

Évolution des sécheresses hydrologiques dans le Québec méridional face aux changements climatiques

Rapport final

Octobre 2025

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Gabriel Bastien-Beaudet, Université du Québec en Outaouais

Audrey Maheu, Université du Québec en Outaouais

Cha Zhao, Université Laval

Marc-André Bourgault, Université Laval

MISE EN PAGE :

Gabriel Bastien-Beaudet, Université du Québec en Outaouais

Titre du projet Ouranos : Évolution des sécheresses hydrologiques dans le Québec méridional face aux changements climatiques

Numéro du projet Ouranos : 71 0800



ISFORT



Remerciements

Ce projet a été financé par Ouranos, via le Plan pour une économie verte du gouvernement du Québec (Évolution des sécheresses hydrologiques dans le Québec méridional face aux changements climatiques, 71 0800) et par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG, subvention Découverte accordée à A. Maheu, RGPIN-2018-04199).

Les auteurs tiennent à remercier le comité de suivi composé de Richard Turcotte, Daniel Nadeau, Alexis Berg, Anne Blondlot, Laurent DaSilva et Sylvestre Delmotte, ainsi que tous autres participants aux réunions de suivis, pour leurs avis, commentaires et suggestions tous au long du projet. Additionnement, ils remercient Gabriel Rondeau-Genesse et Éric Dupuis, spécialistes des scénarios et des services climatiques chez Ouranos, spécifiquement pour leur aide et conseil concernant les données de projection climatiques. Finalement, ils remercient Dr Cecilia Svensson, chercheur retraité du Centre for Ecology & Hydrology du Royaume-Uni, pour avoir généreusement partagé ses scripts R permettant d'intégrer la distribution de Tweedie dans l'ajustement des indices standardisés.



Disponibilité des données

Les données nécessaires à la reproduction des résultats et des analyses de ce projet seront publiquement disponibles lors de la publication d'articles scientifiques présentement en écriture. Elles sont néanmoins disponibles sur demande d'ici la publication de ceux-ci.

Les résultats de cette étude ont été produits à partir de données brutes de sources multiples :

- Les données de débit de rivière proviennent de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP, 2023a).
- Les données de niveaux de nappes proviennent du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (MELCCFP, 2023b).
- Les données de délimitation des bassins versants québécois ont été récoltées de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (MRNF, 2019a).
- Les données de couvert forestier sont issues de Forêt Ouverte (MRNF, 2019b).
- Les données météorologiques en climat historiques proviennent du produit de réanalyse ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al 2021).
- Les données météorologiques en projection climatique sont issues du produit NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections version 1.2 (NEX-GDDP-CMIP6 ; Thrasher et al 2022). Celles-ci ont été dérivées des simulations du modèle de circulation générale (GCM) réalisées dans le cadre du projet d'intercomparaison des modèles couplés, phase 6 (CMIP6 ; Eyring et al 2016).

Tout le traitement et l'analyse des données ont été réalisés à l'aide du logiciel R, version 4.3.1 (R Core Team, 2016), en utilisant les bibliothèques spécifiées dans les sections « Méthodologie » et « Références », ainsi qu'avec le logiciel Python. Toutes les figures ont été produites à l'aide de la librairie « ggplot2 », version 3.5.1 (Wickham et coll., 2016), disponible sous licence MIT, ainsi que des librairies propres à Python.



Résumé

Le projet « Évolution des sécheresses hydrologiques dans le Québec méridional face aux changements climatiques » d'Ouranos brosse un portrait intégré des sécheresses hydrologiques et hydrogéologiques au Québec méridional entre 1970 et 2022, et évalue leur évolution potentielle sous climat futur (2070-2100). Dans le cadre de ce projet, une sécheresse a été définie comme des conditions (e.g. débit de rivière, niveau de nappe, précipitation) largement inférieures à la moyenne historique (1970-2022), ce qui la distingue des étiages en ce qu'elle peut se produire à n'importe quelle période de l'année. Les analyses produites reposent sur des séries de débit de rivière et de niveaux nappes souterraines, jumelées à des indices météorologiques intégrant précipitations, évapotranspiration et neige.

Les résultats ont montré une forte variabilité spatiale et temporelle des sécheresses, avec certains événements demeurant localisés, et d'autres couvrent plus de 90 % du bassin versant. Une seule station hydrométrique ne permet souvent pas de détecter toutes les sécheresses dans un bassin versant donné, soulignant la nécessité de réseaux d'observation denses. Les sécheresses hydrogéologiques se sont avérées plus synchronisées, en particulier pendant les épisodes importants, comme celui de 2021.

La moitié des sécheresses hydrologiques (54 %) se sont vues attribuées aux processus neigeux (l'accumulation et la fonte des neiges), ce qui place ces derniers au cœur des dynamiques de sécheresse au Québec. Les indices intégrant la neige et l'évapotranspiration ont présenté les corrélations les plus fortes avec les débits et ont reproduit efficacement la propagation des périodes sèches vers les sécheresses hydrologiques. Les résultats ont montré qu'une augmentation d'un écart-type de la sévérité des conditions sèches multiplie par cinq la probabilité de déclenchement d'une sécheresse hydrologique.

Les projections climatiques ont indiqué un avenir paradoxal. Bien que les conditions moyennes tendent vers une augmentation des précipitations totales, les conditions extrêmes sèches s'intensifieront, avec des sécheresses plus courtes, mais plus fréquentes et intenses, surtout au printemps et à l'été. Les processus derrière ces relations varient en fonction de la saison, par exemple, une fonte trop hâtive de la neige au printemps et une évapotranspiration accrue durant l'été. De plus, bien que la majorité de l'augmentation des précipitations soit prédite en hiver, la capacité de stockage d'eau sous forme de neige sera compromise par une augmentation de la température moyenne durant cette saison.

Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer la dynamique nivale et la saisonnalité dans la surveillance et la gestion de l'eau au Québec afin d'adapter les stratégies de résilience aux changements climatiques.

Lexique

Terme	Définition
Conditions météorologiques/hydrologiques/hydrogéologique	Déviations de la moyenne de la période considérée, d'une variable météorologique, hydrologique ou hydrogéologique d'intérêt, par exemple les précipitations, le débit ou les niveaux de nappe.
Déficit	Une quantité inférieure à la moyenne de la période étudiée.
Délai de propagation	Représente la période de réaction d'un système hydrologique (rivière, aquifère) aux conditions météorologiques. Par exemple, un délai de 3 mois signifie qu'un système réagit aux variations météorologiques des 3 mois précédents.
Excédent	Une quantité supérieure à la moyenne de la période étudiée.
Indice normalisé/standardisé	Un indice représente, pour un mois donné, le nombre d'écart-types de déviation par rapport à la moyenne de la période considérée, pour une variable d'intérêt.
Période d'accumulation	Une période d'accumulation signifie qu'une moyenne mobile par en arrière a été appliquée sur les indices normalisés. Elle permet d'évaluer les tendances pour une période d'intérêt, par exemple, une période d'accumulation de 3 mois permet d'évaluer les tendances saisonnières.
Période sèche	Période où les conditions météorologiques concernées (par exemple, les précipitations totales) sont sous la moyenne de la période considérée par l'entremise des indices météorologiques. Plus spécifiquement, période où les indices sont négatifs.
Sécheresse	Conditions météorologiques/hydrologiques/hydrogéologiques largement en deçà de la moyenne de la période considérée. Plus précisément, une sécheresse se définit comme une quantité plus petite que 1,5 écart-type de déviation de la moyenne de la période considérée.
Sécheresse hydrogéologique	Sécheresse identifiée dans les chroniques de niveaux de nappe, par l'entremise de l'indice SGI.
Sécheresse hydrologique	Sécheresse identifiée dans les séries temporelles de débit de rivière, par l'entremise de l'indice SSI.
Sécheresse météorologique	Sécheresse identifiée dans des variables météorologiques telles que les précipitations, par l'entremise des indices météorologiques (SPI, SPEI, SMRI, SWBI).
Seuil d'apparition	Valeur d'indice à partir duquel les caractéristiques des sécheresses sont calculées. Par exemple, un seuil de zéro signifie que la durée et la sévérité d'une sécheresse sont calculées à partir du moment où l'indice passe sous zéro, jusqu'à ce qu'il remonte par-dessus zéro.
Seuil de sévérité	Valeur d'indice à partir duquel une sécheresse est identifiée. Par exemple, un seuil de sévérité de -1,5 signifie qu'une sécheresse est identifiée seulement lorsqu'une série d'indices négatifs atteint au moins une fois -1.5.
Taux d'appariement	Ratio entre le nombre de sécheresses hydrologiques et le nombre de périodes sèches identifiées pour la période considérée. Qualifie la sensibilité d'une rivière aux conditions météorologiques.
Taux de correspondance	Ratio entre le nombre de sécheresses hydrogéologiques ayant été déclenchée par des conditions météorologiques sous la normale et le nombre total de sécheresses hydrogéologiques. Renseigne sur la sensibilité d'un aquifère aux conditions météorologiques.
Taux de propagation	La proportion de périodes sèches ayant déclenché une sécheresse hydrologique. Qualifie la sensibilité d'une rivière aux conditions météorologiques.

Table des matières

Remerciements	2
Disponibilité des données	3
Résumé	4
Lexique	5
1. Introduction	9
2. Méthodologie	11
2.1 Données pour caractérisation des niveaux historiques d'eau de surface	11
2.2 Données pour caractérisation des niveaux historiques d'eau souterraine	12
2.3 Données pour caractérisation du climat historique (1970 – 2020)	13
2.4 Données pour caractérisation du climat futur (2020 – 2100)	13
2.5 Identification des sécheresses à partir d'indices normalisés	13
2.5.1 Ajustement des distributions pour l'ensemble des indices	16
2.5.2 Intégration spatiale et temporelle des indicateurs normalisés	16
2.6 Corrélation entre les indices normalisés	17
2.7 Identification des événements de sécheresse	17
2.8 Caractérisation des événements de sécheresse	18
2.8.1 Appariement des sécheresses météorologiques et hydrologiques	18
2.8.2 Appariement des sécheresses météorologiques et hydrogéologiques	19
2.8.3 Modification du début et de la fin des événements météorologiques	20
2.9 Analyses	21
2.9.1 Caractérisation des sécheresses	21
2.9.2 Analyses de sensibilité de la détection des sécheresses	21
2.9.3 Classification des sécheresses.....	23
2.9.4 Propagation des conditions météorologiques en sécheresses.....	24
2.9.5 Changements projetés pour les indices météorologiques en climat futur.....	27
3. Résultats Objectif 1 : Identifier et caractériser les événements de sécheresse hydrologique et hydrogéologique	29
3.1 Description statistique des caractéristiques des sécheresses hydrologiques sévères	29
3.2 L'étendue spatiale de la sécheresse hydrologique varie considérablement d'un événement à l'autre.	29
3.3 Les événements de sécheresse hydrologique avec une grande étendue spatiale sont plus sévères que les événements localisés.	30
3.4 L'étendue temporelle et spatiale des sécheresses hydrogéologiques.....	31
3.5 Variation saisonnière des sécheresses hydrogéologiques	32
3.6 Description statistique des sécheresses hydrogéologiques.....	33
3.7 Cartographie de la sévérité des sécheresses hydrogéologiques.....	34
3.8 Détection des événements de sécheresse hydrologiques à partir d'une analyse de sensibilité.....	34

OBJECTIF 1 – PRINCIPALES CONCLUSIONS	37
4. Résultats Objectif 2 : Identifier les déterminants météorologiques des sécheresses hydrologiques	38
4.1 Les sécheresses associées aux eaux de surface	38
4.1.1 Plus de la moitié des sécheresses hydrologiques sont classées comme reliées à la neige.	38
4.1.2 Les indices météorologiques considérant la neige sont fortement corrélés au débit.	39
4.1.3 Les indices météorologiques considérant la neige décrivent bien la propagation de sécheresse météorologique à hydrologique.	42
4.1.4 Probabilité de propagation des sécheresses météorologiques vers des sécheresses hydrologiques selon le SWBI	43
4.2 Les sécheresses associées aux eaux souterraines	45
4.2.1 Effet de la période d'accumulation sur les corrélations entre SMI et SGI	45
4.2.2 Corrélation croisée entre SMI et SGI.....	46
4.2.3 Évolution temporelle des sécheresses hydrogéologiques.....	49
4.2.4 Caractéristiques des événements de sécheresse couplés et non couplés	50
OBJECTIF 2 – PRINCIPALES CONCLUSIONS	52
5. Résultats Objectif 3 : Quantifier la prévalence des événements météorologiques pouvant entraîner des événements de sécheresse hydrologique en climat futur	53
5.1 Tendances annuelles vers des conditions plus humides en climat futur selon les indices météorologiques normalisés	53
5.2 Tendances saisonnières variables en climat futur selon les indices météorologiques normalisés ...	54
5.3 Occurrence variable des conditions sévères sèches ou humides en climat futur selon les indices météorologiques normalisés	57
5.4 Projections vers des sécheresses météorologiques plus courtes, mais plus fréquentes et plus intenses en climat futur	60
5.5 Analyse de l'occurrence de sécheresse connue en climat futur	62
OBJECTIF 3 – PRINCIPALES CONCLUSIONS	66
6. Discussion	67
6.1. Utilisation des indices standardisés pour l'étude et la gestion des sécheresses	67
6.2. Considérations méthodologiques pour l'utilisation des indices standardisés.....	68
6.3. Au-delà de l'étiage : une vision annuelle des sécheresses.....	70
6.4. Seuils de sécheresse et implications pour la gestion	71
7. Conclusion.....	72
8. Références.....	74
9. Liste des figures.....	81
9. Liste des tableaux.....	86
Annexe A : Pseudo-code du modèle de neige simplifié à partir du module neige du modèle hydrologique HBV-EC	88
Annexe B – Calcul de l'évapotranspiration potentielle avec l'équation de Priestley-Taylor.....	89

Annexe C – Résultats de l'objectif 3 (section 5) avec le scénario d'émission SSP2-4.5 91

1. Introduction

L'eau est une ressource indispensable et, historiquement, sa disponibilité a rarement été compromise au Québec. Néanmoins, dans un contexte de changements climatiques et de pressions anthropiques grandissantes sur les ressources, sa disponibilité pourrait devenir un enjeu plus important. En effet, malgré une augmentation projetée des précipitations totales annuelles, le sud du Québec pourrait connaître des risques accrus de sécheresses hydrologiques (MELCCFP, 2023). Une sécheresse désigne ici une période au cours de laquelle les niveaux d'eau de surface ou souterraine sont largement inférieurs à la moyenne à long terme (1970-2022), ce qui la distingue des étiages en ce qu'elle peut se produire à n'importe quelle période de l'année. À titre d'exemple, lorsqu'une sécheresse hydrologique se produit en mai, il peut y avoir beaucoup d'eau dans la rivière en absolu, mais ce débit est très inférieur aux débits moyens des mois de mai de la période 1970-2022.

Lorsque ces événements coïncident avec des périodes de faible niveau d'eau, ils peuvent avoir des conséquences importantes, notamment des restrictions de l'approvisionnement en eau potable (Wang et al 2022), des perturbations de la navigation fluviale, des pertes économiques pour l'industrie récréative (Wlostowski et al 2022) ainsi que des impacts sur la qualité de l'eau (Mosley 2015) et la santé de l'écosystème (Bond et al 2008). Depuis les années 2000, plusieurs sécheresses hydrologiques ont touché le Québec méridional et ont causé des ruptures dans l'approvisionnement en eau potable de plusieurs municipalités (e.g. rivière des Mille-Îles en 2001). Elles ont aussi entraîné l'assèchement de puits de surface (e.g. Estrie, 2021), mené à des restrictions à la pêche sportive et entraîné d'importants événements de mortalité de la faune aquatique (e.g. carpes dans le fleuve Saint-Laurent en 2001, Mingelbier et al 2001).

En dehors des périodes de faible débit, les sécheresses hydrologiques peuvent également poser des problèmes majeurs dans la gestion des réservoirs (Simeone et al 2024) ainsi qu'affecter les organismes aquatiques dont les cycles de vie sont étroitement liés au régime hydrologique (Lytle et Poff 2004). Les sécheresses hydrologiques peuvent compromettre de manière importante la production d'hydroélectricité (e.g. Lac-St-Jean, 2010). La production d'énergie thermoélectrique peut aussi être amenée à être limitée face à un manque d'eau de refroidissement (Van Vliet et al 2016, Wan et al 2021).

Comprendre les déterminants météorologiques des sécheresses hydrologiques et examiner la prévalence de telles conditions dans le futur apparaissent comme des priorités pour sécuriser les sources d'approvisionnement en eau de plusieurs régions du Québec, en plus de favoriser l'adaptation de notre société aux conséquences des changements climatiques. Un tel exercice a été entrepris par de nombreuses régions à travers le monde, y compris des pays nordiques, comme la Suède qui ont accès, comme le Québec, à d'importantes ressources en eau (Teutschbein et al 2022).

Ce projet vise donc à brosser un portrait général des épisodes de sécheresse hydrologique (eau de surface et eau souterraine) au Québec méridional dans un contexte de climat en évolution. Il se divise en trois objectifs :

- **Objectif 1** : identifier et caractériser les événements historiques de sécheresse hydrologique au Québec;
- **Objectif 2** : identifier les déterminants météorologiques des sécheresses hydrologiques;
- **Objectif 3** : quantifier la prévalence des événements météorologiques pouvant entraîner des événements de sécheresse hydrologique en climat futur.

La figure 1.1 fournit un survol de l'organisation du rapport. Les différentes étapes de la méthodologie sont décrites à la section 2 (boîtes grises). Les résultats pour chacun des objectifs sont présentés à la section 3 (objectif 1), la section 4 (objectif 2) et la section 5 (objectif 3) du rapport.

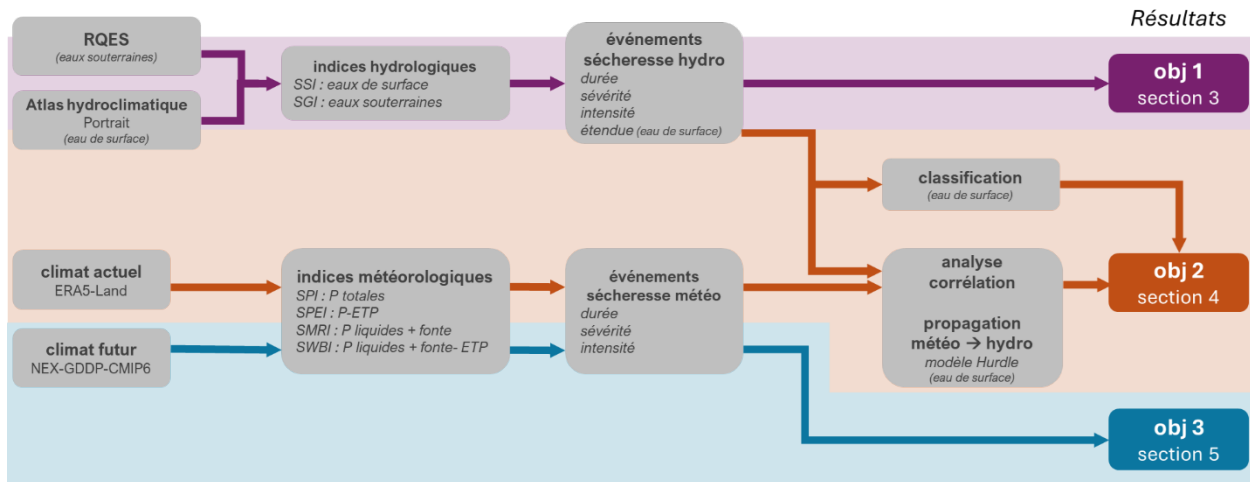


Figure 1.1 Vue d'ensemble du projet et organisation des différentes sections du rapport.

2. Méthodologie

2.1 Données pour caractérisation des niveaux historiques d'eau de surface

Pour les eaux de surface, les sécheresses hydrologiques ont été identifiées à l'aide des données de l'outil « Portrait » de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP, 2023a). Ce jeu de données consiste en une reconstruction des débits historiques pour des tronçons de rivière jaugés et non jaugés avec peu d'influence par des barrages ou de grands lacs. Cette reconstruction est basée sur l'interpolation optimale qui a été utilisée pour combiner des observations aux stations hydrométriques et des simulations hydrologiques faites par le modèle semi-distribué HYDROTEL.

Dans un premier temps, l'ensemble des données du Portrait a été récupéré, soit les débits de 10 441 tronçons de rivière répartis sur 335 bassins versants. Parmi ceux-ci, 2 888 tronçons avec des zones de drainage inférieures à 100 km² ont été écartés, étant donné la grande incertitude du débit simulé par le modèle hydrologique à cette échelle. En outre, l'analyse des bassins versants contenant des données pour moins de 10 segments a été écartée, par soucis de représentation spatiale adéquate. En somme, les sécheresses hydrologiques ont été caractérisées pour 6 718 tronçons répartis sur 109 bassins versants (Figure 2.1). La superficie des bassins versants varie de 375 à 21 897 km², avec une médiane de 2 165 km². Au sein de ces bassins versants, les tronçons avaient une longueur moyenne de 8,6 km et des données de débit étaient en moyenne disponibles pour 51 % de la longueur totale du réseau hydrographique.

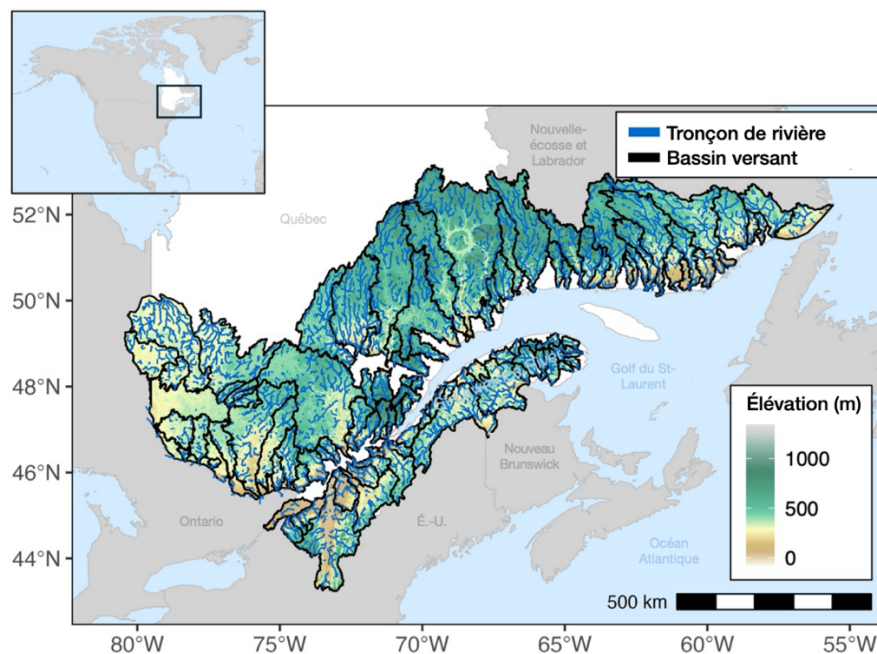


Figure 2.1 Zone d'étude des eaux de surface montrant la sélection des 109 bassins versants pour la caractérisation des sécheresses hydrologiques, incluant les 6718 tronçons de cours d'eau tirés de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP, 2023a). La topographie est tirée du Modèle numérique d'élévation du Canada (RNCAN, 2013).

