

EstimEau : un outil d'aide à la décision pour améliorer la gestion de l'eau et prévenir les conflits d'usage

VOLET 2 – Estimation de la disponibilité en eau à l'échelle du Québec agricole

Projet N° 21-001-GE-IRDA

Durée du projet : Mars 2022 / Mars 2024

RAPPORT FINAL

Auteurs : Simon Ricard, ing. Ph. D., Michael Osina, M. Sc., François Huchet, Arianne Blais-Gagnon, ing., M. Sc. et Carl Boivin, agr., M. Sc., Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

Mars 2024

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

TABLE DES MATIÈRES

1	ÉQUIPE DE PROJET – VOLET 2.....	1
2	APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE.....	2
2.1	Consultation préliminaire	2
2.2	Eau de surface	3
2.2.1	Bassins versants de superficie supérieure à 50 km ²	3
2.2.2	Bassins versants de superficie inférieure à 50 km ²	6
2.3	Eau souterraine	8
2.3.1	Notions et concepts	8
2.3.2	Production de la grille de recharge distribuée	12
2.3.3	Évaluation de la variabilité des niveaux de nappe.....	16
2.3.4	Projection de la recharge en climat futur.....	21
3	RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS	26
3.1	Eau de surface	26
3.1.1	Validation de l'approche	26
3.1.2	Projection en contexte de changements climatiques	30
3.2	Disponibilité de l'eau souterraine	31
4	POINT DE CONTACT POUR INFORMATION.....	32
5	REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS	32
6	RÉFÉRENCES	33
	Annexe A : Cartes relatives à l'estimation de la disponibilité des eaux souterraines	35
	Annexe B : Données relatives à la grille de recharge	36
	Annexe C : Données relatives à la variabilité des niveaux de nappe.....	45
	Annexe D : Données relatives à la recharge en climat futur	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Distribution des tronçons de rivières numérisés par le Portrait hydrologique de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Les points (verts et rouges) indiquent les stations hydrométriques (ouvertes et fermées) entretenues par le MELCCFP.	3
Figure 2. Série hydrologique reconstituée par l'Atlas hydroclimatique au tronçon de rivière numérisé MONT00923 présentant les débits moyens journaliers (Q, en m ³ /s) de 1990 à 2020.....	4
Figure 3. Localisation du tronçon MONT00923 (616 km ²) et de la station hydrométrique Castor à proximité (11,2 km ²) opérée par l'IRDA.	4
Figure 4. Évaluation du 15 % du Q _{2,7} (en m ³ /s) compilée sur une base mensuelle au tronçon MONT00923 sur la période 1990 à 2020.	5
Figure 5. Localisation des bassins versants instrumentés par l'IRDA dont les données ont été colligées et reformatées dans le cadre du projet « Impacts hydrologiques des systèmes cultureux » (Ricard et al., 2023).	6
Figure 6. Schéma de la relation spatiale liant un «tronçon à estimer» et son «tronçon-source». Le post-traitement statistique permettra d'attribuer à la série hydrologique reconstituée au tronçon-source des propriétés statistiques comparables à la station hydrométrique avoisinante.	7
Figure 7. Schéma conceptuel des divers types d'aquifères et d'un aquitard (RQES, 2023).	9
Figure 8. Schéma simplifié du processus de recharge et des principales composantes du cycle de l'eau (Dubois et al., 2021a).....	10
Figure 9. Exemple d'hydrogramme statistique d'un puits du RSESQ localisé en Gaspésie (Gosselin et al., 2020).....	10
Figure 10. Statistiques descriptives (minimum, maximum et moyenne) des normales climatiques (1981-2010) des différents domaines hydroclimatiques par rapport au Québec agricole.....	17
Figure 11. Hydrogramme statistique des niveaux de nappe normalisés du puits 03030008 associé au DH-1 (l'ensemble des hydrogrammes statistiques est joint à la figure 2 de l'annexe 5).....	20
Figure 12. Séries hydrologiques observée à la station Castor et estimée par post-traitement statistique à partir des séries reconstituées au tronçon MONT00923 pour l'année 2012.	26
Figure 13. Hydrogrammes interannuels moyens observés et estimés aux douze sites de validation. Une moyenne mobile sur 7 jours a été appliquée aux deux séries pour faire rehausser le ratio signal-bruit affectant les débits observés.....	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Statistiques de la grille de recharge annuelle moyenne du roc selon les classes initiales et les classes ajustées.	14
Tableau 2. Recharge potentielle estimée dans le Projet Sud Québec - Tableau adapté de la table 4 de Dubois et al. (2022).	22
Tableau 3. Recharge réelle estimée dans le Projet Mercier/St-Rémi – Tableau basé sur la figure 5.28 de Ballard et al. (2022).....	23
Tableau 4. Seuils identifiés dans le Projet Sud Québec afin de définir des niveaux préventifs d’alerte dans le futur pour une meilleure gestion de la ressource en eau - Tableau basé sur les informations de la figure 3.10 de Dubois (2022).	24
Tableau 5. Performance des séries hydrologiques reconstituées sur six sites de validation.	27
Tableau 6. Comparaison de la l’approche ensembliste à une approche déterministe	29
Tableau 7. Erreur relative absolue de simulation (E) affectant les valeurs estimées de $Q_{2,7}$ du mois de juin à septembre par l’approche ensembliste	30
Tableau 8. Ampleur du changement projeté des $Q_{2,7}$ de juin à septembre pour différentes sous-régions hydrologiques ¹	31

USAGES ET LIMITATIONS

Dans le cadre du projet EstimEau, la disponibilité en eau est estimée à partir d'approches de modélisation régionale. L'information présentée est de nature générale et n'a pas fait l'objet d'une vérification exhaustive.

TITRE DU PROJET : EstimEau : un outil d'aide à la décision pour améliorer la gestion de l'eau et prévenir les conflits d'usage. VOLET 2 – Estimation de la disponibilité en eau à l'échelle du Québec agricole

NUMÉRO DU PROJET : 21-001-GE-IRDA

Le résumé du projet et la description de ses objectifs sont présentés dans le rapport du volet 1 (Boivin et al. 2024).

1 ÉQUIPE DE PROJET – VOLET 2

- Simon Ricard, ing., Ph. D., Chercheur en hydrologie, responsable du volet 2« Estimation de la disponibilité en eau à l'échelle du Québec agricole », IRDA.
- Michael Osina, M. Sc., Professionnel de recherche en hydrologie, IRDA.
- François Huchet, M. Sc., Professionnel de recherche en hydrogéologie, IRDA.
- Arianne Blais Gagnon, M.Sc., professionnelle de recherche en hydrologie, IRDA.
- René Lefebvre, contribution scientifique significative pour les éléments méthodologiques liés à l'hydrogéologie, Institut national de la recherche scientifique (INRS).
- Carl Boivin, agr., M. Sc., Chercheur en régie de l'eau en productions fruitière et maraîchère, coordonnateur et responsable scientifique du projet, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).

2 APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

2.1 Consultation préliminaire

En démarrage de projet, trois rencontres ont été tenues avec des partenaires clés afin de discuter des différents aspects liés à l'évaluation de la disponibilité des eaux de surface et souterraines. La première rencontre s'est tenue le 30 mai 2022 avec Charles Malenfant (MELCCFP, Direction de l'expertise hydrique). Il a été question de technicalités concernant la nature des simulations produites dans le cadre de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional : réseau hydrographique numérisé, disponibilité des séries et indicateurs hydrologiques, reconstitutions historiques, projections, limitations méthodologiques et mises à jour récentes. M. Malenfant est demeuré disponible pour répondre à des questions techniques depuis le début du projet.

La seconde rencontre (14 juin 2022) s'est tenue avec René Lefèbvre, chercheur à l'INRS. Les échanges ont porté sur les différentes informations disponibles pour évaluer la recharge des aquifères : mises à jour des projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), le réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) et l'outil de stockage et de gestion des données (SARDES). Il a également été question de la notion de recharge durable ainsi que la mise à jour apportée sur les données du système de gestion des prélèvements d'eau (GPE) en Montérégie. Il a finalement été question de récentes études menées par l'UQAM projetant la recharge d'aquifères au Québec en contexte de changements climatiques.

La dernière rencontre (21 juin 2022) s'est tenue avec Sébastien Ouellet-Proulx (MELCCFP, Direction de la gestion intégrée de l'eau). Il a été question des approches méthodologiques pour estimer les différents prélèvements en eau (agricole, industriel, municipal), l'accès à la base de données GPE et l'information diffusée dans l'Atlas de l'eau, notamment l'indicateur de disponibilité en eau de surface en climat actuel et du sous-indicateur décrivant la pression sur les ressources en eau.

Il a été conclu, sur la base des échanges tenus lors de ces rencontres, que :

- i. La disponibilité de surface allait s'évaluer à partir de la reconstitution historique des séries de débit produites par l'Atlas hydroclimatique (version 2022).
- ii. Une méthode devra être développée pour estimer la disponibilité de surface en tout point sur le territoire, car l'Atlas ne fournit pas les séries simulées aux tronçons de rivière dont la superficie drainée est inférieure à 50 km².
- iii. La recharge sera évaluée sur une base annuelle et posée constante. Les valeurs seront issues des cycles PACES précédents et mises à jour dans la mesure du possible.
- iv. L'évaluation de l'impact cumulatif des prélèvements est hors portée dans le cadre du présent projet. L'indicateur de pression sur les ressources en eau du MELCCFP sera valorisé à titre indicatif.

2.2 Eau de surface

2.2.1 Bassins versants de superficie supérieure à 50 km²

La disponibilité en eau de surface est estimée à partir des séries hydrologiques reconstituées dans le cadre de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Ces séries sont produites sur près de 10 000 tronçons de rivière dans le cadre du Portrait hydrologique (figure 1). Chaque tronçon de rivière est numérisé selon une structure qui décrit les relations amont-aval ainsi que l'attribution des unités spatiales de calcul sur lesquelles sont simulés les processus du bilan hydrologique à un pas de temps journalier, à l'aide d'un modèle hydrologique semi-distribué à base physique dont l'unité spatiale de calcul se nomme UHRH (pour unité hydrologique relativement homogène). Pour chaque tronçon de rivière numérisé, une série de débits journaliers historique reconstituée par modélisation est disponible.

Les séries hydrologiques reconstituées sur la période 1990 à 2020 ont été extraites pour les fins de cette étude. La série hydrologique reconstituée au tronçon MONT00923, (superficie drainée de 616 km²) est présentée à la figure 2 à titre d'exemple. Ce tronçon est localisé à proximité de la station hydrométrique opérée par l'IRDA au ruisseau Castor (figure 3, superficie drainée de 11,2 km²).

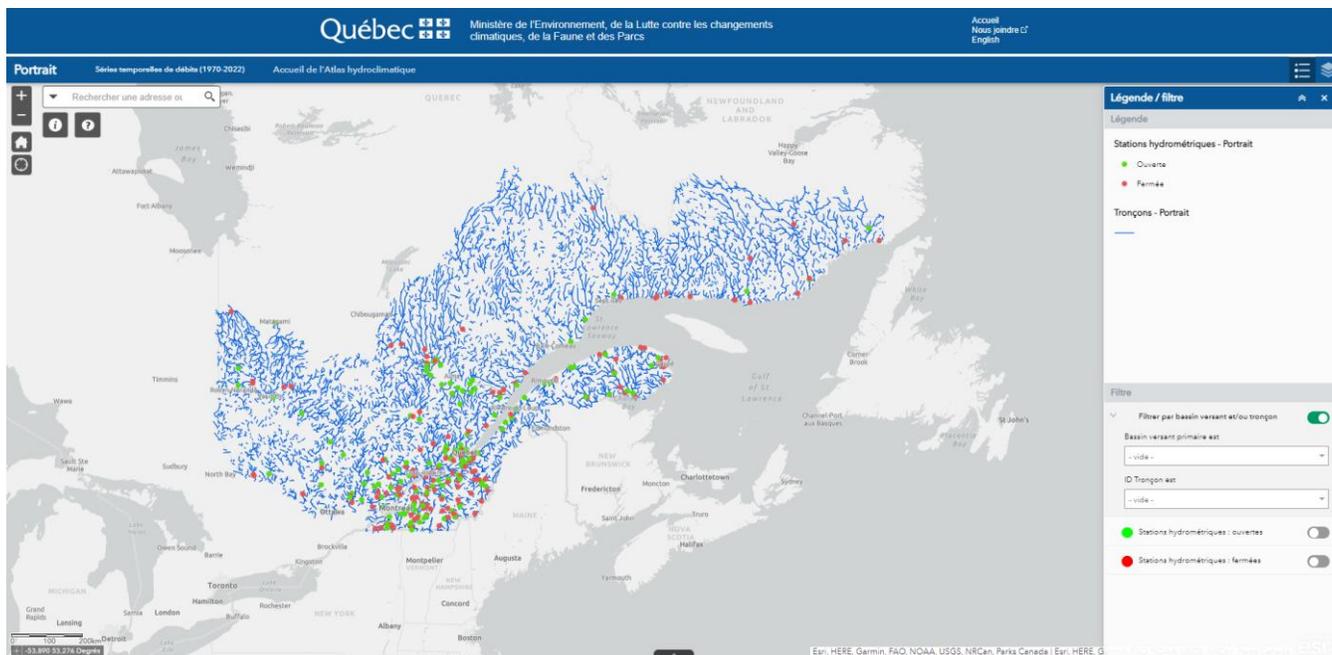


Figure 1. Distribution des tronçons de rivières numérisés par le Portrait hydrologique de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Les points (verts et rouges) indiquent les stations hydrométriques (ouvertes et fermées) entretenues par le MELCCFP.

La disponibilité en eau de surface est évaluée sur la base du critère de 15% du débit d'étiage sur 7 jours consécutifs de récurrence 2 ans ($Q_{2,7}$, débit maximum qu'il est permis de prélever selon MELCCFP 2019), compilé pour chaque mois de l'année. L'estimation de la disponibilité en eau de surface au tronçon MONT00923 est présentée à la figure 4 à titre d'exemple. Pour les bassins versants de superficie supérieure à 50 km², la disponibilité est calculée directement à partir de la série de débit reconstituée, c'est-à-dire sans appliquer de post-traitement statistique tel que décrit à la section 2.2.2. Pour les besoins de l'affichage des résultats dans l'interface EstimEau, la disponibilité est exprimée en m³/mois en multipliant le 15% du $Q_{2,7}$ mensuel par le nombre de secondes dans le mois.

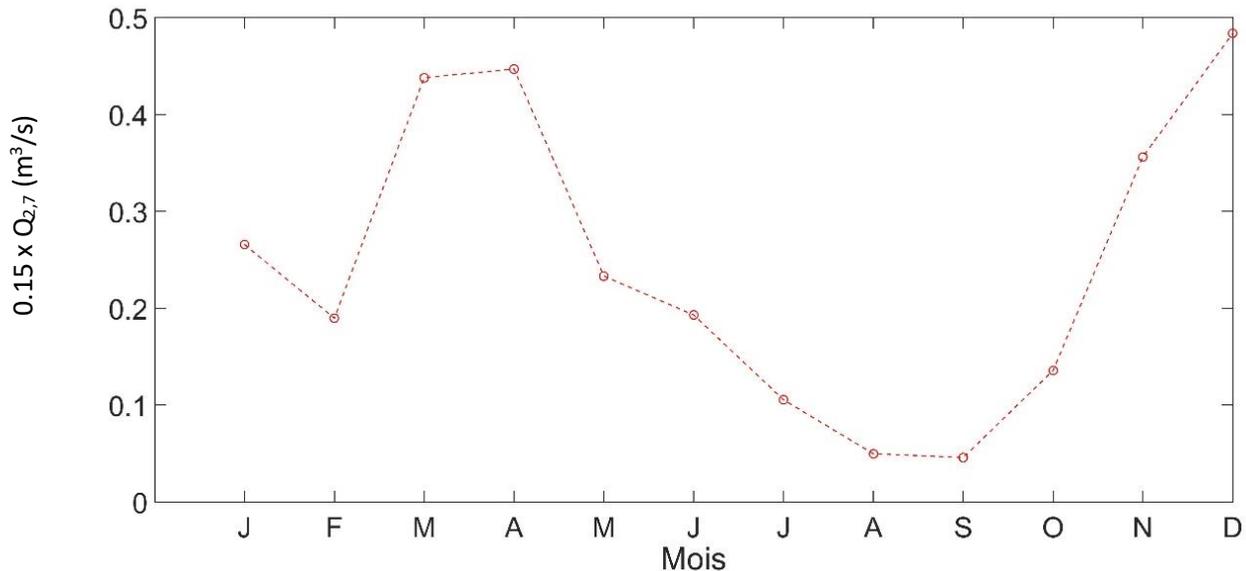


Figure 4. Évaluation du 15 % du $Q_{2,7}$ (en m³/s) compilée sur une base mensuelle au tronçon MONT00923 sur la période 1990 à 2020.

Nous rappelons ici les limitations et recommandations d'usage liées aux séries hydrologiques produites par l'Atlas hydroclimatique (pertinentes dans le cadre de la présente étude, MELCCFP, 2024) :

- i. Il est fortement recommandé d'utiliser les centiles disponibles (25e et 75e) pour apprécier l'incertitude associée aux données utilisées et de ne pas se contenter de la médiane (50e). Les principales sources d'incertitude sont les données (météorologiques, hydrologiques, occupation du territoire, type de sol, topographie, etc.), la modélisation hydrologique et la régionalisation des données par l'interpolation optimale.
- ii. La méthode ne considère pas les modifications anthropiques du débit (opération de barrages localisés en amont, prélèvement d'eau, rejet d'émissaires, etc.). Les données concernant les tronçons dont le régime subit l'influence d'un ou plusieurs barrages ne sont pas diffusées.
- iii. L'usage des données pour les bassins versants de moins de 100 km² n'est pas recommandé. Il y a peu de stations hydrométriques pour les petits bassins versants et ils sont généralement plus difficiles à modéliser et sensibles aux erreurs d'interpolation des données climatiques. Pour ces bassins, de petites différences dans les débits peuvent correspondre à des erreurs relatives importantes. Aucune donnée n'est diffusée pour les bassins versants de moins de 50 km².
- iv. L'information est de nature générale et n'a pas fait l'objet d'une vérification exhaustive, bien que plusieurs validations et vérifications aient été effectuées. Une mise à jour trimestrielle des données est prévue. Comme les données observées (hydrométriques et météorologiques) utilisées peuvent faire l'objet de changements, il est possible que des données historiques puissent changer en conséquence, particulièrement pour l'année en cours.

2.2.2 Bassins versants de superficie inférieure à 50 km²

Pour les bassins versants de superficie inférieure à 50 km², un post-traitement statistique est appliqué aux séries hydrologiques reconstituées par l'Atlas hydroclimatique afin de leur attribuer des propriétés statistiques comparables aux observations hydrométriques typiquement recueillies sur des petits bassins versants agricoles du Québec méridional. Cette approche s'appuie sur l'hypothèse que les séries produites par l'Atlas hydroclimatique reproduisent adéquatement la séquence des événements hydrologiques observés, mais que ces dernières sont affectées par des propriétés statistiques biaisées. Ces biais (erreurs systématiques) découlent du rapport d'échelle entre les bassins versants instrumentés (<50 km²) et modélisé (>50 km²) ainsi que des limites méthodologiques affectant la structure de modélisation déployée pour produire les séries hydrologiques reconstituées. Cette démarche valorise les suivis hydrométriques menés par l'IRDA depuis 1998 sur des petits bassins versants agricoles (figure 5). Une portion de ces données a été colligée et reformatée dans le cadre du projet « Impacts hydrologiques des systèmes culturaux » (Ricard et al., 2023) et sont disponibles sur demande pour fins de recherche. Les bassins Parent (Centre-du-Québec) et Boyer-Sud (Chaudière-Appalaches) ont été exclus de cette étude à cause de leur superficie jugée non représentative.

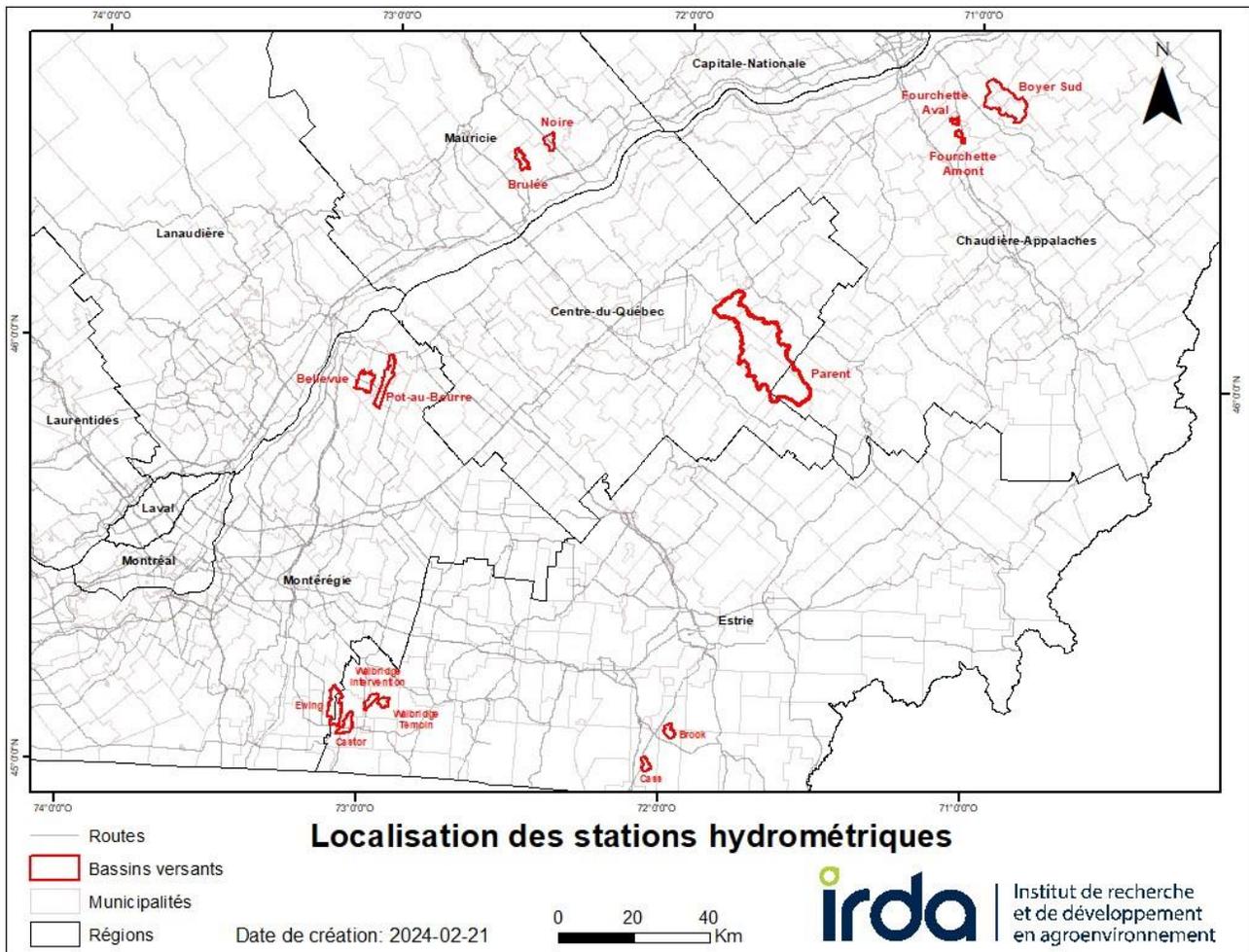


Figure 5. Localisation des bassins versants instrumentés par l'IRDA dont les données ont été colligées et reformatées dans le cadre du projet « Impacts hydrologiques des systèmes culturaux » (Ricard et al., 2023).

Les débits pour les bassins versants de superficie inférieure à 50 km² sont estimés à partir du post-traitement des séries hydrologiques reconstituées par l'Atlas hydroclimatique. Ce post-traitement s'opère selon les étapes suivantes :

ÉTAPE 1 – Identifier, dans le réseau hydrographique numérisé de l'Atlas hydroclimatique, l'ensemble des tronçons de rivière dont la superficie drainée est inférieure à 50 km² (figure 6, ci-après «tronçon à estimer»).

ÉTAPE 2 – Pour chaque tronçon à estimer, identifier le plus proche tronçon en aval dont la superficie drainée est supérieure à 50 km² (figure 6, ci-après «tronçon-source»). Cette opération est implémentée à partir des relations établies dans la structure du réseau hydrographique numérisé.

ÉTAPE 3 – Extraire la série hydrologique reconstituée au tronçon-source sur la période 1990 à 2020 (Q_{source}) et évaluer le débit spécifique (q_{source}) en normalisant par la superficie drainée en amont du tronçon source (A_{source}) tel que :

$$q_{source} = \frac{Q_{source}}{A_{source}} \quad (1)$$

ÉTAPE 4 – Évaluer le débit spécifique observé à une station avoisinante, ci-après nommée la «cible» (q_{cible}), en normalisant le débit de la série des débits observés (Q_{obs}) par la superficie drainée en amont de la station (A_{obs}).

$$q_{cible} = q_{obs} = \frac{Q_{obs}}{A_{obs}} \quad (2)$$

ÉTAPE 5 – Appliquer un post-traitement statistique de type « quantile-mapping » (Themeßl et al., 2011) à q_{source} en utilisant la cible q_{cible} . La série résultante est la « série post-traitée » (q_{pt}) tel que :

$$q_{pt} = X(q_{source}, q_{cible}) \quad (3)$$

Où X est le post-traitement statistique de type quantile mapping.

