1, saison 2022..... 65

Figure 48. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Baie Saint-Paul1, saison 2022..... 65

Figure 49. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Baie Saint-Paul2, saison 2021..... 66

Figure 50. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Hilarion F entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Baie Saint-Paul2, saison 2021..... 66

Figure 51. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Baie Saint-Paul2, saison 2021..... 67

Figure 52. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Baie Saint-Paul2, saison 2021..... 67

Figure 53. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Baie Saint-Paul2, saison 2021..... 68

Figure 54. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul2, saison 2022..... 68

Figure 55. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Hilarion F entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul2, saison 2022..... 69

Figure 56. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Baie Saint-Paul2, saison 2022..... 69

Figure 57. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Baie Saint-Paul2, saison 2022..... 70

Figure 58. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Baie Saint-Paul2, saison 2022..... 70

Figure 59. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Albert, saison 2021..... 71

Figure 60. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Sainte-Clotilde-de-Horton entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Albert, saison 2021. 71

Figure 61. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Saint-Albert, saison 2021..... 72

Figure 62. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Saint-Albert, saison 2021..... 72

Figure 63. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Albert, saison 2021..... 73

Figure 64. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Albert, saison 2022..... 73

Figure 65. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Sainte-Clotilde-de-Horton entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Albert, saison 2022. 74

Figure 66. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Saint-Albert, saison 2022..... 74

Figure 67. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Saint-Albert, saison 2022..... 75

Figure 68. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Albert, saison 2022..... 75

Figure 69. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021. 76

Figure 70. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Aubert entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021. 76

Figure 71. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021..... 77

Figure 72. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021. 77

Figure 73. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021. 78

Figure 74. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022. 78

Figure 75. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Aubert entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022..... 79

Figure 76. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022..... 79

Figure 77. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022..... 80

Figure 78. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022. 80

Figure 79. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Nicolas, saison 2021. 81

Figure 80. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Antoine-de-Tilly entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Nicolas, saison 2021. 81

Figure 81. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Saint-Nicolas, saison 2021. 82

Figure 82. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Saint-Nicolas, saison 2021. 82

Figure 83. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Nicolas, saison 2021. 83

Figure 84. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Nicolas, saison 2022. 83

Figure 85. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Antoine-de-Tilly entre 2011 et 2022 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Nicolas, saison 2022. 84

Figure 86. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Saint-Nicolas, saison 2022. 84

Figure 87. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Saint-Nicolas, saison 2022. 85

Figure 88. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Nicolas, saison 2022. 85

Figure 89. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021. 86

Figure 90. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Armagh entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021. 86

Figure 91. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021. 87

Figure 92. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021. 87

Figure 93. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021. ... 88

Figure 94. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022. 88

Figure 95. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Armagh entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022. 89

Figure 96. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022. 89

Figure 97. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022..... 90

Figure 98. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022. .. 90

Figure 99. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Sainte-Eulalie, saison 2021. 91

Figure 100. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Sainte-Clotilde-de-Horton entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Sainte-Eulalie, saison 2021. 91

Figure 101. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Sainte-Eulalie, saison 2021. 92

Figure 102. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Sainte-Eulalie, saison 2021. 92

Figure 103. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Sainte-Eulalie, saison 2021. 93

Figure 104. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Sainte-Eulalie, saison 2022. 93

Figure 105. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Sainte-Clotilde-de-Horton entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Sainte-Eulalie, saison 2022. 94

Figure 106. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Sainte-Eulalie, saison 2022. 94

Figure 107. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Sainte-Eulalie, saison 2022. 95

Figure 108. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Sainte-Eulalie, saison 2022. 95

Figure 109. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Weedon, saison 2021. 96

Figure 110. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Bury entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Weedon, saison 2021. 96

Figure 111. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) selon la profondeur au site Weedon, saison 2021..... 97

Figure 112. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Weedon, saison 2021..... 97

Figure 113. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Weedon, saison 2021..... 98

Figure 114. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Weedon, saison 2022. 98

Figure 115. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Bury entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Weedon, saison 2022. 99

Figure 116. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Weedon, saison 2022. 99

Figure 117. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Weedon, saison 2022. 100

Figure 118. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Weedon, saison 2022. 100

1 Introduction et contexte

En 2020, les plantes fourragères occupaient près de 686 000 ha, dont 609 100 ha en foin cultivé et 77 000 ha en maïs fourrager (MAPAQ, 2022). Les producteurs laitiers et de bovins de boucherie s'appuient grandement sur les fourrages pour l'alimentation des animaux. Dans les dernières années, plusieurs de ces entreprises ont dû composer avec des rendements largement insuffisants en fourrages avec les conséquences économiques que cela a engendrées. La rareté a occasionné une flambée des prix et même contraint plusieurs producteurs à diminuer leur cheptel. En 2020, il fallait déboursier 245 \$ pour 1 tonne de foin (85 % m.s.), soit une augmentation 51 % comparativement au prix de 2016 (MAPAQ, 2022). Cette hausse est en partie attribuable à la diminution de l'offre causée par des conditions météorologiques défavorables. Les saisons 2017, 2018 et 2019 ont été marquées par des périodes de sécheresse plus ou moins importantes dans plusieurs régions (AAC, 2019). Cette situation est responsable de la diminution considérable des quantités de fourrages récoltés. Depuis 2018, pas moins de 240 M\$ ont été réclamés auprès de la Financière agricole du Québec où 2020 fait figure d'année record avec près de 70 M\$ versés en indemnités (FADQ, 2023). L'enjeu de l'approvisionnement en fourrages de qualité et en quantité suffisante devient une priorité pour les marchés de l'alimentation animale.

Le moyen proposé par ce projet pour résoudre la problématique implique d'avoir recours à une gestion raisonnée de l'irrigation pour éviter que la culture subisse une contrainte de prélèvement en eau due au statut hydrique du sol. Le contexte était tout indiqué pour acquérir des connaissances agronomiques et économiques pour être en mesure d'évaluer la pertinence de l'irrigation dans un contexte de production de plantes fourragères.

2 Objectifs

1. Mesurer l'impact du stress hydrique sur le développement, le prélèvement en eau, le rendement et la qualité de plantes fourragères.
2. Définir les contextes (prix des terres, systèmes d'irrigation, prix foin, etc.) où la rentabilité de l'irrigation peut s'exprimer, tout en y incluant les besoins de stockage en eau d'irrigation.
3. Produire un feuillet technique sur l'irrigation dans les plantes fourragères qui inclut une « charte » pour évaluer le degré du risque de stress hydrique auquel est exposée une entreprise.

3 Équipe de réalisation

- Direction régionale de la Capitale-Nationale et de Chaudière-Appalaches du MAPAQ
 - Philippe-Antoine Taillon
 - Diane Allard
 - France Bélanger
- Site d'essai principal
 - Ferme Jean-Claude Pouliot
 - Jean-Claude Pouliot
- Sites satellites
 - Anglo Acres, Ferme Barjo, Ferme Dubuc & Frères, Ferme Érilis, Ferme Fontabel 1996, Ferme Gérard Raby, Ferme Lamontagne, Ferme l'Oiseau Bleu, Ferme M.G. Lévesque et Fils et Ferme Rénile
- Université Laval
 - Dany Cinq-Mars
- Dubois Agrinovation
 - Mathieu Plante
- IRDA
 - Carl Boivin, Jérémie Vallée, Lélia Anderson, Paul Deschênes, Mick Wu, Antoine Lamontagne, Félix Lavoie-Lochet, Megann Desrochers et Francis-Olivier Lortie

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'Accord Canada-Québec de mise en œuvre du Partenariat canadien pour l'agriculture conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Ce projet a aussi bénéficié d'un appui financier de Dubois Agrinovation.

Ce rapport peut être cité comme suit:

Vallée, J. et C. Boivin. 2023. Irrigation des plantes fourragères : outiller le milieu pour qu'il puisse prendre les bonnes décisions. Rapport final. IRDA. 137 pages.

4 Faits saillants

- Maintenir la culture en situation de confort hydrique a permis d'obtenir un gain en rendement de 20 % en année d'implantation.
- En année de production, des gains de 9,4 et 5,2 % ont respectivement été obtenus à la 2^e et 3^e coupe en évitant que la culture subisse une contrainte de prélèvement en eau.
- La qualité du fourrage n'a pas été significativement affectée par le stress hydrique.
- Selon le contexte, la culture est en mesure de prélever de l'eau jusqu'à 75 cm de profondeur.
- Des coefficients culturaux maximaux « TDR » (K_{c-TDR}) allant jusqu'à 1,8 ont été observés.
- Au semis (2020), la prairie à l'étude était composée de luzerne à 90 % et de mil à 10 %. En 2022, de 59 à 68 % de la biomasse était occupé par la luzerne, 17 à 28 % par des graminées et la balance par des mauvaises herbes. Aucune différence significative n'a pu être attribuée aux traitements (AC, TT et NI).
- En contexte où des pertes de rendements sont attribuables au stress hydrique, l'achat de terres peut être intéressant pour un scénario de perte de rendements de 10 % et moins, alors que l'assurance récolte est plus avantageuse pour des pertes de 25 et 50 %.

5 Méthodologie

5.1 Sites

5.1.1 Site principal

Les essais ont eu lieu à la Ferme Jean-Claude Pouliot (46.916795°, -70.939080°), une entreprise spécialisée dans la production laitière. Cette dernière est située à Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans dans la Capitale-Nationale.

5.1.2 Sites satellites

Dix sites satellites ont fait l'objet d'un suivi en 2021 et 2022. Les fermes participantes sont situées dans cinq régions :

- Capitale-Nationale : Ferme l'Oiseau Bleu (Baie St-Paul1), Ferme Barjo (Baie St-Paul2), Ferme Rénile (Saint-Jean-Port-Joli).
- Estrie : Ferme Fontabel 1996 (Weedon).
- Chaudière-Appalaches : Ferme Lamontagne (Saint-Nicolas), Ferme Gérard Raby (St-Paul-de-Montminy).
- Montérégie : Anglo Acres (Saint-Chrysostome), Ferme M.G. Lévesques et Fils (Ange-Gardien).
- Centre-du-Québec : Ferme Dubuc & Frères (Sainte-Eulalie), Ferme Érilis (Saint-Albert).

Le site Saint-Chrysostome a dû être abandonné en cours de réalisation du projet. Un problème technique important des équipements installés au champ a limité la collecte de données de la saison 2021. Le site a été abandonné en 2022, car le champ instrumenté était destiné au pâturage seulement. Il n'y a pas eu d'autres champs disponibles qui auraient pu répondre aux critères de sélection du projet.

À moins d'un avis contraire, les informations présentées sont en lien avec le site principal.

5.2 Régie de culture

Le précédent cultural (2019) à la culture des plantes fourragères était du maïs-grain. Au printemps 2020, un travail du sol a été effectué avec une déchaumeuse à disques et une herse rotative. Du lisier de bovin a été épandu. Un mélange de 90 % de luzerne et de 10 % de fléole des prés à raison de 19 kg/ha a été semé le 16 mai 2020. Finalement, un traitement phytosanitaire pour contrôler les mauvaises herbes à feuilles larges a été effectué le 22 juin 2020 (Nufarm Agriculture, Embutox). À l'exclusion des fauches manuelles dans les parcelles expérimentales, les pratiques culturales étaient sous la responsabilité du producteur.

En ce qui concerne les sites satellites, les informations concernant la régie de culture et l'année d'implantation des champs suivis sont regroupées au Tableau 1.

Tableau 1. Années d'implantation et composition du mélange fourrager, sites satellites 2021-2022.

Site	Année implantation	Composition du mélange fourrager ¹
Ange-Gardien	2020	90 % luzerne ² 10 % fléole des prés
Baie St-Paul1	2021	50 % luzerne 20 % fléole des prés 10 % brome des prés 10 % brome inerme 10 % fétuque élevée
Baie St-Paul2	2021	60 % herbe du Soudan 10 % brome inerme 10 % dactyle pelotonné 10 % fétuque élevée 10 % fléole des prés
Saint-Albert	2021	80 % luzerne 20 % fétuque élevée
Saint-Chrysostome		Site abandonné
Saint-Jean-Port-Joli	2021	45 % herbe du Soudan 40 % luzerne 12 % dactyle pelotonné 3 % trèfle rouge
Saint-Nicolas	2016	100 % fléole des prés
Saint-Paul-de-Montminy	2011	55 % fléole des prés 30 % trèfle rouge 15% trèfle d'Alsike
Sainte-Eulalie	2021	40 % fétuque élevé 30 % fléole des prés 25 % trèfle rouge 5 % trèfle blanc Avoine comme plante abri (2021)
Weedon	2020	55 % luzerne 20 % fléole des prés 10 % brome des prés 10 % fétuque élevé 5 % brome inerme

¹ Les proportions ont été arrondies

² Proportions estimées

5.3 Traitements

Il y a trois traitements à l'étude et ces derniers ont trait à la régie d'irrigation. Le traitement irrigué « après coupe » (AC), implique d'intervenir avec l'irrigation à la condition que la consigne de déclenchement soit atteinte et qu'une coupe ait été effectuée précédemment. Une seule irrigation peut être déclenchée à la suite d'une coupe. Le traitement irrigué en « tout temps » (TT), implique d'intervenir lorsque la consigne est atteinte, et ce, sans aucune autre condition ou limite en ce qui a trait au nombre d'épisodes. Ce traitement vise à maintenir la culture dans une situation de confort hydrique. Enfin, il y a un témoin « non irrigué » (NI) où intervenir avec l'irrigation est impossible.

La consigne pour déclencher l'irrigation a été déterminée avec la méthode du « Point tournant » (Boivin et coll., 2018). La consigne utilisée a été de 25-30 kPa et cette dernière a été utilisée pour la durée du projet.

Le suivi quotidien du statut hydrique du sol s'est effectué au moyen de tensiomètres (Irrometer, RSUV) reliés à un acquisateur de données (Campbell Scientific, CR300) qui était connecté à un modem cellulaire (Microhard Systems, IPn3Gb). De cette manière, il a été possible de consulter à distance et à tout moment, le statut hydrique du sol pour les parcelles du TT.

Un système d'irrigation par aspersion composé d'une ligne principale a été utilisé. En 2020, les essais ont été réalisés avec les Senninger 70-25 RD1 avec des buses n°18 (7,14 mm) et n°20 (7,94 mm). Par la suite en 2021 et 2022, le gicleur qui a été utilisé est de type à impulsion de moyenne portée (Komet 162, buse de 8 mm). Le contexte de la pandémie (COVID-19) avait affecté considérablement les délais de livraison pour les gicleurs initialement sélectionnés (Komet). Les gicleurs ont été fixés à une ligne d'irrigation constituée de 40 barres d'aluminium. Chacune des barres à une longueur de 9,14 m et un diamètre de 101,6 mm. Ces dernières ont été déposées à la surface du sol. Un régulateur de pression à 3 Bar a été installé à la base de chacun des gicleurs pour assurer une pression constante et uniforme, peu importe la localisation des parcelles. Le rayon d'action du Komet et du Senninger sont respectivement de 15 m et de 19,8 m et ils permettent d'appliquer en moyenne 8,1 mm/h et 3,8 mm/h. Un compteur d'eau (Seametrics, Tx-81), connecté à un acquisateur de données (Campbell Scientific, CR1000) a été installé sur la conduite principale en amont des gicleurs. Le nombre d'irrigations, la durée, et le volume total irrigué ont été mesurés précisément. Pour chaque parcelle où intervenir avec l'irrigation était possible, un gicleur a été installé au centre de cette dernière, à la jonction de deux barres d'aluminium. Comme il y a qu'un gicleur par parcelle, la hauteur d'eau reçue par la culture dépend de sa position par rapport à ce dernier. Ainsi, quoique l'apport en eau ait été déclenché au même moment, la culture risque de se retrouver en stress hydrique plus rapidement dans certaines zones où la hauteur d'eau reçue a été plus faible. Cette approche qui permet une gradation, en ce qui a trait au statut hydrique du sol, a été décrite dans Hanks et coll. (1976) et a été reprise par d'autres essais.

Bien qu'il ait été privilégié d'intervenir avec l'irrigation en absence de vent, il n'a pas toujours été possible d'irriguer dans de telles conditions. La vitesse et la direction du vent ont varié d'un épisode à l'autre et ont été mesurées par la station météo. La hauteur d'eau apportée par un épisode d'irrigation a été mesurée à une distance de 4, 8 et 12 m du centre de la parcelle, et ce, avec 12 chaudières munies d'un entonnoir « Pluviodières ». Le volume d'eau de chaque chaudière a été mesuré et converti en hauteur d'eau selon l'aire de captation de l'entonnoir. Ces dernières ont été disposées parallèlement aux vents dominants (orientation dans un axe est-ouest) dans les blocs 1 et 4.

5.4 Dispositif expérimental et analyses statistiques

Les trois traitements (TT, AC, NI) ont été assignés à l'intérieur d'un plan en blocs aléatoires complets (4) avec mesures répétées. Pour chacun des traitements où intervenir avec l'irrigation est permis, le rayon couvert par le gicleur, de chaque côté de la ligne centrale formée par les barres d'aluminium, a été divisé en 3 zones égales (4, 8 et 12 m). Cette approche a aussi été utilisée pour le témoin NI. Comme il a été impossible de randomiser la « gradation », les parcelles orientées perpendiculairement à la ligne deviennent des mesures répétées. Le dispositif est d'une superficie d'environ 1 ha (301,7 m x 34 m). Le bloc 3 a été retiré du dispositif expérimental, car des problèmes importants de drainage ont été identifiés en 2021. Ce bloc n'était plus représentatif du reste du dispositif expérimental.

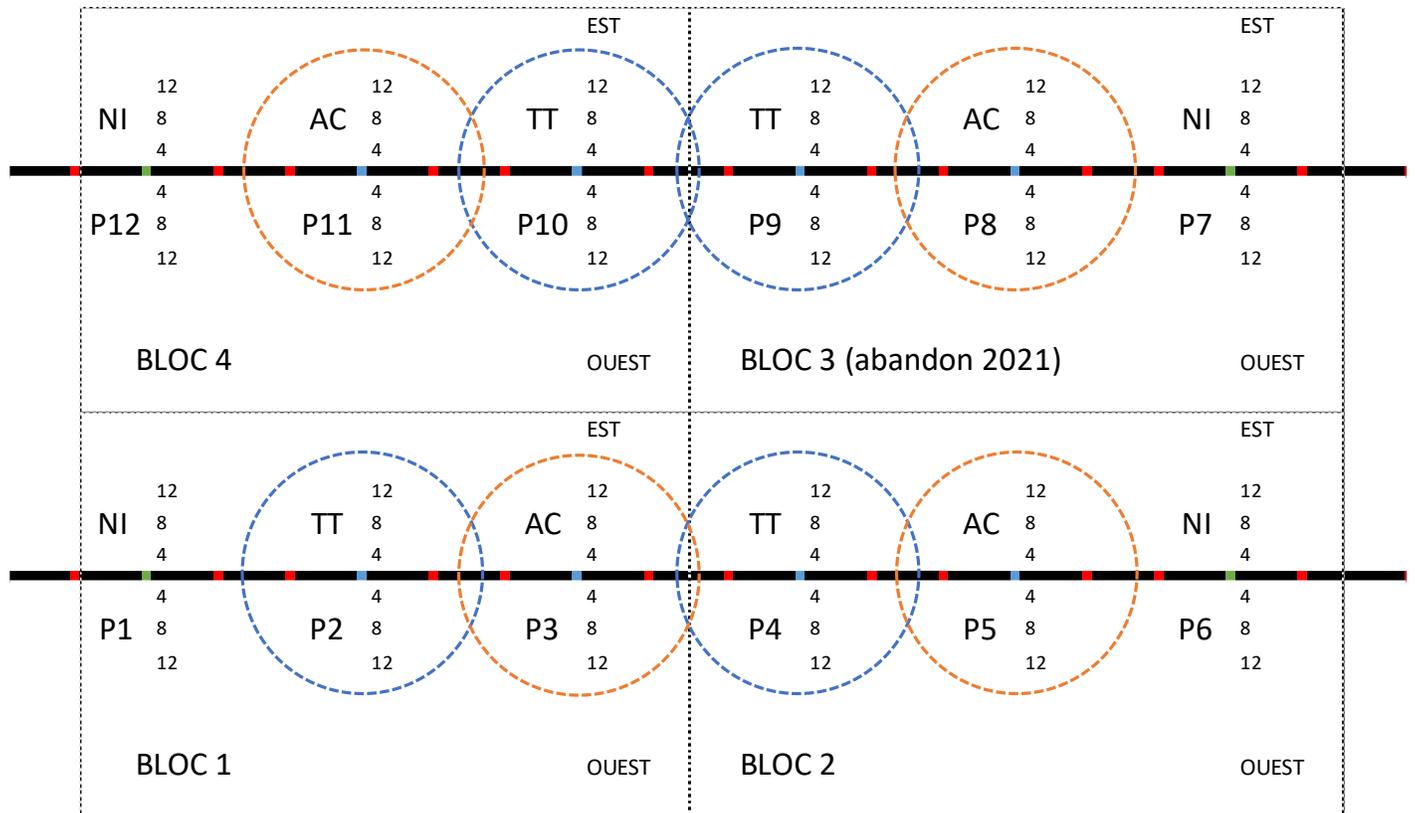


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental.

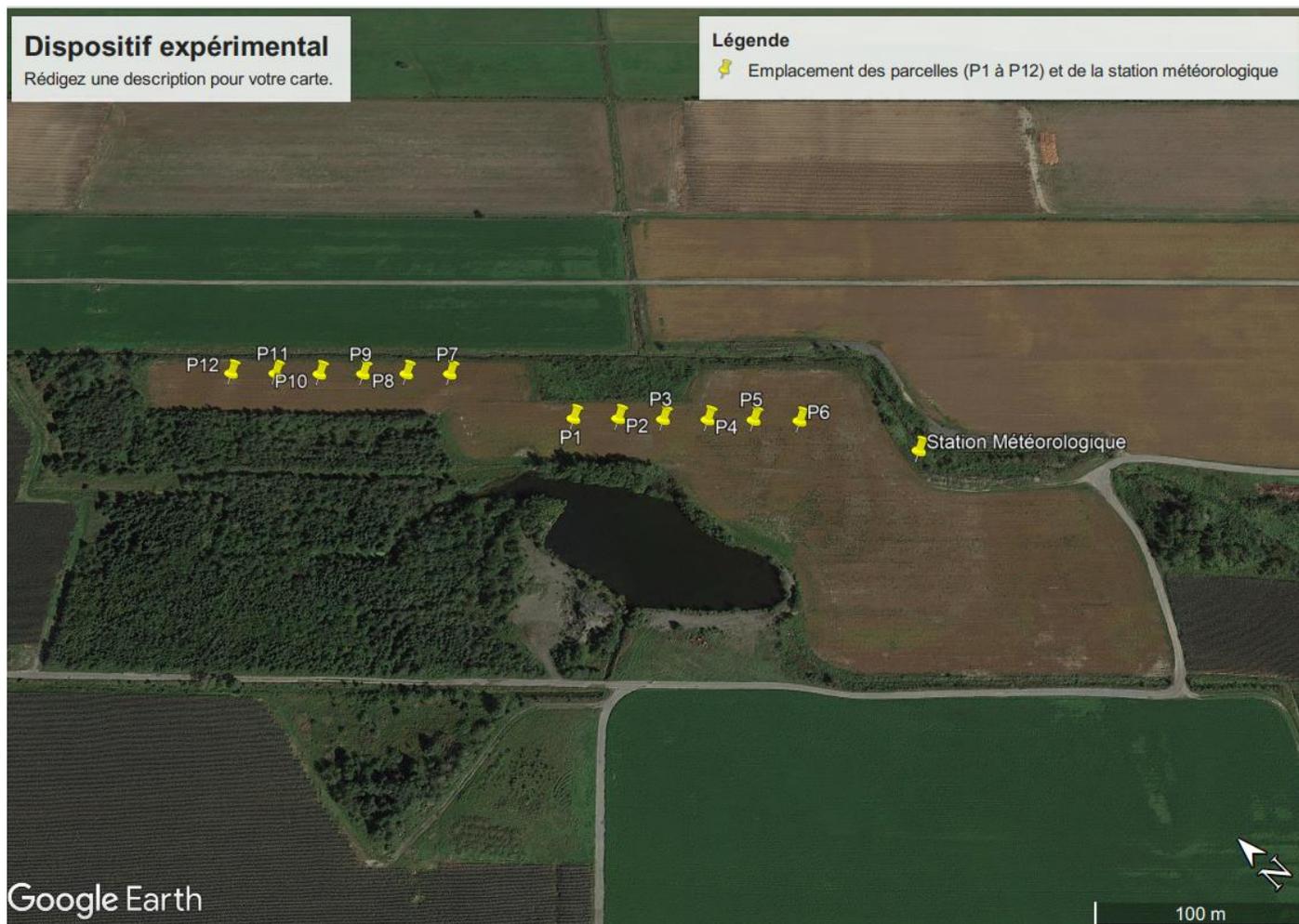


Figure 2. Géolocalisation des 12 parcelles et de la station météorologique.

5.5 Analyses statistiques

Pour l'analyse de la qualité du fourrage, la hauteur des plants ainsi que la composition du mélange fourrager, un modèle mixte a été appliqué avec PROC MIXED de SAS (version 9.4) pour l'analyse de variance.

Spécifiquement pour le rendement, une autre approche d'analyse a été effectuée. L'analyse a été faite pour chaque année (2020, 2021 et 2022), de manière indépendante, en raison de l'hétérogénéité du plan expérimental entre les années (nombre d'épisodes d'irrigation et hauteur totale appliquée, nombre de coupes). Le rendement sec en fonction de la quantité d'eau irriguée a été modélisé en excluant le bloc 3. La quantité d'eau irriguée est la variable pertinente qui est influencée par le traitement, la distance et l'orientation. Cela permet donc de grandement simplifier les analyses statistiques. Des modèles additifs généralisés mixtes (GAMM, Wood 2017), pour permettre de modéliser des relations non-linéaires de façon flexible et parcimonieuse ont été utilisés. Les blocs en effet aléatoire, ainsi qu'un modèle de la variance ont été inclus. Finalement, la validation des modèles statistiques s'est effectuée en examinant les résidus du modèle.

En 2020, la distribution de la hauteur d'eau irriguée est bimodale (0 ou 40-70 mm). Il n'y a donc pas suffisamment de variabilité de hauteur d'eau pour modéliser une relation continue. Le rendement en fonction d'un facteur (irrigué ou non) a donc été modélisé. En 2021, la hauteur d'eau irriguée totale a été subdivisée en quatre catégories (0, 25, 50 et 100 mm). De plus, la coupe 1 n'a pas été analysée, car aucune irrigation n'a été réalisée avant la fauche.

La comparaison du modèle statistique à un modèle nul (sans effet d'irrigation) s'est effectuée avec le critère d'information AIC (Akaike, 1974). L'AIC est un indice de la correspondance des données à un modèle. C'est une mesure de l'information inexploitée avec une pénalité pour la complexité du modèle. Un modèle qui est parcimonieux et correspond bien aux données a donc un plus petit AIC qu'un modèle trop complexe ou correspondant moins bien aux données. Une différence de deux ou plus ($\Delta AIC \geq 2$) entre les modèles est généralement l'indication d'une différence intéressante.

5.6 Paramètres mesurés

5.6.1 pH, détritrus, matière organique, granulométrie et texture

Des échantillons de sol (0-30 cm) ont été prélevés au courant du projet, tamisés à 2 mm et séchés à l'air à 21 °C. La fraction des particules supérieure à 2 mm a été pesée et caractérisée comme détritrus. Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (CPVQ, 1988). Le contenu en matière organique totale a été calculé selon le contenu en C_{tot} , déterminé au LECO, avec un facteur de conversion de 1,724. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points, suivie d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le tamisage permet de déterminer la proportion en % du sable très grossier (1,0 à 2,0 mm), du sable grossier (0,50 à 1,0 mm), du sable moyen (0,25 à 0,50 mm), du sable fin (0,10 à 0,25 mm) et du sable très fin (0,05 à 0,10 mm). La texture du sol a été déterminée avec le diagramme triangulaire des classes de texture de sols (AAC, 2002).

5.6.2 Statut hydrique

Des sondes TDR (CS625 ou CS650, Campbell Scientific) ont été utilisées pour suivre le statut hydrique en continu dans l'horizon 0-60 cm. En 2020, 2021 et 2022, les sondes ont respectivement été opérationnelles du 17 juin au 8 octobre, du 7 mai au 27 septembre et du 6 mai au 28 septembre. 2022 pour mesurer la teneur en eau volumique du sol en continu. Elles ont été connectées à des acquiiseurs de données (CR300, Campbell Scientific). Le positionnement des sondes permet de mesurer les variations de la teneur en eau volumique du sol jusqu'à un horizon situé à 60 cm sous la surface du sol, mais sous forme de profils typiques 0-20, 20-40 et 40-60 cm. Les TDR ont aussi permis d'évaluer l'évapotranspiration de la culture (ET_c) et d'estimer des coefficients culturaux (K_c).

Pour l'ensemble des sites satellites, des sondes TDR (CS625 ou CS650, Campbell Scientific) ont été en opération tout au long du suivi en 2021 et en 2022. Au nombre de trois par site, elles ont été installées tôt en saison et laissées en place jusqu'à la fin du suivi. Elles ont été connectées à des acquiiseurs de données (CR300, Campbell Scientific). D'une longueur de 30 cm, elles ont été insérées de manière verticale ou diagonale dans le sol afin de mesurer le statut hydrique dans le profil de sol colonisé par les racines. Le positionnement des sondes a permis de mesurer les variations de la teneur en eau volumique du sol jusqu'à une profondeur maximale typique de 75 cm. Pour certains sites, la présence de compaction ou d'un affleurement rocheux a limité l'installation des sondes en profondeur.

5.6.3 Conditions météorologiques et évapotranspiration potentielle (ET_p)

Une station météorologique a été installée au site (46.915801°, -70.938120°). La température et l'humidité relative de l'air (HC-S3, Rotronic), la radiation solaire (LI200S, Li-Cor), la vitesse et la direction du vent (05103, R.M. Young), ainsi que la pluviométrie (TR-525M, Texas Electronics) ont été mesurées en continu et enregistrées par un acquiiseur de données (CR1000, Campbell Scientific) relié à modem cellulaire (IPn3Gb, Microhard Systems). Le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ET_p) a été effectué à l'aide de la formule standardisée de Penman-Montheith (ASCE, 2005).

La pluviométrie de chacun des sites satellites a été suivie grâce à un pluviomètre (TR-525M, Texas Electronics) connecté au même acquiiseur de données des TDR.

À des fins de comparaison, les réseaux de stations d'Agrométéo Québec, ainsi que celui d'Environnement et ressources naturelles Canada ont été utilisés. La pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle sont les données qui ont été comparées. Le choix de la station météo pour les sites suivis s'est fait en prenant en compte la distance et l'élévation entre le site et la station météorologique de même que la présence d'éléments naturels pouvant influencer les mesures (ex. présence du fleuve Saint-Laurent). Pour le site principal d'essai, les stations sélectionnées sont Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans et Saint-Michel respectivement pour Agrométéo Québec et pour Environnement et ressources naturelles Canada. Le choix

des stations météorologiques, selon la distance et l'élévation entre les stations et les sites suivis, est présenté au (Tableau 2). Les normales climatiques utilisées sont celles de 1981-2010. Pour l'évapotranspiration potentielle, la moyenne mensuelle de la station météorologique d'Agrométéo Québec a été calculée pour la période entre 2011 et 2022. Finalement, le traitement de ces valeurs s'est aussi effectué de manière cumulative entre le 1^{er} mai et le 31 octobre pour chacun des sites. Le cumulatif a débuté à la date du semis (lorsque connu) ou automatiquement à partir du 1^{er} mai et le cumulatif a été poursuivi jusqu'à un événement de fauche. Le cumulatif recommence à zéro après une fauche et ainsi de suite, jusqu'au 31 octobre.

Tableau 2. Localisation et caractérisation (élévation (m) et distance (km)) des stations météorologiques retenues à des fins comparatives, selon le site.

Site	Élévation (m)	Réseau Agrométéo Québec	Élévation (m)	Distance par rapport au site (km)	Réseau Environnement et ressources naturelles Canada	Élévation (m)	Distance par rapport au site (km)
Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	50	Saint-Laurent	55	6,4	Saint-Michel	69	7,1
Ange-Gardien	79	Farnham F	53	7,0	Farnham	68	5,8
Baie St-Paul1	6	Baie-Saint-Paul	26	3,3	Baie-Saint-Paul	32	1,9
Baie St-Paul2	342	Saint-Hilarion F	408	10,5	Saint-Urbain	91	9,4
Saint-Albert	121	Sainte-Clotilde-de-Horton	82	17,8	Arthabaska	140	6,4
Saint-Jean-Port-Joli	86	Saint-Aubert	37	2,0	Montmagny	15	33,8
Saint-Nicolas	63	Saint-Antoine-de-Tilly	71	5,5	Québec/Jean Lesage	60	13,5
Saint-Paul-de-Montminy	481	Armagh	317	19,0	Sainte-Lucie	373	25,5
Sainte-Eulalie	98	Sainte-Clotilde-de-Horton	82	17,8	Saint-Wenceslas	84	12,0
Weedon	264	Bury	287	14,0	Saint-Camille (Wolfe)	268	18,9

5.6.4 Exportation en eau du système cultural et coefficient cultural « TDR » (K_c -TDR)

Les sondes TDR utilisées pour le suivi du statut hydrique du sol ont aussi servi pour évaluer l'exportation en eau du système cultural. Ainsi, la variation quotidienne de la teneur en eau volumique pour chacune des sondes TDR, a été rapportée en mm d'eau en fonction du profil mesuré (0-20, 20-40, et 40-60 cm). La valeur obtenue a été utilisée pour évaluer l'évapotranspiration de la culture (ET_c -TDR). Pour y parvenir, la valeur mesurée à 8 h a été soustraite de la valeur mesurée à 20 h. Les valeurs issues de journées où il y a eu des apports en eau (précipitations ou irrigation) et celles au lendemain de ces dernières ont été éliminées. Par la suite, ces exportations (ET_c -TDR) ont été mises en relation avec l'évapotranspiration potentielle (ET_p) quotidienne, mesurée avec la station météorologique, pour déterminer un coefficient cultural estimé (k_c) tel que décrit par Allen et coll. (1998). Pour obtenir la chronique complète des k_c par traitement, estimés à l'aide de cette technique, l'ensemble des valeurs du traitement correspondant aux profils identiques ont été mis en commun. Autrement dit, pour un traitement donné, les profils 0-20, 20-40 et 40-60 cm ont été analysés par groupe de profils. Par la suite, la valeur médiane du jeu de données a été compilée pour chaque profil (0-20, 20-40 et 40-60 cm). Finalement, les valeurs médianes ont été

additionnées entre elles pour constituer une ET_c -TDR sur 0-60 cm et par le fait même, un k_c qui intègre l'ensemble des prélèvements en eau et pertes par évaporation suivit par les sondes.

5.6.5 Hauteur et biomasse des plants

La biomasse des parties aérienne a été récoltée à chacune des coupes effectuées (producteur). En 2020, une seule coupe a été effectuée le 6 août 2020. En 2021, trois coupes ont été effectuées au courant de la saison, soit le 5 juin, le 12 juillet ainsi que le 15 août. Finalement, deux coupes ont été effectuées en 2022 : le 14 juin ainsi que le 8 août. Le rendement d'une parcelle correspond à tout le matériel végétal (parties aériennes) présent dans un quadrat de 1 m². Ce matériel végétal a été coupé manuellement et à la même hauteur, par rapport au sol, que celle du producteur. Deux quadrats ont été récoltés dans chacune des parcelles. Pour tous les traitements (NI, AC et TT), le rendement a été mesuré à l'est et à l'ouest de la ligne d'irrigation à une distance de 8 m du centre de la parcelle pour la 1^{re} coupe. À la 2^e coupe, les rendements ont été mesurés à 4, 8 et 12 m de distance du centre de la parcelle, tant à l'est qu'à l'ouest. Finalement, le bloc 3 a été exclu du dispositif à la 2^e récolte et n'a pas été récolté à partir de la saison 2021. Tel que décrit précédemment, le bloc 3 a été exclu des analyses finales La biomasse a été déshydratée pendant 48 h à 105 °C. Le poids en matière sèche des échantillons a été mesuré à l'aide d'une balance électronique (Shimadzu, TXB2201L).

La hauteur maximale moyenne de la luzerne et des graminées (moyenne de cinq tiges visuellement les plus hautes) a été mesurée dans chacune des unités expérimentales. Ces hauteurs ont été mesurées lors de la coupe en 2020, de la 2^e coupe de 2021 et lors des 2 coupes en 2022, à l'aide de 5 sous-quadrats (carré de 50 cm x 50 cm) situés à proximité des quadrats de 1 m² (récolte). Ces mesures ont été effectuées à 4, 8 et 12 m du gicleur.

Pour les sites satellites, une parcelle d'environ 25 m² a été délimitée et récoltée manuellement. Les coupes ont été effectuées à des dates similaires à celle du producteur. Le rendement d'une parcelle correspond à tout le matériel végétal (parties aériennes) présent dans un quadrat de 1 m². Ce matériel végétal a été coupé manuellement et à la même hauteur, par rapport au sol, que celle utilisée par le producteur. Deux quadrats ont été récoltés dans chacune des parcelles. Le reste de la parcelle a été fauché complètement pour ramener la parcelle comparable au reste du champ.

5.6.6 Qualité

Un sous-échantillon du matériel végétal de chaque parcelle a été prélevé à 8 m du centre de la parcelle à l'est de la ligne principale en 2020. En 2021, ces analyses ont été poursuivies tant à l'est qu'à l'ouest de la ligne d'irrigation pour évaluer la qualité du fourrage à la 2^e et 3^e coupe. Ces analyses n'ont pas été poursuivies en 2022. Les analyses ont été confiées au groupe Environex. L'analyse infrarouge comporte 38 paramètres tandis que l'analyse chimique mesure 8 paramètres : la matière sèche (%), l'humidité (%), la protéine brute (%), la fibre ADF (%), le calcium total (%), le phosphore total (%), le magnésium total (%) et le potassium total (%).

5.6.7 Composition du mélange fourrager

Le mélange fourrager a été analysé en pesant les différentes fractions le composant. En 2020, cette opération a été menée à 4, 8 et 12 m. En 2021, les proportions ont été mesurées à la 2^e (8 m seulement) et à la 3^e coupe (4, 8 et 12 m). Finalement, les mesures ont été effectuées en 2022 lors de la 2^e coupe à 4, 8 et 12 m. Pour ce faire, la biomasse d'un quadrat de 50 cm de côté a été récoltée et les espèces végétales ont été manuellement triées (luzerne, graminées, mauvaises herbes) et pesées humides à l'aide d'une balance électronique (Shimadzu, TXB2201L). La biomasse a été déshydratée pendant 48 h à 105 °C. Le poids en matière sèche des échantillons a été mesuré à l'aide d'une balance électronique (Shimadzu, TXB2201L) et comparé pour déterminer les différentes fractions.

5.6.8 Analyse économique

L'analyse économique a été réalisée par le Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture (CECPA). Le rapport complet de cette analyse est présenté à l'Annexe 3. Analyse économique.

6 Résultats

6.1 Analyses physico-chimiques

Les résultats de la caractérisation physico-chimique sont présentés au Tableau 3. La texture des sites satellites suivis, ainsi que celle du site où était situé le dispositif expérimental varie entre le sable et l'argile limoneuse. Le loam sablo-argileux est retrouvé sur trois sites (Saint-Chrysostome, Saint-Jean-Port-Joli et Saint-Nicolas), le loam sableux sur deux sites (Ange-Gardien et Baie-Saint-Paul2) tandis que le loam argileux se retrouve au site principal d'essai et au site Saint-Paul-de-Montminy. Le pH_{eau} varie entre 5,29 et 7,17. Il y a une certaine variabilité en ce qui a trait aux détritux avec des valeurs se situant à près de 0 % jusqu'à 36,9 %. Finalement, la matière organique se situe entre 3,5 et 8,2 %.

Tableau 3. Caractérisation physico-chimique du sol, selon le site.

Site	Texture	pH_{eau}	Détritux	M.O.
			(%)	(%)
Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans (Dispositif principal)	Loam argileux	n.d.	36,8	4,6
Ange-Gardien	Loam sableux	n.d.	9,9	3,5
Baie-Saint-Paul1	Argile limoneuse	6,46	0,4	6,6
Baie-Saint-Paul2	Loam sableux	6,35	5,9	7,6
Saint-Albert	Sable loameux	6,30	7,9	6,3
Saint-Jean-Port-Joli	Loam sablo-argileux	7,17	10,4	5,2
Saint-Nicolas	Loam sablo-argileux	6,11	3,0	4,8
Saint-Paul-de-Montminy	Loam argileux	5,29	20,6	8,2
Sainte-Eulalie	Sable	6,23	2,7	4,9
Weedon	Loam	5,81	11,2	7,8

6.2 Gestion des irrigations

La hauteur d'eau appliquée avec un épisode d'irrigation est présentée au Tableau 4 selon l'année, le traitement et la date. Des irrigations ont eu lieu dès l'année l'implantation. Après le semis, des irrigations courtes ont été effectuées pour maintenir une humidité adéquate dans le profil de sol exploitable par le système racinaire. La hauteur d'eau brute des 4 premières irrigations a été sous les 10 mm. Par la suite, la croissance racinaire de la culture a permis d'effectuer des irrigations plus longues apportant davantage d'eau. Au terme de la saison 2020, le cumulatif de la saison a été de 68,7 mm. Les hauteurs d'eau moyennes apportées selon la distance par rapport au gicleur ont été assez uniformes puisqu'elles varient entre 48,9 à 62,3 mm. Comme mentionné précédemment (5.3), le patron d'application en eau du gicleur qui a été utilisé en 2020 est différent. Il est aussi à noter que seul le traitement TT a été irrigué durant cette année. En 2021, les conditions environnementales de la saison ont engendré davantage d'épisodes d'irrigation. Au total, 8 épisodes ont eu lieu pour le traitement TT pour les blocs 1 et 2 tandis que les blocs 3 et 4 ont reçu 7 épisodes. Dans le cas du traitement AC, 3 épisodes ont eu lieu, soit un épisode après une coupe. La hauteur d'eau brute a atteint 168,6 mm (entre 69,1 et 307,3 mm selon la distance du gicleur et l'orientation par rapport à la ligne d'irrigation) pour le traitement TT et 78,4 mm (entre 32,6 et 152 mm selon la distance et l'orientation) pour le traitement AC. En 2022, une seule irrigation (18,8 mm) a été effectuée au printemps.

Tableau 4. Épisodes d'irrigation selon le traitement, la date et la hauteur d'eau apportée (mm) selon la distance du gicleur et de l'orientation par rapport à la ligne principale.

Année	Traitements	Date	Hauteur d' eau brute (mm)	Hauteur moyenne à			Hauteur moyenne à			Note
				4 m (mm)	8 m (mm)	12 m (mm)	4 m (mm)	8 m (mm)	12 m (mm)	
				est			ouest			
2020	TT	10 juin	4,3	4,9	4,7	4,5	3,1	2,9	4,1	
		16 juin	8,1	3,7	4,7	8,0	4,6	7,8	4,4	
		18 juin	7,1	3,9	1,9	4,9	4,3	5,4	6,1	
		22 juin	7,8	4,3	4,5	6,0	4,2	4,0	6,1	
		3 juillet	15,5	13,4	14,9	13,9	9,2	8,2	14,4	
		6 juillet	8,8	9,8	5,4	1,0	11,0	11,4	10,7	
		23 juillet	17,1	19,4	18,5	18,0	12,5	11,4	16,5	
		Cumulatif	68,7	59,4	54,6	56,3	48,9	51,1	62,3	
2021	TT	9 juin	18,8	52,1	20,9	8,1	39,7	13,2	0	
		10 juin	18,8	39,1	8,5	3,7	38,3	25,4	12,2	
		6 juillet	20,0	32,9	26,5	14,3	32,7	17,3	8,3	
		1 ^{er} août	20,4	33,6	27,0	14,6	33,4	17,6	8,5	Blocs 1 et 2
		7 août	20,1	36,5	25,5	9,5	31,3	22,3	10,0	
		24 août	21,0	29,0	13,2	10,1	23,9	9,7	8,2	Après 3 ^e coupe
		26 août	25,4	31,5	65,4	22,5	37,9	9,1	7,0	Après 3 ^e coupe
		2 septembre	24,1	52,6	24,5	11,0	45,2	26,4	14,9	Après 3 ^e coupe
		Cumulatif	168,6	307,3	211,5	93,8	282,4	141	69,1	
2021	AC	8 juin	18,8	54,5	33,2	20,4	52,0	21,7	6,4	
		1 ^{er} août	20,4	33,6	27,0	14,6	33,4	17,6	8,5	Blocs 1 et 2
		7 août	20,7	37,6	26,3	9,8	32,2	23,0	10,3	Blocs 3 et 4
		24 août	18,5	26,3	12,0	9,2	21,7	8,8	7,4	Après 3 ^e coupe
Cumulatif	78,4	152,0	98,5	54,0	139,3	71,1	32,6			
2022	TT	10 mai	18,8	44,7	16,3	3,8	40,3	24,8	11,0	

6.3 Conditions météorologiques

6.3.1 Pluviométrie

La pluviométrie mesurée au site principal (2020 à 2022) et aux sites satellites (2021-2022) est présentée sur une base mensuelle au Tableau 5. La normale (1981-2010) est aussi présentée selon le site. Globalement, mai, juin, juillet et août ont été assez près des normales climatiques (un peu plus ou un peu moins selon le mois). Toutefois, la hauteur reçue en septembre et octobre a été inférieure à la normale de 44 et 65 mm. En 2021 pour le site principal, la situation a été très similaire à 2020, avec des mois de mai, juin, juillet et août alignés sur les normales climatiques, tandis que pour septembre et octobre, les précipitations ont été inférieures de respectivement 41 et 63 mm. Le site Ange-Gardien a reçu nettement moins de pluie qu'à l'habitude en mai, juin, juillet et août. La situation a particulièrement été marquante en mai avec un déficit de 78 mm. Au site Baie Saint-Paul1 et Baie Saint-Paul2, une situation similaire à l'Ange-Gardien a été observée avec des déficits successifs de mai à août. Le mois d'août a, sans nul doute, été particulièrement déficitaire en pluie avec un manque à gagner d'environ 70 mm. Le site Saint-Albert a également été déficitaire en pluie en mai, juillet, août et septembre, mais dans une moindre mesure. Au site Saint-Jean-Port-Joli, la situation a oscillé entre les déficits (principalement mai, -41 mm et août, -39 mm) et des excès (juin, 54 mm, septembre 12 mm). Au site Saint-Nicolas, mai et août ont aussi été déficitaires avec une diminution respective de 59 mm et 49 mm. Pour le site Saint-Paul-de-Montminy, les déficits ont été plus marqués au courant des mois de juillet et août avec une diminution cumulative de 99 mm durant cette période. De grandes variations ont été mesurées au site de Sainte-Eulalie. Respectivement de 31 et 17 mm, les précipitations pour mai et août ont été inférieures aux normales de 57 et 89 mm. De plus, les précipitations pour le mois de juin ont été de près de 100 mm supérieurs à la normale. Finalement, le site de Weedon a aussi été globalement sous les normales avec une diminution importante de la pluviométrie en mai, juillet et août. De manière générale, la saison 2021 a plutôt été déficitaire pour la plupart des régions suivies.

En 2022, la situation, pour la plupart des sites, a été beaucoup plus près des normales climatiques de manière cumulative, mais avec de plus grandes amplitudes mensuelles (excès et déficits). Certains déficits mensuels ont toutefois été mesurés pour le site de Ange-Gardien en juillet (-49 mm), Baie-Saint-Paul1 et Baie-Saint-Paul2 en septembre (-40 et -43 mm), Saint-Albert en juillet (-42 mm) et en septembre pour Saint-Jean-Port-Joli (-33 mm) et Saint-Paul-de-Montminy (-48 mm). Davantage d'excès de précipitations ont eu lieu en 2022 en comparaison avec 2021, par exemple : en juin pour Baie Saint-Paul2 (78 mm) et en août pour l'Ange-Gardien (72 mm), Saint-Nicolas (90 mm) et Weedon (67 mm).

Tableau 5. Précipitations mensuelles cumulatives mesurées (mm) et normales climatiques 1981-2010 (mm) selon le site et l'année.

Année	Municipalité	Précipitations cumulées (mm)											
		Valeurs mesurées au site						Normales 1981-2010					
		Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
2020	Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	141*	144	126	110	66	39*	103	121	125	115	110	104
2021	Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	118*	129	120	114	69*	41*	103	121	125	115	110	104
	Ange-Gardien	14*	83*	81	54	100*	127*	92	103	120	110	96	109
	Baie St-Paul1	46*	68*	59	10	71*	115*	98	94	87	83	80	79
	Baie St-Paul2	60*	71*	56	12	81*	97*	95	97	90	82	76	70
	Saint-Albert	31*	104*	63	52	75	112*	86	120	124	110	110	111
	Saint-Jean-Port-Joli	50*	145*	79	49	94*	69*	91	91	91	88	82	78
	Saint-Nicolas (Lévis)	57*	141	107	55	95	117*	116	111	121	104	116	98
	Saint-Paul-de-Montminy	93*	140	72	75	134*	61*	92	112	130	116	105	107
	Sainte-Eulalie	31*	191*	134	17	91	112*	88	92	109	106	89	94
	Weedon	37*	113*	36	82	106	75*	98	125	117	127	100	107
2022	Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	114*	100	140	99	72*	47*	103	121	125	115	110	104
	Ange-Gardien	105*	133*	71*	182*	124*	74*	92	103	120	110	96	109
	Baie St-Paul1	93*	124*	97	76*	43*	130*	98	94	87	83	80	79
	Baie St-Paul2	99*	175*	89	83*	39*	129*	95	97	90	82	76	70
	Saint-Albert	90*	142*	82*	148*	124*	70*	86	120	124	110	110	111
	Saint-Jean-Port-Joli	84*	119*	82*	117*	49*	59*	91	91	91	88	82	78
	Saint-Nicolas	83	86*	148*	194*	102*	74*	116	111	121	104	116	98
	Saint-Paul-de-Montminy	146*	146*	99	120*	57*	84*	92	112	130	116	105	107
	Sainte-Eulalie	90*	97*	78	147*	124*	70*	88	92	109	106	89	94
	Weedon	129*	128*	129	194*	179*	52*	98	125	117	127	100	107

* Données complétées avec la station météo la plus proche.

Dans un contexte de cultures fourragères, l'analyse des précipitations entre les coupes ou les récoltes permet d'obtenir de l'information supplémentaire pour caractériser la saison. Cet exercice a été réalisé pour chacun des sites. En premier lieu, pour le site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, les précipitations cumulatives entre les fauches sont présentées aux Figure 3, Figure 4 et Figure 5 respectivement pour les saisons 2020, 2021 et 2022. En 2020, le cumulatif débute avec le semis effectué le 16 mai et se termine avec la première coupe. Le cumulatif pour cette période atteint 301,2 mm et se situe à l'intérieur des valeurs minimale et maximale mesurées par la station météorologique d'Agrométéo Québec pour cette même période. Toutefois, le cumulatif indique que le début de la saison a été particulièrement sec puisqu'il faut attendre près de 2 semaines après le semis pour enregistrer les premières précipitations et plus d'un mois pour atteindre 50 mm cumulés. Par la suite, le régime des précipitations s'est accéléré au mois de juillet et août. Plusieurs jours sans pluie ont suivi la reprise de la 1^{re} coupe. Par la suite, des épisodes fréquents de précipitations ont permis de terminer la période avec un total cumulé de 385,7 mm.

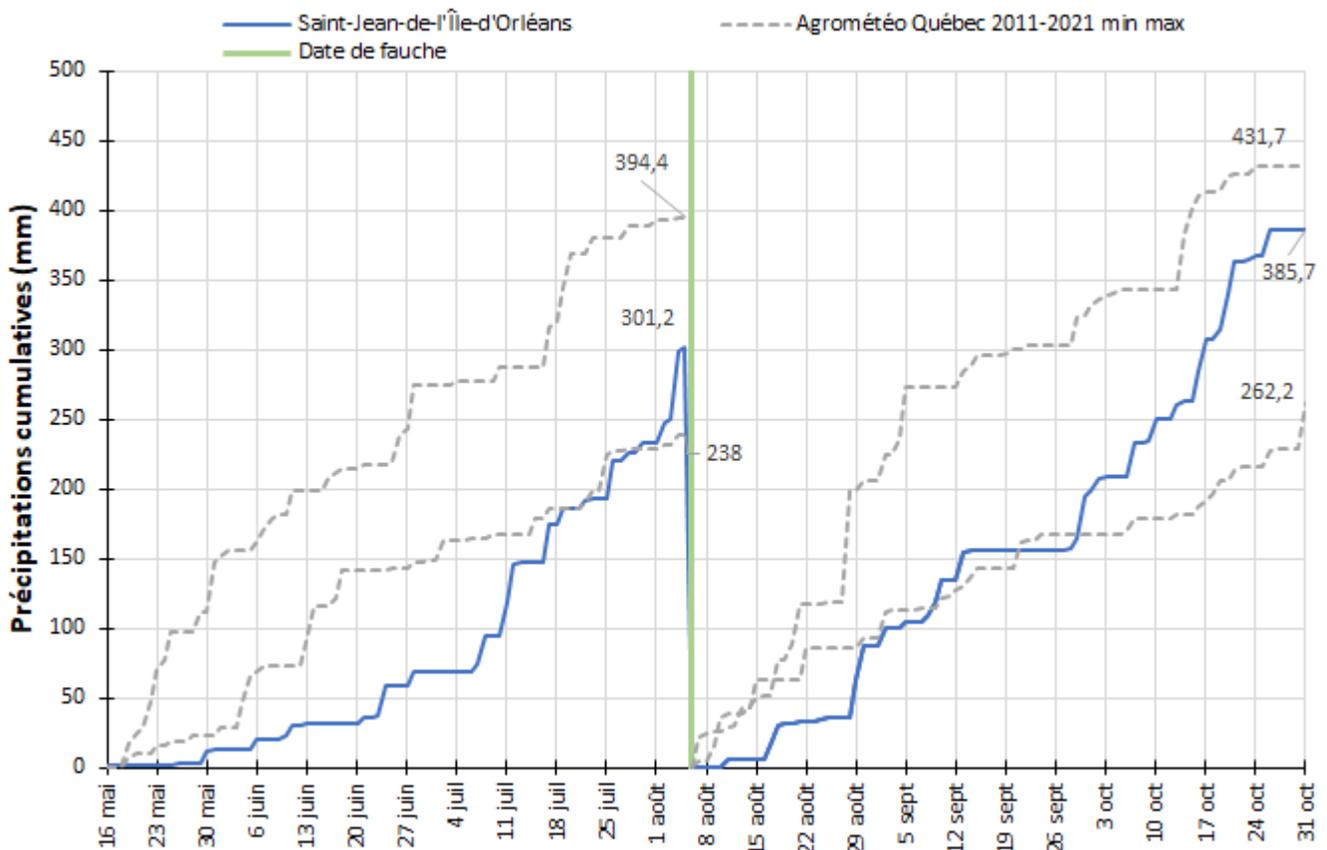


Figure 3. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2020 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2020.

En 2021, trois fauches ont été effectuées au courant de la saison. Le site a reçu une faible quantité de pluie durant la première partie de la saison, c'est-à-dire jusqu'à la 1^{re} coupe. En effet, le cumulatif atteint 45,8 mm, soit un manque à gagner de 26 mm par rapport au minimum enregistré par la station de Saint-Laurent durant la période 2011-2021. De faibles précipitations ont été enregistrées à la reprise jusqu'à la fin juin. Par la suite, des épisodes substantiels ont été enregistrés. La situation a été à l'inverse à la reprise de la 2^e coupe, alors que les précipitations ont été davantage regroupées à la reprise et suivies d'une période avec très peu de pluie. Il n'y a rien à signaler pour la dernière période de la saison.

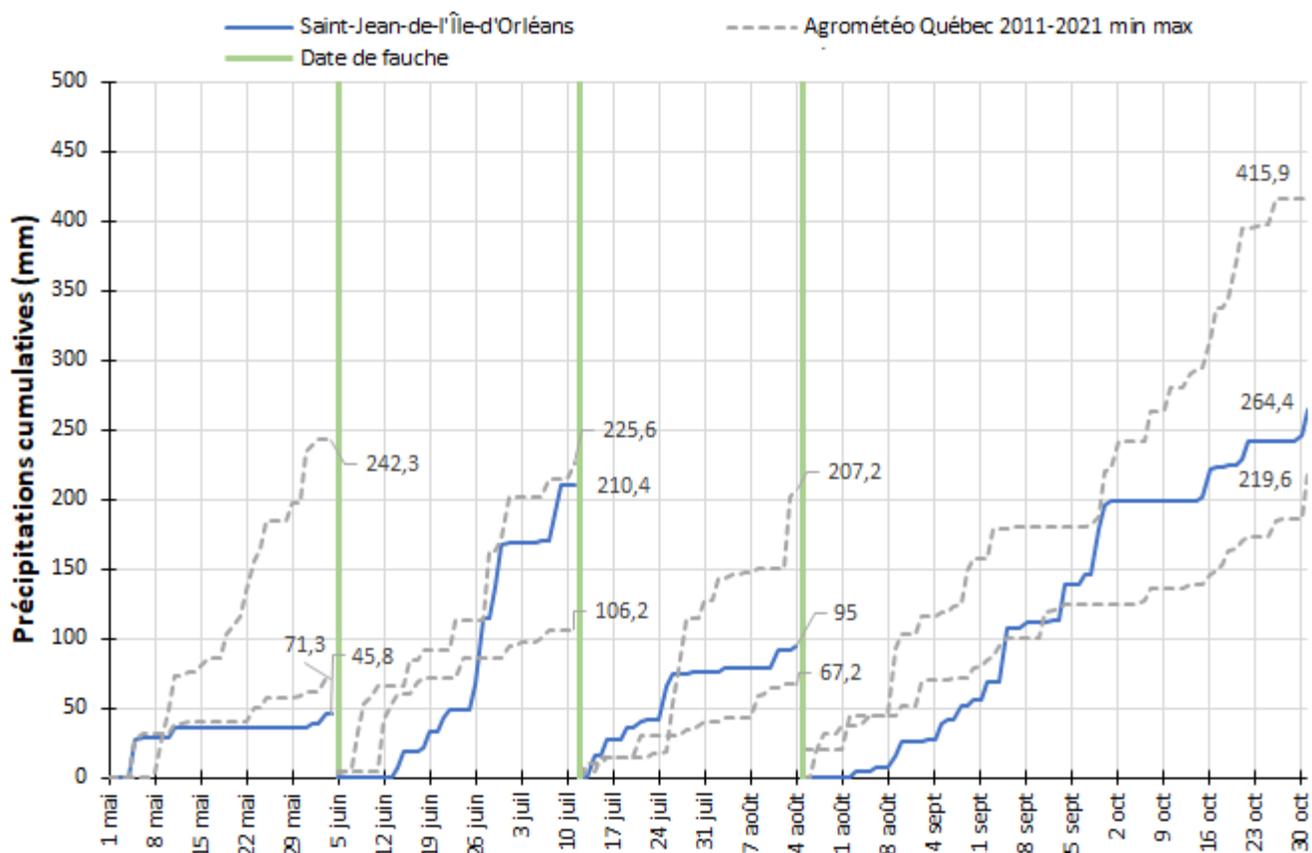


Figure 4. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2021.

Pour 2022, le début de saison a été plutôt sec avec peu de précipitations. Par la suite, vers la fin mai, les précipitations ont permis de rattraper le retard. Les précipitations cumulatives ont atteint 180,9 mm, soit une hauteur qui se situe dans l'intervalle des valeurs minimale et maximale de la période 2011-2022. Par la suite, la période qui précède la 2^e coupe a été caractérisée par une bonne répartition des précipitations. Pour terminer, la fin de la saison s'est close avec des précipitations cumulatives atteignant 219,4 mm, une quantité inférieure à la période minimale de la station météorologique du réseau d'Agrométéo Québec.