2.2 Données pour caractérisation des niveaux historiques d'eau souterraine

Pour les eaux souterraines, les sécheresses hydrogéologiques ont été identifiées à l'aide des données provenant du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (MELCCFP, 2023b). Ce jeu de données compte 263 stations de mesure actives réparties dans toutes les régions du Québec. Bien que certaines stations étaient actives dès 1968, l'essentiel du réseau a été aménagé depuis 2008 en vue de mesurer les variations de niveau et de température des eaux souterraines et d'évaluer leur évolution dans un contexte de changements climatiques. Parmi l'ensemble des données, seules les stations ayant une période de mesure commune de plus de 10 ans et moins de 10 jours consécutifs de manque de données ont été sélectionnées. Cela totalise 66 stations incluant 34 piézomètres en nappe captive et 32 piézomètres en nappe libre. Parmi les 66 stations, 23 puits sont dans les Appalaches, 18 puits dans la vallée du Saint-Laurent et 25 puits dans le Bouclier canadien (Figure 2.2).

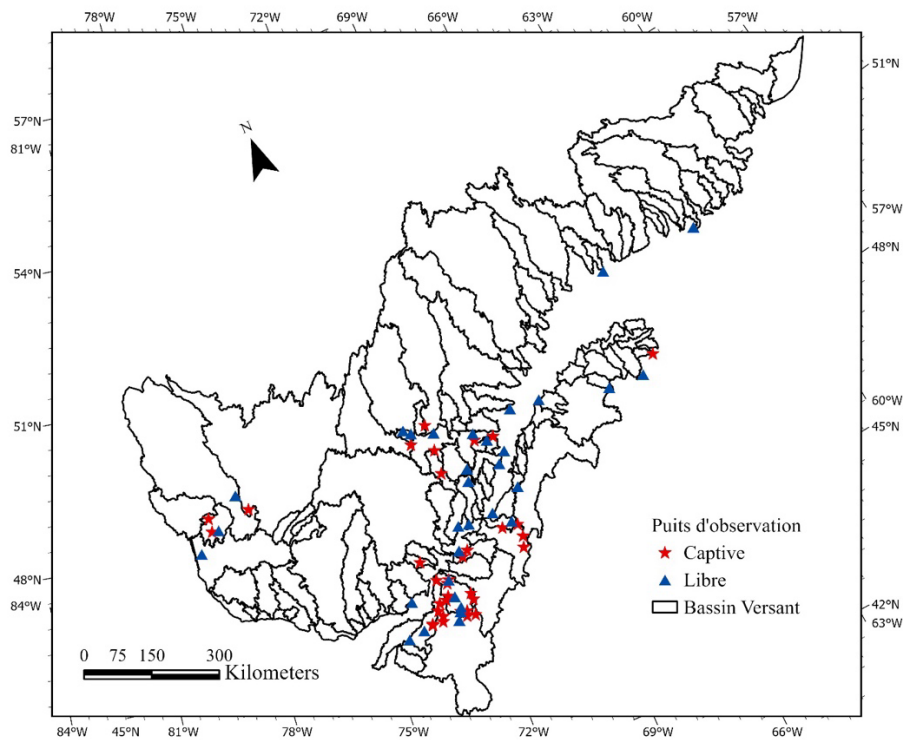


Figure 2.2 Zone d'étude des eaux souterraines montrant les 66 puits sélectionnés pour la caractérisation des sécheresses hydrologiques.

2.3 Données pour caractérisation du climat historique (1970 – 2020)

Les données de réanalyse ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al 2021) ont été utilisées pour caractériser le climat actuel et ainsi faire le lien entre les conditions météorologiques et les sécheresses hydrologiques (section 4). Ces données sont disponibles à une résolution spatiale de 0,1 degré (~9km²) et ont été récolées à l'échelle mensuelle. Les données de précipitations, rayonnement solaire incident, température de l'air, température au point de rosée et albédo de surface ont été extraites pour l'ensemble de la zone d'étude. Pour étudier la relation entre les conditions météorologiques et les sécheresses d'eau de surface, nous avons compilé les précipitations totales et les conditions météorologiques moyennes à l'échelle du bassin versant. Pour étudier la relation avec les sécheresses d'eau souterraine, nous avons utilisé les conditions météorologiques du point de grille le plus proche pour représenter celles de chaque puits d'observation.

2.4 Données pour caractérisation du climat futur (2020 – 2100)

Les projections climatiques NEX-GDDP-CMIP6 (NASA Earth Exchange – Global Daily Downscaled Projections) ont été utilisées pour évaluer la trajectoire des indices météorologiques en climat futur (section 5). Ce jeu de données fournit des données débiaisées à haute résolution spatiale (0,25°) basées sur des simulations par des modèles globaux de génération CMIP6. Celles-ci sont disponibles à l'échelle journalière et ont été convertie à l'échelle mensuelle pour les besoins du projet. Les données provenant de huit modèles climatiques (ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1.5, CanESM5, CMCC-ESM2, MIROC-ESL2, MPI-ESM1-2-HR, NorESM2-MM, TaiESM1-0-LL) combinés à deux scénarios à d'émissions (SSP2-4.5 et SSP3-7.0) ont été utilisées. Des modèles fournissant à la fois des données historiques et des simulations futures pour toutes les variables d'intérêt (précipitation, température de l'air, température au point de rosée et rayonnement solaire incident) de 1970 à 2100 ont été sélectionnés. Le jeu de données NEX-GDDP-CMIP6 a d'ailleurs été sélectionné puisque Ouranos ne possédait pas toutes ces variables dans ses produits post-traités. Les sommes surfaciques des précipitations et les moyennes surfaciques toutes les autres variables ont ensuite été extraites pour chaque bassin versant et pour chaque modèle climatique.

Le jeu de données NEX-GDDP-CMIP6 ne fournit pas les données débiaisées d'albédo, nécessaire pour le calcul de l'évaporation potentielle (ETP). Des données mensuelles débiaisées d'albédo ont donc été produites par Ouranos pour ce projet. Ces données proviennent des huit mêmes modèles climatiques sous SSP3-7.0 et sont débiaisées par la méthode des quantiles (Cannon et al 2015) en utilisant les données ERA5-Land comme référence.

2.5 Identification des sécheresses à partir d'indices normalisés

Dans le cadre de ce projet, une sécheresse se définit comme des conditions météorologiques ou hydrologiques largement inférieures à la moyenne à long terme. Pour identifier ces événements, des indices normalisés qui rapportent les déviations des variables d'intérêt par rapport à la moyenne à long terme ont été utilisés. Les valeurs de l'indice représentent, pour un mois donné, le nombre d'écart-types de déviation par rapport à la moyenne sur l'ensemble de la période

considérée. Les indices normalisés peuvent être calculés pour différentes variables météorologiques (e.g. précipitation), hydrologique (e.g. débit) ou hydrogéologique (e.g. charge hydraulique) d'intérêt. Au total, six indices normalisés ont été calculés, chacun considérant une variable d'intérêt différente (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Indices normalisés pour les variables météorologiques et hydrologiques considérées. Les couleurs associées sont utilisées à travers l'article pour faciliter la lecture des figures. Le type d'indice distingue les indices calculés pour des variables météorologiques et hydrologiques. Parmi les indices météorologiques, on retrouve des indices influencés par l'évaporation potentielle (ETP) ou par la fonte.

Indice normalisé	Variable d'intérêt	Type d'indice
Standardized Precipitation Index (SPI)	Précipitation totale	Météorologique
Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	Précipitation totale – ETP	Météorologique - influencé par l'ETP
Standardized Melt and Runoff Index (SMRI)	Précipitation liquide + Fonte	Météorologique - influencé par la fonte
Standardized Water Budget Index (SWBI)	Précipitation liquide + Fonte – ETP	Météorologique - influencé par l'ETP et la fonte
Standardized Streamflow Index (SSI)	Débit	Hydrologique
Standardized Groundwater Index (SGI)	Niveau d'eau souterraine	Hydrogéologique

Lorsqu'ils sont comparés en utilisant différentes périodes d'accumulation et des analyses de corrélation, les indices normalisés permettent d'évaluer le lien statistique qui existe entre les sécheresses météorologiques, les sécheresses des eaux de surface et des eaux souterraines à différentes échelles temporelles. Une période d'accumulation de 12 mois signifie qu'une moyenne mobile de 12 mois par en arrière a été appliquée sur les indices normalisés. Elle permet d'évaluer les tendances annuelles alors qu'une période d'accumulation de 3 mois permet d'évaluer les tendances saisonnières.

Les indices normalisés sont couramment utilisés pour quantifier les caractéristiques des sécheresses météorologiques, hydrologiques et hydrogéologiques, incluant le début, la fin, la durée, la fréquence (occurrence) et l'intensité. Une association événement par événement peut donc être réalisée en utilisant différentes techniques d'appariement, ce qui permet de construire des modèles d'inférence utilisés pour des prévisions saisonnières.

Standardized Precipitation Index (SPI)

L'indice de précipitations normalisé (SPI) normalise les précipitations totales (McKee et al 1993). Il est largement utilisé et l'Organisation météorologique mondiale le met de l'avant comme méthode standard pour quantifier les sécheresses météorologiques (Hayes et al 2011).

Standardized Precipitation – Evaporation Index (SPEI)

L'indice normalisé de précipitations-évapotranspiration (SPEI) normalise la différence entre les précipitations totales et l'évaporation potentielle (Begueria et al 2014). En considérant non seulement les apports en eau (précipitations), mais aussi les pertes par évaporation dans son calcul,

le SPEI fournit un portrait plus juste de la disponibilité réelle en eau. L'évaporation potentielle a été calculée à l'aide de l'équation de Priestley-Taylor (Priestley & Taylor 1972). Selon la cartographie des domaines bioclimatiques (MRNF, 2022), les valeurs de 0,82; 0,65 et 0,55 ont été attribuées au coefficient alpha pour les forêts tempérées dominées par des feuillus, les forêts tempérées dominées par des conifères et les forêts boréales dominées par des conifères (Komatsu, 2005). Les détails sur le calcul de l'évapotranspiration disponibles en annexe B.

Standardized Melt and Runoff Index (SMRI)

L'indice normalisé de fonte et de ruissellement (SMRI) normalise la somme des précipitations liquides et de la fonte des neiges (Staudinger et al 2014). Cet indice fut développé pour compléter le SPI dans les bassins versants influencés par la neige afin de mieux capter le décalage associé aux précipitations solides, dont l'apport réel en eau ne se fait qu'au moment de la fonte. La fonte est calculée pour chaque point de grille à l'aide d'un modèle couramment utilisé extrait du modèle hydrologique HBV, avec des paramètres calibrés spécifiquement pour la région étudiée (Jabbari et al 2024, voir annexe A pour les détails du calcul). Ce modèle considère l'accumulation de neige (distinction entre précipitations liquides et solides selon des seuils de température) ainsi que la fonte (calculé selon l'accumulation de degrés-jour).

Standardized Water Budget Index (SWBI)

Afin de tirer profit des forces associées à chacun des indices, un quatrième indice a été proposé, soit l'indice normalisé du bilan hydrique (SWBI) qui combine le SPEI et le SMRI. Cet indice normalise le bilan hydrique qui correspond à la différence entre les apports (précipitations liquides et fonte des neiges) et les pertes (évaporation potentielle). Cet indice a été proposé étant donné l'importance de considérer les processus d'évaporation et de fonte dans les études sur les changements climatiques. En effet, la demande atmosphérique est amenée à augmenter de manière importante avec les changements climatiques (Vicente-Serrano et al 2020) et des effets importants sont également attendus pour le couvert neigeux (Gottlieb et al 2024).

Standardized Streamflow Index (SSI)

L'indice normalisé de débit (SSI) normalise le débit et est couramment utilisé pour identifier et caractériser les déficits en eau de surface (Svensson et al 2017 ; Laaha et al 2017 ; Barker et al 2016). Le SSI a été calculé sur une période d'accumulation de trois mois afin de se concentrer sur la variabilité saisonnière et parce que cette période d'accumulation apparaît sensible à la variabilité climatique à plus long terme (Van Loon et al 2015). L'indice normalisé de débit a été calculé pour chaque tronçon de rivière, puis agrégé à l'échelle du bassin versant tel que détaillé à la section 2.8 du présent rapport.

Standardized Groundwater Index (SGI)

L'indice normalisé des niveaux d'eau souterraine (SGI) est couramment utilisé pour identifier et caractériser les déficits en eau souterraine (Bloomfield and Marchant, 2013). Dans le cadre de ce travail, le SGI a été calculé sur plusieurs périodes d'accumulation afin de quantifier les corrélations

maximales entre les indices météorologiques (SPI, SPEI, SWBI) calculés au point de grille où se retrouve le piézomètre.

2.5.1 Ajustement des distributions pour l'ensemble des indices

Les indices normalisés ont été calculés en ajustant une distribution de probabilité aux séries temporelles pour un mois donné. Pour ce faire, huit distributions différentes ont été considérées (2 paramètres : gamma, Gumbel, logistique, log-normale, normale, Weibull ; 3 paramètres : valeur extrême généralisée, Tweedie). Le meilleur ajustement a été choisi en se basant sur le test d'adéquation de Kuiper (Kuiper, 1960). Une fois les indices calculés, ils ont été tronqués à -5 et 5 compte tenu de l'incertitude aux extrémités de la distribution (Svensson et al 2017). Les indices hydrologiques ont seulement été calculés en climat actuel, ainsi l'indice associé aux eaux de surface (SSI) est ajusté sur la période 1970-2022 (section 3.1) et l'indice associé aux eaux souterraines (SGI) est ajusté sur la période 2012-2021 (section 3.2). Pour le calcul des indices météorologiques (SPI, SPEI, SMRI, SWBI) en climat actuel à partir des données ERA5-Land, la distribution a été ajustée sur une période de référence de 1970 à 2022 lorsque ceux-ci étaient mis en relation avec les indices hydrologiques reliés aux eaux de surface (section 4.1) et sur une période de référence de 2012 à 2021 lorsque ceux-ci étaient mis en relation avec les indices hydrologiques reliés aux eaux souterraines (section 4.2). Pour les indices météorologiques en climat futur à partir des données NEX-GDDP-CMIP6, la distribution a été ajustée sur une période de référence de 1970 à 2020 (période de 50 ans) afin d'être ensuite appliquée à l'ensemble de la période étudiée (1970-2100) (section 5). Ainsi, les valeurs d'indice représentent les déviations par rapport à la moyenne de la période de référence.

2.5.2 Intégration spatiale et temporelle des indicateurs normalisés

Pour lier les sécheresses météorologiques, hydrologiques et hydrogéologiques, les indices météorologiques ont été associés aux indices hydrologiques et hydrogéologiques de deux façons.

Pour les eaux de surface, la somme mensuelle des précipitations, de l'évaporation potentielle et de la fonte à l'échelle du bassin versant a été calculées. Les indices ont ensuite été calculées sur ces valeurs, représentant ainsi la disponibilité en eau à l'échelle du bassin versant. Des périodes d'accumulation de 1, 3, 6 et 12 mois ont été utilisé à divers étapes des analyses. Une période d'accumulation de trois mois a été utilisée pour l'ensemble des SSI.

Pour les eaux souterraines, les indices météorologiques ont été extraits au point de grille où se trouve le piézomètre. Ils ont ensuite été moyennés en utilisant des périodes d'accumulation de 3, 6 et 12 mois pour tenir compte du décalage temporel qui peut exister entre l'initiation d'une sécheresse météorologique et hydrogéologique. Spécifiquement pour les eaux souterraines, une analyse de sensibilité sur les périodes d'accumulation a été nécessaire pour identifier le meilleur couple période d'accumulation et corrélation sur les séries chronologiques entières ainsi que sur les corrélations entre les caractéristiques des sécheresses météorologiques et hydrogéologiques appariées. La librairie SCI (Gudmundson & Stagge, 2014) a été utilisée pour calculer les indices, en combinaison avec la librairie Tweedie (Dunn, 2005).

2.6 Corrélation entre les indices normalisés

Pour explorer les déterminants météorologiques des sécheresses hydrologiques et hydrogéologiques, des analyses de corrélation ont été réalisées entre les indices normalisés météorologiques (SPI, SPEI, SMRI, SWBI) et hydrologiques (SSI) et hydrogéologiques (SGI) en faisant varier les périodes d'accumulation ($x = 1, 3, 6, 12$ mois). Des coefficients de corrélation de Pearson, ainsi que la valeur de p associée, ont été calculés entre les indices hydrologiques et hydrogéologiques (SGI et SSI) et chaque indice météorologique (SMI : SPI, SPEI, SMRI, SWBI) sur différentes périodes d'accumulation ($x =$ période d'accumulation). Pour les eaux souterraines, la période présentant la corrélation la plus élevée a été considérée comme la meilleure période d'accumulation (Barker et al 2016 ; Haslinger et al 2014 ; Lorenzo-Lacruz et al 2013).

2.7 Identification des événements de sécheresse

Les événements de sécheresses hydrologiques pour les eaux de surface et souterraines ont été identifiés à partir des séries temporelles des indices SSI et SGI, respectivement, et les périodes sèches et les événements de sécheresse météorologique à partir des séries temporelles des indices SPI, SPEI, SMRI, SWBI.

Pour les eaux de surface, un événement de sécheresse a été défini comme une période pendant laquelle l'indice normalisé est inférieur à 0 (seuil d'apparition), avec au moins un mois avec une valeur inférieure à un seuil prédéfini (seuil de sévérité). Des valeurs seuils de -1 (sécheresse modérée), -1,5 (sévère) et -2 (extrême) ont été proposées par McKee et al. (1993) et sont largement utilisées. Ainsi, en tenant compte des travaux de McKee et al (1993), un seuil de -1,5 a été utilisé pour identifier les sécheresses liées aux eaux de surface. Lors de la caractérisation des conditions météorologiques menant à une sécheresse hydrologique, une période sèche a été définie comme une période où les conditions météorologiques concernées (par exemple, les précipitations totales) sont sous la moyenne, c'est-à-dire une période où les indices sont négatifs (sous zéro).

Pour les sécheresses hydrogéologiques, le seuil d'apparition et le seuil de sévérité ont été respectivement fixés à -0,5 et -1,5. En revanche, pour identifier les caractéristiques des sécheresses météorologiques associées à chacune des sécheresses hydrogéologiques, une analyse de sensibilité, dans laquelle les seuils d'apparition et de sévérité spécifiques aux indices météorologiques ont été modifiés, a été réalisée.

2.8 Caractérisation des événements de sécheresse

Après avoir identifié l'ensemble des événements de sécheresse, la durée, la sévérité, l'intensité et l'occurrence ont été calculées. Chacune de ces caractéristiques est définie comme suit (Figure 2.3) :

- la **durée** : nombre de mois avec une valeur d'indice sous le seuil d'apparition;
- la **sévérité** : somme cumulée des valeurs d'indice sous le seuil d'apparition pendant l'événement;
- l'**intensité** : valeur minimale de l'indice pendant l'événement;
- l'**occurrence** : saison pendant laquelle l'événement a débuté, avec l'hiver défini comme décembre, janvier et février, le printemps comme mars, avril et mai, l'été comme juin, juillet et août, l'automne comme septembre, octobre et novembre.

Étendue spatiale des sécheresses hydrologiques

Pour les sécheresses hydrologiques associées aux eaux de surface, une caractérisation de leur étendue spatiale a été réalisée. L'étendue spatiale a été définie comme la proportion de la longueur de cours d'eau en sécheresse dans un bassin versant pendant l'événement, en considérant seulement les tronçons pour lesquels des données sont disponibles (et non le réseau hydrographique entier). Au sein de chaque bassin versant, les événements de sécheresse observés dans différents tronçons ont été regroupés lorsqu'ils présentaient une période de chevauchement d'au moins un mois (Figure 2.3). Pour décrire l'événement à l'échelle du bassin versant, les valeurs médianes des caractéristiques (durée, sévérité) calculées aux tronçons ont été utilisées. Les sécheresses seront définies comme "étendue" lorsqu'elles affectent plus de 90 % du réseau hydrographique et "localisée" lorsqu'elles affectent moins de 10 % du réseau hydrographique.

2.8.1 Appariement des sécheresses météorologiques et hydrologiques

Le processus d'appariement des sécheresses hydrologiques a été effectué au sein des bassins versants, en associant les sécheresses hydrologiques à l'échelle des bassins versants et les périodes sèches identifiées à l'aide des quatre indices météorologiques.

Dans le cas le plus simple, les sécheresses hydrologiques ont été associées aux périodes sèches précédentes les plus proches et leur durée, leur sévérité, leur intensité et leur délai (nombre de mois entre le début de la période sèche et la sécheresse) ont été enregistrés comme caractéristiques de propagation. Trois exceptions ont été prises en compte lors du processus d'association. Premièrement, lorsqu'une période sèche associée se terminait après la sécheresse hydrologique, sa durée et sa sévérité étaient tronquées à la fin de la sécheresse hydrologique. Deuxièmement, lorsque des périodes sèches subséquentes se produisaient pendant la sécheresse hydrologique, leur durée et leur sévérité étaient additionnées. Enfin, lorsque le délai était supérieur à trois mois, les sécheresses hydrologiques étaient définies comme « non-appariée », ce qui signifie que leur cause ne pouvait être saisie par les processus sous-jacents à l'indice considéré.