ÉTAPE 6 – Opérer un transfert de superficie pour évaluer le débit au tronçon à estimer ($Q_{estimé}$) à partir de la superficie drainée en amont du tronçon à estimer ($A_{estimé}$) tel que :

$$Q_{estimé} = q_{pt} \times A_{estimé} \quad (4)$$

ÉTAPE 7 – Appliquer les étapes 4 à 6 sur une base ensembliste, c'est-à-dire en utilisant les cibles disponibles (stations avoisinantes) itérativement et de façon indépendante.

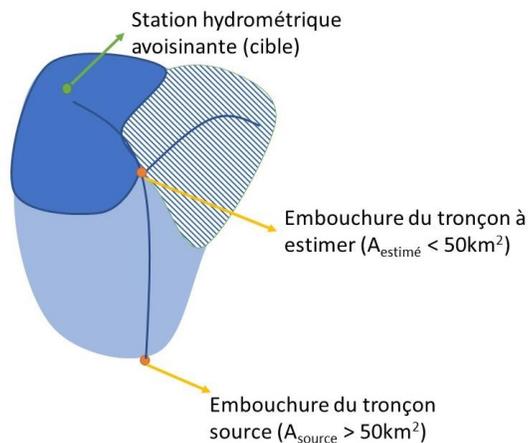


Figure 6. Schéma de la relation spatiale liant un «tronçon à estimer» et son «tronçon-source». Le post-traitement statistique permettra d'attribuer à la série hydrologique reconstituée au tronçon-source des propriétés statistiques comparables à la station hydrométrique avoisinante.

2.3 Eau souterraine

En complément de la disponibilité en eau de surface, des travaux ont été amorcés pour fournir à l'utilisateur de l'outil EstimEau une information sur la disponibilité en eau souterraine (assimilée à la recharge des aquifères). Après concertation (section 2.1), il a été décidé que la recharge des aquifères sera évaluée sur une base annuelle et supposée constante, puis éventuellement mise à jour si des projets l'actualisent dans les années à venir. Les objectifs initiaux étaient de (1) recueillir les valeurs de recharge annuelle des différents projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) sur le territoire du Québec agricole, (2) moyenniser les valeurs de recharge annuelle pour chaque unité spatiale de modélisation de surface (UHRH), (3) proposer un modèle conceptuel simple pour « saisonnaliser » la recharge, et (4) proposer des facteurs d'évolution de la recharge en climat futur en se basant sur la littérature disponible.

Des ajustements ont été faits en cours de projet afin de répondre à ces quatre objectifs préliminaires. Ainsi, cette section sur la disponibilité en eau souterraine s'organise désormais autour des trois objectifs révisés suivants : (1) produire une grille de recharge distribuée à l'échelle du Québec agricole (section 2.3.2) à partir de projets antérieurs (PACES et autres), (2) évaluer la variabilité des niveaux de nappe sur de grands domaines (section 2.3.3) grâce aux données du réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ), et (3) fournir des indications sur l'évolution future de la recharge (section 2.3.4) en se basant sur les études existantes au Québec. En complément, quelques notions et concepts employés dans ces trois sections sont brièvement définis en amont (section 2.3.1) pour faciliter la lecture et la compréhension.

2.3.1 Notions et concepts

L'eau souterraine représente la principale source d'eau potable dans les régions rurales au Québec et dans plusieurs grandes villes (Groupe Agéco, 2019). En plus de l'alimentation en eau potable, elle est aussi utilisée par l'industrie et l'agriculture (Dubois et al., 2021a). Il est donc nécessaire de mieux comprendre l'impact des changements climatiques sur cette ressource afin d'assurer sa gestion durable (Larocque et al., 2019). En effet, une surexploitation de cette ressource entraînerait une baisse du niveau de nappe, l'assèchement de certains puits et une réduction des apports d'eau souterraine aux plans d'eau (lacs et cours d'eau) ainsi qu'aux milieux humides (Dubois et al., 2021a). Pour mieux comprendre les termes employés dans les sections suivantes, il est donc nécessaire de les définir brièvement.

➤ Types d'aquifères et conditions de confinement :

Un aquifère est une formation géologique comportant une zone saturée en eau suffisamment perméable pour stocker l'eau (réservoir) et être exploitée par pompage (RQES, 2023). La nappe constitue la partie saturée d'un aquifère; un aquifère est donc le contenant (la matrice géologique) tandis que la nappe est le contenu (l'eau souterraine qui y circule).

Les aquifères habituellement rencontrés sont les aquifères granulaires (constitués de dépôts meubles) et l'aquifère de roc fracturé (figure 7). La porosité définit la capacité d'un aquifère à emmagasiner (ou stocker) l'eau souterraine. Dans le roc, ce sont essentiellement les fractures qui permettent le stockage de l'eau puis leur interconnexion qui facilite son écoulement. Dans les aquifères granulaires, ce sont les pores qui assurent le stockage et la connectivité entre ces vides (porosité efficace) qui permet l'écoulement libre de l'eau. Ainsi, un sable fin aura une porosité efficace moindre qu'un gravier, plus grossier. La conductivité hydraulique est l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par l'eau. Ainsi, plus un milieu est perméable (i.e. avec une conductivité hydraulique élevée), plus l'eau peut y pénétrer et y circuler librement.

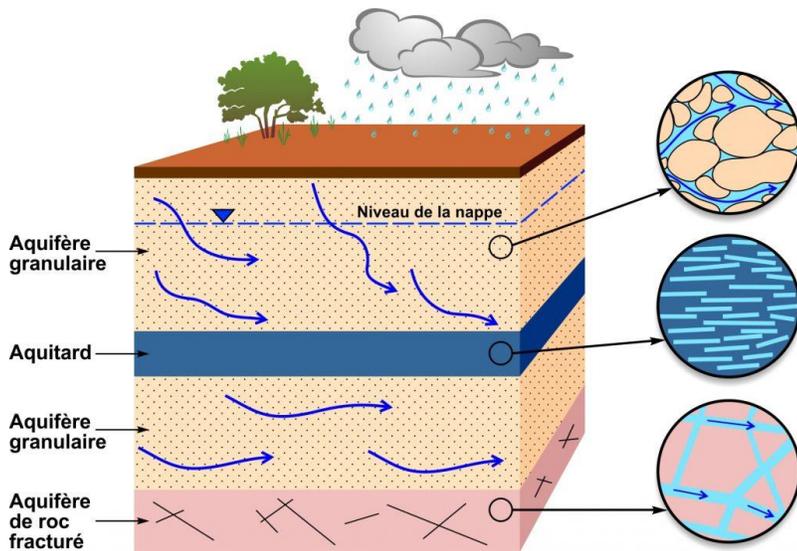


Figure 7. Schéma conceptuel des divers types d'aquifères et d'un aquitard (RQES, 2023).

Quand une formation n'est pas assez perméable pour y laisser l'eau circuler librement (ex. les argiles), il s'agit d'un aquitard (figure 7). Cette formation agit alors comme une barrière naturelle à l'écoulement de l'eau, limitant la recharge de l'aquifère sous-jacent et le protégeant d'éventuelles contaminations de surface. La présence d'une couche peu perméable (aquitard) distingue également les conditions de confinement de l'aquifère sous-jacent. Selon la nature et l'épaisseur des matériaux constituant l'aquitard, l'aquifère sous-jacent peut être non confiné, semi-confiné ou confiné. Un aquifère non confiné (ou contenant une «nappe libre») n'est pas recouvert par un aquitard et donc en contact direct avec l'atmosphère, ce qui facilite son renouvellement (recharge) mais le rend plus vulnérable aux contaminants. À l'inverse, un aquifère confiné (ou contenant une «nappe captive») est recouvert par un aquitard et donc mieux protégé des contaminations potentielles. L'alimentation de ce type d'aquifère se fait essentiellement latéralement (depuis l'amont) car la recharge verticale est limitée. Un aquifère semi-confiné est un cas intermédiaire où l'aquitard sus-jacent présente des matériaux pas totalement imperméables et de faibles épaisseurs.

➤ Bilan hydrologique et recharge des eaux souterraines

Le bilan hydrologique est un élément essentiel aux études hydrogéologiques visant à déterminer le taux de renouvellement d'un aquifère. En effet, la recharge réfère au volume d'eau atteignant la zone saturée d'un aquifère (Scanlon et al., 2002). Le cycle de l'eau peut être divisé en plusieurs composantes (figure 8): (1) les précipitations (neige ou pluie) qui sont l'apport en eau du système, (2) l'évapotranspiration qui retourne l'eau dans l'atmosphère via l'évaporation direct de l'eau et la transpiration des végétaux, (3) le ruissellement qui amène directement l'eau au cours d'eau, et (4) l'infiltration de l'eau dans le sol dont une partie contribue à la recharge des nappes (Raynauld et al., 2022).

Une partie seulement du taux d'infiltration peut percoler sous la zone racinaire, c'est la recharge potentielle, c'est-à-dire disponible pour alimenter l'aquifère sous-jacent. Selon les matériaux traversés, un certain volume de cette recharge potentielle atteint la nappe tandis que le reste constitue le ruissellement de sub-surface qui s'écoule latéralement dans la zone non saturée vers les zones d'émergence. La quantité d'eau atteignant finalement la nappe est appelée recharge réelle (ou nette). En général, les zones de recharge se retrouvent dans les hauts topographiques, là où le roc est affleurant et les épaisseurs de dépôts moindres. À l'inverse, les zones de résurgence sont plutôt localisées dans les vallées où l'apport en eau souterraine contribue notamment au débit des rivières.

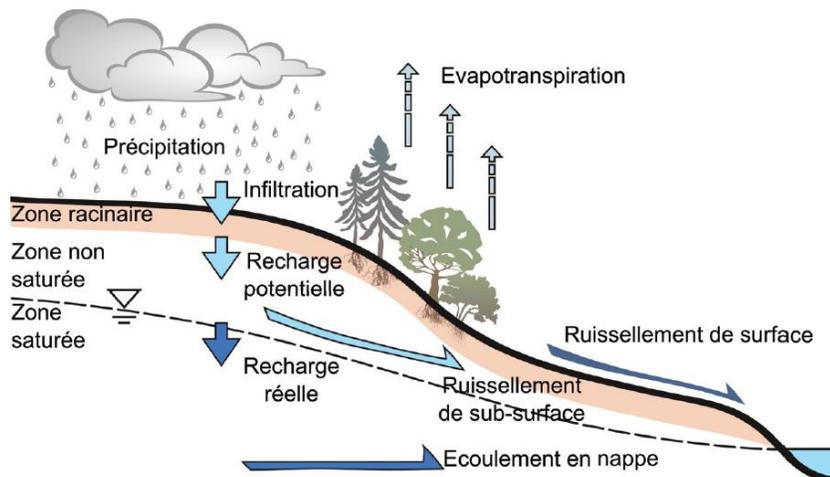


Figure 8. Schéma simplifié du processus de recharge et des principales composantes du cycle de l'eau (Dubois et al., 2021a).

Ainsi, lors des périodes d'étiage, le débit des cours d'eau est uniquement associé à l'apport des écoulements souterrains (i.e. que l'eau qui s'écoule dans une rivière en été est essentiellement d'origine souterraine). En effet, la recharge varie de façon saisonnière au cours de l'année. Au Québec, cette « saisonnalité » se caractérise par deux épisodes de recharge ; un 1er relié à la fonte printanière ainsi qu'aux redoux hivernaux et un 2ième à l'automne lorsque les précipitations se maintiennent et que l'évapotranspiration est faible en raison de la perte des feuilles (figure 9 ; exemple de fluctuations du puits 02167001 à Matane). Entre ces deux épisodes, le niveau des nappes diminue – c'est la période de récession – jusqu'à la fin de l'été (étiage). Actuellement, une grande partie de la recharge a lieu au printemps mais la dynamique pourrait être modifiée dans le futur en raison des changements climatiques (section 2.3.4).

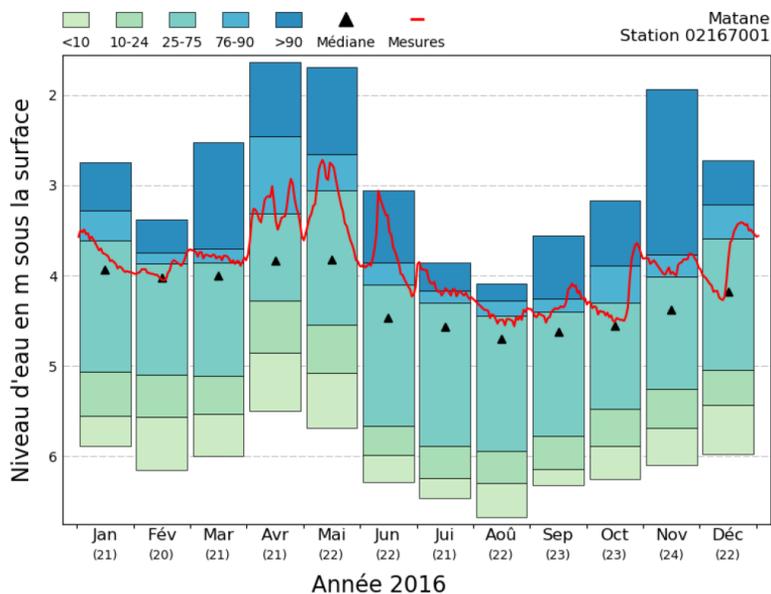


Figure 9. Exemple d'hydrogramme statistique d'un puits du RSESQ localisé en Gaspésie (Gosselin et al., 2020).

Même si la dynamique du processus de recharge doit être précisée (Wright et Novakowski, 2022), plusieurs études indiquent des modifications de la distribution de la recharge dans le futur au sein d'une année. En effet, la crue printanière (pic de recharge) devrait être plus hâtive et moins marquée au profit d'une recharge hivernale plus marquée causée par la hausse du nombre d'épisodes de redoux (Larocque et al., 2019). De plus, les périodes de récession estivale devraient être plus longues pouvant causer des étiages plus sévères des cours d'eau et des problèmes pour les puits d'alimentation (Lefebvre et al., 2023).

➤ Disponibilité, productivité et exploitabilité

Afin d'assurer la pérennité de la ressource en eau souterraine (ou disponibilité), il est donc nécessaire de connaître le taux de recharge réelle annuel d'un aquifère donné car les débits exploitables de façon durable (usages) dépendent grandement du renouvellement annuel de l'eau souterraine. À l'échelle régionale, la recharge n'est pas uniforme car elle dépend de nombreux facteurs difficiles à estimer. C'est donc un paramètre difficile à évaluer (Healy, 2010) dont il est nécessaire de tenir compte des incertitudes liées aux méthodes d'estimation utilisées pour l'évaluer. C'est la disponibilité de l'aquifère rocheux (recharge) qui est estimée car c'est le système aquifère continu à l'échelle régionale (section 2.3.2) et qu'il suffit généralement à répondre aux besoins en eau des résidences, des producteurs agricoles voire même de certaines municipalités.

Globalement, le roc est moins productif que les aquifères granulaires (Raynauld et al. 2022) même si localement il peut présenter un rendement intéressant (Laurencelle, 2018) lorsque le forage intercepte, par exemple, un réseau de fractures interconnectées productives. Pour les puits forés dans le roc – communément appelés « puits artésiens » – c'est en effet le réseau de fractures perméables qui assure l'écoulement de l'eau vers le puits et donc son débit d'exploitation. Diverses études dont les travaux de Laurencelle (2018) ont d'ailleurs confirmé la décroissance de la fracturation en profondeur. Ainsi, la productivité d'un puits est essentiellement reliée aux fractures concentrées dans les premiers mètres du roc. Si les périodes de récessions sont plus longues dans le futur, certains puits pourraient être sujets à des difficultés d'approvisionnement (Lefebvre et al., 2023) comme observées en 2021. Plutôt que d'évaluer la « saisonnalité » de la recharge, il est recommandé de vérifier les fluctuations de la nappe (section 2.3.3) car une baisse plus longue et marquée des niveaux de nappe pourrait éventuellement entraîner un dénoyage de la partie sommitale d'un puits (i.e. là où sont localisées les fractures) et donc engendrer une baisse probable du rendement de certains puits à la fin de l'étiage. C'est dans cette optique que le Bulletin d'état des nappes a été développé (<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm>) afin de fournir à l'utilisateur des informations sur les tendances et la position relative des niveaux de nappe dans de grands domaines (groupes hydroclimatiques) à partir d'un nombre limité de puits représentatifs du RSESQ (Lefebvre et al., 2023).

La disponibilité de l'eau souterraine (recharge) d'un aquifère comme le roc fracturé peut donc être définie à l'échelle régionale grâce à différents outils (comme HydroBudget ou PyHELP par exemple ; voir section 2.3.2). Pour assurer une gestion durable de l'eau souterraine – dont le seuil d'alerte a été fixé à 20 % de la recharge (Huchet et al., 2021) – et éviter sa surexploitation, des indicateurs de stress, tel que le ratio « usage / recharge » (exprimé en %), peuvent être calculés au sein d'unités de gestion comme les limites naturelles du bassin versant de surface (qui sont semblables aux limites du bassin versant souterrain). L'exploitabilité de la ressource en eau souterraine dépend plus de considérations locales reliées à la fois à la productivité de la formation aquifère (limitée pour le roc et reliée aux fractures perméables) et aux fluctuations de la nappe au cours d'une année (amplitude), ainsi qu'à la capacité des infrastructures en place (profondeur du puits, capacité nominale de la pompe...) et de leur résilience face aux changements climatiques (par exemple en modulant les périodes de pompage durant l'année...). Il est donc important de bien distinguer la problématique reliée à l'utilisation durable de la ressource en eau souterraine (et de sa disponibilité) de la productivité des aquifères (et de leur exploitabilité).

➤ Autres informations complémentaires

La plupart des informations de la section 2.3.1 proviennent du site du réseaux québécois sur les eaux souterraines (RQES). Le lecteur peut donc se référer au site du RQES qui offre une définition détaillée de plusieurs termes utiles à la compréhension des sections suivantes : les eaux souterraines, la quantité, la gestion de la ressource... (<https://rqes.ca/introduction-a-lhydrogeologie/>). Le RQES a également produit diverses capsules de vulgarisation qui présentent des notions clés d'hydrogéologie comme : l'écoulement des eaux souterraines, le puits, la porosité, la conductivité hydraulique, etc. (<https://www.youtube.com/channel/UCDAIrs6jwVvrVSqv5pHwl2w>).

2.3.2 Production de la grille de recharge distribuée

Afin de pouvoir retranscrire la disponibilité en eau souterraine sur le territoire du Québec agricole, le travail a tout d'abord consisté à collecter les données de recharge distribuée disponibles au Québec. La plupart des projets existants ont été réalisés par des équipes de recherche universitaires, pour l'essentiel dans le cadre des projets d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES) mises en œuvre par le MELCCFP à partir de l'année 2008 (<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>).

L'avantage de ces projets est la présence systématique d'un livrable associé à la recharge distribuée et sa publication sur un portail en ligne (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/projets-d-acquisition-de-connaissances-sur-les-eaux-souterraines-paces>). Ainsi, les livrables de 18 PACES finalisés (phases 1, 2 et 3) ont pu être récupérés soit sur le site Données Québec, soit en contactant directement certaines équipes de recherche lorsque le livrable n'avait pas encore été publié. Afin d'assurer une couverture optimale de la province, les données de deux projets pilotes (pré-PACES) réalisés en 1998 dans la région de Portneuf et en 2006 dans la région de Châteauguay ont aussi été collectées. En complément, les données de deux autres projets spécifiques réalisés récemment dans les régions de Laval - Laurentides en 2018 et de Mercier - Saint-Rémi en 2023 ont aussi été récupérées. Des PACES plus récents existent également mais il s'agit de deux projets spécifiques en territoire cri et aux Îles-de-la-Madeleine et de deux projets pilotes en Moyenne-Côte-Nord et Gaspésie-Matapédia. Ces quatre projets ne disposent pas encore de grilles de recharge et n'ont donc pas été retenus par la suite. Le tableau 1 de l'annexe B offre une synthèse des projets régionaux existants tandis que la carte 1 (annexe A) présente les limites des 24 projets connus au Québec.

Le projet de Portneuf ne fournit pas de grille de recharge spatialisée mais seulement une valeur de recharge globale estimée pour l'aquifère libre deltaïque. Comme indiqué dans la section 2.3.1, c'est l'aquifère régionale du roc fracturé qui est considéré dans EstimEau car c'est celui qui offre une couverture continue à l'échelle du Québec. De plus, les grilles de recharge distribuée produites par les projets antérieurs retranscrivent généralement la recharge au roc, à l'exception des PACES de la Communauté Métropolitaine de Québec (CMQ) et de l'Outaouais qui visent le premier aquifère rencontré sans distinction. Ainsi, la grille de recharge harmonisée sur le territoire du Québec agricole s'appliquera donc sur l'aquifère du roc fracturé.

Pour 11 projets, les données publiées retranscrivent la recharge réelle tandis que 10 d'entre eux représentent la recharge potentielle. Dans certains cas (principalement des projets menés par l'UQAM) la recharge réelle est déduite à partir de la recharge potentielle à l'aide d'un facteur déterminé selon la nature de la nappe (libre, captive ou semi-captive), la balance de l'écoulement étant considéré comme de l'écoulement hypodermique. Ceci limite considérablement le travail de compilation puisqu'il n'est alors pas possible de concilier l'ensemble des grilles de recharge distribuée comme le révèle la carte 2 (annexe A) où des disparités existent entre des régions d'études voisines. Cette problématique reliée à l'hétérogénéité des livrables avait déjà été noté par Huchet et al. (2021). En effet, il est difficile de concilier toutes ces grilles de recharge en raison (1) de la diversité des outils ou approches utilisés (modèles, bilan hydrique...), (2) des hypothèses ou simplifications appliquées lors des calculs, (3) des diverses données climatiques (stations ou grilles) et des périodes d'estimation considérées, (4) de la variabilité des données sources utilisées (références, couches d'information...), (5) des résolutions variées des grilles (taille des mailles), et (5) de la présence (ou l'absence) d'une phase de calage. L'un des défis posés par ce travail est donc relié à l'harmonisation de ces divers intrants afin de fournir à l'outil EstimEau une couche d'information de la disponibilité en eau souterraine.

Il a donc été décidé de se baser sur une couche d'information robuste et disponible sur l'ensemble de la province pour pouvoir effectuer cette harmonisation des grilles de recharge de manière indirecte. Ainsi, comme la distribution des dépôts de surface influence très largement le taux d'infiltration et par la suite la quantité d'eau contribuant à la recharge de l'aquifère rocheux, la carte du Quaternaire produite

par le MRNF et disponible via le système d'information géomineière (SIGÉOM) offrait cette base de travail solide (carte 3, annexe A). La stratégie visait à définir les valeurs plausibles de recharge au droit de chaque unité quaternaire et de convertir la carte du quaternaire en une carte de recharge distribuée à partir des valeurs typiques de recharge par unité. Ce travail avait déjà été appliqué dans un projet en Montérégie Ouest afin de combler une zone sans recharge et le résultat s'était avéré plutôt concluant (Ballard et al., 2021). Dans le présent projet, cela permettra également de combler certaines lacunes spatiales dont celle du projet de Portneuf. En plus d'homogénéiser les données et de combler certaines lacunes spatiales, une telle procédure offre plusieurs avantages puisqu'elle permet (1) de s'affranchir des problèmes aux limites entre les projets (superposition), (2) de tenir compte à la fois des projets anciens et plus récents, (3) de moyenniser les valeurs de recharge en minimisant notamment les projets surestimant probablement la recharge, et (4) de considérer à la fois les données de recharge potentielle et réelle.

Ainsi, une unité quaternaire a été associée à chaque maille pour chaque grille de recharge individuelle (i.e. une par projet) afin de produire des statistiques de recharge selon le type de dépôt rencontré en surface. Pour ne pas fausser les statistiques, les mailles localisées au droit des étendues d'eau et dans un rayon de 250 m autour des rivières et des lacs ont été exclues de l'analyse car elles sont habituellement considérées comme des zones d'émergence où la recharge réelle est considérée comme nulle. Le tableau 2 de l'annexe B synthétise ces résultats pour les 24 unités de la carte générale du Quaternaire, de même que les figures 1 et 2 de l'annexe B. En considérant la médiane, les résultats s'avèrent très probables avec par exemple une recharge de 48 mm/an pour les sédiments glaciomarins fins d'eau profonde et 198 mm/an pour le roc affleurant. Seule exception, la valeur de recharge de 217 mm/an semblait être surestimée pour les tills indifférenciés. Ainsi, un travail complémentaire a été fait en utilisant la carte détaillée du Quaternaire et en distinguant cinq unités de tills en plus du till non différencié. Selon les résultats (tableau 3 et figures 3 et 6 de l'annexe B), le till mince et discontinu affiche bien une recharge plus élevée (292 mm/an) que le till en couverture généralement continue (244 mm/an). La logique est également respectée entre le till remanié en couverture continue (184 mm/an) et discontinue (190 mm/an). La gamme de recharge du till remanié (123 à 146 mm/an) est plus basse qu'attendue mais cela s'explique par le fait que le till remanié est surtout identifié au sud du fleuve Saint-Laurent là où les divers projets régionaux ont surtout estimé la recharge réelle qui est normalement inférieure à la recharge potentielle. Ainsi, pour vérifier si des distinctions pouvaient être notées entre les deux types de recharge, les statistiques ont donc été faites à la fois pour la recharge réelle (tableau 4 et figures 4 et 7 de l'annexe B) et potentielle (tableau 5 et figures 5 et 8 de l'annexe B). Ces résultats ont montré que la recharge réelle était même souvent supérieure à la recharge potentielle selon l'unité de till considérée. En raison des nombreux facteurs évoqués plus hauts et des incertitudes reliées à chaque méthode d'estimation de la recharge, il n'apparaît pas judicieux de différencier les deux types de recharge (réelle ou potentielle) ni de distinguer les diverses unités de tills de la carte détaillée mais de s'en tenir à la carte générale du Quaternaire. Il est important de rappeler qu'il faut interpréter les valeurs de la carte dans la perspective d'une démarche simplifiée indiquant des valeurs de recharge à large échelle. Considérant la grande variabilité des méthodes appliquées et des résultats obtenus dans les différents projets du PACES, nous avons décidé de ne pas distinguer les unités de tills, ni la recharge réelle de la recharge potentielle. Nous avons jugé qu'il était préférable d'utiliser des unités plus globales (ou intégratrices) et de moyenniser la recharge sur de plus grandes étendues plutôt que de compiler des moyennes peu réalistes sur des unités plus précises.