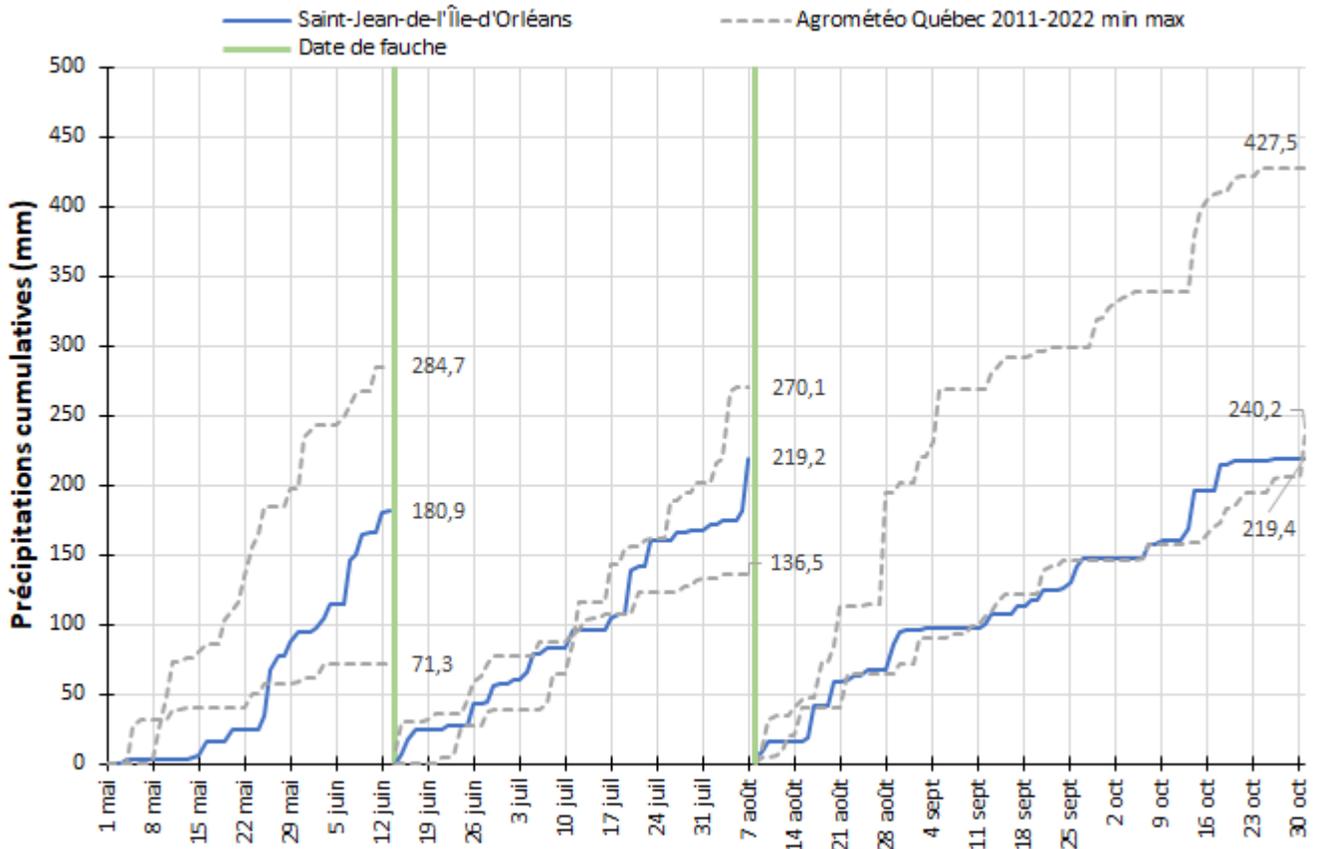


Figure 5. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2022.

Les précipitations cumulatives ont également été segmentées par périodes entre les coupes pour chaque site satellite. Ces données sont présentées l'Annexe 1. Les données d'intérêt de ces sections seront ultérieurement discutées dans ce rapport.

6.3.2 Évapotranspiration potentielle (ET_p)

L'évapotranspiration potentielle du site principal, ainsi que celle des sites suivis, est présentée au Tableau 6. Les valeurs d'ET_p mensuelles mesurées par la station météorologique installée au site de Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans ou par la station du réseau d'Agrométéo Québec la plus près, pour les saisons 2020, 2021 et 2022 sont plus près des valeurs moyennes 2011-2022. Les écarts sont beaucoup plus faibles que la pluviométrie. En 2020, l'ET_p de mai et juin a été de 28 et 16 mm supérieurs à la moyenne au site de Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans. De manière générale, une hausse de l'ET_p a pu être mesurée pour les mois de juin et août en 2021 (augmentation de l'ET_p sur 8 des 10 sites en juin et sur tous les sites en août). L'augmentation de 26 mm en août pour les sites de Saint-Albert et Sainte-Eulalie est importante. Pour 2022, l'ET_p a également été plus élevée pour plusieurs mois dont mai, juillet et octobre. Parmi ces mois, la plus forte augmentation a eu lieu en mai avec des hausses qui ont oscillé entre 4 et 26 mm.

Tableau 6. Évapotranspiration mensuelle cumulative mesurée (mm) et moyennes mensuelles selon la période 2011-2022 (mm) selon le site et l'année.

Année	Municipalité	Évapotranspiration potentielle cumulative (mm)											
		Sommaire mensuel						Moyennes mensuelles (2011-2022)					
		Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
2020	Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	141	144	126	110	66	39	113	128	138	114	75	41
	Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	121	138	131	127	71	41	113	128	138	114	75	41
	Ange-Gardien	127	156	138	139	85	36	126	143	152	128	86	39
	Baie St-Paul1	105	114	120	121	65	35	108	123	133	111	70	34
	Baie St-Paul2	95	128	131	136	56	16	99	123	134	113	64	21
	Saint-Albert	130	156	144	147	90	32	120	135	143	121	79	32
	Saint-Jean-Port-Joli	101	119	120	114	67	33	109	126	134	110	71	33
	Saint-Nicolas	110	145	140	134	68	15	113	132	139	114	71	30
	Saint-Paul-de-Montminy	123	147	145	136	80	32	116	134	142	117	76	32
	Sainte-Eulalie	130	156	144	147	90	32	120	135	143	121	79	32
	Weedon	120	149	133	134	77	29	114	131	138	116	74	33
2021	Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	111	111	142	104	74	47	113	128	138	114	75	41
	Ange-Gardien	143	137	155	133	74	51	126	143	152	128	86	39
	Baie St-Paul1	112	104	130	98	74	40	108	123	133	111	70	34
	Baie St-Paul2	109	114	138	113	62	17	99	123	134	113	64	21
	Saint-Albert	146	125	156	131	73	43	120	135	143	121	79	32
	Saint-Jean-Port-Joli	107	110	136	102	73	47	109	126	134	110	71	33
	Saint-Nicolas	121	133	158	126	63	23	113	132	139	114	71	30
	Saint-Paul-de-Montminy	136	137	153	126	78	40	116	134	142	117	76	32
	Sainte-Eulalie	146	125	156	131	73	43	120	135	143	121	79	32
	Weedon	140	141	154	124	61	43	114	131	138	116	74	33
2022	Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	111	111	142	104	74	47	113	128	138	114	75	41
	Ange-Gardien	143	137	155	133	74	51	126	143	152	128	86	39
	Baie St-Paul1	112	104	130	98	74	40	108	123	133	111	70	34
	Baie St-Paul2	109	114	138	113	62	17	99	123	134	113	64	21
	Saint-Albert	146	125	156	131	73	43	120	135	143	121	79	32
	Saint-Jean-Port-Joli	107	110	136	102	73	47	109	126	134	110	71	33
	Saint-Nicolas	121	133	158	126	63	23	113	132	139	114	71	30
	Saint-Paul-de-Montminy	136	137	153	126	78	40	116	134	142	117	76	32
	Sainte-Eulalie	146	125	156	131	73	43	120	135	143	121	79	32
	Weedon	140	141	154	124	61	43	114	131	138	116	74	33

Tout comme les précipitations, l'évapotranspiration potentielle a été cumulée par périodes entre les coupes pour faciliter la compréhension. Ces données sont présentées aux Figure 6, Figure 7 et Figure 8, respectivement pour les saisons 2020, 2021 et 2022. Les conditions au début de la saison de 2020 ont engendré un cumul très rapide de l'ET_p. Cette tendance s'est légèrement essouffée vers la mi-juin. Néanmoins, le cumulatif pour cette période reste, en comparaison, dans la fourchette haute des valeurs compilées par la station de Saint-Laurent. La 2^e moitié de la saison a été plus près des valeurs minimales, avec un cumulatif de 199,1 mm.

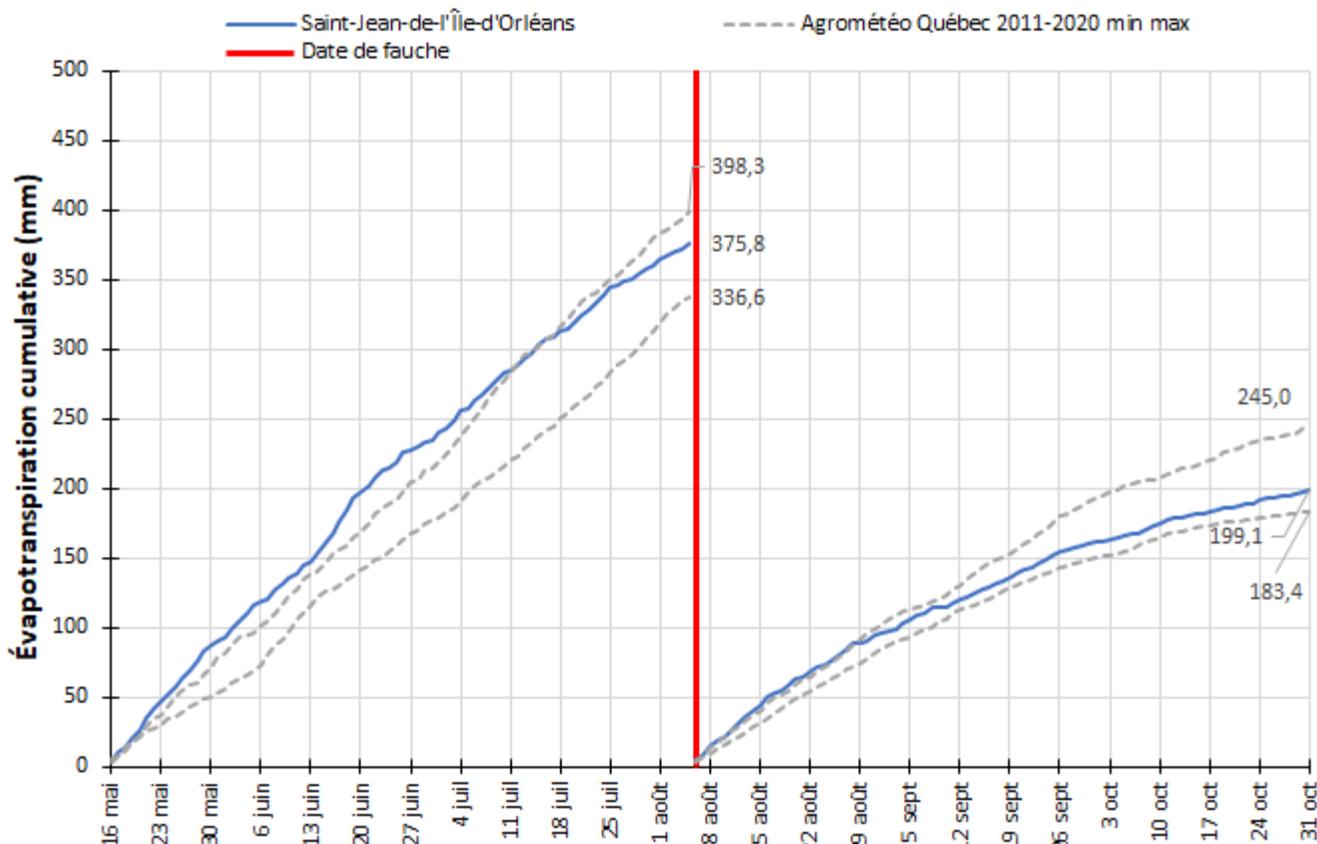


Figure 6. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Laurent entre 2011 et 2020 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2020.

La saison 2021, avec ses trois coupes, a été subdivisée en quatre périodes. La 1^{re} période a été marquée par des valeurs cumulatives d'ET_p de 131,2 mm, soit à mi-chemin entre les valeurs minimale et maximale. Une analyse plus fine de cette période montre que le mois de mai a été plus près du cumulatif maximal. Le cumulatif du mois de juin s'est fait à un rythme plus modéré. La 2^e période est très similaire à la première avec un cumulatif très fort durant la première moitié, suivi d'un ralentissement vers la fin juin. La résultante est un cumulatif de 156,1 mm tout près du cumulatif minimal. Au courant de la 3^e période, le cumulatif enregistré est quasi calqué sur la fourchette inférieure et culmine à 125,2 mm. Finalement, bien que la dernière période semble s'être démarquée jusqu'au début de septembre, elle culmine à 170 mm, soit une valeur dans la moyenne.

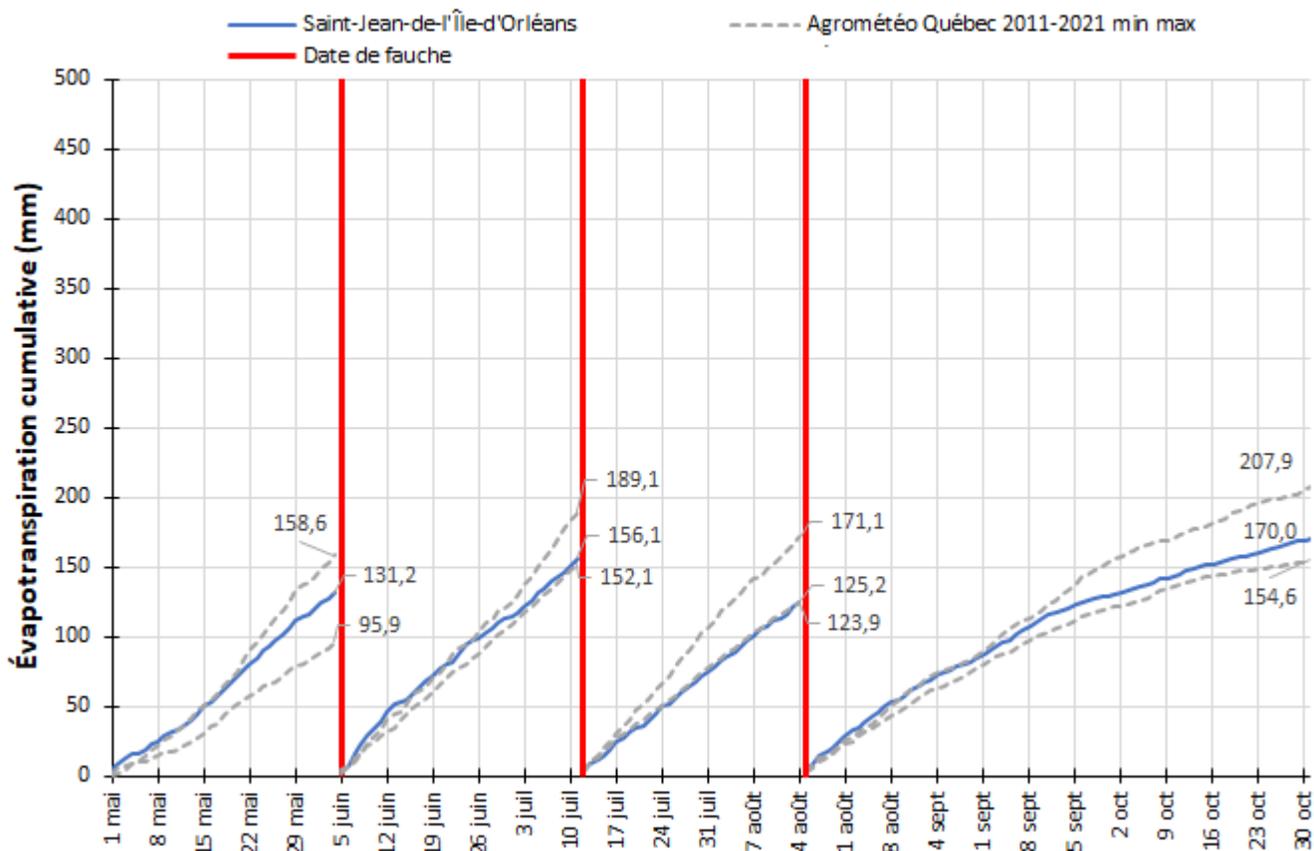


Figure 7. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Laurent entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2021.

La saison 2022 a été découpée en trois périodes. Comme observé précédemment, le début du mois de mai rejoint la fourchette supérieure, mais ce rythme ne s'est pas poursuivi au-delà de la 3^e semaine. Cette période a terminé tout près de la valeur minimale à 139,8 mm. La 2^e période a été sans histoire avec une valeur cumulative de 236,2 mm. La dernière période s'est maintenue près de la valeur minimale avec 190,9 mm.

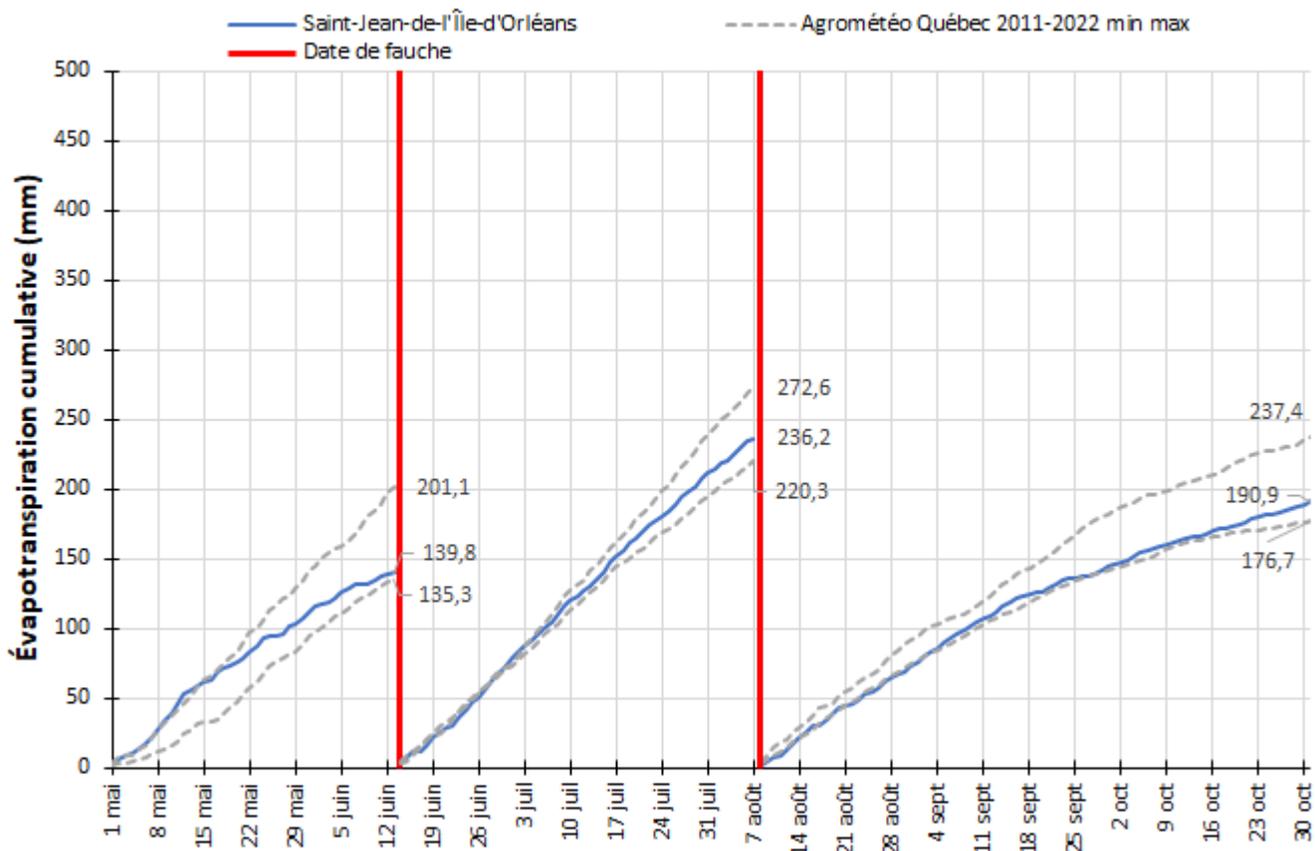


Figure 8. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Laurent entre 2011 et 2022 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, saison 2022.

L'ET_p cumulative pour chaque site satellite a également été segmentée par périodes entre les coupes. Ces données sont présentées à l'Annexe 1. Les données d'intérêt de ces sections seront ultérieurement discutées dans ce rapport.

6.4 Statut hydrique des traitements

Le suivi du statut hydrique du sol est présenté de Figure 9 à la Figure 15 selon la saison et le traitement. En 2020, pour le traitement TT, l'irrigation du 23 juillet a permis une bonne réhumectation des 40^{èmes} cm de sol (Figure 9). Au même moment, le prélèvement en eau dans l'horizon 40-60 cm ne semblait pas très actif, comparativement aux horizons de surface.

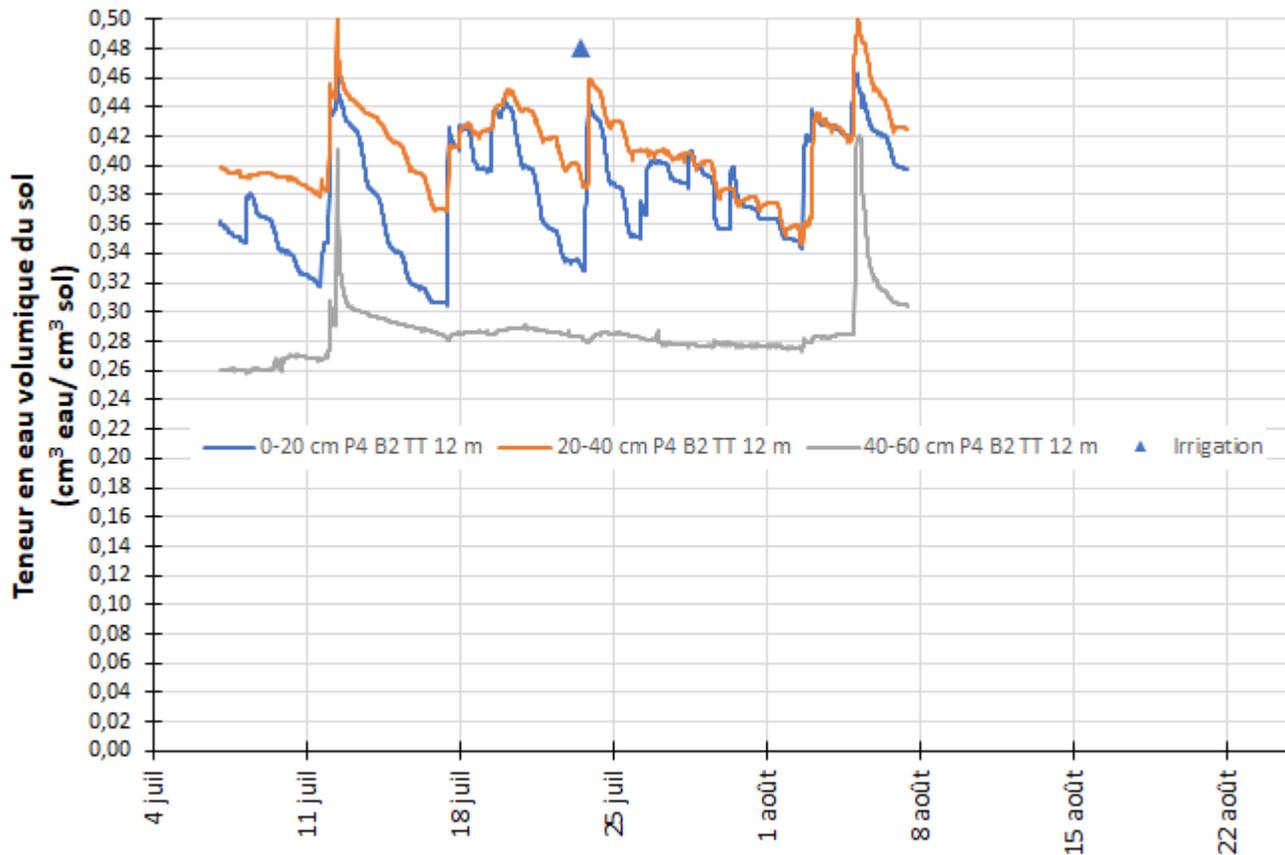


Figure 9. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm³ eau / cm³ sol) selon la profondeur, parcelle 4, bloc 2, traitement TT, saison 2020.

Toujours en 2020, mais pour le traitement NI, un assèchement du sol dans l'horizon 0-40 cm est bien visible à la fin juillet (Figure 10). Cela indique une colonisation plus importante du système racinaire à cette profondeur. Toutefois, la profondeur racinaire maximale ne dépasse guère 40 cm puisque la teneur en eau volumique en profondeur (40-60 cm) indique un assèchement lent et uniforme, en réponse au prélèvement de l'horizon 20-40 cm. À partir du mois d'août, le développement racinaire semble avoir davantage colonisé le profil 40-60 cm puisque la sonde semble davantage réagir aux prélèvements quotidiens.

De manière générale, l'évolution de la teneur en eau volumique du sol des parcelles NI démontre une dynamique similaire aux parcelles TT (Figure 9), à l'exception de la courte période qui a suivi l'irrigation.

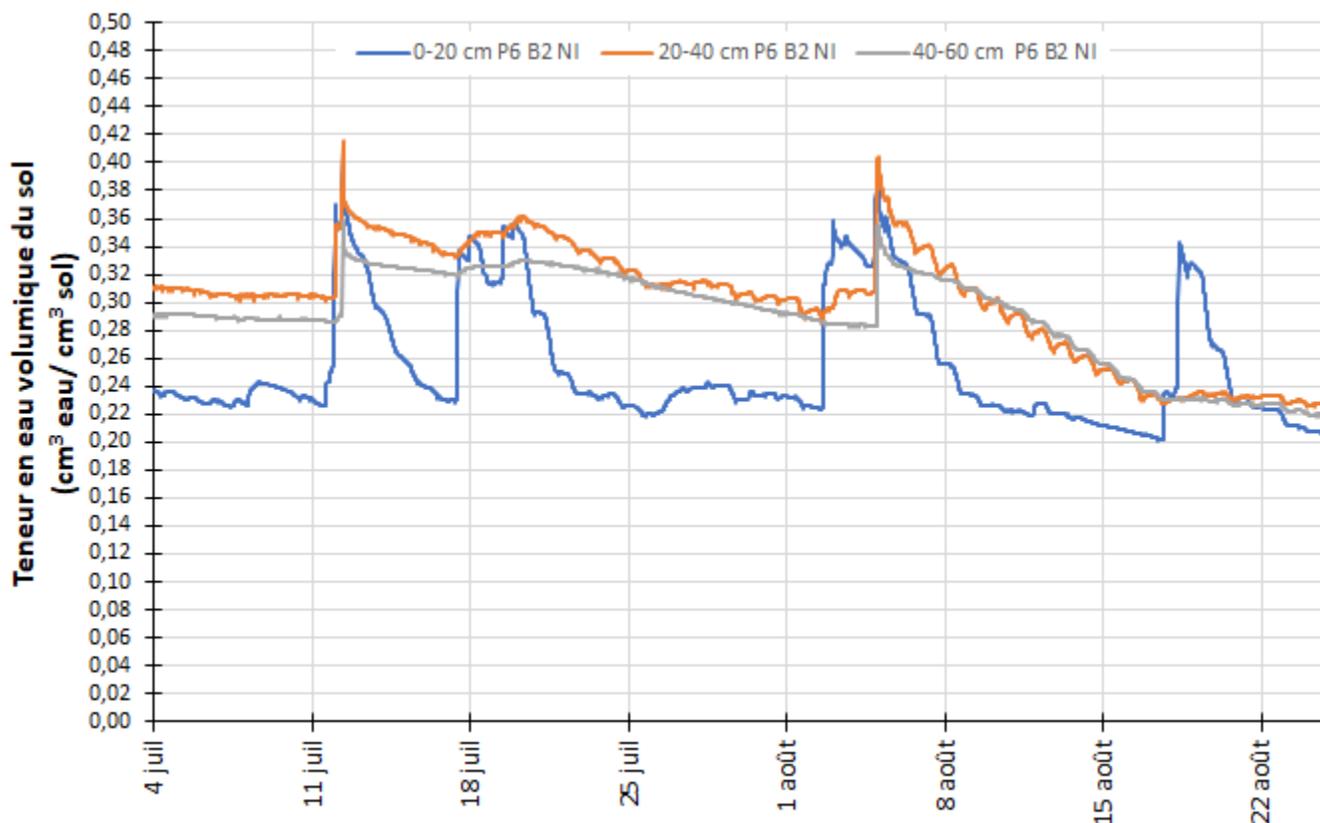


Figure 10. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur, parcelle 6, bloc 2, traitement NI, saison 2020.

En mai et au début de juin 2021, l'évolution de la teneur en eau volumique du sol du traitement TT (Figure 11) présente une dynamique similaire aux traitements AC (Figure 12) et NI (Figure 13). Les premières irrigations ont eu lieu après la 1^{re} coupe, ce qui explique qu'une période de stress hydrique peut être observée quelques jours avant. Par la suite, les irrigations effectuées ont maintenu l'humidité dans une plage optimale à l'exception d'une courte période juste après la 3^e coupe.

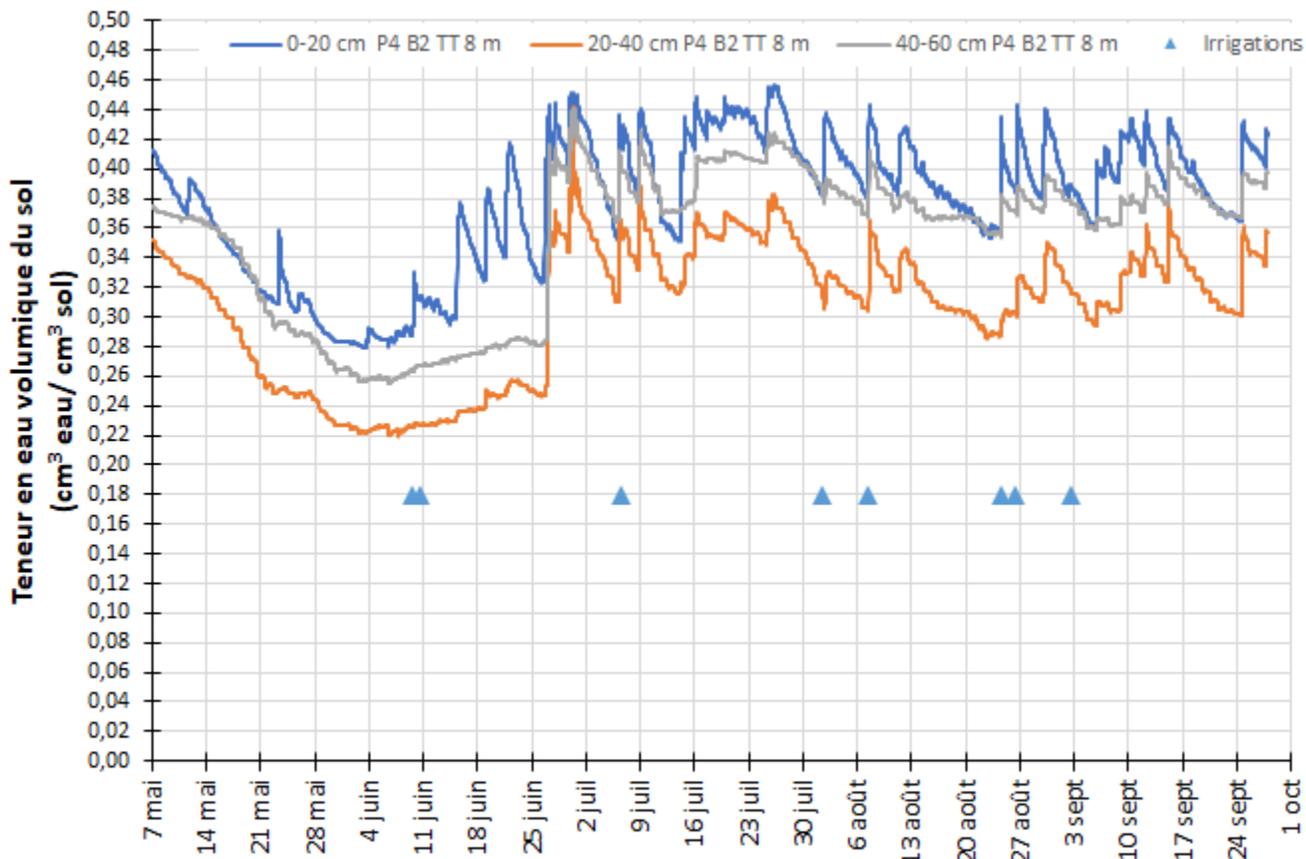


Figure 11. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur, parcelle 4, bloc 2, traitement TT, saison 2021.

Pour le traitement AC, les 3 coupes ont permis d'intervenir à 3 reprises avec l'irrigation soit le 8 juin et les 1^{er} et 24 août (Figure 12). En juin, l'irrigation a permis de modifier considérablement le statut hydrique du sol, lorsque comparé avec le traitement NI (Figure 13). L'horizon 40-60 cm a bénéficié de l'irrigation et ne s'est pas asséché durant le mois de juin. L'irrigation du 8 juin, en combinaison avec des précipitations de moyennes intensités jusqu'à la fin de mois de juin, ont permis un prélèvement en eau très actif dans l'horizon 0-20 cm. Du prélèvement dans l'horizon 20-40 cm y est également observé, mais semble de moindre importance. Par la suite, le prélèvement au courant du mois de juillet y est très actif sur l'horizon 0-40 cm et en aucune circonstance, ne semble avoir été contraint. Le début du mois d'août a été marqué par la deuxième irrigation. Par la suite, une période de 10 jours sans pluie a engendré un assèchement marqué de l'horizon 0-20 cm et d'un assèchement progressif de l'horizon 20-40 cm ainsi que celui de 40-60 cm. Les précipitations du 12 août ont seulement permis de combler une partie de la réserve en eau du sol de l'horizon 0-20 cm de sorte que l'assèchement à 20-40 cm s'est poursuivi jusqu'à la 3^e coupe et même au-delà.

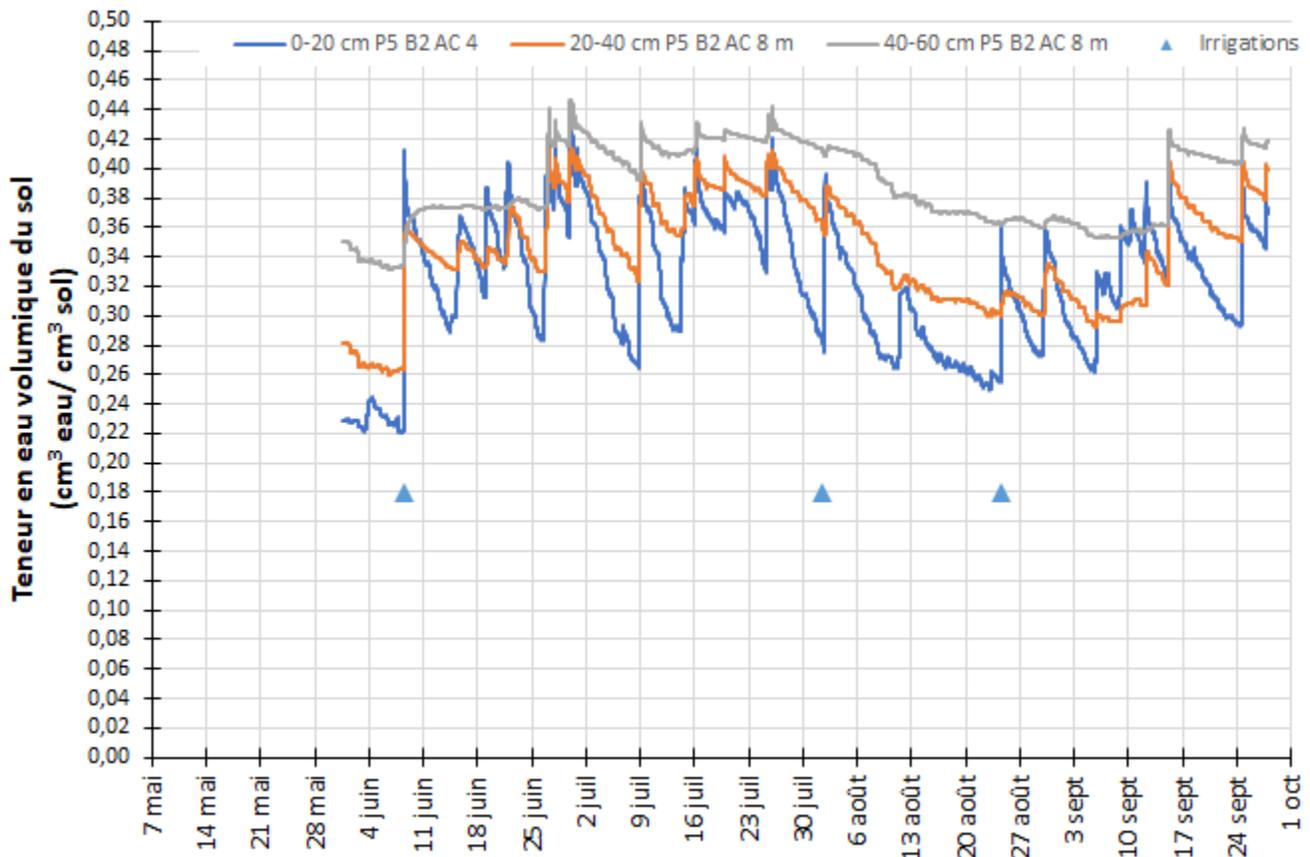


Figure 12. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur, parcelle 5, bloc 2, traitement AC, saison 2021.

Pour le traitement NI, au début du mois de mai et durant le mois de juin, la diminution de la teneur en eau volumique du sol s'observe globalement sur l'horizon 0-60 cm (Figure 13). L'absence marquée de précipitations a influencé la teneur en eau du sol sur l'ensemble du profil. Rapidement, l'horizon 40-60 cm semble s'être asséché puisqu'une stabilité (horizontalité de la courbe) est observée durant une bonne partie du mois de juin. Les précipitations importantes de la fin du mois de juin ont permis de réapprovisionner en eau le sol jusqu'à une profondeur de 60 cm. Le mois de juillet a été marqué par des précipitations régulières et assez importantes pour maintenir un statut hydrique du sol en condition optimal. En août, la situation a été similaire au mois de juin avec une période prolongée sans précipitations importantes à partir de la mi-août. À l'instar du mois de juin, le prélèvement en eau de la culture a été affecté par cette période sèche.

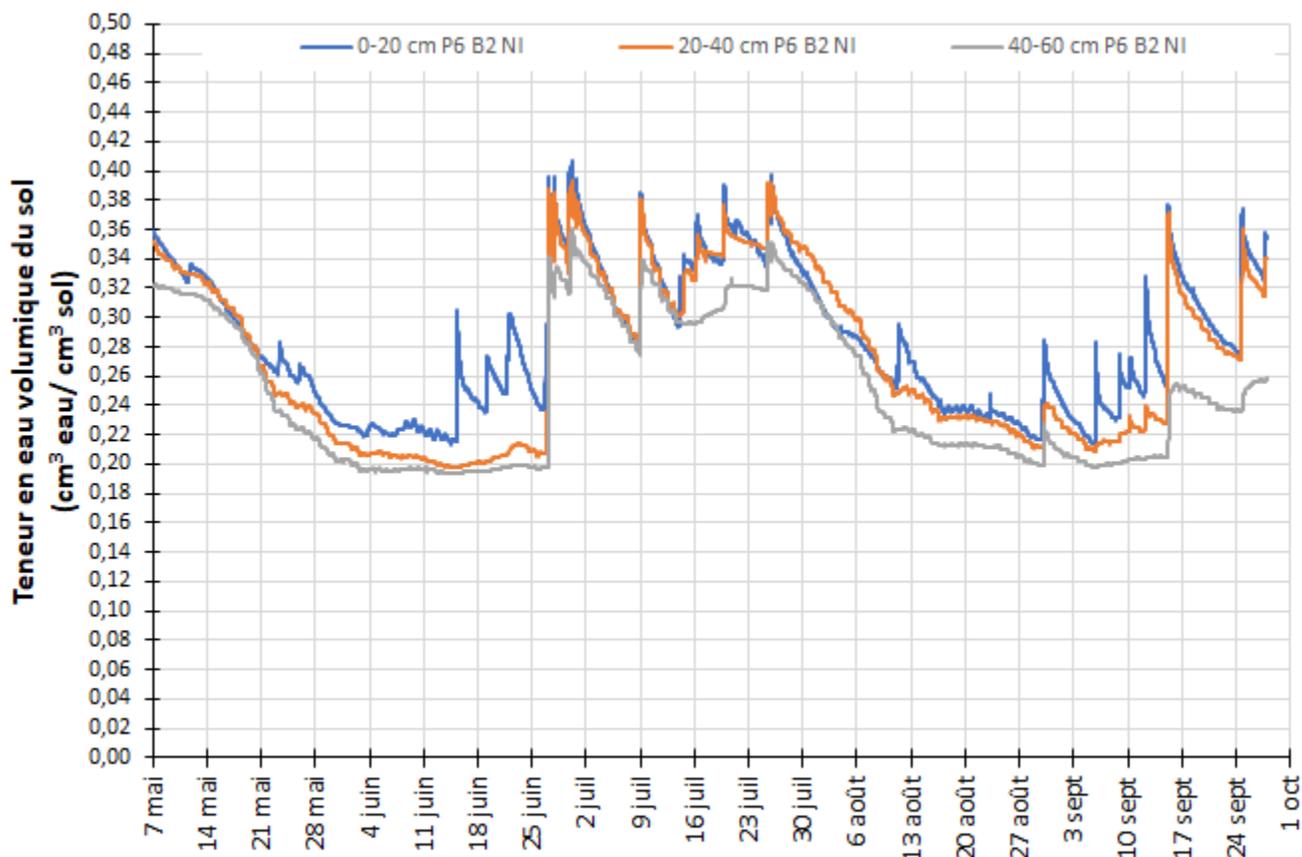


Figure 13. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur, parcelle 6, bloc 2, traitement NI, saison 2021.

Les chroniques de la teneur en eau volumique pour chaque site satellite ont également été réalisées. Ces données sont présentées à l'Annexe 1. Les données d'intérêt de ces sections seront ultérieurement discutées dans ce rapport.

En 2022, une seule irrigation a été effectuée, et ce, très tôt en saison, soit le 10 mai (Figure 14). Il est possible de constater l'effet sur le prélèvement de l'eau en surface pour le traitement TT après cette irrigation, lorsque comparé avec le traitement NI (Figure 15). Cette différence s'estompe à la fin mai où d'importantes précipitations réhumectent le profil 0-40 cm. Il est impossible de discerner des différences entre les traitements par la suite.

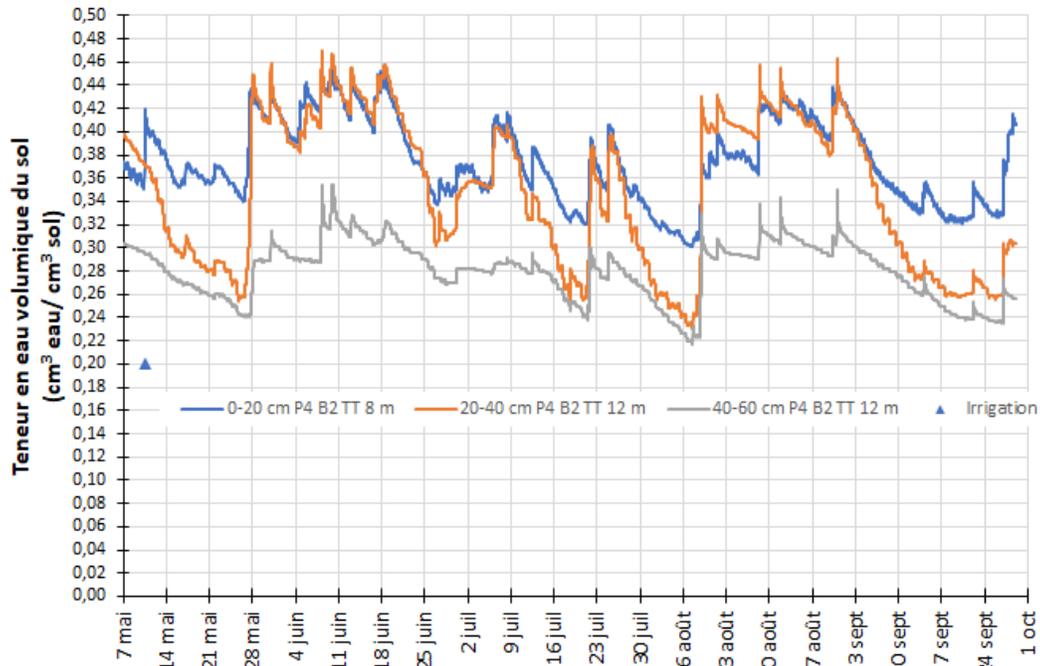


Figure 14. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur, parcelle 4, bloc 2, traitement TT, saison 2022.

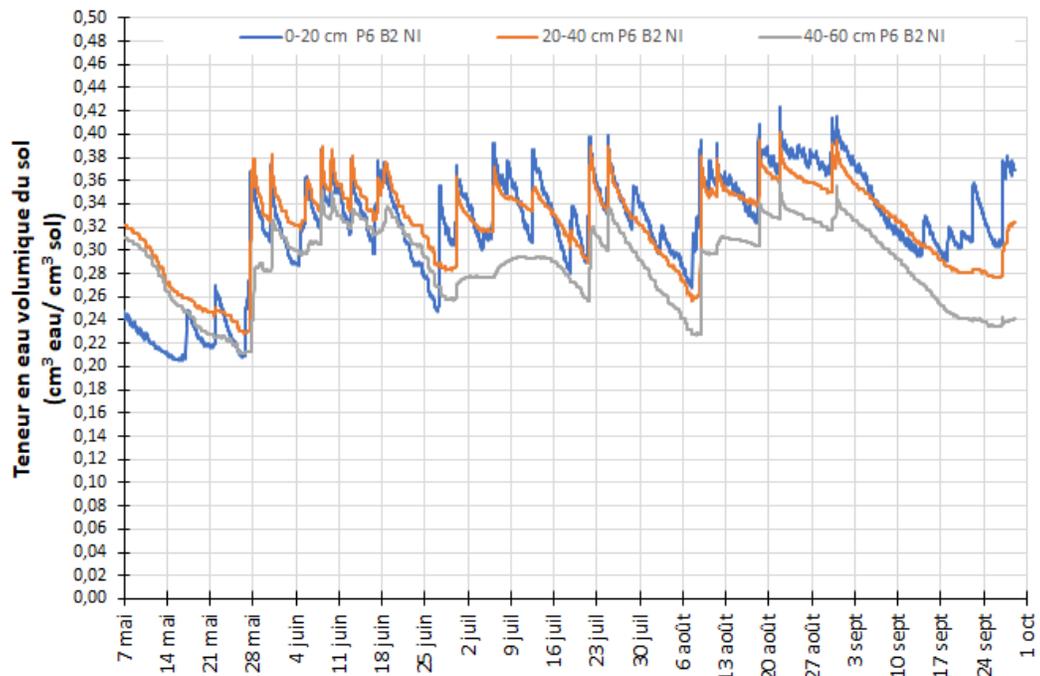


Figure 15. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur, parcelle 6, bloc 2, traitement NI, saison 2022.

6.5 Exportation en eau du système cultural et coefficient cultural « TDR » (K_c -TDR)

Les coefficients culturaux sont présentés par traitement et selon la saison de la Figure 16 à la

Figure 22. Ce coefficient varie entre autres en fonction du stade de développement de la culture. Cet aspect est bien visible en année d'implantation (2020) où la valeur du k_c -TDR a crue jusqu'au mois d'août pour atteindre 1,2, peu de temps avant la fauche de la culture. Par la suite, les valeurs ont oscillé entre 0,5 et 1,0.

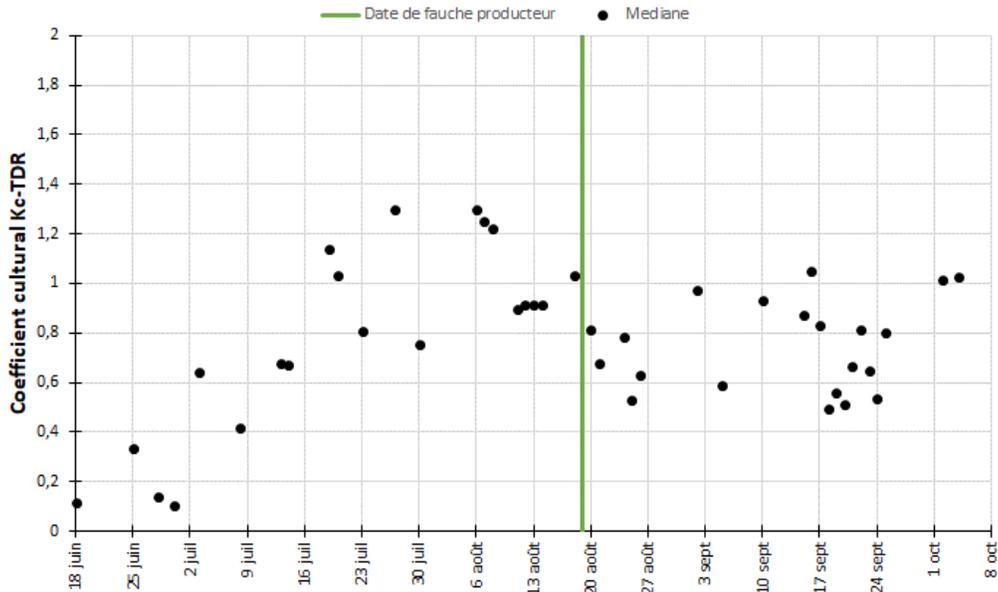


Figure 16. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitement TT, saison 2020.

Hormis un départ plus lent des traitements AC et NI au début juillet (il s'agit en fait du même traitement, car il n'y a pas eu d'irrigation pour ces derniers en 2020), les valeurs ont atteint un sommet équivalent au traitement irrigué (TT), voire légèrement supérieur, de l'ordre de 1,2 à 1,4 (Figure 17).

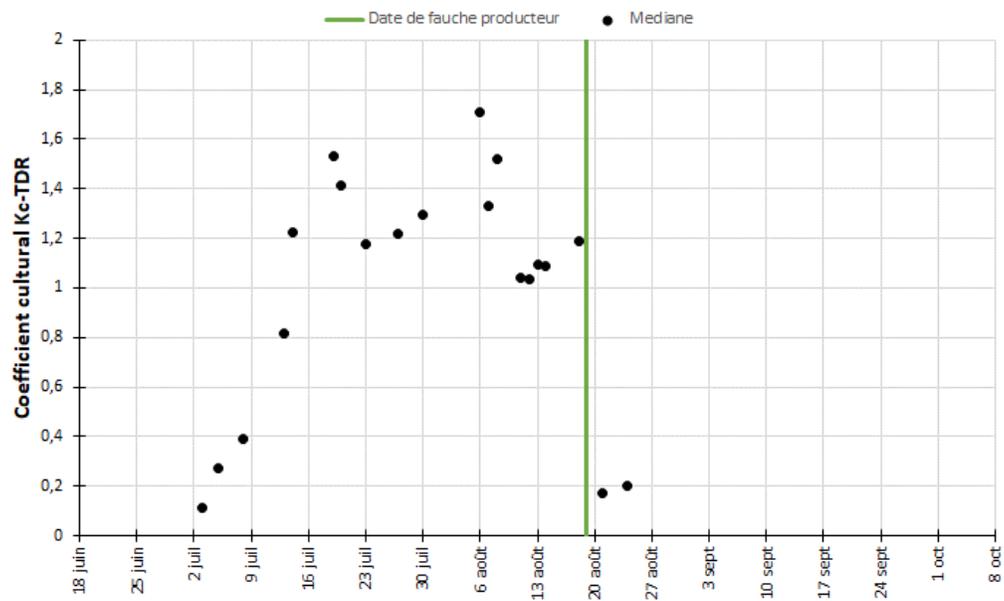


Figure 17. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitements AC et NI combinés, saison 2020.

La tendance des coefficients culturaux de la saison 2021 a été très similaire d'un traitement à l'autre à plusieurs égards (

Figure 18,

Figure 19 et

Figure 20). Comme mentionné dans la chronique de la teneur en eau volumique, des stress hydriques ont été observés en début de saison, indépendamment des traitements. Cette dynamique est visuellement très claire dans cette première période de la saison. Par la suite, les coupes sont très franchement distinguées par des reprises où le k_c débute à des valeurs de 0,2 à 0,4. À mesure que la croissance de la culture s'est poursuivie, le k_c a évolué de même. Les k_c maximaux pour chaque traitement ont atteint des valeurs similaires entre elles, soient entre 1,4 et 1,6.

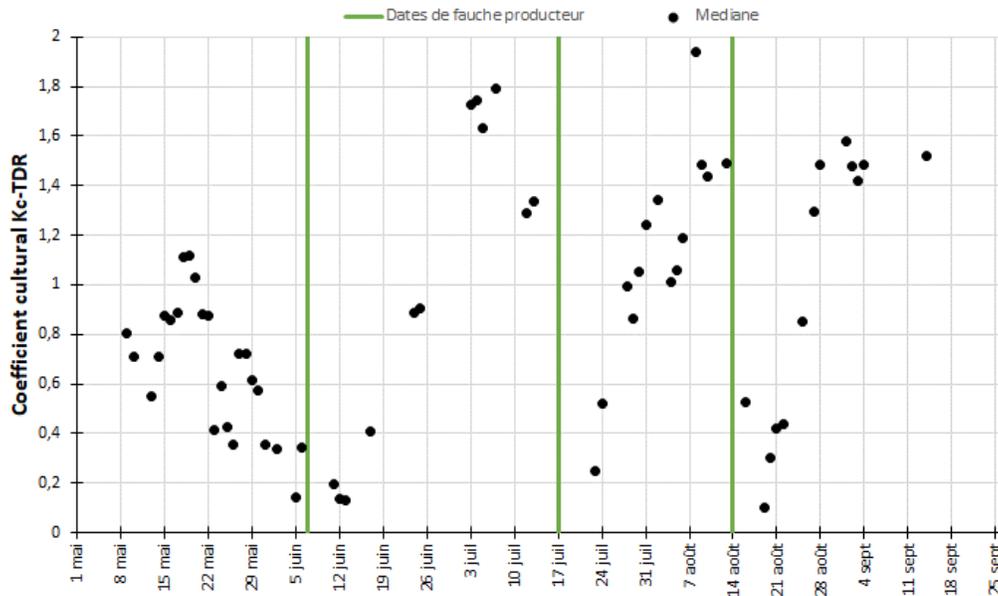


Figure 18. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, traitement TT, saison 2021.

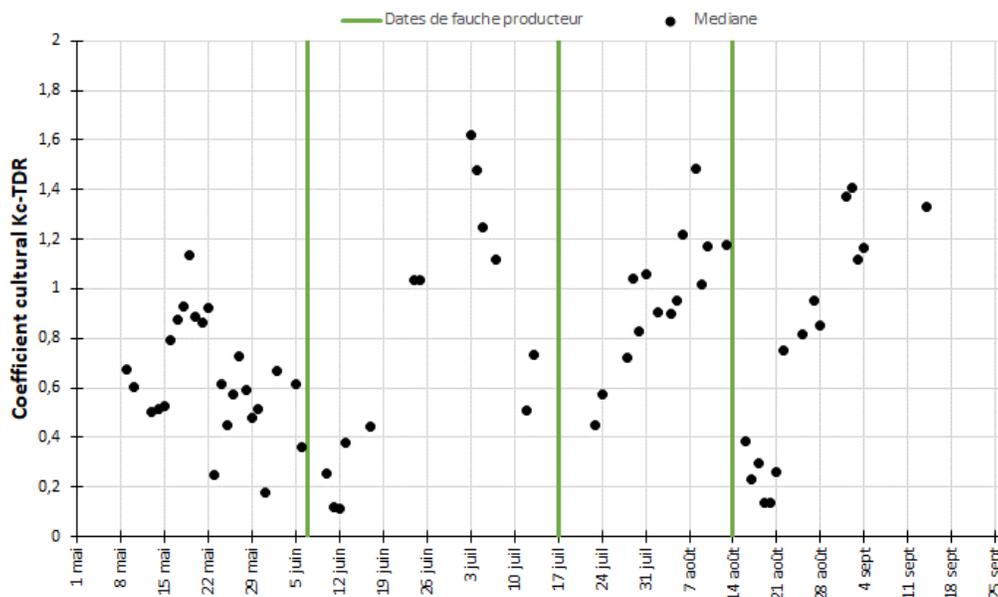


Figure 19. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, traitement AC, saison 2021.

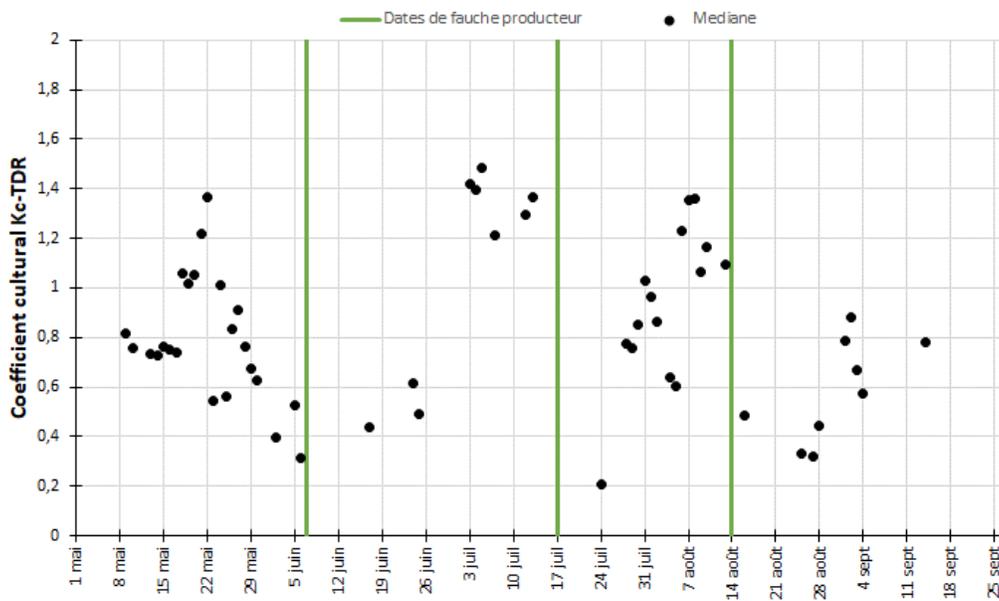


Figure 20. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitement NI, saison 2021.

En 2022, les tendances observées sont très similaires à celles de 2021 (Figure 21 et Figure 22). Des k_c maximaux de l'ordre de 1,2 ont aussi été observés. Toutefois, pour le seul traitement qui a été irrigué en 2022 (TT), quelques valeurs supérieures à 1,2 ont été mesurées.

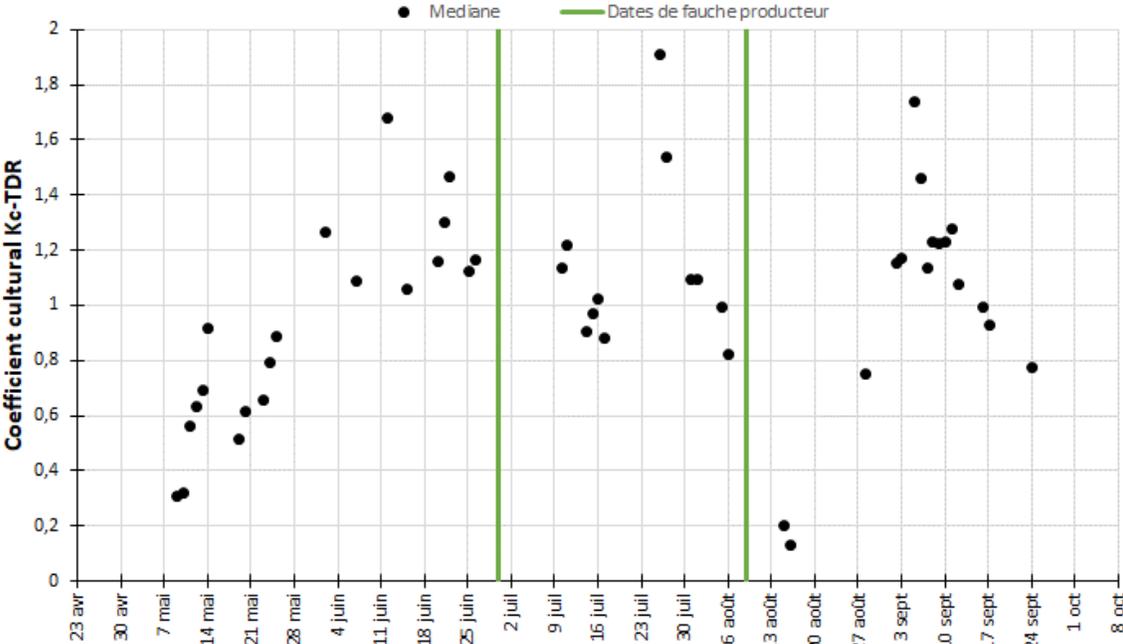


Figure 21. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitement TT, saison 2022.