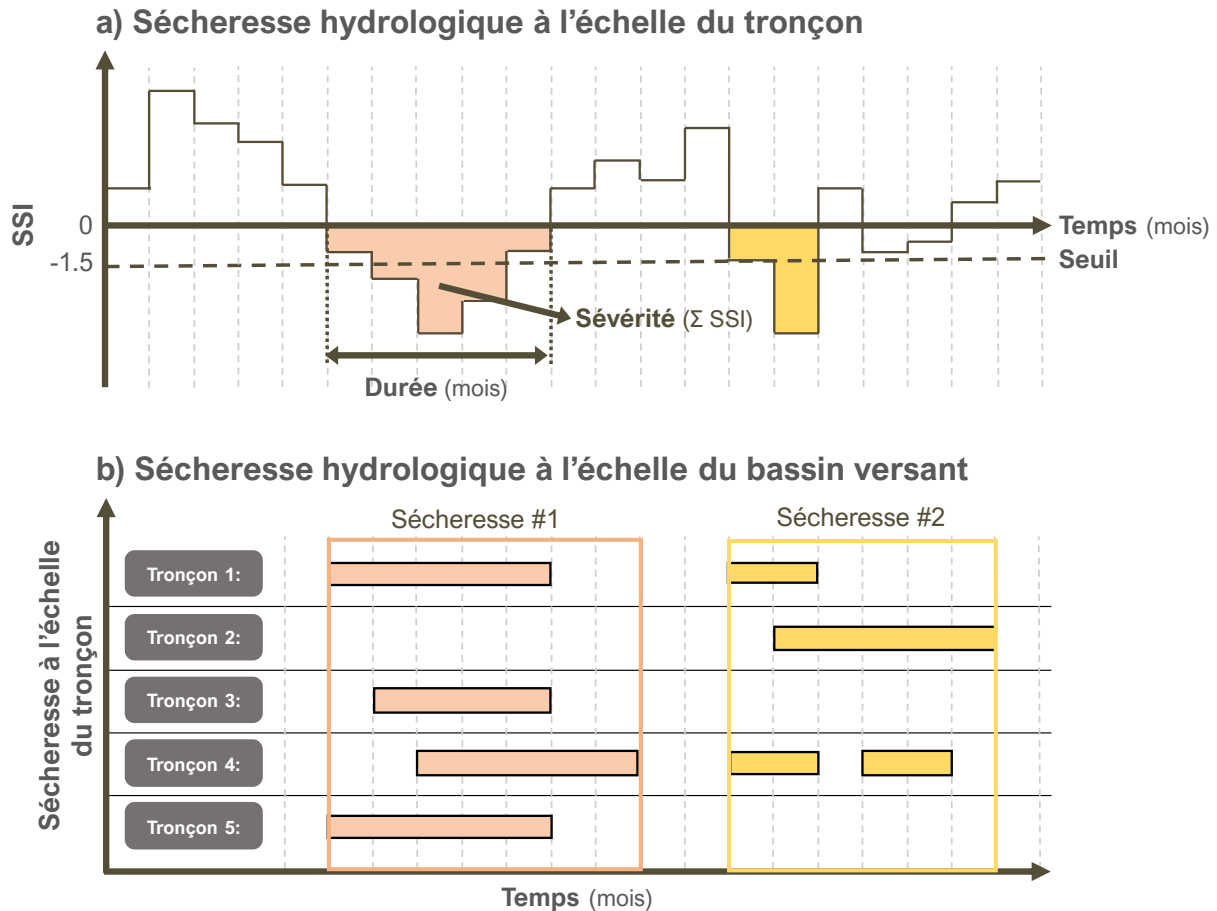


Figure 2.3 Processus en deux étapes pour identifier les épisodes de sécheresse hydrologiques à a) l'échelle du tronçon et b) l'échelle du bassin versant. Le panneau (a) illustre comment deux épisodes de sécheresse sont identifiés à partir d'une série chronologique de l'indice de débit normalisé (SSI) pour le tronçon no 1 et ensuite caractérisés selon leur durée et leur sévérité. Le panneau (b) montre comment les événements à l'échelle du tronçon sont agrégés pour définir les événements à l'échelle du bassin versant. Lorsque plusieurs événements provenant du même tronçon ont été regroupés en un seul événement à l'échelle du bassin versant (événement no 2, tronçon 4), leur durée et leur sévérité ont été additionnées. Les caractéristiques de chaque événement à l'échelle du bassin versant ont été calculées, comme les valeurs médianes des événements correspondants à l'échelle du tronçon.

2.8.2 Appariement des sécheresses météorologiques et hydrogéologiques

Un épisode de sécheresse météorologique est considéré comme correspondant à un épisode de sécheresse des eaux souterraines s'il répond aux critères suivants (Figure 2.4) :

Critère de priorité temporelle : l'événement de sécheresse météorologique doit commencer au plus tard à l'heure de début de l'événement de sécheresse des eaux souterraines, en veillant à ce qu'il précède la réponse des eaux souterraines, c.-à-d.,

$$SMI_{début} \leq SGI_{début}$$

Critère de chevauchement temporel : la sécheresse météorologique doit persister pendant ou au-delà du début ajusté du délai de propagation de la sécheresse des eaux souterraines, garantissant un chevauchement temporel réel.

$$SMI_{fin} \geq SGI_{début} - \text{délai de propagation}$$

Le délai de propagation est calculé par des analyses de corrélation croisées (voir section 4.2.2). De plus, l'appariement exclut les sécheresses météorologiques qui débutent après le début d'une sécheresse des eaux souterraines, préservant ainsi une interprétation causale claire.

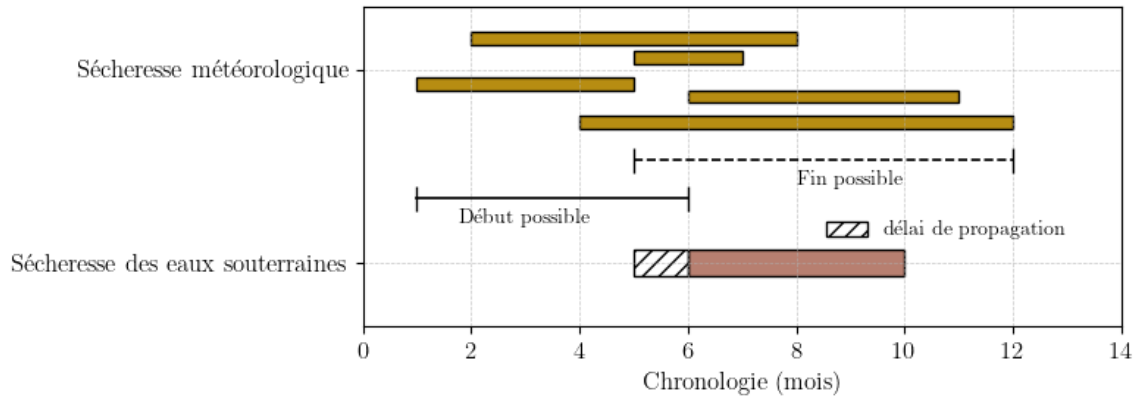


Figure 2.4 Conditions de correspondance des épisodes de sécheresse hydrogéologique (SMI-x (x = 1, 3, 6, 12) vs. SGI-1). Il a été démontré que les alignements possibles des épisodes de sécheresse météorologique correspondent aux épisodes de sécheresse hydrogéologiques.

2.8.3 Modification du début et de la fin des événements météorologiques

Pour l'étude d'inférence statistique entre les caractéristiques des sécheresses météorologiques et hydrogéologiques, les caractéristiques des sécheresses météorologiques ont été ajustées. Par exemple, lorsqu'un événement météorologique correspond à un seul épisode de sécheresse hydrogéologique, sa date de fin était tronquée à la date de fin de sécheresse hydrogéologique (voir figure 2.4). Cela garantit que la durée, l'intensité et la sévérité de la sécheresse météorologique ne sont évaluées que sur l'intervalle de temps pendant lequel les eaux souterraines étaient réellement en condition de sécheresse. Lorsqu'un événement météorologique s'étendait sur deux épisodes de sécheresses hydrogéologiques ou plus, la série temporelle météorologique était partitionnée à chaque date de fin de la sécheresse hydrogéologique. Chaque partition était ensuite traitée comme un segment météorologique indépendant dont les caractéristiques étaient recalculées sur la fenêtre temporelle exacte de l'épisode de sécheresse hydrogéologique. Finalement, lorsque des sécheresses hydrogéologiques ne pouvaient être associées à des sécheresses météorologiques, celles-ci ont été considérées comme non appariées.

2.9 Analyses

Après avoir caractérisé les sécheresses en utilisant des indices normalisés, des analyses spécifiques ont été réalisées et permettent de répondre aux différents objectifs du projet. Chacune des analyses est décrite ci-dessous et correspond à un résultat présenté dans la section résultats de ce rapport.

2.9.1 Caractérisation des sécheresses

Description statistique des caractéristiques des sécheresses hydrologiques et hydrogéologiques

Une analyse statistique des sécheresses hydrologiques a été réalisée, consistant en la description de la durée, de la sévérité, de l'étendue spatiale et de l'occurrence de toutes les sécheresses identifiées à l'aide de l'indice SSI. La moyenne, la médiane et le coefficient de variation ont été utilisés à cette fin. Ces résultats présentent un portrait général des sécheresses historiques ayant été ressenties dans l'ensemble de la région à l'étude.

Une analyse statistique des sécheresses hydrogéologiques a également été réalisée. Celle-ci comprend la description (moyenne, médiane et coefficient de variation) de la durée et la sévérité de toutes les sécheresses identifiées à l'aide de l'indice SGI. Les résultats montrent l'impact des saisons et de la nature des aquifères (c.-à-d. confiné et non confiné). L'analyse fait aussi ressortir le pourcentage de piézomètre en situation de sécheresse sur l'ensemble des années et des saisons couvertes par le réseau ainsi que la distribution spatiale moyenne de la sévérité des piézomètres analysés.

Enfin, la relation entre l'étendue spatiale des sécheresses hydrologiques et la sévérité des événements a été examinée en posant l'hypothèse que la sévérité des événements augmente avec leur étendue spatiale. Un modèle linéaire gaussien mixte a été ajusté pour modéliser la sévérité des événements en fonction de leur étendue spatiale et leur occurrence. Afin de gérer la non-indépendance des événements de sécheresse au sein d'un bassin versant, l'identifiant du bassin versant a été défini comme effet aléatoire. De manière similaire, l'année d'apparition de la sécheresse (année) a également été définie comme effet aléatoire. La sévérité de la sécheresse a été transformée en logarithme (logarithme naturel) afin de stabiliser la variance dans le modèle. Le modèle a été ajusté à l'aide de la librairie glmmTMB dans R (Brooks et al 2017).

2.9.2 Analyses de sensibilité de la détection des sécheresses

Analyse de sensibilité pour la détection des événements de sécheresse hydrologiques

Une analyse de sensibilité a été effectuée quant à la détection des événements de sécheresse hydrologique au sein d'un bassin versant selon le nombre de tronçons considérés. Pour ce faire, nous avons comparé le nombre de sécheresses identifiées à l'échelle du bassin versant à celui identifié lorsqu'un seul tronçon de rivière était utilisé. Pour chacun des 109 bassins versants, nous avons d'abord supposé que les données sur le débit n'étaient disponibles qu'au tronçon le plus en aval du bassin versant. Les valeurs appariées (réseau complet vs tronçon unique) ont ensuite été utilisées pour évaluer la tendance générale à la sous-estimation ou à la surestimation de la fréquence des épisodes de sécheresse dans la zone d'étude. Afin de s'assurer que les résultats

n'étaient pas biaisés par l'utilisation du tronçon le plus en aval, l'analyse a été répétée en sélectionnant au hasard un seul tronçon (sans remplacement) dans chaque bassin versant, et en répétant ceci 100 fois.

Une analyse plus approfondie a été effectuée afin d'estimer le nombre de stations hydrométriques (c'est-à-dire le nombre de tronçons de rivière utilisés pour calculer les événements de sécheresse à l'échelle du bassin versant) nécessaires pour détecter tous les événements de sécheresse dans un bassin versant. Pour chaque bassin versant, un nombre croissant de tronçons de cours d'eau (de 1 jusqu'au nombre total de tronçons) a été échantillonné de manière aléatoire et le nombre d'événements de sécheresse sévère a été calculé à chaque étape. Le taux de détection des sécheresses a été défini comme le rapport entre le nombre d'événements de sécheresse détectés à l'aide d'un nombre réduit de tronçons et le nombre total d'événements détectés en considérant tous les tronçons du bassin versant. Afin de tenir compte de l'influence potentielle de la taille du bassin versant sur la variabilité de la sécheresse, l'analyse a été menée séparément pour les bassins versants de taille moyenne (bassin versant < 2 500 km²) et les bassins versants de grande taille (bassin versant > 2 500 km²).

Analyse de sensibilité pour l'identification des seuils optimaux pour la caractérisation des sécheresses hydrogéologiques

Une analyse de sensibilité a été effectuée en faisant varier les seuils d'apparition des événements de sécheresse afin de trouver un seuil optimal permettant d'identifier les épisodes de sécheresse météorologique les plus fortement associés aux épisodes de sécheresses hydrogéologiques. Le seuil d'apparition est un paramètre essentiel pour l'identification des événements de sécheresse, car il détermine le moment où un épisode de sécheresse est considéré comme commençant selon les valeurs d'indices standardisés. En faisant varier systématiquement ce seuil, l'influence de différentes valeurs de seuil d'apparition sur la durée, la sévérité et l'intensité ont été évaluées, fournissant ainsi des informations sur la fiabilité et l'adaptabilité du cadre de caractérisation de la sécheresse.

Dans cette étude, des seuils d'apparition allant de -1,5 à 0 ont été testés en faisant varier les valeurs de 0,1. Pour chaque seuil, les épisodes de sécheresse météorologique ont été identifiés à partir des indices standardisés (SPEI et SWBI), puis appariés aux épisodes de sécheresse hydrogéologiques dérivés de l'indice SGI-1 à l'aide du cadre d'appariement décrit ci-dessus. Pour chaque événement apparié, les caractéristiques de la sécheresse ont été extraites et les coefficients de corrélation de Pearson ont été calculés. La valeur seuil produisant les corrélations les plus fortes et les plus cohérentes entre les trois caractéristiques des sécheresses a été retenue comme seuil d'apparition optimal. Cette analyse permet d'évaluer la sensibilité de la propagation des sécheresses météorologiques vers des sécheresses hydrogéologiques.

2.9.3 Classification des sécheresses

Classification des sécheresses hydrologiques

En lien avec l'objectif 2 qui vise à comprendre les déterminants des sécheresses hydrologiques, les événements ont été catégorisés selon la classification proposée par Brunner et al. (2022), modifiée afin de tenir compte des différences de climat et de la disponibilité des données relatives à la neige pour la région étudiée. Ainsi, chaque événement de sécheresse hydrologique identifié à partir du SSI a été classé selon sept catégories, selon les conditions météorologiques observées avant ou pendant la sécheresse hydrologique (Figure 2.5).

La première étape de la classification a consisté à distinguer les sécheresses liées à la pluie (reliées à des anomalies pluviométriques) des sécheresses liées à la neige (reliées à des anomalies dans le couvert de neige et étroitement liées à la température qui contrôle la fonte) (Figure 2.5). Lors de l'application de la classification, une *anomalie* a été définie comme une quantité inférieure au 20^e centile. Un *déficit* correspond à une quantité inférieure à la moyenne de la période étudiée, tandis qu'un *excédent* correspond à une quantité supérieure à la moyenne de la période étudiée. Une sécheresse était désignée comme liée à la pluie si une anomalie pluviométrique était détectée jusqu'à deux mois avant la sécheresse et cette anomalie devait s'être produite en dehors de la période de couvert de neige.

Sécheresses liées à la pluie

Si l'anomalie pluviométrique persistait jusqu'à une période de couvert de neige, la sécheresse était classée comme une **sécheresse de transition pluie-neige**, car le retour vers des précipitations proche de la normale n'amène pas un apport aux rivières, étant donné le stockage des précipitations sous forme de neige. Si la sécheresse concorde avec une période où l'évaporation potentielle est élevée (au moins un mois avec ETP > 80^e centile), la sécheresse était classée comme une **sécheresse atmosphérique**. Les événements ne concordant à aucune des deux catégories étaient classés comme une **sécheresse due à un déficit pluviométrique**.

Sécheresses liées à la neige

Parmi les sécheresses liées à neige, une distinction est faite entre les événements liés à une anomalie du couvert de neige au sol. Si tel était le cas, une distinction était faite entre les événements associés à un déficit des précipitations menant à un couvert de neige réduit (**sécheresse de fonte**) et les événements associés à un hiver relativement chaud où les précipitations étaient proches ou supérieures à la normale, mais où la fonte a été devancée (**sécheresse d'hiver chaud**). Lorsqu'aucune anomalie n'était observée pour le couvert de neige, les événements avec un excédent du couvert de neige étaient classés comme une **sécheresse d'hiver froid** où les températures froides limitent la fonte des neiges et donc les apports. Si aucun excédent du couvert de neige était observé, alors les événements étaient classés comme une **sécheresse composite**, où il est probable que plusieurs facteurs météorologiques interagissent pour mener à une sécheresse hydrologique.

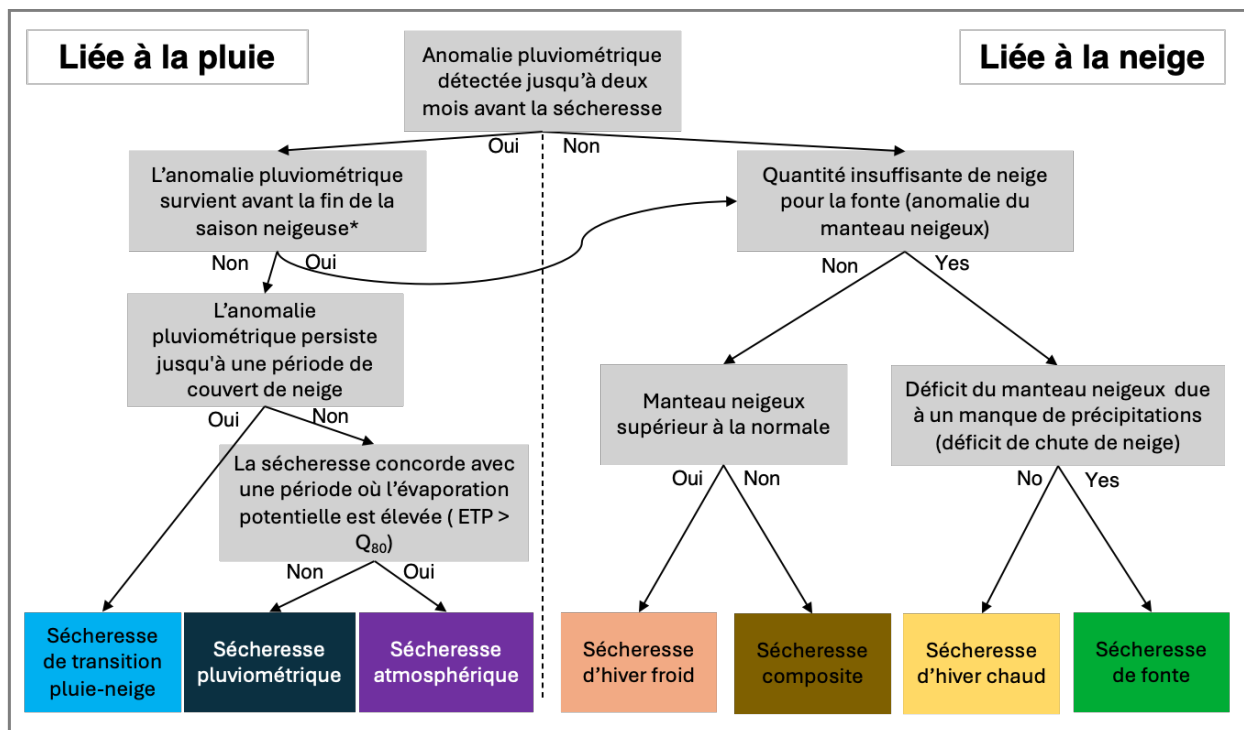


Figure 2.5 Arbre de décision de la classification des événements de sécheresse hydrologique. Les sécheresses hydrologiques sont classées en fonction des précipitations, de l'évaporation potentielle et du couvert de neige. *La fin de la saison neigeuse a lieu après la dernière occurrence de précipitations solides pour chaque bassin versant.

Classification des sécheresses hydrogéologiques

Après l'alignement et l'ajustement temporels des sécheresses telles que décrites dans la section méthodologie, les épisodes de sécheresse météorologique et hydrogéologique ont été classés comme « apparié » (il existe un lien apparent entre les sécheresses météorologiques et hydrogéologiques) ou « non apparié » (il n'existe pas de lien entre les sécheresses météorologiques et hydrogéologiques). Des statistiques (différence absolue et différence en pourcentage) pour chaque caractéristique (durée, intensité et sévérité) ont été calculées. Des tests U non paramétriques de Mann-Whitney ont ensuite été effectués pour comparer les caractéristiques des événements appariés et non appariés. Cette comparaison permet de mettre en évidence les performances des indices météorologiques pour la prédiction des sécheresses météorologiques et de répondre à la question suivante : les épisodes de sécheresse météorologique appariés diffèrent-ils des épisodes non appariés en termes de durée, de sévérité et d'intensité ?

2.9.4 Propagation des conditions météorologiques en sécheresses

Analyse de propagation des conditions météorologiques sèches en sécheresse hydrologique

Après avoir effectué l'appariement entre les différentes sécheresses, un ensemble d'analyse a été réalisé pour évaluer le lien statistique qui existe entre les caractéristiques des conditions météorologiques et celles des sécheresses hydrologiques.

Des indicateurs décrivant la propagation des périodes sèches en sécheresses hydrologiques ont ensuite été calculés. Le taux d'appariement correspond au ratio entre le nombre de sécheresses hydrologiques appariées et le nombre total de sécheresses hydrologiques, calculé par bassin versant. Plus le taux d'appariement était élevé, plus l'indice et la période d'accumulation étaient considérés comme efficaces pour saisir les processus responsables de la propagation de la sécheresse.

La performance des indices en matière de propagation de la sécheresse a également été évaluée en calculant les corrélations entre la sécheresse hydrologique et les caractéristiques de la période sèche appariée (durée, sévérité et intensité). Plus la corrélation était élevée, plus l'indice et la période d'accumulation étaient considérés comme efficaces pour décrire la propagation de la sécheresse.

Le taux de propagation est une mesure proposée à l'origine par Sattar et al. (2019) pour étudier la sensibilité de la propagation de la sécheresse météorologique à la sécheresse hydrologique, puisqu'un certain nombre de périodes sèches n'ont pas pu déclencher de sécheresse hydrologique. Il est défini comme le rapport entre le nombre de sécheresses hydrologiques et le nombre de sécheresses météorologiques pendant la période d'étude. Cependant, une sécheresse hydrologique peut être causée et prolongée par plusieurs sécheresses météorologiques consécutives. Cela était particulièrement fréquent dans la présente étude, car des périodes sèches ont été utilisées plutôt que des sécheresses météorologiques, celles-ci étant plus fréquentes étant donné leur seuil de sévérité plus élevé (0 versus -1.5). Ainsi, un taux de propagation modifié a été utilisé comme indicateur de performance final, défini comme le rapport entre le nombre de périodes sèches qui ont déclenché ou contribué à une sécheresse hydrologique et le nombre total de périodes sèches. Plus le taux de propagation modifié était élevé, plus l'indice ou la période d'accumulation était considéré comme efficace pour saisir les processus responsables de la propagation de la sécheresse.