Les valeurs médianes de recharge par unité quaternaire indiquées dans le tableau 2 de l'annexe B sont donc celles qui ont été utilisées pour produire la grille de recharge finale. Pour ce faire, une grille a été élaborée en considérant à la fois la vitesse de calcul (nombre de mailles) et le maintien d'une certaine résolution spatiale (taille des mailles). La résolution du maillage offrant le meilleur compromis est une grille composée de tuiles de 1 000 m de côté. Cette taille permet de conserver l'information de la carte du Quaternaire où près de 95% des polygones correspondent à un carré de 1 018 m de côté. Ainsi, une résolution de 500 m n'apporte pas de réel gain d'information et augmente considérablement le nombre de mailles ce qui ralentira les vitesses de calcul. La grille de recharge finale, affichée sur la carte 4 (annexe A), est constituée de 184 181 tuiles de 1 km² et couvre l'ensemble des projets régionaux considérés, assimilé au territoire du Québec agricole, ainsi qu'une zone tampon de 5 km en bordure. Avant de produire la grille de recharge finale, il a fallu distinguer les mailles de recharge, soit celles où la recharge est approchée à partir des unités quaternaires, des mailles dites « sans recharge », soit celles où la recharge n'est pas estimée (voir carte 4). Cela concerne les mailles localisées dans les zones d'émergence, i.e. au droit des étendues d'eau (lacs ou rivières) et dans une zone tampon de 250 m – une marge utilisée dans d'autres projets par Ballard et al. (2022) ou encore par Raynauld et al. (2022) – et les mailles en dehors de la carte du Quaternaire, i.e. celles où il n'est pas possible d'attribuer un dépôt de surface. Finalement, il a été possible d'attribuer une unité quaternaire et donc une valeur de recharge typique pour 150 025 mailles de la grille (soit 81.5%), les 34 156 mailles restantes (18.5%) étant associées à des secteurs sans recharge où la valeur « NoData » a été indiquée (tableau 1). En raison de la taille conséquente des mailles (1 km²), il n'a pas été nécessaire d'appliquer un lissage final à cette grille (opération appliquée dans le projet de Mercier – Saint-Rémi (Ballard et al., 2022) mais pour un maillage plus fin de 250 m).

La grille de recharge annuelle moyenne de l'aquifère rocheux est disponible sur les cartes 5 et 6 (annexe A) en annexe. La carte 5 présente cette grille de recharge selon les mêmes classes que la carte initiale regroupant les grilles brutes de chaque projet régional (carte 2). La comparaison des deux cartes révèle bien l'effet d'harmonisation des données d'entrée qui permet de s'affranchir des anomalies identifiées sur la carte 2. En effet, la grille de recharge produite (carte 5) permet de s'affranchir – en bonne partie – des incohérences entre les divers projets régionaux en assurant une certaine continuité à l'échelle du Québec agricole. La zone d'eau saumâtre délimitée lors du PACES Montérégie Est est affichée à titre indicatif sur cette carte 5 (et aussi reprise sur la carte suivante). Elle correspond à un secteur dans lequel l'eau est impropre à la consommation et le potentiel aquifère est très limité et l'alimentation en eau est assurée par les eaux de surface (Carrier et al., 2013). Cette zone est vraisemblablement plus étendue mais il n'a pas été possible de prolonger ses limites avec précisions.

Tableau 1. Statistiques de la grille de recharge annuelle moyenne du roc selon les classes initiales et les classes ajustées.

Recharge ¹		Mailles		Recharge ²		Mailles		Classes de recharge
mm/an	m ³ /an/km ²	Nombre	Ratio (%)	mm/an	m ³ /an/km ²	Nombre	Ratio (%)	
Sans recharge	Sans recharge	34 156	18.5	Sans recharge	Sans recharge	34 156	18.5	Sans recharge
0 - 100	0 - 100 000	29 088	15.8	< 100	< 100 000	29 088	15.8	Faible à modérée
100 - 200	100 000 - 200 000	66 029	35.9	100 - 150	100 000 - 150 000	164	0.1	Modérée
200 - 300	200 000 - 300 000	51 900	28.2	150 - 200	150 000 - 200 000	65 865	35.8	Élevée
300 - 400	300 000 - 400 000	3 008	1.6	200 - 250	200 000 - 250 000	44 789	24.3	Importante
> 400	> 400 000	0	0	> 250	> 250 000	10 119	5.5	Significative
Total		184 181	100	Total		184 181	100	-

¹ : Il s'agit des classes initiales utilisées sur la carte 5 qui retranscrit la recharge en mm/an ;

² : Il s'agit des classes ajustées utilisées sur la carte 6 qui retranscrit la recharge en m³/an/km².

Comme la recharge de l'aquifère rocheux atteint au maximum 309 mm/an, aucune maille de la carte 5 n'est incluse dans la dernière classe (> 400 mm/an) et très peu (1.6% seulement) dans la classe précédente (300-400 mm/an) comme indiqué dans le tableau 1. Ainsi, pour mieux représenter les données de la grille de recharge au roc, les percentiles ont été utilisés pour distinguer des classes plus adéquates sur une gamme de recharge plus restreinte avec des seuils tous les 50 mm/an (tableau 1). De même, dans le tableau 1, sont précisés les qualificatifs semi-quantitatifs de chaque classe de recharge définie à la carte 6. Cette appréciation est basée à la fois sur l'expérience accumulée au Québec sur divers projets régionaux, une revue des seuils utilisés dans ces mêmes projets et aussi un certain jugement professionnel. Les cinq classes de recharge retenues sont donc les suivantes : faible à modérée (< 100 mm/an), modérée (100-150 mm/an), élevée (150-200 mm/an), importante (200-250 mm/an) et significative (> 250 mm/an). Sur la carte 6, les m³/an/km² ont été utilisés au lieu des mm/an (un facteur 1 000 permet de passer d'une unité à l'autre) car c'est cette unité qui a été privilégiée dans l'outil EstimEau.

La grille de recharge moyenne de l'aquifère rocheux a été fournie à la compagnie Alithya au format Raster en mm/an (raster « *r_an_mman* »), soit dans les unités habituelles utilisées en hydrogéologie, et en m³/an/km² (raster « *r_an_m3ankm2* »), soit dans des unités plus adaptées à la représentation des volumes d'eau disponibles. Cette grille de la disponibilité en eau souterraine a aussi été transmise dans un Shapefile intitulé « *Grille_Recharge_Annuelle* » contenant les champs suivants :

- « *POINT_X* » et « *POINT_Y* » : coordonnées (NAD83 Québec Lambert) des centroïdes de maille ;
- « *Maille_ZE* » : type de maille (recharge ou zone d'émergence) ;
- « *Maille_GQ* » : géologie du quaternaire (si disponible) ;
- « *Maille_R* » : type de maille finale (retenue ou non dans le calcul de recharge) ;
- « *R_mman* » : recharge annuelle (en mm/an) – Si pas de recharge = -999 ;
- « *R_m3ankm2* » : recharge annuelle (en m³/an/km²) – Si pas de recharge = -999.

Pour les utilisateurs désirant accéder aux données, il est possible de contacter directement Simon Ricard, chercheur en hydrologie à l'IRDA, à l'adresse suivante simon.ricard@irda.qc.ca.

Points clés

- Les projets régionaux existants au Québec fournissent majoritairement des grilles de recharge distribuées utilisables comme données d'entrée.
- Toutefois, en raison de la grande variabilité des approches utilisées et des livrables fournis (recharge potentielle ou réelle), les grilles de ces divers projets sont difficilement conciliables pour produire une carte de recharge exploitable à l'échelle du Québec agricole.
- Pour harmoniser ces grilles, la carte du Quaternaire a été utilisée en attribuant pour chaque unité de dépôts de surface une valeur de recharge médiane basée sur les données de recharge spatialisées de l'ensemble des projets régionaux retenus.
- La grille de recharge distribuée de l'aquifère rocheux obtenue et servant de base pour estimer la disponibilité en eau souterraine à l'échelle du Québec agricole est composée de 184 181 mailles de 1 km².
- En l'absence d'une grille de recharge distribuée produite à l'échelle du Québec municipalisé, cette première grille produite sur le territoire du Québec agricole offre un estimé préliminaire et continu de la disponibilité en eau souterraine au Québec.
- C'est la disponibilité en eau souterraine (recharge) de l'aquifère rocheux qui a été considérée comme intrant à l'outil EstimEau en raison de son extension régionale et car la majorité des livrables des projets régionaux fournissent la recharge au roc.
- Lorsqu'il utilise l'outil EstimEau, l'utilisateur doit toutefois tenir compte des incertitudes de cette grille reliées à la variabilité des données d'entrée et aux simplifications appliquées pour la rendre exploitable via la carte des dépôts de surface.

2.3.3 Évaluation de la variabilité des niveaux de nappe

Comme évoqué dans la section 2.3.1, le concept de « saisonnalité » de la recharge a plutôt été retranscrit sur la base des fluctuations des niveaux de nappe au cours de l'année. En effet, c'est surtout la notion d'exploitabilité de la ressource en eau qui est d'intérêt pour le producteur agricole. Ainsi, comme des baisses importantes de niveaux de nappe peuvent entraîner des réductions de productivité, des dénoyages de pompe, des puits à sec ou encore des problématiques de qualité d'eau, le suivi des variations des niveaux de nappe est d'intérêt pour l'exploitant agricole utilisant un puits d'approvisionnement en eau. Après discussion et concertation, la démarche a donc consisté à (1) diviser le Québec agricole en domaines hydroclimatiques (DH), (2) sélectionner des puits de référence par DH, et (3) normaliser les niveaux d'eau de ces puits. Le but était d'avoir un premier ordre d'idée des variations pouvant être mesurées dans un puits type – et par extension dans un DH – afin de fournir à l'exploitant un aperçu des fluctuations (amplitudes, fréquences et durées) des niveaux de nappe habituellement observées, surtout lors des périodes de récession.

La définition des domaines hydroclimatiques s'est largement inspirée de travaux déjà menés au Québec où le sud du fleuve Saint-Laurent avait été divisé en quatre groupes hydroclimatiques regroupant 12 secteurs (Huchet et al., 2021). Ces contextes hydroclimatiques avaient pour but de définir de larges territoires aux conditions hydrogéologiques et climatiques particulières permettant d'y associer des puits de référence dont les fluctuations des niveaux de nappe y seraient représentatives. Les groupes hydroclimatiques constituent d'ailleurs l'élément de base du Bulletin d'état des nappes (Lefebvre et al., 2023) à partir duquel a notamment été faite la sélection des puits de référence du RSESQ. Depuis la première édition du Bulletin en 2022 (<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/piezo/bulletin-2022-printemps.pdf>), le nombre de groupe a été réduit à trois (Lefebvre et al., 2023). Afin d'assurer une certaine cohérence et continuité entre les projets, les limites de ces trois groupes hydroclimatiques ont été considérées pour les DH-1, DH-2 et DH-3 (carte 12).

Pour le reste du territoire, la démarche a consisté à récupérer les données utiles au tracé de limites physiques et climatiques puis à diviser le Québec agricole en une dizaine de DH à partir de seuils identifiés sur ces cartes, en suivant la procédure décrite dans Huchet et al. (2021). Les couches d'information nécessaires incluaient donc des données : (1) topographiques, (2) climatiques, et (3) hydrographiques. Pour la topographie, une tuile de la 4^{ème} version du Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 90 m de résolution et mise à disposition par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) a été récupérée. Ce modèle numérique de terrain (MNT) a ensuite été simplifié à une résolution adéquate afin de visualiser les principaux seuils d'altitude (carte 7). Pour les données associées au climat, les fichiers NetCDF de la grille Info-Climat (Bergeron, 2016) fournis par le MELCCFP ont été récupérés. Un cadre d'extraction a été créé afin de retenir uniquement les mailles de cette grille climatique couvrant au minimum le Québec agricole soit 14 228 mailles sur un total de 53 000. Puis, un script Python, disponible sur GitHub (https://github.com/cgg-qgc/scripts_python_geosci), a été utilisé afin de formater les données de la grille Info-Climat pour produire les trois indicateurs climatiques suivants sur la période des normales climatiques (1981-2010) : précipitations totales (Ptot), températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax). Après correction des quelques données manquantes, deux grilles représentatives des précipitations totales moyennes annuelles (carte 8) et les températures moyennes annuelles (carte 9) sur la période de référence (1981-2010) ont été produites. Finalement, la dernière information utile réfère aux zones de gestion intégrée de l'eau par bassins versants (ZGIEBV) mises à disposition par le MELCCFP. Les organismes de bassins versants (OBV) permettent à la fois de considérer des limites administratives de gestion de l'eau et aussi des limites physiques reliées aux principaux bassins versants (carte 10). En complément, les limites des provinces géologiques extraites du système d'information géominière (SIGÉOM) géré par le MNRF ont aussi été considérées (carte 11), notamment pour rattacher certaines îles du fleuve à un DH selon leur contexte géologique.

Tous ces cartes ont par la suite été analysées visuellement pour définir des seuils permettant de distinguer un DH d'un autre (carte 12). En effet, le relief exerce une influence prépondérante sur la distribution des précipitations au sud du fleuve Saint-Laurent (Huchet et al., 2021) où le seuil de 200 m d'altitude marque la limite entre une zone de plus fortes précipitations au sud (> 1 050 mm/an) et une autre moins pluvieuse au nord (< 1 050 mm/an). Par extension, ce sont donc essentiellement les cartes des précipitations (carte 8) et de la topographie simplifiée (carte 7) qui ont été utilisées pour définir ces seuils. Les autres cartes, soient celles des températures (carte 9) et des provinces géologiques (carte 11), viennent en support au travail de délimitation des DH tandis que la carte des ZGIEBV (carte 10) assure une certaine cohésion territoriale.

La carte 12 identifie ainsi les trois types de limites et leurs seuils : topographiques (MNT), climatiques (Ptot) ou hydrographiques (ZGIEBV). Les limites à 1 150 mm/an et à 200 m sont d'ailleurs déjà utilisées dans Huchet et al. (2021). Lors de ce travail, il a fallu tenir compte de deux orientations : (1) disposer d'un nombre suffisant de puits du RSESQ (au moins 10) dans chaque DH, et (2) obtenir un nombre restreint de DH pour conserver de larges territoires (une dizaine maximum). C'est pourquoi la carte 12 présente à la fois les limites des 11 DH identifiés et aussi les emplacements des puits du RSESQ.

Bien qu'il s'agisse d'une approche visuelle basée sur un nombre restreint de couches d'information, les 11 DH délimités sur la carte 13 possèdent des caractéristiques physiographiques et surtout climatiques distinctes (figure 10). En regardant les températures moyennes annuelles (Tmoy) et les précipitations totales moyennes annuelles (Ptot) sur la période de référence (1981-2010), il est possible de les regrouper en six ensembles (identifiés par des ellipses rouges sur la figure 10). En effet, les DH-5 et DH-8 sont proches des conditions moyennes rencontrées sur l'ensemble du Québec agricole. Le DH-7 est le seul avec des Ptot plus faibles et des Tmoy plus élevées que la moyenne. Les DH-6 et DH-11, les deux DH les plus au nord du territoire (carte 13), affichent des Ptot et Tmoy plus basses que le reste du Québec agricole. Le DH-2 présente des Ptot et des Tmoy plus importantes que la moyenne. Les DH-1 et DH-9, de part et d'autre du fleuve au niveau de la plate-forme du Saint-Laurent (carte 13), ont des Tmoy plus élevées que la moyenne. Finalement, les DH-3, DH-4 et DH-10, affichent surtout des Ptot plus importantes que le reste du Québec agricole.

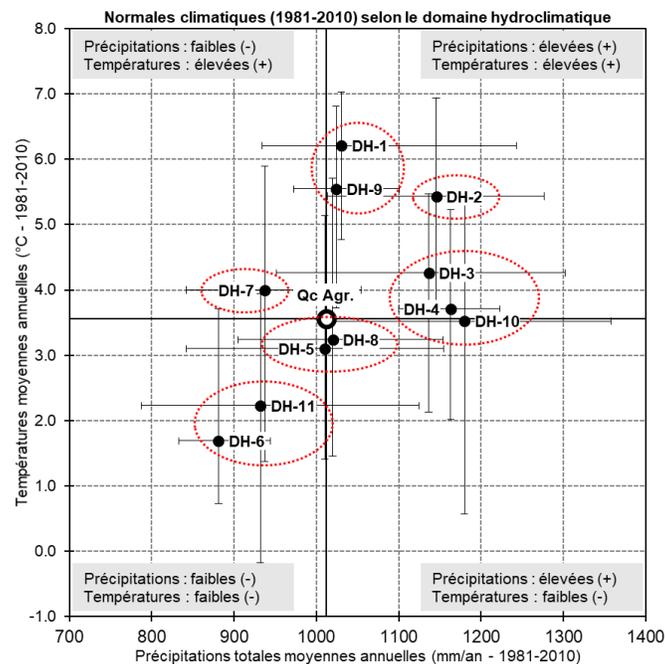


Figure 10. Statistiques descriptives (minimum, maximum et moyenne) des normales climatiques (1981-2010) des différents domaines hydroclimatiques par rapport au Québec agricole.

Les caractéristiques des 11 DH sont aussi indiquées dans le tableau 1 et la figure 1 de l'annexe C. Les 11 DH définis répondent donc à l'une des deux orientations établies au début de la démarche, à savoir obtenir au maximum une dizaine de grands territoires. C'est aussi le cas pour la deuxième orientation qui fixait un minimum de 10 puits par DH car le RSESQ dispose d'un nombre limité de puits (293 dans la province dont 263 actifs). Finalement, 11 à 67 puits sont identifiés selon les DH (tableau 1 de l'annexe C). C'est donc à partir des 243 puits du RSESQ localisés au Québec agricole que la démarche de sélection des puits représentatifs s'est appuyée; le but étant de retenir un puits de référence par DH.

Trois étapes de traitement ont été nécessaires afin d'aboutir à une sélection optimale des 11 puits : (A) primaire, (B) secondaire et (C) tertiaire. L'outil Sardes (Suivi, analyse et représentation de données d'eau souterraine) développé par Gosselin et al. (2020) et disponible sur GitHub (<https://github.com/geo-stack/sardes>) a tout d'abord permis de collecter les données de la dernière base de données (BD) du RSESQ fournie par le MELCCFP. La sélection primaire (A) incluait cinq critères : (1) la localisation du puits par rapport aux limites du Québec agricole, (2) son état (actif ou non et la durée du suivi), (3) le type d'aquifère (granulaire ou roc), (4) l'influence potentielle par un pompage proche et (5) le confinement (libre, semi-captif ou captif ; voir section 1.1). Les détails sur ces critères primaires (sélection A) sont fournis dans le tableau 2 de l'annexe C. Pour être conservé, un puits devait donc être dans les limites du Québec agricole, toujours actif, au roc, non influencé et libre ou semi-captif. Les 123 puits situés au sud du fleuve Saint-Laurent ont aussi profité des travaux de Gosselin et al. (2021) sur la BRF (fonction de réponse barométrique) qui précisent les conditions de confinement et l'influence potentielle de pompages proches sur les variations des niveaux de nappe. Ainsi, comme indiqué dans le tableau 2 de l'annexe C, des puits ont été rejetés ou conservés « avec réserves » afin de retenir quelques puits de plus au besoin en raison du nombre restreints de puits actifs du RSESQ. Les résultats sont présentés dans le tableau 3 de l'annexe C où cette première étape a permis de sélectionner trois puits dans trois DH et d'en retenir 46 autres pour la sélection secondaire (B).

La sélection secondaire (B) se base sur plusieurs conclusions émises par l'UQAM dans Larocque et al. (2022) concernant l'inertie des aquifères et son lien avec certains facteurs. En effet, un puits répondant aux critères suivants aura tendance à afficher des fluctuations rapides du niveau de nappe : (1) altitude élevée, (2) faible profondeur du puits et (3) niveau de nappe superficiel. Ainsi, les critères suivants ont été appliqués ici : (6.a) niveau de nappe moyen, (6.b) profondeur du puits et (6.c) altitude du sol. Les seuils de ces trois critères, basés sur l'analyse statistique des 46 puits retenus pour la sélection secondaire, sont précisés dans le tableau 5 de l'annexe C. En plus de ceux-ci, un dernier critère a été ajouté concernant la durée du suivi (critère 7). Pour ce dernier, une durée de suivi inférieure à 5 ans impliquait le rejet du puits tandis qu'un puits avec plus de 10 ans de données était conservé. Un puits avec une chronique de 5 à 10 ans était conservé « avec réserves » (tableau 4 de l'annexe C). Les résultats sont affichés dans le tableau 6 de l'annexe C où cette seconde étape a permis de sélectionner deux puits dans deux DH et d'en retenir 18 autres pour la sélection tertiaire (C).

Pour les six DH restants, la sélection tertiaire (C) a tout d'abord consisté à faire une analyse combinée des divers critères précédents afin de déterminer le puits avec le plus de critères favorables (critère 8). Ensuite, si cela ne permettait pas distinguer un puits d'un autre, les valeurs absolues de chaque critère étaient alors étudiées en détail (critère 9). En dernier recours, les hydrogrammes des puits à distinguer étaient affichés sur Sardes afin de vérifier quel était le moins perturbé (bruité) ou celui affichant le moins de lacunes temporelles (manques de données) et ne présentant aucune donnée aberrante (tableau 7 de l'annexe C). Les résultats sont affichés dans le tableau 8 de l'annexe C où cette dernière étape a permis de sélectionner les six derniers puits dans les six DH restants.

L'ensemble des 11 puits de référence est indiqué dans le tableau 9 de l'annexe C. La carte 14 présente ces 11 puits au regard des 282 puits du RSESQ rejetés à la suite de cette sélection. La carte 15 affiche quant à elle uniquement ces 11 puits au sein de leur DH respectif. Les caractéristiques associées à ces 11 puits sont indiquées dans les tableaux 10 et 11 de l'annexe C dans lesquels sont aussi indiqués les critères des sélections primaire (A) et secondaire (B) ayant mené au choix de ces puits. La sélection tertiaire (C) n'y est pas indiquée car il s'agit d'une étape de sélection reliée au jugement professionnel incluant un comparatif détaillé des critères précédents (sélections A et B) et aussi une analyse visuelle des hydrogrammes.

La dernière phase de travail a alors consisté à reproduire des hydrogrammes statistiques similaires à ceux émis dans Sardes, dont un exemple est visible à la figure 9, et de les normaliser. Le but de la normalisation est de remettre les niveaux de nappe à la même échelle (variable centrée réduite) afin de pouvoir comparer les variations relatives des niveaux de nappe dans chaque DH. La procédure s'est inspirée des travaux effectués dans le Bulletin pour normaliser les niveaux d'eau des puits retenus pour définir l'état des nappes (Lefebvre et al., 2023). Tout d'abord, les données de suivi des 11 puits sélectionnés ont été extraites de Sardes. Puis, pour chaque puits, la présence de données aberrantes a été vérifiée sur l'hydrogramme et, pour quatre puits, une partie des données a dû être supprimée afin de ne pas affecter l'hydrogramme statistique final (tableau 12 de l'annexe C). Lorsque les données des niveaux de nappe ont été contrôlées, la normalisation est appliquée en suivant la formule suivante extraite de Lefebvre et al. (2023) :

$$NN = \frac{\bar{X} - \text{Niveau}}{\sigma} \quad (5)$$

Les niveaux normalisés (*NN*) sont ainsi définis pour caractériser la variation relative des niveaux de nappe d'un puits (*Niveau*) par rapport au niveau d'eau moyen (\bar{X}) mesuré dans ce puits sur une période donnée en tenant compte de la variabilité du niveau de nappe caractérisée par son écart-type (σ). La durée de suivi des puits est supérieure à 10 ans pour huit puits toujours actifs (10.9 à 16.2 ans selon les puits) et donc les variations des niveaux d'eau associées aux DH suivants peuvent être considérées comme assez représentatives : DH-1, DH-2, DH-3, DH-5, DH-6, DH-7, DH-9 et DH-11 (tableau 11 de l'annexe C). Deux puits présentent des durées de suivi intermédiaires : 9.6 ans pour le puits 02330003 (DH-4) et 5.7 ans pour le puits 05030001 (DH-10). Pour le DH-4, les données seraient donc plutôt représentatives car approchant les 10 ans, tandis que le suivi du puits associé au DH-10 nécessiterait plus d'années de suivi. Hélas, en raison du nombre limité de puits du RSESQ disponibles répondant aux critères dans le DH-10, le puits 05030001 n'est plus actif (tableau 10 de l'annexe C). Il faudrait éventuellement revoir la sélection ou ajouter un puits dans le DH-10. Finalement, un seul puits (04010003) présente une période de suivi plutôt courte (3.2 ans) mais comme ce dernier est actif, il faudrait refaire l'exercice dans quelques années pour actualiser les données de l'hydrogramme statistique du DH-8.