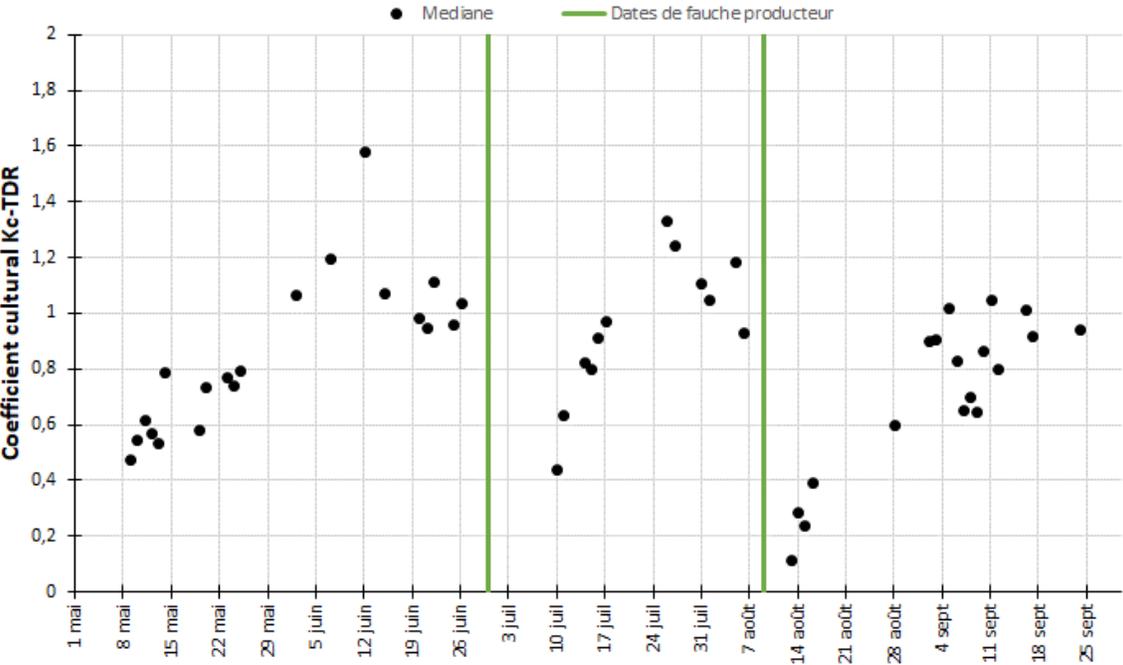


Figure 22. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, traitements AC et NI combinés, saison 2022.

Les chroniques du coefficient cultural pour chaque site satellite ont également été réalisées. Ces données sont présentées à l'Annexe 1. Les données d'intérêt de ces sections seront ultérieurement discutées dans ce rapport.

6.6 Rendement de la biomasse aérienne

6.6.1 Évaluation des modèles statistiques

Pour chaque année, différents modèles ont été testés et comparés à l'aide du critère d'information et sont présentés au Tableau 7. En 2020, deux modèles ont été comparés soit le modèle statistique (mod2020) et le modèle nul, c'est-à-dire sans effet d'irrigation (mod2020.nul). Les critères d'information respectivement obtenus pour le mod2020 et le mod2020.nul sont respectivement de 32,93 et de 45,42. Le AIC du modèle nul est nettement plus élevé que le modèle statistique, ce qui supporte un effet de l'irrigation ($\Delta AIC \approx 12,5$). En 2021, le modèle statistique a été comparé avec plusieurs modèles : même effet sur les deux coupes (mod2021.meme), effet sur la moyenne seulement (mod2021.moy), effet sur la variance seulement (mod2021.var) et un modèle nul sans effet de l'irrigation (mod2021.nul). L'effet de l'irrigation sur la moyenne et la variance du rendement (sans distinction de la coupe) est supporté puisque le modèle correspondant a eu un AIC bas (AICmeme \approx 37), comparé aux modèles plus simples, incluant le modèle nul ($\Delta AIC > 9$). Le modèle avec effet spécifique à la coupe (mod2021) n'est pas supporté puisque son AIC est plus élevé et il est plus complexe. Dans le cas de 2022, il n'y a aucun effet détecté puisque le modèle nul a un AIC similaire ou plus petit que tous les autres modèles.

Tableau 7. Comparaison des modèles testés, degré de liberté ainsi que le critère d'information AIC, selon l'année.

Année	Test modèle	DL	AIC
2020	mod2020	4,90	32,93
	Mod2020.nul	3,84	45,42
2021	mod2021	10,57	39,81
	mod2021.meme	9,59	37,18
	mod2021.moy	6,98	46,51
	mod2021.var	6,92	54,31
	mod2021.nul	4,98	53,40
2022	mod2022	5,71	56,85
	mod2022.moy	4,54	54,41
	mod2022.var	4,68	54,90
	mod2022.nul	2,00	55,45

6.6.2 Rendement estimé selon le modèle sélectionné

Le rendement sec de la 1^{re} et unique coupe de la saison d'implantation (2020) qui a été estimé avec le modèle est présenté à la Figure 23, selon qu'il y ait eu ou non un apport en eau avec l'irrigation. Ce modèle a permis d'expliquer 69 % de la variance (dispersion des valeurs). Le rendement est respectivement de 3,36 et 2,79 t/ha avec et sans irrigation. Dans ce contexte, l'irrigation a engendré une augmentation significative du rendement de 0,57 t/ha ou de 20 %.

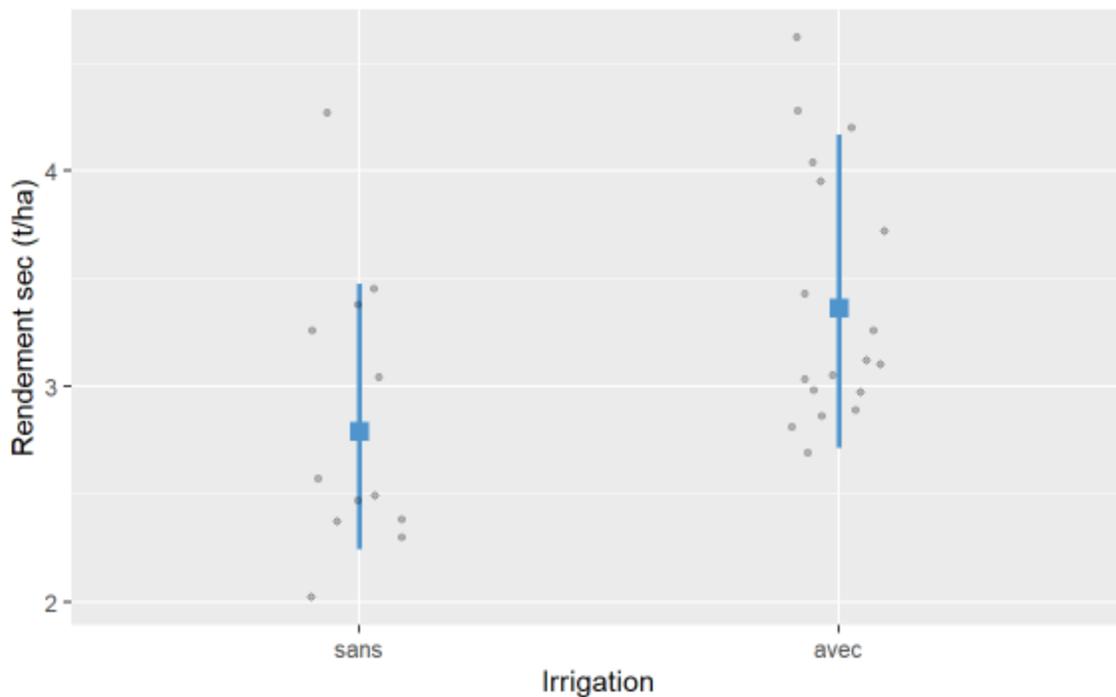


Figure 23. Rendement sec (t/ha) estimé selon le modèle sélectionné (mod2020) avec et sans irrigation pour la 1^{re} et unique coupe de 2020 (moyennes estimées avec intervalles de confiance à 95 %).

En 2021, les estimations de rendements (axe vertical) selon la quantité d'eau apportée avec l'irrigation (axe horizontal) sont présentées à la Figure 24 pour la 2^e et 3^e coupe, respectivement en vert et violet. Le modèle a permis d'expliquer 92,7 % de la variance. Pour chacune des coupes, la zone de couleur foncée représente l'intervalle de confiance pour la moyenne, tandis que l'intervalle de prédiction pour les nouvelles observations est présenté avec la bande de couleur pâle. À titre d'exemple, les rendements estimés par le modèle sont présentés au Tableau 8. Le rendement sec de la 2^e coupe a été supérieur au rendement sec de la 3^e coupe. Le rendement sec moyen de la 2^e coupe, en contexte irrigué (100 mm) a été supérieur de 9,4 % ou de 0,31 t/ha, comparativement à celui non irrigué (0 mm). À la 3^e coupe, l'augmentation a été de 5,2 % ou 0,12 t/ha pour une hauteur d'eau cumulée de 50 mm.

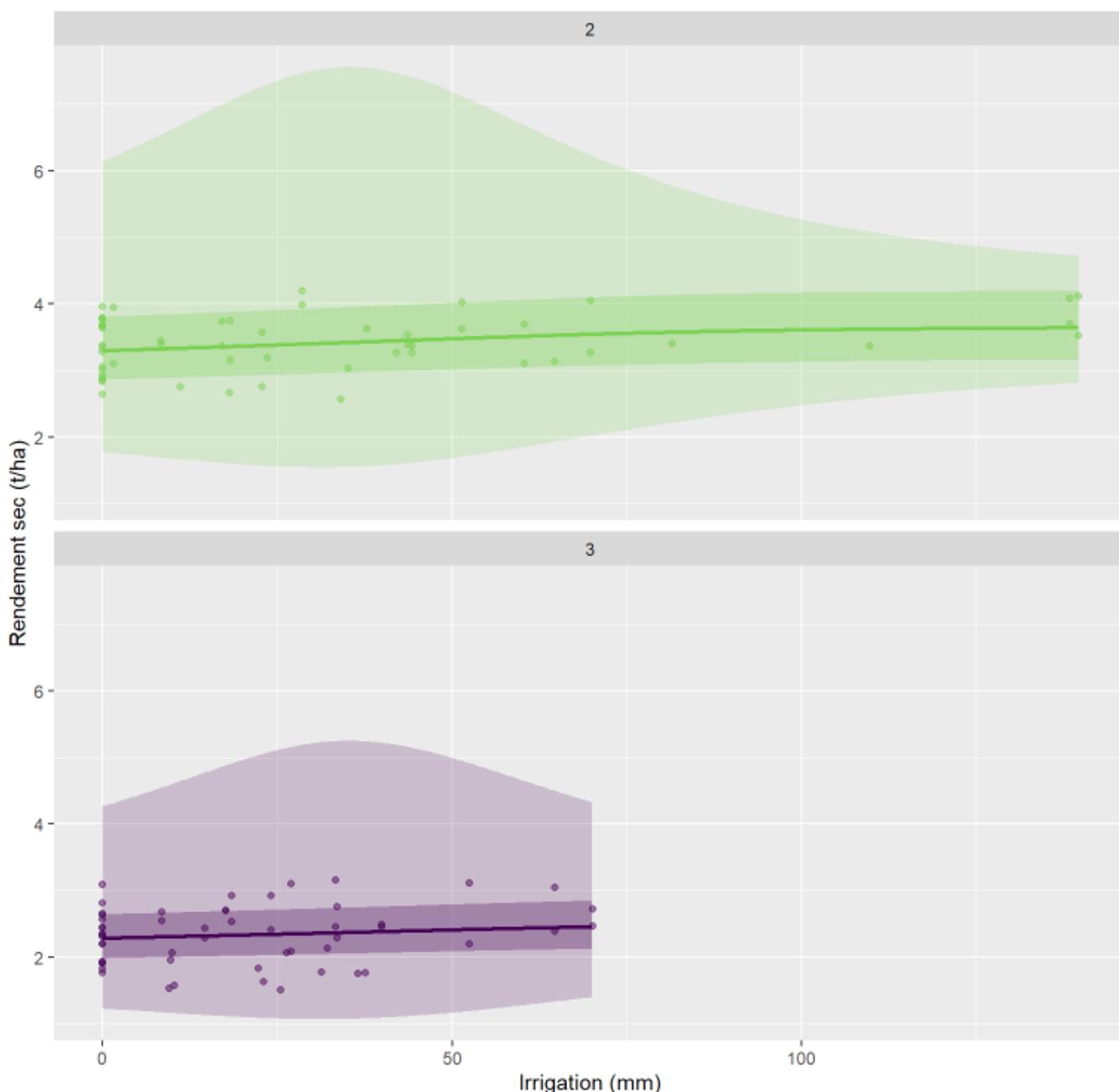


Figure 24. Rendement sec (t/ha) estimé selon le modèle sélectionné (mod2021.meme) selon l'irrigation (mm), par coupe, saison 2021.

Tableau 8. Rendement sec (t/ha), valeurs minimale et maximale selon un intervalle de confiance de 95 % et valeurs minimale et maximale prédites pour les coupes 2 et 3, saison 2021.

Coupe	Irrigation cumulative (mm)	Rendement sec				
		Moyenne	Valeur minimale à intervalle de confiance de 95 %	Valeur maximale à intervalle de confiance de 95 %	Valeur minimale projetée	Valeur maximale projetée
(t/ha)						
2	0	3,30	2,86	3,80	1,77	6,14
	25	3,38	2,93	3,90	1,56	7,35
	50	3,48	3,01	4,01	1,68	7,18
	100	3,61	3,13	4,16	2,47	5,27
3	0	2,29	1,98	2,64	1,23	4,27
	25	2,35	2,03	2,71	1,08	5,11
	50	2,41	2,09	2,79	1,17	4,99

En 2022, l'irrigation n'a pas eu d'effet clair sur le rendement en fourrages (Figure 25). De plus, l'irrigation n'a pas eu d'effet important sur la variabilité du rendement. À titre d'exemple, les rendements estimés du modèle sont présentés au Tableau 9. Peu importe la hauteur d'eau cumulée apportée avec l'irrigation, le rendement est statistiquement le même.

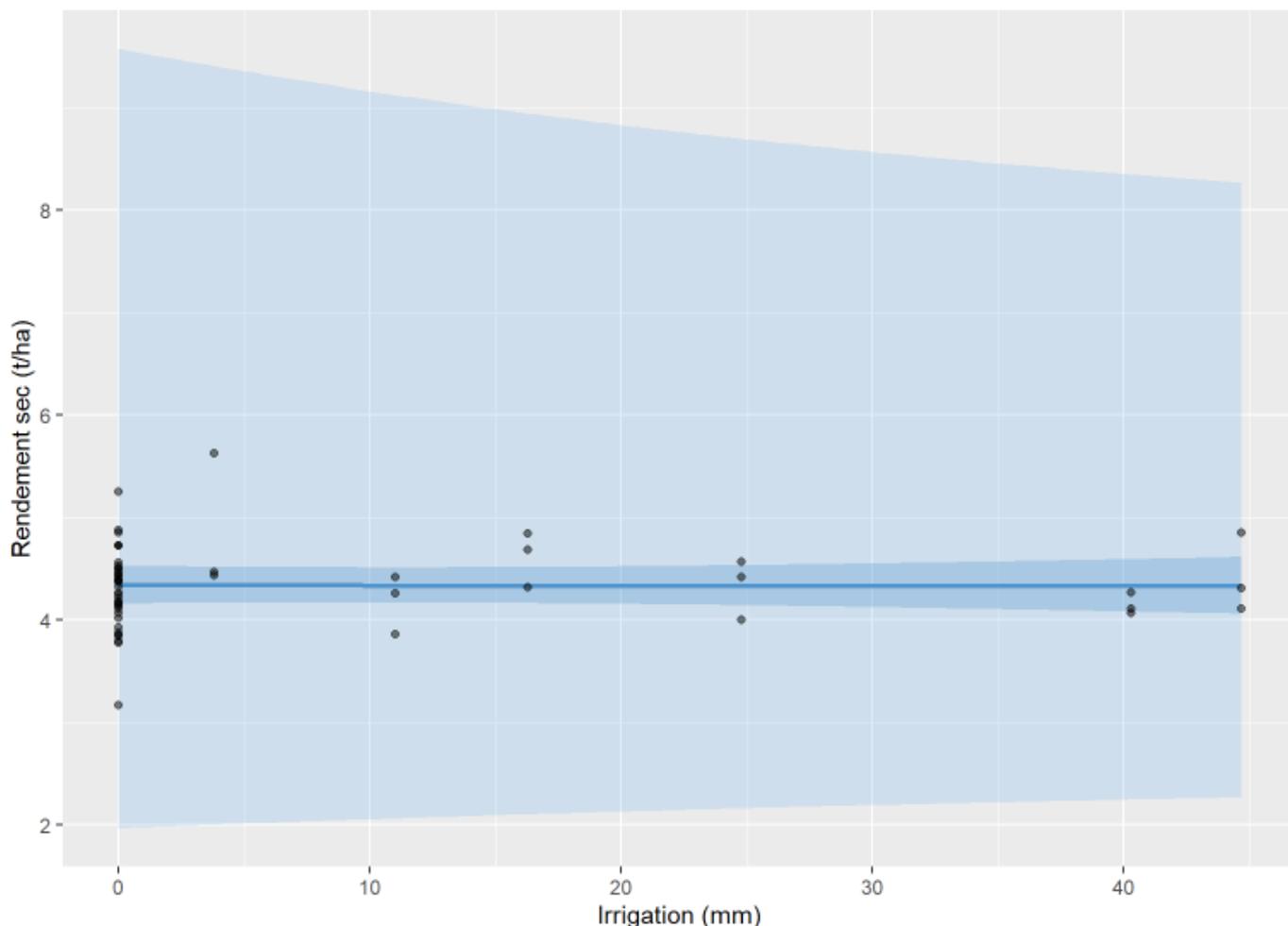


Figure 25. Rendement sec (t/ha) estimé selon le modèle sélectionné (mod2022) selon l'irrigation, coupe 1, saison 2022.

Tableau 9. Rendement sec (t/ha), valeurs minimale et maximale selon un intervalle de confiance de 95 % et valeurs minimale et maximale prédites pour la coupe 1, saison 2022.

Coupe	Hauteur totale eau Irrigation (mm)	Rendement sec				
		Moyenne	Valeur minimale à intervalle de confiance de 95 %	Valeur maximale à intervalle de confiance de 95 %	Valeur minimale projetée	Valeur maximale projetée
(t/ha)						
1	0	4,34	4,16	4,53	1,97	9,57
	20	4,33	4,16	4,52	2,13	8,83
	40	4,33	4,08	4,08	2,24	8,35

6.6.3 Rendements mesurés aux sites satellites

Le rendement qui a été mesuré aux sites satellites est présenté selon l'année, le site et la coupe au Tableau 10. Au maximum, deux coupes ont été effectuées annuellement sur un site. En 2021, les différents systèmes de production de fourrages ont eu des rendements entre 3,44 et 5,74 t/ha à la 1^{re} coupe, de 0,64 à 3,32 t/ha à la 2^e et entre 1,51 et 2,88 t/ha à la 3^e. En 2022, les rendements ont atteint entre 2,27 et 6,38 t/ha à la 1^{re} coupe et entre 2,01 et 3,83 t/ha à la 2^e. Au site Ange-Gardien, la 2^e coupe a atteint 3,83 t/ha en 2022 comparativement à 2,88 t/ha en 2021, une augmentation de 38,3 %. Au site Saint-Albert, une situation semblable a été observée. La 2^e coupe a atteint 3,42 t/ha en 2022 comparativement à 1,90 t/ha en 2021 (année d'implantation), soit une augmentation de 80 %. En 2021 au site Sainte-Eulalie, le rendement a été de 5,08 t/ha à la 1^{re} coupe et de 0,64 t/ha à la 2^e. Le rendement de la 1^{re} coupe inclut la biomasse de la plante abri. En 2022, les rendements ont été de 2,27 et 2,53 t/ha à la 1^{re} et 2^e coupe. De plus, les dates de la 2^e coupe entre les années sont considérablement éloignées. Le nombre de jours de croissance entre la 1^{re} et la 2^e coupe a donc été de 47 en 2021 et de 56 en 2022. Au site Weedon, le rendement de la 2^e coupe en 2021 a été supérieur à celui de 2022. Un rendement de 3,32 t/ha a été mesuré en 2021 et de 2,34 t/ha en 2022, soit une diminution de 29,5 %. Dans une moindre mesure, le rendement du site Saint-Nicolas a augmenté de 11,1% entre 2021 et 2022.

Tableau 10. Rendements en base sèche (t/ha) mesurés aux sites satellites, selon la coupe et l'année.

Année	Site	Coupe ¹	Date de la coupe	Rendement b.s. (t/ha)
2021	Ange-Gardien	2 ^e	2021-07-06	2,77
		3 ^e	2021-08-12	2,88
	Baie-Saint-Paul 1	1 ^{re}	2021-09-27	4,29
	Baie-Saint-Paul 2	1 ^{re}	2021-07-20	3,44
	Saint-Albert	2 ^e	2021-07-07	1,90
		3 ^e	2021-08-23	1,61
	Saint-Jean-Port-Joli	1 ^{re}	2021-07-26	3,77
	Saint-Nicolas	1 ^{re}	2021-07-26	5,74
	Saint-Paul-de-Montminy	1 ^{re}	2021-06-18	4,20
	Sainte-Eulalie	1 ^{re}	2021-07-16	5,08
		2 ^e	2021-09-01	0,64
	Weedon	2 ^e	2021-07-29	3,32
		3 ^e	2021-09-01	1,51
	2022	Ange-Gardien	1 ^{re}	2022-06-08
2 ^e			2022-07-11	3,83
Baie-Saint-Paul 1		1 ^{re}	2022-06-27	4,27
		2 ^e	2022-08-15	3,23
Baie-Saint-Paul 2		1 ^{re}	2022-06-27	3,49
		2 ^e	2022-08-15	3,29
Saint-Albert		1 ^{re}	2022-06-08	3,14
		2 ^e	2022-07-28	3,42
Saint-Jean-Port-Joli		1 ^{re}	2022-06-16	3,11
		2 ^e	n.d.	3,36
Saint-Nicolas		1 ^{re}	2022-07-09	6,38
Saint-Paul-de-Montminy		1 ^{re}	2022-06-16	4,51
		2 ^e	2022-08-16	2,01
Sainte-Eulalie		1 ^{re}	2022-06-08	2,27
		2 ^e	2022-08-03	2,53
Weedon	1 ^{re}	2022-06-08	4,39	
	2 ^e	2022-08-03	2,34	

¹Il est possible qu'il y ait divergence entre le nombre de coupes effectuées et la réglementation du producteur.

6.7 Hauteur des plants

La hauteur maximale moyenne des plants de luzerne et de graminées est présentée au Tableau 11. En 2020, les hauteurs maximales moyennes respectives ont atteint 63,8, 54,9 et 59,6 cm ainsi que 55,4, 55,9 et 54,9 cm, respectivement pour les traitements TT, AC et NI pour la luzerne et les graminées. Aucune différence significative n'a pu être observée entre les traitements en ce qui a trait à la hauteur maximale moyenne de la luzerne et des graminées. En 2021, les hauteurs maximales moyennes des graminées ont été de 76,7, 80,8 et 75,3 cm pour la luzerne, respectivement pour les traitements TT, AC et NI ainsi que 67,4, 67,4, et 63,4 cm respectivement pour les traitements TT AC et NI. Pour la hauteur maximale moyenne de la luzerne, le traitement AC a favorisé une hauteur significativement supérieure avec 80,8 cm comparativement à 76,7 cm pour le traitement TT ($p=0,0892$) et 75,3 cm pour le traitement NI ($p=0,0294$). Aucune différence significative n'a été observée entre la hauteur maximale moyenne de la luzerne entre le traitement NI et TT. Les hauteurs maximales moyennes des graminées ne sont pas significativement différentes d'un traitement à l'autre. Finalement, pour 2022, les hauteurs maximales moyennes ont atteint respectivement 89,7 88,8 et 88,1 cm, ainsi que 95,5, 88,3 et 92,1 cm respectivement pour les traitements TT AC et NI pour la luzerne et les graminées.

Tableau 11. Hauteur maximale moyenne de la luzerne (cm) selon l'année et le traitement d'irrigation.

Année	Traitement	Luzerne	Graminées
2020	TT	63,8	55,1
	AC	54,9	55,9
	NI	59,6	54,9
	p	n.s.	n.s.
2021	TT	76,7 b	67,4
	AC	80,8 a	67,4
	NI	75,3 b	63,4
	p	†	n.s.
2022	TT	89,7	95,5
	AC	88,8	88,3
	NI	88,1	92,1
	p	n.d.	n.d.

n.s : non significatif
 † effet significatif à $p \leq 0,1$
 n.d. : non disponible

6.8 Composition du mélange fourrager

Aucun des trois traitements (NI, AC et TT) n'a eu d'effet significatif sur la proportion qu'occupent les graminées, la luzerne et les mauvaises herbes dans la composition des parties aériennes, tant en 2020 qu'en 2021 (Tableau 12). Au semis, le mélange était composé de 90 % de luzerne et de 10 % de graminées. Cette proportion a évolué au fil des saisons. En 2020, la proportion de la luzerne oscillait entre 0,834 et 0,860 tandis que pour les graminées, elle s'élevait entre 0,034 et 0,075 selon les traitements. En 2022, ces proportions sont passées entre 0,594 et 0,679 pour la luzerne et entre 0,174 et 0,278 pour les graminées en 2022.

Tableau 12. Proportion occupée par les graminées, la luzerne et les mauvaises herbes dans la composition des parties aériennes selon le traitement d'irrigation.

Année	Traitement	Composition du mélange		
		Graminées	Luzerne	Mauvaises herbes
2020	NI	0,038	0,860	0,102
	AC	0,034	0,834	0,132
	TT	0,075	0,845	0,080
	<i>p</i>	n.s.	n.s.	n.s.
2021	NI	0,085	0,876	0,037
	AC	0,066	0,907	0,023
	TT	0,094	0,877	0,027
	<i>p</i>	n.s.	n.s.	n.s.
2022	NI	0,278	0,594	0,127
	AC	0,174	0,688	0,138
	TT	0,214	0,679	0,108
	<i>p</i>	n.d.	n.d.	n.d.

n.s. : non significatif

n.d. : non disponible

6.9 Qualité

L'irrigation a eu un effet significatif sur deux des huit paramètres d'évaluation de la qualité des fourrages en 2020 (Tableau 13). L'effet du traitement a été significatif pour le calcium total ($p = 0,0491$) et le magnésium total ($p = 0,0431$). En effet, le calcium a significativement été influencé par l'irrigation (Tableau 14). Ces résultats présentent la moyenne combinée des deux campagnes d'échantillonnage (2^e et 3^e coupe). Le contenu a respectivement été de 1,27 et 1,49 % pour le traitement NI et AC, TT. Pour le magnésium total, les contenus mesurés dans les parcelles du traitement AC sont statistiquement plus élevés avec 0,22 % en comparaison avec 0,19 et 0,17 % respectivement pour le traitement NI et TT. En 2021, l'irrigation n'a pas eu d'effet significatif sur les huit paramètres d'évaluation de la qualité des fourrages. Toutefois, l'humidité et la matière sèche ont été influencées par l'irrigation ($p=0,1134$), une tendance. Les résultats détaillés par coupe et par année incluant les analyses par infrarouge selon le traitement d'irrigation sont présentés au Tableau 15, à l'annexe 2.

Tableau 13. Analyse de la variance ayant trait aux variables utilisées pour mesurer la qualité des fourrages (analyse chimique).

Année	Variables	Effet	dl.	Valeur de F	Pr > F
2020	Matière sèche (%)	Irrigation	2	2,01	0,2147
	Humidité (%)		2	2,01	0,2147
	Protéine brute (%)		2	0,36	0,7111
	Fibre ADF (%)		2	0,86	0,4561
	Calcium total (%)		2	5,20	0,0491
	Phosphore total (%)		2	2,62	0,1525
	Magnésium total (%)		2	4,55	0,0431
	Potassium total (%)		2	1,34	0,3304
2021	Matière sèche (%)	Irrigation	2	2,34	0,1134
	Humidité (%)		2	2,34	0,1134
	Protéine brute (%)		2	0,78	0,4654
	Fibre ADF (%)		2	0,15	0,8624
	Calcium total (%)		2	1,07	0,3563
	Phosphore total (%)		2	0,91	0,4111
	Magnésium total (%)		2	0,91	0,4141
	Potassium total (%)		2	1,67	0,2047

Tableau 14. Résultats de l'analyse de la qualité du fourrage pour 8 paramètres (contenu en %) selon le traitement d'irrigation (analyse chimique).

Année	Irrigation	Matière sèche	Humidité	Protéine brute	Fibre ADF	Calcium total	Phosphore total	Magnésium total	Potassium total
(%)									
2020	NI	21,9	78,1	19,0	27,6	1,49 a	0,33	0,19 b	2,98
	AC	22,5	77,5	19,4	23,9	1,49 a	0,38	0,22 a	3,24
	TT	24,3	75,7	18,3	28,2	1,27 b	0,34	0,17 b	2,75
	<i>p</i>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	†	n.s.
2021	NI	19,1	80,9	23,4	29,3	1,40	0,37	0,21	3,4
	AC	18,6	81,5	25,1	28,7	1,52	0,39	0,23	3,6
	TT	17,8	82,2	25,4	28,6	1,45	0,40	0,22	3,6
	<i>p</i>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

* effet significatif à $p \leq 0,05$

† effet significatif à $p \leq 0,1$

6.10 Analyse économique

L'analyse économique a été réalisée par le Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture (CECPA). Le rapport complet de cette analyse est présenté à l'Annexe 3. Analyse économique.

7 Analyse et discussion selon les objectifs

7.1 OBJECTIF 1. Mesurer l'impact du stress hydrique sur le développement, le prélèvement en eau, le rendement et la qualité de plantes fourragères

Les essais agronomiques au site principal, ainsi que les suivis effectués aux sites satellites ont permis de caractériser les saisons 2020, 2021 et 2022, et ce, pour différentes régions au Québec. L'identification des périodes de stress hydriques devient importante pour évaluer une perte potentielle du rendement.

7.1.1 Site principal

Intervenir avec l'irrigation a permis de mesurer un gain significatif en rendement de 20 % en 2020 et de respectivement 9,4 et 5,2 % à la 2^e et 3^e coupe en 2021. Les périodes de contraintes de prélèvement en eau mesurées en 2020 et 2021 sont identifiées à l'aide de zones jaunes aux Figure 26 et Figure 27.

La saison 2020 a été propice à ce que la culture subisse une contrainte de prélèvements en eau et en éléments nutritifs sur une période prolongée. Du 16 mai au 11 juillet (zone jaune à la Figure 26), soit une période d'environ huit semaines, les conditions étaient favorables à ce que la culture subisse un stress hydrique, au moment où cette dernière était en phase d'implantation. La pluviométrie a été très faible et assez près des valeurs minimales historiques à 301,2 mm, tandis que l' ET_p a atteint 375,8 mm (Figure 3 et Figure 6). La résultante sur l'écart $P-ET_p$ a abouti à -74,6 mm, malgré une valeur minimale tout près de -200 mm. Voilà les conditions dans lesquelles une diminution significative de rendement de 20 % a été mesurée, en absence d'irrigation pour éviter un stress hydrique à la culture. Aussi, dans un contexte d'implantation, les besoins en eau de la culture sont plus faibles et les précipitations permettent de supporter un apport suffisant en eau pour une plus longue période. Il est possible que l'impact de telles conditions dans un contexte post-implantation ait été plus important, car le besoin en eau aurait été plus élevé. C'est pourquoi le sommaire $P-ET_p$ dans un contexte d'une culture en implantation ne permet pas d'évaluer pleinement l'ampleur de la contrainte de prélèvement en eau.

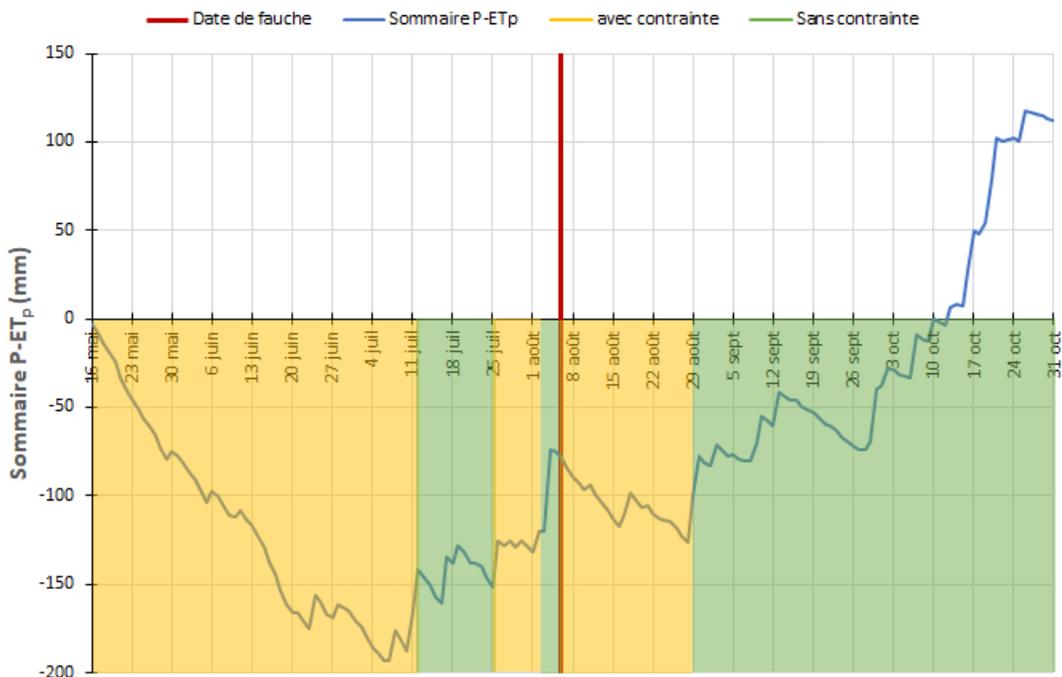


Figure 26. Chronique du sommaire précipitations – évapotranspiration potentielle ($P-ET_p$), période avec ou sans contrainte de prélèvement en eau, traitement NI, saison 2020.

En 2021, globalement, 3 semaines de contraintes de prélèvement en eau et éléments nutritifs ont été observées, tout comme une perte de rendement d'environ 10 %. Cette période n'a pas été complètement continue, car même lorsque de faibles précipitations sont enregistrées, la hausse du statut hydrique du sol permet d'augmenter l'eau disponible dans le sol. Conséquemment, la contrainte de prélèvement en eau a pu être relevée durant de courtes périodes. De plus, il est important de considérer les conditions ayant cours avant la fauche. Or, la culture était déjà soumise à une contrainte de prélèvement en eau avant la fauche. Sans précipitations, le statut hydrique du sol était limitant au moment de la reprise. En considérant l'écart $P-ET_p$ pour la période comprise entre les coupes seulement, il est plus difficile de caractériser le stress hydrique de la culture à l'aide de cet indice. En effet, le sommaire pour la période entre la 1^{re} et la 2^e coupe s'est élevé à 52 mm. Lors de la dernière coupe, une période assez courte de contrainte de prélèvement a été identifiée. Néanmoins, un gain significatif en rendement, quoique plus faible (5,2 %), a été attribué à l'irrigation. Sans surprise, la durée et l'intensité des périodes de contraintes de prélèvement en eau vécues au courant des essais agronomiques ont démontré un effet probant sur la diminution du rendement.

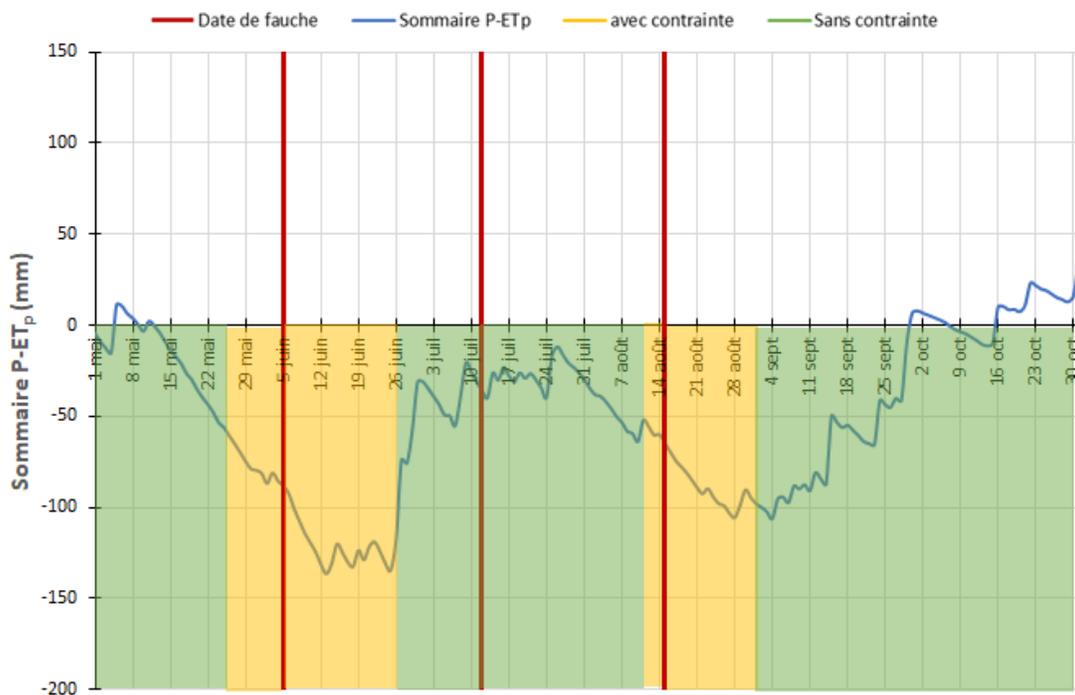


Figure 27. Chronique du sommaire précipitations – évapotranspiration potentielle (P-ET_p), période avec ou sans contrainte de prélèvement en eau, traitement NI, saison 2021.

Dans le contexte de l'étude, il n'a pas été possible d'établir un lien entre le stress hydrique subi par la culture et la qualité des fourrages. Certes, des effets sur le calcium total et le magnésium total ont été mesurés en 2020, mais ces différences n'ont pas été observées en 2021. Des paramètres importants comme la protéine brute et la digestibilité n'ont pas été influencés par les contextes de contraintes rencontrés.

7.1.2 Sites satellites

7.1.2.1 Sites sans contrainte de prélèvements en eau et en nutriments

7.1.2.1.1 *Baie Saint-Paul1*

Aucune contrainte de prélèvement en eau pour la culture n'a été observée pour ce site, tant en 2021 qu'en 2022. Malgré de faibles précipitations en 2021 (368,7 mm du 1^{er} mai au 31 octobre), la culture ne semble pas avoir subi de contrainte de prélèvement sur une longue période. C'est grâce au suivi des TDR (Figure 41) que des hypothèses peuvent être formulées pour expliquer la situation. Dans un premier temps, la culture a bien exploité le profil (0-75 cm), ce qui démontre l'absence de compaction. La teneur en eau très élevée en profondeur indique que la nappe n'est pas particulièrement profonde et participe à maintenir une certaine humidité dans le profil. De plus, à l'aide de l'analyse de K_c -TDR (Figure 43), il est possible de constater que le sol possède une très bonne réserve facilement utilisable par la culture. Malgré tout, une courte période de contrainte de prélèvement en eau a été observée à la fin août, début septembre. En 2022, aucun élément du suivi effectué ne laisse croire qu'il y ait eu une contrainte. La nature pédologique du champ suivi, la présence potentielle d'une nappe superficielle ainsi que l'observation d'une contrainte de prélèvement en eau limitée malgré une saison avec de très fiables précipitations permettent d'affirmer que ce contexte de production a très peu de probabilité à subir une contrainte de prélèvement en eau.

7.1.2.1.2 *Saint-Jean-Port-Joli*

Le site Saint-Jean-Port-Joli a connu deux saisons assez semblables en termes de pluviométrie cumulative (Figure 69 et Figure 74). En 2021, la période entre le 14 août et le 4 septembre s'est déroulée en absence de précipitations. La culture a subi une période de contrainte de prélèvement en eau à la fin août et au début septembre seulement (Figure 73). Autrement, aucune autre période n'a été identifiée comme propice au stress hydrique.

7.1.2.1.3 *Saint-Paul-de-Montminy*

Le suivi effectué au site Saint-Paul-de-Montminy n'a pas permis d'identifier des périodes où la culture a pu subir des contraintes de prélèvement en eau importantes. Même si l'écart $P-ET_p$ entre le 29 mai et le 28 août 2021 a atteint -163 mm, quelques jours seulement de contrainte de prélèvement en eau ont pu être mesurées (Figure 92, Figure 93). Cette période a été de courte durée et ne constitue pas une tendance forte. De manière globale, le coefficient cultural s'est situé sous la valeur de 1, encore plus visible après la 2^e coupe (Figure 93, Figure 98). Une diminution du prélèvement semble être affectée par des facteurs extérieurs au statut hydrique du sol. Une carence en éléments nutritifs pourrait être un des facteurs importants. En effet, le pH du sol à 5,29 pourrait limiter la disponibilité des éléments nutritifs. De plus, des objectifs spécifiques à la ferme concernant les besoins visés par cette prairie sont également des facteurs pouvant influencer les pratiques culturales. Cette prairie a été implantée en 2011, avec les années, la composition du mélange a probablement été modifiée considérablement, ce qui pourrait influencer aussi les prélèvements.

7.1.2.2 Sites avec contrainte(s) de prélèvements en eau et en nutriments

7.1.2.2.1 Site Ange-Gardien

Les précipitations de la saison 2021 ont été généralement faibles (Figure 29), tandis que l' ET_p a atteint des valeurs maximales ou normales (

Figure 30). Ces conditions ont engendré des écarts $P-ET_p$ de -205,2 mm (entre le 1^{er} mai et le 6 juillet), de -67 mm (du 7 juillet au 12 août) et de 51,5mm pour le reste de la saison (jusqu'au 31 octobre). Le suivi du statut hydrique du sol sur l'horizon 0-75cm a permis de constater que le sol a été très sec au-delà d'une profondeur de 30 cm, et ce, sur la durée quasi complète du suivi en 2021 (Figure 31). Les horizons en profondeur se sont probablement asséchés en début de saison et les précipitations n'ont pas été suffisantes pour atteindre et réhumecter ces profils (à l'exception de la pluie du 9 septembre pour l'horizon 25-45 cm). Les contraintes de prélèvement sont illustrées aux

Figure 32 et

Figure 33. Ces graphiques démontrent que des périodes importantes de contraintes de prélèvements ont eu lieu durant la saison 2021. Le coefficient cultural a présenté une tendance à la baisse de manière continue avant les deux fauches, signe que la culture n'a pas été dans les conditions optimales pour fournir son plein rendement. Il est fort probable que ce stress hydrique ait engendré une perte de rendement. Cette hypothèse est partiellement corroborée par les rendements comparatifs de la 2^e coupe en 2021 et 2022. Comme mentionné précédemment, le rendement de la 2^e coupe a atteint 3,83 t/ha en 2022 comparativement à 2,88 t/ha l'année précédente, soit une augmentation de 38,3 %. Bien qu'il soit impossible de quantifier le rôle du stress hydrique dans les différences de rendements observées, il est certain qu'il y ait contribué.

7.1.2.2.2 Site Baie Saint-Paul

La pluviométrie cumulative du 1^{er} mai au 20 juillet a été de 166,8 mm (plus près de la valeur minimale), tandis que celle entre le 21 juillet et le 31 octobre 2021 a été de 209 mm soit tout près de la valeur minimale de 204,6 mm enregistrée à la station Saint-Hilarion F (Figure 49). Lors de la 1^{re} coupe, l'écart $P-ET_p$ a atteint -140,8 mm, mais dans un contexte d'implantation. Dans une certaine mesure, les conditions météorologiques de la saison 2021 ont été propices à engendrer des conditions où la culture puisse subir des contraintes de prélèvement en eau. De telles contraintes ont effectivement pu être mesurées en 2021 (Figure 51, Figure 52 et Figure 53). À partir du début du mois d'août, le profil 0-40 cm s'est complètement asséché et le prélèvement a été minimal. Il est également possible de constater que les coefficients culturaux sont relativement faibles (maximums de 0,6 mesurés) durant les deux saisons. Malgré tout, un rendement de 3,44 t/ha a été mesuré en 2021. Ce sol agricole repose sur un affleurement rocheux qui limite la réserve en eau facilement disponible à la culture, ce contexte augmente fortement le risque de subir un stress hydrique.

7.1.2.2.3 Saint-Albert

La saison 2021, avec de faibles précipitations cumulatives et une forte demande en évapotranspiration, a été propice pour identifier des périodes où la culture a subi une contrainte de prélèvement en eau au site Saint-Albert (Figure 59 et Figure 60). Des périodes de contraintes de prélèvement en eau ont été identifiées dès le début juin (Figure 62). Ces périodes se sont prolongées durant la saison. De plus, à partir de la fin juin, très peu de prélèvement en eau a été mesuré dans l'horizon 25-75 cm (Figure 61). Pour 2022, la saison a été très différente au niveau du régime des précipitations (Figure 64). Bien que le suivi de 2022 ait été plus court que 2021, les conditions n'ont pas été propices à ce que la culture subisse une contrainte de prélèvement en eau. En effet, seule une très courte période de contrainte a été observée vers le 9 juillet. Il est important de rappeler que le rendement de la 2^e coupe en 2021 (1,90 t/ha) bien qu'il soit plus faible que

celui de 2022 (3,42 t/ha), était le rendement de l'année de l'implantation. Il demeure ainsi difficile d'estimer l'impact du stress hydrique sur le rendement de 2021.

7.1.2.2.4 Saint-Nicolas

Le site de Saint-Nicolas a un contexte de production assez différent des autres. La culture fourragère était constituée à 100 % de fléole des prés. Les fourrages récoltés étaient destinés à l'alimentation de chevaux, ce qui nécessite une qualité spécifique. De plus, une seule coupe a été effectuée. En termes de rendement, une augmentation de 11,1 % a été mesurée entre les saisons 2021 et 2022. Les conditions au début de la saison 2021 ont été caractérisées par moins de précipitations qu'en 2022. En effet, l'écart P-ET_p entre le 1^{er} mai et le 14 juin en 2021 a atteint -88,2 mm, tandis qu'il a été de -40,9 mm en 2022, une différence qui est importante (Figure 79, Figure 80, Figure 84 et Figure 85). Grâce au suivi des TDR, il est possible de déceler une courte période de contrainte de prélèvement en eau vers le 10 juin 2021, mais rien d'intense (Figure 83). Sinon, pour le reste du suivi effectué, aucune autre période importante n'a été propice à ce que la culture subisse une contrainte de prélèvement en eau. Si l'augmentation du rendement entre les années était attribuable à un contexte de contrainte de prélèvement en eau, il aurait eu principalement cours au mois de mai (période pré-installation des équipements).

7.1.2.2.5 Sainte-Eulalie

En 2021, la pluviométrie a basculé d'un extrême à l'autre (Figure 99). En effet, au début de la saison (1^{er} mai au 15 juillet) le site a reçu 304,2 mm de pluie, soit 40 mm de moins que la valeur la plus haute enregistrée à la station Sainte-Clotilde-de-Horton. Par la suite, les pluviométries cumulatives de la 2^e et 3^e période ont été inférieures aux valeurs minimales avec respectivement 69,2 mm et 202,2 mm. Le suivi des TDR a permis de constater qu'à la suite de la 1^{re} coupe, le coefficient cultural a chuté drastiquement (Figure 103). Une plante abri a été utilisée au semis, ce qui a eu un impact important sur le prélèvement en eau de la culture, à la suite de la 1^{re} fauche. Néanmoins, une contrainte de prélèvement a été observée vers le 24 août et cette situation se poursuit au-delà de la 2^e coupe. À ce moment, l'écart P-ET_p atteignait -127,6 mm (16 juillet au 24 août). En 2022, une autre période de contrainte de prélèvement a pu être identifiée. À partir du 11 juillet, il a été possible d'observer un ralentissement évident du prélèvement en eau pendant que l'ET_p était en hausse. L'écart P-ET_p durant cette période a atteint -66 mm (8 juin au 10 juillet).

7.1.2.2.6 Weedon

La pluviométrie cumulative au site Weedon a été dans les valeurs minimales tout au long de la saison (Figure 109). Durant une grande partie de la saison, les horizons au-delà de 30 cm n'ont pratiquement pas évolué (Figure 111). Ce qui pourrait ressembler d'emblée à un problème de compaction, le suivi des TDR de la saison 2022 permet d'affirmer que du prélèvement a été mesuré dans les horizons plus en profondeur (Figure 116). Ceci indique donc que l'eau dans les horizons plus en profondeur n'était plus disponible à la culture. Une période de contrainte de prélèvement en eau partielle a pu être décelée à partir du 12 juillet. En effet, les coefficients culturaux dans cette période diminuent et stagnent (Figure 113). L'écart P-ET_p projeté pour cette période (8 juin au 12 juillet 2021) aurait atteint -55,9 mm, tandis qu'il a atteint -102 mm pour la période du 8 juin au 28 juillet. La date potentielle de la première coupe en 2021 a été arbitrairement attribuée au 8 juin. Bien que les coefficients culturaux aient plutôt été stagnants entre la 1^{re} et la 2^e coupe en 2022, les données issues des TDR ne permettent pas d'affirmer, hors de tout doute, que la culture ait subi une contrainte importante de prélèvement en eau (Figure 117, Figure 118).

7.2 OBJECTIF 2. Définir les contextes (prix des terres, systèmes d'irrigation, prix foin, etc.) où la rentabilité de l'irrigation peut s'exprimer, tout en y incluant les besoins de stockage en eau d'irrigation

7.2.1 Volet économique

L'analyse économique a été réalisée par le Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture (CECPA). Le rapport complet de cette analyse est présenté à l'Annexe 3. Analyse économique.

7.2.2 Besoins en stockage

Les scénarios économiques évalués ont considéré trois intensités de perte de rendement, soit 10, 25 et 50 % sur une base annualisée. Pour contrer ces pertes de rendement avec l'irrigation, une certaine quantité d'eau doit être disponible. Ces hauteurs d'eau ont été estimées à l'aide des résultats de cette étude, ainsi que celle de Boivin et coll. 2020. Les hauteurs d'eau spécifiques pour contrer l'impact d'un stress hydrique prolongé menant à des diminutions de rendement intégrées dans les scénarios économiques sont de 100, 150 et 200 mm. Bien qu'elles puissent être variables en fonction des facteurs spécifiques associés à texture du sol, l'enracinement de la culture, le type de culture fourragère, les pratiques culturales, la région, etc., il s'agit néanmoins d'estimations crédibles. Des hauteurs d'eau d'une telle ampleur impliquent des volumes de l'ordre de 1000, 1500 et 2000 m³/ha. Dans un scénario hypothétique avec 30 ha en cultures fourragères, le volume pourrait atteindre de 30 000 à 60 000 m³ annuellement. Dans un contexte où l'eau proviendrait d'un étang d'irrigation, les dimensions associées à une réserve de 60 000 m³ correspondent à une excavation approximative de 6 m de profondeur sur une superficie de 1 ha.

7.3 OBJECTIF 3. Produire un feuillet technique sur l'irrigation dans les plantes fourragères qui inclut une «charte» pour évaluer le niveau du risque de stress hydrique auquel est exposée une entreprise

Cette section présente une charte qui décrit le risque de stress hydrique d'une culture fourragère d'une composition de 90 % de luzerne et de 10 % de fléole des prés. Différents paramètres permettent de mettre en lumière l'état de risque au stress hydrique de cette culture en fonction des conditions présentes pour une entreprise ou un champ donné. Ces derniers sont : la texture du sol, la région où est situé le champ considérant le cumul des unités thermiques maïs (UTM) (probabilité de 8 années sur 10) (CRAAQ, non daté), l'âge de la culture, la profondeur d'enracinement et le nombre de coupes dans la saison.

La texture du sol est le premier paramètre à considérer pour évaluer le risque de stress hydrique pour une culture. En effet, le sol sera en mesure de contenir plus ou moins d'eau et de la rendre disponible aux prélèvements de la culture dépendamment des proportions de particules de sable, de limon et d'argile. Les sols plus légers comme les sables possèdent une forte proportion de macropores qui favorise un écoulement de l'eau principalement vertical et diminue leur capacité de rétention en eau. À l'inverse, les sols plus lourds comme les argiles ont une importante microporosité qui permet un mouvement de l'eau latéral par capillarité. Cet aspect occasionne une plus importante capacité de rétention en eau du sol. Toutefois, l'eau des sols à forte proportion argileuse est en partie indisponible aux prélèvements de la culture, car trop fortement liée aux particules de sol. Ainsi, des classes texturales tendant vers l'argile, mais composées de particules plus grossières, permettront un volume d'eau disponible à la culture plus important.

Le territoire agricole québécois où des cultures fourragères sont retrouvées est très vaste. Les conditions météorologiques varieront donc en fonction des régions et influenceront le développement de la culture ainsi que son risque au stress hydrique. Les régions plus au sud seront donc plus à risque étant donné le potentiel d'atteindre des températures plus élevées. Une carte représentant le cumul des unités thermiques maïs (probabilité de 8 années sur 10) permet de représenter géographiquement sur le territoire les régions pour les températures de saison de culture plus ou moins chaudes (Atlas agroclimatique, 2012).

L'âge de la culture, c'est-à-dire son état de développement, est aussi une composante à considérer. Le développement de la culture tant en implantation qu'en production influence directement la profondeur d'enracinement, la composition du mélange et la vigueur de la culture. Une culture en implantation sera nécessairement plus à risque de subir un stress hydrique. Le stade de germination est particulièrement à risque du fait que le système racinaire ne sera que peu développé et ne permettra pas un accès à l'eau du sol au-delà des premiers cm de sol.

La profondeur d'enracinement de la culture est considérée dans le paramètre précédent, mais dépend d'autres aspects propres au lieu de culture. L'enracinement d'une culture sera influencé par l'état du sol, soit la compaction, la texture et la structure, mais aussi par la culture elle-même. Effectivement, les différentes cultures fourragères n'ont pas toutes le même potentiel d'enracinement. Il faut donc connaître cette information afin de déterminer si le système racinaire de la culture est à son plein potentiel. La profondeur d'enracinement est un facteur important quant au volume d'eau pouvant être à portée de la culture. Un sol aura beau contenir une quantité d'eau significative, mais cette réserve ne sera valorisée que par ce que le système racinaire est en mesure de prélever, soit par la distribution des racines horizontalement et verticalement. Un enracinement très superficiel (0-15 cm) limite grandement l'accès à l'eau du sol pour la culture. Une telle situation est normalement observable en début d'année d'implantation.

Le risque de stress hydrique de la culture variera en fonction du moment des coupes pour une même saison. La première coupe est réalisée en début de saison, moment auquel le statut hydrique du sol est encore passablement élevé, résultant de la fonte des neiges au printemps et aux températures potentiellement moins élevées. Une température plus fraîche, une longue durée d'ensoleillement et un statut hydrique généralement favorable deviennent de conditions gagnantes aux plantes fourragères. La deuxième coupe se déroule habituellement en période où la température est plus élevée. Un bon nombre

d'espèces retrouvées dans les mélanges fourragers des sites restent des plantes qui préfèrent et prospèrent mieux dans les climats frais (CRAAQ, 2005). Au cours de cette période, la durée d'ensoleillement reste encore élevée, la demande en ET_p augmente et le statut hydrique du sol est uniquement relié au régime des précipitations. Autrement dit, le potentiel de production de la biomasse reste élevé, mais les conditions pour soutenir cette productivité ne sont pas garanties. En considérant donc ces aspects mentionnés, la période entre la première et la deuxième coupe est celle apportant la hausse de risque de stress hydrique la plus importante dans une saison de croissance. Ce risque diminue avec l'arrivée de la troisième coupe. Pour plusieurs régions, cette coupe est la dernière de la saison. La diminution progressive de la température fera en sorte de diminuer les prélèvements en eau par la culture ainsi que d'en ralentir le développement. La quatrième coupe est quant à elle réalisée principalement dans les régions agricoles du sud de la province. De la même manière que le ralentissement de la culture décrit pour la coupe précédente, le risque de stress hydrique est réduit au minimum pour cette période de la saison pour les cultures fourragères.

Le volume de biomasse décrit dans la section précédente démontre l'impact de ce paramètre sur le risque de stress hydrique au cours de la saison de production. Cette variation de développement végétal peut aussi être décrite pour les périodes entre les coupes. Une plus faible biomasse occasionnera de plus faibles prélèvements en eau par la culture comparativement à une biomasse plus importante. Dès la fin d'une coupe, le couvert végétal est très fortement réduit (faible biomasse). La repousse ainsi engendrée fait en sorte d'augmenter la biomasse ainsi que les prélèvements en eau leur étant associés. Cette augmentation se poursuit jusqu'à l'événement de la prochaine coupe. Cette observation est corroborée par les valeurs de K_c mesurées dans ce projet. Plus la valeur de ce coefficient est élevée, plus les prélèvements en eau seront importants. Leurs valeurs augmentent progressivement jusqu'à une coupe pour ensuite chuter drastiquement. Ce cycle se répète d'une coupe à l'autre pour l'ensemble de la saison.

La proportion de débris de diamètre supérieur à 2 mm dans un sol viendra nécessairement y influencer la dynamique de l'eau. Ces débris font en sorte d'augmenter la macroporosité du sol, ce qui favorisera l'écoulement de l'eau à la verticale et hors de portée du système racinaire. L'analyse texturale d'un sol ne considère pas ces débris. Il faut donc être prudent avec les résultats d'analyse texturale quant au comportement de l'eau dans un sol et son potentiel de risque au stress hydrique. Plus la proportion de débris de diamètre supérieur à 2 mm sera élevée, plus le risque de stress hydrique sera accentué. Les valeurs de proportion habituellement rencontrées dans les sols agricoles varient entre 0 et 40 %.

Les apports en eau par la pluie et les pertes en eau par évapotranspiration constituent les deux aspects principaux du bilan hydrique utilisés en gestion de l'irrigation. Sans réaliser un bilan hydrique complet, le sommaire $P-ET_p$ devient une indication intéressante. Une différence de valeur négative indique que les pertes d'eau par évapotranspiration sont supérieures aux apports en eau par les précipitations, résultant en une diminution de la réserve en eau du sol disponible aux prélèvements par la culture. Une telle situation augmente donc le risque d'un stress hydrique pour la culture. Une différence de valeur positive indique le contraire des explications précédentes, soit une augmentation de la réserve en eau disponible et une diminution du risque de stress hydrique. Les valeurs de $P-ET_p$ sont disponibles sur le site agrometeo.org pour l'ensemble des stations météorologiques présentes.

Lorsque l'ensemble de ces paramètres sont déterminés, un constat général peut être émis en observant le positionnement des résultats quant au degré de risque de stress hydrique (Figure 28). Des résultats tendant majoritairement vers la couleur rouge indiqueront une augmentation accrue du risque de stress hydrique pour la culture, tandis que des résultats avec une tendance vers la couleur verte indiqueront plutôt une diminution de ce même risque. L'identification des paramètres occasionnant une augmentation du risque au stress hydrique pourra faire en sorte de mettre en place des stratégies pour augmenter la résilience de la culture face à cette problématique.

Impacts sur le degré du risque						
Texture	Sable	Sable loameux	Loam sableux	Loam	Argile	Loam argileux
Région UTM cumulatif	2501 et +		< 2501 à > 1900		1900 et -	
Âge de la culture	Implantation			Production		
Profondeur d'enracinement (cm)	0-15	15-30	30-60	60-90		
Nombre de coupes réalisées (année de production)	1	2	3	4		
Volume de biomasse	Élevé		Moyen		Faible	
Détritus (%)	30-40	20-30	10-20	0-10		
P-ETp	Négatif			Positif		

Figure 28. Évaluation du stress hydrique potentiel selon l'impact individuel des principaux critères d'intérêt.

8 Conclusion

Les essais effectués au site de Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans de 2020 à 2022 ont démontré que l'irrigation est une pratique culturale qui permet de diminuer la vulnérabilité au stress hydrique d'une culture fourragère composée à 90 % de luzerne et de 10 % de graminées. D'un point de vue agronomique, le gain en rendement de 20 % a démontré qu'il est pertinent d'intervenir avec l'irrigation pour éviter que la culture subisse une contrainte de prélèvement en eau dès la saison d'implantation. De plus, cette pertinence s'étend aussi en année de production où des gains de respectivement 10 et 5 % à la 2^e et 3^e coupe ont été mesurés. Cette pertinence s'exprime seulement en contexte où la culture subit une contrainte de prélèvement en eau et où les interventions s'appuient sur une gestion raisonnée de l'irrigation. En ce qui a trait aux principaux paramètres utilisés pour mesurer la qualité, aucune différence significative n'a été observée entre les différents régimes hydriques. Considérant un besoin potentiel allant jusqu'à 2000 m³/ha, et des superficies en culture importantes, il est clair que l'approvisionnement en eau pourrait constituer un enjeu de taille dans plusieurs contextes de production. La faisabilité technique et les contextes réglementaires pourraient tout simplement rendre impossible la réalisation de certains projets.