Propagation des sécheresses météorologiques en sécheresses hydrogéologiques

Pour évaluer dans quelle mesure les sécheresses des eaux souterraines sont dues aux conditions météorologiques, le taux de correspondance a été calculé, défini comme :

$$\text{le taux de correspondance} = \frac{\text{événements SGI appariés}}{\text{total des événements SGI}} \times 100 \quad (\text{équation 2.1})$$

Tel que décrit précédemment, un événement SGI apparié est un événement qui chevauche temporellement (y compris les décalages potentiels) au moins un événement de sécheresse météorologique (par exemple, SPI, SPEI ou SWBI), tandis que le nombre total d'événements de sécheresse hydrogéologique fait référence à toutes les sécheresses des eaux souterraines identifiées à l'aide de SGI-1.

Modélisation statistique de la propagation des périodes sèches

Pour répondre à l'objectif 3 du projet, des modèles statistiques ont été développés pour les sécheresses hydrologiques. Cependant, en raison des faibles corrélations entre les indices normalisés météorologiques et hydrogéologiques ainsi que la capacité limitée de modèles

statistiques à prédire les caractéristiques des sécheresses hydrogéologiques, aucun résultat de modélisation statistique n'est présenté pour les eaux souterraines.

Pour les sécheresses hydrologiques, un modèle Hurdle a été développé dans l'intention de modéliser la probabilité de propagation d'une période sèche en sécheresse hydrologique. Un modèle Hurdle est un modèle en deux étapes (Mullahy 1968 ; Heilbron 1994) généralement appliqué à des données comportant un nombre excessif de zéros, où un ajustement déraisonnable peut résulter à la fois pour les zéros et les données continues non nulles (Perumean-Chaney et al 2013). Ce type de modèle s'applique bien à l'étude de propagation, car de nombreuses périodes sèches ne conduisaient pas à des sécheresses hydrologiques (75 % de toutes les périodes sèches). La première étape permet de modéliser si une observation est nulle ou non (propagation en sécheresse hydrologique ou non), tandis que la deuxième étape modélise la relation entre la partie continue non nulle des données (relation entre la sévérité de la période sèche et la sévérité de la sécheresse hydrologique).

Pour la première étape du modèle Hurdle, une régression logistique binomiale a été utilisée pour modéliser si une période sèche d'un point de vue météorologique se propageait ou non en une sécheresse hydrologique. Pour la deuxième étape, un modèle additif généralisé (GAM) a été utilisé pour modéliser la sévérité d'une sécheresse hydrologique selon la sévérité de la période sèche d'un point de vue météorologique, se concentrant ainsi seulement sur les événements pour laquelle la propagation vers une sécheresse hydrologique s'était produite. Un modèle GAM avec une famille Gamma et une fonction de liaison logarithmique a été choisi pour traiter l'hétéroscédasticité des données. La classe de lissage pour la sévérité des sécheresses hydrologiques était une spline de régression cubique, définie par un ensemble modeste de nœuds répartis uniformément sur les valeurs des covariables (Wood, 2017). Dans les deux modèles, l'occurrence (saison de début) a été ajoutée comme covariable afin de tenir compte de la variabilité saisonnière. Dans les deux modèles, l'identifiant du bassin versant et l'année ont également été définis comme effet aléatoire afin de gérer la dépendance des événements au sein de chaque bassin versant et la variabilité climatique d'une année à l'autre (par exemple, lié aux téléconnections).

Le modèle logistique a été entraîné à partir d'un sous-ensemble aléatoire de données représentant 70 % des données. Il a été validé sur les 30 % restants en calculant une matrice de confusion avec un seuil de probabilité obtenu en maximisant la statistique J de Youden (Fluss et al 2005). La performance du modèle a été évaluée selon la précision (justesse des prédictions positives), la sensibilité (ou rappel, taux de vrais positifs), la spécificité (taux de vrais négatifs) et le score F1 (moyenne entre précision et rappel). Un test binomial a été utilisé pour évaluer si la précision était significativement supérieure au taux d'absence d'information. L'ajustement du modèle GAM a été évalué par inspection visuelle des résidus et en vérifiant le lissage selon les critères établis par Wood (2017). Le surajustement a été évalué en ajustant le GAM avec une centaine de sous-ensembles composés de 70 % des données et en évaluant la variance expliquée. Le modèle logistique a été ajusté à l'aide de la librairie `glmmTMB` dans R (Brooks et al 2017), tandis que le GAM a été ajusté avec la librairie `mgcv` (Wood, 2011).

2.9.5 Changements projetés pour les indices météorologiques en climat futur

Tendances dans les séries temporelles des indices météorologiques normalisés

L'analyse des tendances a été effectuée pour la période 1970 à 2100 pour les moyennes d'ensemble des indices météorologiques compilés à l'échelle annuelle (période d'accumulation = 12 mois) et saisonnière (période d'accumulation = 3 mois) selon les projections climatiques NEX-GDDP-CMIP6 des huit modèles sélectionnés. À l'échelle saisonnière, la série d'indice du mois de février (reflétant les conditions de décembre, janvier et février) a été considérée pour évaluer les tendances à l'hiver, la série du mois de mai (reflétant mars, avril et mai) pour le printemps, la série du mois d'août (reflétant juin, juillet et août) pour l'été et la série du mois de novembre (reflétant septembre, octobre, novembre) pour l'automne. Le test non paramétrique de Mann-Kendall a été utilisé pour détecter les tendances, ainsi que l'estimation non paramétrique de la pente de Sen pour les quantifier (Hipel et McLeod, 1994).

Tendances dans les conditions sévères

Pour étudier les tendances dans les conditions sévères, la fréquence annuelle et saisonnière des conditions moyennes (indice $< 1,0$ et $> -1,0$), sévères humides (indice $> 1,5$) et sévères sèches (indice $< -1,5$) a été calculée. Pour ce faire, le nombre de mois par an (annuel) ou par saison (saisonnier) avec une valeur d'indice supérieure ou inférieure aux seuils définis a été calculé, et ce, pour chaque bassin versant et chaque modèle climatique. Les moyennes d'ensemble pour chaque indice météorologique ont été ensuite compilées et analysées avec les tests de Mann-Kendall et Sen.

Les tendances observées dans les caractéristiques des événements de sécheresse météorologique ont été analysées.

Pour étudier les tendances dans les caractéristiques des sécheresses, tous les événements ont été identifiés et décrits en termes de durée, sévérité et intensité, tel que décrit à la section 2.6. Les événements de sécheresse ont été identifiés et caractérisés pour chacun des 109 bassins versants et huit modèles climatiques. Ensuite, la moyenne annuelle et saisonnière des caractéristiques des sécheresses (durée, sévérité, intensité) a été calculée en faisant la moyenne de tous les bassins versants et modèles climatiques sur la période concernée. Finalement, les moyennes d'ensemble pour chaque indice météorologique ont été compilées et les tendances avec les tests de Mann-Kendall et Sen ont été analysées.

Changements relatifs entre la période de référence et de futur éloigné

Les changements relatifs dans la fréquence des conditions sévères humides/sèches ainsi que dans la durée, la sévérité, l'intensité et le nombre d'événements de sécheresse en comparant la période de référence (1970-2020) et la période de futur éloigné (2070-2100), à l'échelle annuelle et saisonnière ont été calculés. Pour chaque bassin versant, les changements relatifs ont été calculés comme suit, en considérant les moyennes d'ensemble :

$$RC = (x_{\text{futur}} - x_{\text{référence}}) / x_{\text{référence}} \times 100 \quad (\text{équation 2.2})$$

Où RC correspond au changement relatif (%), x_{futur} à la moyenne d'ensemble pour la période de futur éloigné et $x_{\text{référence}}$ à la moyenne d'ensemble pour la période de référence.

3. Résultats Objectif 1 : Identifier et caractériser les événements de sécheresse hydrologique et hydrogéologique

3.1 Description statistique des caractéristiques des sécheresses hydrologiques sévères

Au cours de la période d'étude de 52 ans, les bassins versants ont connu en moyenne 26 épisodes de sécheresse hydrologiques sévères, soit en moyenne un épisode tous les deux ans (Tableau 3.1). Les sécheresses sévères ont duré en moyenne 8 mois et leur sévérité moyenne était de -8,1, ce qui indique que le débit des cours d'eau était en moyenne inférieur d'un écart-type à la moyenne à long terme pour chaque mois d'un épisode de sécheresse. Des épisodes plus longs et plus sévères se sont aussi produits, avec des durées allant jusqu'à 61 mois et une sévérité atteignant -75,0. La durée et la sévérité des sécheresses étaient fortement corrélées ($R^2 = 0,87$), reflétant l'accumulation des déficits au cours d'épisodes plus longs. Dans l'ensemble, les caractéristiques de la sécheresse étaient relativement similaires d'une saison à l'autre : la durée, la sévérité et l'étendue spatiale étaient comparables au printemps, en été et en automne. En hiver, les sécheresses étaient légèrement moins sévères et leur étendue spatiale était réduite, mais les différences étaient modestes (tableau 3.1).

Tableau 3.1 Caractéristiques des sécheresses hydrologiques à l'échelle du bassin versant pour une période d'accumulation de 3 mois. Les valeurs médianes (Méd.), moyennes (Moy.) et le coefficient de variation (CV) sont présentés.

Occurrence	Nombre d'événements par bassin versant			Durée (mois)			Sévérité (-)			Étendue spatiale		
	Méd.	Moy.	CV (%)	Méd.	Moy.	CV (%)	Méd.	Moy.	CV (%)	Méd.	Moy.	CV (%)
Annuel	27	26	19	7	8	69	- 6,6	- 8,1	74	68	61	60
Hiver	5	5	40	6	7	78	- 5,3	- 7,0	81	58	57	65
Printemps	9	9	35	6	8	68	- 6,6	- 8,1	70	75	63	59
Été	7	7	34	7	8	68	- 7,1	- 8,3	73	69	62	59
Automne	6	6	41	7	9	65	- 7,0	- 8,7	72	66	60	61

3.2 L'étendue spatiale de la sécheresse hydrologique varie considérablement d'un événement à l'autre.

En moyenne, 61 % de la longueur du réseau hydrographique a connu une sécheresse sévère au cours d'un événement donné, bien qu'une variabilité importante ait été observée (CV = 60 %, Tableau 3.1). Pour la période considérée, 37 % des événements étaient étendus (touchant plus de 90 % du réseau hydrographique), tandis que 14 % des événements étaient localisés (touchant moins de 10 % du réseau hydrographique). Lorsqu'une sécheresse affecte un bassin versant, les tronçons ne subissant pas de sécheresse présentaient des valeurs d'indice bien supérieures au seuil

sélectionné de -1,5 (Figure 3.1). Par exemple, 38 % des tronçons avaient des valeurs SSI supérieures ou égales à zéro pendant les épisodes de sécheresse sévères. De manière générale, la majorité (86 %) des tronçons ne subissant pas de sécheresse lors d'un événement à l'échelle du bassin versant présentaient un SSI supérieur d'au moins 0,5 unité au seuil de -1,5, ce qui indique une distinction claire entre les tronçons subissant et ne subissant pas de sécheresse.

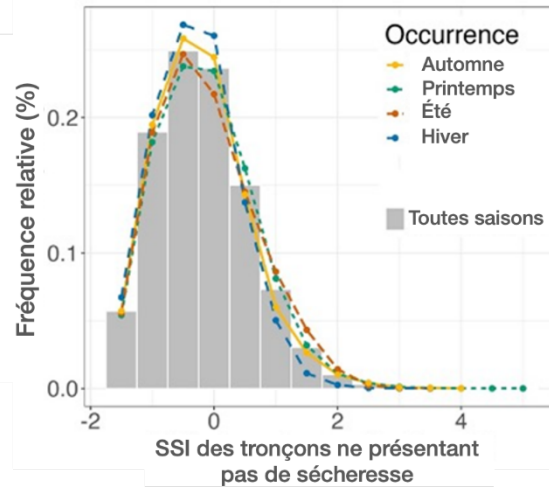


Figure 3.1 Fréquences relatives par catégorie (affichées sous forme de barres et de lignes superposées) de l'indice de débit normalisé (SSI) pour les tronçons ne subissant pas de sécheresse lors d'événements de sécheresse à l'échelle du bassin versant. Les barres grises représentent l'ensemble de la zone d'étude et la ligne colorée en pointillés fait référence aux quatre saisons d'occurrence des sécheresses.

3.3 Les événements de sécheresse hydrologique avec une grande étendue spatiale sont plus sévères que les événements localisés.

Les résultats du modèle linéaire mixte ont identifié un lien significatif entre l'étendue spatiale des événements de sécheresse et leur sévérité (Tableau 3.2). En moyenne, les épisodes étendus (étendue spatiale > 90 %) étaient près de deux fois (1,9 fois) plus graves que les épisodes localisés (étendue spatiale < 10 %; figure 3.2). Malgré cette tendance, une variabilité considérable subsiste, avec certains événements très sévères (sévérité > 10) possédant une étendue spatiale de moins de 25 %. Les sécheresses débutant à l'hiver étaient caractérisées par une sévérité moindre et aucune différence significative n'a été observée pour les autres saisons.

Tableau 3.2 Paramètres de régression estimés, erreurs types, valeurs z, valeurs p et intervalles de confiance à 95 % du modèle linéaire mixte évaluant l'influence de l'étendue spatiale et de l'occurrence sur la sévérité des sécheresses hydrologiques associées aux eaux de surface. Les valeurs estimées de la variance (σ) pour $\sigma_{IDbassin}$ et $\sigma_{année}$ sont respectivement de 0,018 et 0,031. La valeur R^2 estimée est de 0,37 ($n = 2864$).

	Paramètre estimé	Intervalle de confiance 95 %	Erreur standard	Valeur z	Valeur p
(Intercept)	1,305	[1,228; 1,384]	0,040	32,78	< 0,001
Étendue spatiale	0,782	[0,729; 0,835]	0,027	28,86	< 0,001
Occurrence : Automne	0,187	[0,122; 0,251]	0,033	5,70	< 0,001
Occurrence : Printemps	0,118	[0,056; 0,180]	0,032	3,71	< 0,001
Occurrence : Été	0,172	[0,109; 0,234]	0,032	5,36	< 0,001

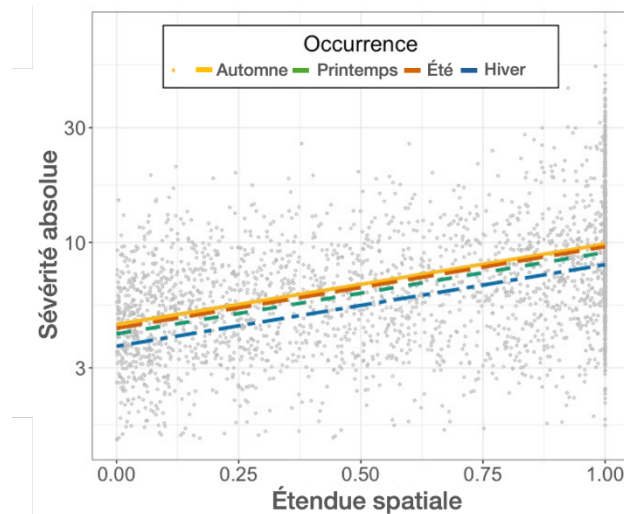


Figure 3.2 Relation entre l'étendue spatiale des sécheresses (proportion du réseau hydrographique touchée par la sécheresse pour un événement donné) et leur sévérité (somme des valeurs absolues de SSI pendant l'événement) selon la saison d'occurrence. La sévérité est représentée sur l'axe Y à l'aide d'une échelle logarithmique (logarithme naturel) ($e^1 \sim 3$, $e^2 \sim 10$, $e^3 \sim 30$).

3.4 L'étendue temporelle et spatiale des sécheresses hydrogéologiques

La figure 3.3 présente 330 épisodes de sécheresse des eaux souterraines enregistrés dans 66 puits du sud du Québec entre 2012 et 2021. 164 épisodes ont été enregistrés dans des aquifères à nappe libre (32 puits) et 166 dans des aquifères captifs (34 puits). En 2021, une sécheresse météorologique importante a entraîné une sécheresse hydrogéologique ayant touché la majorité du réseau de mesure, sans distinction apparente entre les aquifères à nappe libre et à nappe captive. On observe également la présence de sécheresses hydrogéologiques en 2013, 2014, 2015 et 2020, années au cours desquelles le pourcentage de piézomètres touchés par des sécheresses météorologiques oscille entre 30 et 50 % du réseau.

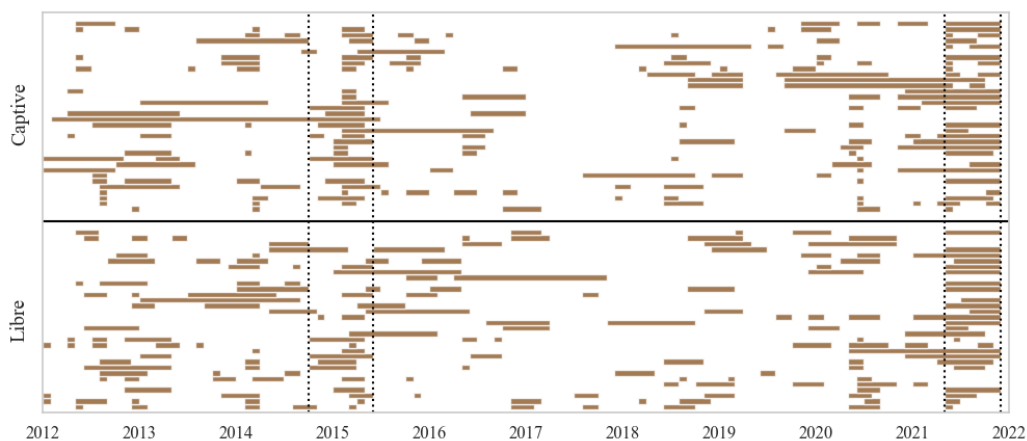


Figure 3.3 Chronologie des épisodes de sécheresse des eaux souterraines identifiés par le SGI d'un mois (SGI-1).

3.5 Variation saisonnière des sécheresses hydrogéologiques

Pour chaque mois, tout au long de la période d'étude, la couverture de sécheresse, définie comme le pourcentage de puits en état de sécheresse dans deux aquifères, a été calculée (Figure 3.4). Les sécheresses d'eaux souterraines les plus importantes se sont produites en 2021, avec une couverture de sécheresse dépassant 65 % dans les aquifères captifs et libres (Figure 3.4a). Une forte concordance temporelle a été observée dans la couverture de sécheresse mensuelle entre les deux types d'aquifères (ρ de Spearman = 0,73, $p < 0,01$). Bien que les deux types d'aquifères présentent une variabilité saisonnière dans la couverture des sécheresses (Figure 3.4 b), aucune saison n'a montré de différence statistiquement significative entre les types d'aquifères. L'interprétation visuelle suggère que les aquifères libres pourraient connaître une couverture de sécheresse médiane légèrement plus élevée dans le DJF et le SON par rapport au MAM et au JJA, bien que ces différences ne soient pas statistiquement confirmées.

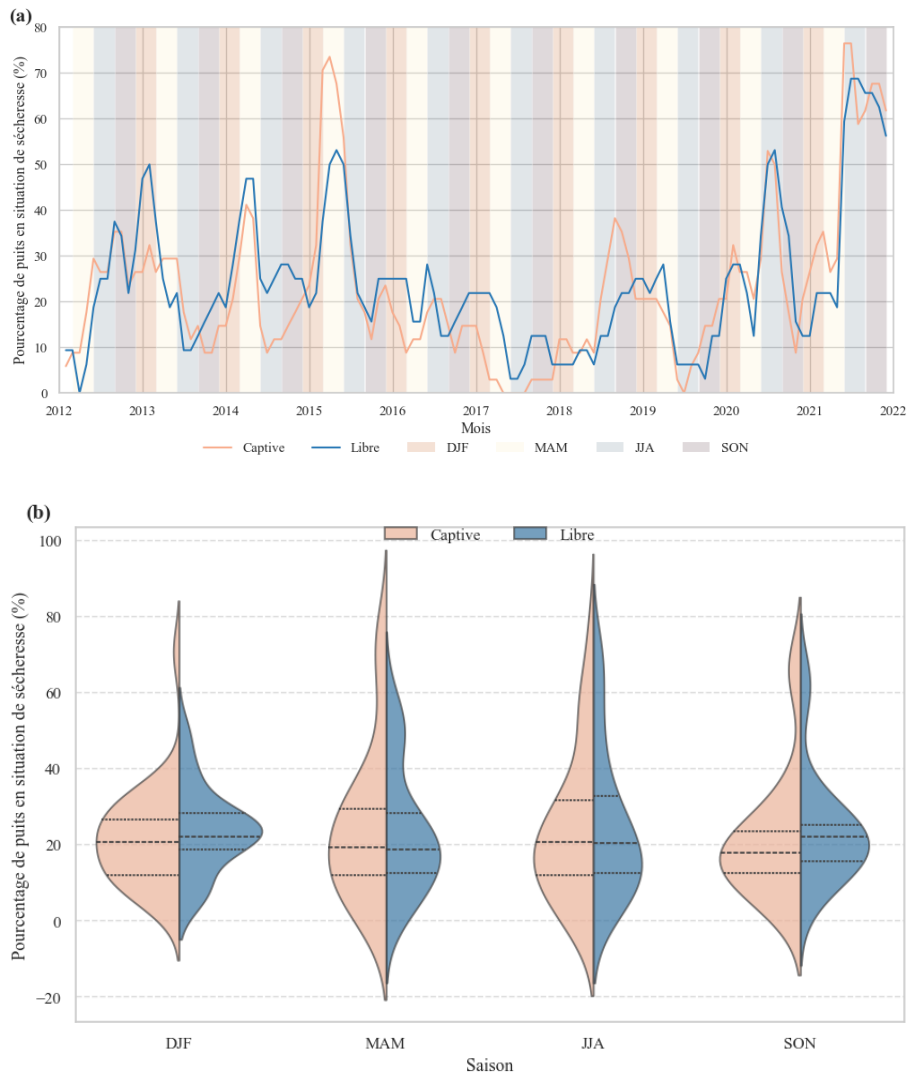


Figure 3.4 la couverture de sécheresse, définie comme le pourcentage de puits en sécheresse dans deux types d'aquifères (a) chaque mois et (b) à différentes saisons. DJF = décembre-janvier-février, MAM = mars-avril-mai, JJA = juin-juillet-août, SON = septembre-octobre-novembre.

3.6 Description statistique des sécheresses hydrogéologiques

Le Tableau 3.3 montre l'ensemble des caractéristiques calculées à partir des SGI, incluant la durée, l'intensité et la sévérité, pour les aquifères confinés et les aquifères en nappe libre. Pour les aquifères en nappe libre, la durée et la sévérité médianes varient entre 4 et 6 mois et entre 4,6 et 7,2. Pour les aquifères en nappe captive, la durée et la sévérité médianes varient entre 3 et 5 mois et entre 4,0 et 7,1. Malgré ce qui serait attendu, les résultats du test U de Mann-Whitney n'ont révélé aucune différence statistiquement significative (Durée : $U = 13\ 563$, $p = 0,280\ 8$; Sévérité : $U = 14\ 902$, $p = 0,687\ 2$; Intensité : $U = 13\ 100$, $p = 0,115\ 0$) entre les deux types d'aquifère.