Les hydrogrammes statistiques des niveaux de nappe normalisés sont affichés pour chaque puits et donc chaque DH sur la figure 2 de l'annexe C. Un exemple pour le puits 03030008 associé au DH-1 est également indiqué à la figure 11. Les données affichées sur ces hydrogrammes sont les cinq classes de percentiles ainsi que les médianes du niveau de nappe mensuels moyens normalisés. L'hydrogramme statistique offre donc une information pertinente pour l'exploitant car il représente les fluctuations typiquement rencontrées sur un territoire donné correspondant au DH. Toutefois, il est utile de rappeler plusieurs limitations en lien avec ce travail : (1) la sélection des puits de référence a été faite au sein d'un nombre limité de puits du RSESQ, (2) certains puits ne répondent pas à tous les critères mais ont dû être conservés en raison du nombre restreint de puits disponibles dans chaque DH, et (3) les fluctuations relatives affichées sur les hydrogrammes statistiques ne tiennent pas compte de considérations locales associées à la productivité de l'aquifère, aux infrastructures de pompage et au contexte local.

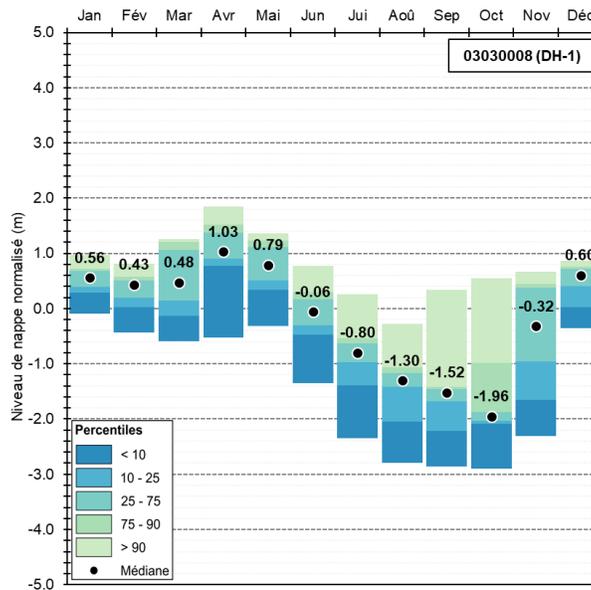


Figure 11. Hydrogramme statistique des niveaux de nappe normalisés du puits 03030008 associé au DH-1 (l'ensemble des hydrogrammes statistiques est joint à la figure 2 de l'annexe 5).

Les hydrogrammes statistiques normalisés donnent donc une information sur les baisses ou les hausses des niveaux de nappe relatifs habituellement observées dans chaque DH selon le mois. La normalisation permet également de comparer les fluctuations (variations relatives des niveaux d'eau) associées à un DH par rapport à un autre. Toutes les valeurs médianes mensuelles sont indiquées pour les 11 DH dans le tableau 13 de l'annexe C. Sur la figure 11 reproduisant les fluctuations associées au DH-1, il est donc attendu une baisse de l'ordre de 3.0 m des niveaux de nappe entre avril (+1.03 m) et octobre (-1.96 m). Les niveaux de nappe sont supposés remonter de près de 2.6 m entre octobre (-1.96 m) et décembre (+0.60 m). Ensuite, ils sont plutôt stables à l'hiver (entre +0.56 et +0.48 m) puis une légère hausse d'environ 0.5 m est envisagée en mars-avril. Comme indiqué précédemment, ces hydrogrammes statistiques se basent sur les observations et ne considèrent pas les possibles modifications de la dynamique annuelle de la recharge dans le futur causée par les changements climatiques (section 2.3.4) et pouvant alors potentiellement affecter les fluctuations habituellement observées.

Points clefs

- Les fluctuations de la nappe sont un indicateur plus pertinent pour les producteurs agricoles que la saisonnalité de la recharge car il reflète directement les variations de hauteur d'eau dans un puits d'approvisionnement en eau.
- Onze domaines hydroclimatiques (DH), i.e. des régions aux caractéristiques hydrogéologiques et climatiques distinctes, ont été délimités sur le territoire du Québec agricole.
- À partir des 293 stations de suivi du RSEQ, un puits de référence a été retenu pour chaque DH à la suite de trois étapes de sélection combinant une dizaine de critères.
- Pour ces 11 puits de référence, des hydrogrammes statistiques des niveaux de nappe normalisés ont été produits afin de représenter les variations relatives des niveaux d'eau dans chaque DH.
- Un hydrogramme statistique normalisé est un outil intéressant pour l'exploitant agricole car il donne une information sur les baisses ou les hausses relatives des niveaux d'eau habituellement attendues dans les puits d'approvisionnement en eau selon les mois.
- Cependant, plusieurs limitations sont associées à ce travail : (1) la sélection des puits de référence par DH est contrainte par le nombre restreint de puits du RSEQ disponibles, (2) les fluctuations observées sont représentatives du puits de référence mais des considérations locales peuvent autrement affecter les niveaux de nappe à l'échelle du puits d'approvisionnement en eau, (3) les hydrogrammes statistiques se basent sur des périodes de suivi limitées (moins de 15 ans) de sorte que la représentativité peut être partiellement respectée et, (4) ces hydrogrammes statistiques se basent aussi sur des données historiques et ne tiennent pas compte des potentielles modifications de la dynamique des niveaux de nappe dans le futur liées aux changements climatiques.

2.3.4 Projection de la recharge en climat futur

La ressource en eau souterraine est la principale source d'eau potable en région rurale au Québec (Groupe Agéco, 2019 ; Larocque et al., 2019). C'est aussi une ressource d'importance pour l'industrie et l'agriculture ainsi que pour le maintien des écosystèmes et de certains milieux humides. Les eaux souterraines participent également aux débits de base des cours d'eau. Ainsi, une baisse des niveaux de nappe pourrait entraîner des réductions de ces apports et des baisses de débits importantes, notamment lors de l'étiage estival. En plus de mieux connaître les usages futurs et afin d'assurer une gestion optimale de cette ressource dans les années à venir, il est donc nécessaire d'estimer la recharge en considérant les changements climatiques. C'est dans ce cadre qu'une brève revue de littérature a été faite afin de recenser les quelques travaux ayant déjà été faits dans la province. Le but initial était de définir un ou plusieurs facteurs d'évolution potentielle de la recharge pouvant être par la suite intégrés à l'outil EstimEau. L'horizon considéré pour la sélection du ou des facteurs est le futur proche (2041-2070) car il correspond à la période de prévision des usages pour 2050 du projet RADEAU 1 (Groupe Agéco, 2019) et aussi car cet horizon a été retenu pour évaluer la pression sur la ressource en eau en Montérégie Ouest (Ballard et al., 2022). Selon l'avancement du projet EstimEau, il a été décidé de ne pas statuer sur le facteur à retenir ou la plage de recharge à utiliser mais de plutôt recenser les plages de valeurs possibles extraites des projets existants. Des travaux supplémentaires sont recommandés pour intégrer les projections de recharge en climat futur et les intégrer de façon adéquate à l'outil EstimEau.

Les études existantes au Québec traitant de la recharge tout en considérant l'impact des changements climatiques sont peu nombreuses. Ainsi, ce travail de synthèse a essentiellement considéré deux projets réalisés au sud du fleuve Saint-Laurent. Le premier est un projet du MELCCFP et d'Ouranos mené par l'UQAM sur un large territoire de 35 800 km² couvrant le sud de la province. Ce projet a abouti à diverses publications d'intérêt (Dubois et al., 2021a ; Dubois et al., 2021b ; Dubois et al., 2022 ; Larocque et al., 2022) et une thèse de doctorat (Dubois, 2022). Ce projet de synthèse a été mené conjointement avec d'autres équipes de recherche universitaires dont l'Université Laval et l'INRS afin de mieux définir l'état actuel des connaissances sur les ressources en eau souterraine au sud du fleuve Saint-Laurent et de proposer des outils pour assurer une gestion plus efficace des eaux souterraines face aux changements climatiques (Larocque et al., 2021). Le deuxième projet a été réalisé par l'INRS en Montérégie Ouest dans un secteur plus réduit de 954 km² et visait la modélisation numérique des conditions actuelles et en climat futur des ressources en eau souterraine dans la région des anciennes lagunes de Mercier (Ballard et al., 2022). Pour les biens du rapport et la lecture, le projet supra-régional de l'UQAM couvrant le sud du Québec sera nommé « Projet Sud Québec » et le projet régional de l'INRS en Montérégie Ouest sera intitulé « Projet Mercier/St-Rémi ». En parallèle, deux autres publications ont été considérées afin de mieux appréhender les possibles changements dans la dynamique du processus de recharge dans le futur et de mieux cerner les limitations des simulations climatiques (Larocque et al., 2019 ; Wright et Novakowski, 2022). Finalement, les fiches de synthèse régionale d'adaptation aux changements climatiques mises en place par le MAMH et produites par Ouranos ont aussi été exploitées car elles apportent des informations pertinentes sur l'évolution prévue de certains paramètres clefs (dont les températures et les précipitations) dans chaque région administrative du Québec (Ouranos, 2020).

Le Projet Sud Québec a utilisé le modèle HydroBudget (HB) afin de simuler la recharge potentielle sur une grille composée de mailles de 500 m. Ce modèle a été développé par l'UQAM (Dubois et al., 2021b) pour simuler régionalement la recharge potentielle en conditions froides et humides. La région couverte par ce projet recoupe près du quart (24%) du territoire du Québec agricole défini dans la section 1.2 et a été divisée en huit bassins-versants (BV). Le modèle HB a été calé grâce à 51 stations de jaugeage puis la recharge potentielle a été simulée sur la période historique (1961-2017, 57 ans) en utilisant la grille climatique d'Info-Climat (Bergeron, 2016) produite par le MELCCFP (Dubois, 2022). Ensuite, 12 scénarios climatiques dérivés d'un ensemble de 54 simulations fourni par 29 modèles

climatiques globaux (GCMs) du Coupled Model Intercomparison Project—Phase 5 (CMIP5) pour les émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 ont été retenus. Cette sélection a été faite afin de réduire le temps de calcul tout en préservant 85% de la variance des 54 simulations initiales (Dubois et al., 2022). Ces 12 scénarios représentent un réchauffement de +0.8 à +5.0°C et des précipitations stables jusqu'à une hausse de +200 mm/an (Dubois et al., 2021a). Ensuite, une réduction d'échelle (downscaling) a été faite sur une grille de 10 km (similaire à celle de la grille d'Info-Climat). L'analyse des résultats a été faite selon quatre périodes distinctes de 30 ans : 1981-2010 (normales climatiques), 2011-2040 (période actuelle), 2041-2070 (futur proche) et 2071-2100 (futur lointain).

Pour l'horizon 2041-2070, la médiane de la recharge potentielle annuelle est sensiblement la même que celle de la période de référence (1981-2010) avec toutefois une légère hausse dans sept des huit BV étudiés. La hausse de recharge prévue est comprise entre +0.6 et +9.5% selon les BV (voir tableau 2). À partir de 2040, les incertitudes des modèles climatiques augmentent, il est donc important de considérer cet élément dans l'analyse des tendances dans le futur. En effet, l'intervalle de recharge est plus large pour l'horizon proche par rapport à la période de référence (Dubois et al., 2021a). La marge d'erreur reliée à ces incertitudes est indiquée dans le tableau 2 et correspond à la variabilité des résultats de l'ensemble des 12 scénarios climatiques retenus divisée par deux. Cette marge d'erreur augmente effectivement entre chaque période (tableau 2) : référence (8%), actuel (9%) et futur (16%). Selon le BV, la marge d'erreur varie ainsi de 14 à 17% dans le futur proche.

Tableau 2. Recharge potentielle estimée dans le Projet Sud Québec - Tableau adapté de la table 4 de Dubois et al. (2022).

Recharge ¹	BV1	BV2	BV3	BV4	BV5	BV6	BV7	BV8	Moy.
Référence	126	136	160	173	171	175	170	170	160
Actuel	132	140	164	175	175	177	175	171	164
Futur	138	145	168	176	178	180	178	171	167
Marge d'erreur ²	BV1	BV2	BV3	BV4	BV5	BV6	BV7	BV8	Moy.
Référence	13 10%	12 9%	13 8%	14 8%	13 8%	14 8%	14 8%	12 7%	13 8%
Actuel	11 8%	11 8%	13 8%	17 10%	17 10%	19 11%	18 10%	18 11%	16 9%
Futur	21 15%	21 14%	24 14%	27 15%	30 17%	30 17%	30 17%	25 15%	26 16%
Tendance ³	BV1	BV2	BV3	BV4	BV5	BV6	BV7	BV8	Moy.
Act. / Réf.	+6 +4.8%	+4 +2.9%	+4 +2.5%	+2 +1.2%	+4 +2.3%	+2 +1.1%	+5 +2.9%	+1 +0.6%	+4 +2.2%
Fut. / Réf.	+12 +9.5%	+9 +6.6%	+8 +5%	+3 +1.7%	+7 +4.1%	+5 +2.9%	+8 +4.7%	+1 +0.6%	+7 +4.1%
Fut. / Act.	+6 +4.5%	+5 +3.6%	+4 +2.4%	+1 +0.6%	+3 +1.7%	+3 +1.7%	+3 +1.7%	0 0%	+3 +1.9%

¹ : Il s'agit de la recharge potentielle exprimée en mm/an ;

² : La marge d'erreur correspond à la gamme de changement possible de l'ensemble des 12 scénarios divisée par deux. L'affichage est le suivant : "gamme de variations des 12 scénarios en mm/an | ratio par rapport à la valeur absolue (exprimé en pourcentage)" ;

³ : L'affichage est le suivant : "valeur du changement en mm/an | ratio par rapport à la valeur de base (exprimé en pourcentage)".

Dans le Projet Mercier/St-Rémi, la recharge distribuée a été estimée à l'aide du modèle HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance), un modèle très largement utilisé pour estimer la recharge diffuse dans des contextes similaires et notamment dans plusieurs projets PACES (voir section 2.3.2). Ce projet a bénéficié d'améliorations apportées au modèle HELP original grâce à des outils Python développés par l'INRS (voir le nouvel outil PyHELP : <https://github.com/cgq-qgc/pyhelp>). L'avantage du modèle HELP par rapport au modèle HB évoqué précédemment est qu'il partitionne la recharge potentielle en deux composantes (ruissellement hypodermique et recharge réelle) et permet ainsi d'estimer la recharge nette (soit la part d'infiltration atteignant l'aquifère). Les données climatiques utilisées ici sont similaires à celles du Projet Sud Québec. Pour les données historiques, la grille climatique d'Info-Climat a été fournie par le MELCCFP entre 1980 et 2021. Afin d'être cohérent avec les travaux menés par l'UQAM, les 12 scénarios sélectionnés dans le Projet Sud Québec ont été

conservés et les résultats de ces simulations ont été récupérés auprès d'Ouranos. Le calage du modèle HELP a été fait sur deux BV jaugés avec les données climatiques historiques (1980-2020, 41 ans). La recharge future a été estimée entre 2006 et 2095 (plage des 12 simulations climatiques) et la combinaison des 12 grilles obtenues a permis d'obtenir une grille de recharge finale pour les horizons proche (2041-2070) et lointain (2071-2095) correspondant à la médiane des 12 simulations.

Les simulations suggèrent une hausse de 24% de la recharge réelle dans le futur proche (2041-2070) par rapport à la période de référence (1981-2010 ; tableau 4.2). Cette hausse est surtout constatée entre la période actuelle (2011-2040) et la période de référence (+16%) alors qu'elle est plus modérée entre la période future (2041-2070) et la période actuelle (+8%). De plus, la marge d'erreur reliée à la variabilité inter-annuelle de la recharge réelle diminue dans le futur, ce qui est l'inverse des conclusions de l'UQAM pour le Projet Sud Québec (Dubois et al., 2021b). Les gammes de valeurs de recharge réelle estimées (102, 119, 127 mm/an ; tableau 3) sont toutefois cohérentes avec les valeurs de recharge potentielle du BV1 (126, 132 et 138 mm/an ; tableau 3) du Projet Sud Québec, BV dans lequel s'intègre le Projet Mercier/St-Rémi.

Tableau 3. Recharge réelle estimée dans le Projet Mercier/St-Rémi – Tableau basé sur la figure 5.28 de Ballard et al. (2022).

Recharge réelle ¹	Min.	10 ^e	25 ^e	Méd.	75 ^e	90 ^e	Max.	Marge d'erreur ²	Méd.	Tendance ³	Méd.
Référence	64	76	86	102	131	146	173	Référence	54 53%	Act. / Réf.	+16 +16%
Actuel	82	88	96	119	132	136	141	Actuel	29 25%	Fut. / Réf.	+24 +24%
Futur	107	118	122	127	136	151	162	Futur	27 21%	Fut. / Act.	+8 +7%

¹ : Il s'agit de la recharge réelle exprimée en mm/an ;

² : La marge d'erreur correspond à la différence entre le minimum et le maximum pour la valeur médiane obtenue à partir des 12 simulations climatiques divisée par deux. L'affichage est le même que le tableau 2 ;

³ : La tendance a été calculée uniquement selon la médiane. L'affichage est le suivant : "valeur du changement en mm/an | ratio par rapport à la valeur de base (exprimé en pourcentage)". L'affichage est le même que le tableau 2.

Lors du choix de la plage de recharge, il est important de toujours considérer les incertitudes et les marges d'erreur reliées à ces estimations afin de les utiliser avec un certain regard critique. En effet, ces valeurs ont été extraites de travaux menés dans des régions spécifiques (sud du Québec), basés sur un nombre limité de simulations climatiques (12) et découlant de divers modèles (HELP et HB) impliquant leur lot de simplifications et limitations. Ces constats avaient déjà été mis en évidence par Larocque et al. (2019). Leur revue des 22 projets menés à l'est du Canada n'avait pas mis en évidence de tendance spatiale ni d'évolution future de la recharge. Cependant, ces études sont généralement d'accord pour dire que le réchauffement devrait réduire le couvert de neige à l'hiver ce qui entrainera une hausse de recharge à l'hiver et une baisse au printemps (Larocque et al., 2019). Ces études mettaient aussi en évidence la plus grande variabilité interannuelle de la recharge dans le futur de même qu'une recharge printanière hâtive. Tous ces éléments devraient entraîner des baisses des débits d'étiage ce qui pourrait alors affecter les activités économiques estivales (loisirs, agriculture) et causer des conditions critiques pour les approvisionnements en eau – dont ceux en milieu agricole – et les écosystèmes (Larocque et al., 2019).

Comme observé dans le Projet Sud Québec, c'est surtout la dynamique du processus de recharge au sein d'une année hydrologique qui devrait être modifiée dans le futur dans les régions froides et humides ou celles dont l'hydrologie dépend de la neige (Dubois, 2022). Ainsi, la recharge potentielle augmenterait l'hiver (décembre à mars) à cause des températures plus douces entraînant alors un pic de recharge printanière hâtif et moins marqué. Dans le futur, la recharge hivernale devrait égaler ou dépasser en importance la recharge printanière qui est normalement la plus importante. À l'exception d'avril (mois de transition), les 12 scénarios convergent vers une baisse de la recharge de mai à novembre et quasi nulle entre juin et août (Larocque et al., 2022). L'UQAM recommande d'ailleurs de considérer ces résultats à une échelle moins large car des variations spatiales reliées au gradient de

température est-ouest sont observées au sud du fleuve Saint-Laurent. Ce constat a aussi été fait par l'INRS dans le Projet Mercier/St-Rémi (Ballard et al., 2022) où la recharge nette augmenterait entre novembre et mars dans le futur proche (2041-2070) par rapport à la période historique (1980-2021). Les travaux de l'UQAM ont permis de définir des seuils qui pourraient être d'intérêt pour le projet EstimEau car ils visent à mieux définir les variations de recharge potentielle dans le futur (tableau 4). Ces différents seuils cadrent les conditions de précipitations et de températures nécessaires pour avoir une hausse (ou une baisse) significative probable de la recharge (i.e. ± 15 mm) par rapport à la période de référence (1981-2010). Il faut que les trois seuils soient atteints sur une période assez longue pour avoir un changement significatif probable de recharge. De plus, il s'agit de critères génériques donnés à titre indicatif et basés sur les résultats des simulations climatiques produites à large échelle par l'UQAM. Il est conseillé d'entreprendre des travaux plus spécifiques dans chaque DH pour voir l'effet à long terme des changements climatiques sur la recharge.

Tableau 4. Seuils identifiés dans le Projet Sud Québec afin de définir des niveaux préventifs d'alerte dans le futur pour une meilleure gestion de la ressource en eau - Tableau basé sur les informations de la figure 3.10 de Dubois (2022).

Composante	Changement de la composante		
	> +15 mm	Non significatif	< -15 mm
Recharge potentielle (ΔR_{pot})			
Précipitations totales annuelles (ΔP)	> +150 mm	-	< +150 mm
Précipitations- Mois froids (ΔP_{Mf}) ¹	> +25 mm	-	< +25 mm
Température moyenne annuelle (ΔT)	> +2°C ²	< +2°C	+3°C < ΔT < +5°C

Ces valeurs seuils pourraient être considérées dans des plans de gestion des eaux souterraines et d'adaptation face aux changements climatiques. Ces valeurs rejoignent les données des fiches élaborées par Ouranos (2020) qui présentent, pour chaque région administrative du Québec, les conséquences des changements climatiques et des exemples de mesures d'adaptation. À partir du tableau de synthèse des projections climatiques disponible dans ces fiches, un travail préliminaire de compilation de variables climatiques clefs a été fait afin de proposer des pistes d'amélioration de l'outil EstimEau. Pour assurer une cohérence avec le projet en cours, les domaines hydroclimatiques (DH) définis dans la section 2.3.3 ont été considérés pour cette synthèse à la place des régions administratives. Pour chaque DH, les valeurs pour l'horizon proche (2041-2070, RCP 4.5) des précipitations (liquides, solides et totales), les températures (moyenne annuelle) et les périodes de gel-dégel (redoux hivernaux et degré-jours de gel) ont été retenues (tableau 1 de l'annexe D) en première approche. Les tendances mises en évidence sont cohérentes avec les conclusions de l'UQAM (Dubois, 2022) au sud du fleuve Saint-Laurent ce qui pourrait suggérer que les impacts des changements climatiques sur la recharge potentielle seraient globalement similaires dans le reste du Québec agricole. Selon le DH, les principaux constats sont (1) une hausse des précipitations totales (moins de neige et plus de pluie) de +5% à +7%, (2) une hausse des températures de +2.0°C à +2.4°C et (3) une hausse du nombre de redoux hivernaux (tableau 1 de l'annexe D). D'autres éléments clefs ressortent de ces fiches, à savoir (1) une crue printanière hâtive et (2) des étiages plus sévères et plus longs. Ces observations ont également été constatées par l'équipe de l'UQAM (Larocque et al., 2022) qui indiquait une prolongation de la durée des étiages dans le futur.

Une incertitude réside toutefois dans les simulations des phénomènes hydrologiques liés au stockage de l'eau sous forme de neige et au phénomène de gel au sol (Larocque et al., 2022). En effet, en utilisant les modèles actuels d'estimation de la recharge, les processus de recharge sont supposés être les mêmes dans le futur. Il serait utile de mieux connaître les processus qui influencent l'infiltration et la recharge (Larocque et al., 2019), surtout en raison des hivers plus doux attendus dans le futur car c'est en hiver que va se faire la majorité de la recharge. Wright et Novakowski (2022) ont d'ailleurs montré que l'infiltration au milieu de l'hiver pourrait être limitée en raison de la perméabilité réduite du sol gelé causée par la succession d'épisodes de pluie et de neige au début de l'hiver. De mêmes, les auteurs indiquent que des épisodes de fonte au milieu de l'hiver pourraient éventuellement augmenter la

recharge au roc mais que la baisse de l'épaisseur de neige qui en découle devrait approfondir le gel au sol ce qui retarderait alors l'infiltration et augmenterait le ruissellement de surface. Dans le cas où le roc affleure, la recharge au roc est favorisée durant l'hiver selon les simulations. Il est donc nécessaire d'investiguer plus en détail ces processus de recharge qui peuvent être influencés par des considérations plus locales.

Il est d'ailleurs recommandé de maintenir le suivi du RSESQ afin de mieux comprendre les changements potentiels de ces processus (Larocque et al., 2019) et de poursuivre (voire d'élargir au reste du Québec) l'analyse des tendances entamée par l'UQAM (Larocque et al., 2022). Cela aurait un intérêt tout particulier pour le projet EstimEau où le suivi et l'analyse des tendances des puits du RSESQ pourraient contribuer à mieux définir les variations des niveaux de nappe attendues dans le futur. Une première sélection de puits représentatifs dans les 11 DH a été engagée (section 2.3.3). Celle-ci pourrait bénéficier de travaux connexes dont ceux sur le Bulletin d'état des nappes (Lefebvre et al., 2023) qui ont pour but de mieux comprendre la ressource en eau souterraine et son évolution future avec les changements climatiques. En effet, même si la recharge augmente annuellement, l'étiement de la durée de l'étiage dans le futur devrait mener à des périodes plus difficiles reliées à des niveaux bas dans les puits d'approvisionnement en eau (Larocque et al., 2022).