Maintenant, si la pertinence agronomique d'éviter un stress hydrique à la culture en ayant recours à l'irrigation est évidente, il en est autrement pour la pertinence économique. L'objectif généralement poursuivi avec la production de plantes fourragères n'est pas de générer des profits, mais plutôt de nourrir les animaux. Minimiser le coût de production sans affecter la qualité demeure le principal objectif. Quoique l'achat de terres soit la meilleure solution économique pour un scénario de 10 % de pertes de rendements, cette approche peut être difficile à concrétiser. De plus, il faut aussi considérer qu'en absence de pertes de rendements, il faut continuer à s'occuper de ces superficies qui deviennent alors excédentaires. L'assurance récolte suit de près la solution gagnante et s'empare du premier rang pour les scénarios à 25 et 50 % de pertes. De plus, ce programme couvre aussi les pertes pour le gel et certaines difficultés de récolte qui ne sont pas prises en compte dans l'analyse réalisée dans ce projet. Enfin, à 50 % de pertes, l'irrigation est une solution plus avantageuse que l'achat de terres.

Le secteur de la production des plantes fourragères implique une diversité de systèmes cultureux qui complique toute généralisation des résultats obtenus avec une pratique culturale comme l'irrigation. Les sites satellites ont permis d'obtenir un regard sur différents contextes de productions. Cette grande variabilité des contextes de productions instrumentés a également mis en lumière la difficulté de généraliser l'impact du stress hydrique sur les cultures fourragères. Chaque système intègre un ensemble de facteurs plus ou moins interdépendants qui varie d'une ferme à l'autre. Le type de mélange fourrager, la texture du sol, la profondeur d'enracinement et les pratiques culturales ne sont que quelques exemples qui augmentent ou diminuent le risque que la culture subisse un stress hydrique. Il existe bel et bien des rapprochements entre certains sites suivis, mais la réponse au stress hydrique est hautement spécifique. Néanmoins, les suivis effectués ont démontré qu'une majorité des sites (6 des 9 sites) ont subi des épisodes plus ou moins prolongés de contraintes de prélèvements en eau et en éléments nutritifs. L'écart $P-ET_p$ est une information intéressante qui peut devenir un outil pour évaluer la probabilité que la culture puisse subir un stress hydrique compte tenu du lien fondamental entre l' ET_p et le besoin en eau des cultures. Sans pour autant être en mesure d'estimer les pertes de rendement associées aux périodes de contraintes, le rendement des sites satellites a diminué lors des périodes où des contraintes ont été observées.

9 Références

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). 2019. Outils de surveillance des sécheresses au Canada, [En ligne], <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/292646cd-619f-4200-afb1-8b2c52f984a2>, page consultée le 11 décembre 2023.

AAC. 2002. Le système canadien de classification des sols, 3^e édition, Presses scientifiques du CNRC, Ottawa, Canada, 196 p.

Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control. Volume: 19, No. 6.

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes et M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. Rome.

American Society of Civil Engineering (ASCE). 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Report of ASCE Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee, American Society of Civil Engineering, 59 p.

Atlas agroclimatique du Québec. 2012. Cumul des unités thermiques maïs (UTM) : probabilité de 8 années sur 10. [En ligne]
https://www.agrometeo.org/index.php/atlas/map/probabilite_de_8_annees_sur_109/utm/1979-2008/false

Boivin et coll., 2018. Gestion raisonnée de l'irrigation – Guide technique. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 312 p.

Boivin, C., J. Vallée, P.-A. Taillon et D. Bergeron. 2020. « Le défi de l'eau : l'Île d'Orléans se mobilise ». IRDA. 53 p.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2005. Les plantes fourragères, Édité par le CRAAQ, 228 p.

Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. CPVQ. Québec. Agdex 533, méthode SS-1.

Financière agricole du Québec (FADQ). 2019. Statistiques en assurance récolte 2018-2023, [En ligne], [La Financière agricole du Québec: Assurance récolte - Statistiques annuelles \(fadq.gc.ca\)](https://www.fadq.gc.ca/fr/statistiques-en-assurance-recolte), page consultée le 11 décembre 2023.

Gee, G.W. et J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In Klute, A. (ed) Methods of soil analysis. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd edition. Madison, WI.

Hanks, R. J., J. Keller, V.P. Rasmussen et G.D. Wilson. 1976. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. Soil Science Society of America Proceedings, volume 40, p. 426 - 429.

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2018. Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie des plantes fourragères, Direction du développement des secteurs agroalimentaires, 29 p.

Woods, S. (2017). Generalized Additive Models : An Introduction with R. Chapman and Hall/CRC, 2^e édition.

10 Annexe 1. Sites satellites

10.1 Ange-Gardien

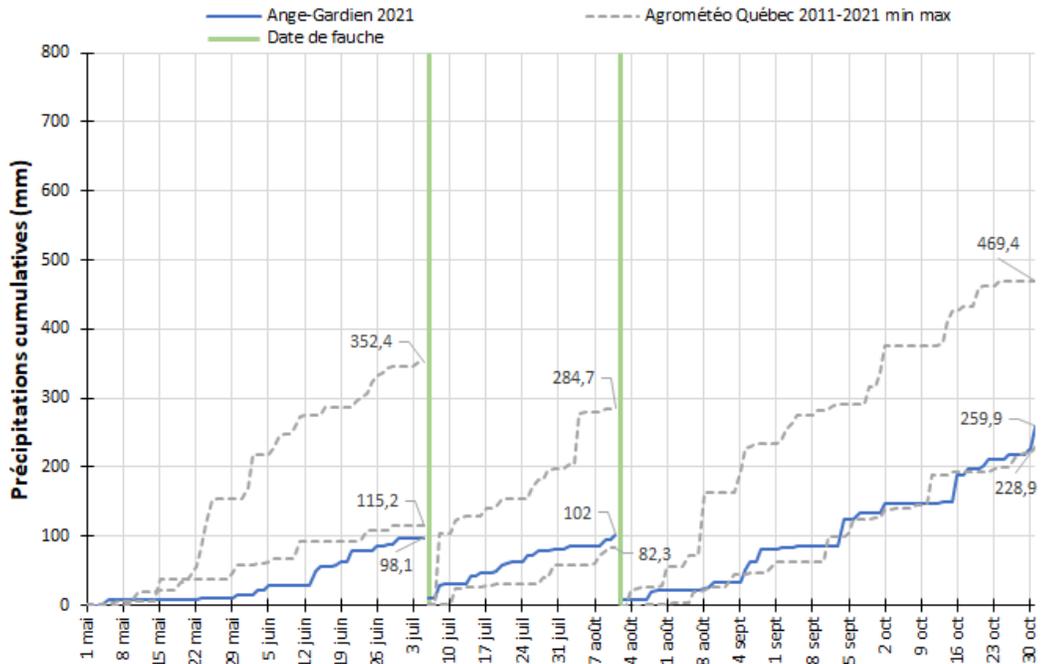


Figure 29. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Ange-Gardien, saison 2021.

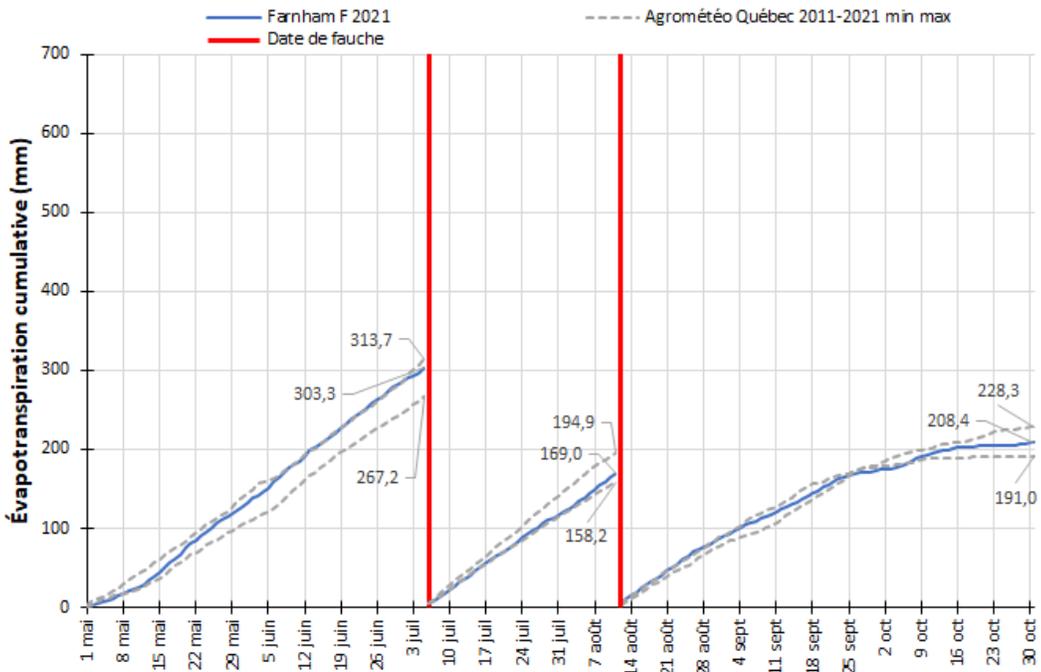


Figure 30. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Farnham F entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Ange-Gardien, saison 2021.

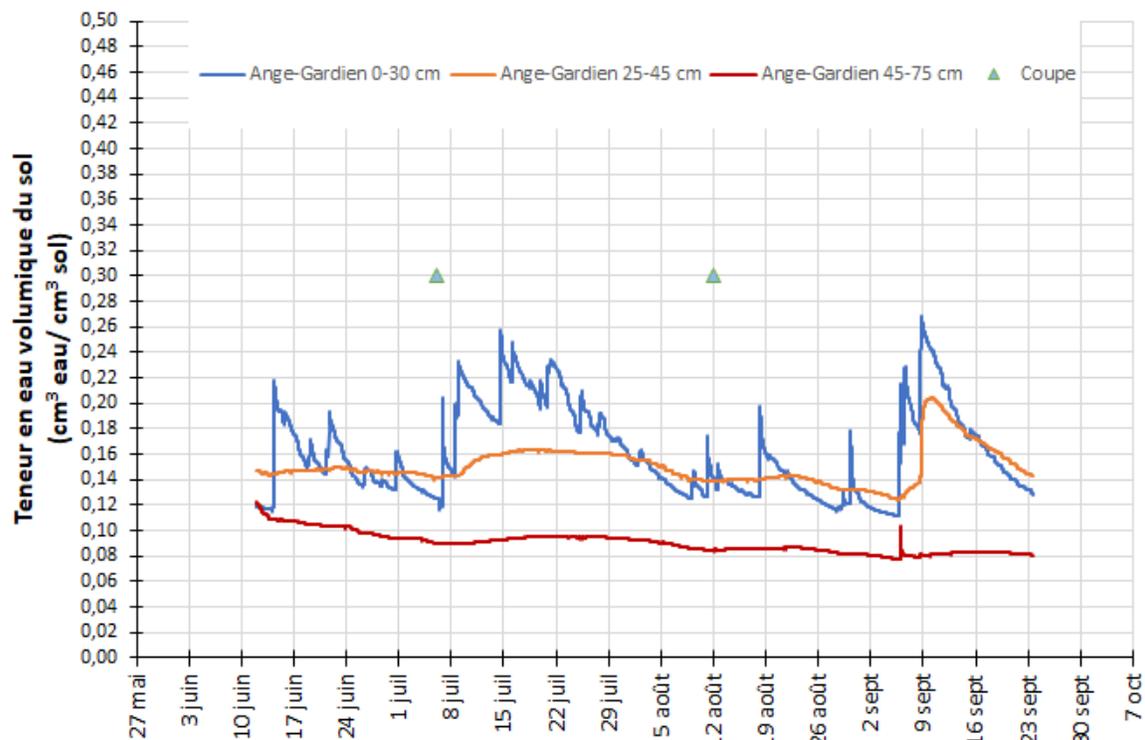


Figure 31. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Ange-Gardien, saison 2021.

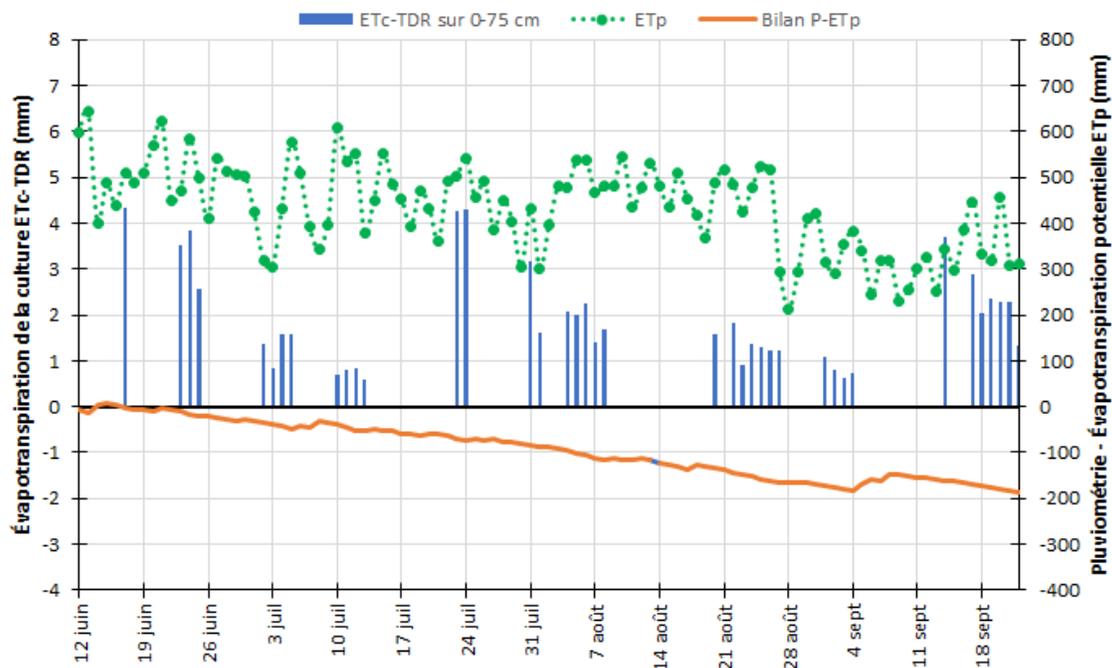


Figure 32. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Ange-Gardien, saison 2021.

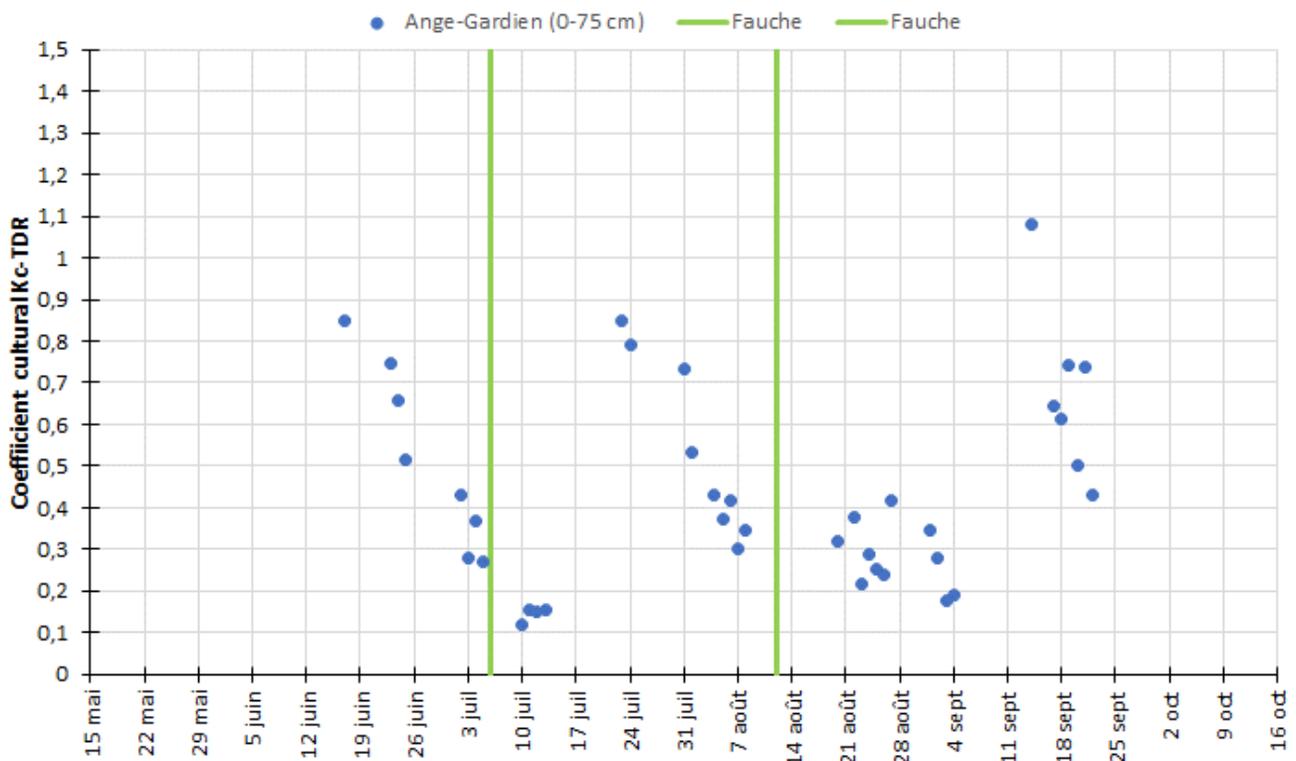


Figure 33. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Ange-Gardien, saison 2021.

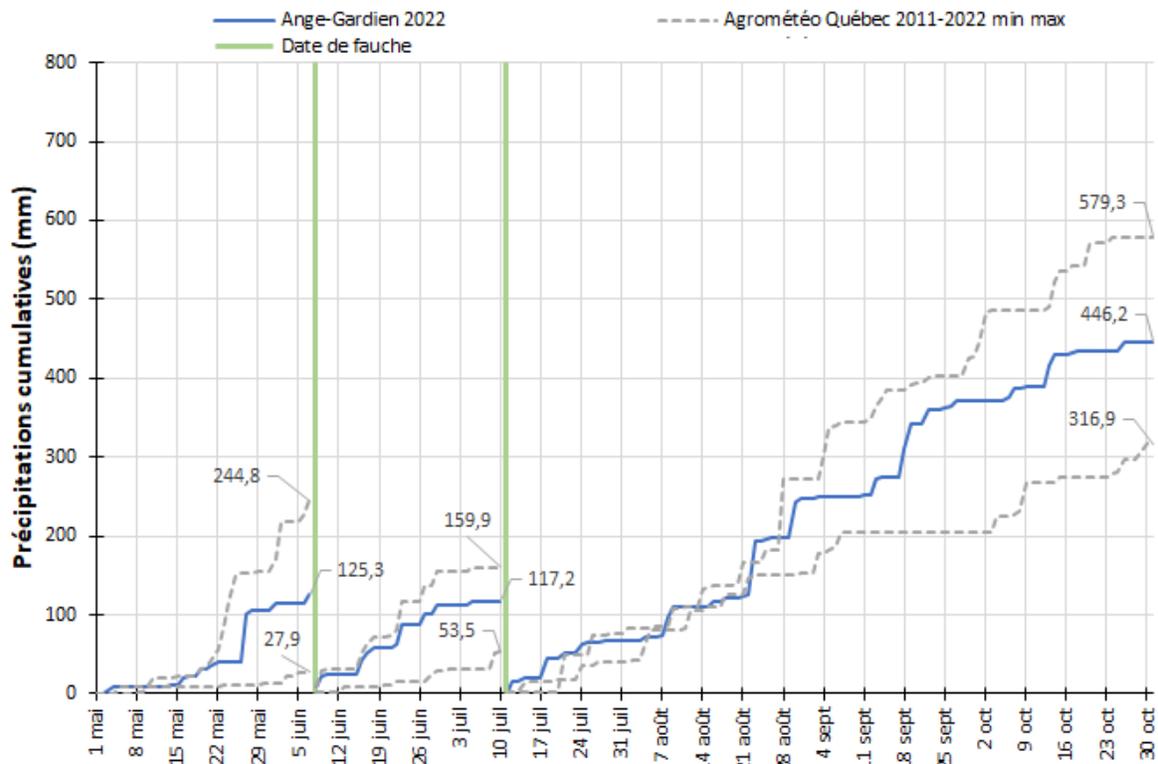


Figure 34. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Ange-Gardien, saison 2022.

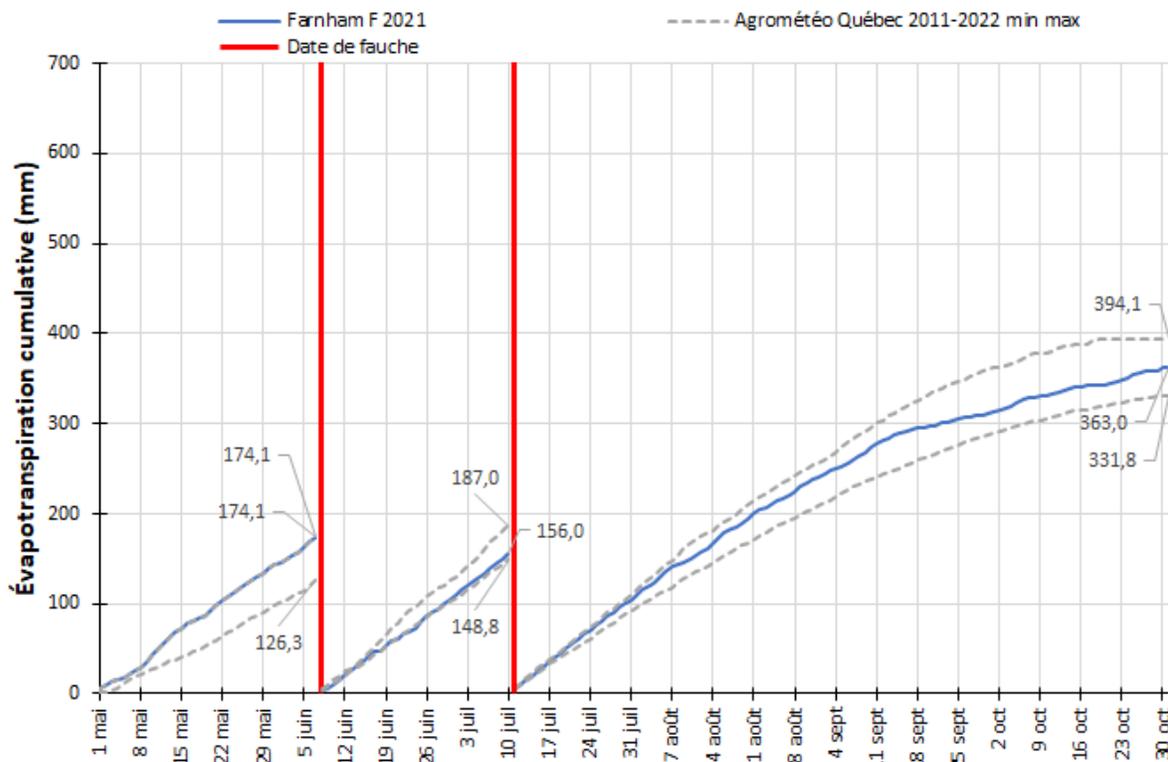


Figure 35. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Farnham F entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Ange-Gardien, saison 2022.

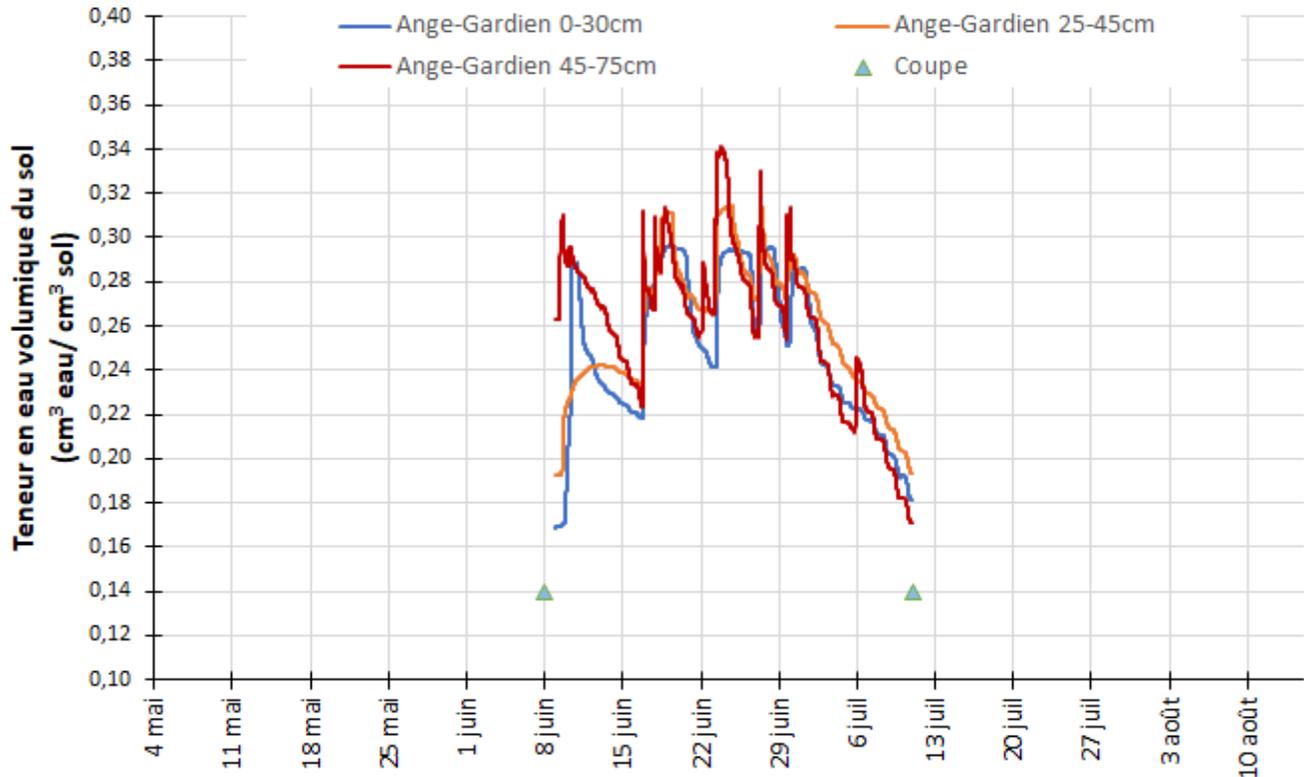


Figure 36. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Ange-Gardien, saison 2022.

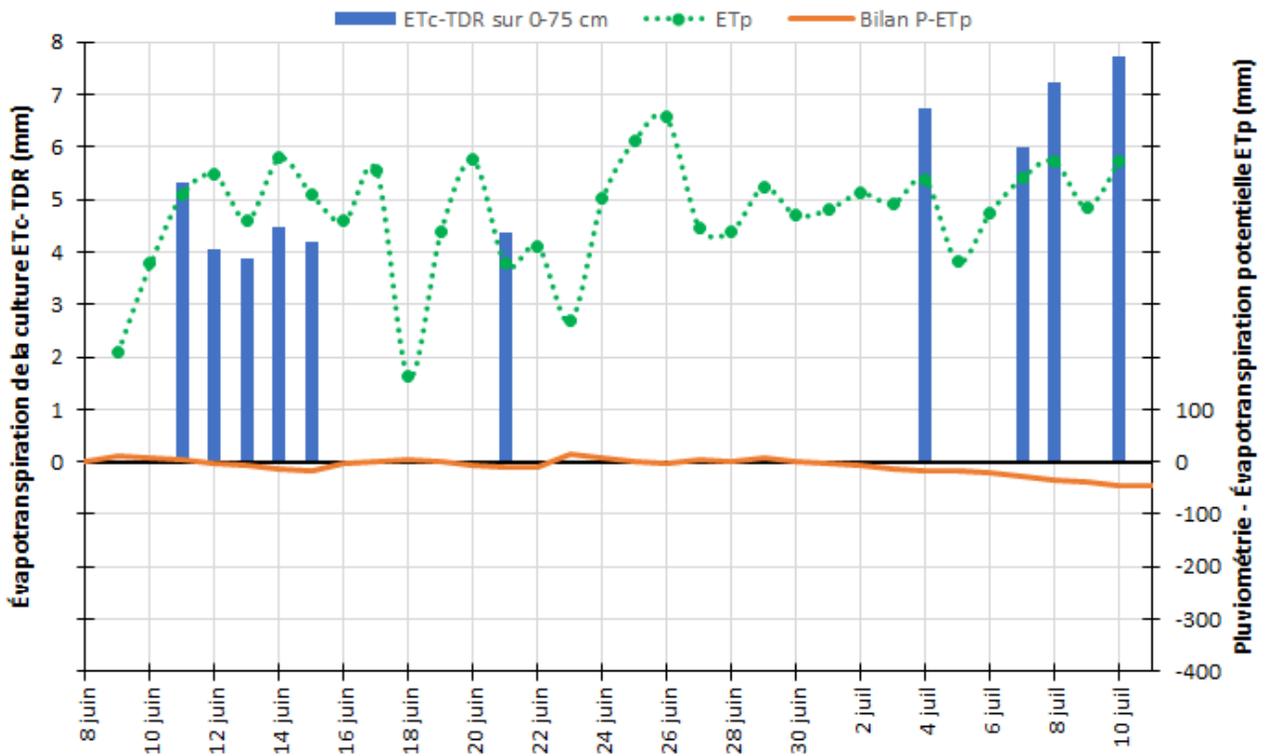


Figure 37. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Ange-Gardien, saison 2022.

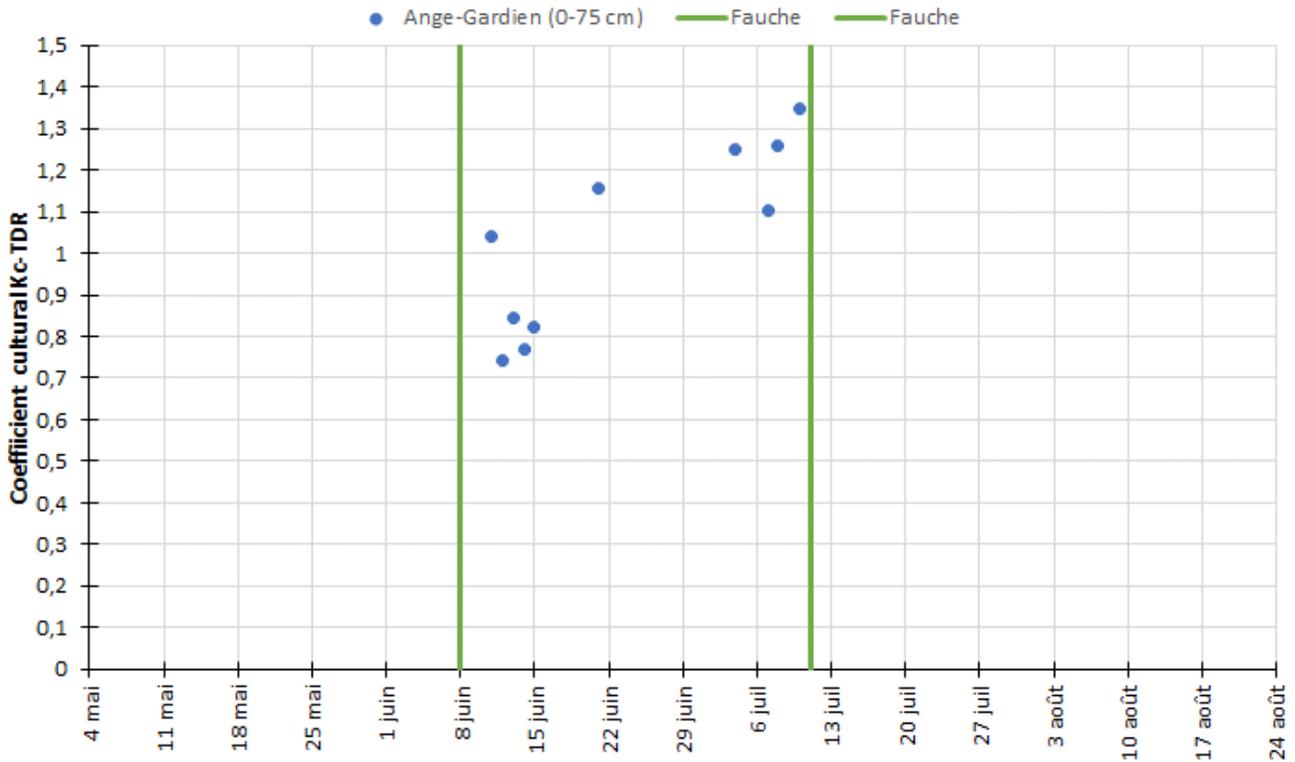


Figure 38. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Ange-Gardien, saison 2022.

10.2 Baie Saint-Paul1

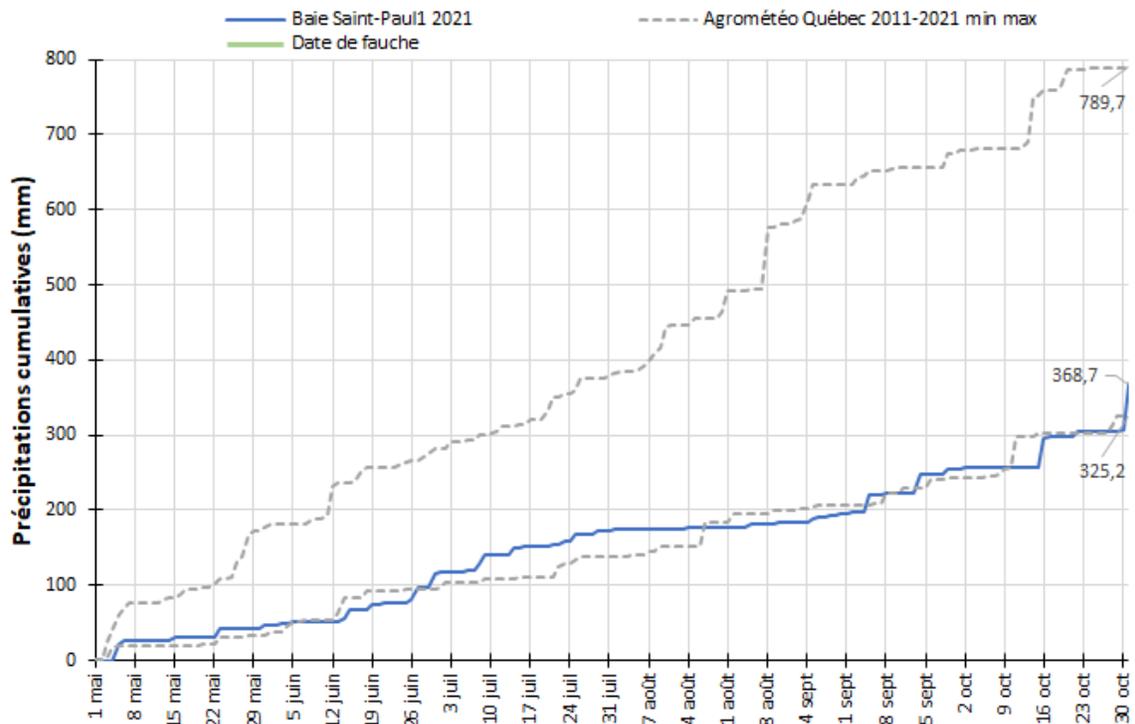


Figure 39. Pluviométrie cumulative (mm) mesurée au site, précipitations minimale et maximale à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul1, saison 2021.

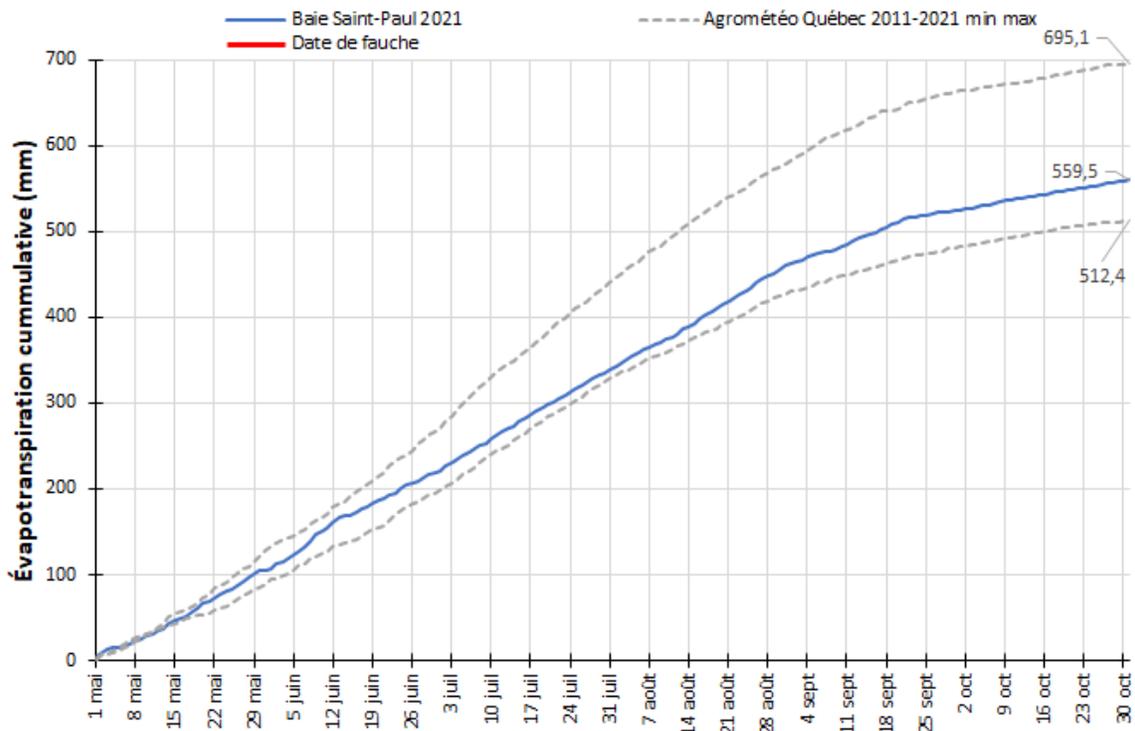


Figure 40. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Baie-Saint-Paul entre 2011 et 2021 (mm), site Baie Saint-Paul1, saison 2021.

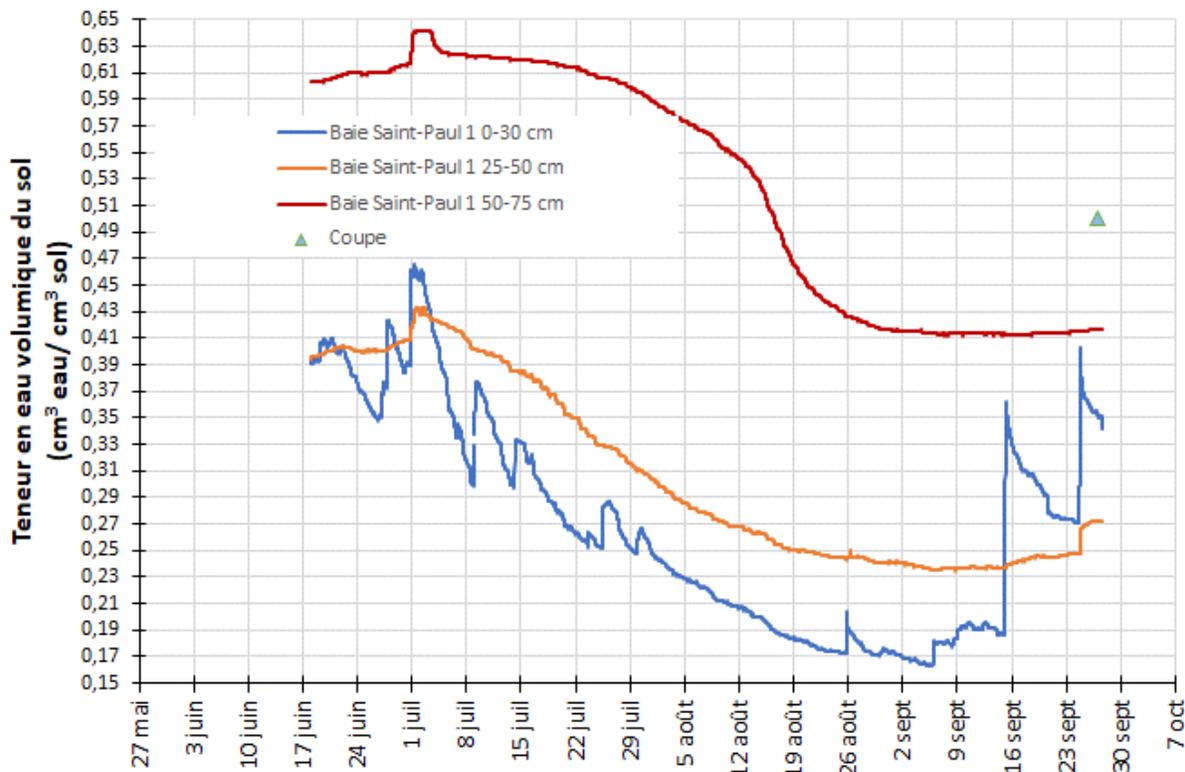


Figure 41. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Baie Saint-Paul1, saison 2021.

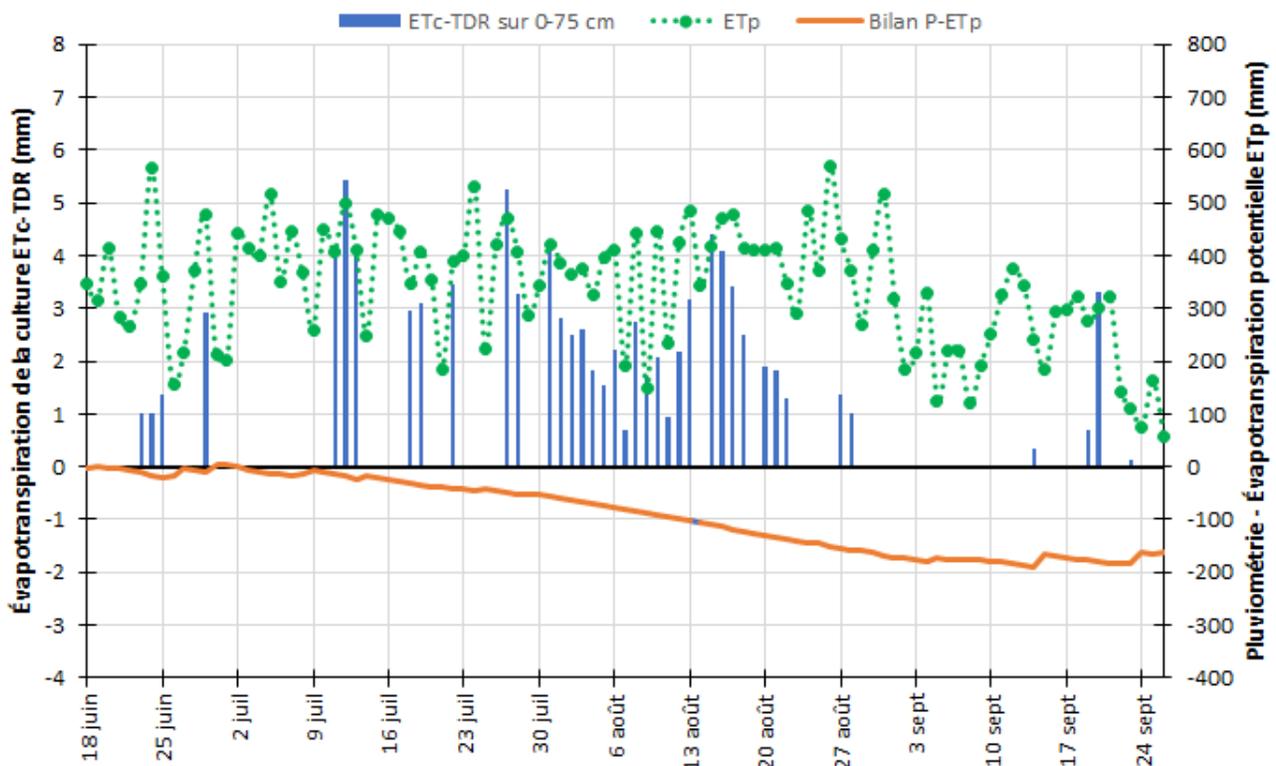


Figure 42. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Baie Saint-Paul1, saison 2021.

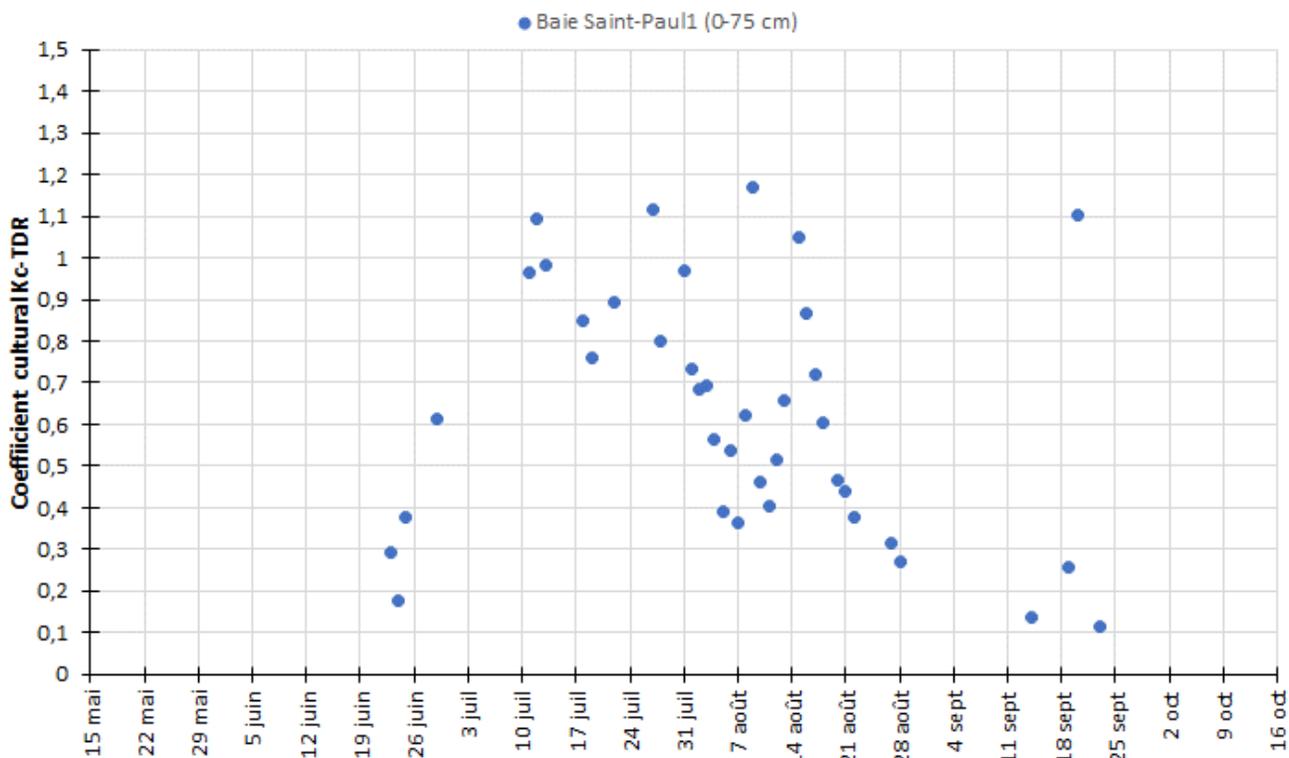


Figure 43. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Baie Saint-Paul1, saison 2021.

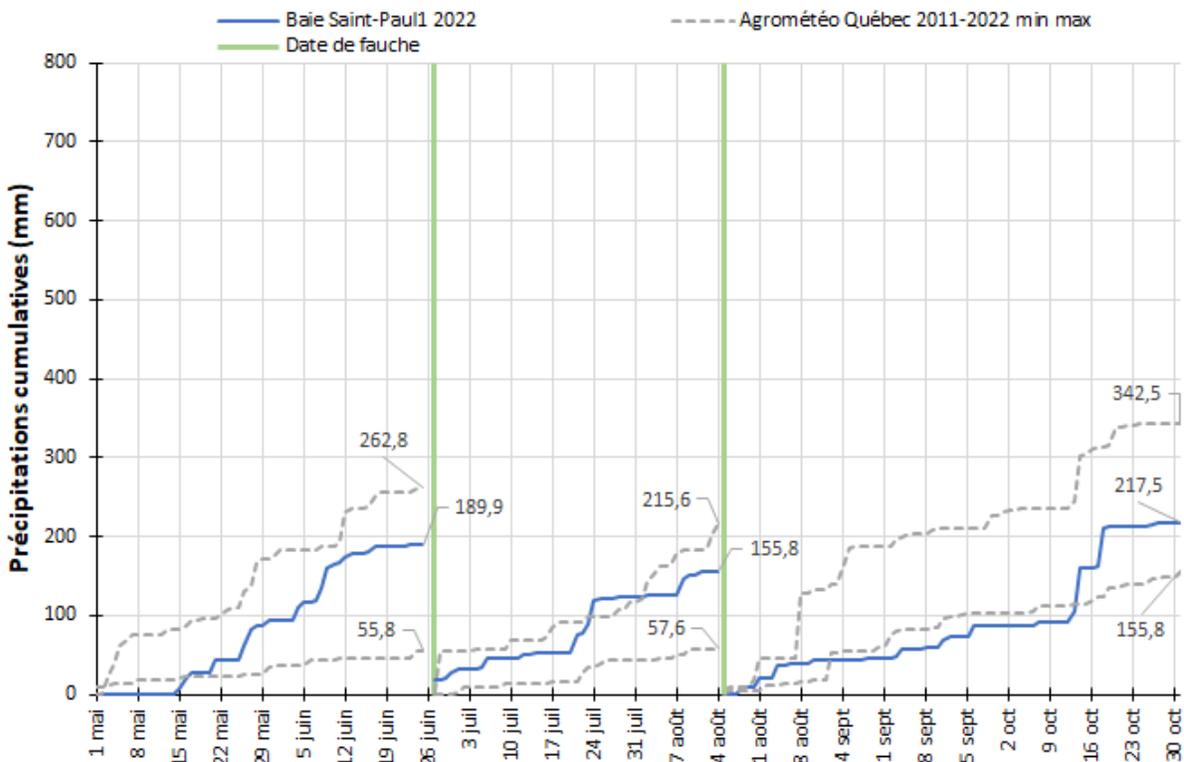


Figure 44. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul1, saison 2022.

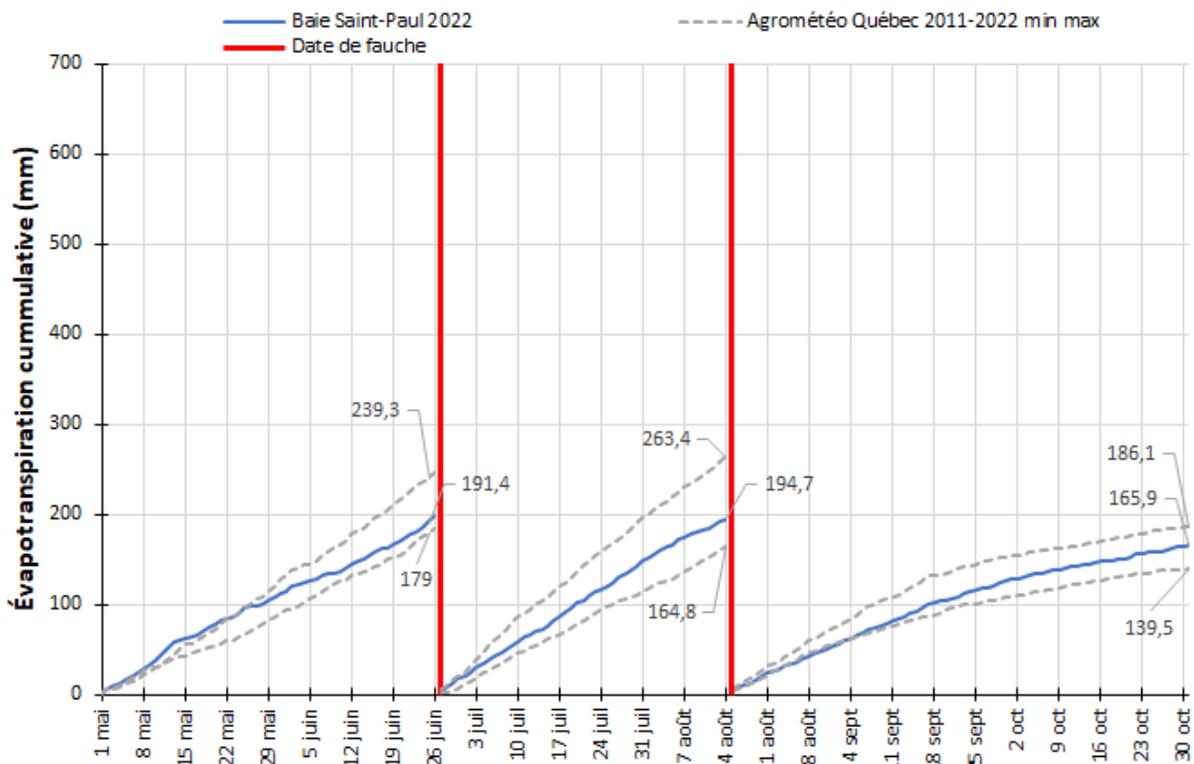


Figure 45. Évapotranspiration potentielle cummulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cummulative à la station Baie-Saint-Paul entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul1, saison 2022.

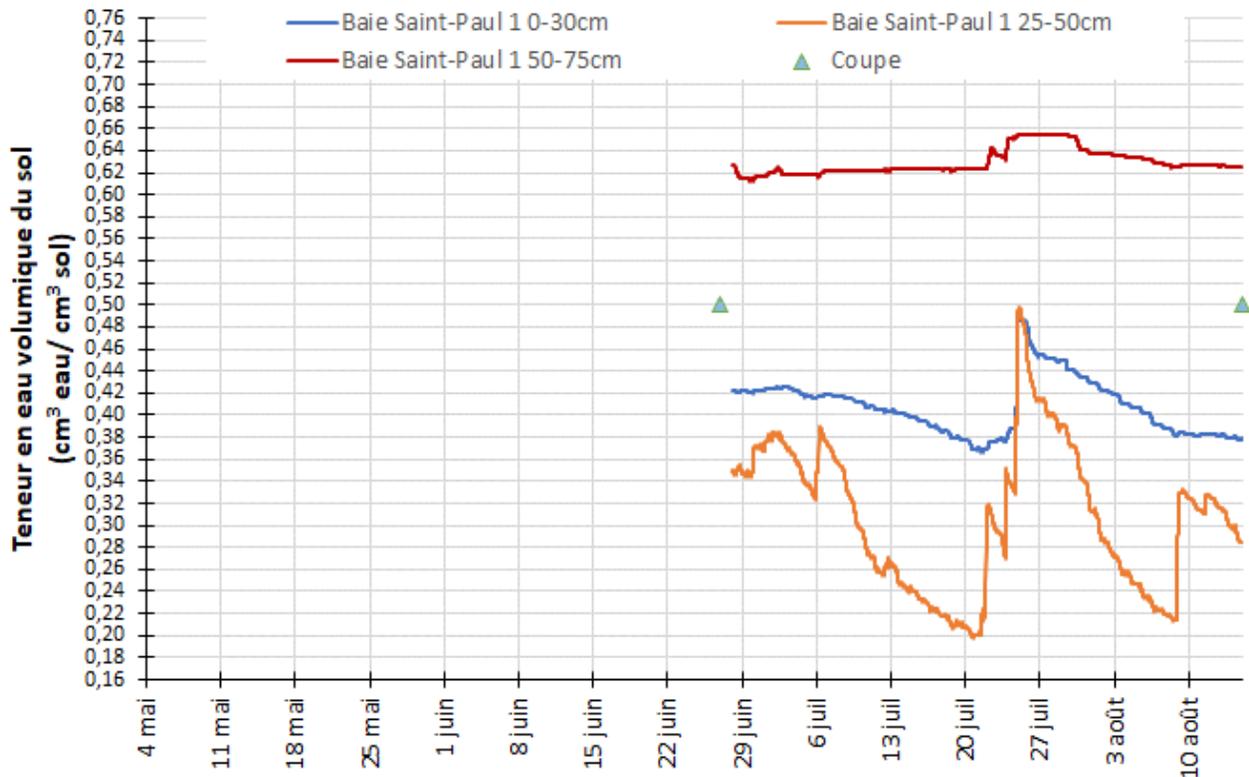


Figure 46. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Baie Saint-Paul1, saison 2022.

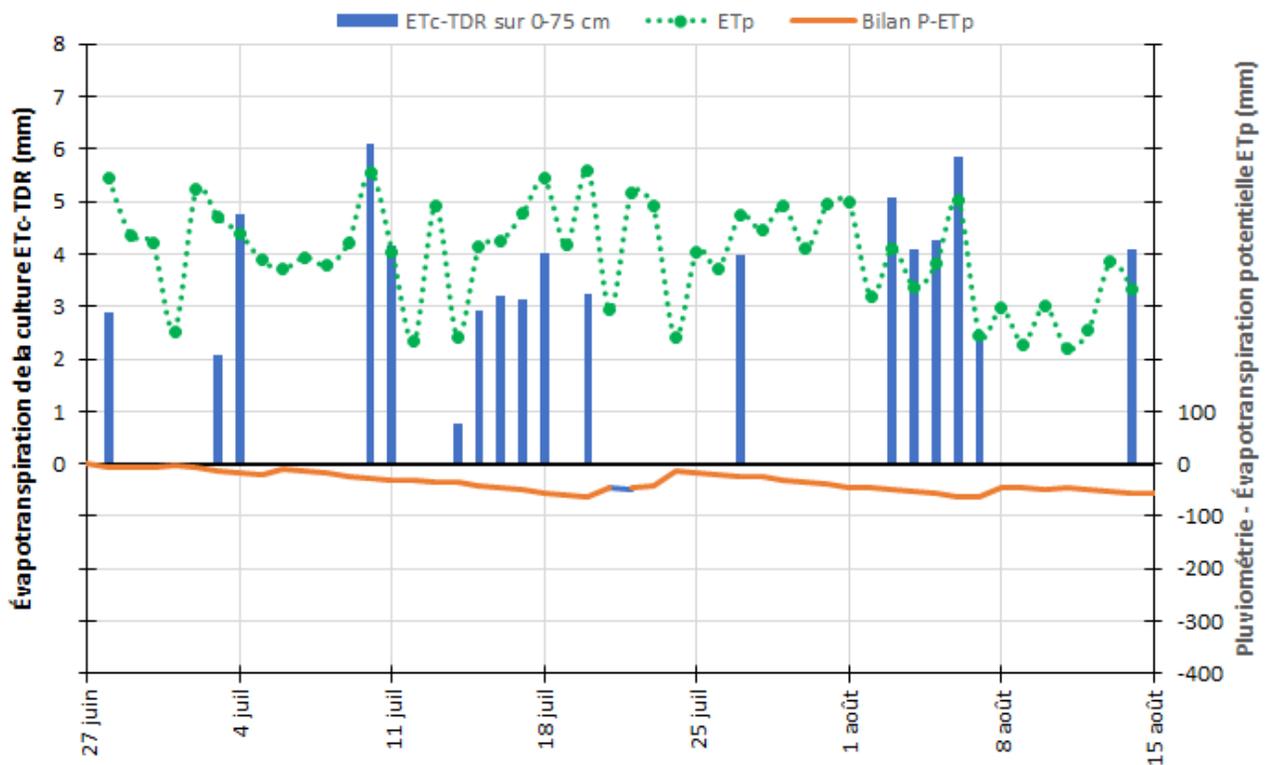


Figure 47. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Baie Saint-Paul1, saison 2022.