Le tableau 3.3 résume les caractéristiques saisonnières et annuelles des épisodes de sécheresse des eaux souterraines dans les aquifères captifs et libres du sud du Québec. En moyenne, les puits des aquifères libres ont connu des sécheresses plus fréquentes (5,34 épisodes par décennie) que ceux des aquifères captifs (5 épisodes par décennie), particulièrement au printemps (MAM), avec une moyenne de 1,66 épisode par décennie.

Tableau 3.3 Caractéristiques des épisodes de sécheresse des eaux souterraines à l'échelle annuelle et saisonnière.

Aquifère typique	Période	Nombre moyen de sécheresses par puits (sur une durée de 10 ans)	Durée (mois)			Sévérité		
			Médian	Moyenne	CV	Médian	Moyenne	CV
Captive	Annuel	5,00	4	6	0,89	4,87	7,93	0,99
	MAM	1,41	4	5	0,62	4,56	7,13	0,95
	JJA	1,12	3	5	0,81	4,00	6,49	0,93
	SON	1,12	5	7	0,76	7,05	9,83	0,87
	DJF	1,35	4	6	1,07	5,15	8,37	1,09
Libre	Annuel	5,34	5	5	0,64	5,49	7,45	0,84
	MAM	1,66	5	6	0,72	5,48	8,43	0,92
	JJA	1,28	4	5	0,54	4,64	5,91	0,64
	SON	1,12	6	6	0,39	7,02	6,94	0,48
	DJF	1,28	4	6	0,74	5,16	8,17	0,93

En ce qui concerne la durée des sécheresses, les aquifères captifs ont présenté une plus grande variabilité, particulièrement en hiver (DJF), avec un coefficient de variation (CV) de 1,07, comparativement à 0,74 pour les aquifères en nappe libre. En revanche, les aquifères en nappe libre ont affiché des durées plus stables toutes saisons confondues ($CV \leq 0,74$), ce qui suggère des réponses hydrologiques plus constantes. La sévérité des sécheresses a aussi varié considérablement selon le type d'aquifère. Les aquifères captifs ont montré des valeurs de sévérité moyenne plus élevées (par exemple, 9,8 dans le SON), ainsi qu'une plus grande variabilité interévénement (CV systématiquement $\geq 0,87$). Les aquifères libres ont eu une sévérité moyenne légèrement inférieure, mais ont montré une dispersion moindre, en particulier en automne (SON) où le CV de sévérité est tombé à 0,48. Ces résultats suggèrent que les aquifères captifs sont plus sujets à des sécheresses sporadiques, mais potentiellement extrêmes, en particulier pendant les saisons froides, tandis que

les aquifères libres connaissent des épisodes de sécheresse plus fréquents et temporellement stables, en particulier pendant la saison de croissance.

3.7 Cartographie de la sévérité des sécheresses hydrogéologiques

La moyenne, le maximum et l'écart-type de la sévérité des épisodes de sécheresse des eaux souterraines dans les puits du sud du Québec ont été cartographiés. Comme le montre la figure 3.5, les puits situés dans la partie centrale dans la zone d'étude ont tendance à connaître des sécheresses plus intenses en moyenne, comme l'indiquent des valeurs moyennes et maximales de sévérité plus élevées. De plus, ces zones présentent également une plus grande variabilité de la sévérité des sécheresses, comme en témoignent des valeurs d'écart-type élevées. En revanche, les puits situés dans les régions de l'est présentent généralement une sévérité et une variabilité plus faibles.

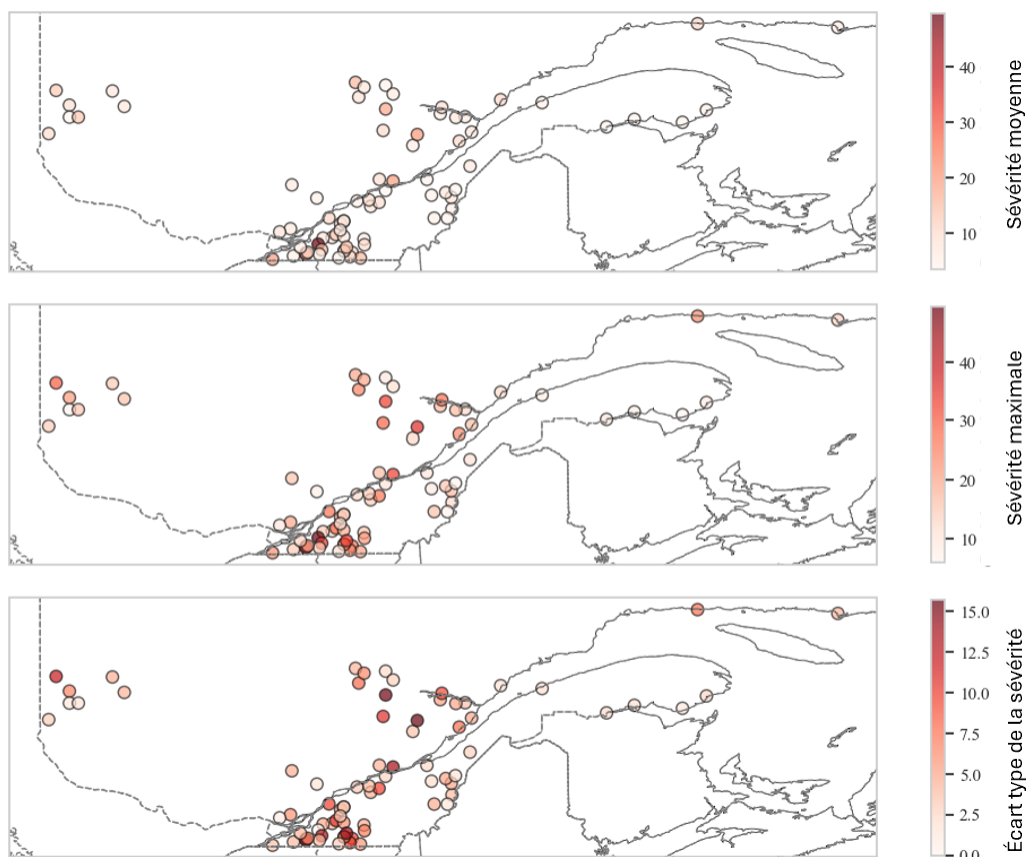


Figure 3.5 Répartition spatiale des caractéristiques de la sévérité de la sécheresse des eaux souterraines dans les puits du sud du Québec incluant la sévérité moyenne, maximale et l'écart type. Les analyses ont été réalisées sur une période commune de 10 ans.

3.8 Détection des événements de sécheresse hydrologiques à partir d'une analyse de sensibilité

L'étendue des sécheresses peut varier de manière considérable d'un événement à l'autre, ce qui a une incidence importante sur la capacité de détecter des sécheresses à l'échelle du bassin versant

à partir d'une seule station hydrométrique. En considérant uniquement les débits du tronçon le plus aval d'un bassin versant, une sous-estimation du nombre de sécheresses a été observée, avec une moyenne de 9 événements (min = 1, max = 27) manqués par bassin versant (Figure 3.6). Cela représente en moyenne 37 % (min = 3 %, max = 78 %) des événements non détectés. En excluant les événements observés à un seul tronçon par bassin versant, une moyenne de 7 événements était manquée par bassin versant, ce qui correspond en moyenne à 30 % (min = 0 %, max = 76 %) des événements non détectés. La sévérité médiane des événements est passée de -6,6 en considérant tous les tronçons d'un bassin versant à -7,4 en considérant seulement le tronçon le plus en aval alors que l'intensité est passée de -69,2 à -75,0. Cela suggère que, bien que les événements non détectés aient souvent été modérés, certains étaient néanmoins très sévères. Des conclusions ont été tirées en effectuant un échantillonnage aléatoire du tronçon considéré : en moyenne, 35 % (min = 0 %, max = 84 %) des événements n'ont pas été détectés, ce qui correspond à une moyenne de 9 (min = 0, max = 28) événements manqués par bassin versant.

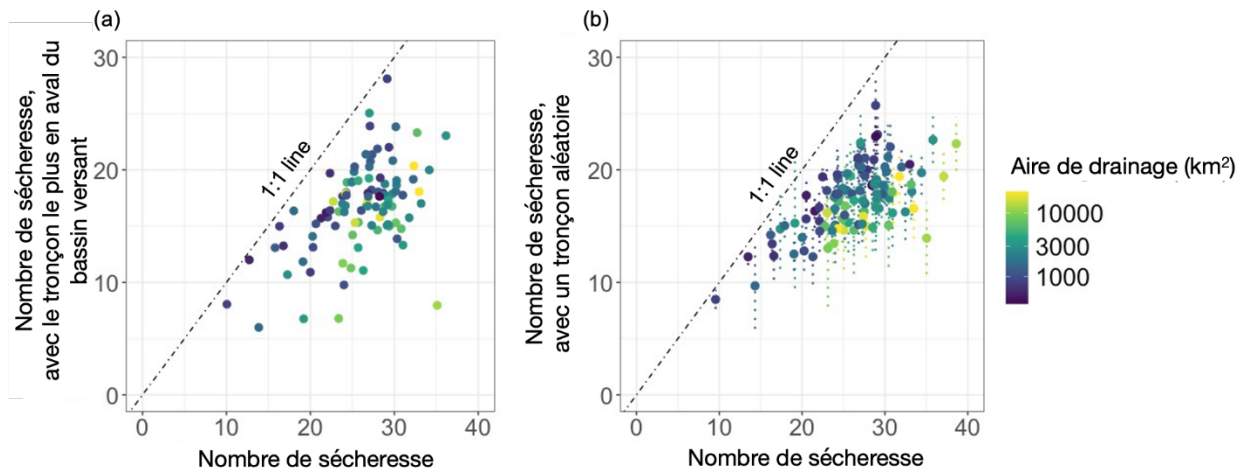


Figure 3.6 Relation entre le nombre d'événements de sécheresse identifiée par bassin versant lorsque tous les tronçons disponibles sont utilisés (axe des X) et lorsque (a) seul le tronçon le plus en aval d'un bassin versant est utilisé ou (b) un tronçon sélectionné au hasard est utilisé. Dans (b), les points et les lignes pointillées représentent la moyenne et l'écart-type du nombre d'événements de sécheresse identifiée à partir de chaque échantillonnage. La couleur des points de données représente l'aire de drainage du bassin versant.

En augmentant progressivement le nombre de tronçons échantillonnés aléatoirement par bassin versant, le nombre de tronçons nécessaires pour détecter tous les événements de sécheresse a été estimé pour chaque bassin versant (Figure 3.7). Dans les bassins versants de taille moyenne (< 2500 km²), la plupart des événements étaient détectés en considérant 1,0 tronçon par 100 km² d'aire de drainage. Les bassins versants de grande taille (> 2500 km²) nécessitaient une densité d'échantillonnage moindre et moins de 0,3 tronçon par 100 km² était suffisant pour détecter la plupart des événements. Réduire ces densités de suivi de moitié se traduisait par, en moyenne, 15 % d'événements non détectés dans les bassins versants de grande moyenne et 20 % dans les bassins versants de grande taille. Lorsque la densité de surveillance était réduite à 10 %, environ 40 % des événements de sécheresse n'étaient pas détectés, quelle que soit la taille du bassin versant. Le réseau de surveillance hydrométrique au Québec représente actuellement 1 à 28

stations de mesure par bassin versant avec une moyenne de 3.5, ce qui se traduit en des densités d'échantillonnage de 0.005 à 0.77 tronçon par 100 km². Selon les résultats obtenus, la couverture du réseau d'observation québécois omettrait en moyenne la détection de 22% des événements de sécheresses hydrologiques par bassin versant, compte tenu de la localisation de la station, en allant maximale jusqu'à une omission de 84%.

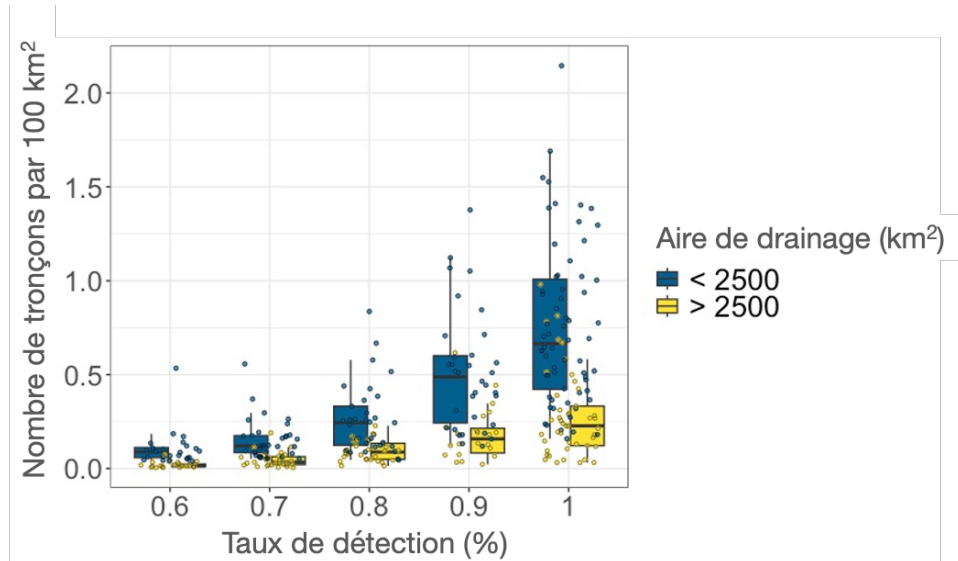




Figure 3.7 Proportion d'événements de sécheresse détectés à l'échelle du bassin versant en utilisant un nombre croissant de tronçons sélectionnés au hasard. L'axe des x (taux de détection de la sécheresse) représente le rapport entre le nombre d'événements détectés à l'aide d'un nombre réduit de tronçons et le nombre total d'événements détectés à l'aide de tous les tronçons. L'axe des y représente le nombre de tronçons par 100 km² d'aire de drainage du bassin versant.

OBJECTIF 1 – PRINCIPALES CONCLUSIONS

<p>Eaux de surface</p> 	<ul style="list-style-type: none">• Les indices normalisés permettent de décrire les sécheresses hydrologiques de manière comparable entre les bassins versants.• Entre 1970 et 2022, 2864 sécheresses ont été identifiées dans 109 bassins versants, représentant une moyenne de 26 sécheresses par bassin. Les sécheresses ont duré en moyenne 8 mois et leur sévérité moyenne était de -8,1.• L'étendue spatiale de la sécheresse varie considérablement d'un événement à l'autre, avec en moyenne 61 % du réseau hydrographique d'un bassin versant impacté lors d'un événement.• Les événements de sécheresse avec une grande étendue spatiale sont plus sévères que les événements localisés.• Plusieurs sécheresses hydrologiques ne sont pas détectées lorsqu'on se fie à un seul site de suivi. Le réseau de surveillance actuelle ne détecte qu'en moyenne 78% des sécheresses hydrologiques, soulignant la plus-value d'un jeu de données de débit spatialisé.
<p>Eaux souterraines</p> 	<ul style="list-style-type: none">• Les sécheresses hydrogéologiques survenues entre 2012 et 2021 dans le sud du Québec ont touché de manière comparable les aquifères à nappe libre et captive, avec un impact particulièrement généralisé en 2021.• Une forte cohérence temporelle des épisodes de sécheresse des eaux souterraines a été observée dans les aquifères captifs et libres, en particulier lors de sécheresses régionales généralisées.• Bien que les aquifères captifs présentent des sécheresses plus variables et potentiellement plus sévères, notamment en hiver. Aucune différence statistiquement significative n'a été constatée dans les caractéristiques de la sécheresse (durée, sévérité et intensité) entre les types d'aquifères.

4. Résultats Objectif 2: Identifier les déterminants météorologiques des sécheresses hydrologiques

4.1 Les sécheresses associées aux eaux de surface

4.1.1 Plus de la moitié des sécheresses hydrologiques sont classées comme reliées à la neige.

Selon la classification des sécheresses hydrologiques (Figure 2.5), les sécheresses liées des à la neige représentaient 54 % des événements identifiés entre 1970 et 2022 dans les bassins versants du Québec méridional (Figure 4.1). De plus, 12 % des événements ont été déclenchés par un déficit pluviométrique, mais prolongés par la présence de neige (**sécheresse de transition pluie-neige**). Ainsi, les processus reliés à la neige comme l'accumulation et la fonte, ressortent comme des déterminants météorologiques importants des sécheresses hydrologiques dans le Québec méridional.

Dans la zone d'étude, les **sécheresses dues à un déficit pluviométrique**, les **sécheresses d'hiver froid** et les **sécheresses de fonte** étaient les plus fréquentes, représentant 24, 21 et 17 % des événements identifiés, respectivement (figure 4.1). Les sécheresses pluviométriques étaient le type le plus dominant dans les régions de l'Outaouais, du Saguenay ainsi que le sud du St-Laurent, alors que les sécheresses d'hiver froid étaient plus fréquentes sur la côte nord et en Gaspésie (figure 4.2a). Les **sécheresses d'hiver chaud** constituaient le type de sécheresse le moins fréquent (4 % des événements), suivies des **sécheresses atmosphériques** et des **sécheresses composites** représentant 10 et 12 % des événements. Parmi toutes les sécheresses liées à la neige, 45 % étaient dues à des anomalies temporelles dans les processus neigeux (**sécheresse d'hiver chaud**, **sécheresse d'hiver froid**) et non dues à un déficit dans le couvert de neige au sol. Les différents types de sécheresse étaient très cependant similaires au niveau de leurs caractéristiques, c'est-à-dire leurs durées, sévérités, intensités et étendues spatiales. Des analyses de variances et de classification hiérarchique n'ont révélé aucune différence ou de groupement significatif.

L'occurrence des sécheresses hydrologiques variait selon les saisons, avec le plus grand nombre d'événements répertoriés au printemps (37 %), alors que les événements ayant lieu l'été, l'automne et l'hiver représentaient plutôt 26 %, 21 % et 16 % des événements, respectivement. Au printemps, les sécheresses liées à la neige représentaient 77 % des événements (Figure 4.1). Les sécheresses liées à la pluie représentaient 64 % des sécheresses pendant l'été. À l'automne, 70 % des sécheresses étaient liées à la pluie, tandis que les sécheresses liées à la neige étaient les plus fréquentes en hiver, représentant 64 % des sécheresses hivernales. Ces tendances saisonnières dans l'occurrence des types de sécheresse étaient assez homogènes entre les bassins versants à l'échelle du Québec méridional durant l'été, mais plus hétérogènes durant les autres saisons (figure 4.2b-e).

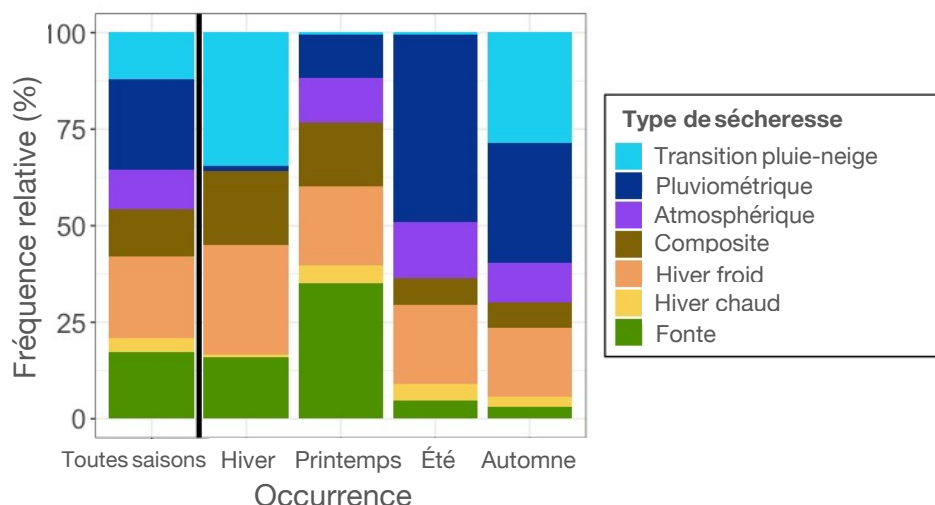


Figure 4.1 Répartition des types de sécheresse hydrologique pour les événements répertoriés dans les 109 bassins versants du Québec méridional entre 1970 et 2022. Les sécheresses liées à la pluie sont catégorisées en sécheresse de transition pluie-neige, sécheresse atmosphérique ou sécheresse due à un déficit pluviométrique. Les sécheresses liées à la neige sont catégorisées en sécheresse de fonte, sécheresse d’hiver chaud, sécheresse d’hiver froid, sécheresse composite.

4.1.2 Les indices météorologiques considérant la neige sont fortement corrélés au débit.

Pour les 109 bassins versants, l’indice normalisé de débit (SSI, période d’accumulation de 3 mois) était le plus fortement corrélé avec les indices météorologiques normalisés considérant la neige, soit le SMRI et le SWBI et ce, pour toutes les périodes d’accumulation considérées (Figure 4.3). De manière générale, la corrélation entre le SSI et les indices météorologiques était plus faible à une période d’accumulation de 1 mois, et ce, pour tous les indices. La plus forte corrélation entre le SSI et les indices météorologiques a pu être observée pour le SWBI à des périodes d’accumulation de 3 et 6 mois, avec des moyennes respectives de 0,58 et 0,57. Les indices météorologiques avec une période d’accumulation de 3 mois ont montré la corrélation la plus élevée avec le SSI dans 66 des 109 bassins versants (61 %), tandis que la période de 6 mois était la plus élevée dans les 43 bassins versants restants (39 %).

Pour valider le choix du SWBI comme indice d’intérêt pour expliquer le SSI, la corrélation entre les deux indices pour l’ensemble de la série temporelle (1970-2022) ainsi que par mois (Figure 4.4) a été évalué. Pour 105 des 109 bassins, le SSI présentait la plus forte corrélation avec le SWBI en comparaison aux autres indices météorologiques (Figure 4.3). Au cours de la plupart des mois, plus de 75 % des bassins versants présentaient la corrélation la plus forte avec le SWBI, sauf de février à mai, où cette proportion diminuait à environ 50 % étant donné la bonne performance du SMRI. De manière générale, moins de 25 % des bassins versants présentaient leur corrélation la plus élevée avec le SPEI ou le SPI. Ainsi, le SWBI compilé avec une période d’accumulation de 3 mois apparaît comme un indice tout indiqué pour étudier la propagation des sécheresses

météorologiques en sécheresse hydrologique. Le choix de cet indice souligne également l'importance des processus liés à la neige comme déterminants des sécheresses hydrologiques.