Points clefs

- Considérant les incertitudes reliées à travaux dans le domaine des changements climatiques, les études existantes au Québec ne montrent pas d'évolution marquée de la recharge dans le futur qui devrait être en légère hausse (tout du moins au sud du fleuve Saint-Laurent) même si des hausses plus importantes pourraient être envisagées dans certaines régions plus spécifiques.
- Dans le futur, c'est la dynamique de la recharge au sein d'une année qui va probablement être modifiée.
- Le réchauffement attendu devrait réduire le couvert de neige à l'hiver entraînant alors une hausse de la recharge hivernale au détriment du pic de recharge printanière.
- La crue printanière hâtive combinée à des périodes de récession plus longues pourrait conduire à des étiages plus sévères et donc des baisses de niveaux de nappe plus importantes à la fin de l'été et à l'automne impactant certains puits d'approvisionnement.
- Cependant, des travaux sont nécessaires pour mieux comprendre les processus de recharge qui pourraient être affectés dans le futur (notamment en période hivernale) et le maintien du réseau de suivi en place (RSESQ) répond à ce besoin de connaissances.

3 RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

3.1 Eau de surface

3.1.1 Validation de l'approche

La capacité des séries hydrologiques estimées par post-traitement statistique (section 2.2.2) à reproduire adéquatement le comportement hydrologique des bassins versants de superficie inférieure à 50 km² est évaluée à l'aide de trois étapes de validation. Chaque étape correspond à une tentative de généraliser l'approche proposée sur une portée spatio-temporelle de plus en plus large. La première étape de validation cherche à confirmer si une série hydrologique estimée par post-traitement statistique permet une représentation adéquate des débits observés pour des conditions jugées idéales. Ces conditions correspondent à la présence d'une station hydrométrique localisée à proximité du tronçon source et une période d'observation disponible largement plus longue (17 ans) que celle de la série à estimer (1 an). Cette première validation correspond davantage à une preuve de concept, de par le fait qu'elle s'applique pour des conditions optimales, non représentatives de l'ensemble des tronçons de rivière du Québec agricole.

La figure 12 ci-dessous compare les débits journaliers observés à la station hydrométrique Castor (11,2 km², figure 3) pour l'année 2012 à ceux estimés par post-traitement statistique. La série hydrologique reconstituée est extraite au tronçon-source MONT00923 (616 km²). Il est possible d'observer que la série estimée résultante propose une représentation généralement adéquate des observations. L'évaluation de la performance de simulation est ici basée sur le critère «Kling-Gupta Efficiency» (KGE) :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\sigma - 1)^2 + (\mu - 1)^2} \quad (6)$$

où : r est la corrélation linéaire entre les débits observés et simulés; σ est le ratio des écarts-types observé et simulé; μ est le ratio des moyennes observée et simulée. Plus le critère KGE se rapproche le plus de 1, plus la simulation est jugée performante.

La valeur du score de performance ($KGE = 0.8$) confirme une représentation adéquate de l'hydrogramme simulé, principalement en termes de corrélation ($r = 0,8$) et de dispersion ($\sigma = 1,0$). Il est cependant possible d'observer une tendance de l'hydrogramme simulé à sous-estimer les observations ($\mu = 0,9$), principalement lors des épisodes de forts débits (crues) au printemps et à l'automne.

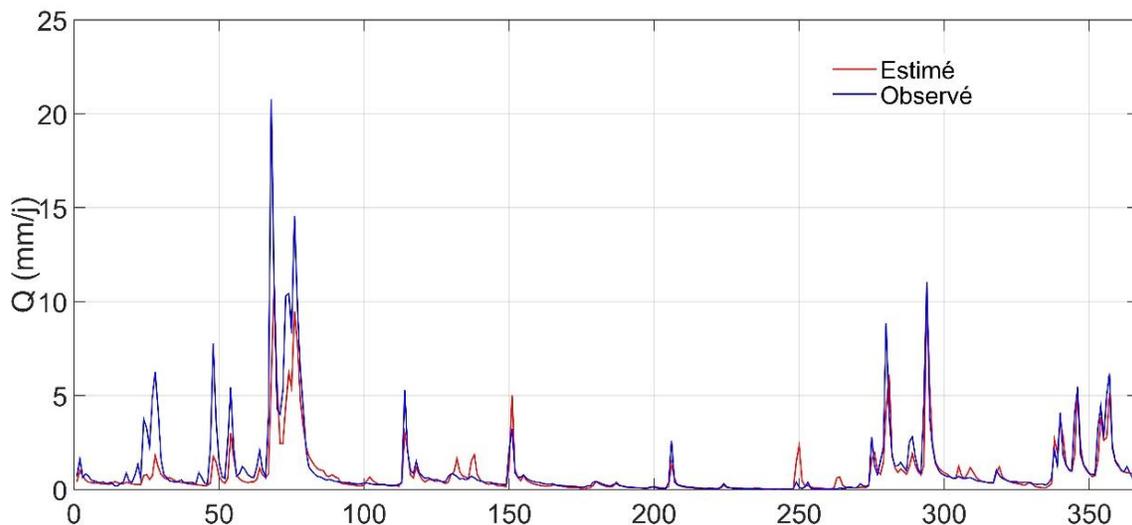


Figure 12. Séries hydrologiques observée à la station Castor et estimée par post-traitement statistique à partir des séries reconstituées au tronçon MONT00923 pour l'année 2012.

La seconde étape de validation cherche à confirmer si les séries hydrologiques estimées par post-traitement reproduisent adéquatement, sur une période pluriannuelle, le comportement hydrologique et les conditions d'étiage pour un ensemble de bassins versants agricoles de superficie inférieure à 50 km². Nous avons ici sélectionné six stations hydrométriques cibles : Bellevue, Pot au Beurre, Ewing, Wallbridge-branche 4, Wallbridge-branche 25 et Castor (figure 5). Ces stations sont localisées en «Montérégie hydrologique», un domaine spatial défini par les limites de la plateforme de modélisation ayant été utilisée pour produire l'Atlas hydroclimatique. Les périodes entières d'observations disponibles à chaque station (tableau 5) ont été utilisées pour construire les fonctions de distribution cumulative nécessaires au post-traitement statistique. Ce dernier est appliqué indépendamment pour chacune des six stations hydrométriques cibles, permettant la production de six séries hydrologiques estimées de façon indépendante à chacun des sites de validation. La performance est calculée sur la période d'observation disponible à partir de la série hydrologique «ensembliste», déterminée par la valeur médiane, évaluée à chaque jour de la période, des séries indépendantes. La série estimée à un site donné à partir des observations recueillies au même site est exclue du processus de validation (rééchantillonnage de type «jackknife»).

Le tableau 5 présente l'évaluation de la performance des séries hydrologiques «ensemblistes» reconstituées aux six sites de validation. Les valeurs de *KGE* varient de 0,62 (bassin Pot au Beurre) à 0,82 (bassin Wallbridge – branche 4), ce qui indique une représentation des débits observés globalement adéquate. Les séries simulées sont généralement bien corrélées avec les observations (*r* supérieur à 0,73), sauf pour le site Ewing où *r* = 0,58. La dispersion est également assez bien représentée par les séries hydrologiques reconstituées. Les valeurs calculées du ratio σ sont généralement centrées autour de 1. Seuls les sites Ewing et Castor sont affectés d'une sous-estimation plus marquée de la dispersion (σ = 0,80 et 0,86, respectivement). On peut finalement constater que les séries reconstituées ont tendance à surestimer les débits, le ratio μ étant supérieur à 1 pour l'ensemble de sites de validation, sauf au site Wallridge – branche 25 (μ = 0,92). Ces scores indiquent des variations de performance somme toute modérées d'un site à l'autre. L'évaluation de performance varie également selon la composante de l'indicateur analysé. Le Tableau 2 présente également l'erreur relative absolue de simulation (*E*, équation 7) affectant les valeurs estimées de $Q_{2,7}$ pour les mois de juin à septembre tel que :

$$E = \left| \frac{Q_{2,7}^{sim} - Q_{2,7}^{obs}}{Q_{2,7}^{obs}} \right| \quad (7)$$

L'évaluation de *E* sur les principaux mois de la saison de culture permet d'apprécier plus précisément la capacité de la méthode à estimer les fluctuations saisonnières de la disponibilité en eau de surface. Il est possible de constater que l'erreur est généralement inférieure à 0,5, ce qui peut être jugé convenable considérant les faibles valeurs de $Q_{2,7}$ typiquement évaluées à partir de séries hydrologiques observées sur des petits bassins versants (section 2.2.1 – limitation iii). La disponibilité au site Bellevue présente une erreur systématiquement plus élevée par rapport aux autres sites. La disponibilité au mois de juin semble aussi affectée d'une erreur systématiquement plus élevée par rapport aux autres mois.

Tableau 5. Performance des séries hydrologiques reconstituées sur six sites de validation.

Site	Période	<i>KGE</i>	<i>r</i>	σ	μ	<i>E</i> _{juin}	<i>E</i> _{juil}	<i>E</i> _{août}	<i>E</i> _{sept}
Bellevue	2009 - 2014	0,75	0,78	0,96	1,11	2,7	1,6	1,5	0,7
Pot au Beurre	2009 - 2014	0,62	0,73	1,11	1,24	1,1	0,5	0,3	0,1
Ewing	2001 - 2012	0,66	0,58	0,80	1,19	0,3	0,5	0,5	0,4
Walbridge-4	2001 - 2006	0,82	0,85	1,07	1,05	0,2	0,1	0,02	0,3
Walbridge-25	2001 - 2006	0,75	0,76	1,01	0,92	0,7	0,05	0,3	0,3
Castor	1997 - 2013	0,72	0,77	0,86	1,03	0,4	0,3	0,1	0,8

La troisième étape de validation cherche à confirmer si les séries hydrologiques estimées par post-traitement statistique reproduisent adéquatement, sur une période pluriannuelle, le comportement hydrologique et les conditions d'étiage sur un ensemble aussi large que possible de bassins versants agricoles de superficie inférieure à 50 km². Nous avons donc sélectionné, en plus des bassins utilisés à la deuxième étape de validation («Montérégie hydrologique»), les six bassins suivants (figure 5) : Noire et Brulée en Mauricie, Fourchette aval et Fourchette amont en Chaudière-Appalaches, Brook et Cass en Estrie. Tout comme pour la deuxième étape de validation, les périodes entières d'observations disponibles à chaque station (tableau 6) ont été utilisées pour construire les fonctions de distribution cumulative nécessaires au post-traitement. Ce dernier est appliqué indépendamment pour chacune des douze stations hydrométriques cibles, permettant la production de douze séries hydrologiques estimées de façon indépendante à chacun des sites de validation. La performance est calculée sur la période d'observation disponible à partir de la série hydrologique «ensembliste», déterminée par la valeur médiane, évaluée à chaque jour de la période, des séries indépendantes. La série estimée à un site donné à partir des observations recueillies au même site n'est pas ici exclue du processus de validation. Nous jugeons que l'ensemble de séries reconstituées est suffisamment grand pour que la série en question ne puisse influencer le processus d'évaluation.

La figure 13 présente les hydrogrammes interannuels moyens calculés à partir des débits observés et estimés par post-traitement statistique aux douze sites de validation. Une moyenne mobile sur 7 jours a été appliquée aux deux séries pour rehausser le ratio signal-bruit affectant les débits observés. Il est possible de constater que les séries hydrologiques estimées permettent une représentation généralement adéquate des fluctuations saisonnières de débit, et ce pour l'ensemble des sites de validation. Les séries estimées sont cependant typiquement affectées d'un biais positif (surestimation) des épisodes de forts débits au printemps et à l'automne. Ce biais est davantage marqué pour les bassins à l'extérieur de la «Montérégie hydrologique», soit les bassins Noire, Brulée, Fourchette aval, Fourchette amont, Brook et Cass.

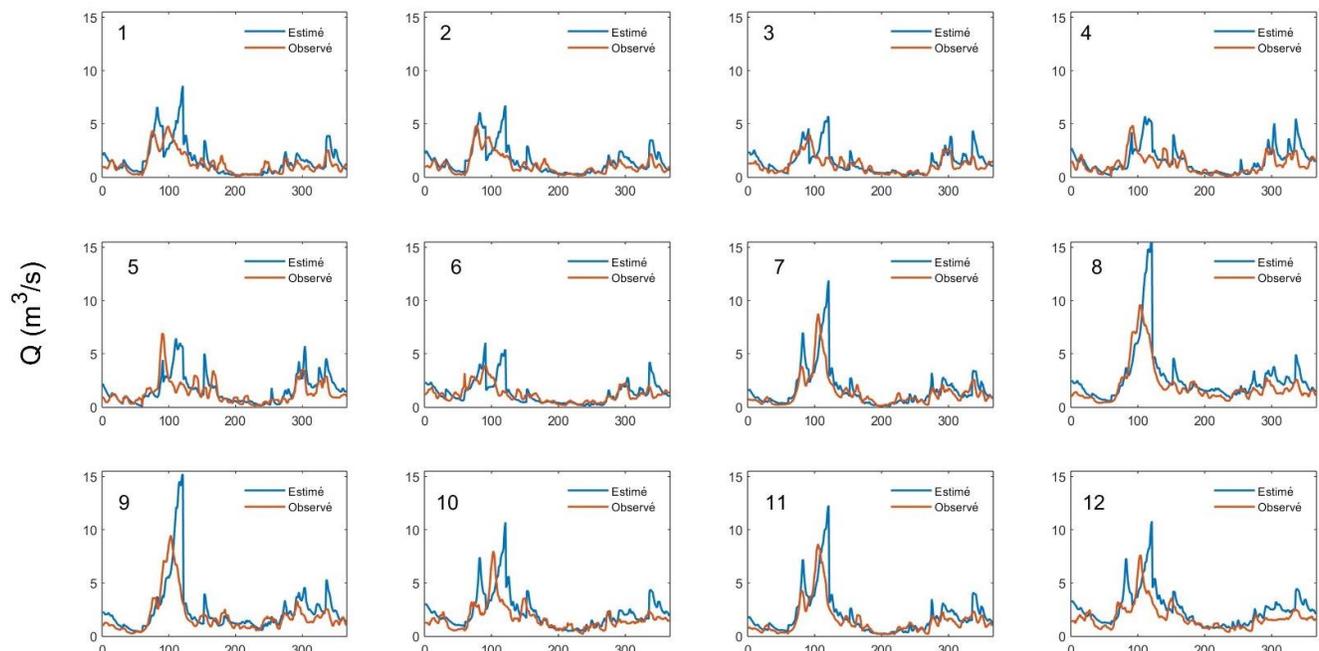


Figure 13. Hydrogrammes interannuels moyens observés et estimés aux douze sites de validation. Une moyenne mobile sur 7 jours a été appliquée aux deux séries pour faire rehausser le ratio signal-bruit affectant les débits observés.

Le tableau 6 compare la performance, à chacun des douze sites de validation, de l'approche ensembliste proposée (la série médiane issue des séries estimées indépendamment) à celle d'une approche déterministe (l'ensemble des séries estimées indépendamment). L'approche déterministe est ici évaluée par la performance médiane issue des séries estimées indépendamment. Il est possible de constater que la performance de l'approche ensembliste (KGE variant de 0,30 à 0,54) est notablement supérieure à celle de l'approche déterministe (KGE variant de -0,13 à 0,02). Il est également possible de constater une performance systématiquement accrue pour l'approche ensembliste en termes de corrélation (r) et de biais (μ). L'approche ensembliste induit cependant une sous-estimation systématique de la dispersion ($\sigma < 1$), alors que l'approche déterministe induit plutôt une surestimation systématique ($\sigma > 1$). Il est aussi important de noter que la performance globale de l'approche ensembliste est ici amoindrie par rapport à la seconde étape de validation.

Le tableau 7 présente l'erreur relative absolue de simulation (E , équation 7) pour les $Q_{2,7}$ estimés de juin à septembre par l'approche ensembliste aux douze sites de validation. Il est possible de constater que l'erreur est généralement inférieure à 1,5, ce qui s'avère notablement supérieur à l'erreur évaluée lors de la seconde phase de validation. Ces résultats peuvent s'expliquer par les faibles valeurs de $Q_{2,7}$ typiquement évaluées à partir de séries hydrologiques observées sur des petits bassins versants (section 2.2.1 – limitation iii). La disponibilité estimée aux sites Bellevue, Walbridge – Branche 4 et Walbridge – Branche 25 présentent une erreur plus élevée par rapport aux autres sites.

Les résultats présentés aux tableaux 6 et 7 indiquent que l'approche proposée visant à estimer la disponibilité en eau de surface des bassins versants de superficie inférieure à 50 km² est affectée d'une limite dans sa capacité à se généraliser sur un très grand territoire et demeure vraisemblablement perfectible. Il serait à notre sens pertinent d'explorer plus systématiquement différentes approches d'attribution des cibles ou bien l'utilisation de séries hydrologiques reconstituées alternatives dans le but d'améliorer la reproductibilité de l'approche à l'échelle du Québec agricole.

Tableau 6. Comparaison de la l'approche ensembliste à une approche déterministe

Sites	Période	Approche déterministe ¹				Approche ensembliste ²			
		KGE	r	σ	μ	KGE	r	σ	μ
Bellevue	2009 - 2014	-0,07	0,26	1,32	1,57	0,39	0,45	0,94	1,26
Pot-au-Beurre	2009 - 2014	-0,03	0,31	1,25	1,57	0,42	0,52	0,91	1,31
Ewing	2001 - 2012	-0,13	0,18	1,41	1,59	0,29	0,33	0,95	1,25
Walbridge_Br_4	2001 - 2006	-0,09	0,21	1,36	1,58	0,31	0,38	0,91	1,29
Walbridge_Br_25	2001 - 2006	-0,09	0,21	1,31	1,55	0,32	0,37	0,89	1,22
Castor	1997 - 2013	-0,12	0,16	1,44	1,49	0,30	0,32	0,94	1,15
Noire	2009 – 2015	0,00	0,40	1,30	1,53	0,54	0,60	0,97	1,23
Fourchette aval	2001 – 2015	-0,01	0,50	1,23	1,50	0,53	0,67	0,89	1,31
Fourchette amont	2001 – 2015	-0,04	0,39	1,25	1,52	0,48	0,56	0,91	1,25
Brook	2009 – 2015	-0,11	0,22	1,41	1,51	0,30	0,38	0,94	1,31
Brulée	2009 – 2015	0,02	0,45	1,27	1,53	0,54	0,65	0,94	1,28
Cass	2009 - 2015	-0,05	0,28	1,33	1,53	0,31	0,44	0,90	1,40

¹ Ensemble des séries estimées indépendamment (la performance médiane de l'ensemble est ici présentée).

² Série médiane issue des séries estimées indépendamment.

Tableau 7. Erreur relative absolue de simulation (E) affectant les valeurs estimées de $Q_{2,7}$ du mois de juin à septembre par l'approche ensembliste

Sites	Période	E_{juin}	E_{juil}	$E_{août}$	E_{sept}
Bellevue	2009 - 2014	1,7	0,9	2,6	1,5
Pot-au-Beurre	2009 - 2014	1,3	1,1	1,9	0,8
Ewing	2001 - 2012	1,4	1,7	1,8	0,1
Walbridge_Br_4	2001 - 2006	2,5	1,3	2,2	0,1
Walbridge_Br_25	2001 - 2006	2,8	2,4	1,7	0,5
Castor	1997 - 2013	0,9	1,7	0,7	0,8
Noire	2009 – 2015	1,6	0,5	2,0	1,1
Fourchette aval	2001 – 2015	1,1	1,7	1,6	1,1
Fourchette amont	2001 – 2015	1,4	1,5	1,1	0,6
Brook	2009 – 2015	1,0	0,1	1,1	0,9
Brulée	2009 – 2015	0,9	0,4	1,3	1,8
Cass	2009 - 2015	0,9	0,2	1,2	1,3

3.1.2 Projection en contexte de changements climatiques

L'Atlas hydroclimatique offre un large ensemble de projections du régime hydrique pour chacun des 10 000 tronçons de rivière modélisés. Ces projections sont produites en alimentant la plateforme de modélisation hydrologique préalablement calibrée avec un très grand nombre de scénarios climatiques (MELCCFP, 2024). Les projections prennent la forme d'un ensemble de valeurs de changements projetés pour différents indicateurs numériques, ces derniers décrivant un aspect spécifique du régime hydrique (p.ex. l'ampleur de la crue printanière). L'analyse de la projection d'un indicateur donné se base typiquement sur la distribution des valeurs de changements modélisés. Pour chaque tronçon modélisé et chaque indicateur numérique, l'Atlas hydroclimatique indique l'ampleur du changement projeté, soit la valeur médiane de la distribution des valeurs de changement projetés. Le tableau 8 présente à titre indicatif, l'ampleur du changement projeté des valeurs de $Q_{2,7}$ de juin à septembre pour différentes sous-régions hydrologiques. Ces dernières sont définies par les limites de la plateforme de modélisation ayant été utilisée pour produire l'Atlas hydroclimatique (figure 14). Il est possible de constater une tendance assez systématique indiquant une baisse de la disponibilité en eau de surface. L'ampleur de cette baisse varie d'une région hydrologique à l'autre et selon les mois de l'année. Il est important de noter qu'il existe des variations sous-régionales de l'ampleur des changements projetés. Une estimation à l'échelle locale de la disponibilité nécessiterait une analyse plus poussée des projections fournies par l'Atlas hydroclimatique.

Tableau 8. Ampleur du changement projeté des $Q_{2,7}$ de juin à septembre pour différentes sous-régions hydrologiques

Régions hydrologiques	Ampleur projetée du changement du $Q_{2,7}$ (%) ¹			
	Juin	Juillet	Août	Septembre
Gaspésie	-23	-18	-19	-26
Montérégie	-21	-28	-30	-36
Outaouais amont	-22	-21	-22	-27
Outaouais aval	-20	-23	-23	-28
Saguenay	-21	-19	-20	-22
Saint-Laurent Nord-Ouest	-20	-23	-25	-28
Saint-Laurent Sud-Ouest	-24	-28	-28	-30

¹ Valeur médiane pour la sous-région hydrologique associée au RCP8.5 à l'horizon 2050.

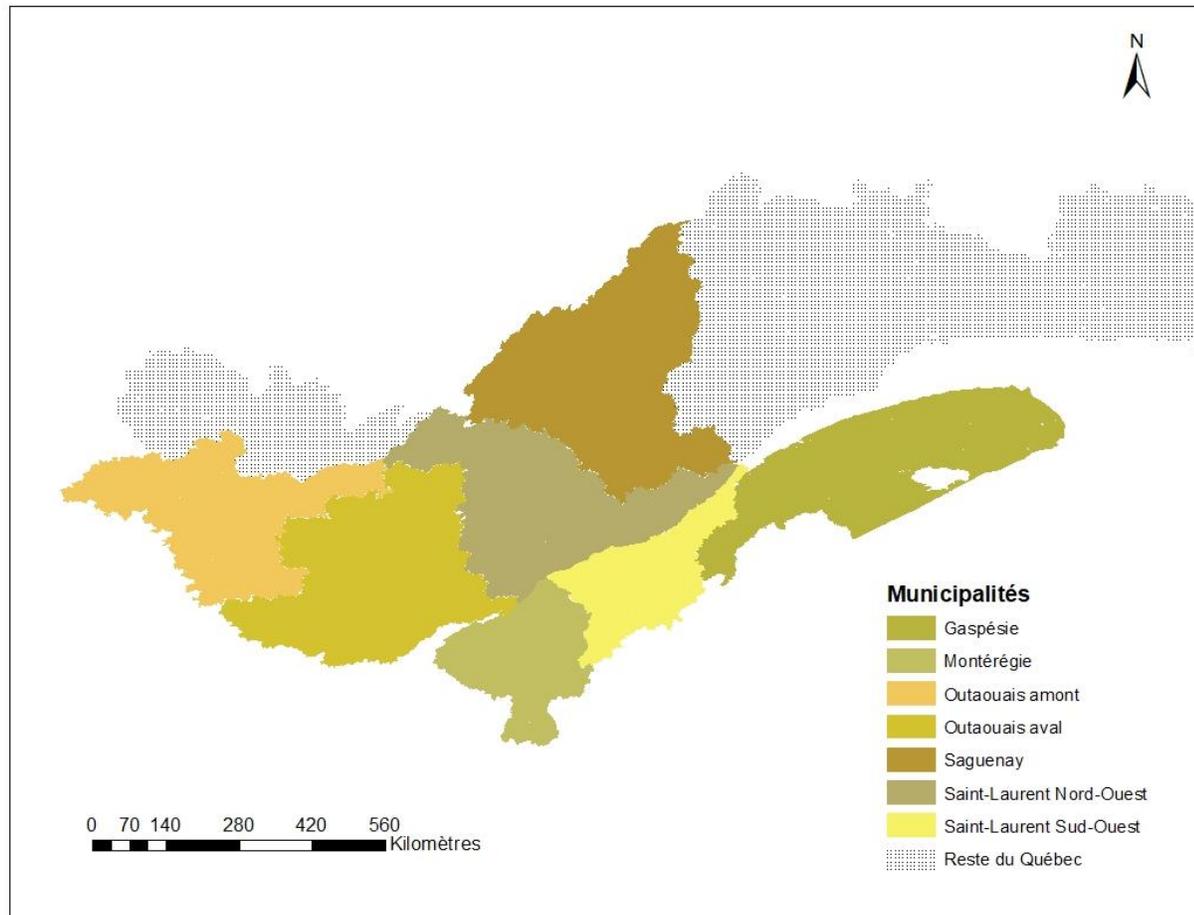


Figure 14. Sous-régions hydrologiques définies par les limites de la plateforme de modélisation ayant été utilisée pour produire l'Atlas hydroclimatique.