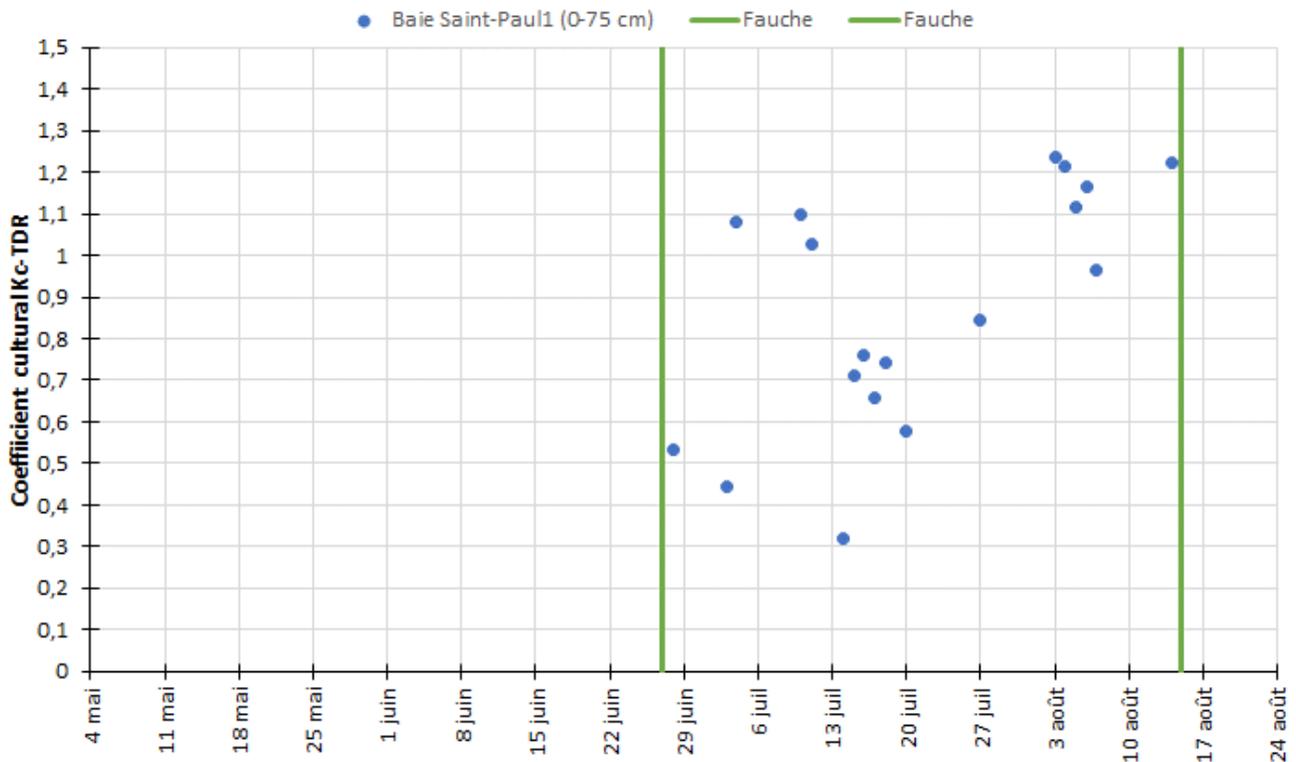


Figure 48. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Baie Saint-Paul1, saison 2022.

10.3 Baie Saint-Paul2

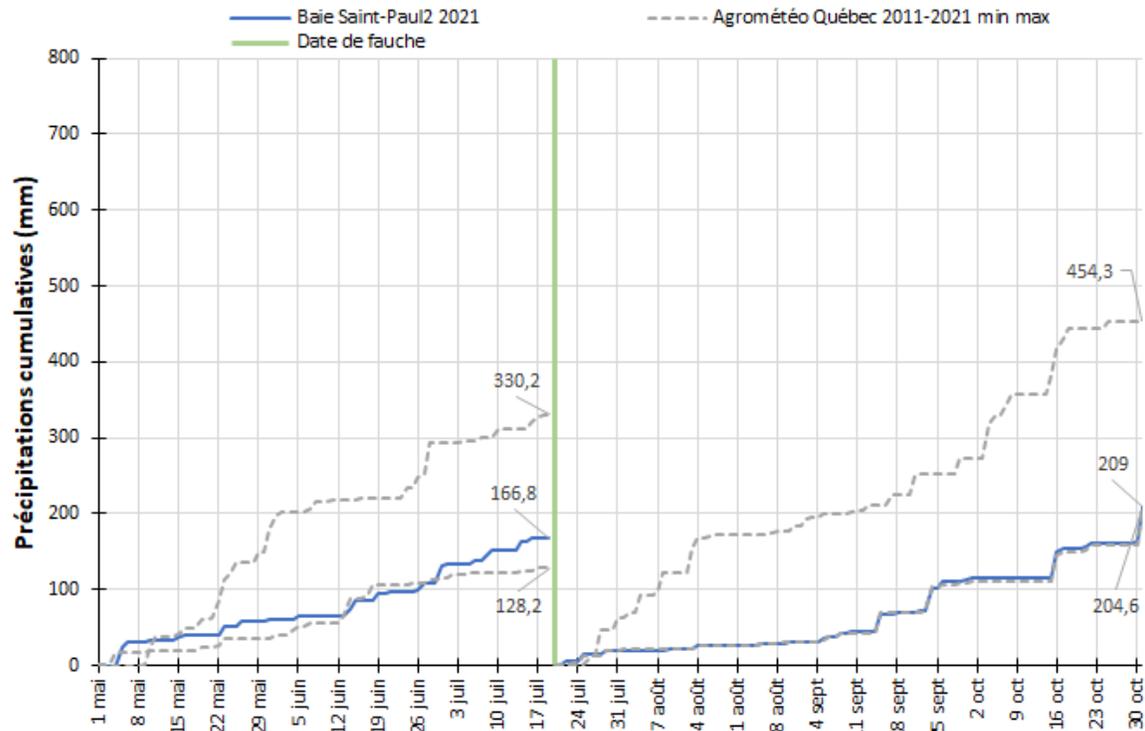


Figure 49. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Baie Saint-Paul2, saison 2021.

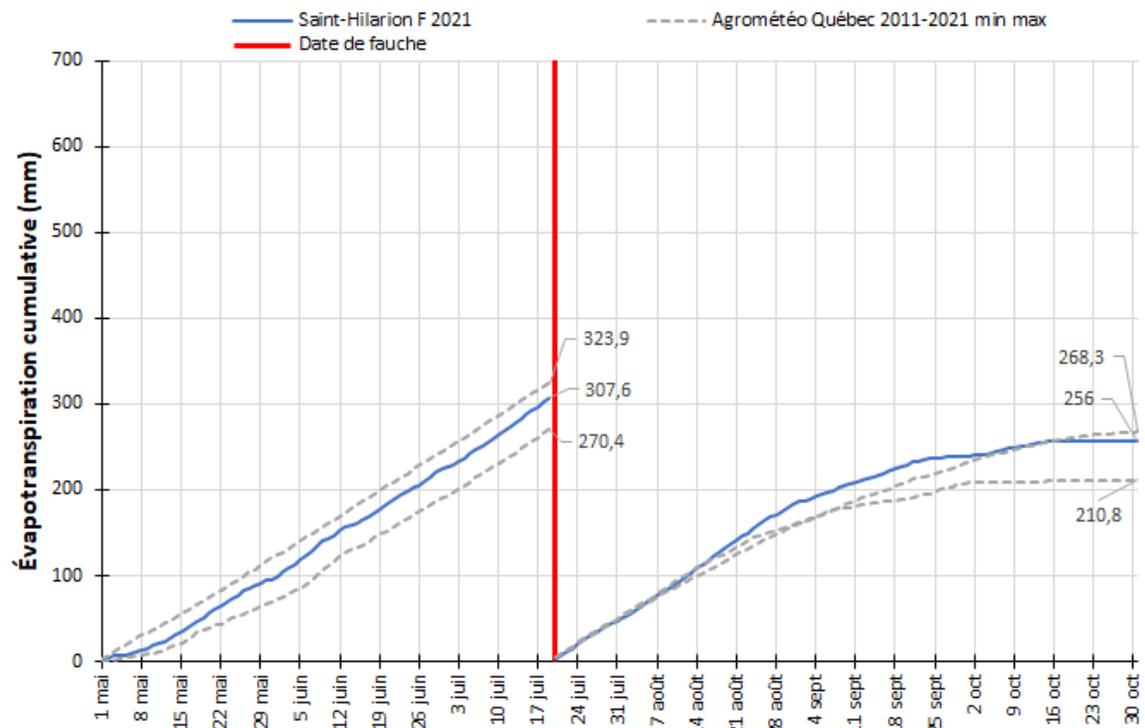


Figure 50. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Hilarion F entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Baie Saint-Paul2, saison 2021.

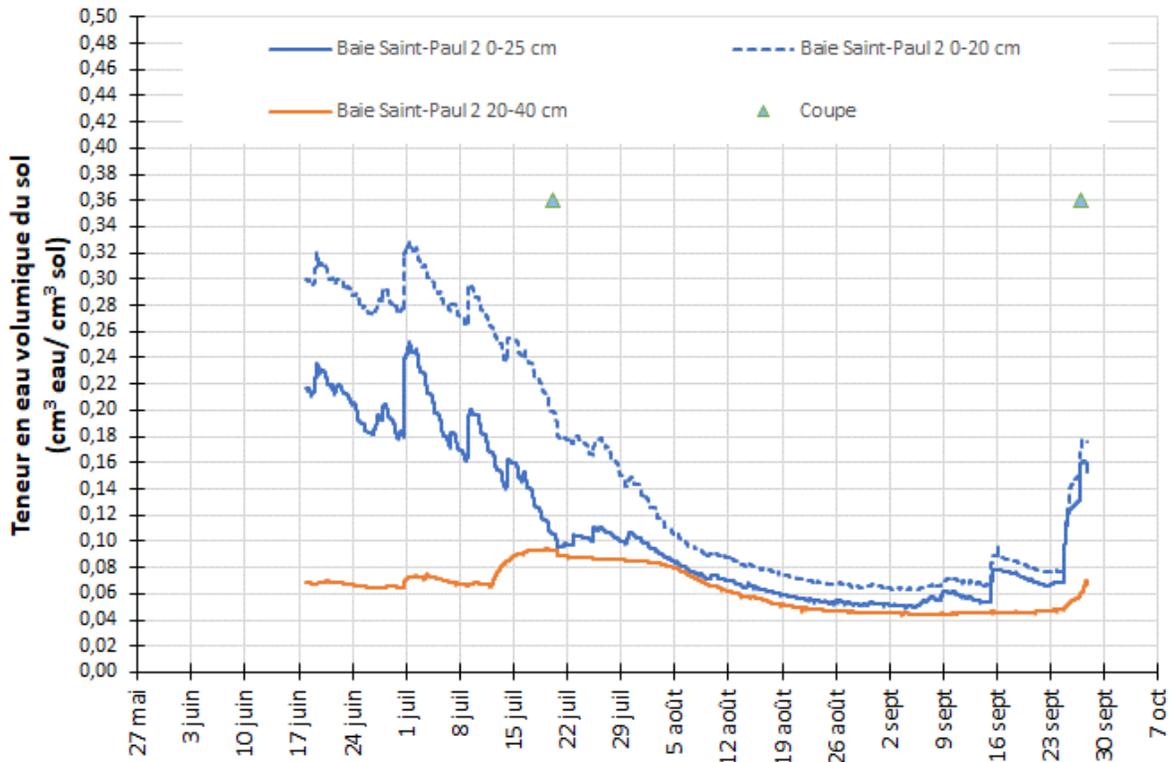


Figure 51. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Baie Saint-Paul2, saison 2021.

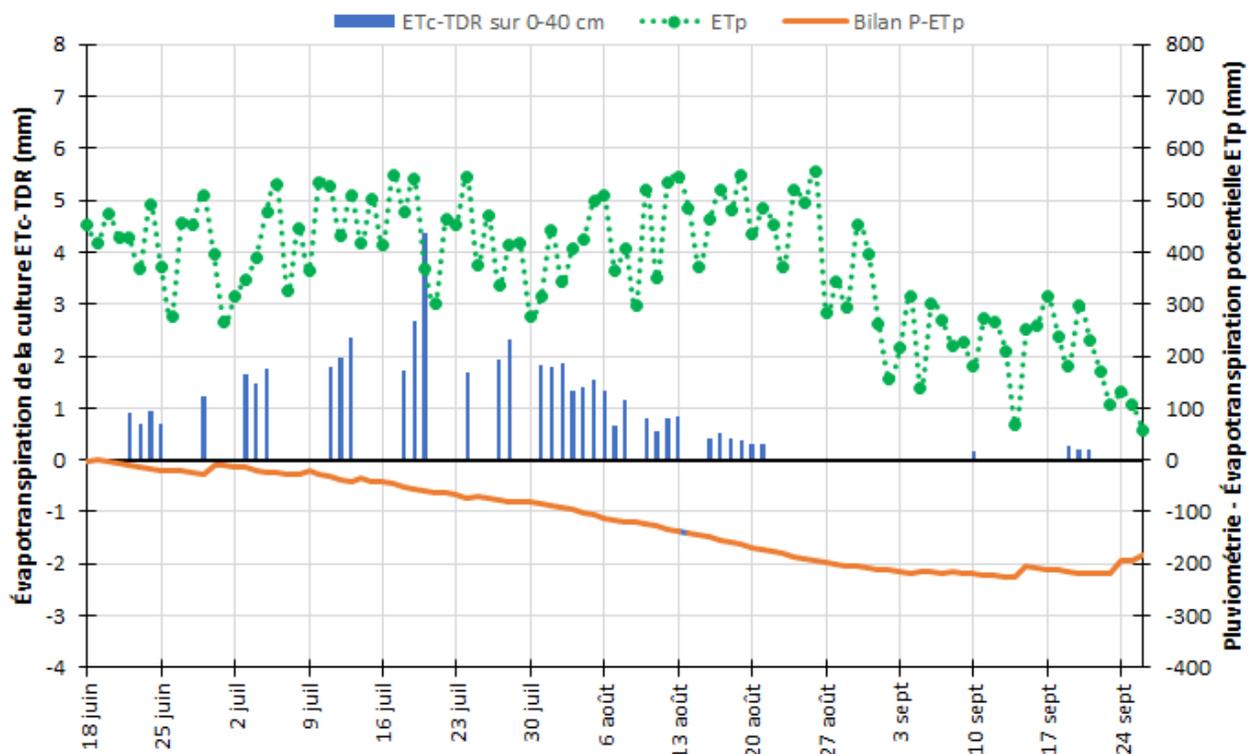


Figure 52. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($ET_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P\text{-}ET_p$) (mm), site Baie Saint-Paul2, saison 2021.

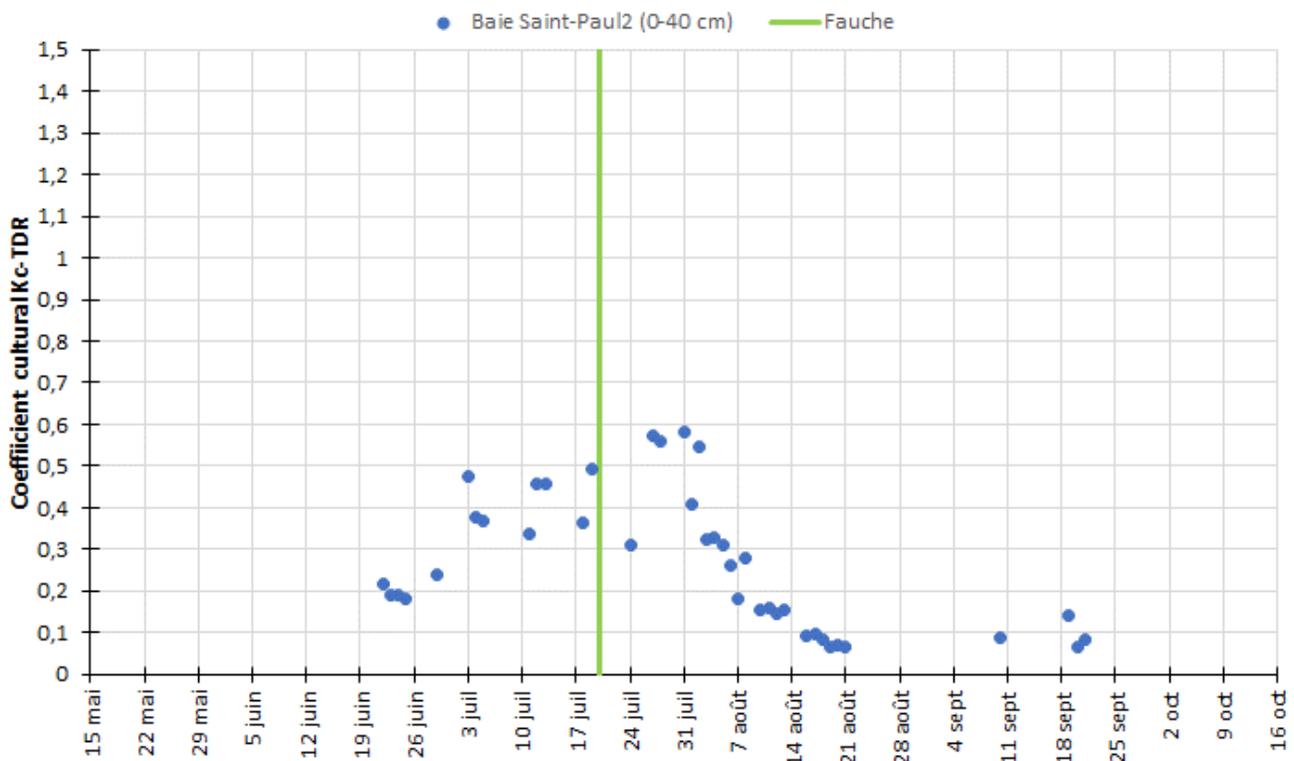


Figure 53. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Baie Saint-Paul2, saison 2021.

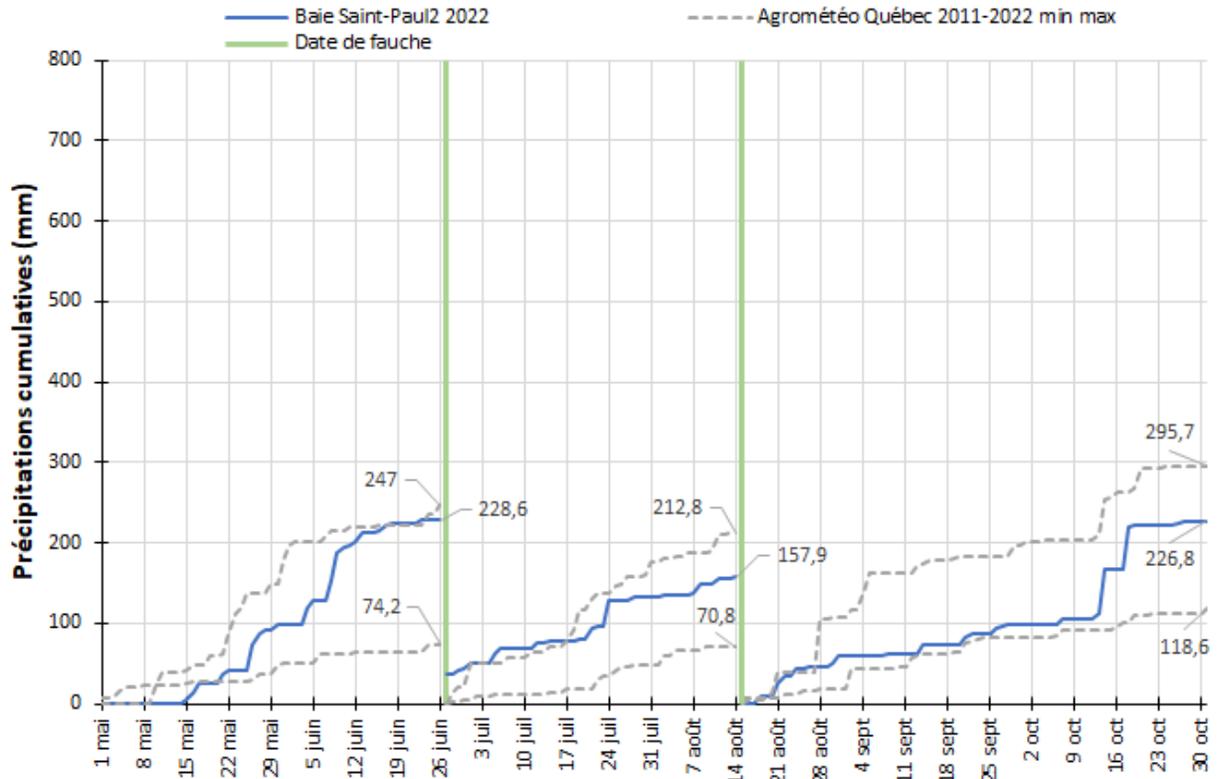


Figure 54. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul2, saison 2022.

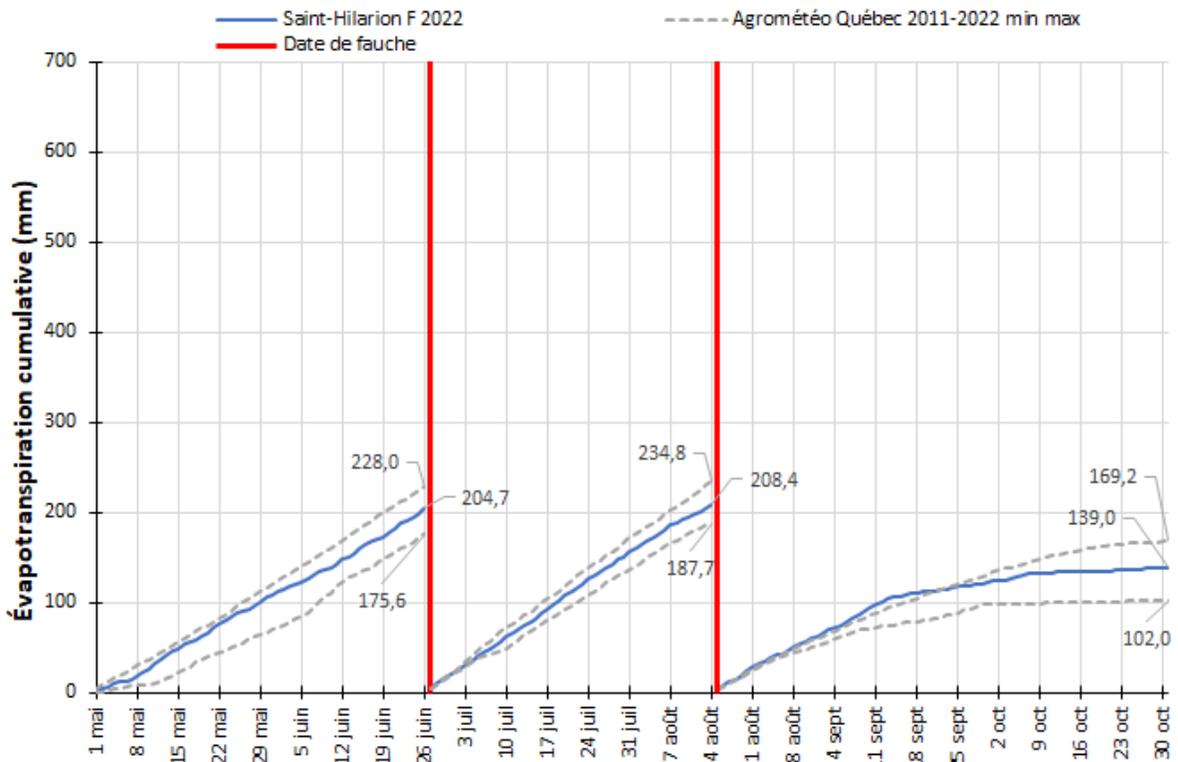


Figure 55. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Hilarion F entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Baie Saint-Paul2, saison 2022.

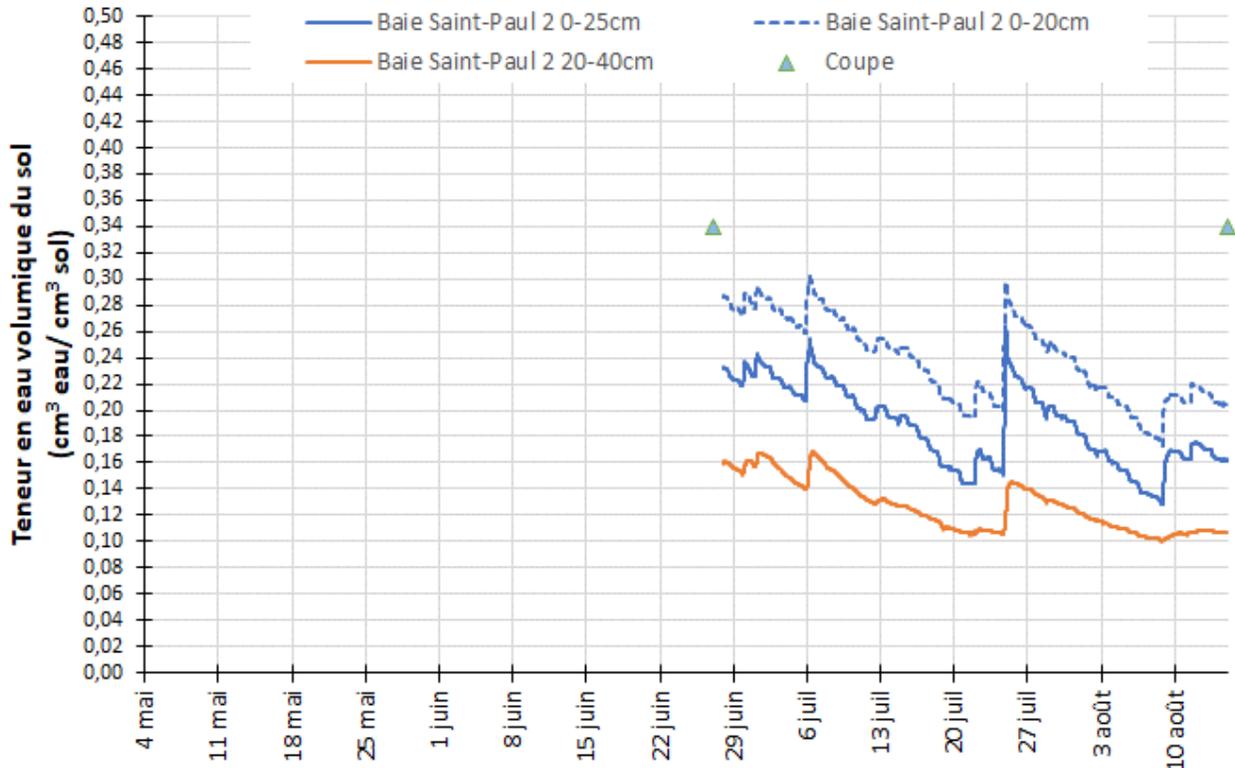


Figure 56. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Baie Saint-Paul2, saison 2022.

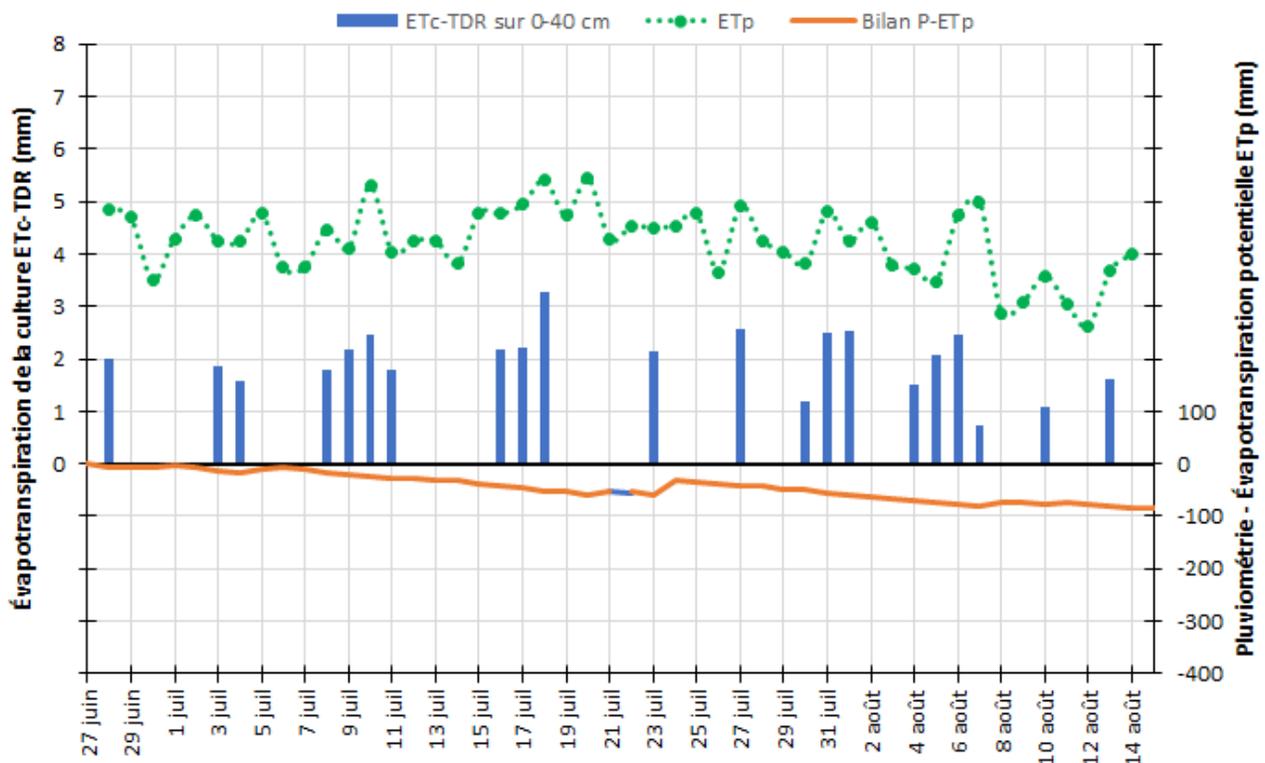


Figure 57. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Baie Saint-Paul2, saison 2022.

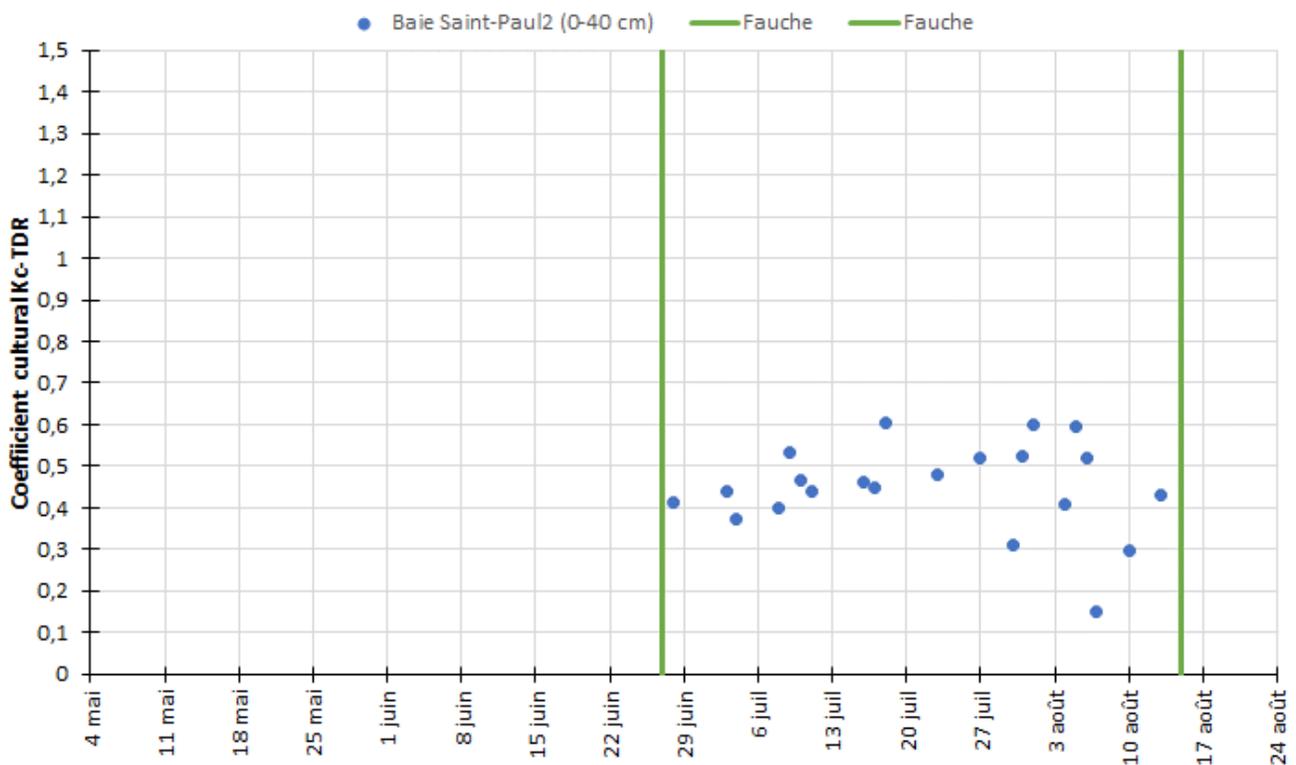


Figure 58. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Baie Saint-Paul2, saison 2022.

10.4 Saint-Albert

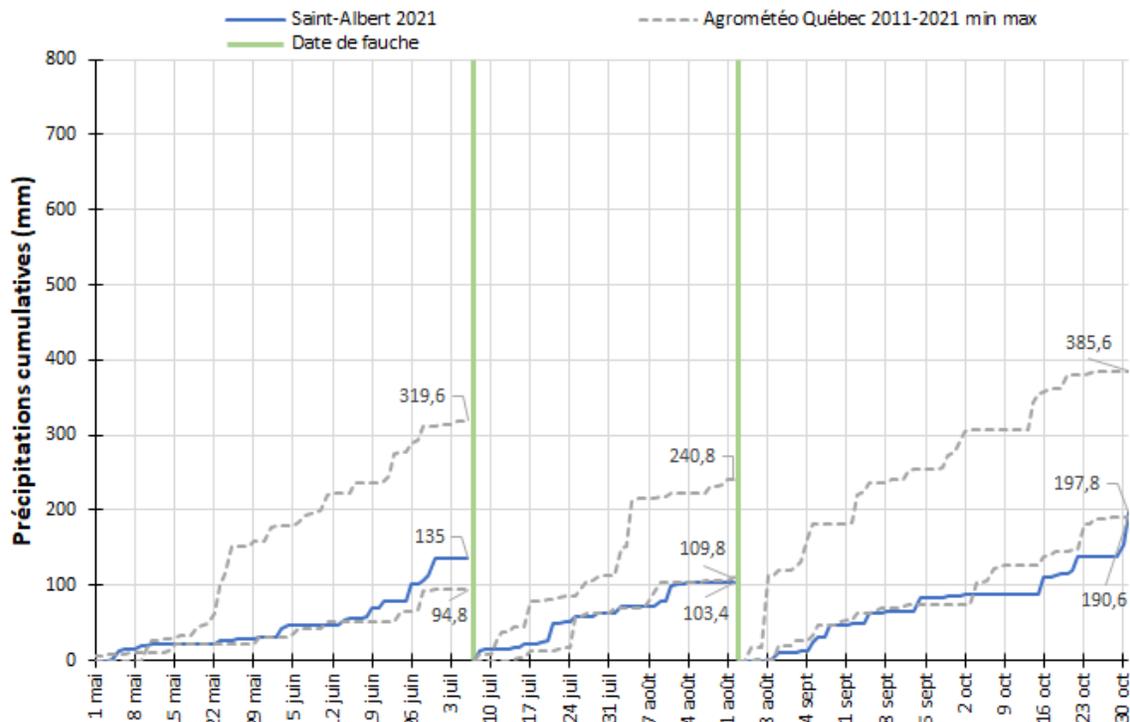


Figure 59. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Albert, saison 2021.

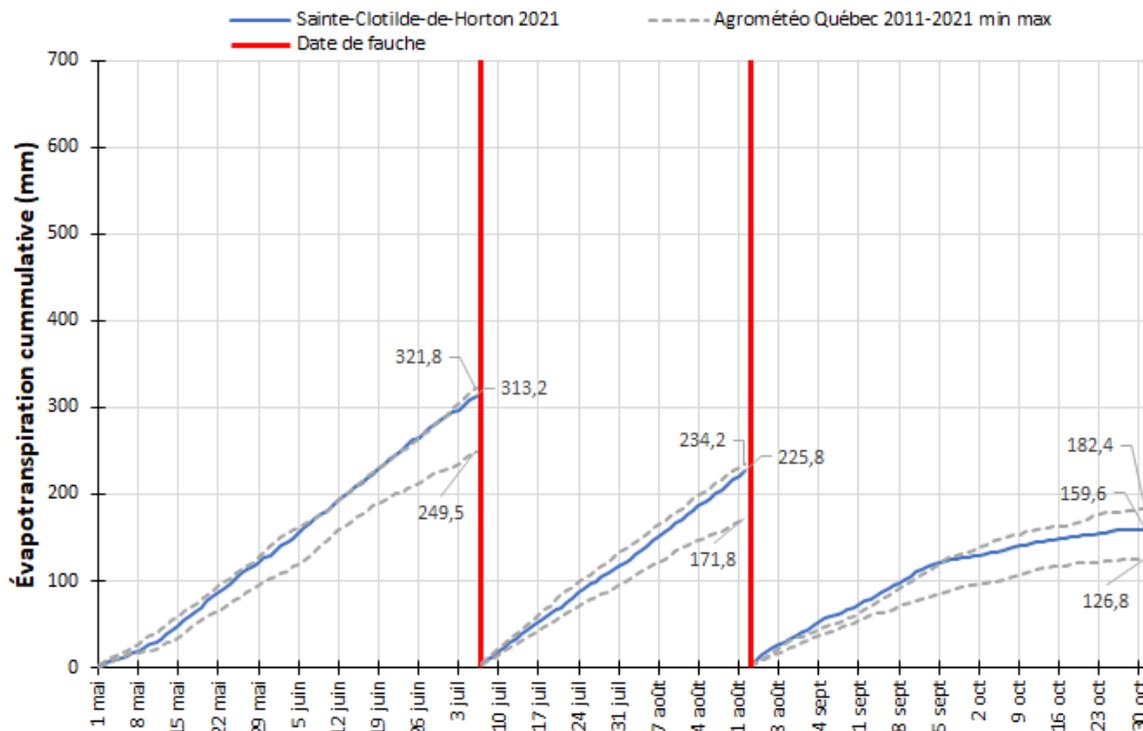


Figure 60. Évapotranspiration potentielle cummulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Sainte-Clotilde-de-Horton entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Albert, saison 2021.

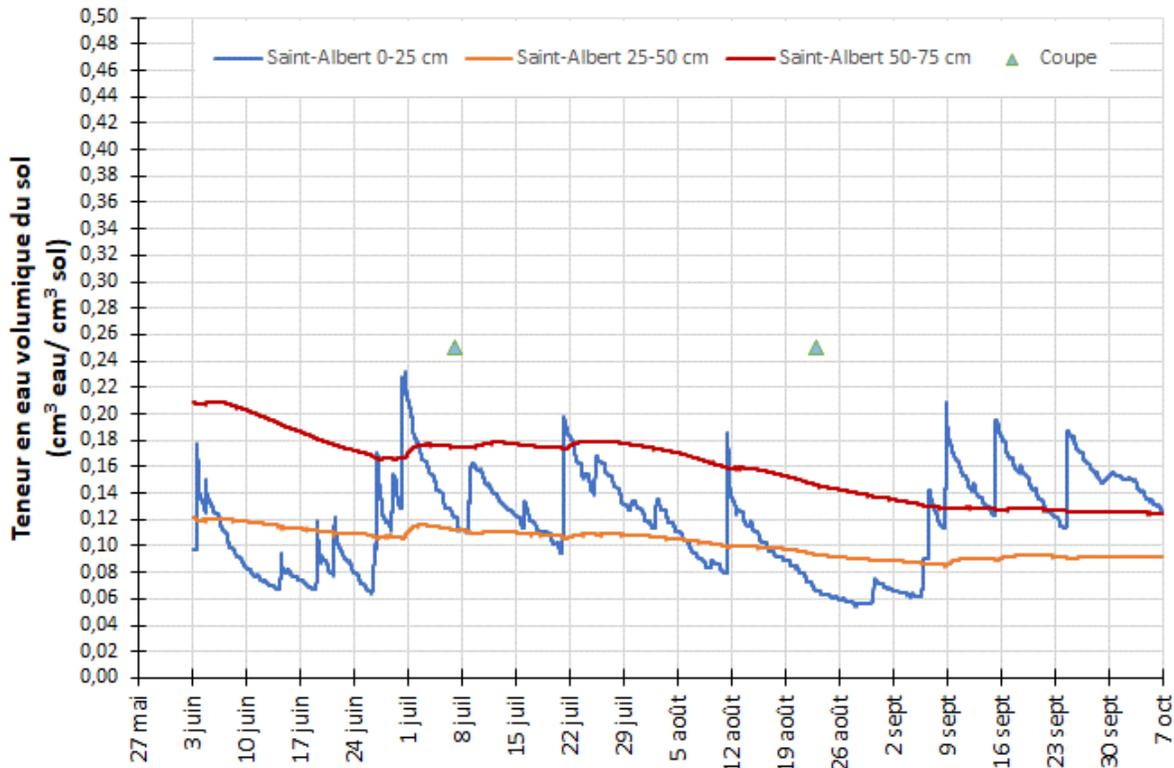


Figure 61. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Saint-Albert, saison 2021.

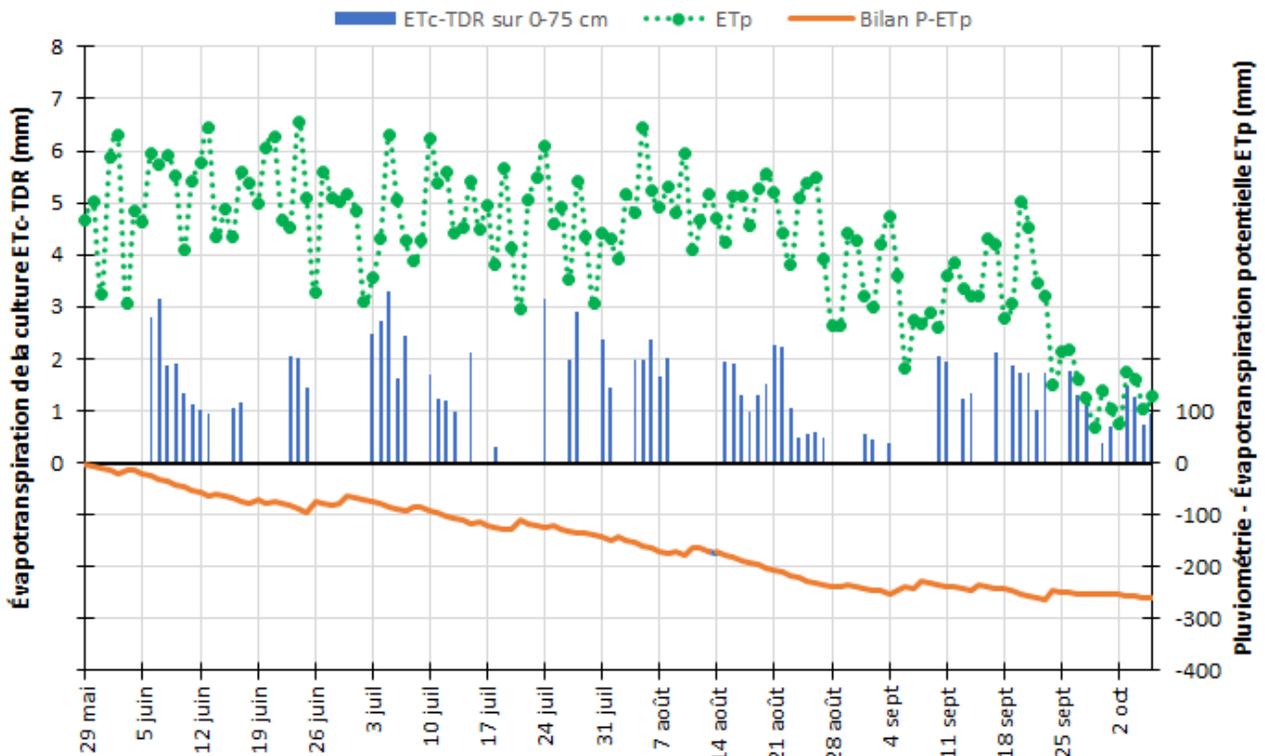


Figure 62. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($ET_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P\text{-}ET_p$) (mm), site Saint-Albert, saison 2021.

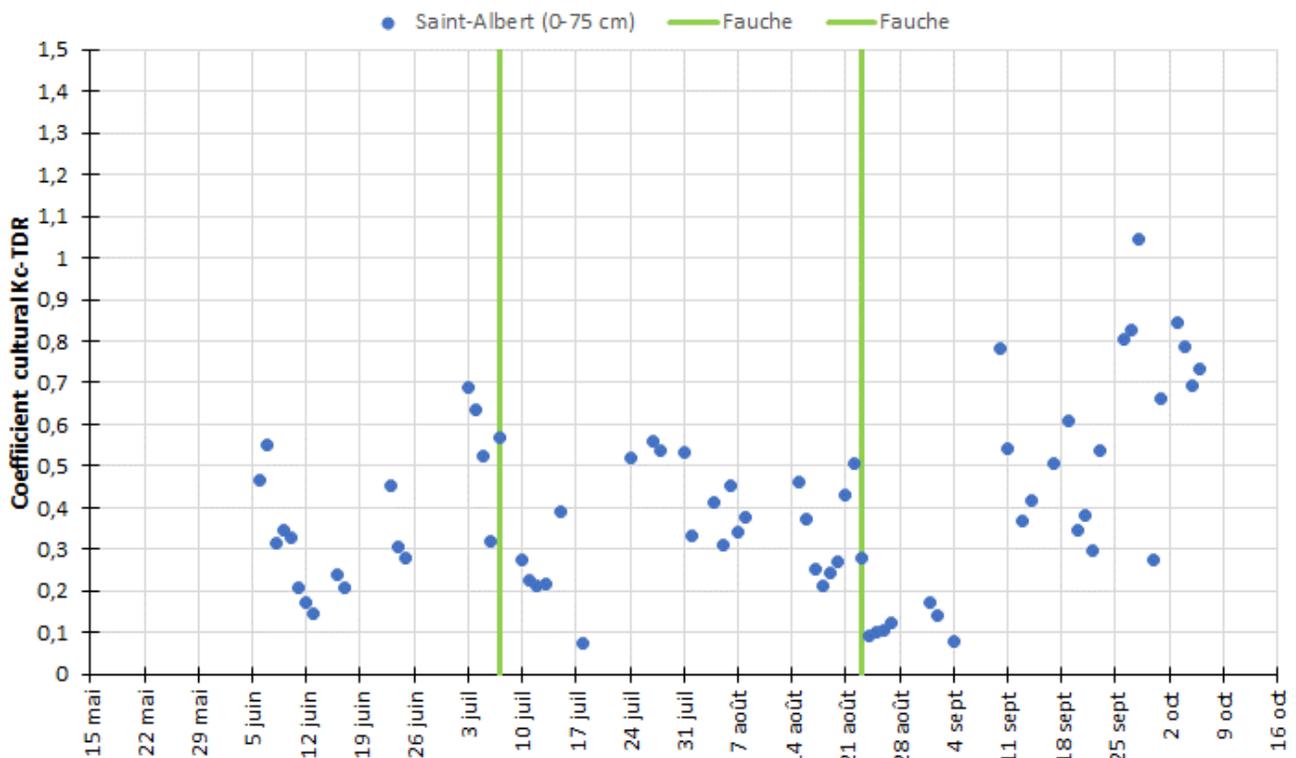


Figure 63. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Saint-Albert, saison 2021.

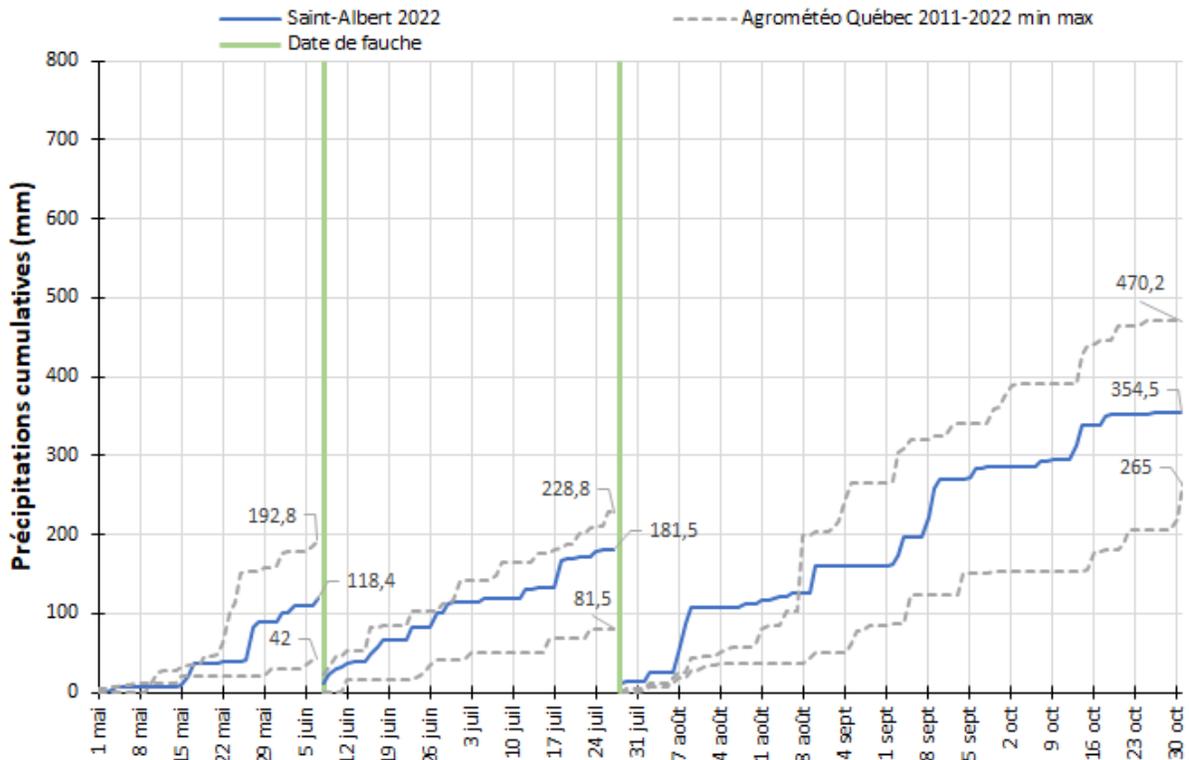


Figure 64. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Albert, saison 2022.

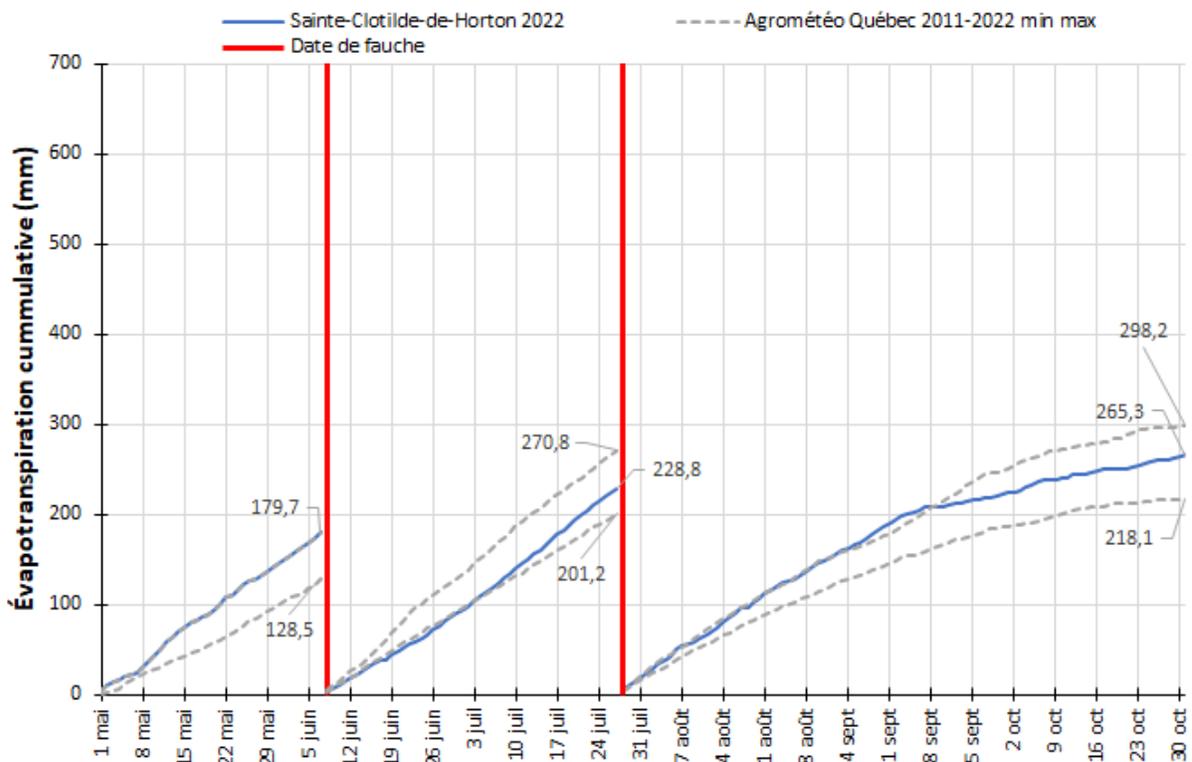


Figure 65. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Sainte-Clotilde-de-Horton entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Albert, saison 2022.

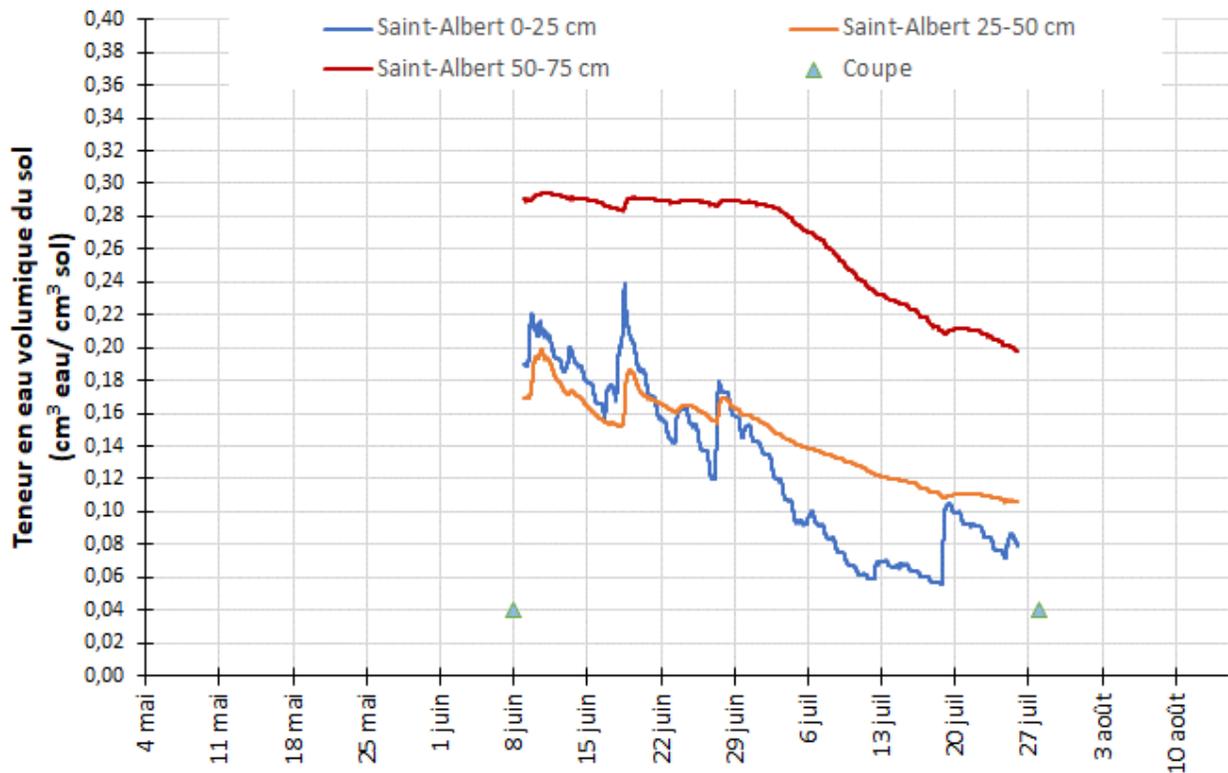


Figure 66. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Saint-Albert, saison 2022.

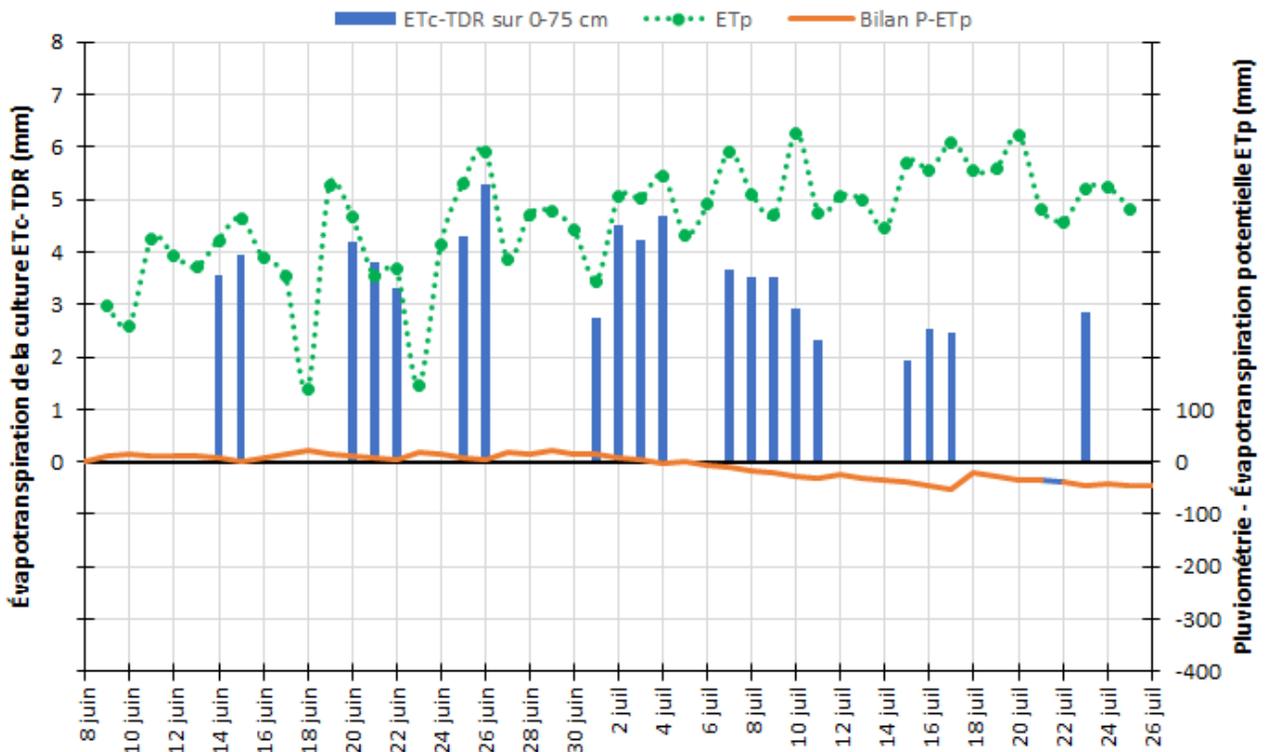


Figure 67. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Saint-Albert, saison 2022.

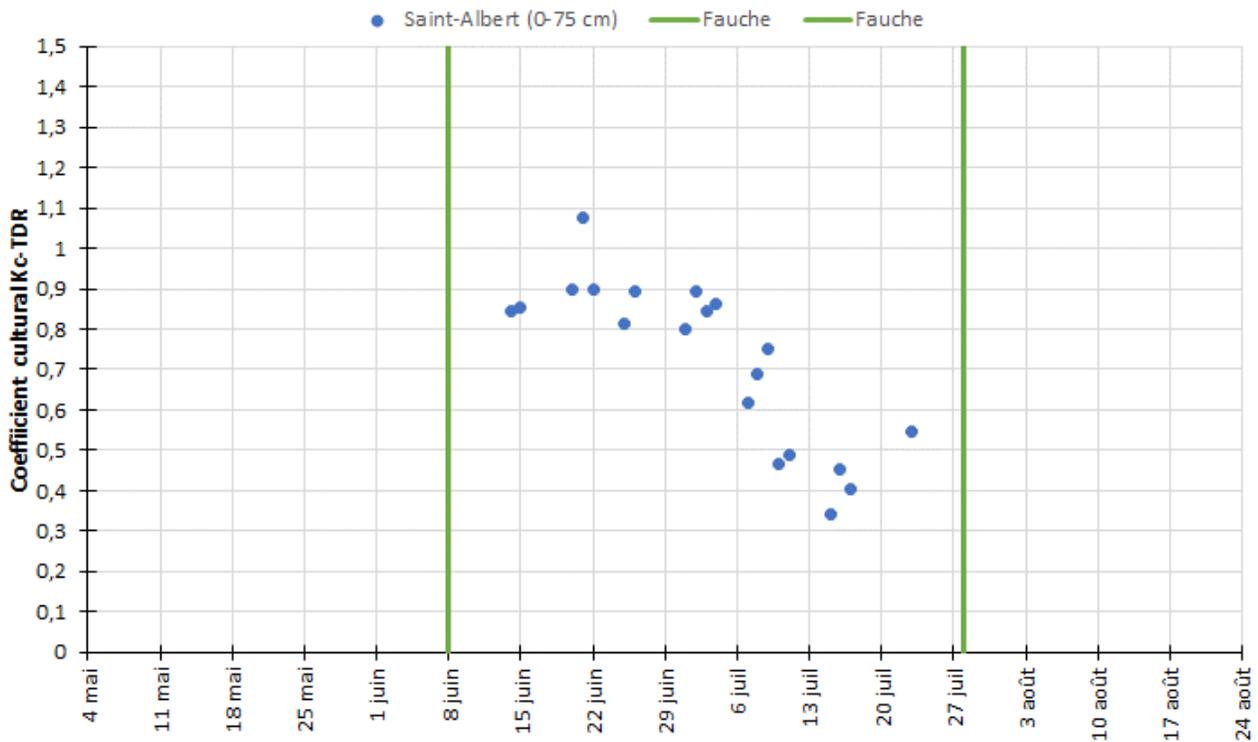


Figure 68. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Albert, saison 2022.