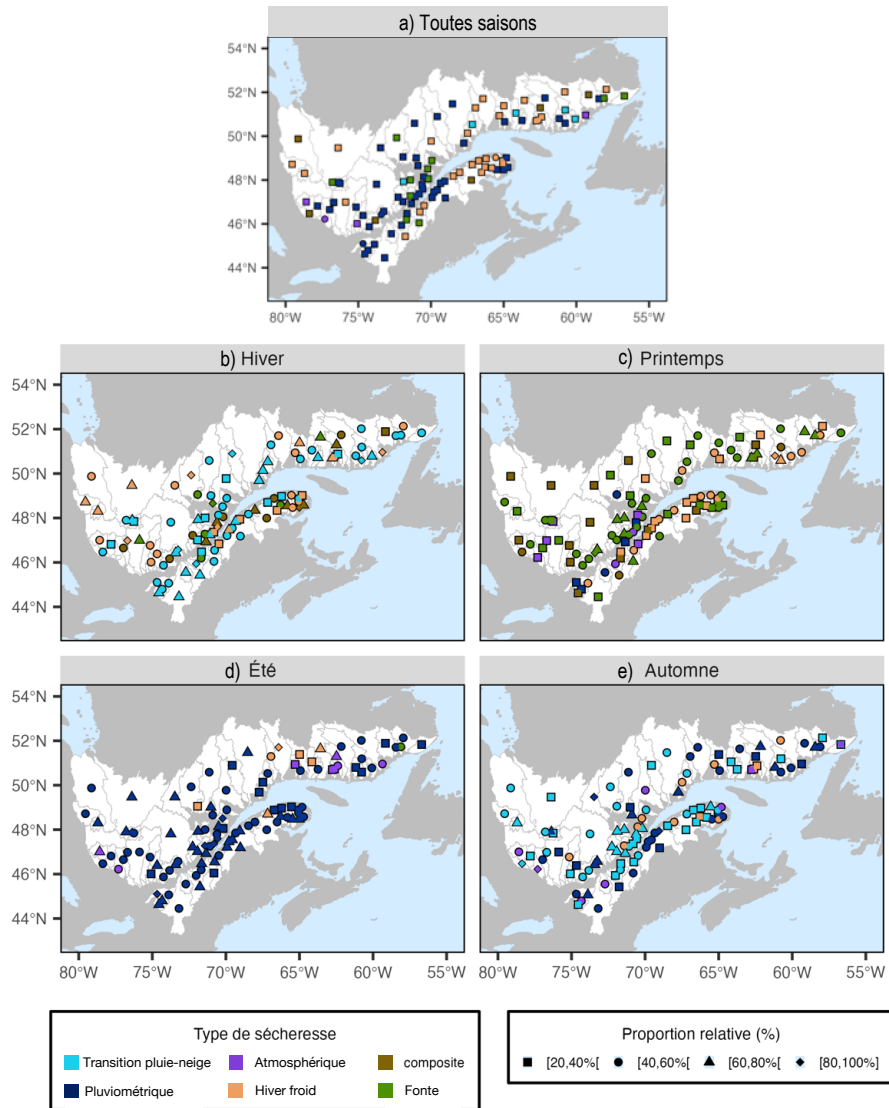


Figure 4.2. Types de sécheresse hydrologique dominants par bassin versant à l'échelle du Québec méridional. Chaque point identifie le type plus fréquent par bassin versant par sa couleur, et la forme du point caractérise la proportion relative du type dominant. Le type dominant est représenté pour a) toutes saisons confondues puis b-e) par saison.

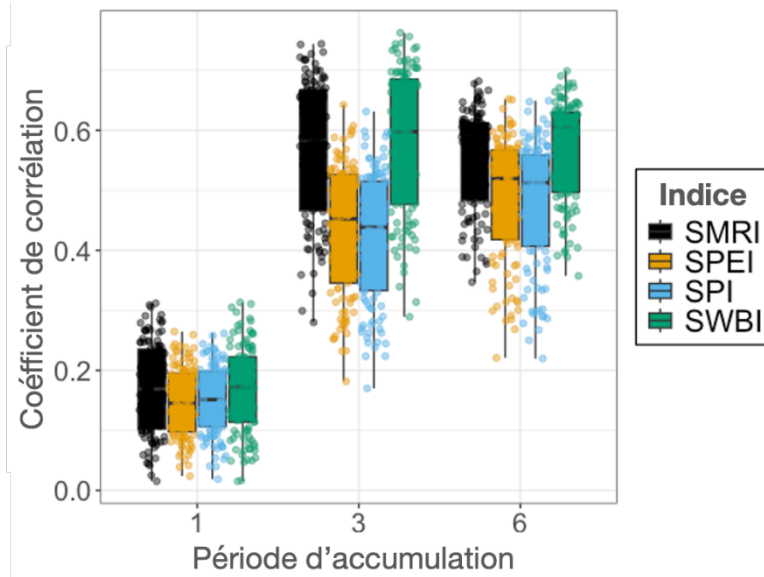


Figure 4.3 Corrélation entre l'indice normalisé de débit (SSI, période d'accumulation de 3 mois) et différents indices météorologiques pour différentes périodes d'accumulation (1, 3 et 6 mois). Les indices météorologiques considérés sont : l'indice normalisé de précipitation (SPI), l'indice normalisé de précipitation-évaporation (SPEI), l'indice normalisé de fonte et ruissellement (SMRI) et l'indice normalisé de bilan hydrique (SWBI). Les points représentent les 109 bassins versants de la zone d'étude.

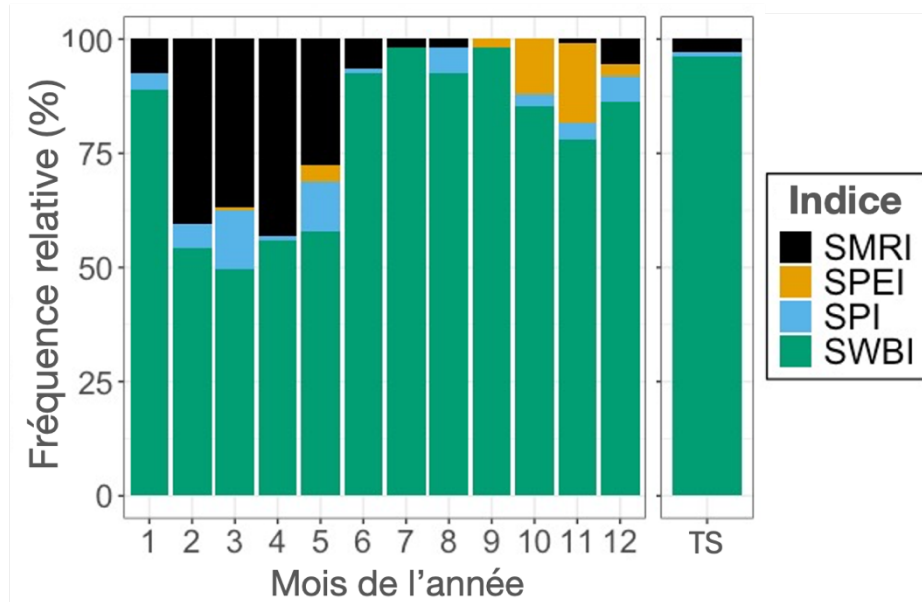


Figure 4.4 Compilation des indices météorologiques présentant la plus forte corrélation avec l'indice normalisé de débit (SSI, période d'accumulation de 3 mois) pour les 109 bassins versants pour chaque mois ainsi que pour l'ensemble de la série temporelle de 1970 à 2022 (TS). Les indices météorologiques considérés sont : l'indice normalisé de précipitation (SPI), l'indice normalisé de précipitation-évaporation (SPEI), l'indice normalisé de fonte et ruissellement (SMRI) et l'indice normalisé de bilan hydrique (SWBI).

4.1.3 Les indices météorologiques considérant la neige décrivent bien la propagation de sécheresse météorologique à hydrologique.

Le tableau 4.1 montre la corrélation entre les caractéristiques (durée, sévérité, intensité) des périodes sèches d'un point de vue hydrologique et les sécheresses hydrologiques. Le SWBI présentait les plus fortes corrélations pour la durée (0,93 pour les périodes d'accumulation de 1 et 3 mois) et la sévérité (0,75 à 1 mois et 0,76 à 3 mois). De plus, le tableau 4.1 décrit le taux d'appariement entre les périodes sèches d'un point de vue météorologique et les sécheresses hydrologiques ainsi que le taux de propagation, soit la proportion de périodes sèches ayant déclenché une sécheresse hydrologique. Le SWBI a atteint le taux d'appariement le plus élevé (96 % à 1 mois) et le taux de propagation le plus élevé (53 % à 1 mois). Le SMRI a également montré une bonne performance, notamment en termes de taux d'appariement (95 % pour une période d'accumulation de 1 mois). Au contraire, le SPI et le SPEI ont affiché des performances légèrement inférieures, notamment par leurs taux d'appariement plus faibles. Les taux de propagation associés à ces indices étaient également inférieurs à ceux des indices considérant la neige (SMRI et SWBI).

Tableau 4.1 Corrélation entre les caractéristiques (durée, sévérité, intensité) des périodes sèches d'un point de vue météorologique et des sécheresses hydrologiques ainsi que les caractéristiques de propagation des sécheresses météorologiques en sécheresse hydrologique. Pour chaque métrique, la moyenne et l'écart-type pour les 109 bassins versants sont présentés. Dans chaque colonne, l'indice le plus performant (valeur la plus élevée) a été surligné en vert, tandis que le moins performant (valeur la plus faible) a été surligné en orange. Plusieurs cellules sont surlignées dans la même colonne si les valeurs sont identiques.

Période d'accumulation	Indice	Durée corrélation	Intensité corrélation	Sévérité corrélation	Taux appariement (%)	Taux propagation (%)
1 mois	SPI	0.92 ± 0,05	0.23 ± 0,22	0.75 ± 0,16	88 ± 6,2	51 ± 13
	SPEI	0.92 ± 0,05	0.23 ± 0,21	0.75 ± 0,16	87 ± 6,2	50 ± 14
	SMRI	0.91 ± 0,05	0.26 ± 0,18	0.74 ± 0,15	95 ± 4,6	53 ± 13
	SWBI	0.93 ± 0,04	0.20 ± 0,18	0.76 ± 0,15	96 ± 4,2	53 ± 12
3 mois	SPI	0.87 ± 0,09	0.24 ± 0,25	0.71 ± 0,17	67 ± 9,3	41 ± 12
	SPEI	0.88 ± 0,09	0.26 ± 0,22	0.72 ± 0,16	66 ± 9,3	42 ± 12
	SMRI	0.90 ± 0,06	0.28 ± 0,20	0.73 ± 0,15	78 ± 8,9	44 ± 11
	SWBI	0.93 ± 0,06	0.31 ± 0,22	0.76 ± 0,15	79 ± 9,9	45 ± 11
6 mois	SPI	0.85 ± 0,13	0.20 ± 0,32	0.70 ± 0,23	42 ± 9,1	31 ± 9,1
	SPEI	0.86 ± 0,12	0.25 ± 0,33	0.74 ± 0,19	43 ± 9,3	32 ± 9,7
	SMRI	0.84 ± 0,15	0.35 ± 0,29	0.68 ± 0,23	46 ± 9,5	31 ± 8,2
	SWBI	0.86 ± 0,13	0.32 ± 0,27	0.69 ± 0,21	47 ± 9,5	31 ± 7,5

4.1.4 Probabilité de propagation des sécheresses météorologiques vers des sécheresses hydrologiques selon le SWBI

Selon le tableau 4.1, le SWBI à une période d'accumulation de 1 mois a généralement donné les meilleurs résultats pour décrire la propagation des conditions météorologiques sèches en sécheresse hydrologique, avec les taux d'appariement et de propagation les plus élevés. Par conséquent, cet indice a été utilisé pour modéliser la probabilité d'occurrence ainsi que la sévérité des sécheresses hydrologiques. Selon le modèle logistique, la sévérité des périodes sèches ainsi que la saison d'occurrence avaient un effet significatif sur la probabilité qu'une période sèche d'un point de vue météorologique se propage en sécheresse hydrologique. Le modèle logistique présentait une bonne performance. Tout d'abord, l'aire sous la courbe du modèle logistique est de 0,97, en considérant qu'une valeur de 1 indique une discrimination parfaite entre la présence/absence de propagation vers une sécheresse hydrologique. Pour évaluer la performance du modèle logistique, un seuil de probabilité optimal de 0,20 a été retenu en maximisant la statistique J de Youden. Ainsi, toute période sèche pour laquelle le modèle prédit une probabilité de propagation en sécheresse hydrologique égale ou supérieure à 20 % est considérée comme s'étant effectivement propagée en sécheresse hydrologique. Cette approche est fréquente dans l'application des modèles logistiques lorsque les données présentent une répartition déséquilibrée des classes. Cette validation a donné une précision de 0,91, une sensibilité (rappel) de 0,92, une spécificité de 0,91 et un score F1 de 0,83. La précision était significativement supérieure au taux d'absence d'information de 0,75 selon un test binomial unilatéral.

La figure 4.5 montre la probabilité qu'une période sèche d'un point de vue météorologique (période où $SWBI < 0$) de sévérité variable se propage en sécheresse hydrologique. Pour des périodes sèches de sévérité identique, les probabilités de propagation en une sécheresse hydrologique étaient toujours les plus élevées au printemps, suivies par l'été, l'automne et l'hiver. Une augmentation de la sévérité de la période sèche de 1 écart-type multiplie par 4,95 les chances de propagation vers une sécheresse hydrologique. Autrement dit, pour chaque augmentation de 1 écart-type de la sévérité d'une période sèche, la propagation vers une sécheresse hydrologique était environ 5 fois plus probable. Pour une sévérité donnée, les périodes sèches ayant lieu à l'automne et en hiver étaient respectivement 1,7 et 2,6 fois moins susceptibles de se propager en une sécheresse hydrologique que celles survenant en été. Les périodes sèches ayant lieu au printemps étaient 2,2 fois plus susceptibles de se propager en une sécheresse hydrologique que celles survenant en été. Toutes saisons confondues, la propagation en une sécheresse hydrologique était de 100 % lorsqu'une période sèche avec une sévérité absolue plus grande ou égale à 7,5 se produisait.

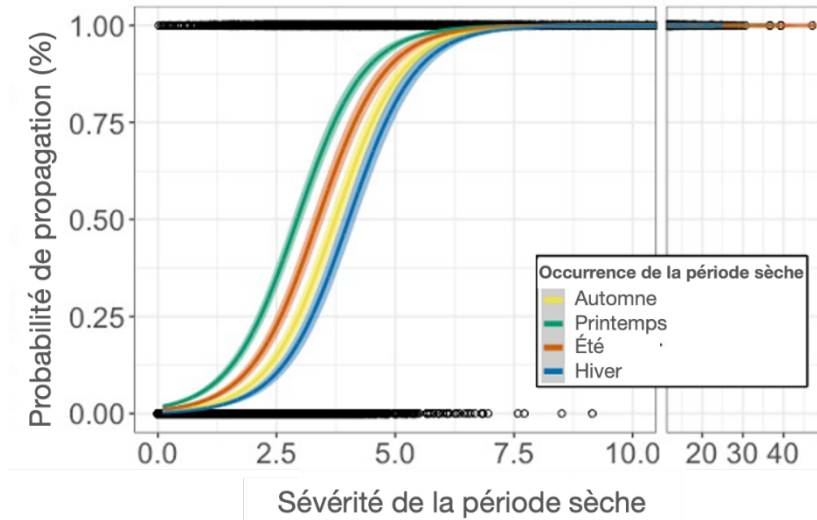


Figure 4.5 Modèle de régression logistique pour la première étape du modèle Hurdle montrant la probabilité qu'une période sèche d'un point de vue météorologique ($SWBI < 0$) se transforme en sécheresse hydrologique. Les courbes sont représentées pour chaque saison où survient une période sèche, la période estivale étant prise comme référence dans le modèle. Les zones ombragées indiquent les intervalles de confiance à 95 % du modèle.

La figure 4.6 montre la modélisation de la sévérité des sécheresses hydrologiques selon la sévérité des périodes sèches d'un point de vue météorologique (période où $SWBI < 0$) et la saison d'occurrence, lorsqu'une période sèche s'est effectivement transformée en sécheresse hydrologique. Selon le modèle GAM, la sévérité des périodes sèches ainsi que la saison d'occurrence avaient un effet significatif sur la sévérité des sécheresses hydrologiques. Le modèle GAM présentait une bonne performance et permettait d'expliquer 63 % de la variance observée. Le GAM a été ajusté 100 fois supplémentaires sur des sous-ensembles aléatoires composés de 70 % des données et les résultats n'ont pas indiqué de signes de surajustement, avec une variance moyenne expliquée de 65 % et un écart-type de 1,6 % pour les 100 exécutions.

De manière générale, la relation entre la sévérité de la période sèche et de la sécheresse hydrologique était linéaire lorsque la sévérité de la période sèche restait inférieure à 15, sauf en hiver (Figure 4.6). Pour cette plage de valeurs, le modèle GAM estime une pente proche de 1 et une ordonnée à l'origine de 1,97. Cela suggère qu'une période sèche s'est généralement propagée en une sécheresse hydrologique de sévérité similaire, avec une intensité supplémentaire d'environ 2 unités, jusqu'à atteindre une sévérité de 15 pour la période sèche. Au-delà de ce point, les différences saisonnières sont plus prononcées et l'incertitude du modèle augmente considérablement.

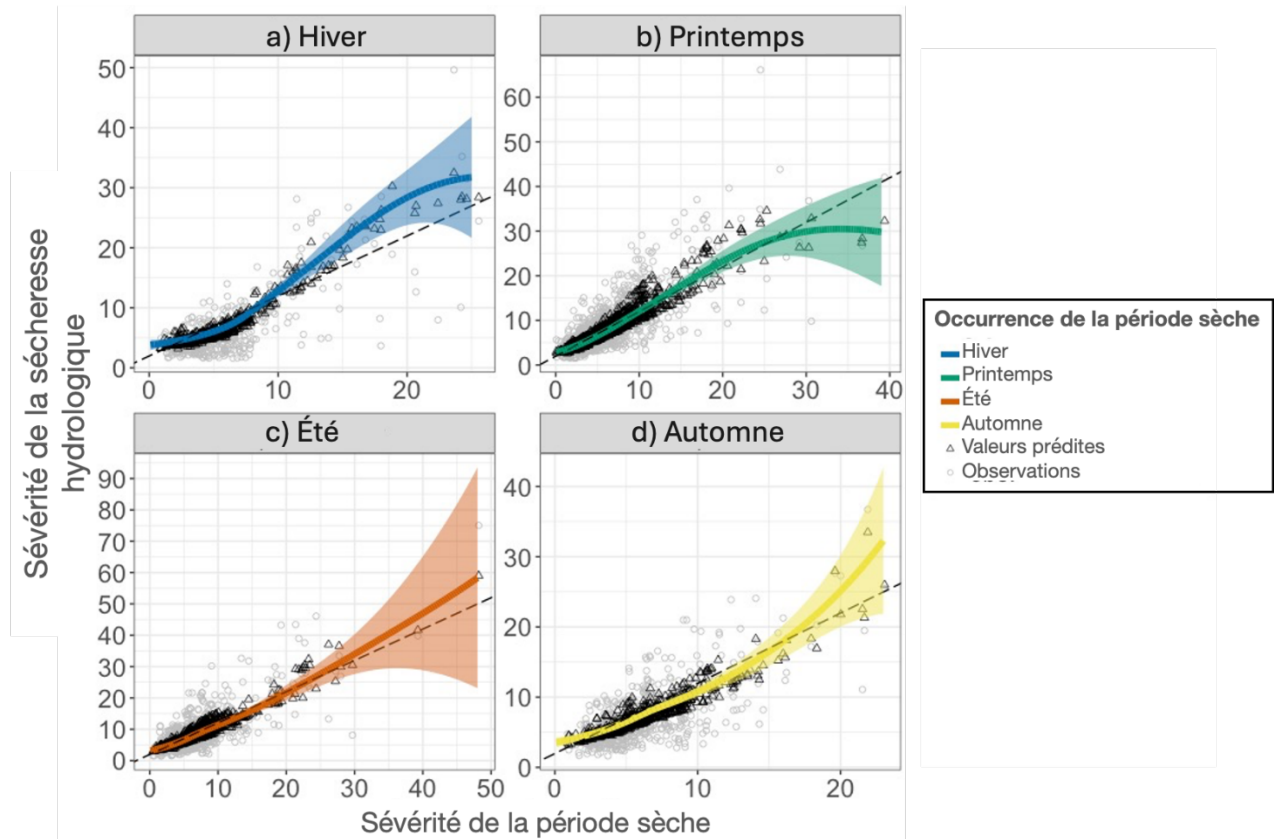


Figure 4.6 Modèle additif généralisé pour la deuxième étape du modèle Hurdle montrant la relation entre la sévérité de la période sèche d'un point de vue météorologique ($SWBI < 0$) et la sévérité de la sécheresse hydrologique, lorsqu'une période sèche s'est effectivement transformée en sécheresse hydrologique. Les zones ombragées indiquent les intervalles de confiance à 95 % du modèle. Les triangles noirs représentent les valeurs prédites par le modèle, tandis que les cercles gris représentent les observations.

4.2 Les sécheresses associées aux eaux souterraines

Afin d'identifier les déterminants météorologiques des sécheresses hydrogéologiques, un ensemble d'analyses statistiques a été réalisé. La section 4.2.1 présente l'effet des périodes d'accumulation sur les corrélations entre les indices normalisés, la section 4.2.2 est une analyse des différences temporelles entre les indices météorologiques et le SGI et la section 4.2.3 est une description temporelle de l'ensemble des sécheresses ainsi que des caractéristiques.

4.2.1 Effet de la période d'accumulation sur les corrélations entre SMI et SGI

L'effet de la période d'accumulation sur la corrélation entre SGI-1 et les différents indices météorologiques (SMI) en tenant compte des différents types d'aquifères est présenté dans la Figure 4.7. Tant pour les aquifères en nappe libre qu'en nappe captive, on observe une forte augmentation des corrélations entre SMI-X et SGI-1 lorsque les périodes d'accumulation passent de 1 mois à 3 mois.

Pour les aquifères en nappe libre, les coefficients de corrélation entre SGI-1 et SMI-X atteignent un pic à des périodes d'accumulation de 6 mois, avec des coefficients de corrélation médians atteignant 0,42 pour SPI, 0,42 pour SPEI et 0,49 pour SWBI.