3.2 Disponibilité de l'eau souterraine

Les cartes relatives à l'estimation de la disponibilité des eaux souterraines sont présentées à l'annexe A.

4 POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Simon Ricard, ing., Ph.D.
Chercheur | Hydrologie
T. 418 643-2380, poste 691
F. 418 644-6855
simon.ricard@irda.qc.ca | www.irda.qc.ca
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Questions générales relatives au projet EstimEau et spécifiques au volet 1 «Estimation des besoins»

Carl Boivin, agr., M. Sc.
Chercheur | Régie de l'eau en productions fruitière et maraîchère
T. 418 643-2380, poste 430
C. 418 265-1913
F. 418 644-6855
carl.boivin@irda.qc.ca | www.irda.qc.ca
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

5 REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Ce projet a été financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du programme Prime-Vert.

6 RÉFÉRENCES

Ballard, J.-M., Huchet, F., Raynauld, M., Gosselin, J.-S., Lefebvre, R. (2021). Réalisation de travaux de caractérisation complémentaire pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines à Mercier : conditions des ressources en eau souterraine dans la région et en amont des anciennes lagunes de Mercier. Rapport de recherche R2033. INRS, Centre Eau, Terre et Environnement, Québec. 88 p.

Ballard, J.-M., Huchet, F., Lefebvre, R. (2022). Modélisation numérique régionale des conditions actuelles et en climat futur des ressources en eau souterraine dans la région des anciennes lagunes de Mercier. Rapport de recherche R2120, version finale : juillet 2022 (révisée en février 2023). INRS, Centre Eau, Terre et Environnement, Québec. 107 p.

Bergeron, O. (2016). Guide d'utilisation - Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec, version 2 (User guide 2016 – Daily climate grids from the Quebec Climate monitoring program, version 2). Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), Direction du suivi de l'état de l'environnement. 26 p.

Boivin, C., Anderson, L., Ricard, S. et Denault, J.T. (2024). EstimEau : un outil d'aide à la décision pour améliorer la gestion de l'eau et prévenir les conflits d'usage; VOLET 1 – Estimation des besoins en eau des exploitations agricoles. Rapport IRDA. 105 pages.

Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoit, N., Vigneault, H., Beaudry, C., Malet, X., Laurencelle, M., Gosselin, J.-S., Ladevèze, P., Thériault, R., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Morin, R., Crow, H., Gloaguen, E., Bleser, J., Martin, A., Lavoie, D. (2013). Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, rapport final INRS R-1433, soumis en juin 2013. 283 p.

Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S. (2021a). Impact des changements climatiques sur la recharge des eaux souterraines dans le sud du Québec. *À propos*, 2, 76. Lien : <https://climatoscope.ca/article/impact-des-changements-climatiques-sur-la-recharge-des-eaux-souterraines-dans-le-sud-du-quebec/>.

Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., Meyzonnat, G. (2021b). Simulation of long-term spatiotemporal variations in regional-scale groundwater recharge: contributions of a water budget approach in cold and humid climates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(12), 6567-6589. Lien : <https://hess.copernicus.org/articles/25/6567/2021/>.

Dubois, E. (2022). Impact of global changes on groundwater recharge in cold and humid climate, case study in southern Quebec (Canada). Thèse, Montréal (Québec, Canada), Université du Québec à Montréal, Doctorat en sciences de la Terre et de l'atmosphère. 161 p. Lien : <https://archipel.uqam.ca/16253/>.

Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., Braun, M. (2022). Climate Change Impacts on Groundwater Recharge in Cold and Humid Climates: Controlling Processes and Thresholds. *Climate*, 10(1), 6 p. Lien : <https://archipel.uqam.ca/15027/>.

Gosselin, J.-S., Lefebvre, R., Vigneault, H., Huchet, F., Raynauld, M. (2020). Développement de méthodologies d'analyse des données du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ). Rapport de recherche R1942. INRS, Centre Eau, Terre et Environnement, Québec. 93 p. Lien : <https://espace.inrs.ca/id/eprint/11226/>.

Gosselin, J.S., Huchet, F., Lefebvre, R. (2021). Indicateurs de l'état des ressources en eau souterraine sous l'effet du climat et de leur exploitation - Rapport final R2039 (version révisée en mai 2023). Rapport déposé au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, Québec. 226 p.

Groupe Agéco (2019). Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU1). Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ), Fonds Vert. 332 p. Lien : https://www.agrireseau.net/documents/Document_101346.pdf. Healy, R.W. (2010). Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 245 p.

Huchet, F., Gosselin, J.-S., Raynauld, M., Domaine, J., Lefebvre, R. (2021). Outil de support à l'analyse des demandes d'autorisation de prélèvement d'eau – développement d'une méthodologie pour déterminer les pressions sur les ressources en eau souterraine et les zones de gestion particulière – Rapport final. Rapport de recherche R2061, soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en août 2021, 320 p.

Larocque, M., Levison, J., Martin, A., Chaumont, D. (2019). A review of simulated climate change impacts on groundwater resources in Eastern Canada. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 44(1), pp. 22-41. Lien : <https://archipel.uqam.ca/12414/>.

Larocque, M., Lefebvre, R., Therrien, R., Gagné, S., Delottier, H., Gosselin, J.S., Huchet, F., Dubois, E., Anh Vu, T. (2021). *Projet synthèse sur les ressources en eau souterraine du sud du Saint-Laurent - Outils pour assurer la gestion des eaux souterraines face aux changements climatiques Rapport déposé au MELCC*. 55 p.

Larocque, M., Gagné, S., Dubois, E., Vu, T.A. (2022). *Recharge des aquifères et contribution des eaux souterraines aux débits de base des cours d'eau - conditions passées, actuelles et futures en présence de changements climatiques – Rapport final. Rapport déposé au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques*. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. 156 p. Lien : <https://archipel.uqam.ca/15967/>.

Laurencelle, M. (2018). *Propriétés hydrauliques et processus d'invasion par la mer de Champlain du système aquifère rocheux fracturé régional de la Montérégie est, Québec, Canada*. Thèse. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Doctorat en sciences de la terre, 399 p.

Lefebvre, R., Huchet, F., Gosselin, J.S., Raynauld, M. (2023). *Bulletin sur l'état des nappes pour le sud du Québec au printemps et à l'automne 2022. Rapport de recherche R2132, version finale : mars 2023 (révisée en novembre 2023)*. INRS, Centre Eau, Terre et Environnement, Québec. 96 p.

MELCCFP (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Québec), *Atlas hydroclimatique du Québec méridional*. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/>. Dernier accès: 23 février 2024.

MELCCFP (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Québec), *Guide de conception des installations de production d'eau potable*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/documents/volume1.pdf>. Dernier accès: 8 avril 2024.

Ouranos (2020). *Fiches synthèses régionales d'adaptation aux changements climatiques. Lutte contre les changements climatiques. Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques (Ouranos) & Ministère des Affaires municipales (MAMH), Fonds Vert*. Lien : <https://www.mamh.gouv.qc.ca/amenagement-du-territoire/lutte-contre-les-changements-climatiques/fiches-syntheses-regionales-dadaptation-aux-changements-climatiques/>.

Raynauld, M., Huchet, F., Ballard, J.-M., Colléau, É., Delisle, R., Mayrand, J., Mathis, R., Caron, O., Vigneault, H., Lavoie, R., Grenier, J., Vergnaud, V., Lefebvre, R. (2022). *Portrait des ressources en eau souterraine en Estrie, Québec, Canada. Rapport final, Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Estrie (PACES Estrie), projet réalisé par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) en collaboration avec le Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF)*. Rapport de recherche R2091 soumis au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs en mars 2022, révisée en mai 2023, 196 p. et annexes.

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

RQES (2023). *Introduction à l'hydrogéologie. Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES)*. Lien : <https://rqes.ca/introduction-a-lhydrogeologie/#:~:text=Un%20aquif%C3%A8re%20correspond%20%C3%A0%20une,qui%20constitue%20la%20cro%C3%B4te%20terrestre>.

Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G (2002). *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. *Hydrogeology Journal* 10, 18–39 (2002). Lien : <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>.

Themeßl, M. J., Gobiet, A., et Leuprecht, A. (2011). *Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models*. *International Journal of Climatology*. 31, 1530–1544. <https://doi.org/10.1002/joc.2168>.

Wright, S. N., Novakowski, K. S. (2022). *Numerical analysis of midwinter infiltration along the soil-rock interface: A pathway for enhanced bedrock recharge*. *Advances in Water Resources*, 166, 104261. Lien : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170822001312?casa_token=SQL2G_dKJUAAAAA:jowTJXgWESM9zwVXDd95Rkvs4y6tX6bJ3INZXZxc-P4IV0opiRmkEpkPHVTyjZwzvNxK3yTCXyw.

Annexe A : Cartes relatives à l'estimation de la disponibilité des eaux souterraines

Carte 1 : Limites des zones d'étude des projets de caractérisation hydrogéologique régionale existants.

Carte 2 : Recharge distribuée estimée lors des projets de caractérisation hydrogéologique régionale.

Carte 3 : Géologie du Quaternaire (dépôts de surface) de la province de Québec.

Carte 4 : Couverture spatiale de la grille d'estimation de la recharge et propriétés des mailles individuelles.

Carte 5 : Recharge annuelle moyenne du roc (a).

Carte 6 : Recharge annuelle moyenne du roc (b).

Carte 7 : Topographie simplifiée.

Carte 8 : Précipitations totales moyennes annuelles (normales climatiques).

Carte 9 : Températures moyennes annuelles (normales climatiques).

Carte 10 : Zones de gestion intégrée de l'eau (ZGIE) et Organismes de bassins versants (OBV) associés.

Carte 11 : Limites des provinces géologiques.

Carte 12 : Limites des domaines hydroclimatiques définis sur le territoire du Québec agricole (a).

Carte 13 : Limites des domaines hydroclimatiques définis sur le territoire du Québec agricole (b).

Carte 14 : Puits de référence du RSESQ sélectionnés dans chaque domaine hydroclimatique (a).

Carte 15 : Puits de référence du RSESQ sélectionnés dans chaque domaine hydroclimatique (b).

L'ensemble des cartes en format .pdf sont jointes au présent document.

Annexe B : Données relatives à la grille de recharge

Tableau 1 : Disponibilité des données extraites des projets régionaux existants et type de recharge associée aux livrables.

Projet ¹	Région d'étude	Phase ^{2,3}	Année	Responsable ⁴	Disponibilité	Livable ⁵	Type de recharge ^{5,6}
POR	Portneuf	Pilotes (pré-PACES)	1998	INRS-CGC	Disponible	Valeur unique	NA
CHA	Châteauguay	Pilotes (pré-PACES)	2006	INRS-CGC	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
MTRE	Montréal Est	PACES - Phase 1	2013	INRS	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
SLSJ	Saguenay - Lac-Saint-Jean	PACES - Phase 1	2013	UQAC	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
BECA	Bécancour	PACES - Phase 1	2013	UQAM	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
AT1	Abitibi-Témiscamingue Est	PACES - Phase 1	2013	UQAT	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
MAUR	Mauricie	PACES - Phase 1	2013	UQTR	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
CMQ	Communauté Métropolitaine de Québec	PACES - Phase 2	2013	UL	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
OUT	Outaouais	PACES - Phase 2	2013	UL	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
CA	Chaudière-Appalaches	PACES - Phase 3	2015	INRS	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
CHCN	Charlevoix - Haute-Côte-Nord	PACES - Phase 3	2015	UQAC	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
NSF	Nicolet - Saint-François	PACES - Phase 3	2015	UQAM	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
VS	Vaudreuil-Soulanges	PACES - Phase 3	2015	UQAM	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
NEBSL	Bas-Saint-Laurent (Nord-Est)	PACES - Phase 3	2015	UQAR	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
AT2	Abitibi-Témiscamingue Ouest	PACES - Phase 3	2015	UQAT	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
EST	Estrie	PACES - Phase 4	2022	INRS	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
LA	Lanaudière	PACES - Phase 4	2022	UQAC	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
ME	Mauricie Est	PACES - Phase 4	2022	UQAC	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
LAULM	Laurentides - Les Moulins	PACES - Phase 4	2022	UQAM	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
KRT	Kamouraska - Rivière-du-Loup - Témiscouata	PACES - Phase 4	2022	UQAR	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge potentielle
RAD	Radeau 2 (Laval - Laurentides)	Spécifiques	2018	INRS	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
MER	Mercier - Saint-Rémi	Spécifiques	2023	INRS	Disponible	Grille de recharge distribuée	Recharge réelle
MCN	Moyenne-Côte-Nord	PACES - Phase 4 (pilotes)	2022	UQAC	Indisponible	NA	NA
ESGM	Gaspésie-Matapédia	PACES - Phase 4 (pilotes)	2022	UQAR	Indisponible	NA	NA
IDLM	Îles-de-la-Madeleine	PACES - Spécifiques	2022	UL	Indisponible	NA	NA
TCE	Territoire crie d'Eastmain	PACES - Spécifiques	2022	UQAT	Indisponible	NA	NA

1 : Les acronymes sont repris dans le rapport et les cartes afin d'alléger la lecture ;

2 : PACES : projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines ;

3 : Les couleurs indiquées ici sont à mettre en lien avec celles utilisées sur la carte 1 de l'annexe A ;

4 : CGC : Commission Géologique du Canada ; INRS : Institut National de la Recherche Scientifique ; UL : Université Laval ; UQAC : Université du Québec à Chicoutimi ; UQAM : Université du Québec à Montréal ; UQAR : Université du Québec à Rimouski ; UQAT : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue ; UQTR : Université du Québec à Trois-Rivières ;

5 : La valeur « NA » est indiquée pour « Non applicable » ;

6 : Se référer à la section 2.3.1 sur les notions et concepts pour la différence entre « recharge réelle » et « recharge potentielle ».

Tableau 2 : Statistiques descriptives des valeurs de recharge typiquement rencontrées au droit des diverses unités quaternaires et du roc affleurant.¹

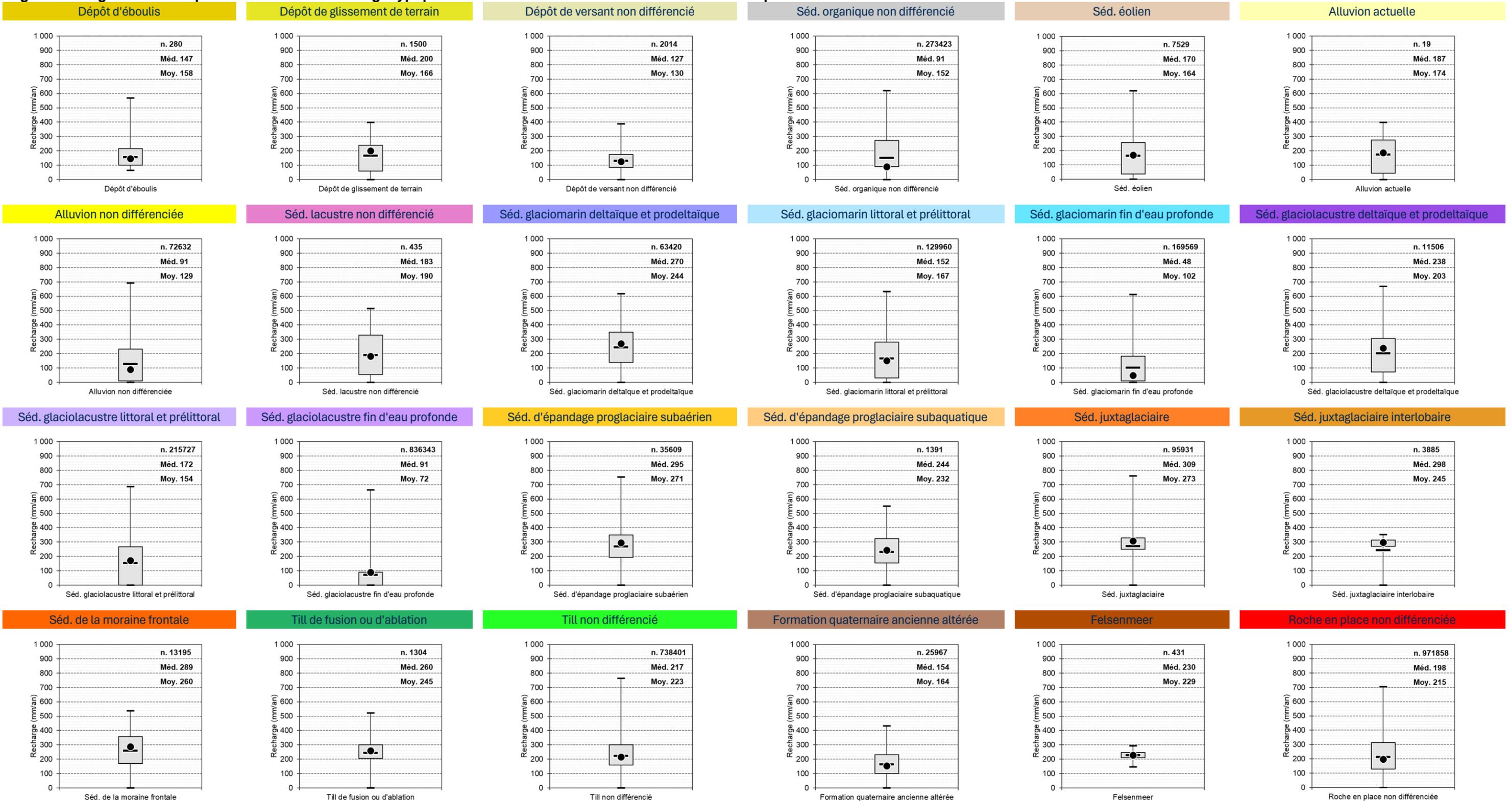
Période	Type	Unité ²	Symbole	Mailles		Recharge réelle au roc estimée (mm/an) ³							
				Nombre	Ratio (%)	10°	90°	Moy.	Min.	25°	Méd.	75°	Max.
Postglaciaire	Dépôts de versant	Dépôt d'éboulis	Ce	280	0.01	73.6	227.3	157.6	64.9	101.2	146.6	217.0	569.4
Postglaciaire	Dépôts de versant	Dépôt de glissement de terrain	Cg	1500	0.04	35.8	293.1	166.1	0.0	58.7	200.1	238.7	398.0
Postglaciaire	Dépôts de versant	Dépôt de versant non différencié	C	2014	0.05	48.1	217.4	130.2	0.0	84.2	126.6	176.0	387.9
Postglaciaire	Séd. organiques	Séd. organique non différencié	O	273423	7.45	86.0	312.3	152.5	0.0	91.0	91.0	271.4	619.5
Postglaciaire	Séd. éoliens	Séd. éolien	Ed	7529	0.21	9.4	301.6	163.6	0.0	35.0	170.4	257.1	619.5
Postglaciaire	Séd. alluviaux	Alluvion actuelle	Ap	19	0.00	29.4	355.5	173.7	0.0	43.0	187.2	275.7	399.7
Postglaciaire	Séd. alluviaux	Alluvion non différenciée	A	72632	1.98	0.0	327.5	128.9	0.0	9.2	91.0	232.3	692.0
Postglaciaire	Séd. lacustres	Séd. lacustre non différencié	L	435	0.01	0.0	360.0	190.3	0.0	53.5	182.6	329.3	513.6
Dern. glaciation	Séd. glaciomarins	Séd. glaciomarin deltaïque et prodeltaïque	MGd	63420	1.73	24.3	395.8	243.5	0.0	138.8	269.7	349.8	616.5
Dern. glaciation	Séd. glaciomarins	Séd. glaciomarin littoral et pré-littoral	MGb	129960	3.54	9.3	363.0	167.1	0.0	31.6	152.2	281.3	632.7
Dern. glaciation	Séd. glaciomarins	Séd. glaciomarin fin d'eau profonde	MGa	169569	4.62	0.0	274.0	101.7	0.0	11.3	47.9	181.7	612.0
Dern. glaciation	Séd. glaciolacustres	Séd. glaciolacustre deltaïque et prodeltaïque	LGd	11506	0.31	0.0	346.1	203.5	0.0	70.7	238.3	307.2	669.2
Dern. glaciation	Séd. glaciolacustres	Séd. glaciolacustre littoral et pré-littoral	LGb	215727	5.87	0.0	293.1	154.1	0.0	0.0	172.3	268.6	687.6
Dern. glaciation	Séd. glaciolacustres	Séd. glaciolacustre fin d'eau profonde	LGa	836343	22.77	0.0	147.6	72.5	0.0	0.0	91.0	91.0	662.8
Dern. glaciation	Séd. fluvioglaciaires	Séd. d'épandage proglaciaire subaérien	Go	35609	0.97	83.7	422.7	271.1	0.0	193.5	295.3	350.5	754.3
Dern. glaciation	Séd. fluvioglaciaires	Séd. d'épandage proglaciaire subaquatique	Gs	1391	0.04	74.9	357.9	231.8	0.0	154.2	244.5	324.3	549.3
Dern. glaciation	Séd. fluvioglaciaires	Séd. juxtaglaciaire	Gx	95931	2.61	99.9	348.1	273.3	0.0	248.4	309.5	329.7	761.7
Dern. glaciation	Séd. fluvioglaciaires	Séd. juxtaglaciaire interlobaire	Gxi	3885	0.11	37.8	316.2	244.7	0.0	271.0	297.7	313.4	352.0
Dern. glaciation	Séd. fluvioglaciaires	Séd. de la moraine frontale	GxT	13195	0.36	91.0	383.8	260.3	0.0	170.9	288.9	356.8	537.5
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till de fusion ou d'ablation	Tf	1304	0.04	119.0	332.9	244.5	0.0	206.0	259.8	301.8	521.8
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till non différencié	T	738401	20.11	91.0	352.0	223.3	0.0	158.3	216.6	300.9	764.7
Quat. ancien	Quat. ancien	Formation quaternaire ancienne altérée	Qa	25967	0.71	55.2	277.2	163.9	0.0	101.0	153.7	232.1	430.7
Quat. ancien	Quat. ancien	Felsenmeer	Qf	431	0.01	200.0	260.2	229.3	147.8	212.1	229.6	246.7	293.7
Pré-quaternaire	Substrat rocheux	Roche en place non différenciée	R	971858	26.46	91.0	352.0	214.6	0.0	127.7	198.4	312.5	705.8
Total				3672329	100.00								

1 : Liste des diminutifs employés pour alléger le tableau : Dern. Glaciation : dernière glaciation ; Quat. Ancien : Quaternaire ancien ; Séd. : sédiments ;

2 : Les couleurs indiquées ici sont à mettre en lien avec celles utilisées sur la carte 3 de l'annexe A même si cette dernière a été quelque peu simplifiée pour la lisibilité.

3 : Recharge réelle au roc estimée partir d'une approche simplifiée à large échelle basée sur la carte de la géologie du quaternaire.

Figure 1 : Diagrammes box-plot des valeurs de recharge typiquement rencontrées au droit des diverses unités quaternaires et du roc affleurant.¹



1 : Le box-plot (ou « boîte à moustache ») représente de bas en haut les valeurs suivantes : le minimum, le 25^e percentile (Q1), la médiane (point), la moyenne (tiret), le 75^e percentile (Q3) et le maximum.

Figure 2 : Diagrammes de cumul du nombre de mailles selon les valeurs de recharge typiquement rencontrées au droit des diverses unités quaternaires et du roc affleurant.¹



1 : Le Q1 correspond au 25^e percentile et le Q3 correspond au 75^e percentile.

Tableau 3 : Statistiques descriptives des valeurs de recharge (sans distinction de la recharge réelle ou potentielle) typiquement rencontrées au droit des diverses unités de tills.

Période	Type	Unité ¹	Symbole	Mailles		Recharge (mm/an)							
				Nombre	Ratio (%)	10°	90°	Moy.	Min.	25°	Méd.	75°	Max.
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till remanié en couverture continue	Tr	19398	2.22	27.6	304.2	185.6	0.0	122.7	184.3	237.7	693.4
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till remanié en couverture discontinue	Trm	3225	0.37	58.5	281.2	186.3	0.0	145.6	190.2	237.2	631.1
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till de fusion ou d'ablation	Tf	858	0.10	104.8	348.2	258.2	0.0	236.5	287.0	322.3	612.0
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till en couverture généralement continue	Tc	359224	41.05	83.9	357.9	239.1	0.0	164.9	244.0	329.3	742.0
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till en couverture mince et discontinue	Tm	492467	56.27	83.9	359.7	253.2	0.0	176.5	292.8	344.3	679.6
Total				875172	100.00								

1 : Les tills suivants ne sont pas présents sur la carte quaternaire détaillée : till délavé (Td), till bosselé (Tb), till côtélé (To) et till fuselé (Ts).

Tableau 4 : Statistiques descriptives des valeurs de recharge réelle typiquement rencontrées au droit des diverses unités de tills.