10.5 Saint-Jean-Port-Joli

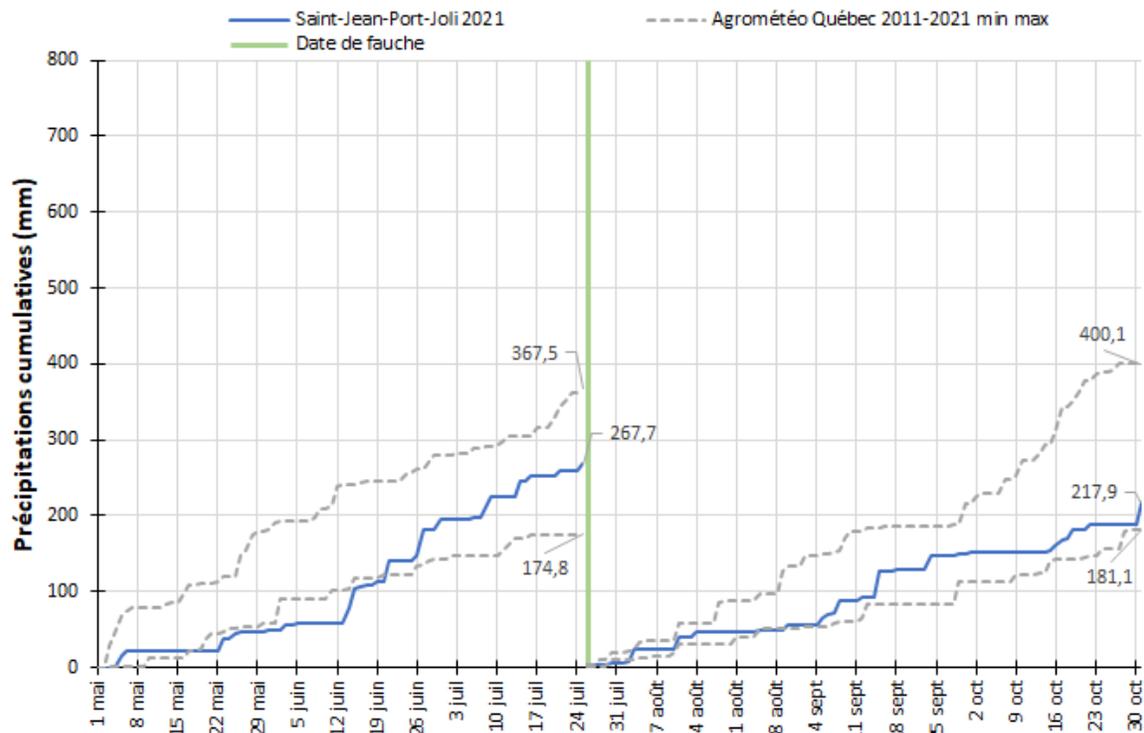


Figure 69. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021.

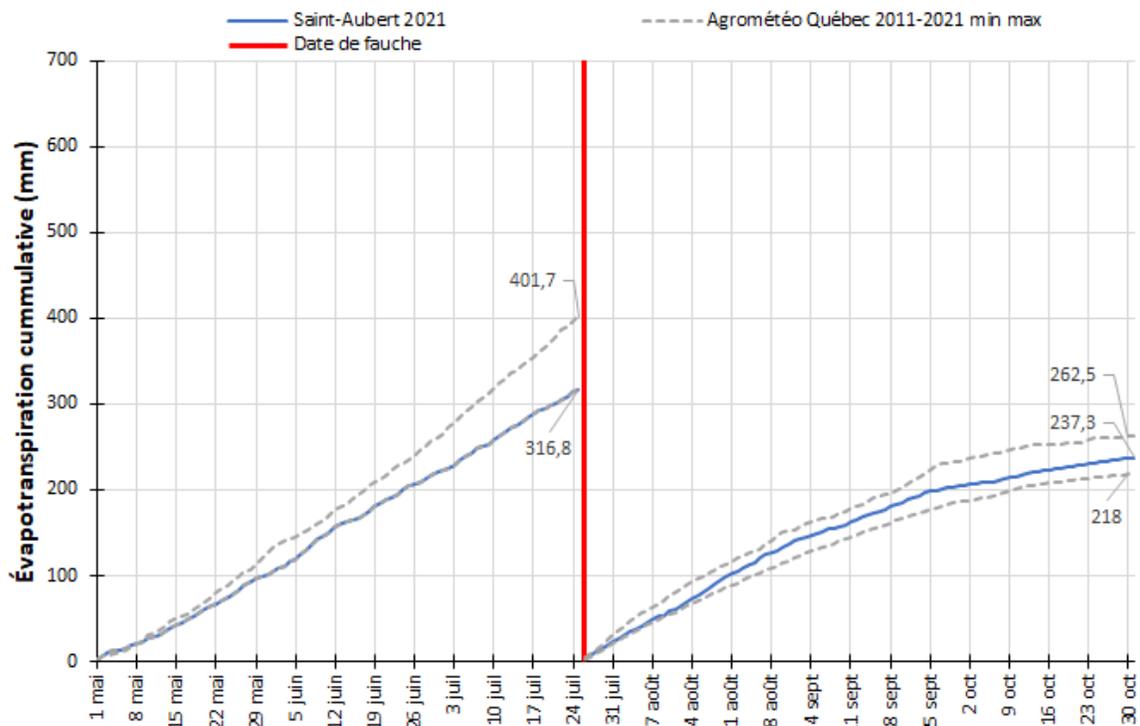


Figure 70. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Aubert entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021.

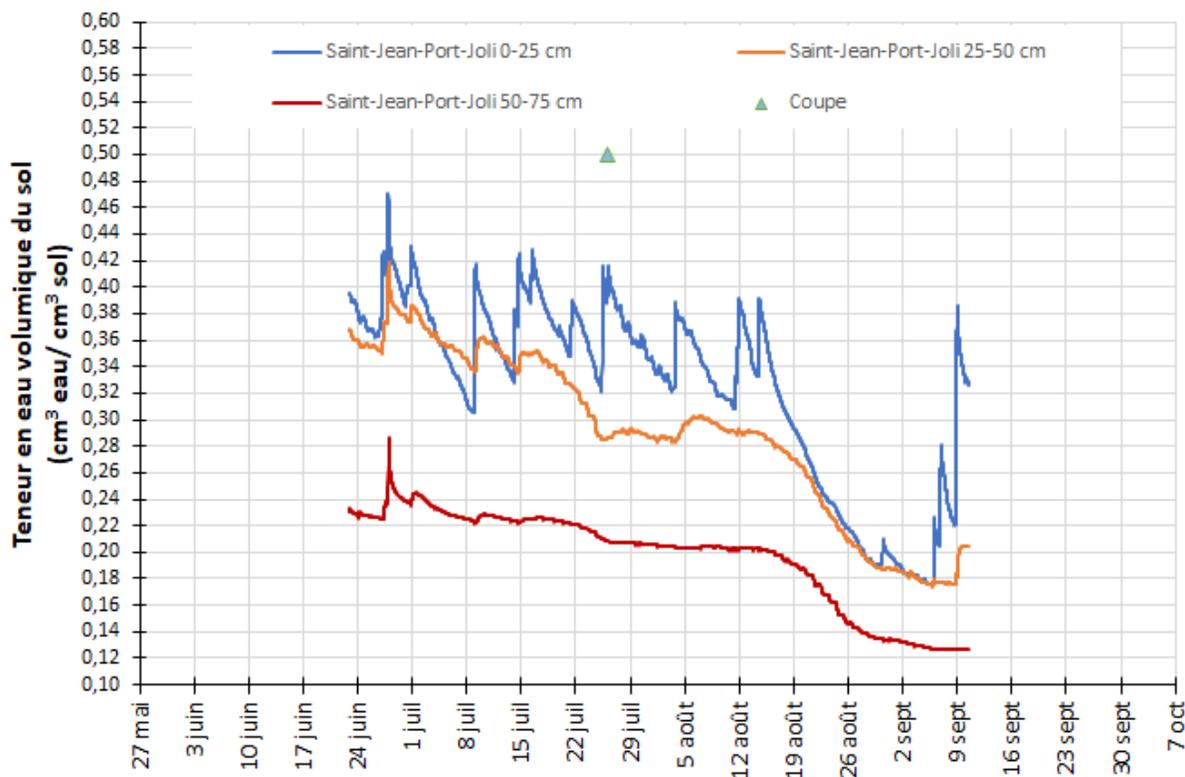


Figure 71. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021.

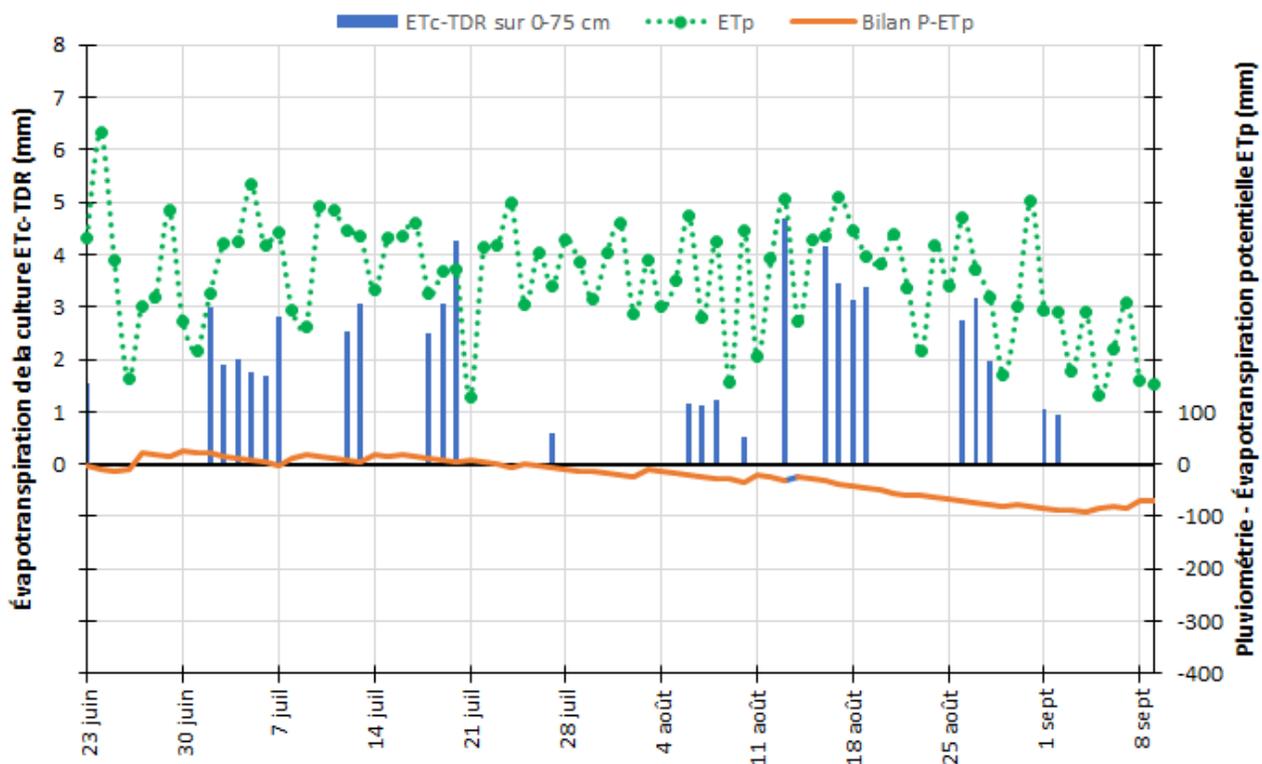


Figure 72. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021.

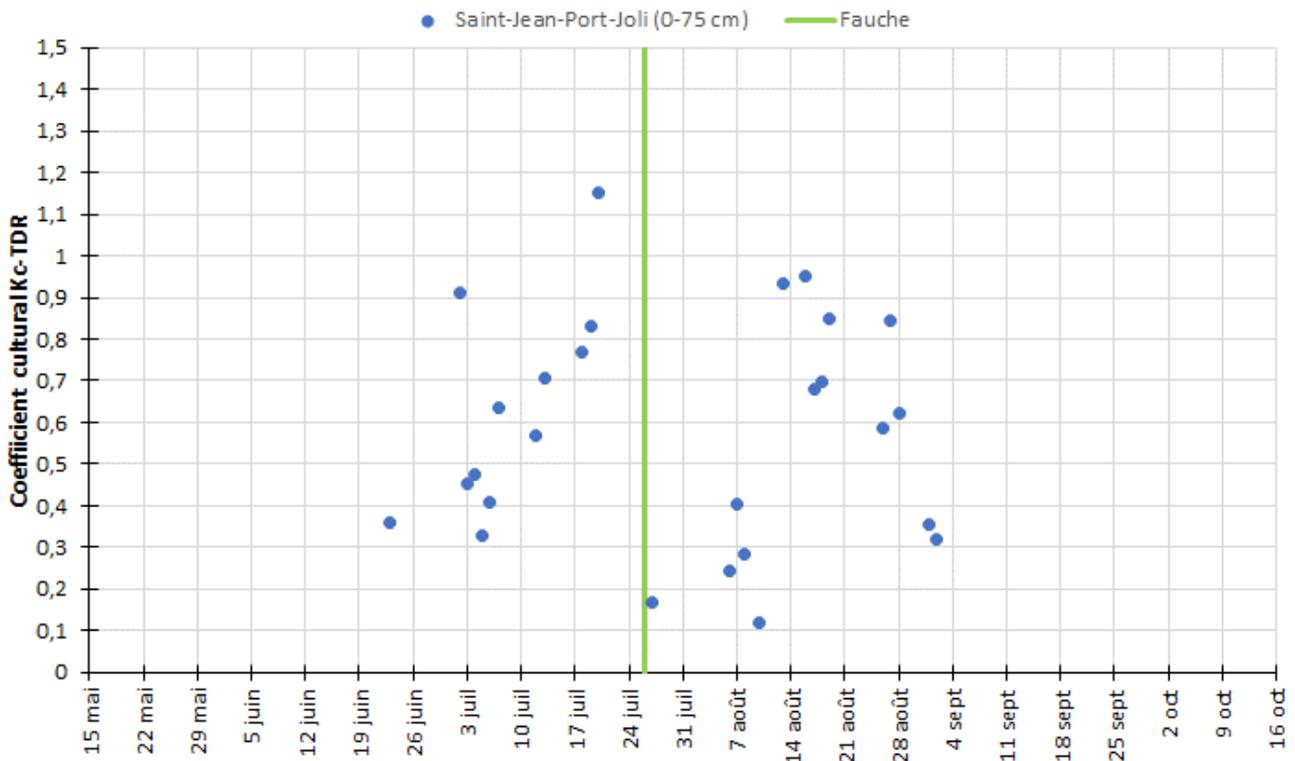


Figure 73. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2021.

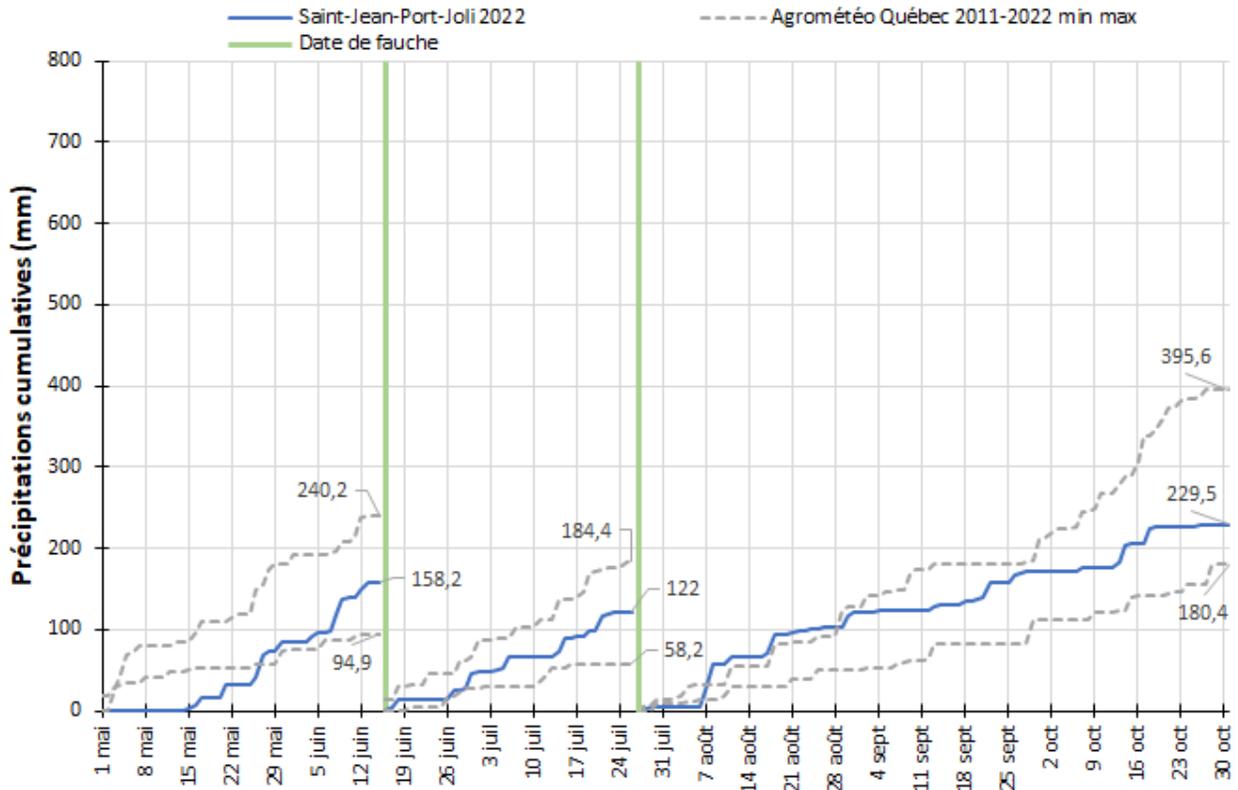


Figure 74. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022.

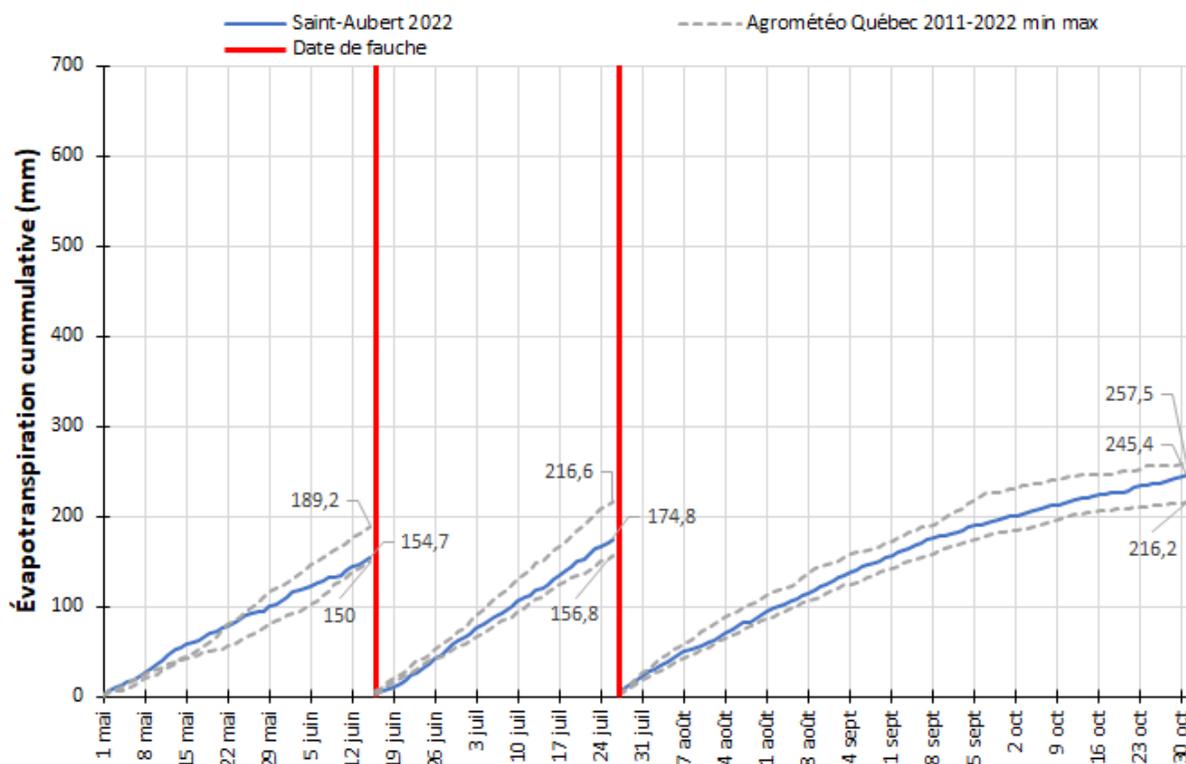


Figure 75. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Aubert entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022.

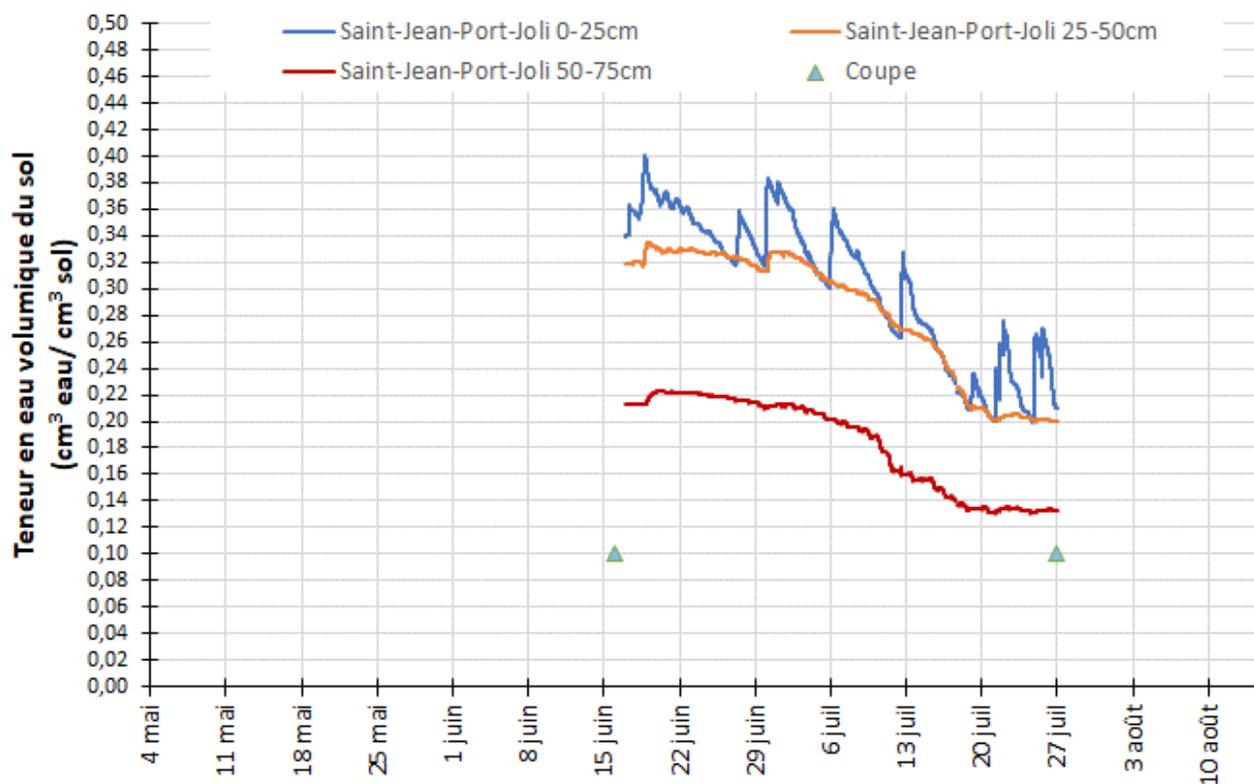


Figure 76. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022.

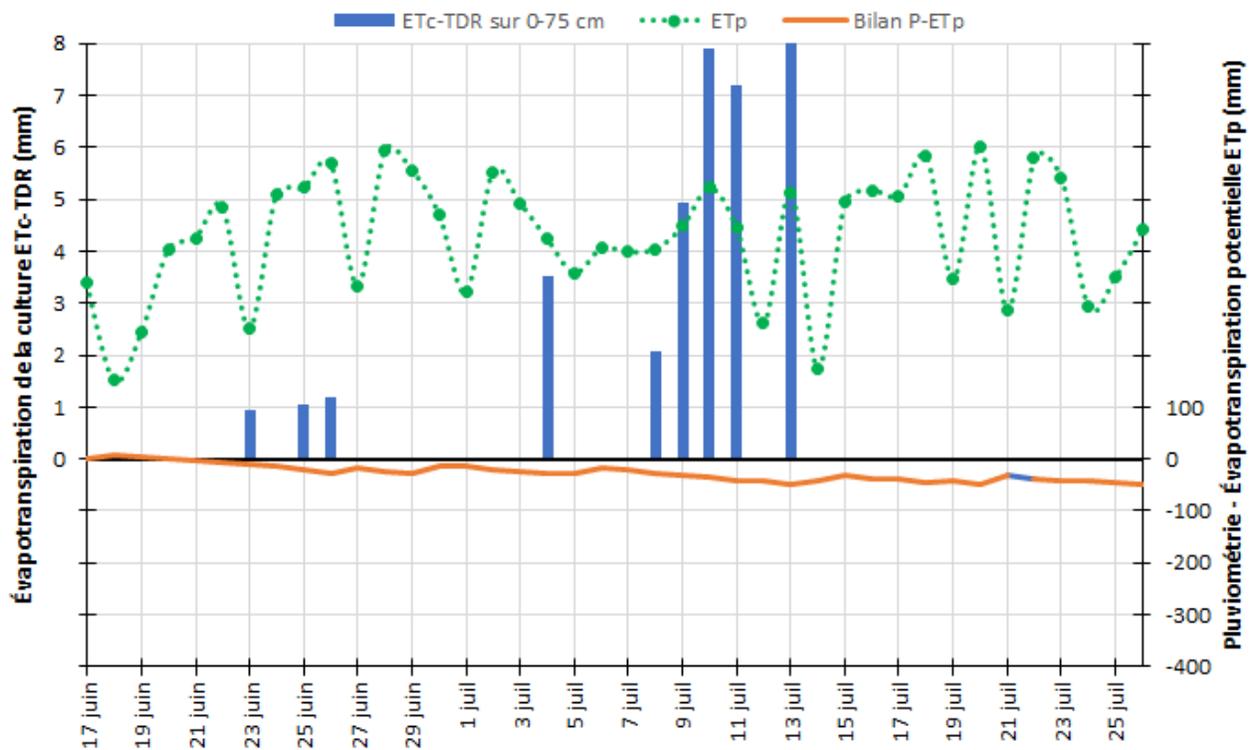


Figure 77. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022.

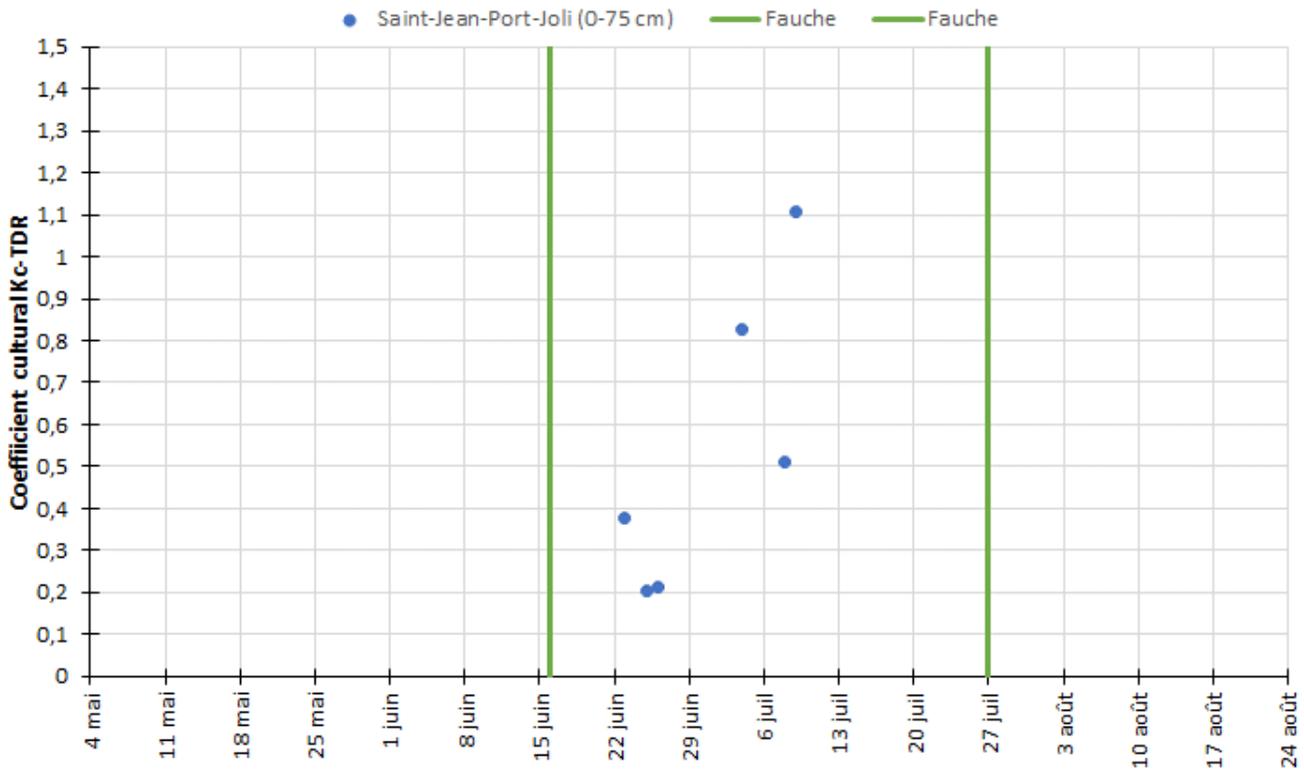


Figure 78. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Jean-Port-Joli, saison 2022.

10.6 Saint-Nicolas

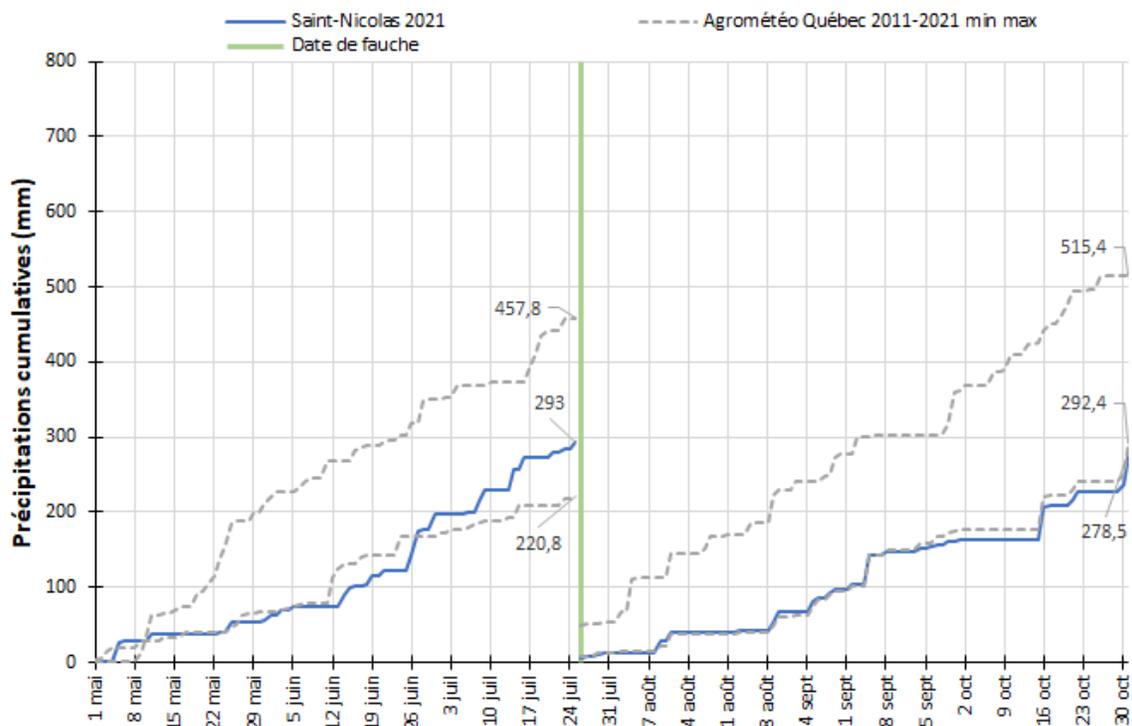


Figure 79. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Nicolas, saison 2021.

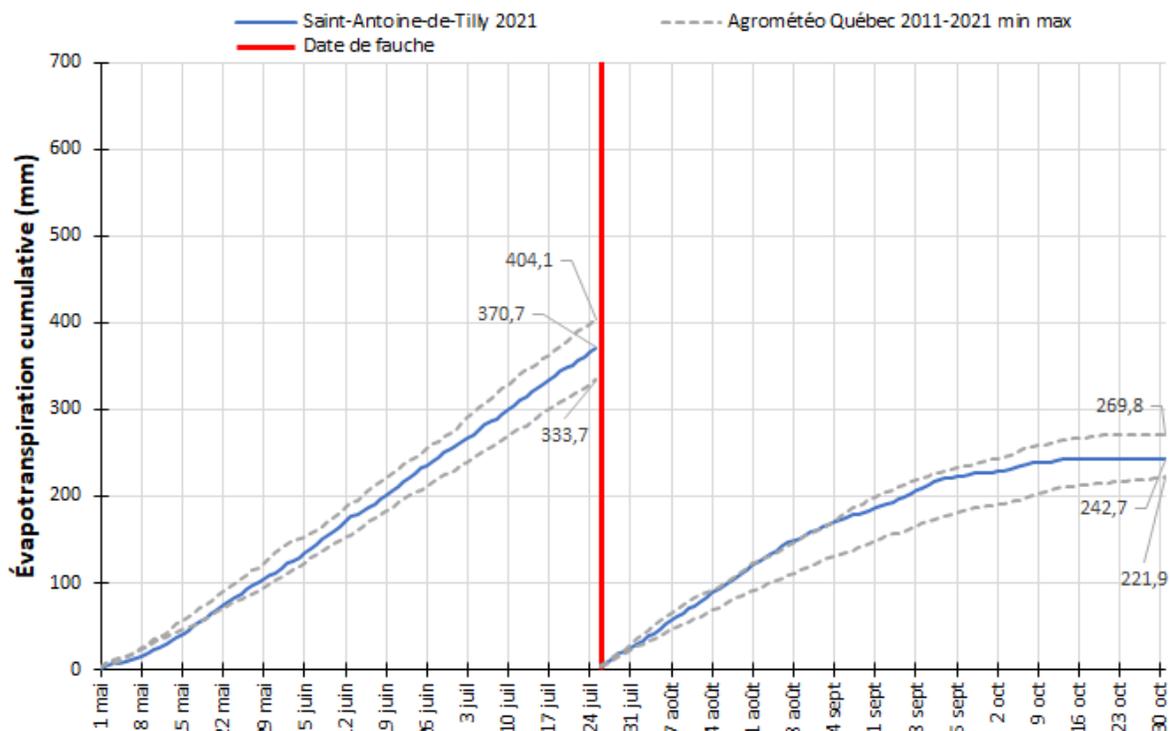


Figure 80. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Antoine-de-Tilly entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Nicolas, saison 2021.

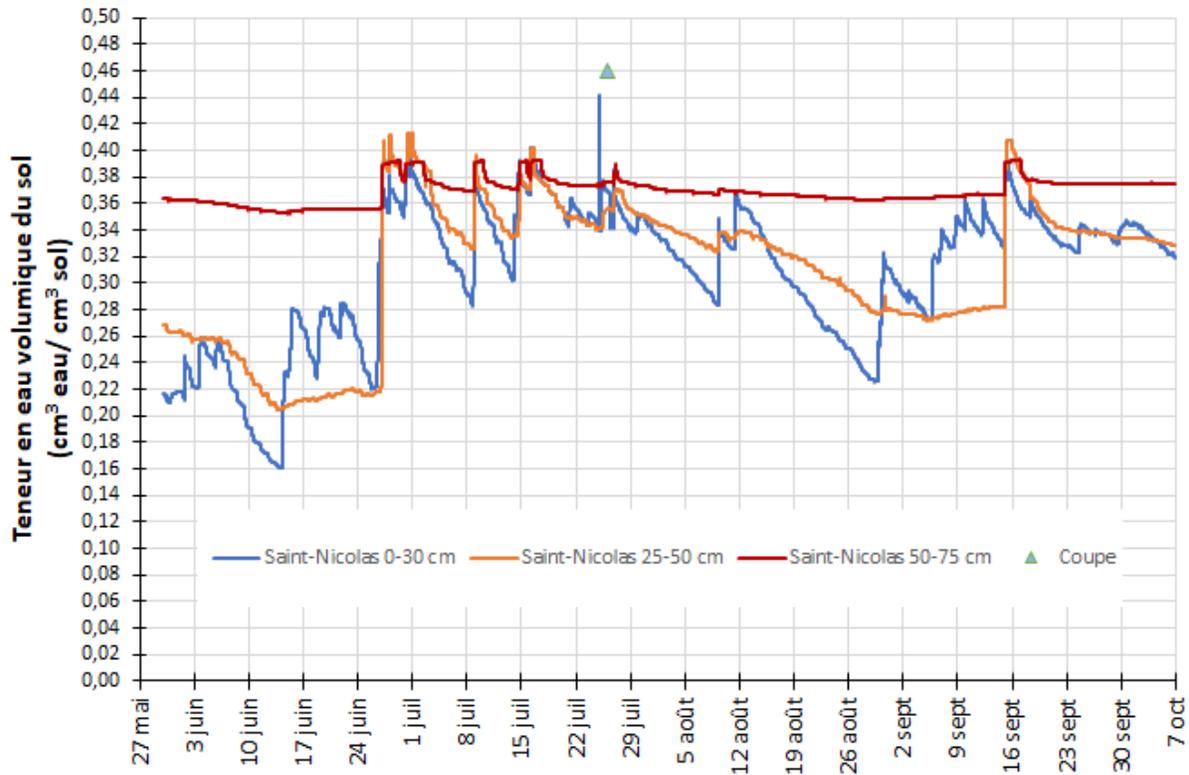


Figure 81. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Saint-Nicolas, saison 2021.

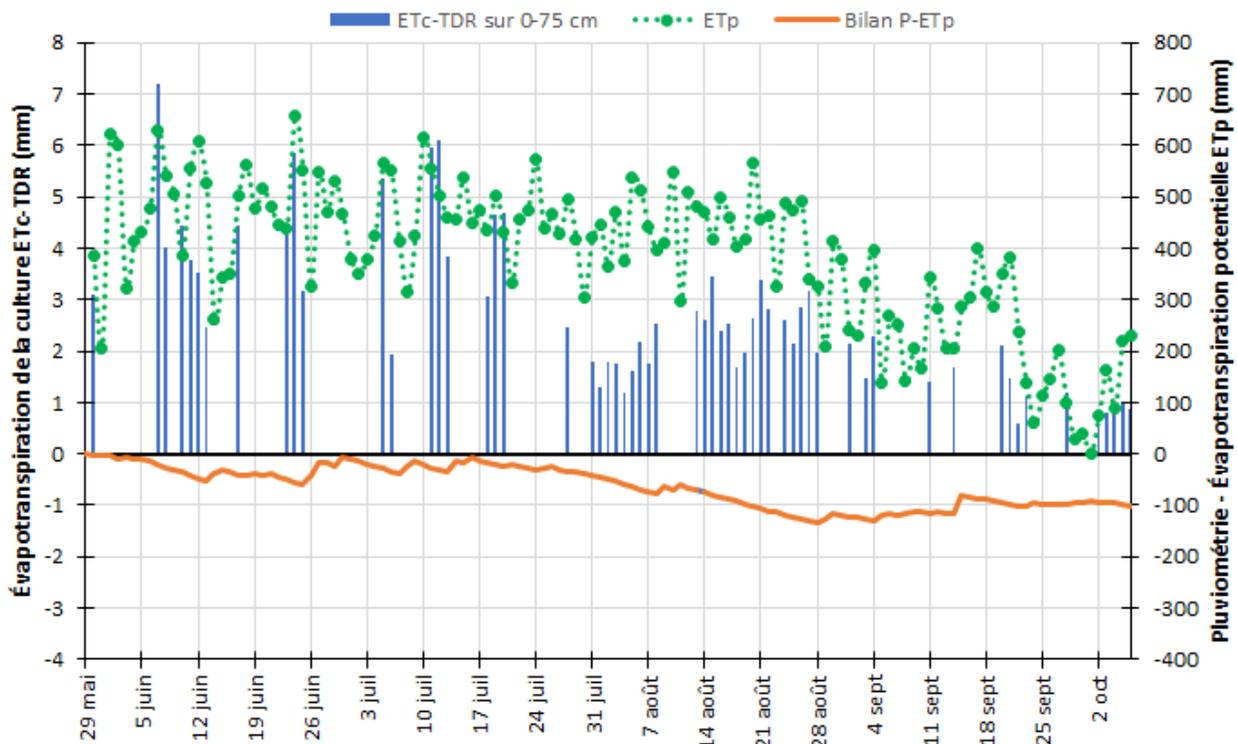


Figure 82. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($ET_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P\text{-}ET_p$) (mm), site Saint-Nicolas, saison 2021.

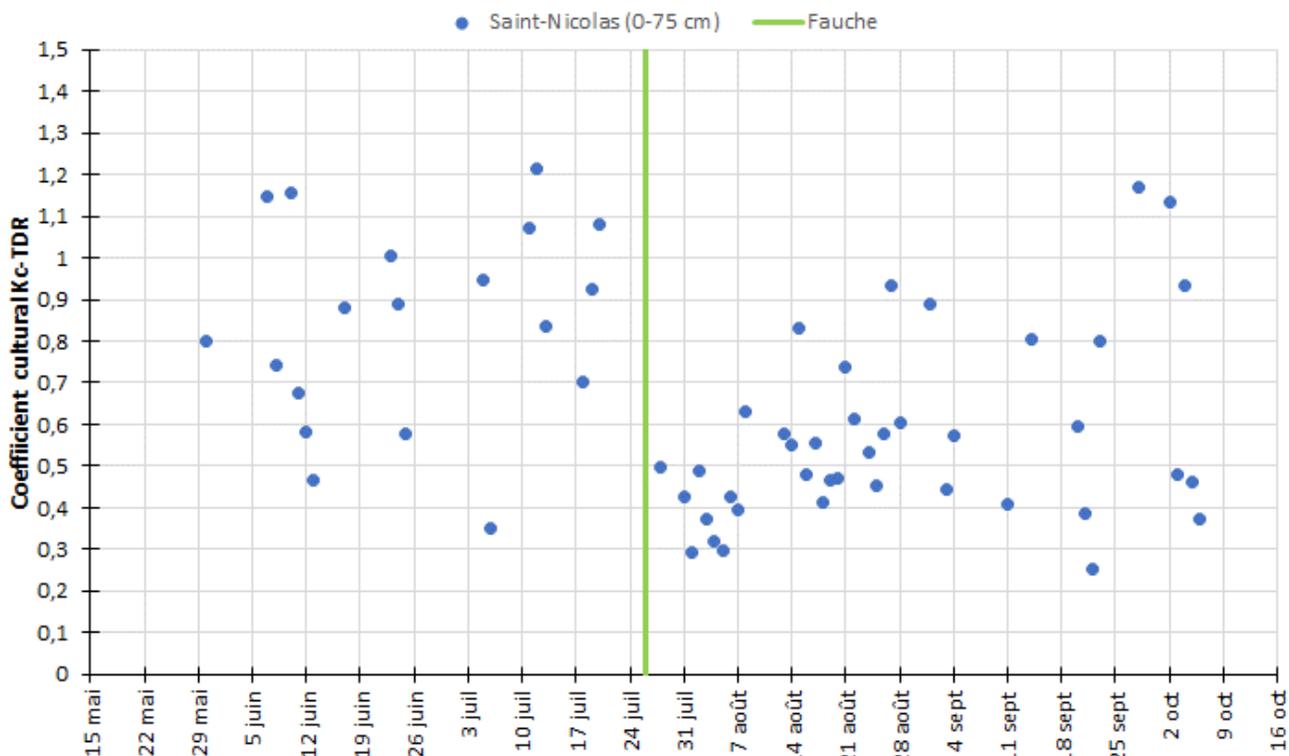


Figure 83. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Saint-Nicolas, saison 2021.

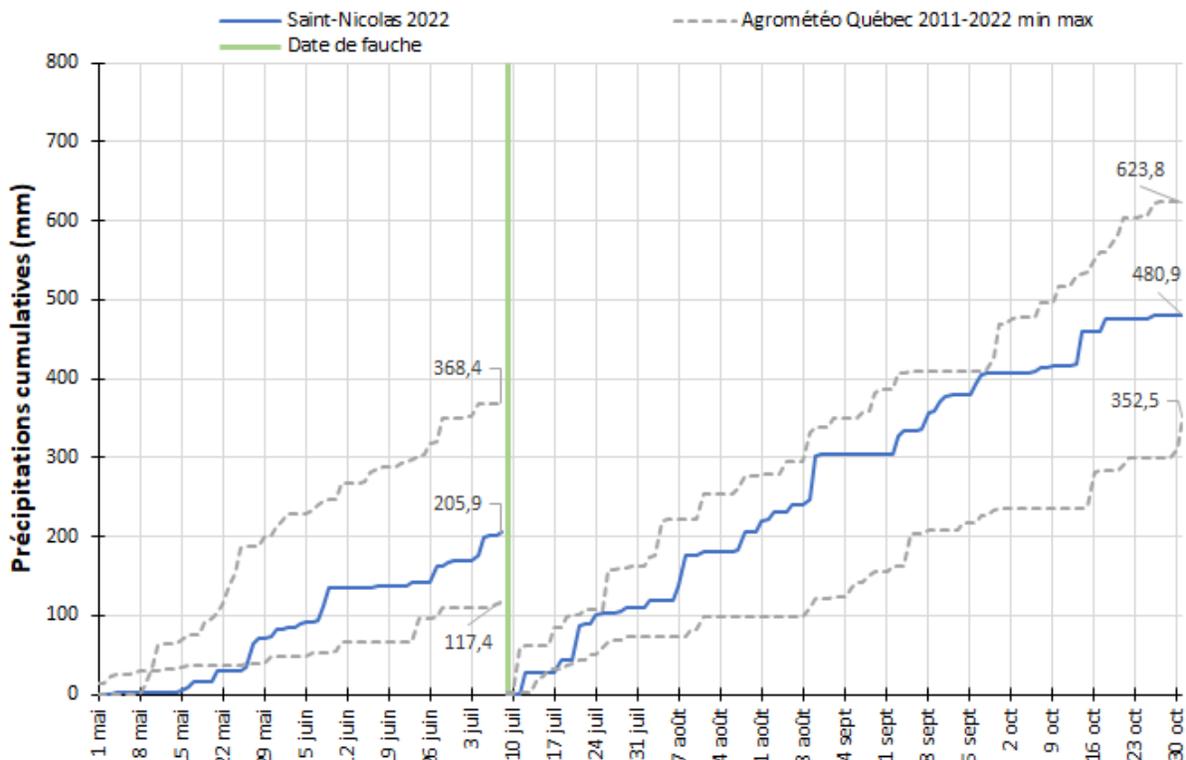


Figure 84. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Nicolas, saison 2022.

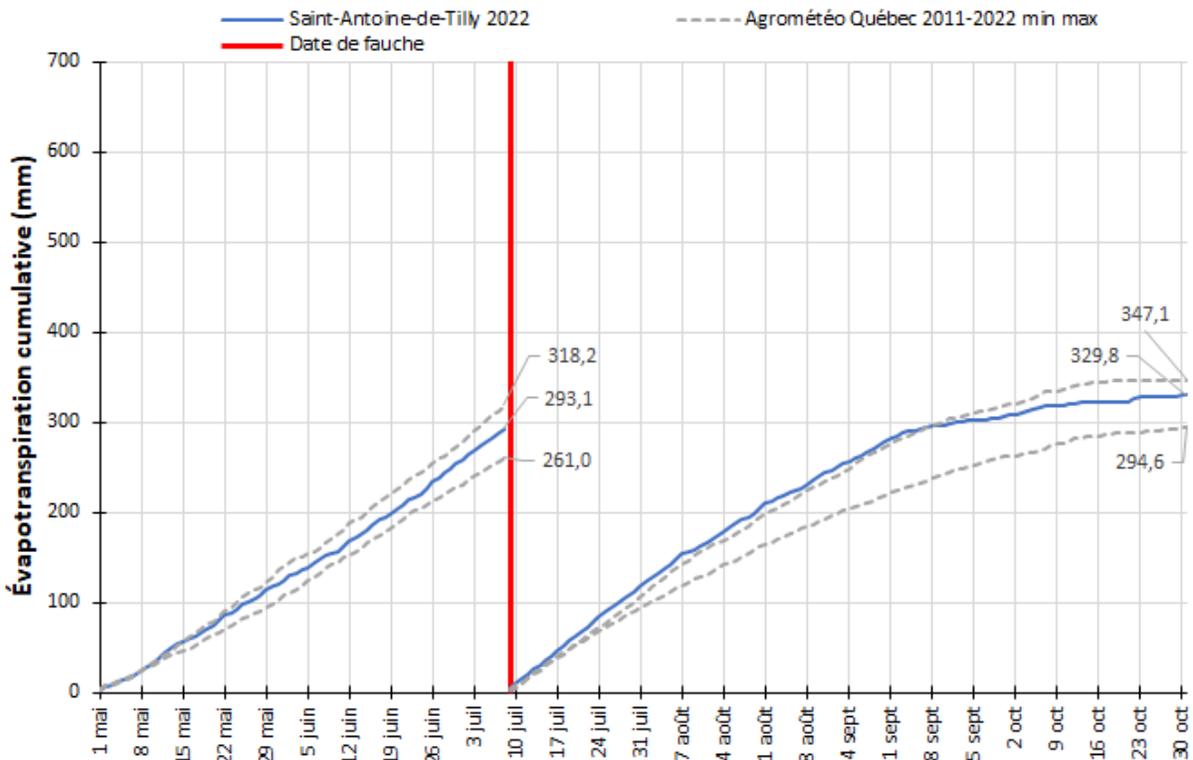


Figure 85. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Antoine-de-Tilly entre 2011 et 2022 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Nicolas, saison 2022.

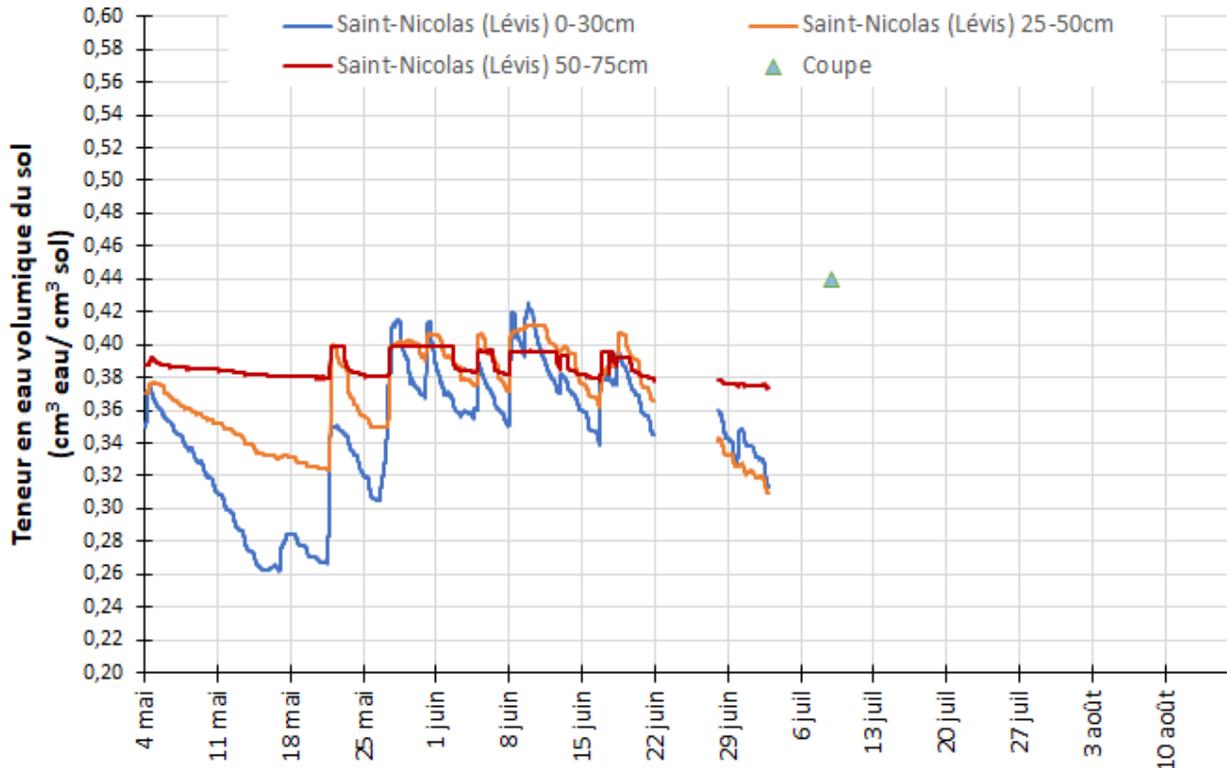


Figure 86. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm³ eau / cm³ sol) selon la profondeur au site Saint-Nicolas, saison 2022.

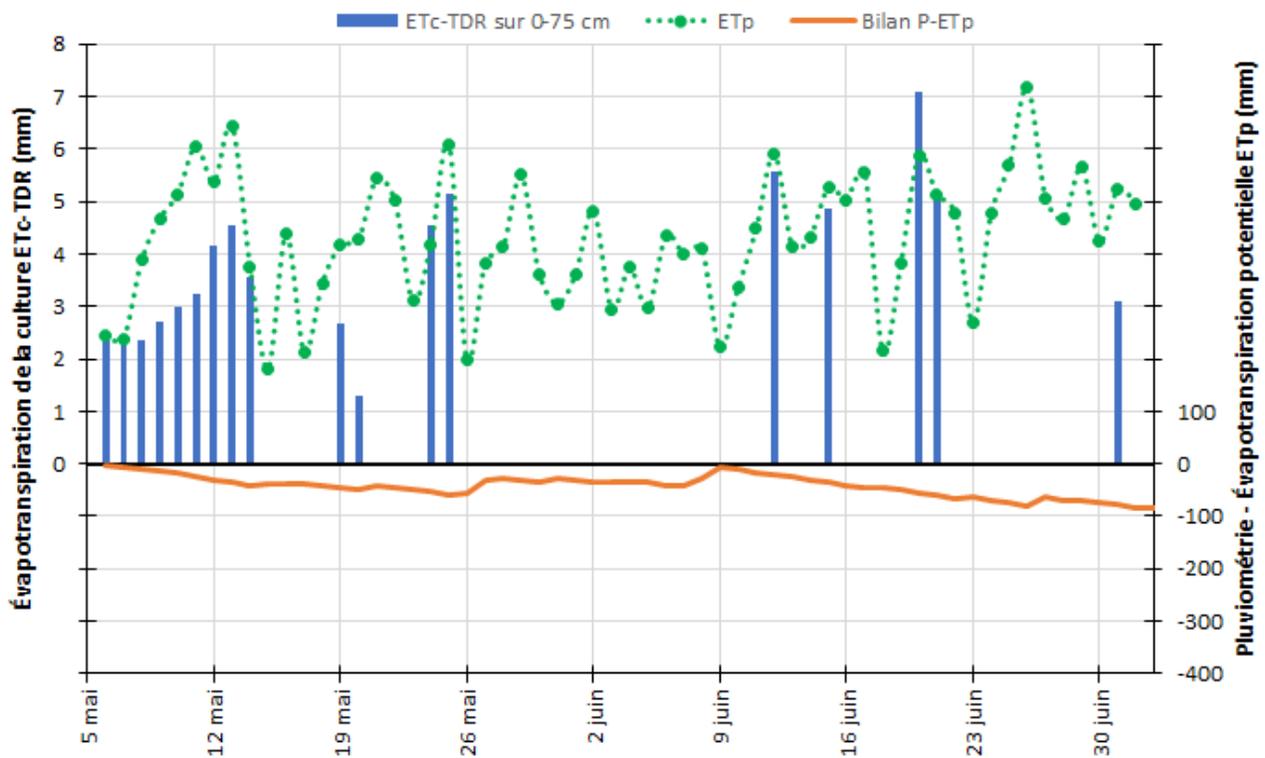


Figure 87. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Saint-Nicolas, saison 2022.

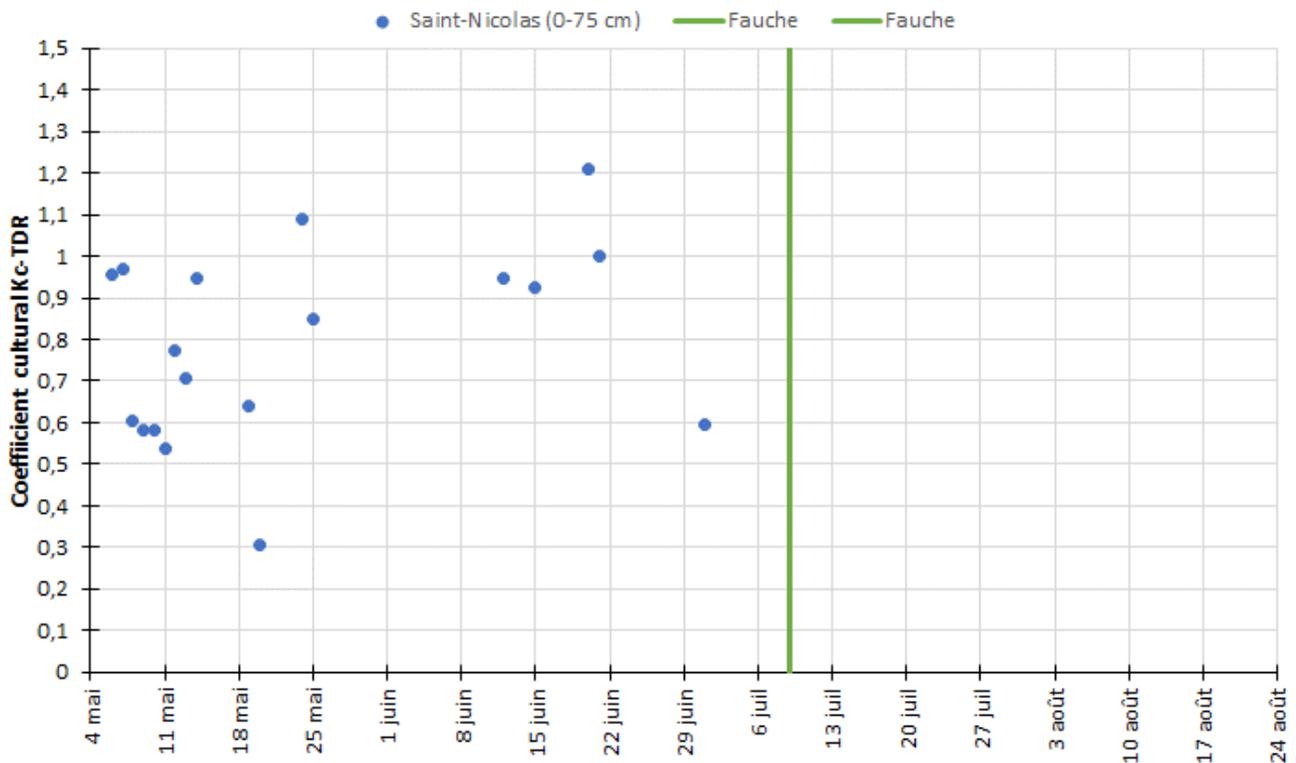


Figure 88. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Nicolas, saison 2022.