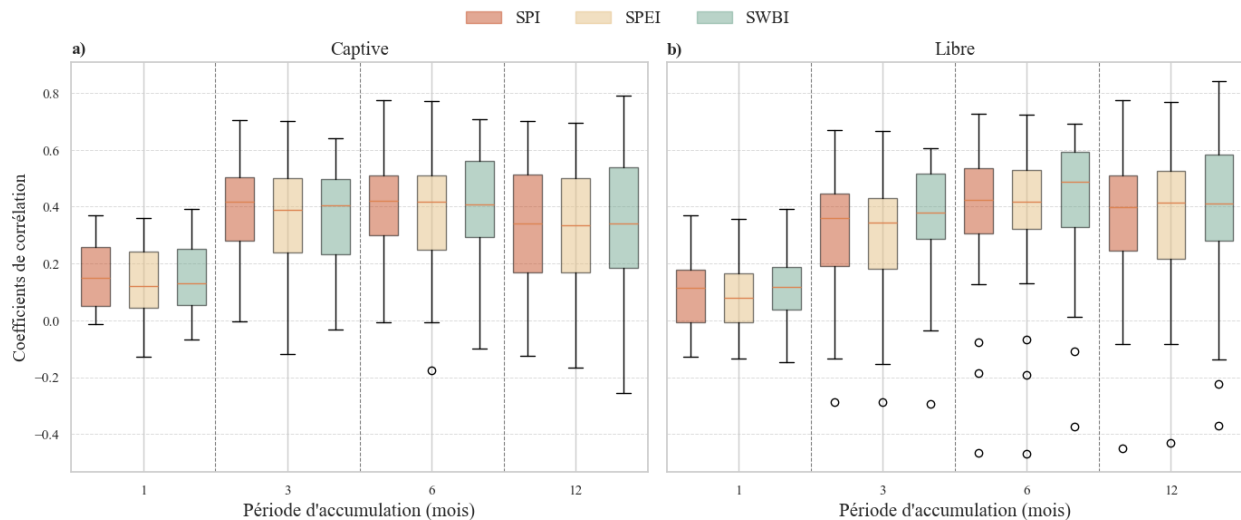


Figure 4.7 Corrélation entre les indices normalisés météorologiques et le SGI pour des périodes d'accumulation de 1, 3, 6 et 12 mois.

4.2.2 Corrélation croisée entre SMI et SGI

Influence du seuil d'apparition sur les caractéristiques des sécheresses

L'analyse de corrélation révèle des tendances distinctes dans la relation entre les indices de sécheresse météorologique (SPI, SPEI et SWBI) et les caractéristiques des sécheresses hydrogéologiques lorsque les seuils d'apparition sont modifiés

En ce qui concerne la durée et la sévérité, les trois indices ont montré des corrélations croissantes à mesure que le seuil d'apparition des événements de sécheresse météorologique devenait moins négatif. Les différences entre le SPI et le SPEI étaient relativement faibles, ce qui indique que les déficits pluviométriques et les fortes conditions d'évapotranspiration, qui sont fortement corrélés en périodes estivales, jouent un rôle important dans l'explication des caractéristiques de la sécheresse. En ce qui concerne l'intensité, les corrélations globales étaient plus faibles que celles des autres indices météorologiques. La corrélation plus faible de l'intensité met en évidence la

complexité des mécanismes de propagation de la sécheresse et le rôle des conditions hydrogéologiques locales.

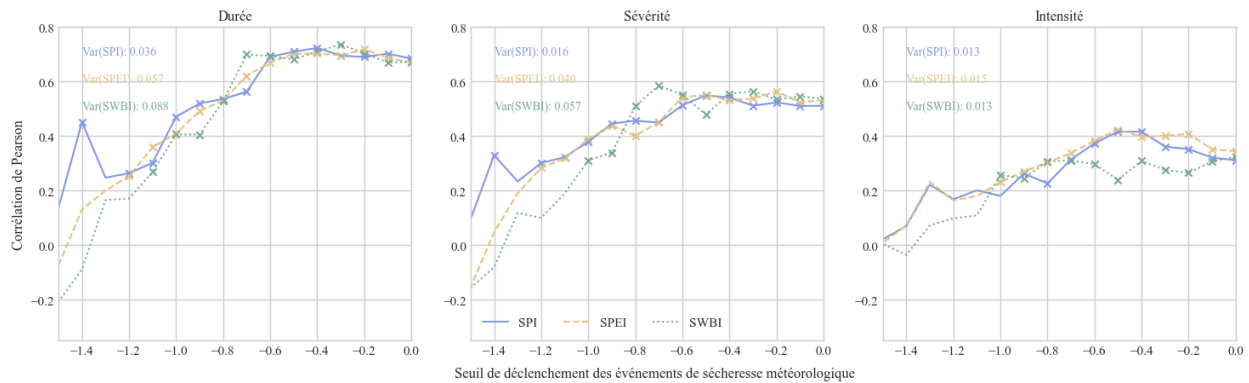


Figure 4.8 Coefficients de corrélation entre les attributs de la sécheresse des eaux souterraines (durée, sévérité et intensité) et les indices de sécheresse météorologique (SPI, SPEI, SWBI) pour une série de seuils d'apparition. Le seuil d'apparition définit la valeur de l'indice à partir de laquelle une sécheresse météorologique est considérée comme ayant commencé. Les marqueurs « x » indiquent des corrélations statistiquement significatives ($p < 0,05$). Chaque panneau correspond à une caractéristique différente de la sécheresse des eaux souterraines. Var (SPI) indique la variabilité de la corrélation entre le SPI et le SGI.

Analyse des délais de propagation

La figure 4.9 présente les délais de propagation entre SGI-1 et SMI-6, ces délais des propagations indiquant que SMI-6 survient avant SGI-1. Les distributions des délais des propagations dans les aquifères libres et captifs sont similaires, la plupart des valeurs se situant autour de 1 à 3 mois. Certains puits n'ont pas montré de corrélation significative avec le délai de propagation dans la plage de la fenêtre de délai maximale de 12 mois (SPI-6 vs. SGI-1 : 7 puits, SPEI-6 vs. SGI-1 : 11 puits, SWBI-6 vs. SGI-1 : 12 puits). Le SPI a systématiquement montré un délai de propagation d'environ 3 mois pour les deux types d'aquifères. Le SWBI a montré une réponse plus rapide dans les aquifères libres (délai médian = 1 mois) et une réponse plus lente dans les aquifères captifs (délai médian = 3 mois). Le SPEI présentait le délai le plus court dans les aquifères captifs (1 mois) et un délai de réponse modéré dans les aquifères libres (2 mois). Les délais médians ont ensuite été appliqués au processus d'appariement d'événements décrit dans la méthodologie section 2.10.

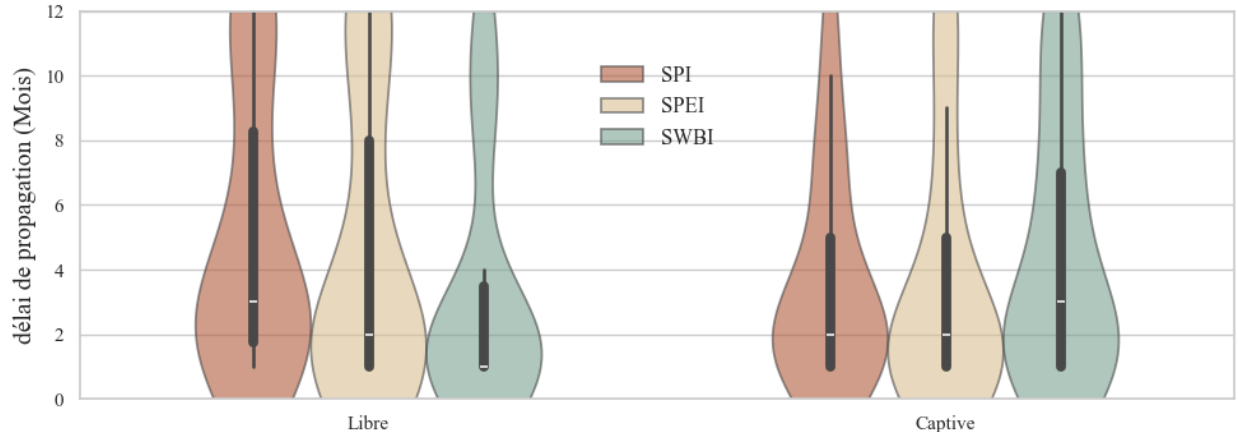


Figure 4.9 Les délais de propagation entre les différents indices de sécheresse météorologique standardisés (SPI : indice de précipitations standardisé, SPEI : indice de précipitations et d'évapotranspiration standardisé, SWBI : indice de bilan hydrique standardisé) et SGI-1 dans les aquifères captifs et libres.

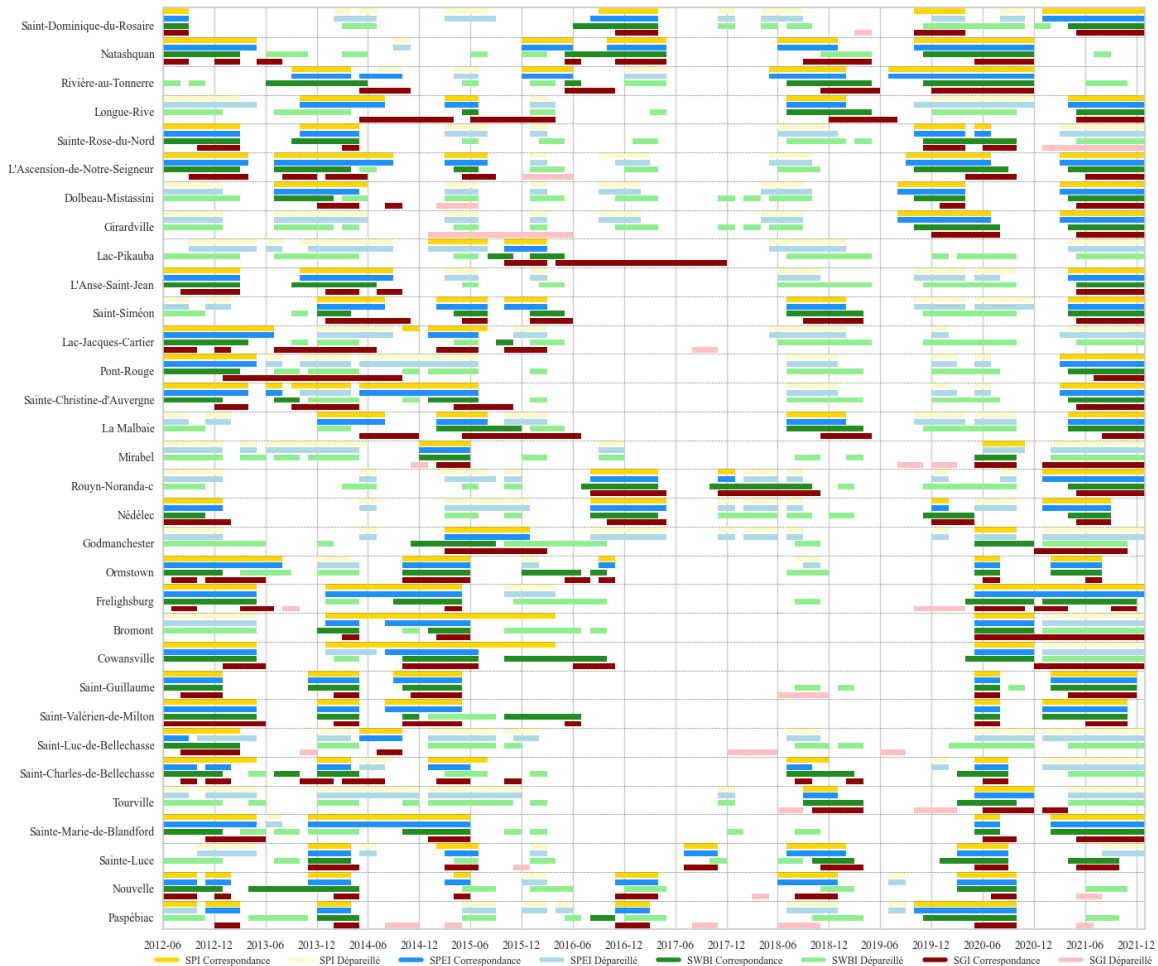


Figure 4.10 Chronologie des épisodes de sécheresse météorologique et hydrogéologique, identifiés par différents indices de sécheresse standardisés (SPI, SPEI, SWBI et SGI) dans divers puits d'aquifères libres. Les sécheresses météorologiques sont définies comme des anomalies négatives, avec des seuils de déclenchement et de sévérité fixés à 0.

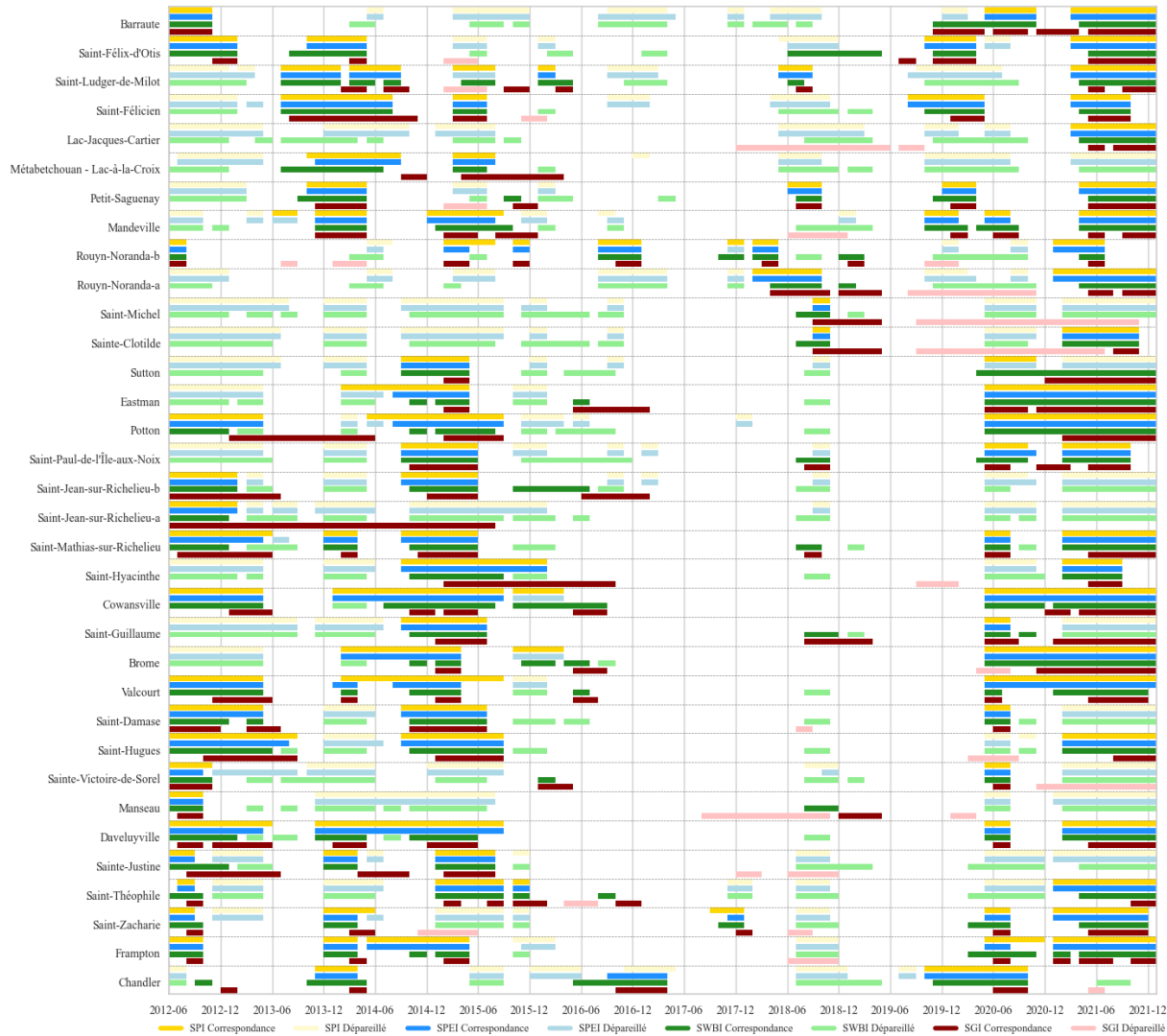


Figure 4.11 Chronologie des épisodes de sécheresse météorologique et hydrogéologique, identifiés par différents indices de sécheresse standardisés (SPI, SPEI, SWBI et SGI) dans divers puits d'aquifères captifs. Les sécheresses météorologiques sont définies comme des anomalies négatives, avec des seuils de déclenchement et de sévérité fixés à 0.

4.2.3 Évolution temporelle des sécheresses hydrogéologiques

Les figures 4.10 et 4.11 présentent la chronologie les événements de sécheresse météorologique et hydrogéologique identifiés par SMI-6 et SGI-1 dans les aquifères confinés et non confinés.

Des périodes de sécheresse hydrogéologiques sont visibles en 2014, 2015, 2020 et 2021 et coïncident avec des sécheresses météorologiques majeures dans la région. Les taux de correspondance entre les événements de sécheresse météorologique et les sécheresses hydrogéologiques présentent de légères différences selon les types d'aquifères (tableau 4.2).

Tableau 4.2 Taux de correspondance entre les événements de sécheresse météorologique et les sécheresses hydrogéologiques selon le type d'aquifère.

Type d'aquifère	Événements SGI correspondants	Associé à SPI	Taux de correspondance SPI (%)	Associé à SPEI	Taux de correspondance SPEI (%)	Associé à SWBI	Taux de correspondance SWBI (%)
Libre	150	127	77,44	125	76,22	120	73,17
Confiné	150	107	64,46	117	70,48	137	82,53

Dans les aquifères non confinés, 164 épisodes de sécheresse des eaux souterraines ont été identifiés, dont 150 correspondaient à des épisodes de sécheresse météorologique. Parmi les 164 épisodes de sécheresse des eaux souterraines (ci-après dénommés « épisodes SGI »), 77 % pouvaient être associés aux épisodes de sécheresse météorologique identifiés par le SPI-6 (ci-après dénommés « épisodes SPI »), suivis par 76 % liés à ceux identifiés par le SPEI-6. Le taux de correspondance le plus faible a été observé entre le SWBI-6 et le SGI-1, avec 73 %.

Les aquifères confinés ont montré une tendance légèrement différente. Le plus grand nombre de correspondances, tout type d'aquifère confondu, a été trouvé entre les événements SWBI (83%) et les événements SGI, avec 137 événements. La réponse des nappes étant plus lente, l'utilisation d'un indice intégrant la neige peut contribuer à ce taux d'appariement plus élevé. Le SPEI et le SPI ont affiché des taux de correspondance plus faibles (70% et 64%), avec respectivement 117 et 107 événements.

4.2.4 Caractéristiques des événements de sécheresse couplés et non couplés

Une analyse comparative entre les événements appariés et non appariés a été réalisée. Des différences statistiquement significatives dans les caractéristiques des événements de sécheresse entre ces deux types d'événements ont été observées pour les indices SPI, SPEI et SWBI (figure 4.12).

Dans les aquifères en nappe libre, les trois indices (SPI, SPEI, SWBI) ont révélé des différences statistiquement significatives entre les événements appariés et non appariés en termes de durée, d'intensité et de sévérité. Il est à noter que les différences sont plus significatives pour le SPEI et le SWBI entre les événements appariés et non appariés que pour le SPI. Plus précisément, les événements SPEI appariés ont une durée en moyenne 1,7 mois (34 %) de plus et ont été 38 % plus intenses que les événements non appariés, avec une augmentation de 80 % de la sévérité (tous $p < 0,001$). De même, pour le SWBI, les événements appariés ont été 36,0 % plus longs et 43 % plus intenses, avec une sévérité supérieure de 89 % à celle des événements non appariés ($p < 0,001$). En revanche, bien que le SPI ait également montré des différences statistiquement significatives, les différences relatives étaient plus faibles pour les trois caractéristiques (par exemple, une durée plus longue de 25 % et une intensité plus forte de 23 %).

Dans les aquifères confinés, la capacité des indices à distinguer les événements appariés des événements non appariés était moins prononcée. Pour le SPI, aucune des différences en termes de durée, d'intensité ou de sévérité n'était statistiquement significative. Pour le SPEI et le SWBI, certaines différences ont atteint un niveau significatif, en particulier pour la sévérité (respectivement 55 % et 37 % plus élevée), mais les amplitudes absolues étaient plus faibles que pour les aquifères en nappe libre. Par exemple, la différence moyenne de durée pour les

événements SWBI n'était que de 0,6 mois (12 %), et les différences d'intensité étaient modestes (< 20 %). Néanmoins, le SPEI et le SWBI ont encore affiché de meilleures performances que le SPI.

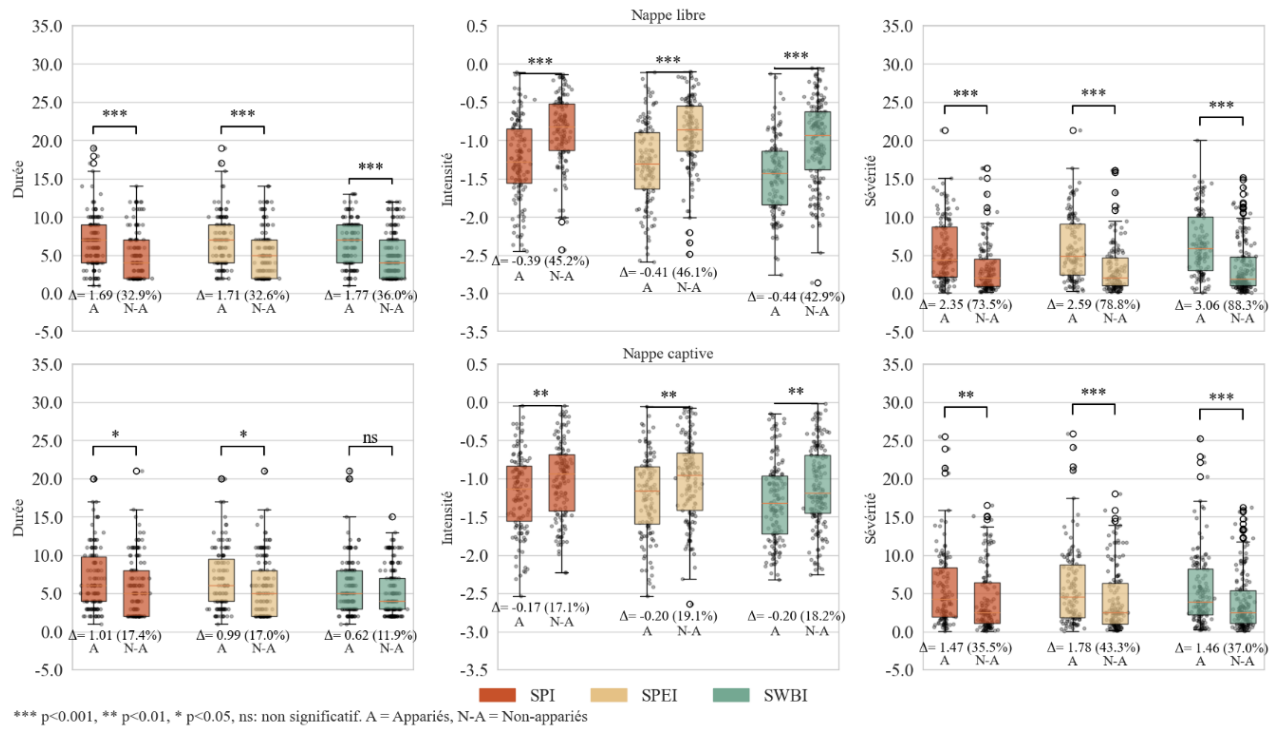




Figure 4.12 Boîtes à moustaches comparant la durée, l'intensité et la sévérité des épisodes de sécheresse météorologique appariés (A) et non appariés (non apparié, NA), selon trois indices de sécheresse (SPI, SPEI et SWBI) et deux types d'aquifères (non confinés et confinés). Les différences (Δ) (absolues et en pourcentage) entre les groupes A et NA sont indiquées sous chaque paire de boîtes à moustaches. Les astérisques indiquent les niveaux de signification : *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$, ns : non significatif.