Période	Type	Unité ¹	Symbole	Mailles		Recharge réelle (mm/an)							
				Nombre	Ratio (%)	10°	90°	Moy.	Min.	25°	Méd.	75°	Max.
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till remanié en couverture continue	Tr	19020	3.17	25.7	306.3	186.4	0.0	124.7	184.9	238.8	693.4
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till remanié en couverture discontinue	Trm	2908	0.48	41.1	284.8	189.2	0.0	150.1	190.9	241.9	631.1
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till de fusion ou d'ablation	Tf	447	0.07	0.0	369.2	262.1	0.0	228.0	316.4	337.6	612.0
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till en couverture généralement continue	Tc	255715	42.59	126.6	360.4	265.4	0.0	193.2	299.4	345.5	698.7
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till en couverture mince et discontinue	Tm	322316	53.68	189.7	360.5	303.9	0.0	286.3	325.9	351.3	668.7
Total				600406	100.00								

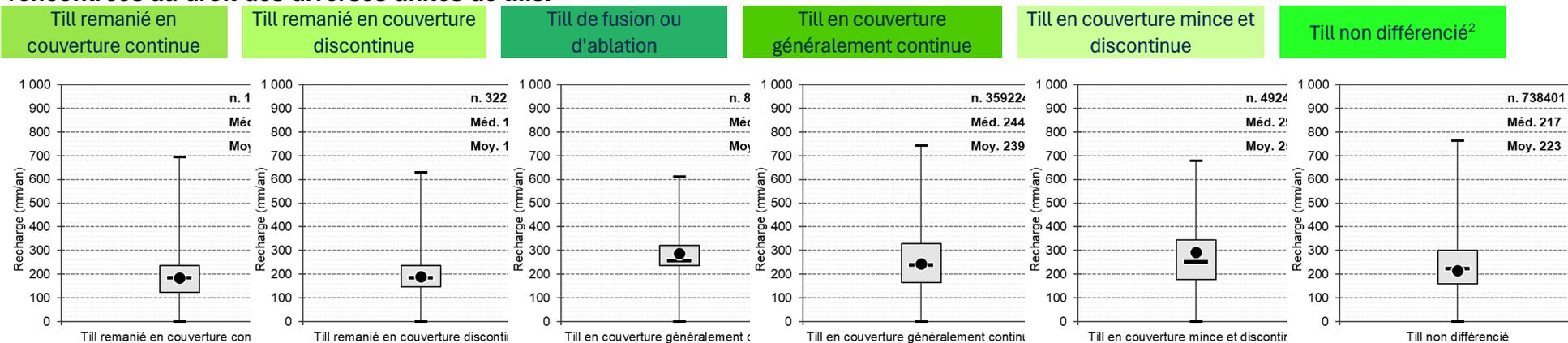
1 : Les tills suivants ne sont pas présents sur la carte quaternaire détaillée : till délavé (Td), till bosselé (Tb), till côtélé (To) et till fuselé (Ts).

Tableau 5 : Statistiques descriptives des valeurs de recharge potentielle typiquement rencontrées au droit des diverses unités de tills.

Période	Type	Unité ¹	Symbole	Mailles		Recharge potentielle (mm/an)							
				Nombre	Ratio (%)	10°	90°	Moy.	Min.	25°	Méd.	75°	Max.
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till remanié en couverture continue	Tr	378	0.14	81.4	211.7	146.1	0.0	111.3	113.4	190.0	315.2
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till remanié en couverture discontinue	Trm	317	0.12	72.8	211.6	159.6	35.0	109.2	186.2	204.2	367.2
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till de fusion ou d'ablation	Tf	411	0.15	126.4	304.3	254.0	105.8	237.7	278.7	294.4	337.3
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till en couverture généralement continue	Tc	103509	37.67	49.5	286.2	174.2	0.0	105.0	179.0	234.1	742.0
Dern. glaciation	Séd. glaciaires	Till en couverture mince et discontinue	Tm	170151	61.93	46.5	258.9	157.1	0.0	87.4	158.5	217.2	679.6
Total				274766	100.00								

1 : Les tills suivants ne sont pas présents sur la carte quaternaire détaillée : till délavé (Td), till bosselé (Tb), till côtélé (To) et till fuselé (Ts).

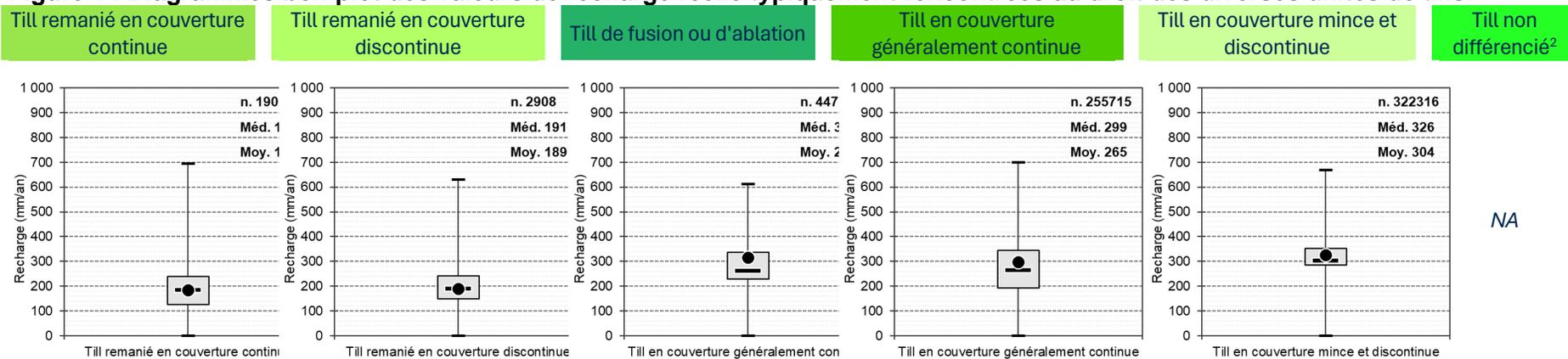
Figure 3 : Diagrammes box-plot des valeurs de recharge (sans distinction de la recharge réelle ou potentielle) typiquement rencontrées au droit des diverses unités de tills.¹



1 : Le box-plot (ou « boîte à moustache ») représente de bas en haut les valeurs suivantes : le minimum, le 25^e percentile (Q1), la médiane (point), la moyenne (tiret), le 75^e percentile (Q3) et le maximum ;

2 : Les valeurs du till non différencié proviennent de la carte quaternaire générale et non de la carte détaillée.

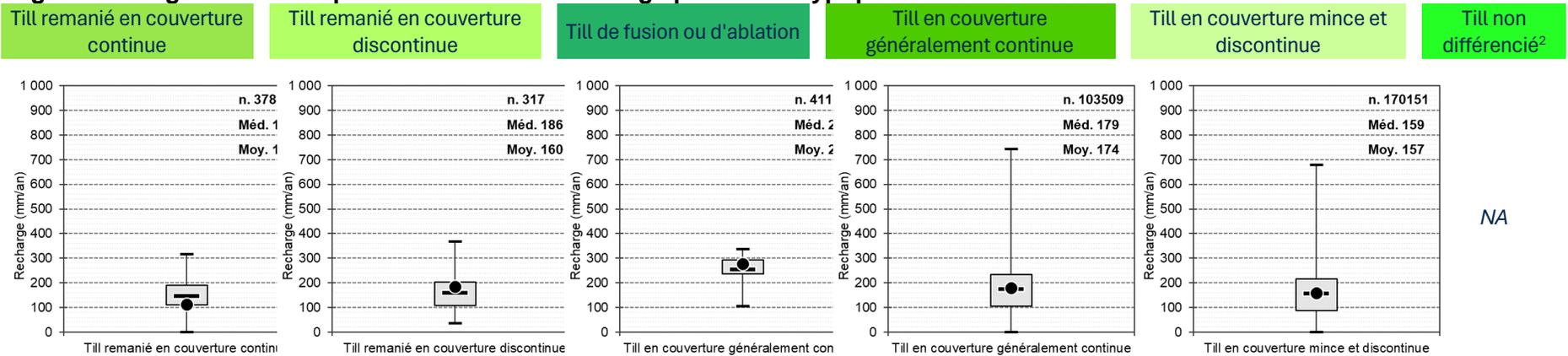
Figure 4 : Diagrammes box-plot des valeurs de recharge réelle typiquement rencontrées au droit des diverses unités de tills.¹



1 : Le box-plot (ou « boîte à moustache ») représente de bas en haut les valeurs suivantes : le minimum, le 25^e percentile (Q1), la médiane (point), la moyenne (tiret), le 75^e percentile (Q3) et le maximum ;

2 : Le till non différencié est affiché sur la figure 3 de l'annexe B car il provient de la carte générale et la distinction entre recharge réelle et potentielle a seulement été appliquée sur la carte détaillée.

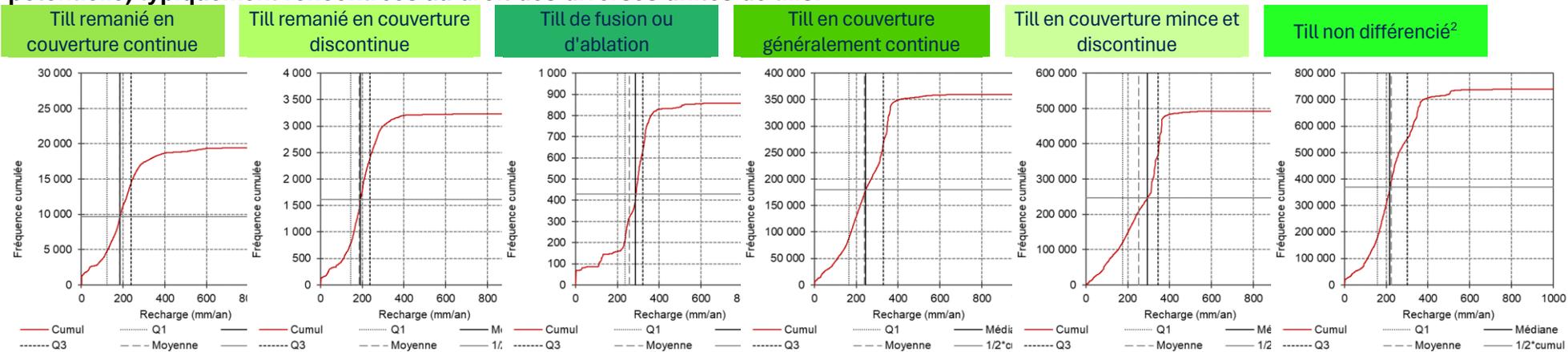
Figure 5 : Diagrammes box-plot des valeurs de recharge potentielle typiquement rencontrées au droit des diverses unités de tills.¹



1 : Le box-plot (ou « boîte à moustache ») représente de bas en haut les valeurs suivantes : le minimum, le 25^e percentile (Q1), la médiane (point), la moyenne (tiret), le 75^e percentile (Q3) et le maximum ;

2 : Le till non différencié est affiché sur la figure 3 de l'annexe B car il provient de la carte générale et la distinction entre recharge réelle et potentielle a seulement été appliquée sur la carte détaillée.

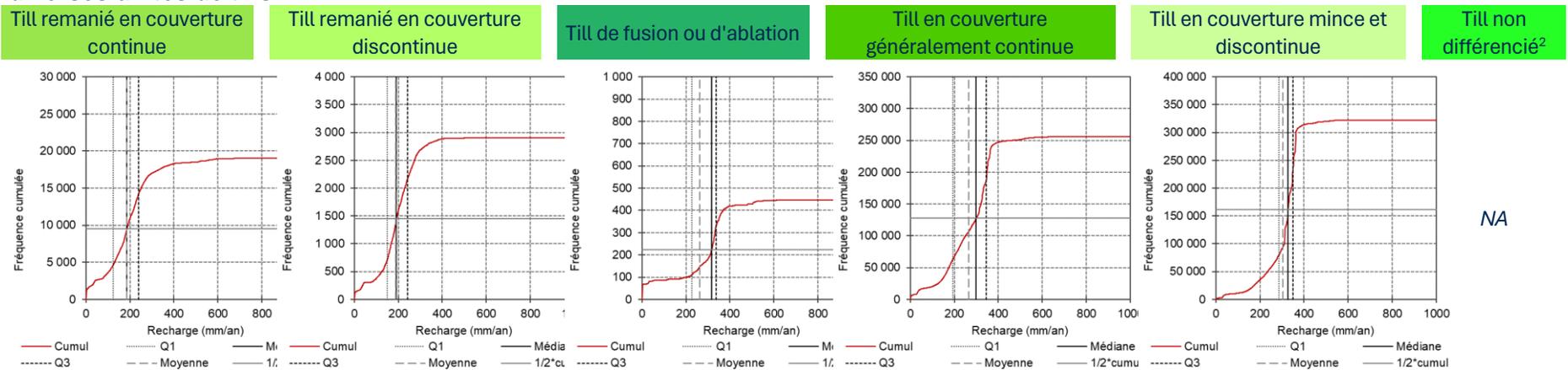
Figure 6 : Diagrammes de cumul du nombre de mailles selon les valeurs de recharge (sans distinction de la recharge réelle ou potentielle) typiquement rencontrées au droit des diverses unités de tills.¹



1 : Le Q1 correspond au 25^e percentile et le Q3 correspond au 75^e percentile ;

2 : Les valeurs du till non différencié proviennent de la carte quaternaire générale et non de la carte détaillée.

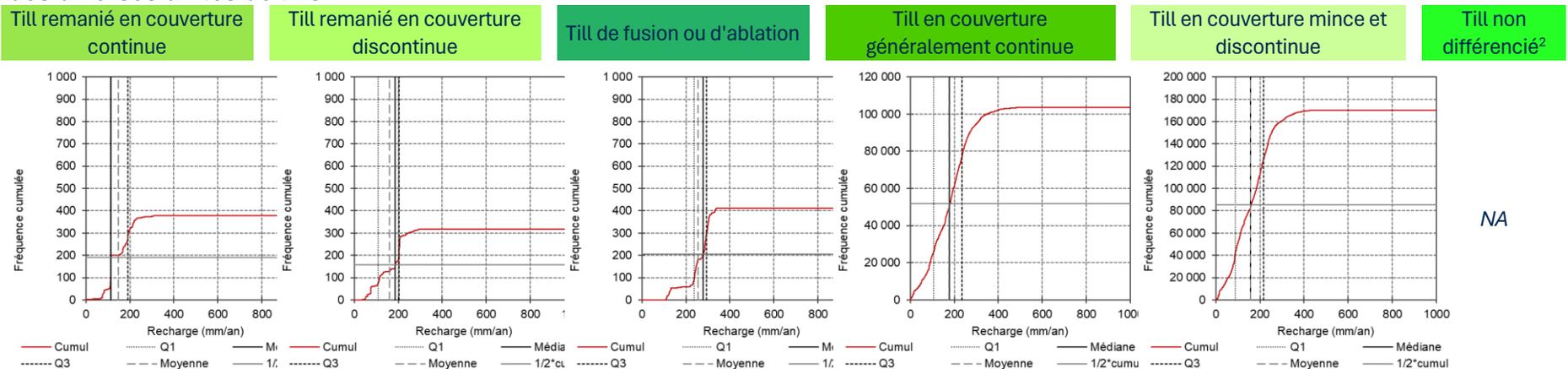
Figure 7 : Diagrammes de cumul du nombre de mailles selon les valeurs de recharge réelle typiquement rencontrées au droit des diverses unités de tills.¹



1 : Le Q1 correspond au 25^e percentile et le Q3 correspond au 75^e percentile ;

2 : Le till non différencié est affiché sur la [figure 6 de l'annexe B](#) car il provient de la carte générale et la distinction entre recharge réelle et potentielle a seulement été appliquée sur la carte détaillée.

Figure 8 : Diagrammes de cumul du nombre de mailles selon les valeurs de recharge potentielle typiquement rencontrées au droit des diverses unités de tills.¹



1 : Le Q1 correspond au 25^e percentile et le Q3 correspond au 75^e percentile ;

2 : Le till non différencié est affiché sur la [figure 6 de l'annexe B](#) car il provient de la carte générale et la distinction entre recharge réelle et potentielle a seulement été appliquée sur la carte détaillée.

Annexe C : Données relatives à la variabilité des niveaux de nappe

Tableau 1 : Caractéristiques (superficie, nombre de mailles, nombre de puits, relief) et statistiques descriptives des normales climatiques (1981-2010) définissant les différents domaines hydroclimatiques (DH) par rapport à l'ensemble du Québec agricole.

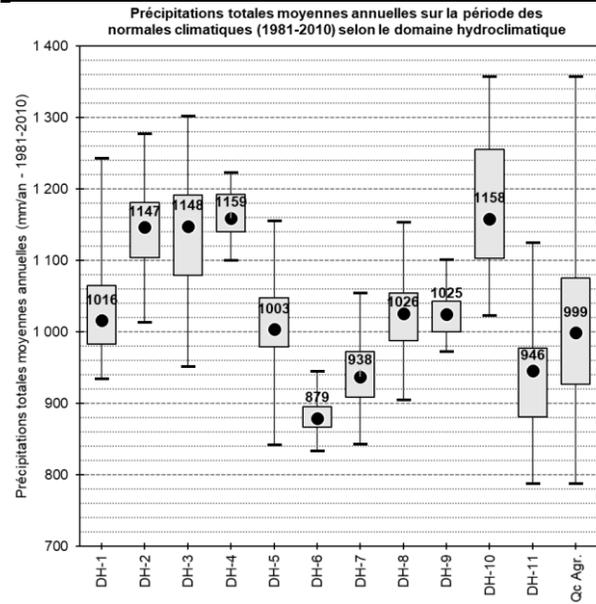
DH ¹	Aire			Grille Info-Climat Mailles ¹	RSESQ Puits ¹	Altitude (m)			Précipitations totales moyennes annuelles (mm/an - 1981-2010)						Températures moyennes annuelles (°C - 1981-2010)					
	km ²	%	km ² (%)			Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Méd.	25°	75°	Moy.	Min.	Max.	Méd.	25°	75°	Moy.
DH-1	12327	8.2	12327 (8.2 %)	145	67	8	204	71	934	1243	1016	983	1065	1030	4.8	7.0	6.3	5.9	6.6	6.2
DH-2	6088	4.0	6088 (4 %)	65	17	42	414	255	1013	1277	1147	1104	1181	1146	3.8	6.9	5.4	5.2	5.7	5.4
DH-3	17482	11.6	17482 (11.6 %)	202	35	26	687	313	951	1302	1148	1079	1192	1137	2.1	5.5	4.3	4.0	4.6	4.3
DH-4	6475	4.3	6475 (4.3 %)	73	12	29	562	308	1100	1223	1159	1140	1192	1163	2.0	5.2	3.5	3.0	4.5	3.7
DH-5	13098	8.7	13098 (8.7 %)	165	17	23	491	263	842	1155	1003	979	1047	1010	1.4	5.1	3.1	2.7	3.4	3.1
DH-6	19396	12.8	19396 (12.8 %)	246	18	202	351	304	833	944	879	867	895	881	0.7	3.7	1.5	1.2	2.0	1.7
DH-7	19611	13.0	19611 (13 %)	230	11	90	491	268	842	1055	938	909	973	938	1.4	5.9	4.2	3.4	4.8	4.0
DH-8	24526	16.2	24526 (16.2 %)	289	14	97	539	357	905	1153	1026	987	1054	1020	1.4	5.7	3.1	2.5	3.9	3.2
DH-9	7037	4.7	7037 (4.7 %)	83	21	9	264	84	972	1101	1025	1000	1043	1024	3.7	6.8	5.7	5.1	6.0	5.5
DH-10	7735	5.1	7735 (5.1 %)	92	14	23	827	275	1023	1357	1158	1103	1255	1180	0.6	5.3	3.6	3.0	4.3	3.5
DH-11	17317	11.5	17317 (11.5 %)	216	17	81	816	251	788	1125	946	881	977	932	-0.2	3.9	2.2	1.8	2.7	2.2
Qc Agr.²	151092	100	151092 (100 %)	1806	243	8	827	267	788	1357	999	927	1075	1012	-0.2	7.0	3.4	2.4	4.6	3.6

1 : Pour les mailles de la grille Info-Climat et les puits du RSESQ, l'information indiquée renseigne sur leur nombre par domaine hydroclimatique (DH) ;

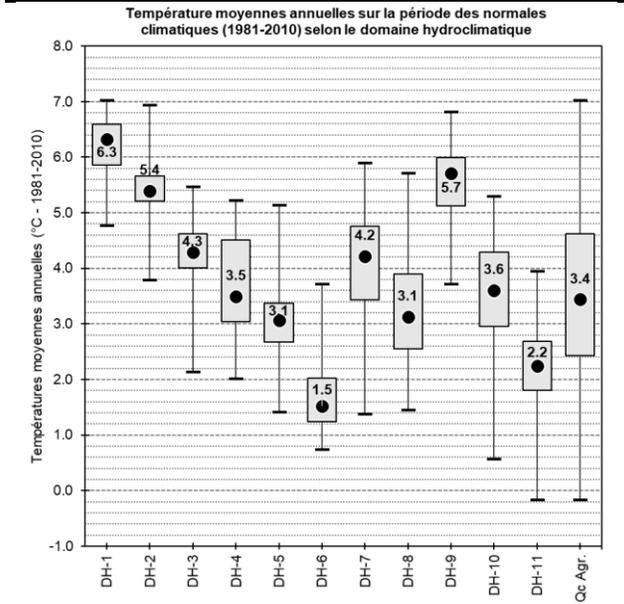
2 : « Qc Agr. » renvoie au territoire couvrant l'ensemble du « Québec agricole ».

Figure 1 : Diagrammes box-plot des normales climatiques (1981-2010) pour les différents DH par rapport à l'ensemble du Québec agricole.

Précipitations totales moyennes annuelles (1981-2010)



Températures moyennes annuelles (1981-2010)



Normales climatiques (1981-2010)

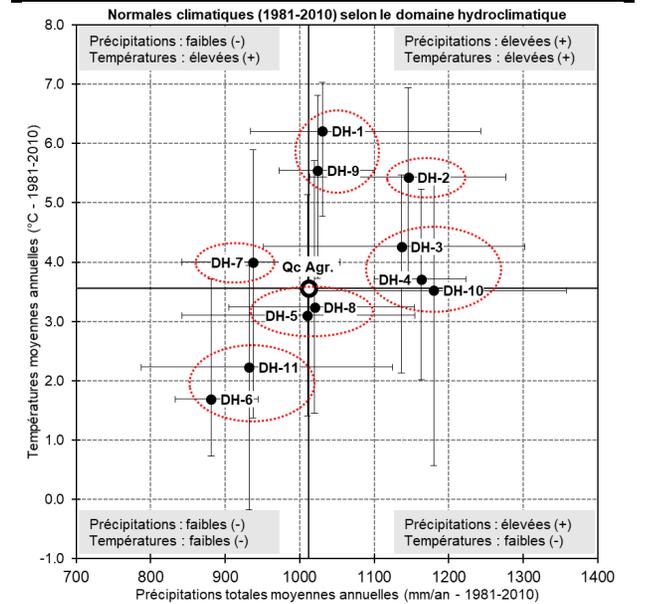


Tableau 2 : Critères appliqués lors de la sélection primaire (A) des puits du RSESQ.

Ordre	Critère	Type	Catégorie	Action
1	Québec agricole	Primaire	En dehors des limites du Québec agricole	Rejeté
			Dans les limites du Québec Agricole	Conservé
2	État	Primaire	Inactif (depuis plus de 10 ans - avant 2011)	Rejeté
			Inactif (depuis moins de 10 ans - après 2011)	Rejeté (avec réserves)
			Actif	Conservé
3	Type d'aquifère	Primaire	Granulaire	Rejeté
			Roc	Conservé
4	Influence	Primaire	Influencé (PACC/INRS/BRF) ¹	Rejeté
			Influencé (MELCCFP) ²	Rejeté (avec réserves)
			Non influencé (MELCCFP) ²	Conservé (avec réserves)
			Non influencé (PACC/INRS/BRF) ¹	Conservé
5	Confinement	Primaire	Captif (PACC/INRS/BRF) ¹	Rejeté
			Captif (MELCCFP) ²	Rejeté (avec réserves)
			Libre ou semi-captif (MELCCFP) ²	Conservé (avec réserves)
			Libre ou semi-captif (PACC/INRS/BRF) ¹	Conservé

1 : La mention « PACC/INRS/BRF » fait référence à l'usage de la BRF (fonction de réponse barométrique) appliquée par Gosselin et al. (2021) ;

2 : La mention « MELCCFP » fait référence aux informations fournies dans la BD du RSESQ extraite de Sardes.

Tableau 3 : Résultats de la sélection primaire (A) des puits du RSESQ.^{1,2}

DH	RSESQ	Sélection A : critères primaires			
	Nombre de puits	Rejeté	Rejeté (avec réserves)	Conservé (avec réserves)	Conservé
DH-1	67	50	6	0	11
DH-2	17	6	0	6	5
DH-3	35	26	2	2	5
DH-4	12	3	5	4	0
DH-5	17	8	1	8	0
DH-6	18	11	6	1	0
DH-7	11	6	2	3	0
DH-8	14	8	2	4	0
DH-9	21	7	8	6	0
DH-10	14	13	1	0	0
DH-11	17	16	1	0	0
Qc Agr.³	243	154	34	34	21

1 : Les puits en **gras** sont ceux retenus pour la sélection secondaire (B) ;

2 : Les puits en **gras et en bordaux** sont ceux retenus, soit ceux sélectionnés pour le DH correspondant ;

3 : « Qc Agr. » renvoie au territoire couvrant l'ensemble du « Québec agricole ».

Tableau 4 : Critères appliqués lors de la sélection secondaire (B) des puits du RSESQ.