10.7 Saint-Paul-de-Montminy

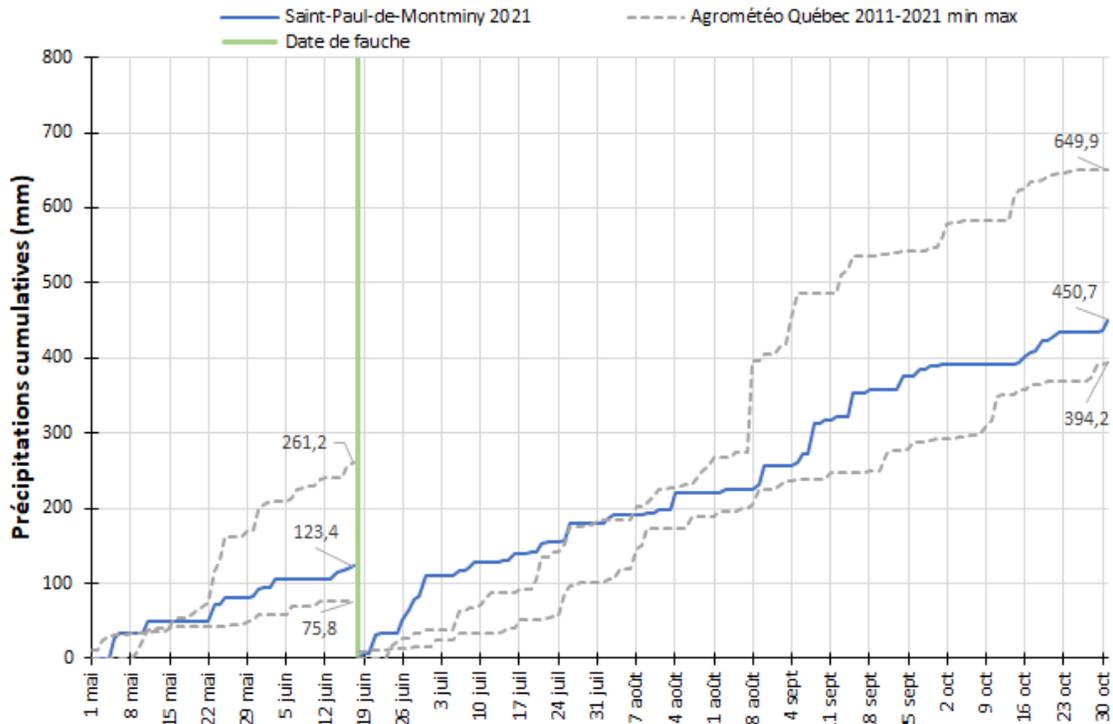


Figure 89. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021.

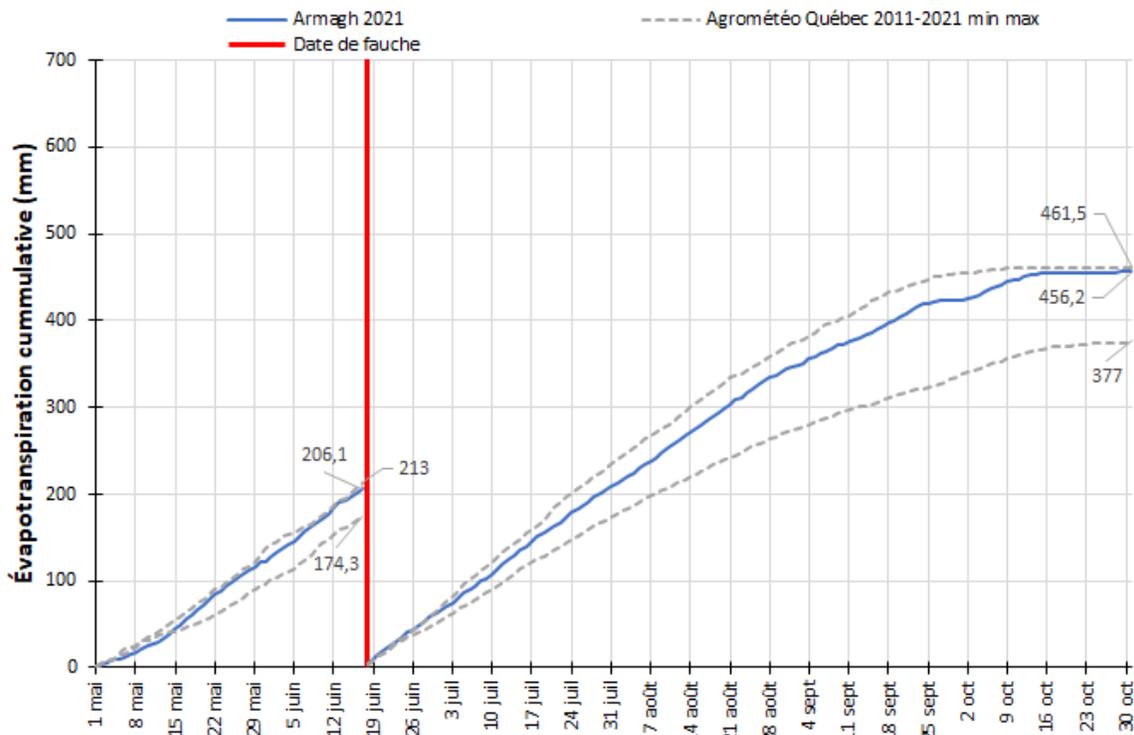


Figure 90. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Armagh entre 2011 et 2021 (mm) en fonction de la fauche effectuée, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021.

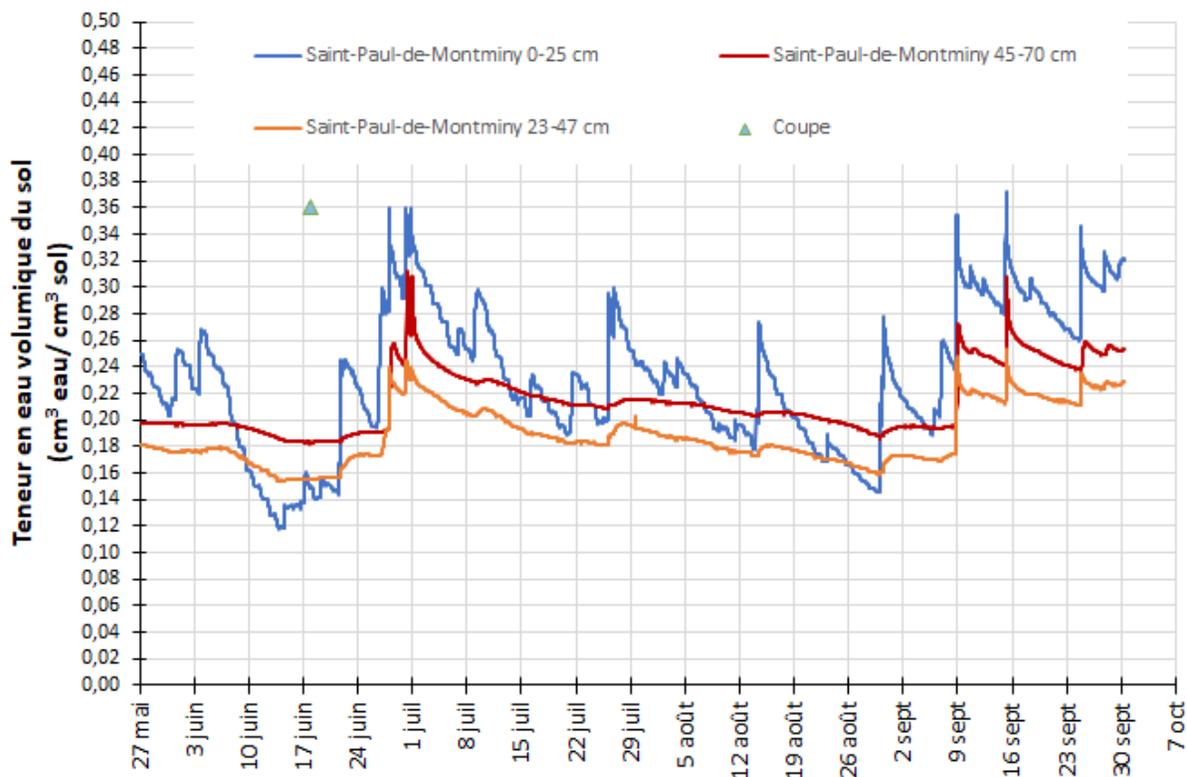


Figure 91. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021.

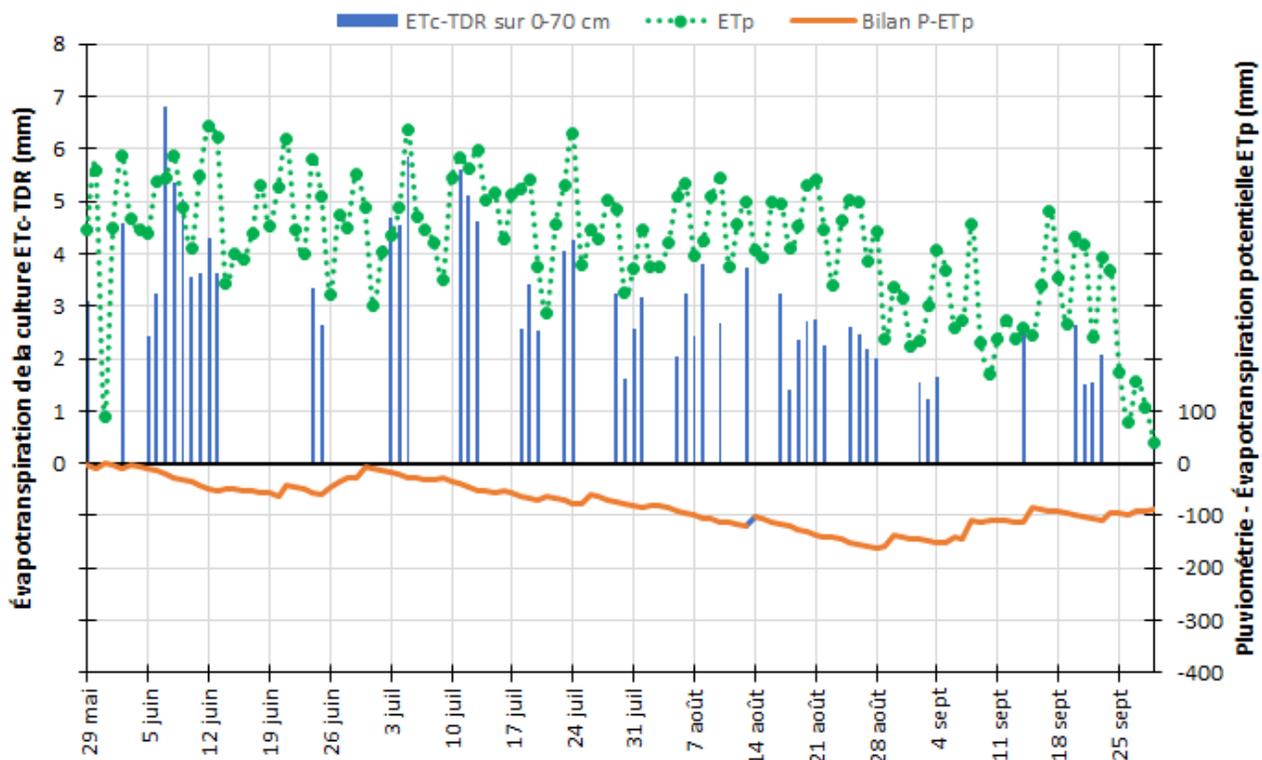


Figure 92. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($ET_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P\text{-}ET_p$) (mm), site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021.

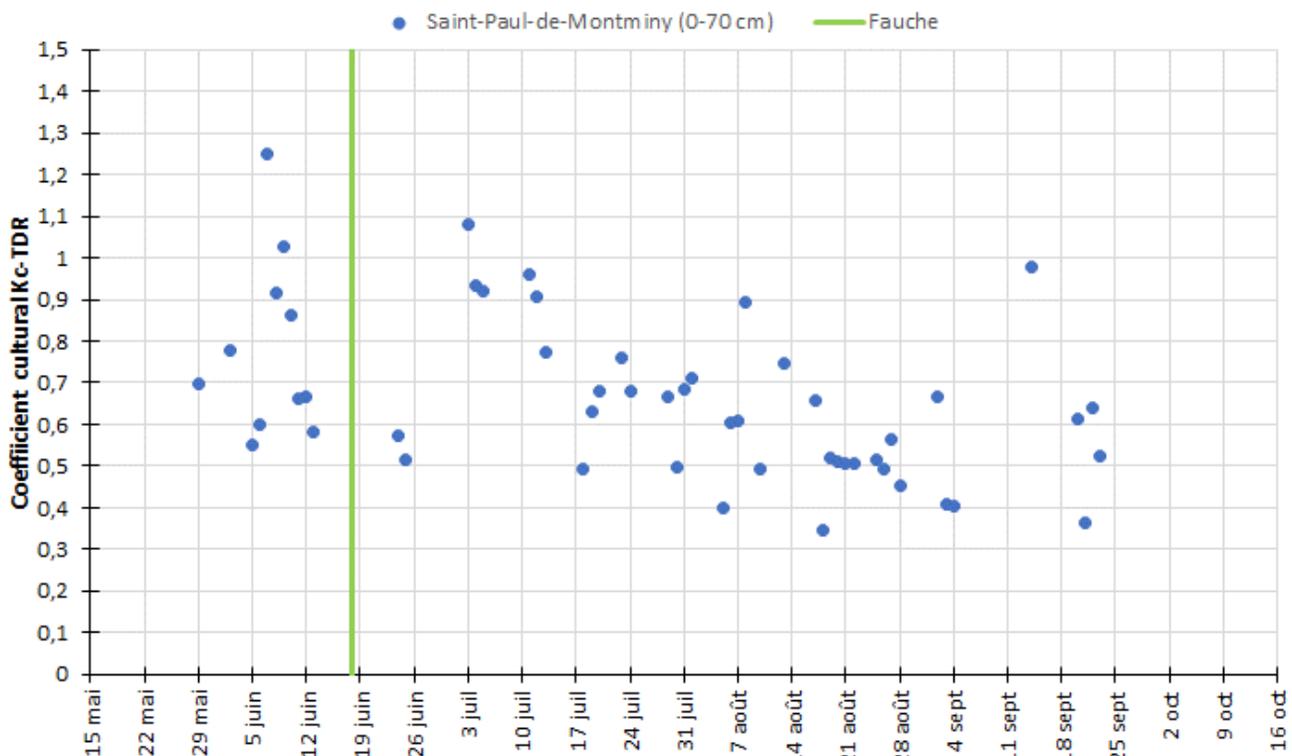


Figure 93. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2021.

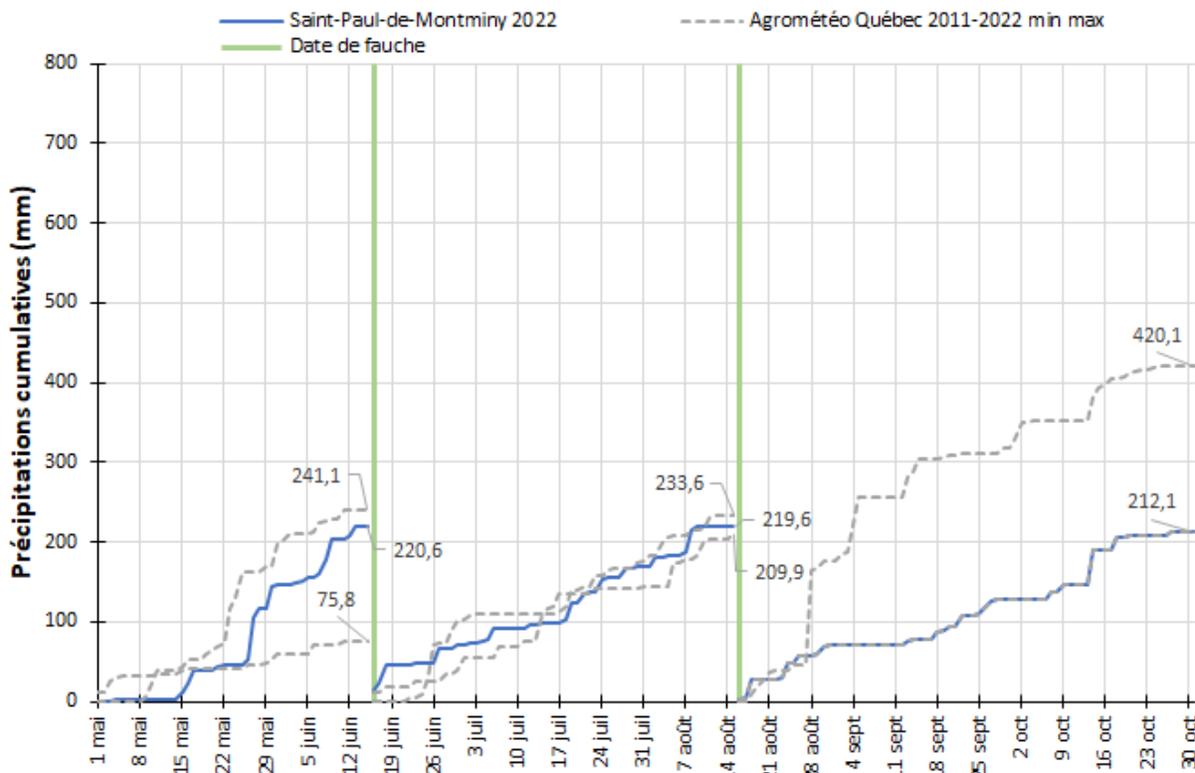


Figure 94. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022.

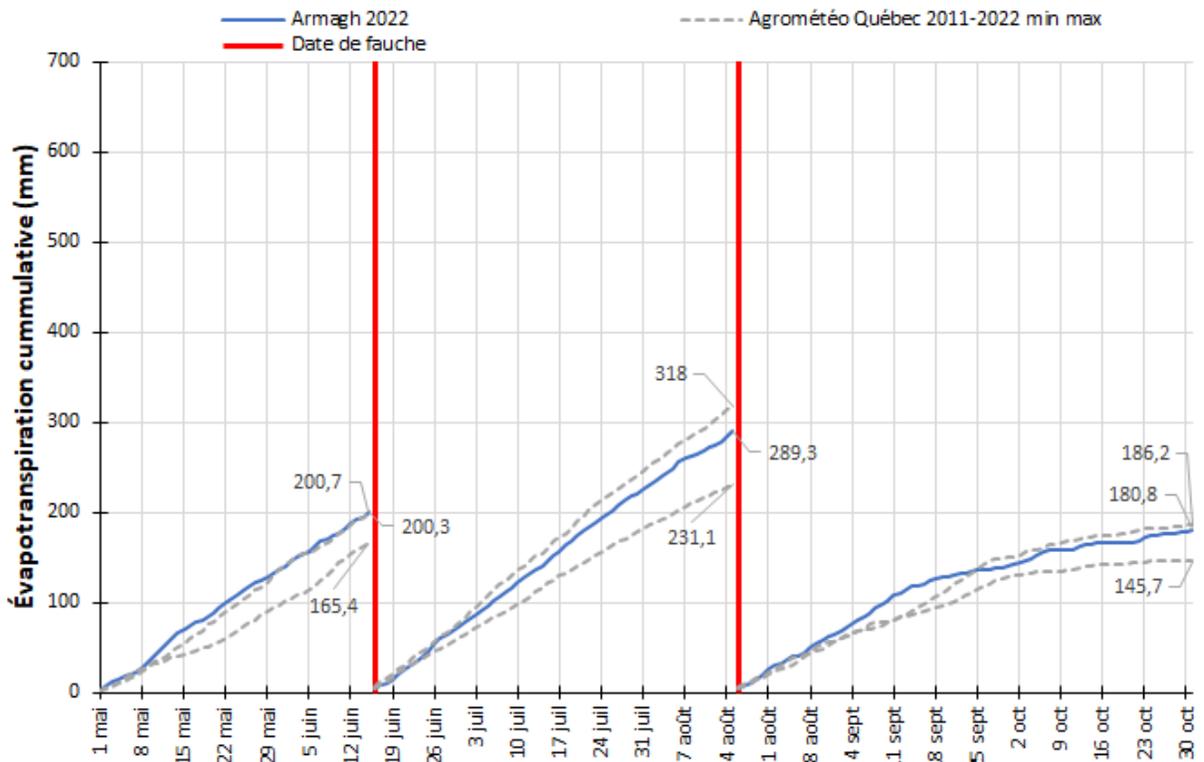


Figure 95. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Armagh entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022.

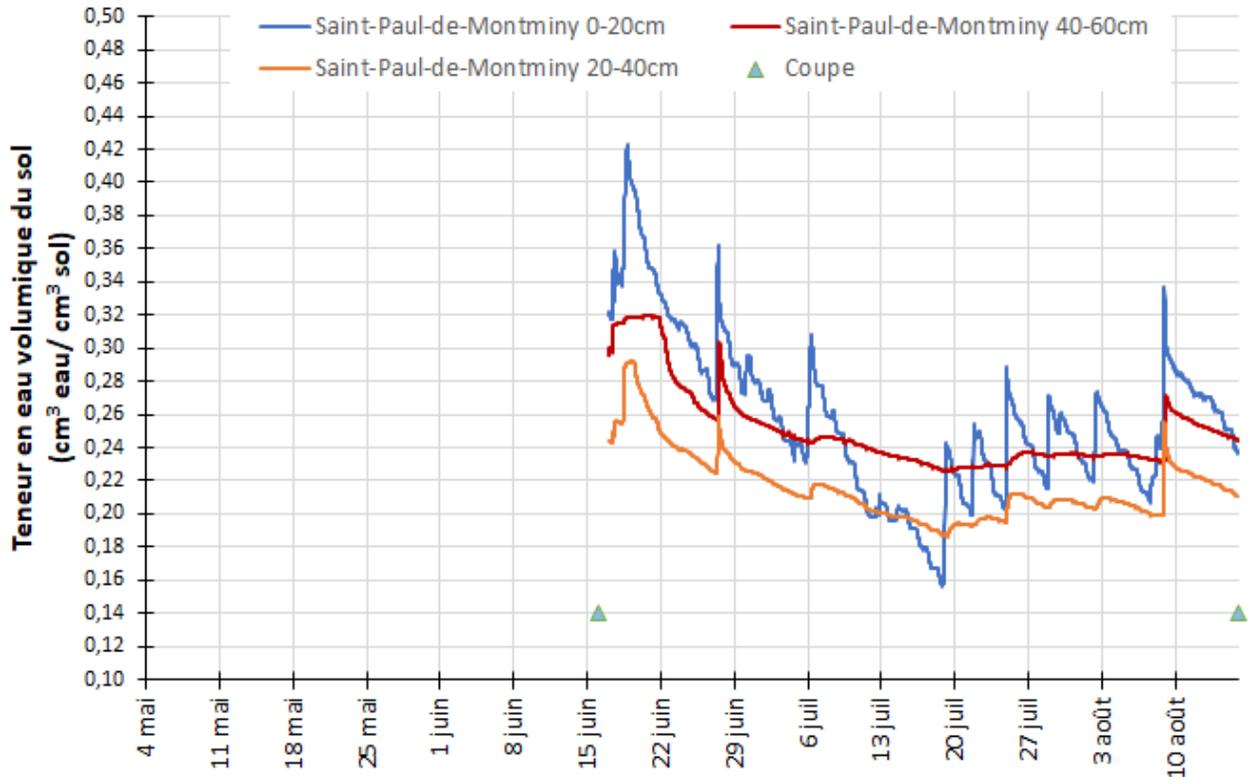


Figure 96. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022.

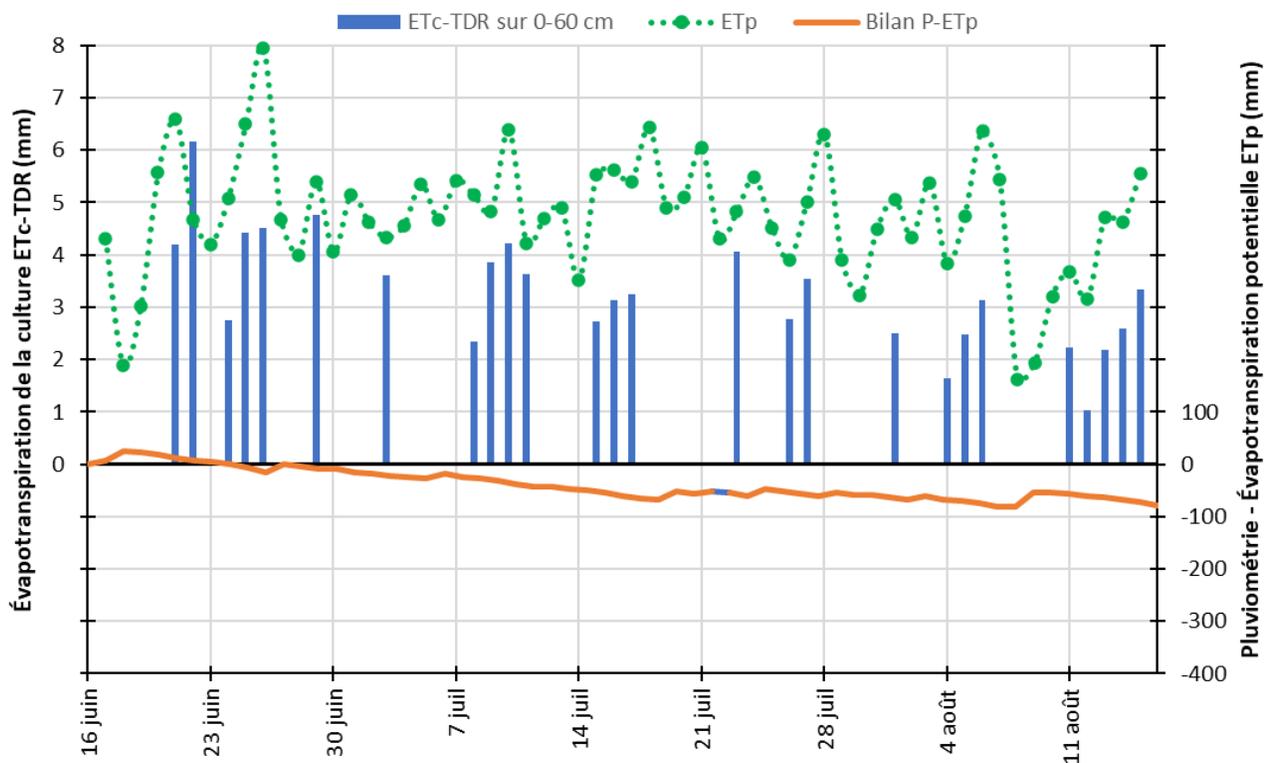


Figure 97. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022.

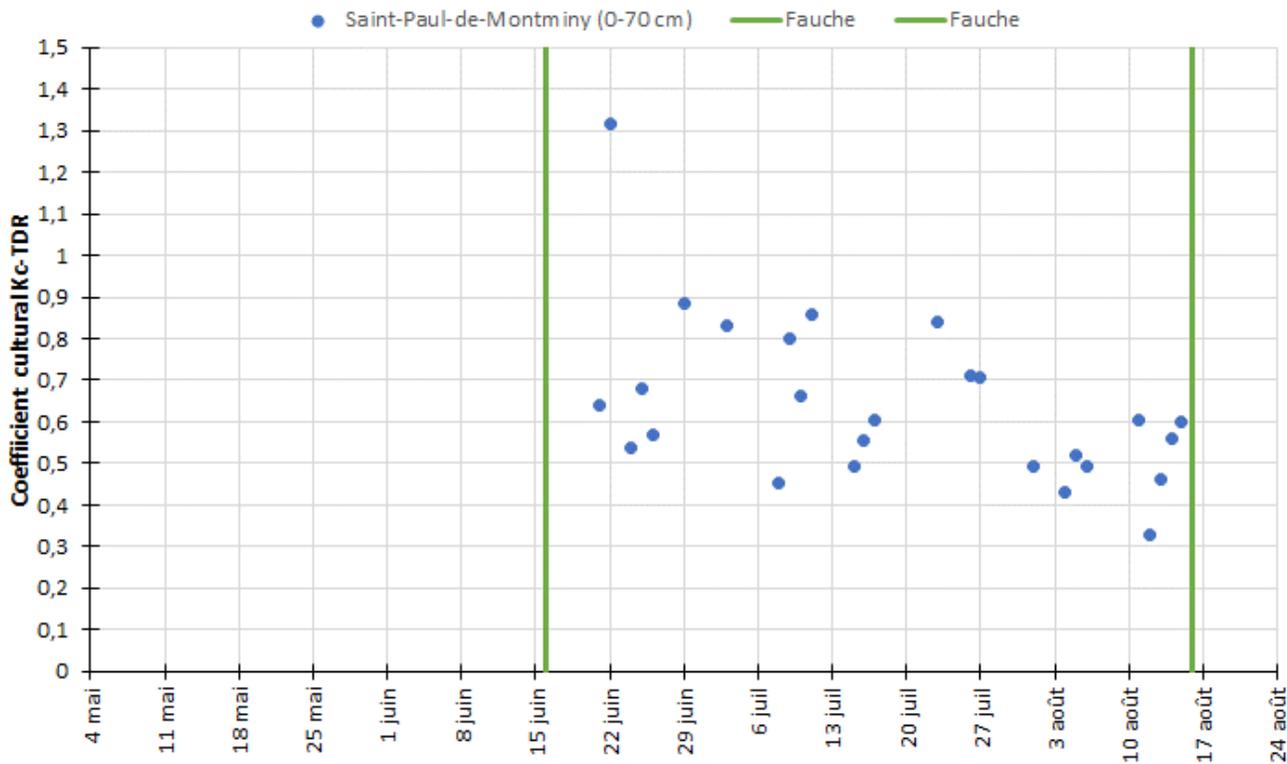


Figure 98. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Paul-de-Montminy, saison 2022.

10.8 Sainte-Eulalie

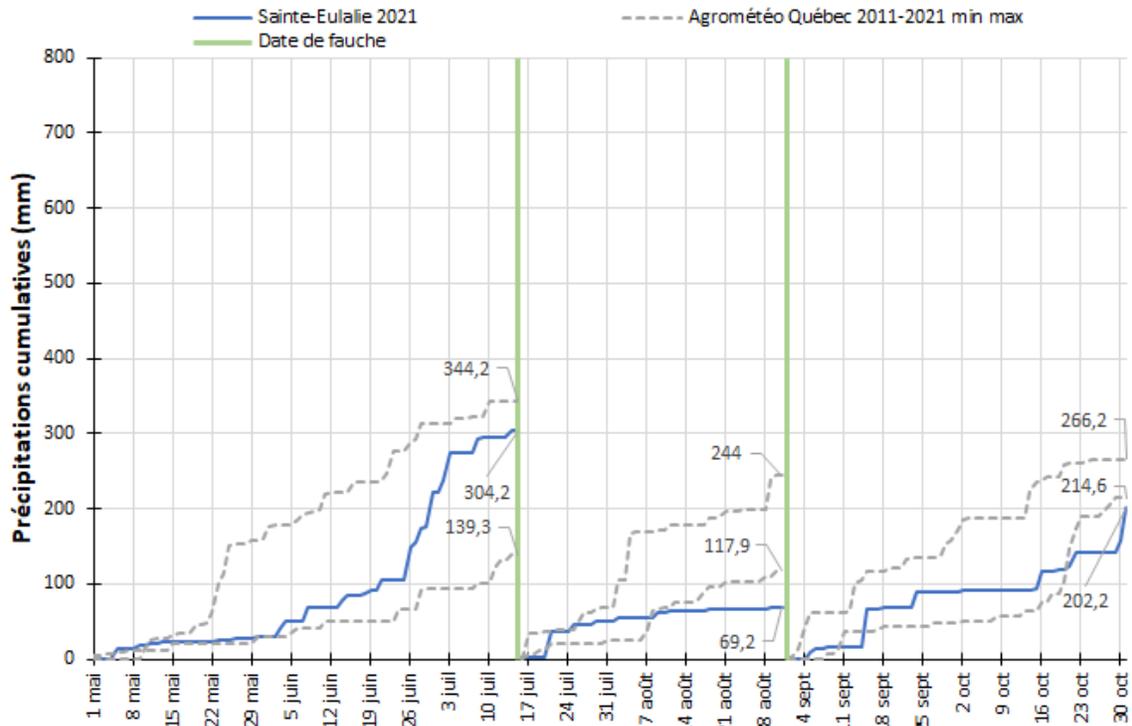


Figure 99. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Sainte-Eulalie, saison 2021.

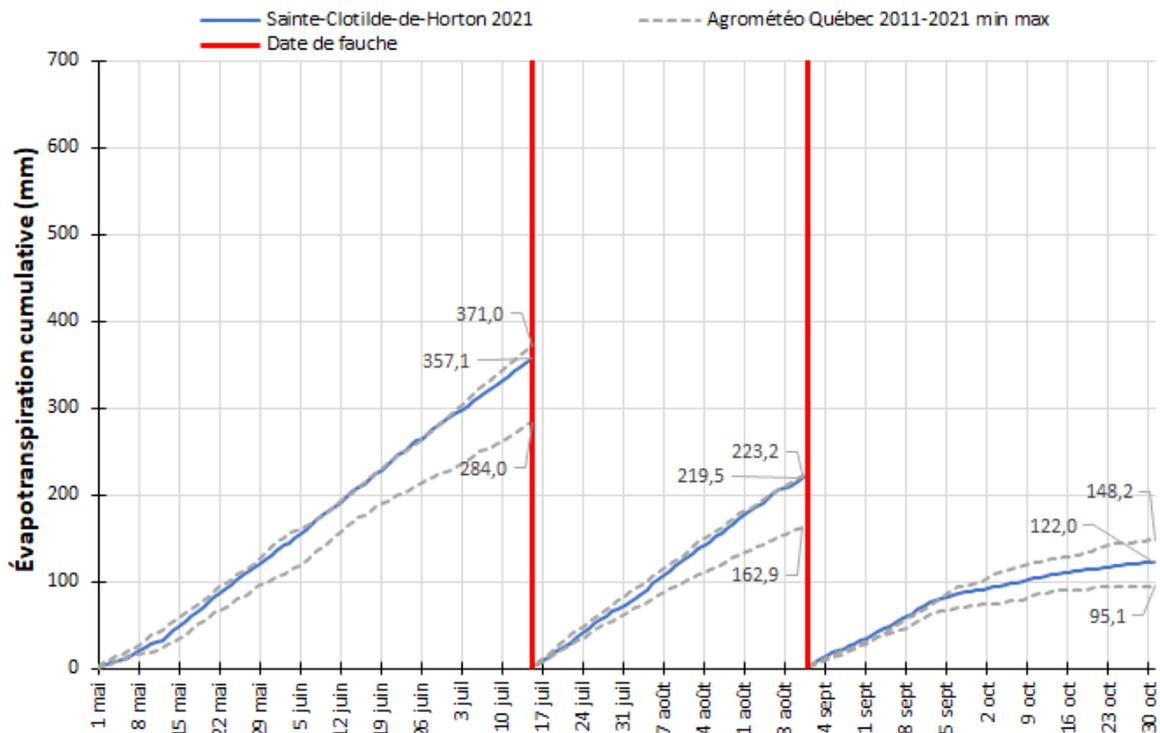


Figure 100. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Sainte-Clotilde-de-Horton entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Sainte-Eulalie, saison 2021.

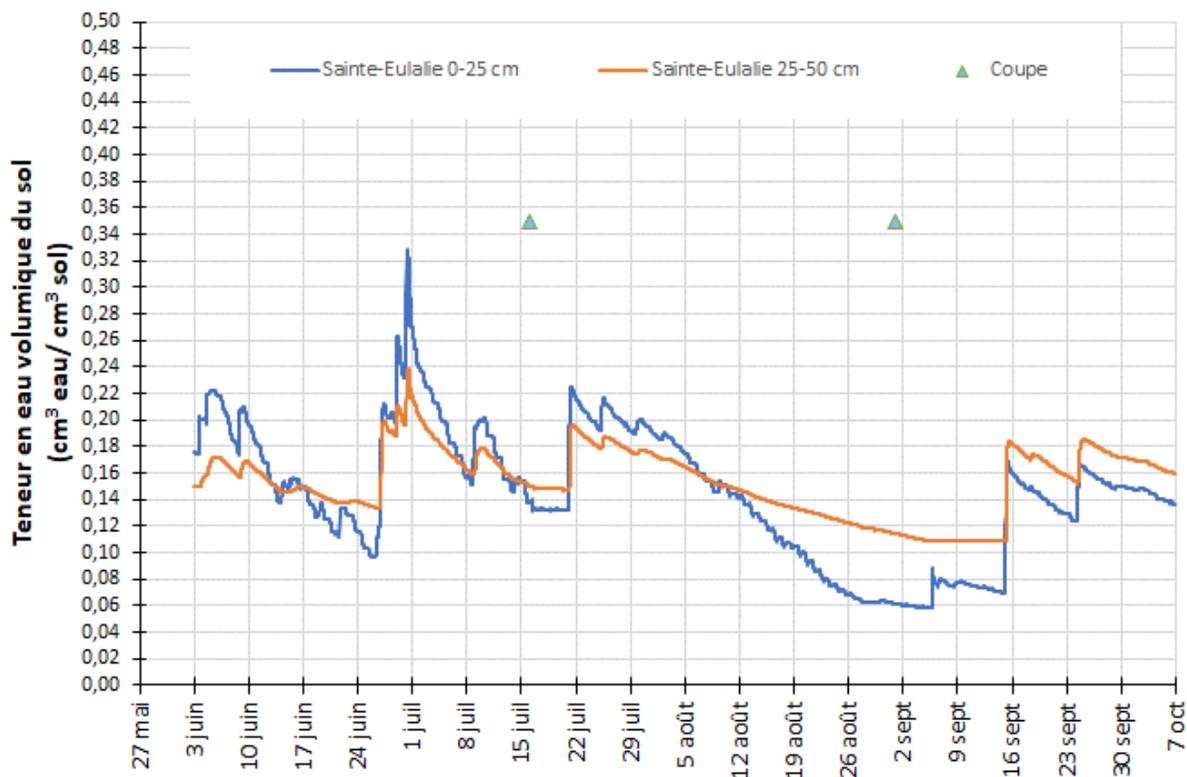


Figure 101. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Sainte-Eulalie, saison 2021.

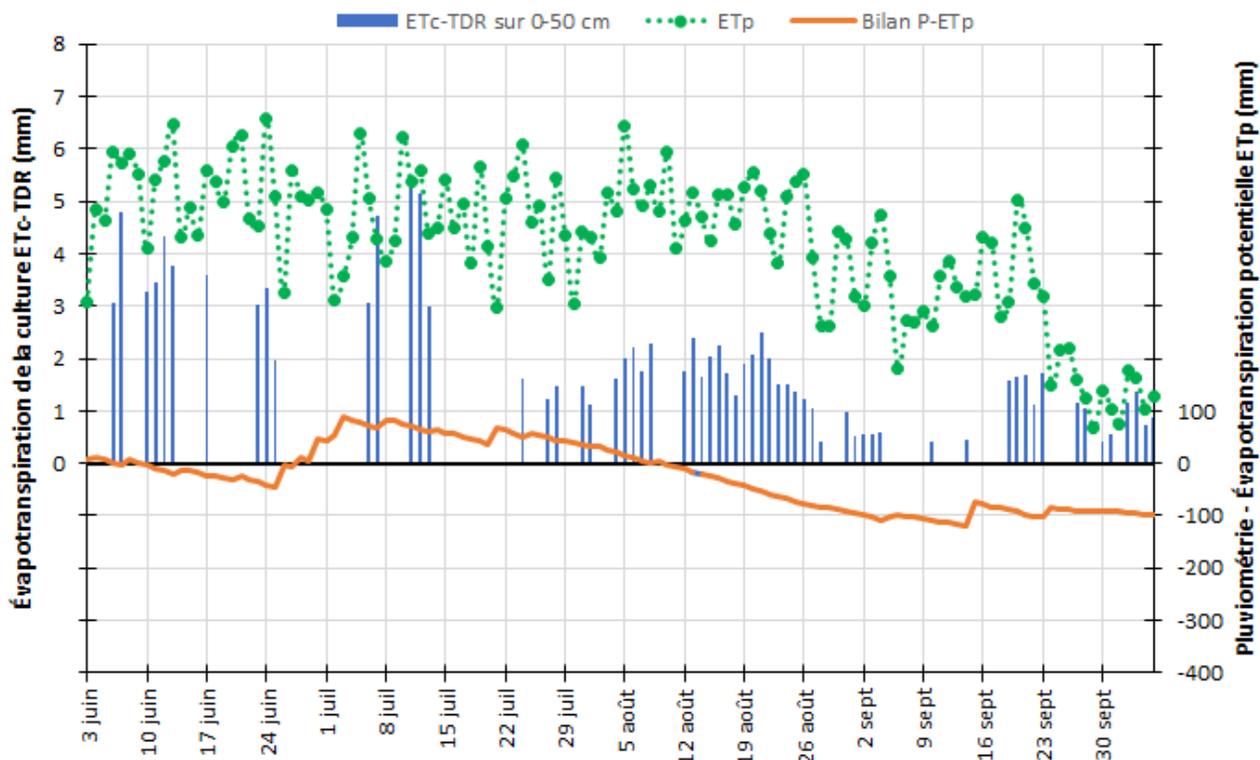


Figure 102. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), site Sainte-Eulalie, saison 2021.

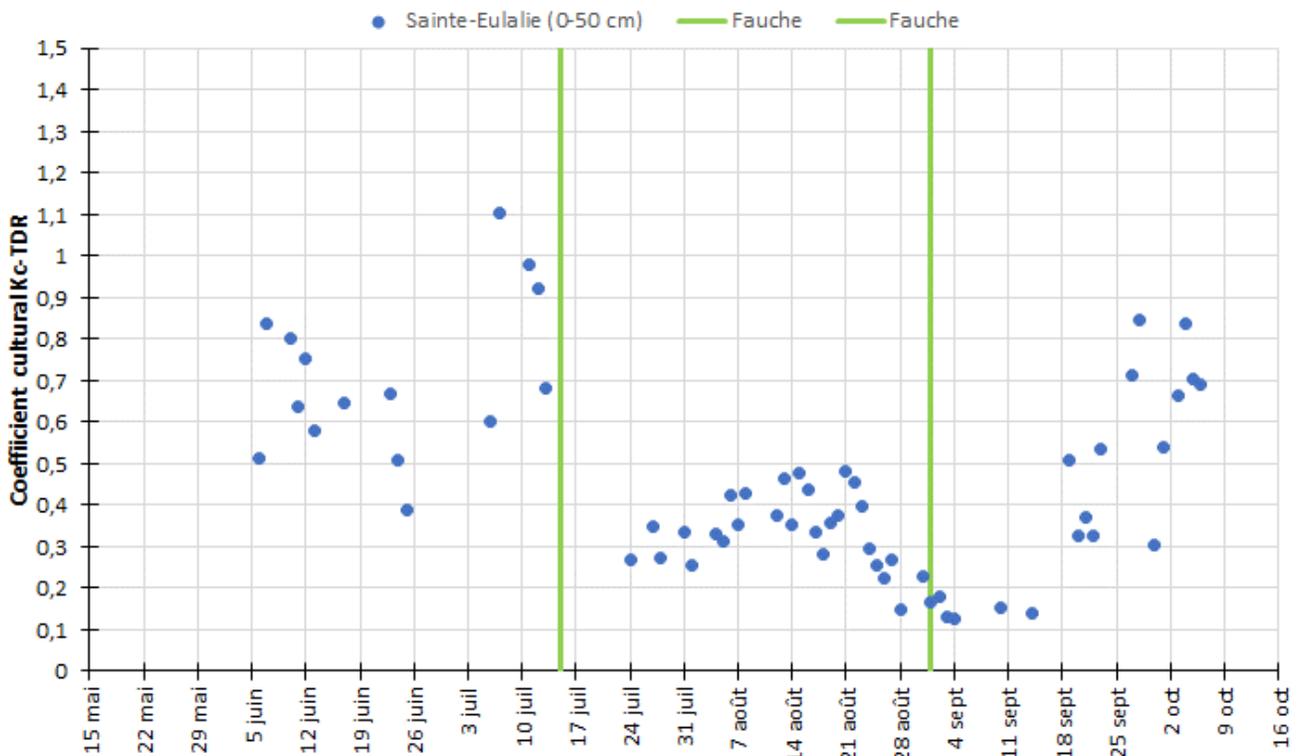


Figure 103. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Sainte-Eulalie, saison 2021.

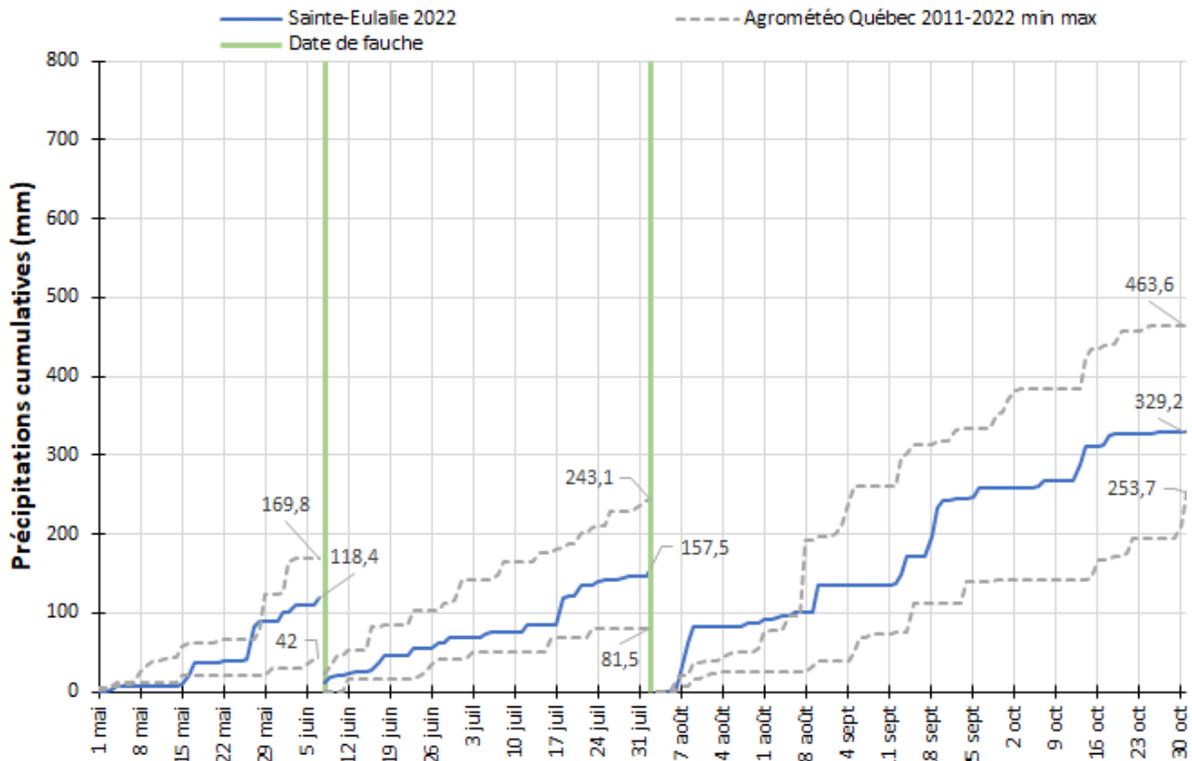


Figure 104. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Sainte-Eulalie, saison 2022.

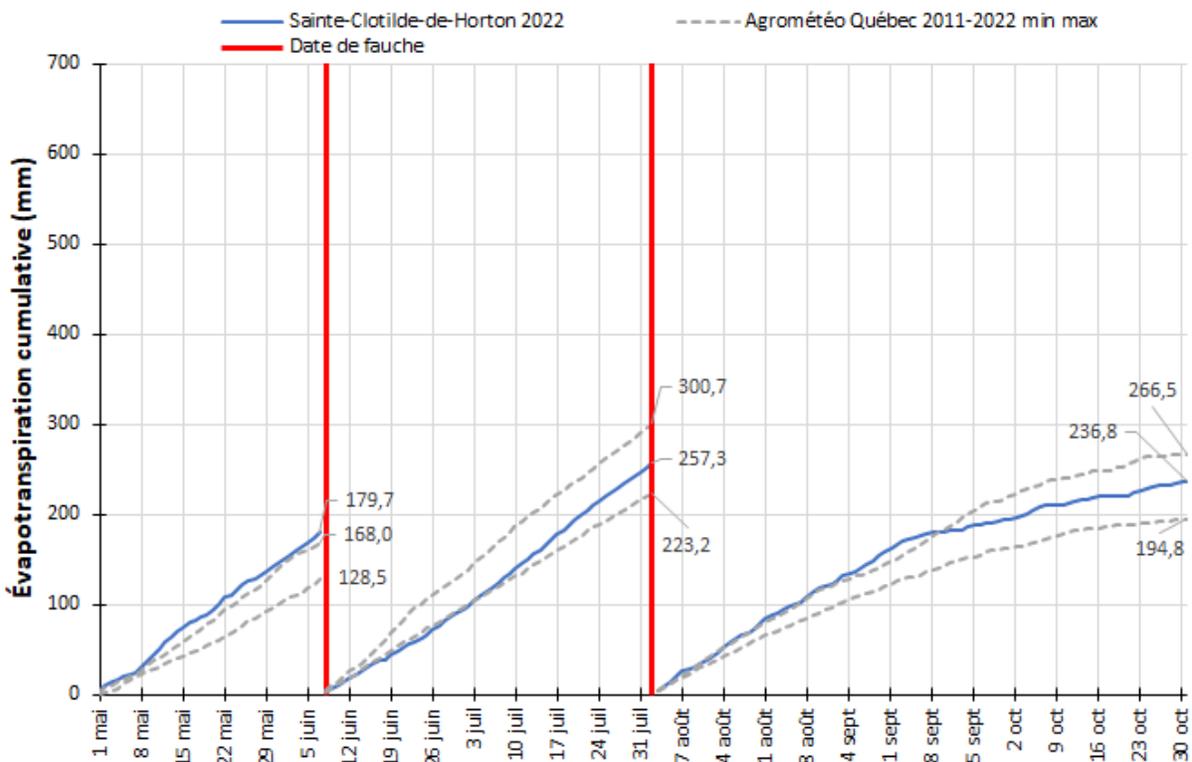


Figure 105. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Sainte-Clotilde-de-Horton entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Sainte-Eulalie, saison 2022.

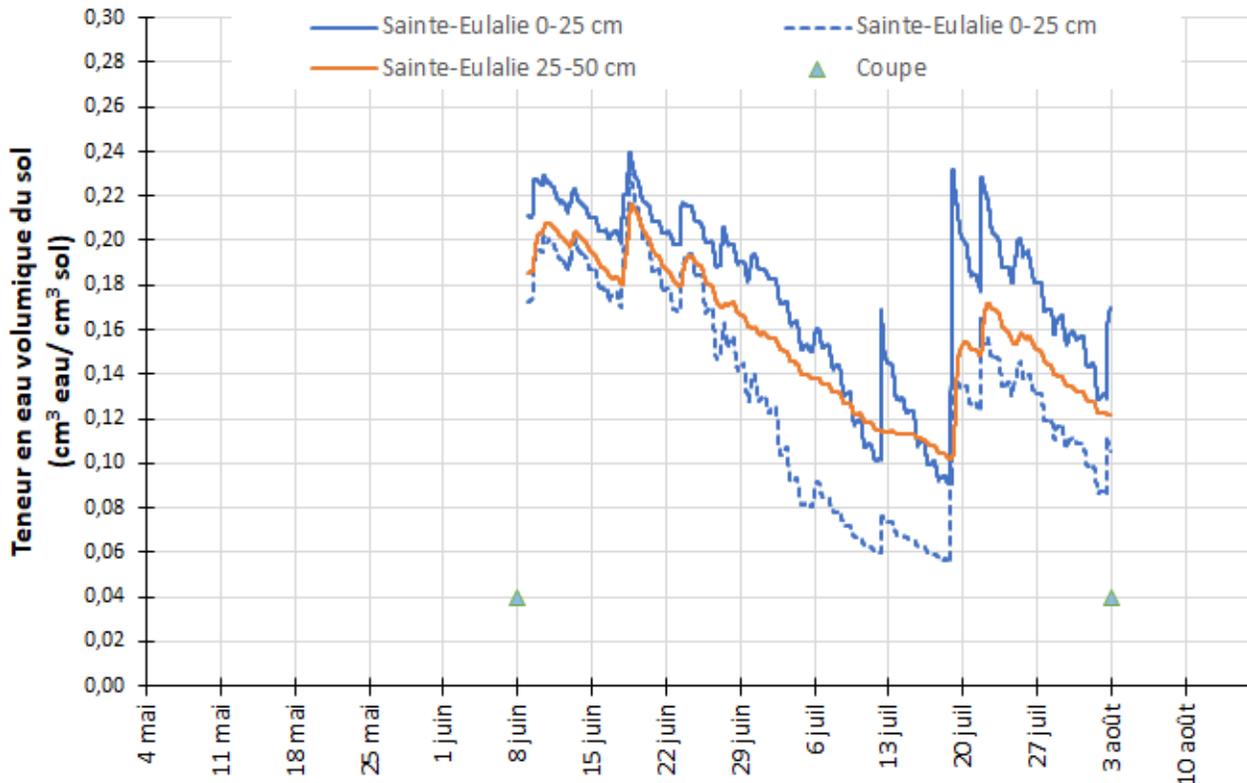


Figure 106. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Sainte-Eulalie, saison 2022.

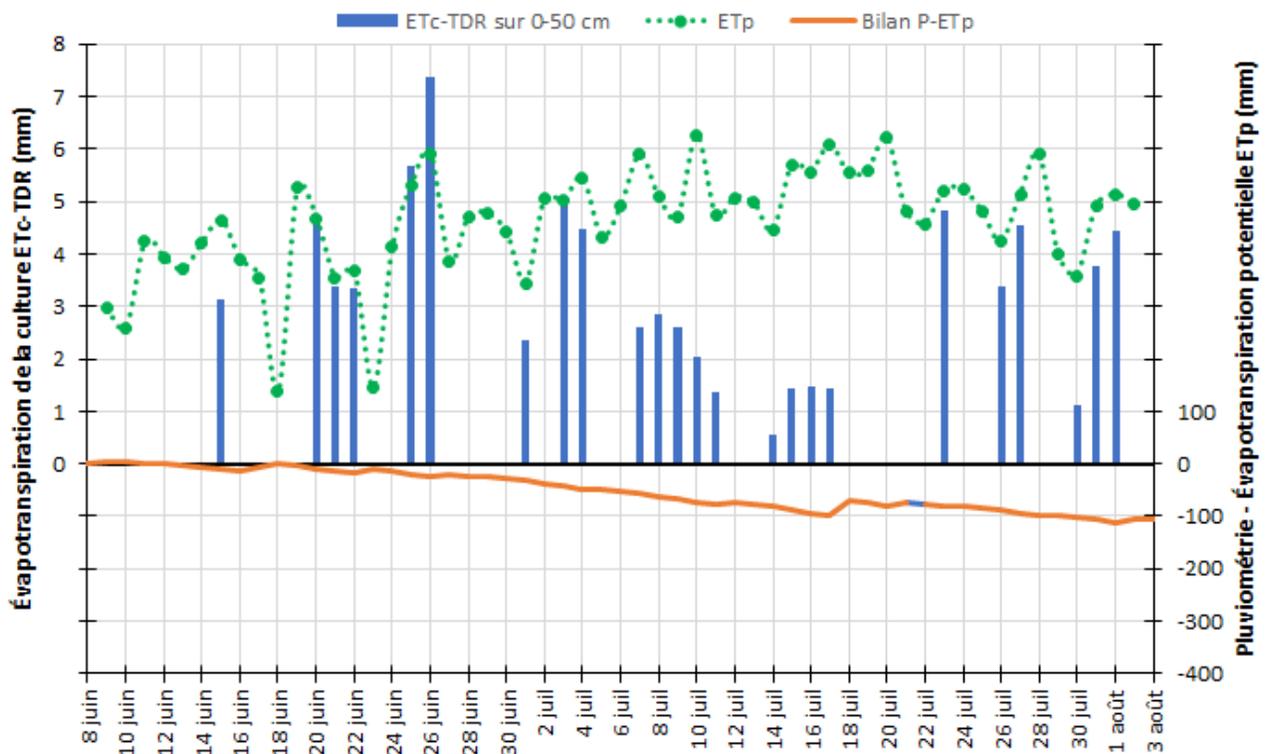


Figure 107. Évolution de l'évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrique- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Sainte-Eulalie, saison 2022.

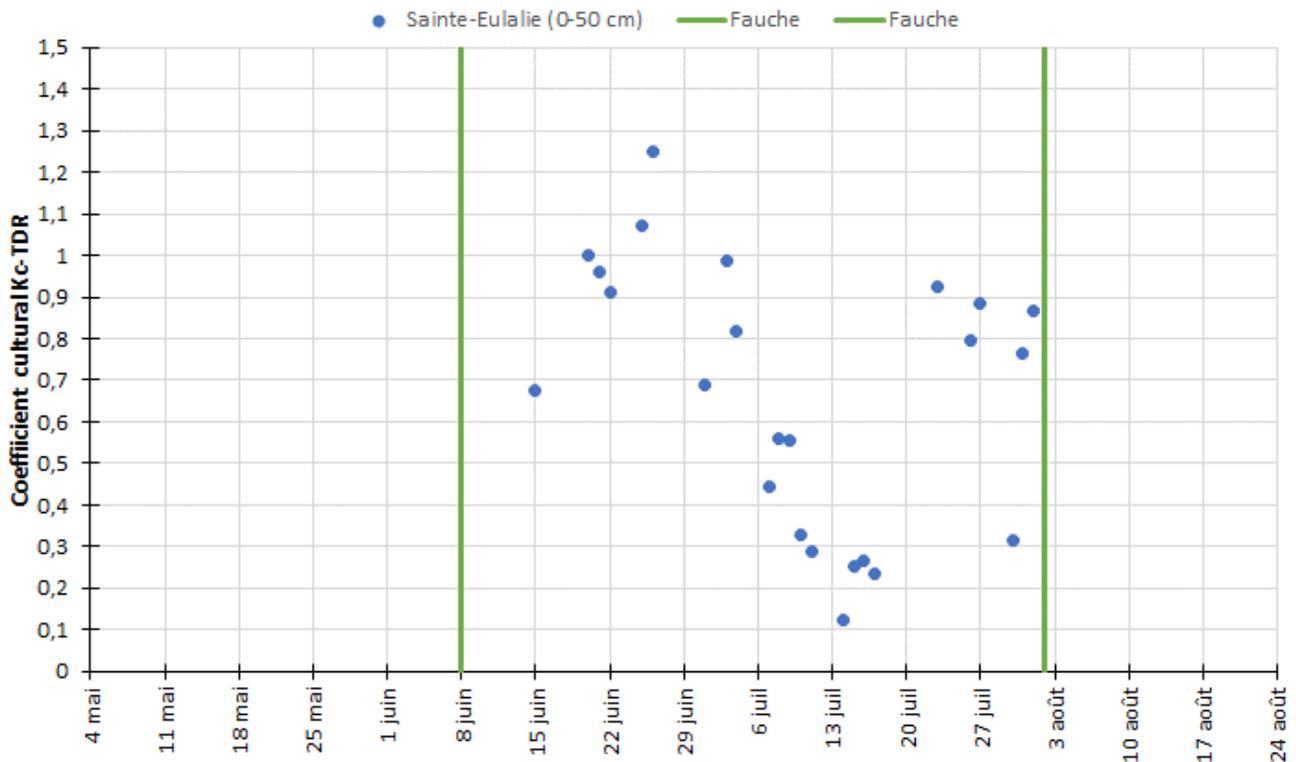


Figure 108. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Sainte-Eulalie, saison 2022.

10.9 Weedon

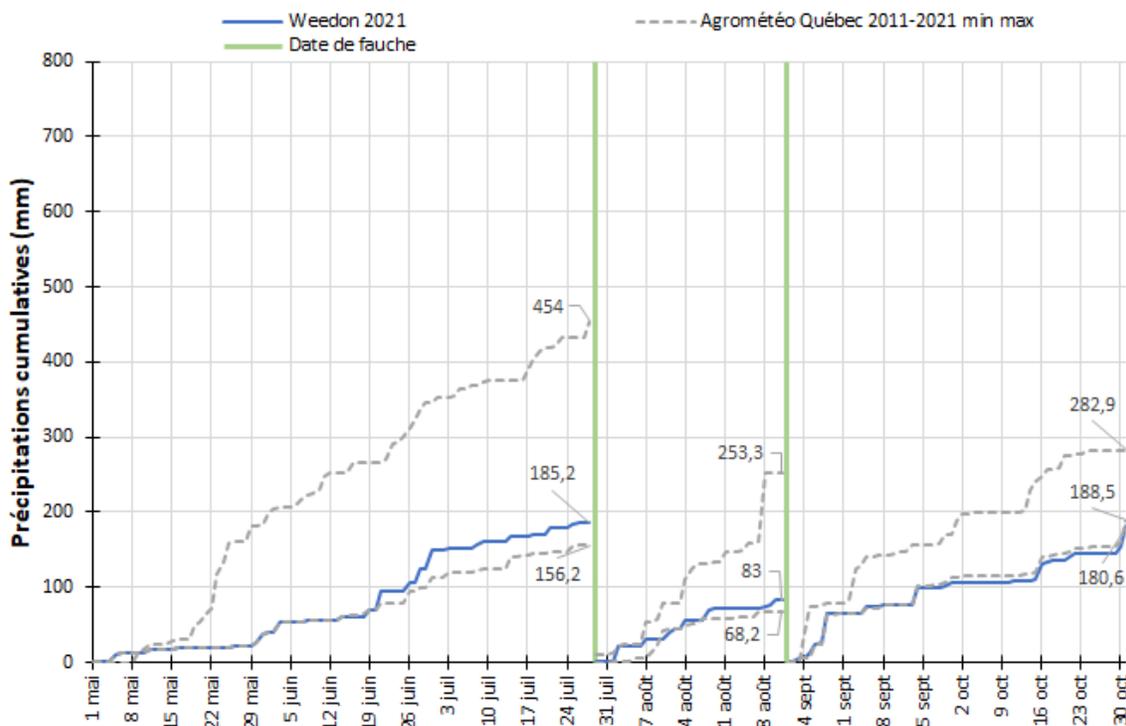


Figure 109. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Weedon, saison 2021.

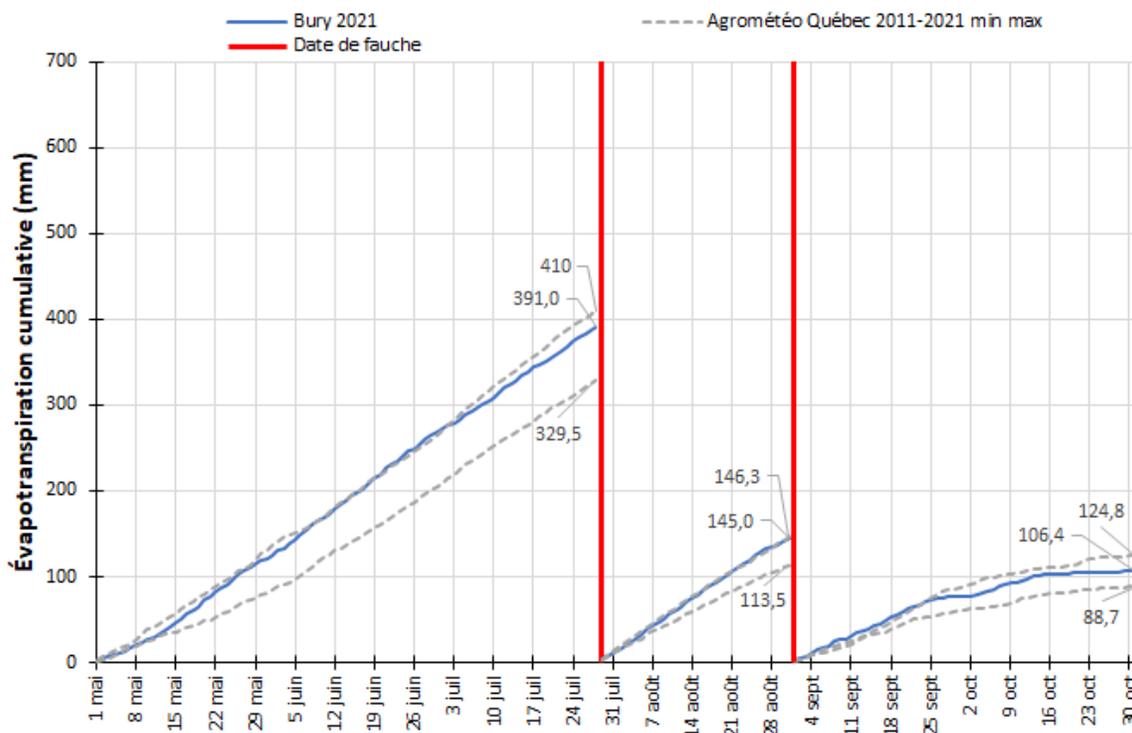


Figure 110. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Bury entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Weedon, saison 2021.

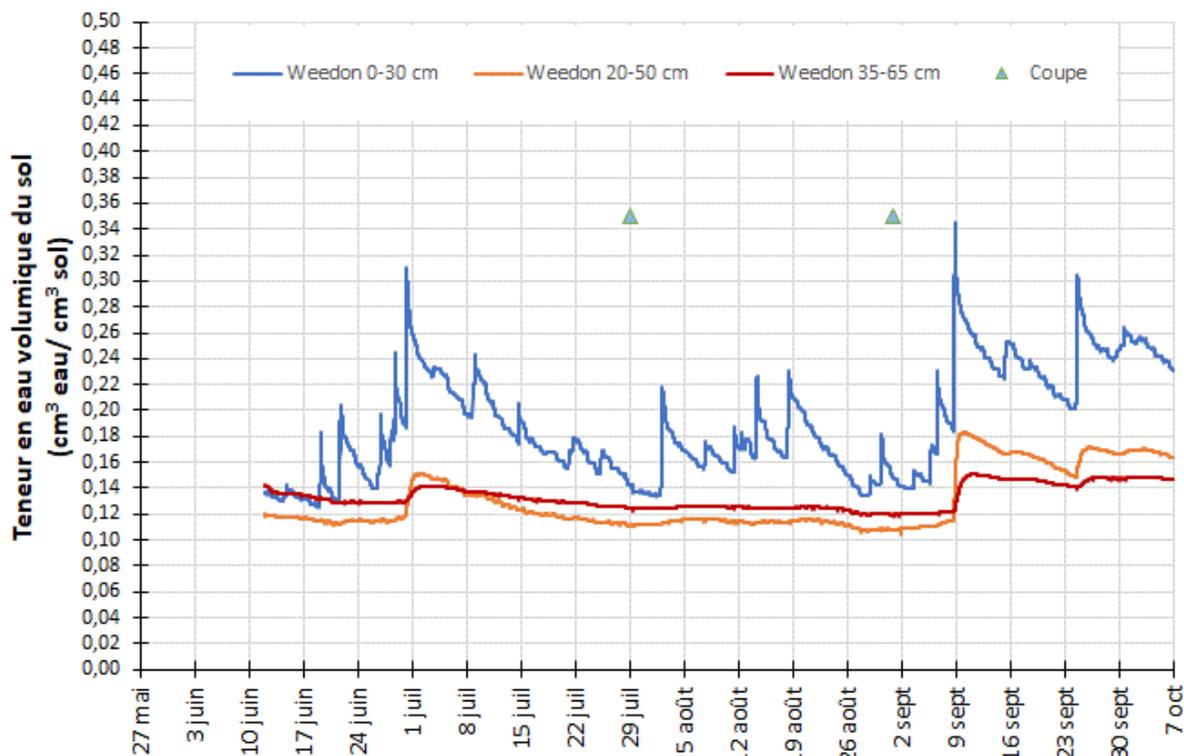


Figure 111. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Weedon, saison 2021.

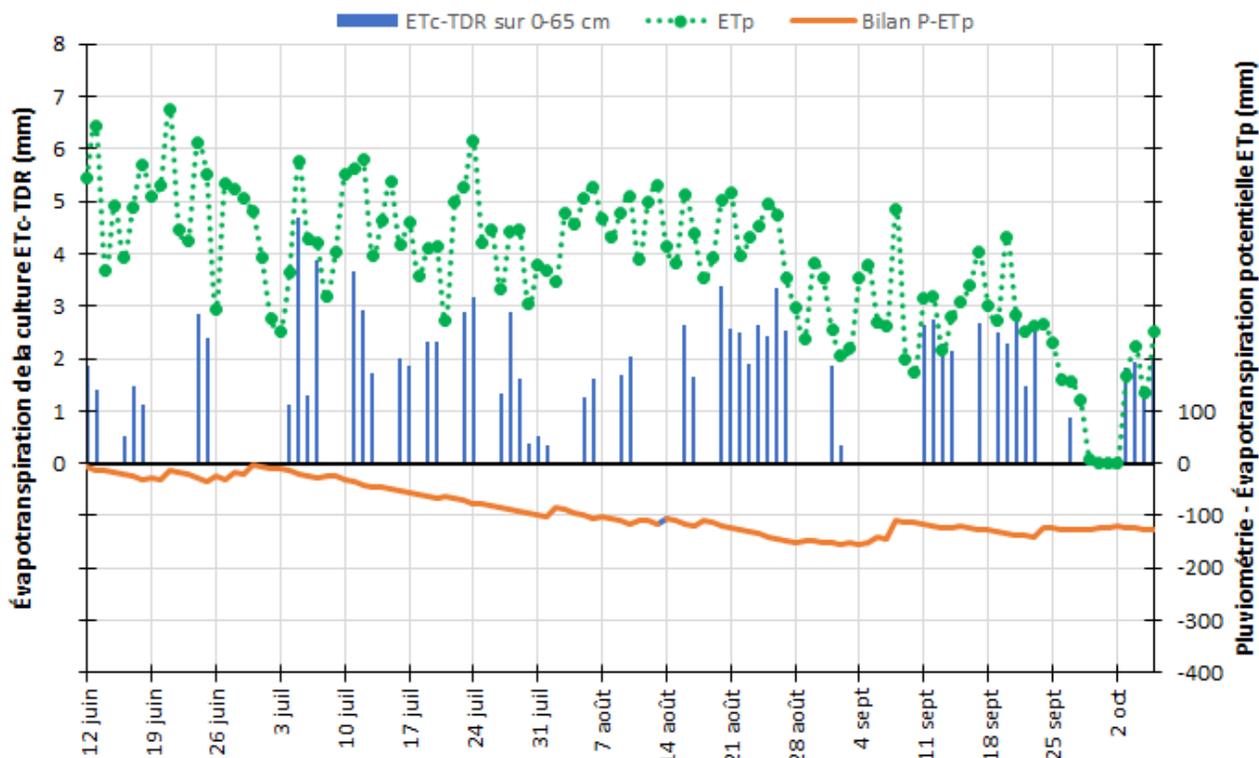


Figure 112. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($ET_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P\text{-}ET_p$) (mm), site Weedon, saison 2021.

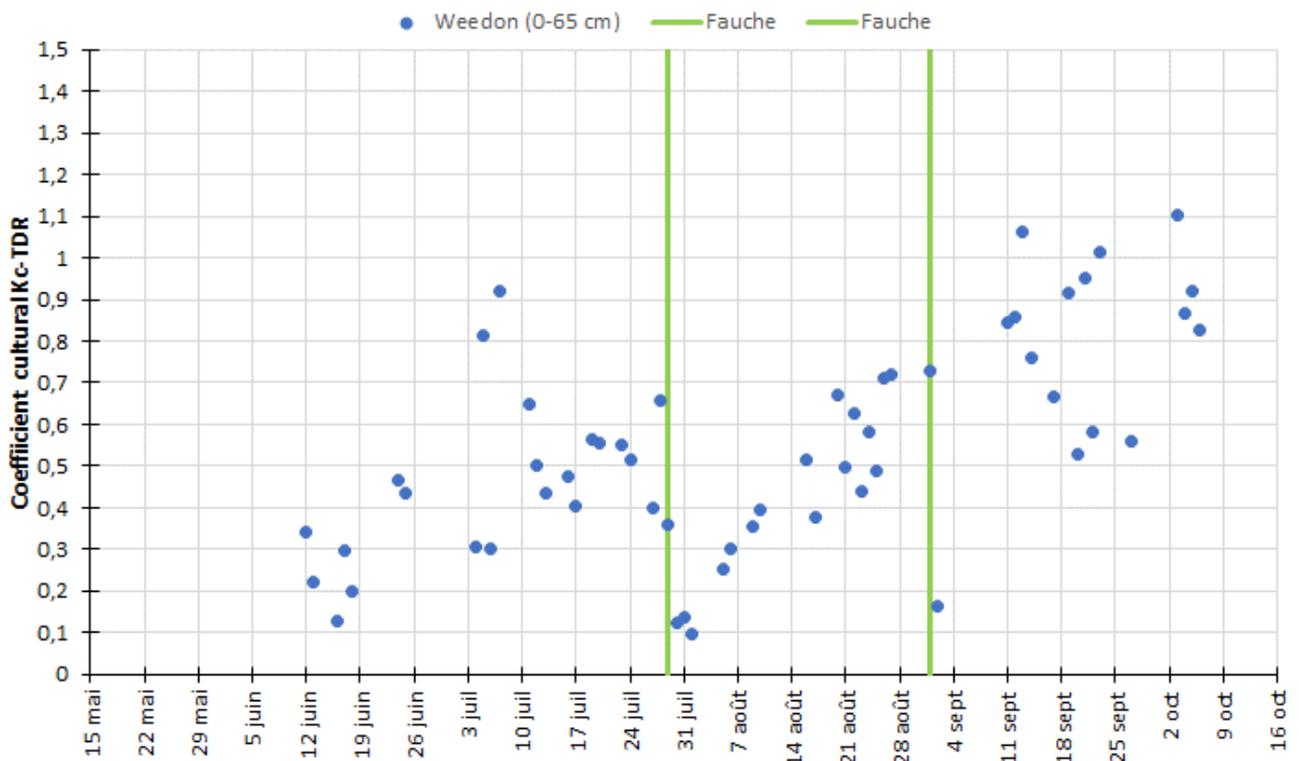


Figure 113. Chronique du coefficient culturel calculé par TDR, site Weedon, saison 2021.

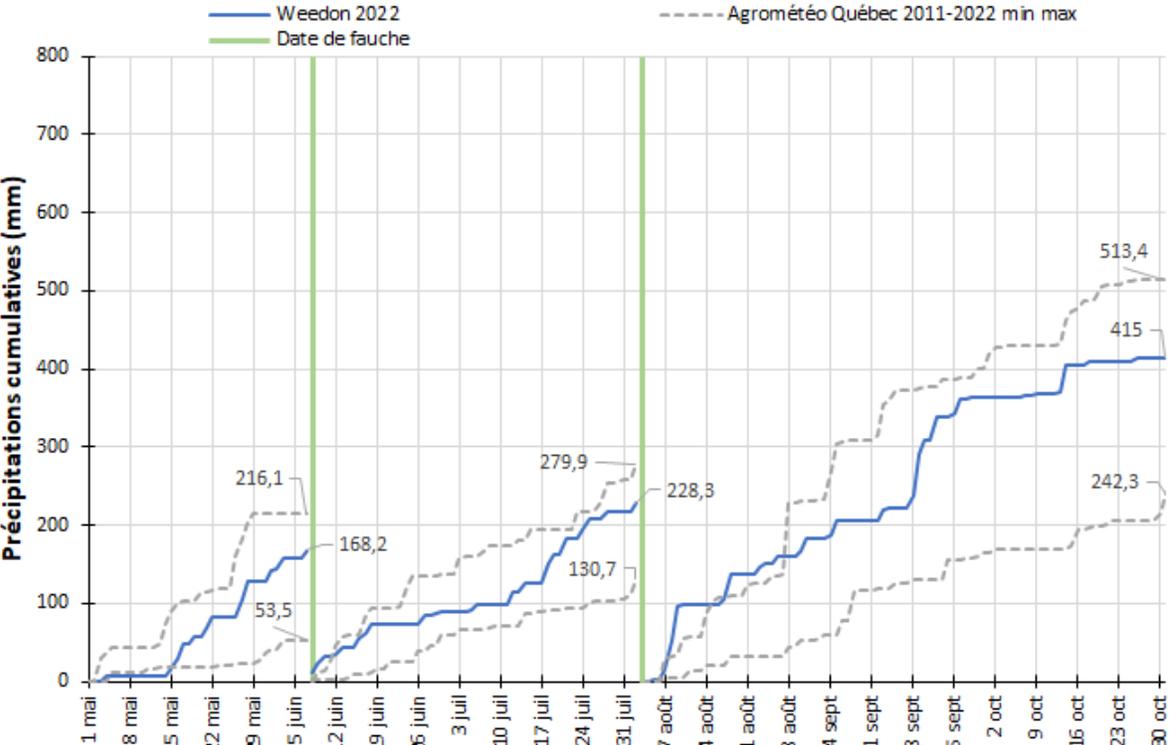


Figure 114. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Weedon, saison 2022.

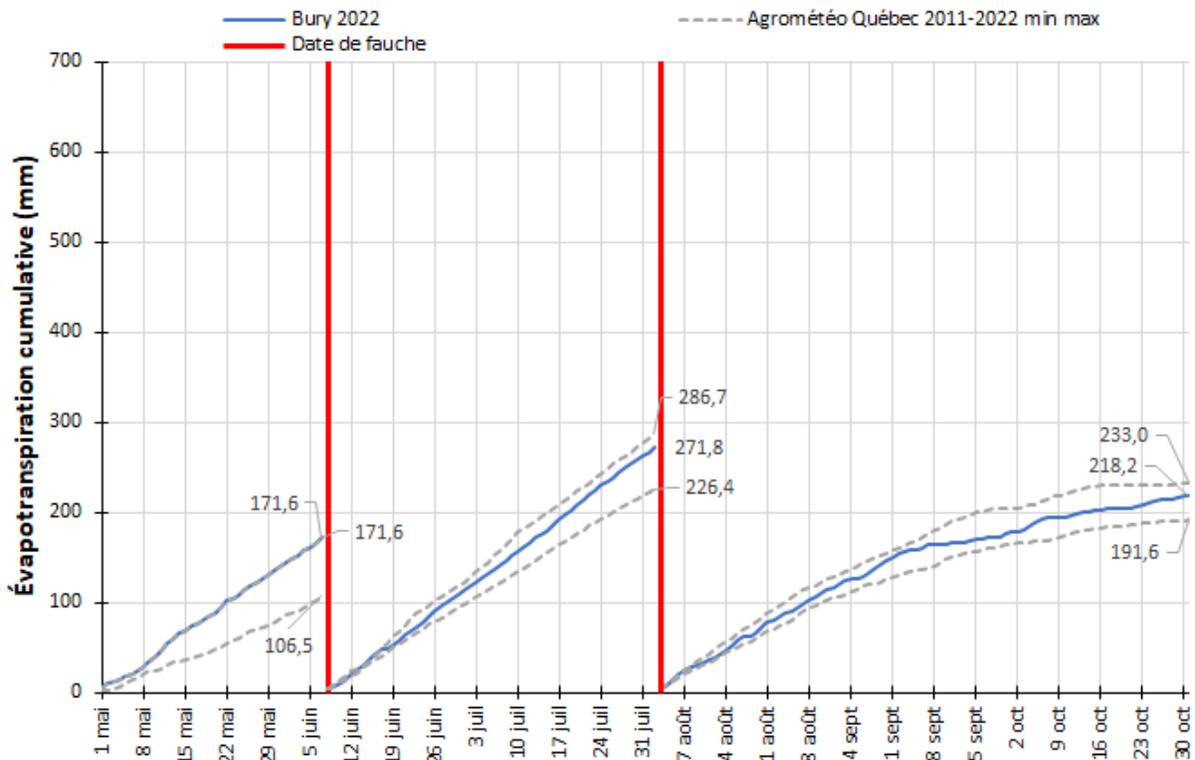


Figure 115. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Bury entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Weedon, saison 2022.

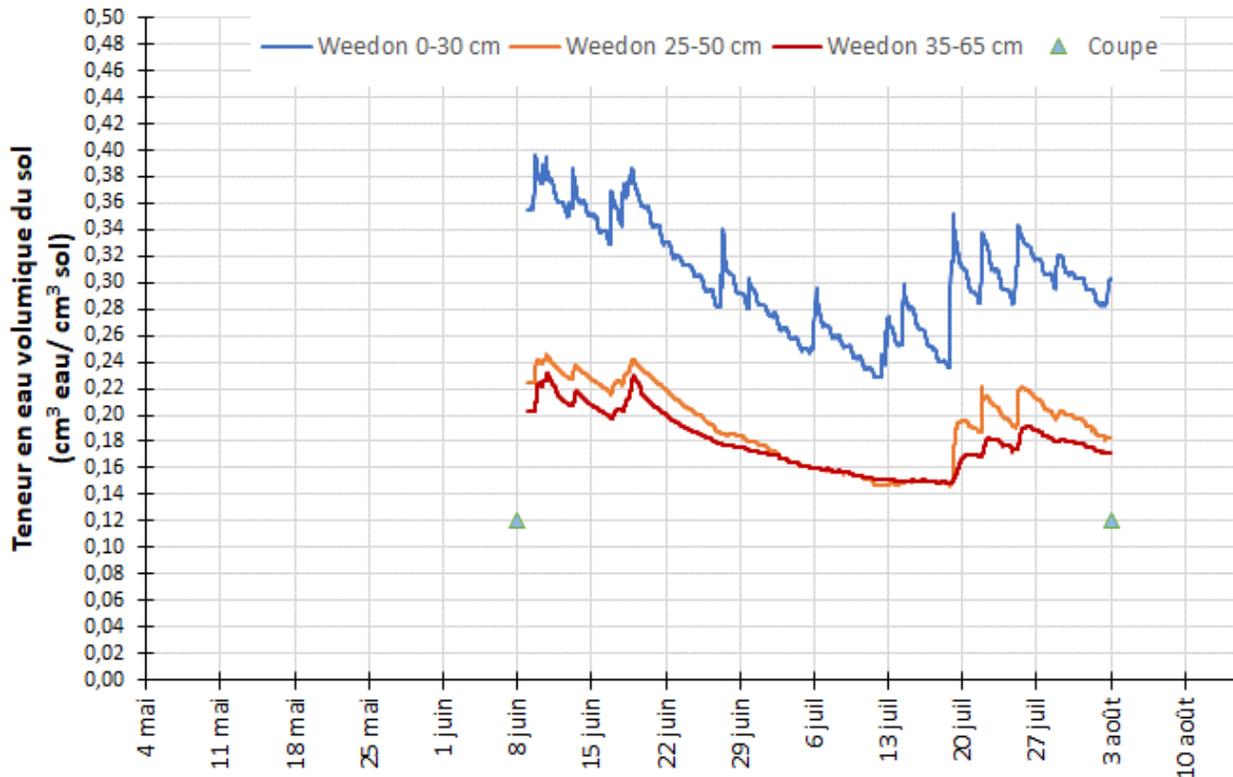


Figure 116. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) selon la profondeur au site Weedon, saison 2022.

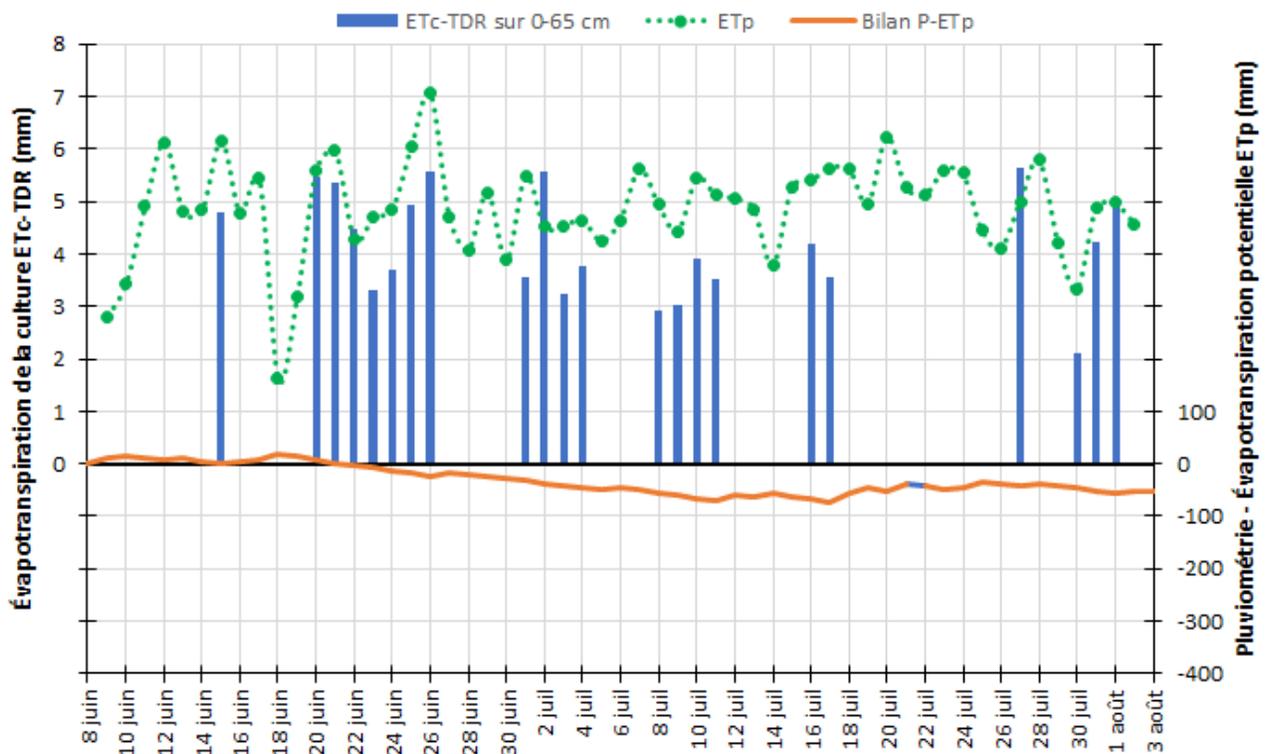


Figure 117. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), site Weedon, saison 2022.

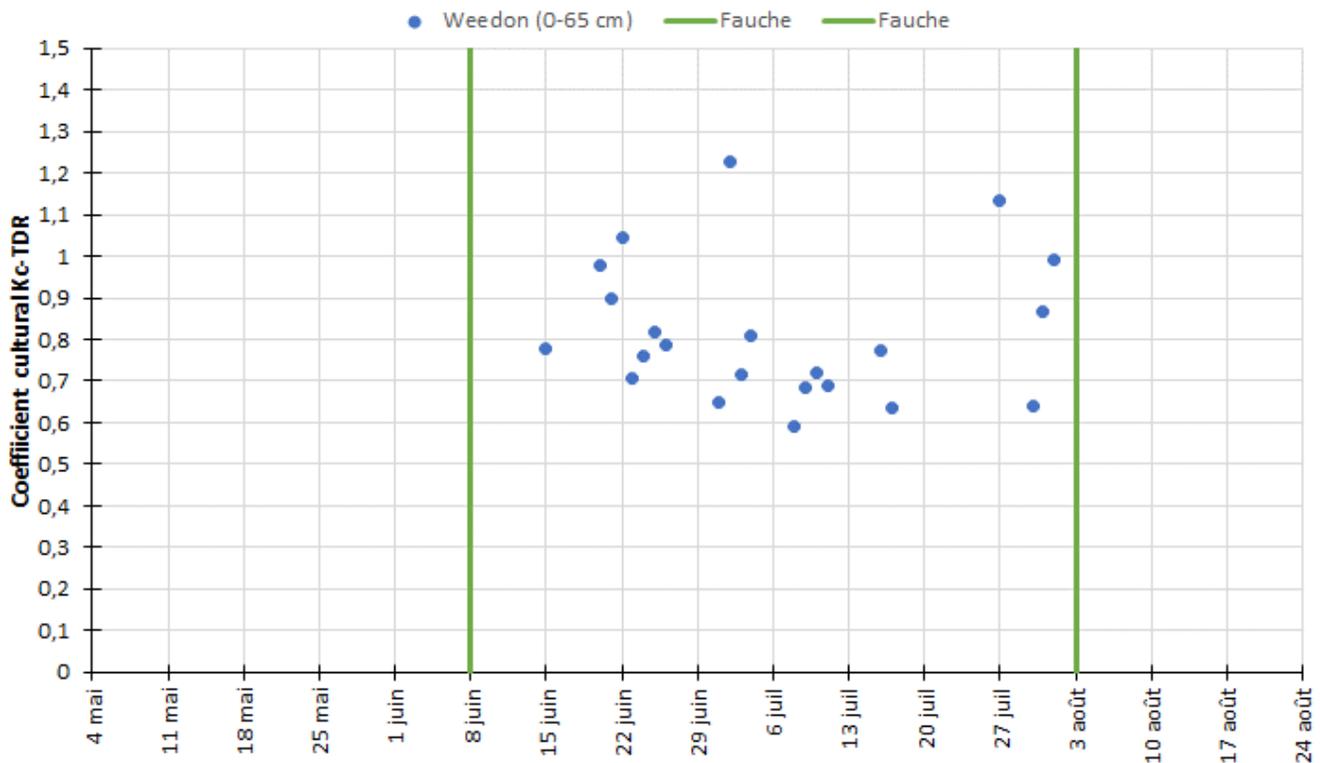


Figure 118. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Weedon, saison 2022.

11 Annexe 2. Analyses de la qualité des fourrages

Tableau 15. Paramètres analysés pour déterminer la qualité du fourrage selon les traitements et la saison.

Année	Coupe	Paramètre ¹	Traitement		
			Irrigué en tout temps (TT)	Irrigué après coupe (AC)	Témoin non irrigué (NI)
2020	1 ^{re}	IR - Matière sèche (%)	24,2	21,7	21,8
		IR - ENL (Mcal/kg)	1,42	1,44	1,45
		IR - ENE (Mcal/kg)	1,45	1,50	1,51
		IR - ENG (Mcal/kg)	0,87	0,91	0,92
		IR - UNT 1x (NRC 2001) (%)	63	64	64
		IR - Protéine brute (%)	16,1	19,3	19,2
		IR - Protéine disponible (%)	16,1	19,3	19,2
		IR - PND estimée (% PB)	20,3	18,7	18,6
		IR - % soluble PB (%)	40,8	37,3	38,0
		IR - Fibre détergente acide ADF (%)	31,3	29,4	29,1
		IR - ADIPB (%)	1,2	1,2	1,2
		IR - Fibre détergente neutre NDF (%)	42,1	45,4	40,0
		IR - NDIPB (%)	3,8	4,7	4,8
		IR - NDFD 30 (% NDF)	37,99	46,60	47,88
		IR - NDFD 48 (% NDF)	48,56	58,27	57,00
		IR - Lignine (%)	6,4	6,0	5,9
		IR - Lignine (% NDF)	15,02	14,36	14,71
		IR - Calcium total (%)	1,31	1,44	1,52
		IR - Phosphore total (%)	0,32	0,33	0,34
		IR - Magnésium total (%)	0,21	0,28	0,30
		IR - Potassium total (%)	2,59	2,90	3,01
		IR - Cendres (%)	7,5	8,7	8,7
		IR - HCNF (%)	35,53	32,71	33,94
		IR - Amidon (%)	6,92	6,03	5,88
		IR - Sucres solubles à l'eau (%)	10,07	8,66	9,71
		IR - Sucres solubles à l'éthanol (%)	6,87	6,28	6,71
		IR - Gras (%)	2,6	3,1	3,0
		IR - Acides gras insaturés dans le rumen AGIR (%)	1,4	1,6	1,7
		IR - Acides gras totaux AGT (%)	2,29	2,76	2,71
		IR - C18:1 Oléique (%)	0,23	0,25	0,23
		IR - C18:2 Linoléique (%)	0,53	0,54	0,57
		IR - C18:3 Linoléique (%)	0,67	0,85	0,86
		IR - Valeur relative de fourrage VRF	143	160	155
		IR - ED cheval (Mcal/kg)	2,6	2,5	2,6
		IR - EM mouton (Mcal/kg)	2,26	2,29	2,30
		IR - Soufre (%)	0,24	0,26	0,34
		IR - uNDFom120 (%)	18,2	16,2	13,9
		IR - uNDFom240 (%)	17,5	15,4	13,1
		CH - Matière sèche (%)	24,3	22,5	21,9
		CH - Humidité (%)	75,7	77,5	78,1
		CH - Protéine brute (%)	18,3	19,4	19,0
CH - Fibre ADF (%)	28,2	23,9	27,6		
CH - Calcium total (%)	1,27	1,49	1,49		
CH - Phosphore total (%)	0,34	0,38	0,33		
CH - Magnésium total (%)	0,17	0,22	0,19		
CH - Potassium total (%)	2,75	3,24	2,98		
2021	2 ^e	CH - Matière sèche (%)	19,0	19,38	19,77
		CH - Humidité (%)	81,0	80,62	80,23
		CH - Protéine brute (%)	21,63	22,25	20,07
		CH - Fibre ADF (%)	31,03	30,02	30,58
		CH - Calcium total (%)	1,34	1,48	1,29
		CH - Phosphore total (%)	0,38	0,37	0,34
		CH - Magnésium total (%)	0,19	0,22	0,19
	CH - Potassium total (%)	3,46	3,71	3,26	
	3 ^e	CH - Matière sèche (%)	16,57	17,72	18,47
		CH - Humidité (%)	83,43	82,28	81,53
		CH - Protéine brute (%)	29,18	27,88	26,77
		CH - Fibre ADF (%)	26,07	27,30	27,92
		CH - Calcium total (%)	1,55	1,55	1,51
		CH - Phosphore total (%)	0,42	0,41	0,40
		CH - Magnésium total (%)	0,24	0,24	0,24
		CH - Potassium total (%)	3,65	3,48	3,50

¹ IR : analyse par infrarouge, CH : analyse chimique

12 Annexe 3. Analyse économique



Irrigation des plantes fourragères - outiller le milieu pour qu'il puisse prendre les bonnes décisions

Analyse économique

Projet no. 400189

16 février 2024

TABLE DES MATIÈRES

MISE EN CONTEXTE.....	4
Mandat.....	4
Réserves et limites.....	4
Assurance qualité.....	4
APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	4
SCÉNARIOS DE RÉDUCTION DES PERTES FACE AU STRESS HYDRIQUE.....	5
Solution A : Irrigation mobile avec un canon enrouleur.....	5
Solution B : Achat de terres.....	7
Solution C : Assurance récolte.....	9
DISCUSSION.....	11
RÉFÉRENCES.....	13

Liste des tableaux

Tableau 1. Données des scénarios de stress hydrique.....	5
Tableau 2. Information technique sur la solution d'irrigation.....	6
Tableau 3. Marges annuelles du système d'irrigation sur 30 ha.....	6
Tableau 4. Table de sensibilité de la marge annuelle du système d'irrigation selon le prix du fourrage.....	7
Tableau 5. Marges annuelles pour la solution d'achat de terres.....	8
Tableau 6. Effets de l'achat de terres pour les années sans pertes.....	8
Tableau 7. Table de sensibilité du prix des terres.....	9
Tableau 8. Exemple de paramètres de calcul de la valeur assurée et de la contribution pour l'assurance récolte.....	10
Tableau 9. Exemple de marge annuelle avec l'assurance récolte foin avec bonification du prix unitaire pour le foin de remplacement.....	10
Tableau 10. Exemple de marge annuelle avec l'assurance récolte foin sans bonification du prix unitaire pour le foin de remplacement.....	11
Tableau 11. Comparaison des marges annuelles des solutions.....	11

MISE EN CONTEXTE

Mandat

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) réalise le projet « Irrigation des plantes fourragères - outiller le milieu pour qu'il puisse prendre les bonnes décisions ». L'Institut a sollicité l'appui du Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture (CECPA) pour la réalisation de l'analyse économique de scénarios basés sur les données collectées. Notre mandat consiste à faire une évaluation économique de scénarios d'irrigation conçus avec les données collectées par l'IRDA et des scénarios alternatifs à l'irrigation basée sur la littérature grise.

Notre démarche consiste à :

- organiser l'information agronomique pour en faire une analyse économique;
- participer à l'élaboration des scénarios étudiés ;
- collecter l'information pour les scénarios alternatifs à l'irrigation ;
- déterminer les revenus et les pertes liés aux scénarios ;
- appuyer l'analyse des résultats et des constats.

Réserves et limites

Ce rapport présente des analyses basées sur plusieurs scénarios à propos de situations complexes et multifactorielles. Le CECPA utilise les données ayant la meilleure représentativité possible afin de présenter des scénarios réalistes et crédibles. Toutefois, les réalités de plusieurs entreprises peuvent différer des scénarios proposés.

Ce rapport est préparé à la demande de l'IRDA dans le cadre du projet mentionné ci-haut. Toute diffusion nécessite une permission écrite de l'IRDA ou du CECPA. Nous n'assumons aucune responsabilité pour des pertes qui pourraient être occasionnées aux parties en cause, à leurs partenaires, à leurs administrateurs, à leurs employés ou à toute autre partie, à la suite de la circulation de la référence ou de l'utilisation de ce rapport. Pour finir, le CECPA se réserve le droit de réviser ses constats et ses conclusions si des informations pertinentes, antérieurement non disponibles ou non fournies, lui étaient communiquées subséquemment.

Assurance qualité

Un protocole de vérification interne a été établi afin de valider les processus d'analyse. Celui-ci a démontré l'absence d'anomalies significatives.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'approche utilisée dans ce projet repose sur l'analyse de scénarios d'irrigation et d'alternatives à l'irrigation. Les données utilisées dans les scénarios d'irrigation proviennent majoritairement de l'IRDA. Celles-ci contenaient les taux de pertes liées au stress hydrique, les données techniques d'irrigation et une soumission pour un canon enrouleur. Les données utilisées dans les scénarios alternatifs proviennent principalement de la littérature grise du milieu agricole québécois.

Notre analyse cherche à évaluer les gains et les pertes économiques des solutions étudiées pour réduire les pertes de rendements en fourrage liées au stress hydrique dans la région de la Capitale-Nationale. Une évaluation des scénarios de solutions selon divers taux de pertes de rendement (10 %, 25 % et 50 %) permet d'obtenir les gains et les pertes pour chaque scénario. L'analyse repose sur des budgets partiels des solutions proposées.

À noter que ce type d'analyse est généralement utilisé afin d'évaluer une augmentation de la productivité d'une entreprise, ce qui mène à des marges annuelles positives. Dans le cas présent, l'objectif est plutôt de réduire une perte. Il est donc normal que l'ensemble des marges annuelles présentées soient négatives puisque la mitigation d'une perte engendre nécessairement un coût. L'objectif est donc de minimiser ces pertes.

Le budget partiel

L'analyse économique est principalement effectuée selon la méthode de budget partiel. Cette méthode consiste à évaluer les conséquences financières spécifiques d'un scénario. Pour ce faire, les améliorations (produits en plus et frais en moins) et les détériorations (produits en moins et frais en plus) de chacun des scénarios sont estimées. Les postes considérés sont détaillés dans l'analyse.

SCÉNARIOS DE RÉDUCTION DES PERTES FACE AU STRESS HYDRIQUE

La solution étudiée pour faire face au stress hydrique au champ est l'installation d'un système d'irrigation. Toutefois, une entreprise dispose d'autres moyens pour gérer le risque de pertes liées au stress hydrique. En effet, elle peut cultiver des superficies en fourrage plus importantes et ainsi être en mesure d'absorber une certaine perte de rendement sans avoir besoin d'acheter des fourrages. Une autre méthode permettant de gérer ce risque est de souscrire à l'assurance récolte (ASREC) afin d'obtenir une compensation monétaire pour les pertes encourues, en espérant que ce montant monétaire permet de couvrir l'achat du volume de fourrage manquant. Les solutions proposées sont testées vis-à-vis trois (3) scénarios de stress hydrique et un scénario de référence présentés au Tableau 1.

Les données de rendements sont spécifiques à la région de la Capitale-Nationale et représentent un rendement sans pertes hydriques. La valeur attribuée aux fourrages est celle du prix unitaire de La Financière agricole du Québec (FADQ) 2023 pour le scénario de référence et de pertes faibles. Afin de simuler un effet de rareté régionale sur les prix, une hausse de 20 % est appliquée pour les pertes moyennes et 50 % pour les pertes élevées. La superficie étudiée est de 30 hectares, soit la superficie maximale couverte par un canon enrouleur. Les masses de fourrages sont toujours à 85 % d'humidité.

Note sur l'entreposage

L'entreposage de fourrages de sécurité est une réalité pour la majorité des entreprises laitières et bovines. Elles entreposent une partie de leur surplus afin de faire face aux années de sécheresses. Cette gestion des surplus varie grandement entre les entreprises et entre les années. Ce surplus est utilisé lors des années de pertes afin de réduire l'achat de foin nécessaire.

D'un point de vue économique, ces surplus ont toutefois une valeur! Celle de leur production, de leur maintenance et de leur entreposage. Ainsi remplacer l'achat de foin par l'utilisation de ses propres surplus est équivalent dans cette analyse. Même pour les années de grande rareté, le coût d'opportunité de vendre ce foin entreposé le rend équivalent à son achat. De plus, il ne faut pas négliger qu'advenant des pertes sur plusieurs années consécutives, il n'y a plus d'inventaire et il faut alors acheter l'ensemble des pertes à l'externe.

Tableau 1. Données des scénarios de stress hydrique

Scénarios de stress hydrique	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Pourcentage de pertes annuelles de fourrages	10 %	25 %	50 %	0 %
Rendement à l'hectare (t/ha)	6,1	5,1	3,4	6,7
Rendement obtenu en fourrages sur 30 ha (t)	182	152	101	202
Pertes en fourrages sur 30 ha (t)	20,2	50,5	101,0	0,0
Valeur des fourrages (\$/t)	245	294	368	245
Coût d'achat des pertes (\$)	-4 949	-14 848	-37 120	0

Solution A : Irrigation mobile avec un canon enrouleur

Le scénario d'irrigation proposé par l'IRDA est l'achat d'un système mobile d'irrigation composé d'un canon enrouleur. Dans ce scénario, l'entreprise n'a pas de diminution de rendement puisqu'elle irrigue. Elle évite donc de devoir acheter le fourrage manquant. Les données techniques sur l'irrigation sont présentées au Tableau 2. Le nombre d'irrigations et la quantité d'eau appliquée doublent dans un scénario de stress hydrique important.

Tableau 2. Information technique sur la solution d'irrigation

Scénarios de stress hydrique	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Pourcentage de pertes annuelles de fourrage	10 %	25 %	50 %	0 %
Volume d'irrigation par saison (mm/ha)	100	150	200	
Nombre d'irrigation par saison (n ^{bre})	4	6	8	0
Temps d'irrigation - tracteur 80 HP (h)	450	675	900	
Temps d'installation et de déplacement - tracteur 100 HP (h)	12	18	24	

L'utilisation d'un système d'irrigation comporte trois (3) impacts économiques importants. Le premier est d'éviter une perte de rendement. La valeur des fourrages protégée par l'irrigation représente le gain à irriguer (voir Tableau 3). Deuxièmement, il y a des coûts liés à l'opération du système d'irrigation. Ce dernier requiert un tracteur pour la pompe qui doit fonctionner pour de longues durées. Un second tracteur pour l'installation et le déplacement de l'équipement est aussi nécessaire. Le système étant mécanisé, le besoin en main-d'œuvre pour l'installation, le déplacement et la surveillance est faible. Troisièmement, l'achat de ce type de système mobile est estimé à 125 000 \$. Les frais de possession associés, d'entretien, d'amortissement et d'intérêt à long terme sont répartis sur 15 ans et doivent être assumés même si le système d'irrigation n'est pas utilisé. Les frais d'assurances ne sont pas inclus. Puisque le tracteur de 80 HP sert uniquement au pompage durant l'année, l'ensemble des frais fixes annuels sont alloués aux tracteurs. Ce sont donc les mêmes frais pour tous les scénarios.

Tableau 3. Marges annuelles du système d'irrigation sur 30 ha

Scénarios de stress hydrique	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Gains (A)				
Valeur du fourrage sauvé (\$)	4 949	14 848	37 120	-
Coûts d'opération (B)				
<u>Tracteur 80 HP (Pompe sur PDF)</u>				
Entretien et réparation machinerie (\$)	3 893	5 839	7 785	-
Carburants et lubrifiants (\$)	10 122	15 183	20 245	-
<u>Tracteur 100 HP (Installation et déplacement)</u>				
Entretien et réparation machinerie (\$)	142	212	283	-
Carburants et lubrifiants (\$)	337	506	675	-
<u>Main-d'œuvre</u>				
Frais en main-d'œuvre (\$)	312	468	624	-
Total des coûts d'opération	14 806	22 209	29 612	-
Coûts fixes annualisés (C)				
Canon enrouleur mobile			17 890	
Tracteur 80 HP			10 545	
Tracteur 100 HP	333	500	667	-
Total de coûts fixes	28 769	28 935	29 102	28 435
Coût total annuel (D = B + C)	43 574	51 144	58 714	28 435
Marges annuelles liées au canon (A - D)	(38 625)	(36 296)	(21 593)	(28 435)

Le Tableau 3 montre les gains et les coûts engagés pour le système d'irrigation pour sa superficie maximale de 30 ha selon les scénarios de stress hydrique. Ainsi, ce système engendre plus de coûts pour l'entreprise que de gains et ce peu importe la masse de fourrage sauvée. Les frais d'opération et les frais de possession sont tous les deux très élevés vis-à-vis la valeur des fourrages économisés. Puisque l'élément principal qui affecte la perte annuelle est la valeur du fourrage sauvé, une table de sensibilité est présentée au Tableau 4. Cela permet de constater que lorsque le prix du fourrage est faible, l'ensemble des scénarios semblent peu avantageux pour une entreprise. Toutefois, lorsque le prix des fourrages est élevé, à cause d'un effet de rareté régional, le système d'irrigation devient de plus en plus avantageux.

Tableau 4. Table de sensibilité de la marge annuelle du système d'irrigation selon le prix du fourrage

Scénarios de stress hydrique	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Prix du fourrage				
221 \$/t (90 %)	(39 110)	(39 983)	(36 391)	
245 \$/t (100 %)	(38 625)	(38 771)	(33 967)	
294 \$/t (120 %)	(37 635)	(36 296)	(29 017)	(28 435)
368 \$/t (150 %)	(36 140)	(32 559)	(21 543)	
429 \$/t (175 %)	(34 908)	(29 478)	(15 381)	
490 \$/t (200 %)	(33 676)	(26 397)	(9 220)	

Il est important de mentionner que l'ensemble des coûts liés à l'accès à l'eau (permis, étang, chemin, canaux, etc.) ne sont pas pris en compte dans cette analyse, mais doivent être considérés par les entreprises désirant utiliser un système d'irrigation. De plus, lors de grande sécheresse, il peut être plus difficile de s'approvisionner en eau.

Solution B : Achat de terres

Le second scénario proposé par l'IRDA est l'achat de terres. Avant toute chose, il est important de mentionner que l'achat de terres est fortement limité par l'offre et la demande régionale et que le prix des terres varie énormément à l'intérieur d'une même région. Ce scénario de solution sert à initier la réflexion sur la possibilité d'achat de terres afin de réduire un risque climatique et ne doit pas être utilisé tel quel pour évaluer l'achat de terre dans un scénario réel puisque les liquidités de l'entreprise ne sont pas prises en compte.

La superficie de terre à acheter est calculée selon les pertes de fourrage à combler et le rendement obtenu selon le stress hydrique puisque ces superficies sont aussi affectées par les pertes. L'achat des terres est limité à 40 % des superficies possédées, le besoin en fourrage ne pouvant être comblé de cette manière doit être acheté. Une hypothèse d'autofinancement de 20 % est retenue. La mise de fonds annualisée sur la même durée que le prêt, soit 20 ans.

Tout comme pour la solution d'irrigation, l'achat de terres permet d'éviter d'avoir à acheter du foin, ce qui représente le gain de l'entreprise. Puisque les superficies cultivées sont plus importantes, les frais d'opération supplémentaire pour l'ensemble des opérations culturales (implantation, fauche, récolte) sont considérés. Pour ce scénario, l'ensemble des déboursés monétaires sont considérés, incluant le paiement en capital et la mise de fonds. Finalement, un achat de fourrage est nécessaire pour le scénario avec des pertes hydriques élevées puisque les superficies supplémentaires ne permettent pas de couvrir l'ensemble des pertes. Le coût des terres retenu est de 11 288 \$/ha.

Ce scénario est fortement influencé par la valeur du fourrage et par le coût de production du fourrage. En effet, le coût de production retenu (CRAAQ, 2023) est de 262 \$/t alors que la valeur du fourrage (présenté au Tableau 1) varie entre 245 \$/t et 328 \$/t selon le scénario de perte. Ainsi, la production de fourrage peut être une activité déficitaire. Sur ce point, il faut savoir que le fourrage est généralement produit pour nourrir des animaux qui eux

fournissent des revenus et des profits à l'entreprise. Une fois achetées, les terres doivent demeurer en production. L'entreprise devra donc gérer des surplus de foin lors des années sans pertes.

Tableau 5. Marges annuelles pour la solution d'achat de terres

Scénarios de stress hydrique	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Pourcentage de pertes annuelles de fourrage	10 %	25 %	50 %	0 %
Pertes en fourrages (t)	20,2	50,5	101,0	-
Superficies nécessaires pour couvrir les pertes (ha)	3,3	10,0	12,0*	-
Valeurs des terres achetées (\$)	37 973	113 920	136 704	-
Mise de fonds (\$)	7 595	22 784	27 341	-
Emprunt (\$)	30 379	91 136	109 363	-
Annuité moyenne sur l'emprunt (\$)	2 248	6 744	8 093	-
Paiement en capital (\$)	1 519	4 557	5 468	-
Paiement en intérêt LT. (\$)	729	2 187	2 625	-
Gains (A)				
Valeur du fourrage sauvé (\$)	4 949	14 848	14 848	-
Frais encourus (B)				
Frais d'opération pour superficies supplémentaires (\$)	5 880	17 640	21 168	-
Déboursés monétaires pour achat de terres (\$)	2 628	7 883	9 460	-
Achat de foin manquant (\$)	-	-	22 272	-
Coût total annuel	8 508	25 523	52 900	-
Marges annuelles liées à l'achat de terres (A - B)	(3 558)	(10 675)	(38 052)	-

* Superficie d'achat limitée à 40 %, soit 12 ha.

Le Tableau 6 présente les surplus de foin lors des années sans pertes (donc avec un rendement de 6 734 kg/ha pour tous les scénarios), la valeur attribuée à ce surplus (prix de référence de 245 \$/t) et la marge restante après avoir couvert les frais d'opération pour les superficies supplémentaires ET les déboursés monétaires, qui eux doivent être payés chaque année! Les années sans stress hydrique, il y a donc une perte monétaire associée au maintien des terres en culture. La vente des surplus ne permet pas de couvrir ces frais. La vente à perte peut paraître surprenante, mais semble courante lorsque les surplus s'accumulent, ce qui peut même causer une pression à la baisse sur les prix (non considéré dans l'exemple).

Tableau 6. Effets de l'achat de terres pour les années sans pertes

Scénarios de stress hydrique	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Surplus de foin - sans pertes (t/ha)	22	67	81	-
Valeur du surplus (\$)	5 499	16 498	19 798	-
Marge des années sans pertes (\$)	(3 008)	(9 025)	(10 830)	-

Les frais liés à l'achat des terres représentent une part importante des coûts de cette option. Afin de tenir compte des variations dans le prix des terres, le Tableau 7 présente une table de sensibilité avec plusieurs prix de terres.

Tableau 7. Table de sensibilité du prix des terres

Scénarios de stress hydrique	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Prix des terres (ha)				
10 000 \$/ha (88 %)	(3 237)	(9 712)	(36 896)	
11 000 \$/ha (100 %)	(3 558)	(10 675)	(38 052)	
15 000 \$/ha (132 %)	(4 391)	(13 172)	(41 048)	-
17 000 \$/ha (154 %)	(4 967)	(14 902)	(43 124)	
20 000 \$/ha (176 %)	(5 544)	(16 632)	(45 200)	

Solution C : Assurance récolte

L'assurance récolte est l'option de gestion de risque la plus populaire dans la production de foin. À cet effet, plus de 5 000 entreprises représentant 438 000 ha (FADQ, 2023a) étaient assurées à l'un des trois (3) types de couvertures.

- 1) La couverture selon les besoins alimentaires est basée sur une évaluation de la consommation de fourrage des animaux qui est rapporté en une masse (tonnes) de fourrage nécessaire puis en superficie (ha) nécessaire pour produire cette masse de fourrage.
- 2) La couverture pâturage fonctionne sur un principe similaire.
- 3) La couverture sur les superficies repose sur un mélange de données historiques et de données climatiques et de rendements selon des stations météo afin de calculer un rendement probable ainsi que des pertes. C'est ce type de couverture qui est retenue pour l'analyse puisqu'elle recoupe les autres types.

Cette solution d'assurance permet, en l'échange d'une contribution de participation, d'obtenir un paiement qui couvre une partie des pertes monétaires calculées par la FADQ selon les options d'assurances choisies. Ainsi cette solution s'ajuste à l'intensité de la perte en fourrage. Toutefois, puisque c'est un programme d'assurance avec une franchise, l'indemnisation ne couvre jamais l'ensemble des pertes et une contribution demeure nécessaire même s'il n'y a pas de pertes. L'analyse est présentée en deux (2) sous-sections, le calcul de la contribution et le calcul de l'indemnité. Les données présentées le sont à titre d'exemple, car le calcul de contribution et de compensation est particulier à chaque entreprise. Les résultats peuvent varier considérablement selon les options sélectionnées.

Le premier élément pris en considération pour cette solution est le calcul du paiement de la contribution, présenté au Tableau 8. Les paramètres sont les suivants :

- les unités assurées représentent le rendement de référence ;
- le prix unitaire peut varier entre 60 % et 100 % du prix de référence, le dernier étant retenu dans l'exemple ;
- la valeur assurable est calculée avec ces dernières informations ;
- l'option de garantie est choisie par l'entreprise entre 70 % et 85 % ;
- le taux de prime, le facteur de discrimination ainsi que la part assumée par le producteur sont définis par le programme. Les valeurs retenues sont des valeurs de références de la FADQ ;
- un rabais fidélité peut être appliqué. Les entreprises étant souvent assurées de manière continue ce dernier est appliqué dans l'exemple.

Tableau 8. Exemple de paramètres de calcul de la valeur assurée et de la contribution pour l'assurance récolte

Paramètres	Données /ha	Données 30/ha
Valeur assurée		
Unités assurées (t/ha)	6,7	
Prix unitaire (\$/t)	245	
Valeur assurable (\$)	1 650	
Option de garantie	85 %	
Valeur assurée (\$)	1 402	42 070
Contribution		
Taux de prime de base provincial	6 %	
Facteur de discrimination individuel	1,19	
Part assumée par le producteur	40 %	
Contribution brute (\$)	41,19	
Rabais fidélité	8 %	
Rabais (\$)	3,30	
Contribution nette (\$)	37,89	1 136,83

Le second élément pris en considération est le calcul des pertes et des indemnités (voir le Tableau 9). Les éléments suivants sont considérés :

- la perte en fourrage est celle des scénarios ;
- la franchise est relative à l'option de garantie ;
- la perte nette dans le programme est détaillée par coupe et par type de perte. Dans l'exemple, seule la perte causée par la sécheresse est considérée et la perte est annualisée. Elle est calculée par la différence entre le pourcentage de perte du scénario et la franchise ;
- une bonification du prix unitaire pour le foin de remplacement pour une sécheresse régionale dans les scénarios de pertes moyennes et élevées : voir les explications ci-bas.

Tableau 9. Exemple de marge annuelle avec l'assurance récolte foin avec bonification du prix unitaire pour le foin de remplacement

Scénarios	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Pourcentage de pertes annuelles de fourrage	10 %	25 %	50 %	0 %
Indemnité (A)				
Pertes en fourrages sur 30 ha (t)	20,2	50,5	101,0	0,0
Franchise			15 %	
Perte nette	0 %	10 %	35 %	0 %
Valeur <u>FADQ</u> foin de remplacement (\$/t)	245	294	368	245
Indemnité reçue (\$)	-	5 048	22 087	-
Contribution nette pour 30 ha (\$) (B)				
			1 137	
Coût d'achat de foin (C)				
Valeur <u>régionale</u> foin de remplacement (\$/t)	245	294	368	245
Coût d'achat de foin (\$)	4 949	14 848	37 120	-
Marques annuelles liées à l'assurance-récolte (A-B-C)	(6 086)	(10 937)	(16 171)	(1 137)

La FADQ peut bonifier le prix unitaire pour le foin de remplacement lorsqu'il y a des sécheresses régionales (plusieurs conditions s'appliquent). Dans l'exemple présenté au Tableau 9, il est considéré que les conditions permettent le déclenchement de cette bonification pour les scénarios de pertes moyennes et élevées. Toutefois, les critères pour le déclenchement de cette bonification sont multiples. Ainsi, le Tableau 10 présente une version abrégée des mêmes scénarios, mais sans le déclenchement de la bonification du prix unitaire, ce qui crée une différence entre la valeur FADQ et la valeur régionale du foin de remplacement.

L'information présentée au tableau 10 permet de constater que c'est surtout lors de pertes élevées, lorsque le besoin d'achat de fourrage est important et que les prix augmentent rapidement que l'effet de la bonification devient important.

Tableau 10. Exemple de marge annuelle avec l'assurance récolte foin sans bonification du prix unitaire pour le foin de remplacement

Scénarios	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Valeur FADQ foin de remplacement (\$/t)	245	245	245	245
Indemnité reçue (\$)	-	4 207	14 724	-
Valeur régionale foin de remplacement (\$/t)	245	294	368	245
Coût d'achat de foin (\$)	4 949	14 848	37 120	-
Gains ou pertes annuelles liées à l'assurance-récolte (A-B-C)	(6 086)	(11 778)	(23 533)	(1 137)

DISCUSSION

En réalité, les entreprises font du fourrage afin de nourrir des animaux et ce sont ces animaux qui permettent de générer des revenus. L'objectif d'une entreprise n'est donc pas de faire des profits avec les fourrages, mais plutôt de minimiser son coût au maximum sans affecter la qualité. Le Tableau 11 présente la comparaison des options évaluées afin de minimiser les frais associés à la production de fourrage lors de stress hydrique.

Tableau 11. Comparaison des marges annuelles des solutions

Scénarios de pertes hydriques Pourcentage de pertes annuelles de fourrage	Pertes faibles 10 %	Pertes moyennes 25 %	Pertes élevées 50 %	Référence (sans pertes) 0 %
Pertes en fourrage (kg)	20	51	101	-
Achat de fourrage (\$)	(4 949)	(14 848)	(37 120)	-
Solution A: Système d'irrigation (\$)	(38 625)	(36 296)	(21 593)	(28 435)
Solution B: Achat des terres (\$)	(3 558)	(10 675)	(38 052)	-
Solution C: Assurance récolte foin (\$)	(6 086)	(10 937)	(16 171)	(1 137)

Le système d'irrigation n'est avantageux dans aucune des solutions. Les frais d'opération et les frais de possession sont importants alors que la valeur du fourrage, elle, est plutôt faible par rapport à d'autres denrées agricoles. De plus, des frais importants doivent être couverts même lorsque le système n'est pas utilisé. Selon les données utilisées, il est plus économique d'acheter des fourrages que d'irriguer avec un canon enrouleur.

L'achat de terre est un scénario qui peut être intéressant. La disponibilité des terres ainsi que les liquidités de l'entreprise (et sa capacité de remboursement) fait que cette option, quoiqu'intéressante, est difficile à mettre en place. De plus, certaines cultures pourraient être plus intéressantes économiquement à cultiver que des fourrages. Néanmoins, c'est l'option qui permet de réduire le plus l'impact économique des pertes hydriques. Il y a fort à parier

que c'est une option utilisée, consciemment ou non, par plusieurs entreprises, surtout celles qui accumulent des surplus presque toutes les années. Toutefois, puisque les superficies additionnelles sont aussi soumises au stress hydrique, c'est une option qui performe moins bien lors de sécheresse importante. À rappeler que dans l'exemple présenté, il y a aussi un achat de fourrage nécessaire pour le scénario de pertes élevées.

Finalement, l'assurance récolte est le scénario le plus stable. Lorsqu'il y a peu ou pas de pertes, le programme d'assurance n'est pas aussi avantageux que l'achat de terre. Cela coûte même plus cher que de simplement couvrir les pertes par l'achat de fourrage. Toutefois, lorsque les pertes deviennent plus importantes (moyenne et élevée), le programme est plus avantageux que l'achat de fourrage et autant ou plus intéressant que les autres scénarios, et ce, avec ou sans bonification. De plus, il est important de souligner que le programme couvre aussi les pertes pour le gel et certaines difficultés de récolte qui ne sont pas prises en compte dans cette analyse.

RÉFÉRENCES

- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2022). *Machinerie - Coûts d'utilisation et taux à forfait suggéré*. AGDEX 740/825a.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2023). *Foin de mil et de luzerne sans plante-abri – Autoconsommation*. AGDEX 121/821a.
- Financière agricole du Québec. (2023a). *Assurance récolte prix unitaires 2023*. (<https://www.fada.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/prix-unitaires>)
- Financière agricole du Québec. (2023). *Bulletin Transac-TERRES, deuxième édition 2023*. (<https://www.fada.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/bulletin-transac-terres>)
- Financière agricole du Québec. (2023b). *Assurance récolte – Statistiques annuelles 2023*. (<https://www.fada.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/statistiques-annuelles>)



225, rue Monfort, bureau 300 | Lévis (Québec) | G6W 3L8

T : 418 833-2515 | F : 418 933-9125 | www.cecpa.qc.ca