Ordre	Critère	Type	Catégorie	Action
6.a ¹	Réactivité vs inertie Niveau de nappe moyen	Secondaire	Nappe profonde (profondeur > 7.3 m)	Rejeté
			Nappe intermédiaire (2.2 m < profondeur < 7.3 m)	Conservé (avec réserves)
			Nappe superficielle (profondeur < 2.2 m)	Conservé
6.b ¹	Réactivité vs inertie Profondeur du puits	Secondaire	Puits profond (profondeur > 53 m)	Rejeté
			Puits sans données de profondeur ³	Rejeté (avec réserves)
			Puits intermédiaire (30 m < profondeur < 53 m)	Conservé (avec réserves)
			Puits peu profond (profondeur < 30 m)	Conservé
6.c ¹	Réactivité vs inertie Altitude du sol	Secondaire	Altitude faible (< 69 m)	Rejeté
			Altitude intermédiaire (69 m < altitude < 196 m)	Conservé (avec réserves)
			Altitude élevée (> 196 m)	Conservé
7 ²	Durée du suivi	Secondaire	Suivi récent (suivi < 5 ans)	Rejeté
			Suivi intermédiaire (5 ans < suivi < 10 ans)	Conservé (avec réserves)
			Suivi ancien (suivi > 10 ans)	Conservé

1 : Se référer au **tableau 5 de l'annexe 5** pour la définition des seuils de profondeur ou d'altitude ;

2 : Les seuils utilisés pour définir les différentes durées de suivi sont basées sur l'expérience ;

3 : Deux puits n'avaient pas de log de forage et donc de données sur leur profondeur.

Tableau 5 : Statistiques descriptives pour les quatre critères retenus lors de la sélection secondaire (B).^{1,2}

Critère	Minimum	25e percentile	Médiane	75e percentile	Maximum	Moyenne
Niveau de nappe moyen (m)	0.6	2.2	3.5	7.3	23.8	5.6
Profondeur du puits (m)	15	30	42	53	104	43
Altitude du sol (m)	2	69	109	196	563	146
Durée du suivi (an)	1.2	9.3	11.5	12.6	47.9	13.2

1 : Les valeurs en **gras** sont celles qui ont été utilisées pour définir les seuils (et les classes) des critères 6.a, 6.b et 6.c du tableau 4 de l'annexe C ;

2 : Les statistiques de ce tableau ont considéré les 46 puits retenus lors de la sélection secondaire (B).

Tableau 6 : Résultats de la sélection secondaire (B) des puits du RSESQ.^{1,2,4}

Domaine hydroclimatique	RSESQ				
	Nombre de puits	Rejeté	Rejeté (avec réserves)	Conservé (avec réserves)	Conservé
DH-1	11	9	0	2	0
DH-2	5	2	0	3	0
DH-3	5	0	0	5	0
DH-4	4	3	0	1	0
DH-5	8	5	1	2	0
DH-6	NA	NA	NA	NA	NA
DH-7	3	2	0	1	0
DH-8	4	4⁵	0	0	0
DH-9	6	4	0	2	0
DH-10	NA	NA	NA	NA	NA
DH-11	NA	NA	NA	NA	NA
Qc Agr.³	46	29	1	16	0

1 : Les puits en **gras** sont ceux retenus pour la sélection tertiaire (C) ;

2 : Les puits en **gras et en bordeaux** sont ceux retenus, soit ceux sélectionnés pour le DH correspondant ;

3 : « Qc Agr. » renvoie au territoire couvrant l'ensemble du « Québec agricole » ;

4 : Les cellules grisées portant la mention « NA » renvoient aux DH pour lesquels un puits a déjà été retenu lors de l'étape de sélection précédente ;

5 : Pour le DH-8, la sélection a dû impliquer de retenir ces quatre puits car ils affichaient tous la mention « rejetés ».

Tableau 7 : Critères appliqués lors de la sélection tertiaire (C) des puits du RSESQ.

Numéro	Critère	Type	Catégorie	Action
8	Analyse superficielle des critères	Tertiaire	-	Rejeté
			-	Conservé
9	Analyse détaillée des critères	Tertiaire	-	Rejeté
			-	Conservé
10	Analyse visuelle de l'hydrogramme	Tertiaire	-	Rejeté
			-	Conservé

Tableau 8 : Résultats de la sélection tertiaire (C) des puits du RSESQ.^{1,2}

Domaine hydroclimatique	RSESQ	Sélection C : critères tertiaires			
	Nombre de puits	Rejeté	Rejeté (avec réserves)	Conservé (avec réserves)	Conservé
DH-1	2	1	0	0	1
DH-2	3	2	0	0	1
DH-3	5	4	0	0	1
DH-4	NA	NA	NA	NA	NA
DH-5	2	1	0	0	1
DH-6	NA	NA	NA	NA	NA
DH-7	NA	NA	NA	NA	NA
DH-8	4	3	0	0	1
DH-9	2	1	0	0	1
DH-10	NA	NA	NA	NA	NA
DH-11	NA	NA	NA	NA	NA
Qc Agr. ³	18	12	0	0	6

1 : Les puits en **gras et en bordeaux** sont ceux retenus, soit ceux sélectionnés pour le DH correspondant ;

2 : Les cellules grisées portant la mention « NA » renvoient aux DH pour lesquels un puits à déjà été retenu lors des étapes de sélection précédentes ;

3 : « Qc Agr. » renvoie au territoire couvrant l'ensemble du « Québec agricole ».

Tableau 9 : Liste des 11 puits de référence retenus à la suite du travail de sélection des puits du RSESQ.¹

ID du puits	Latitude	Longitude	X (Nad83QL) ¹	Y (Nad83QL) ¹	Nom du puits	Municipalité	DH	Sélection
03030008	45.45351	-73.04992	-356076	173306	PO-19	Rougemont	DH-1	Sélection C Critères tertiaires
03040015	45.35453	-72.30305	-298272	158894	PO-24	Eastman	DH-2	Sélection C Critères tertiaires
02340005	46.40819	-70.37099	-143731	269989	Sainte-Justine	Sainte-Justine	DH-3	Sélection C Critères tertiaires
02330003	46.61661	-70.94719	-187188	294456	Saint-Anselme	Saint-Anselme	DH-4	Sélection B Critères secondaires
02200001	48.20282	-68.52795	-2070	467155	Réserve de Duchénier	Saint-Narcisse-de-Rimouski	DH-5	Sélection C Critères tertiaires
04300003	46.87612	-79.23291	-813753	381202	Pointe-Antoine	Témiscaming	DH-6	Sélection A Critères primaires
04080001	45.55226	-75.77693	-567778	201862	Cantley	Cantley	DH-7	Sélection B Critères secondaires
04010003	45.90068	-74.25528	-446230	229669	Morin-Heights	Morin-Heights	DH-8	Sélection C Critères tertiaires
04640001	45.71087	-73.94903	-424137	206766	00_CSP-F1	Mirabel	DH-9	Sélection C Critères tertiaires
05030001	46.61505	-72.38830	-297342	299162	Saint-Stanislas	Saint-Stanislas	DH-10	Sélection A Critères primaires
06190001	48.63807	-72.43073	-288270	523273	Saint-Félicien	Saint-Félicien	DH-11	Sélection A Critères primaires

1 : Les coordonnées affichées sont en Québec Lambert Nad 1983.

Tableau 10 : Liste des 11 puits de référence retenus à la suite du travail de sélection des puits du RSESQ et les critères associés de la sélection primaire (A).

ID Puits	Sélection	Primaire (A)															
	Critère	1			2			3		4				5			
		Québec agricole			État			Type d'aquifère		Influence				Confinement			
DH	DH	Cat. ¹	Active	Dernière date	Cat. ¹	Aquifère	Cat. ¹	Influence (MELCCFP)	Influence (PACC/INRS/BRF)	Influence	Cat. ¹	Confinement (MELCCFP)	Confinement (PACC/INRS/BRF)	Confinement	Cat. ¹		
03030008	DH-1	DH-1	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2022-11-14	Actif	ROC	Roc	Non	Non	Non (PACC/INRS/BRF)	Non influencé (PACC/INRS/BRF)	Semi-captive	Libre	Libre (PACC/INRS/BRF)	Libre ou semi-captif (PACC/INRS/BRF)	
03040015	DH-2	DH-2	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2023-05-01	Actif	ROC	Roc	Non	Non	Non (PACC/INRS/BRF)	Non influencé (PACC/INRS/BRF)	Captive	Libre	Libre (PACC/INRS/BRF)	Libre ou semi-captif (PACC/INRS/BRF)	
02340005	DH-3	DH-3	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2023-05-08	Actif	ROC	Roc	Non	Non	Non (PACC/INRS/BRF)	Non influencé (PACC/INRS/BRF)	Captive	Libre	Libre (PACC/INRS/BRF)	Libre ou semi-captif (PACC/INRS/BRF)	
02330003	DH-4	DH-4	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2023-05-05	Actif	ROC	Roc	Non	N/A	Non (MELCCFP)	Non influencé (MELCCFP)	Libre	N/A	Libre (MELCCFP)	Libre ou semi-captif (MELCCFP)	
02200001	DH-5	DH-5	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2022-11-01	Actif	ROC	Roc	Non	N/A	Non (MELCCFP)	Non influencé (MELCCFP)	Libre	N/A	Libre (MELCCFP)	Libre ou semi-captif (MELCCFP)	
04300003	DH-6	DH-6	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2022-10-26	Actif	ROC	Roc	Non	N/A	Non (MELCCFP)	Non influencé (MELCCFP)	Libre	N/A	Libre (MELCCFP)	Libre ou semi-captif (MELCCFP)	
04080001	DH-7	DH-7	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2022-10-27	Actif	ROC	Roc	Non	N/A	Non (MELCCFP)	Non influencé (MELCCFP)	Libre	N/A	Libre (MELCCFP)	Libre ou semi-captif (MELCCFP)	
04010003	DH-8	DH-8	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2022-11-08	Actif	ROC	Roc	Non	N/A	Non (MELCCFP)	Non influencé (MELCCFP)	Libre	N/A	Libre (MELCCFP)	Libre ou semi-captif (MELCCFP)	
04640001	DH-9	DH-9	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2022-11-09	Actif	ROC	Roc	Non	N/A	Non (MELCCFP)	Non influencé (MELCCFP)	Libre	N/A	Libre (MELCCFP)	Libre ou semi-captif (MELCCFP)	
05030001	DH-10	DH-10	Dans les limites du Québec Agricole	Non	2020-05-14	Inactif (depuis moins de 10 ans - après 2011)	ROC	Roc	Non	N/A	Non (MELCCFP)	Non influencé (MELCCFP)	Captive	N/A	Captive (MELCCFP)	Captif (MELCCFP)	
06190001	DH-11	DH-11	Dans les limites du Québec Agricole	Oui	2022-07-26	Actif	ROC	Roc	Non	N/A	Non (MELCCFP)	Non influencé (MELCCFP)	Captive	N/A	Captive (MELCCFP)	Captif (MELCCFP)	

1 : « Cat. » renvoie à « Catégorie ».

Tableau 11 : Liste des 11 puits de référence retenus à la suite du travail de sélection des puits du RSESQ et les critères associés de la sélection secondaire (B).

ID Puits	Sélection	Secondaire (B)							
	Critère	6.a		6.b		6.c		7	
		Réactivité vs inertie - Niveau de nappe moyen		Réactivité vs inertie - Profondeur du puits		Réactivité vs inertie - Altitude du sol		Durée du suivi ²	
DH	Niveau moyen (m)	Cat. ¹	Profondeur du puits (m)	Cat. ¹	Altitude du sol (m)	Cat. ¹	Durée du suivi (an)	Cat. ¹	
03030008	DH-1	2.9	Nappe intermédiaire (2.2 m < profondeur < 7.3 m)	30.5	Puits intermédiaire (30 m < profondeur < 53 m)	130.0	Altitude intermédiaire (69 m < altitude < 196 m)	11.8	Suivi ancien (suivi > 10 ans)
03040015	DH-2	2.1	Nappe superficielle (profondeur < 2.2 m)	30.5	Puits intermédiaire (30 m < profondeur < 53 m)	251.0	Altitude élevée (> 196 m)	12.4	Suivi ancien (suivi > 10 ans)
02340005	DH-3	7.0	Nappe intermédiaire (2.2 m < profondeur < 7.3 m)	15.0	Puits peu profond (profondeur < 30 m)	401.0	Altitude élevée (> 196 m)	12.6	Suivi ancien (suivi > 10 ans)
02330003	DH-4	6.2	Nappe intermédiaire (2.2 m < profondeur < 7.3 m)	33.0	Puits intermédiaire (30 m < profondeur < 53 m)	172.1	Altitude intermédiaire (69 m < altitude < 196 m)	9.6	Suivi intermédiaire (5 ans < suivi < 10 ans)
02200001	DH-5	1.5	Nappe superficielle (profondeur < 2.2 m)	17.7	Puits peu profond (profondeur < 30 m)	168.0	Altitude intermédiaire (69 m < altitude < 196 m)	13.3	Suivi ancien (suivi > 10 ans)
04300003	DH-6	38.4	Nappe profonde (profondeur > 7.3 m)	48.8	Puits intermédiaire (30 m < profondeur < 53 m)	260.0	Altitude élevée (> 196 m)	13.5	Suivi ancien (suivi > 10 ans)
04080001	DH-7	6.6	Nappe intermédiaire (2.2 m < profondeur < 7.3 m)	42.1	Puits intermédiaire (30 m < profondeur < 53 m)	196.0	Altitude intermédiaire (69 m < altitude < 196 m)	10.9	Suivi ancien (suivi > 10 ans)
04010003	DH-8	5.2	Nappe intermédiaire (2.2 m < profondeur < 7.3 m)	24.4	Puits peu profond (profondeur < 30 m)	243.0	Altitude élevée (> 196 m)	3.2	Suivi récent (suivi < 5 ans)
04640001	DH-9	4.7	Nappe intermédiaire (2.2 m < profondeur < 7.3 m)	42.7	Puits intermédiaire (30 m < profondeur < 53 m)	69.7	Altitude intermédiaire (69 m < altitude < 196 m)	16.2	Suivi ancien (suivi > 10 ans)
05030001	DH-10	6.8	Nappe intermédiaire (2.2 m < profondeur < 7.3 m)	61.0	Puits profond (profondeur > 53 m)	104.5	Altitude intermédiaire (69 m < altitude < 196 m)	5.7	Suivi intermédiaire (5 ans < suivi < 10 ans)
06190001	DH-11	1.0	Nappe superficielle (profondeur < 2.2 m)	29.9	Puits peu profond (profondeur < 30 m)	109.0	Altitude intermédiaire (69 m < altitude < 196 m)	11.8	Suivi ancien (suivi > 10 ans)

1 : « Cat. » renvoie à « Catégorie » ;

2 : La durée du suivi considère comme fin la date de la dernière relève des sondes pressiométriques dans les puits du RSESQ soit celle du printemps 2023.

Tableau 12 : Liste des quatre puits présentant des données aberrantes sur leur hydrogramme.

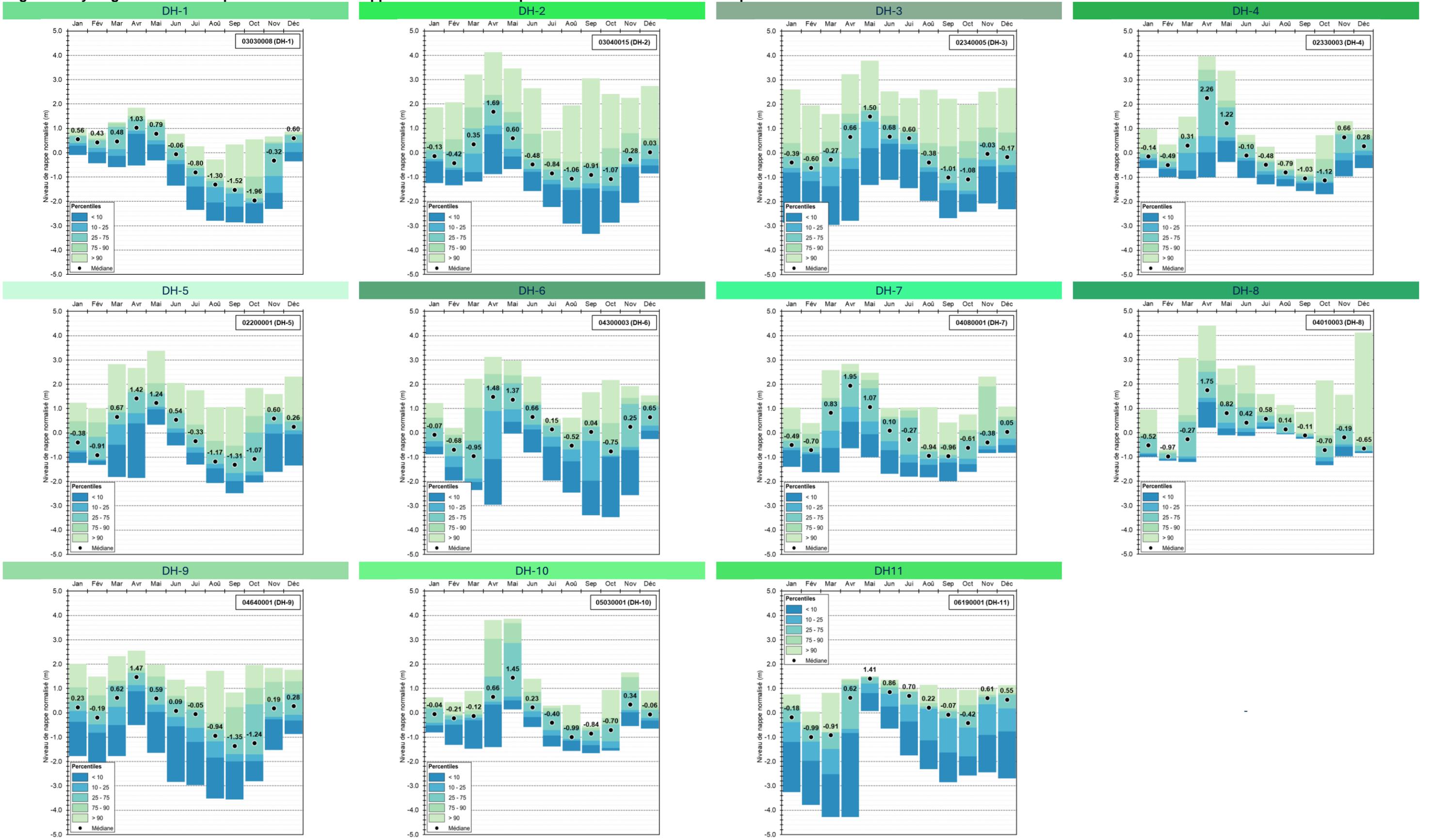
Domaine hydroclimatique	DH-2	DH-6	DH-7	DH-8
Puits de référence	03040015	04300003	04080001	04010003
Valeurs supprimées (nombre)	6	22 258	227	6
Données totales du suivi (nombre)	66 024	53 399	61 841	29 846
Ratio de valeurs supprimées (%)	0.0091%	41.6824%	0.3671%	0.0201%

Tableau 13 : Niveaux de nappe normalisés associés à chaque DH.¹

Mois	DH-1	DH-2	DH-3	DH-4	DH-5	DH-6	DH-7	DH-8	DH-9	DH-10	DH-11
Janvier	0.56	-0.13	-0.39	-0.14	-0.38	-0.07	-0.49	-0.52	0.23	-0.04	-0.18
Février	0.43	-0.42	-0.60	-0.49	-0.91	-0.68	-0.70	-0.97	-0.19	-0.21	-0.99
Mars	0.48	0.35	-0.27	0.31	0.67	-0.95	0.83	-0.27	0.62	-0.12	-0.91
Avril	1.03	1.69	0.66	2.26	1.42	1.48	1.95	1.75	1.47	0.66	0.62
Mai	0.79	0.60	1.50	1.22	1.24	1.37	1.07	0.82	0.59	1.45	1.41
Juin	-0.06	-0.48	0.68	-0.10	0.54	0.66	0.10	0.42	0.09	0.23	0.86
Juillet	-0.80	-0.84	0.60	-0.48	-0.33	0.15	-0.27	0.58	-0.05	-0.40	0.70
Août	-1.30	-1.06	-0.38	-0.79	-1.17	-0.52	-0.94	0.14	-0.94	-0.99	0.22
Septembre	-1.52	-0.91	-1.01	-1.03	-1.31	0.04	-0.96	-0.11	-1.35	-0.84	-0.07
Octobre	-1.96	-1.07	-1.08	-1.12	-1.07	-0.75	-0.61	-0.70	-1.24	-0.70	-0.42
Novembre	-0.32	-0.28	-0.03	0.66	0.60	0.25	-0.38	-0.19	0.19	0.34	0.61
Décembre	0.60	0.03	-0.17	0.28	0.26	0.65	0.05	-0.65	0.28	-0.06	0.55
Puits	03030008	03040015	02340005	02330003	02200001	04300003	04080001	04010003	04640001	05030001	06190001

¹ : Les valeurs indiquées correspondent à la médiane des niveaux de nappe mensuels normalisés pour chaque puits de référence (un puits par domaine hydroclimatique). Ces valeurs sont aussi affichées sur les graphes de la figure 2 de l'annexe C et représentées par un point noir.

Figure 2 : Hydrogrammes statistiques des niveaux de nappe normalisés des 11 puits de référence associés à chaque DH.



Annexe D : Données relatives à la recharge en climat futur

Tableau 1 : Synthèse par domaine hydroclimatique (DH) des informations tirées des fiches synthèses régionales d'adaptation aux changements climatiques (Ouranos, 2020).^{1,2,3,4}

DH	Précipitations			Températures	Périodes de gel-dégel	
	Liquides (pluie) - mm	Solides (neige) - mm	Totales - mm	Moyenne annuelle - °C	Redoux en hiver - Nb	Degré-jours de gel - DJG
DH-1	849 939 (+90 mm +11%)	211 183 (-27 mm -13%)	1060 1123 (+63 mm +6%)	6.0 8.4 (+2.4°C)	26 28 (+2 +9%)	950 684 (-266 -28%)
DH-2	894 984 (+90 mm +10%)	266 233 (-32 mm -12%)	1160 1217 (+58 mm +5%)	4.8 7.2 (+2.4°C)	23 27 (+4 +16%)	1051 765 (-285 -27%)
DH-3	860 950 (+90 mm +11%)	268 237 (-31 mm -12%)	1128 1187 (+59 mm +5%)	4.5 6.9 (+2.4°C)	20 24 (+4 +18%)	1124 826 (-298 -26%)
DH-4	841 933 (+92 mm +11%)	288 258 (-30 mm -10%)	1129 1191 (+62 mm +5%)	3.9 6.2 (+2.3°C)	18 21 (+4 +23%)	1220 907 (-312 -26%)
DH-5	748 837 (+89 mm +12%)	319 287 (-32 mm -10%)	1066 1124 (+58 mm +5%)	2.9 5.1 (+2.2°C)	13 18 (+5 +36%)	1342 1047 (-295 -22%)
DH-6	673 732 (+59 mm +9%)	241 230 (-12 mm -5%)	914 962 (+47 mm +5%)	2.1 4.6 (+2.5°C)	12 15 (+3 +27%)	1671 1296 (-375 -22%)
DH-7	732 801 (+69 mm +9%)	245 226 (-19 mm -8%)	978 1027 (+50 mm +5%)	3.6 6.0 (+2.4°C)	18 21 (+4 +21%)	1359 1033 (-327 -24%)
DH-8	750 822 (+72 mm +10%)	260 242 (-18 mm -7%)	1010 1064 (+54 mm +5%)	3.0 5.5 (+2.4°C)	16 20 (+4 +25%)	1446 1108 (-338 -23%)
DH-9	734 807 (+73 mm +10%)	245 226 (-19 mm -8%)	979 1034 (+54 mm +6%)	3.3 5.6 (+2.3°C)	16 20 (+4 +22%)	1334 1018 (-316 -24%)
DH-10	812 902 (+90 mm +11%)	349 337 (-12 mm -4%)	1161 1239 (+78 mm +7%)	2.0 4.4 (+2.4°C)	12 15 (+4 +31%)	1570 1245 (-326 -21%)
DH-11	625 684 (+59 mm +9%)	273 261 (-12 mm -5%)	898 944 (+47 mm +5%)	0.2 2.2 (+2.0°C)	6 8 (+2 +37%)	1761 1464 (-297 -17%)

1 : Les informations extraites sont celles de l'horizon proche (2041-2070) pour un scénario d'émission modéré des GES (RCP 4.5) qui sont comparées à la période de référence (1981-2010) ;

2 : Le calcul de ces valeurs a été fait en considérant le ratio du territoire de chaque région administrative recoupant l'un ou l'autre des domaines hydroclimatiques (ex. si un DH est recoupé à 25% par l'Estrie et à 75% par la Montérégie, alors la température moyenne annuelle a été approchée selon la formule suivante : $25\% \cdot T_{\text{Estrie}} + 75\% \cdot T_{\text{Montérégie}} = T_{\text{DH}}$) ;

3 : Dans le tableau, l'affichage est le suivant : "valeur de référence | valeur dans le futur (tendance en valeur absolue | tendance exprimée en pourcentage)". Il est similaire aux divers paramètres ;

4 : D'autres paramètres clés sont disponibles directement dans les fiches (<https://www.mamh.gouv.qc.ca/amenagement-du-territoire/lutte-contre-les-changements-climatiques/fiches-syntheses-regionales-dadaptation-aux-changements-climatiques/>)