OBJECTIF 2 – PRINCIPALES CONCLUSIONS

<p>Eaux de surface</p> 	<ul style="list-style-type: none">• Plus de la moitié des sécheresses hydrologiques entre 1970 et 2022 sont classées comme reliées à la neige, cela inclut les sécheresses hydrologiques ayant lieu à l'été, dont 26 % sont liées à la neige.• Parmi les indices météorologiques, le SWBI présente la plus forte corrélation avec le SSI, ce qui en fait un indice de choix pour modéliser les sécheresses hydrologiques.• En moyenne, 53 % des sécheresses météorologiques (identifiées par le SWBI à une période d'accumulation de 1 mois) se transforment en sécheresse hydrologique affectant les rivières.• Un modèle Hurdle permet d'estimer i) la probabilité qu'une période sèche d'un point de vue météorologique se transforme en sécheresse hydrologique et ii) la sévérité de l'événement hydrologique.• Une augmentation de 1 écart-type de la sévérité des périodes sèches multiplie par 5 les risques de propagation en une sécheresse hydrologique.
<p>Eaux souterraines</p> 	<ul style="list-style-type: none">• La période optimale d'accumulation des indices de sécheresse météorologique a été établie à 6 mois dans le sud du Québec. Les délais entre les indices de sécheresse variaient selon les indices météorologiques, et le délai médian était inférieur à 4 mois.• Dans les climats froids et humides, se fier uniquement aux précipitations ne suffit pas à saisir la complexité de la transition de la sécheresse atmosphérique vers les eaux souterraines.

5. Résultats Objectif 3 : Quantifier la prévalence des événements météorologiques pouvant entraîner des événements de sécheresse hydrologique en climat futur

À noter que les analyses de cette section sont présentées exclusivement pour les projections climatiques sous le scénario SSP3-7.0. Cette décision fut prise pour alléger le rapport technique puisque, à moins de mention contraire, le scénario SSP2-4.5 a produit les résultats auxquels l'on pourrait s'attendre, à savoir les mêmes tendances et changements qu'avec le SSP3-7.0 mais d'ampleurs plus faibles, quoique toujours significatifs. Les figures et tableaux présentés dans cette section mais avec le scénario SSP2-4.5 sont tous disponibles en annexe du rapport.

5.1 Tendances annuelles vers des conditions plus humides en climat futur selon les indices météorologiques normalisés

À l'échelle annuelle (période d'accumulation de 12 mois), les indices normalisés présentaient tous une tendance significative à la hausse de 1970 à 2100 sous le scénario SSP3-7.0, suggérant ainsi une évolution vers des conditions plus humides (Figure 5.1; Tableau 5.1a). Les indices considérant l'évaporation potentielle (SPEI et SWBI) ont tous deux montré une légère augmentation de +0,048 par décennie, tandis que les autres indices (SPI, SMRI) ont augmenté de manière plus importante, avec +0,132 et +0,120 par décennie respectivement. En comparant la période de référence (1970-2020) à la période de futur éloigné (2070-2100), la valeur moyenne des indices considérant l'évaporation potentielle (SPEI, SWBI) a augmenté de +0,5 alors qu'elle a augmenté de manière plus importante pour les indices ne considérant pas l'évaporation potentielle (+1,3 pour SPI et SMRI; figure 5.1 – panneau de droite). Lorsque spatialisées à l'échelle du bassin versant, ces tendances se maintiennent, c'est-à-dire que les augmentations sont plus prononcées pour le SMRI et le SPI (figure 5.2). On remarque cependant que les changements sont généralement plus importants sur les régions de la Côte-Nord et dans du St-Laurent Sud-Ouest, et plus faible dans le Sud-Ouest du Québec.

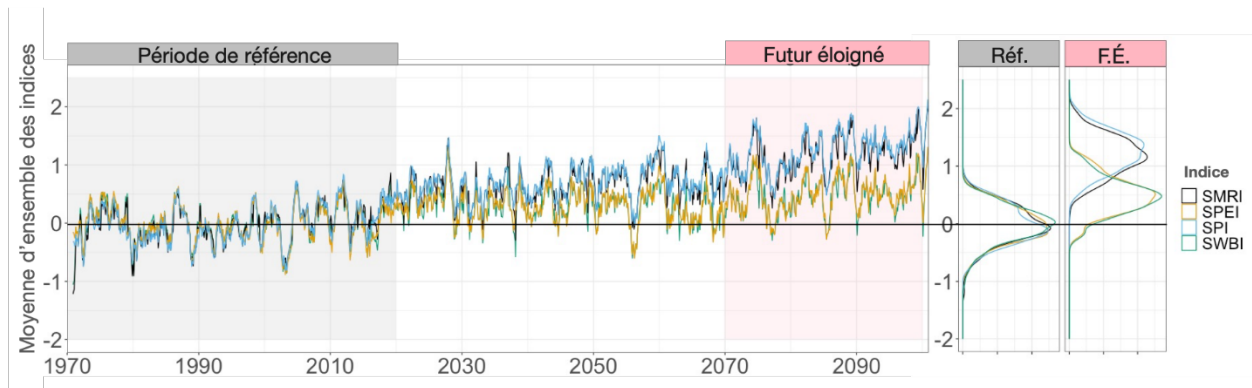


Figure 5.1 Moyennes d'ensemble des quatre indices normalisés calculées à l'échelle annuelle (période d'accumulation de 12 mois), avec la distribution des moyennes d'ensemble annuelles pour la période de référence (1970-2020) et la période de futur éloigné (2070-2100) selon SSP3-7.0. La ligne horizontale noire (valeur d'indice = 0) représente la moyenne de la période de référence, et chaque valeur d'indice représente le nombre d'écart-types de déviation par rapport à celle-ci. Les indices météorologiques considérés sont : l'indice normalisé de précipitation (SPI), l'indice normalisé de précipitation-évaporation (SPEI), l'indice normalisé de fonte et ruissellement (SMRI) et l'indice normalisé de bilan hydrique (SWBI).

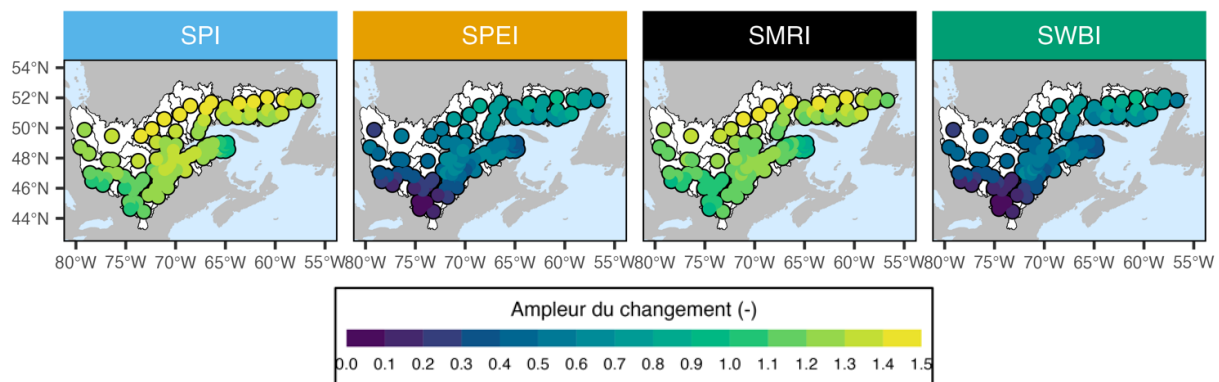


Figure 5.2. Ampleur du changement des valeurs d'indice annuel (période d'accumulation de 12 mois) par bassin versant selon les différents indices standardisés. Le changement représente la différence de moyenne entre la période « futur éloigné » (2070-2100) et la période de référence (1970-2020), selon les moyennes d'ensemble sous le scénario SSP3-7.0. Ainsi, une ampleur de changement de 1,0 signifie que les conditions représentées par l'indice concerné sont plus élevées d'une magnitude d'un écart-type en période future, par rapport à la période de référence.

5.2 Tendances saisonnières variables en climat futur selon les indices météorologiques normalisés

À l'échelle saisonnière (période d'accumulation de 3 mois), les tendances (à la hausse vs. À la baisse) observées de 1970 à 2100 sous le scénario SSP3-7.0 varie selon les saisons et les indices météorologiques (Tableau 5.1a). À l'**hiver**, on observe une forte tendance à la hausse pour les quatre indices météorologiques, suggérant des hivers plus humides en climat futur (Tableau 5.1a, figure 5.3a). La tendance à la hausse était plus prononcée pour les indices considérant la neige (SMRI = +0,186 et SWBI = +0,169 par décennie) en comparaison aux autres indices (SPI = +0,111 et SPEI = +0,112 par décennie). Au **printemps**, les indices considérant la neige montrent une

tendance à la baisse (SMRI= -0,069 et SWBI= -0,106 par décennie), suggérant ainsi des conditions plus sèches (Figure 5.3b). Cela contraste avec les autres indices qui suggèrent plutôt des conditions plus humides (SPI=+0,086 par décennie) ou relativement stables (SPEI=+0,018 par décennie). Ainsi, la prise en compte de la fonte dans les indices météorologiques influence de manière importante les tendances projetées et seuls les indices considérant la fonte suggèrent une tendance vers des conditions plus sèches. À l'été, les processus considérés influencent également les tendances observées. En effet, les indices considérant l'évaporation potentielle montrent une tendance à la baisse (SPEI= -0,048 et SWBI=-0,052 par décennie) tandis que les indices ne considérant pas l'évaporation suggèrent une légère tendance à la hausse (SPI=+0,031 et SMRI=+0.025 par décennie; figure 5.3c). À l'automne, une tendance à la hausse est projetée pour tous les indices, sauf le SPEI pour lequel la tendance saisonnière n'est pas significative (Figure 5.3d).

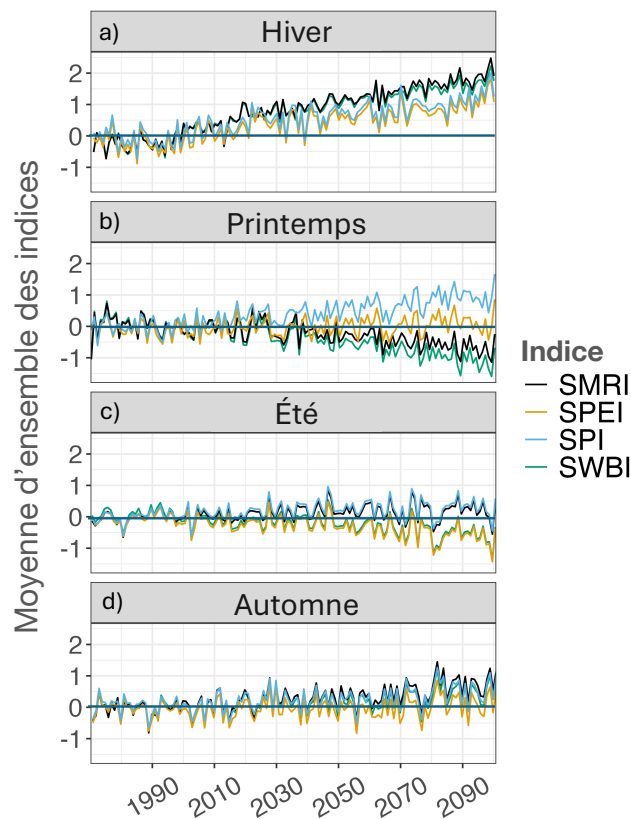


Figure 5.3 Moyennes d'ensemble des quatre indices normalisés calculées à l'échelle saisonnière (période d'accumulation de 3 mois) selon SSP3-7.0 pour a) l'hiver, b) le printemps, c) l'été et d) l'automne. La ligne horizontale noire (valeur d'indice = 0) représente la moyenne de la période de référence, et chaque valeur d'indice représente le nombre d'écart-types de déviation par rapport à celle-ci. Les indices météorologiques considérés sont : l'indice normalisé de précipitation (SPI), l'indice normalisé de précipitation-évaporation (SPEI), l'indice normalisé de fonte et ruissellement (SMRI) et l'indice normalisé de bilan hydrique (SWBI).

Ces tendances sont généralement maintenues lorsqu'analysées à l'échelle du bassin versant (figure 5.4). Les tendances hivernales sont similaires à l'échelle du Québec, avec des ampleurs de changement qui diffère peu d'un bassin versant à l'autre lorsque la période de futur éloigné est comparée à la période de référence. Au printemps, les conditions s'assèchent de manière plus importante dans les régions de la Côte-Nord et de la Gaspésie lorsque la fonte des neiges est considérée (SMRI et SWBI). L'ajout de l'évapotranspiration dans la considération de la disponibilité en eau (SPEI et SWBI) à l'été renverse les tendances du Sud-Ouest du St-Laurent, la Côte-Nord et la Gaspésie de l'humidification à l'assèchement, et amplifie l'assèchement de l'Abitibi et du Saguenay. À l'automne, les changements sont plus prononcés sur la rive nord du St-Laurent et en Abitibi et moins prononcés en Outaouais et sur la rive Sud du St-Laurent.

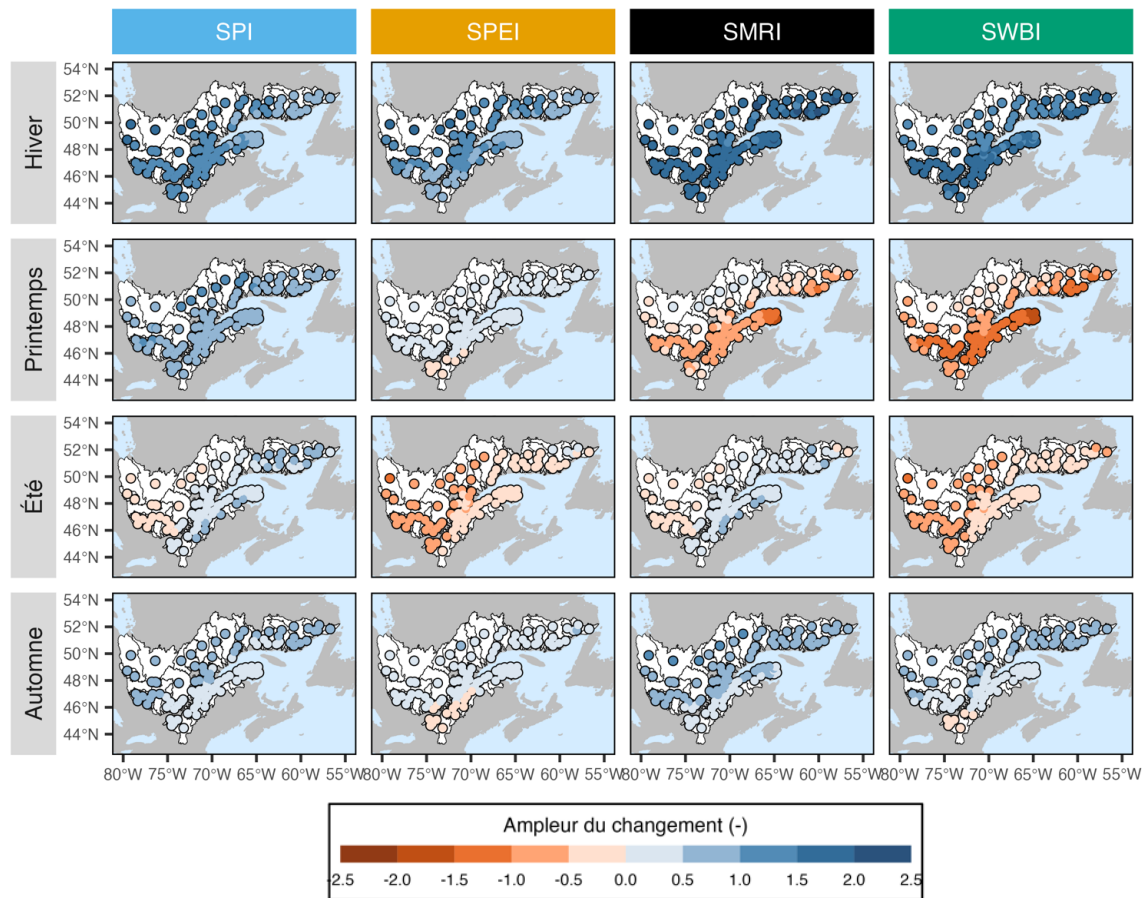


Figure 5.4. Ampleur du changement des valeurs d'indice saisonniers (période d'accumulation de 3 mois) par bassin versant et par saison, selon les différents indices standardisés. Le changement représente la différence de moyenne entre la période « futur éloigné » (2070-2100) et la période de référence (1970-2020), selon les moyennes d'ensemble sous le scénario SSP3-7.0. Ainsi, une ampleur de changement de 1,0 signifie que les conditions représentées par l'indice concerné sont plus élevées d'une magnitude d'un écart-type en période future, par rapport à la période de référence, et vice versa pour un changement de -1,0.

Tableau 5.1 Tendance décennale entre 1970 et 2100 a) des indices météorologiques normalisés, b) des occurrences de conditions sèches/humides et c) des caractéristiques des événements de sécheresses selon les moyennes d'ensemble des quatre indices normalisés selon le SSP3-7.0. Une étoile indique une tendance significative selon le test non paramétrique de Mann-Kendall. Les tendances ont été quantifiées à l'aide de la méthode d'estimation non paramétrique de la pente de Sen.

Variables	Période ou caractéristique	SPI	SPEI	SMRI	SWBI
a) Indices (nb d'écart-type par décennie)	Annuel (fig. 5.1)	0,132*	0,048*	0,120*	0,048*
	Hiver (fig. 5.2a)	0,112*	0,111*	0,186*	0,169*
	Printemps (fig. 5,2 b)	0,086*	0,018*	-0,069*	-0,107*
	Été (fig. 5.2c)	0,031*	-0,048*	0,025*	-0,052*
	Automne (fig. 5.2d)	0,043*	0,016	0,067*	0,042*
b) Occurrence annuelle (nb de mois par année par décennie)	Conditions sèches sévères (3M, fig. 5.3a)	-0,030*	0,045*	0,037*	0,116*
	Conditions moyennes (3M, fig. 5,3 b)	-0,186*	-0,185*	-0,285*	-0,321*
	Conditions humides sévères (3M, fig. 5.3c)	0,207*	0,131*	0,243*	0,192*
c) Caractéristiques des événements de sécheresse (par décennie)	Nombre annuel d'événements (fig. 5.4a)	-0,130*	0,140*	0,190*	0,380*
	Durée (mois, fig. 5,4 b)	-0,197*	-0,105*	-0,152*	-0,042*
	Intensité (nb d'écart-type, fig. 5.4c)	0,011*	0,042*	0,042*	0,067*
	Sévérité (nb d'écart-type, fig. 5.4d)	-0,161*	0,034	-0,031	0,172*

5.3 Occurrence variable des conditions sévères sèches ou humides en climat futur selon les indices météorologiques normalisés

À l'échelle saisonnière, les conditions moyennes ($-1 < \text{indice} < 1$) se sont produites moins fréquemment pour tous les indices alors que les conditions extrêmes ($\text{indice} < -1,5$ ou $\text{indice} > 1,5$) sont devenues plus fréquentes pour tous les indices, à l'exception du SPI (Figure 5.5). Les tendances à la hausse pour les conditions extrêmes et les tendances à la baisse pour les conditions moyennes étaient significatives selon le test de Mann-Kendall. Les indices considérant la neige ont montré la plus forte diminution des conditions moyennes (SWBI=-0,321 et SMRI=-0,285 mois par an et par décennie; Tableau 5.1 b) en comparaison aux autres indices, bien que ceux-ci montrent également une tendance à la baisse. Le SWBI présente la plus forte augmentation des conditions sèches sévères (+0,116 mois par an et par décennie) alors que le SPEI et le SMRI ne présentaient qu'une faible tendance à la hausse (SPEI = +0,045 et SMRI = +0,037 mois par an et par décennie. Ainsi, c'est lorsque les processus d'évaporation et de fonte sont tous deux considérés c'est dans ces conditions que l'on observe la plus forte augmentation des conditions sèches sévères.

L'augmentation des conditions sèches sévères a principalement lieu au printemps et à l'été, alors qu'une augmentation des conditions humides sévères est projetée pour l'hiver et l'automne (Figure 5.7). À l'hiver, la fréquence des conditions moyennes est projetée diminuer de 70 % selon le SWBI et le SMRI, alors que les conditions humides sévères sont projetées d'augmenter de manière

importante, avec une hausse de +788 % pour le SWBI. Au **printemps**, la fréquence des conditions sèches sévères est projetée augmenter de manière importante, soit de +431 % et +285 % pour le SWBI et le SMRI, respectivement. Cela contraste avec les indices ne considérant pas la neige, où une augmentation des conditions humides sévères est plutôt projetée. À l'**été**, la fréquence des conditions sèches sévères est projetée de doubler selon le SPEI (+216 %) et le SWBI (+221 %), soit les indices considérant l'évaporation. À l'**automne**, on observe une tendance similaire qu'à l'hiver, avec une augmentation projetée des conditions humides sévères pour tous les indices (SWBI = +160%).

À l'analyse des changements dans l'occurrence des différents types de conditions spatialisés à l'échelle du bassin versant, une extrémisation est bien visible, avec une large réduction des conditions « moyennes » et une augmentation des conditions sévères (figure 5.6). On remarque des changements plus prononcés dans certaines régions, notamment la Côte-Nord et la Gaspésie, spécialement lorsque la fonte des neiges est considérée (SMRI et SWBI).

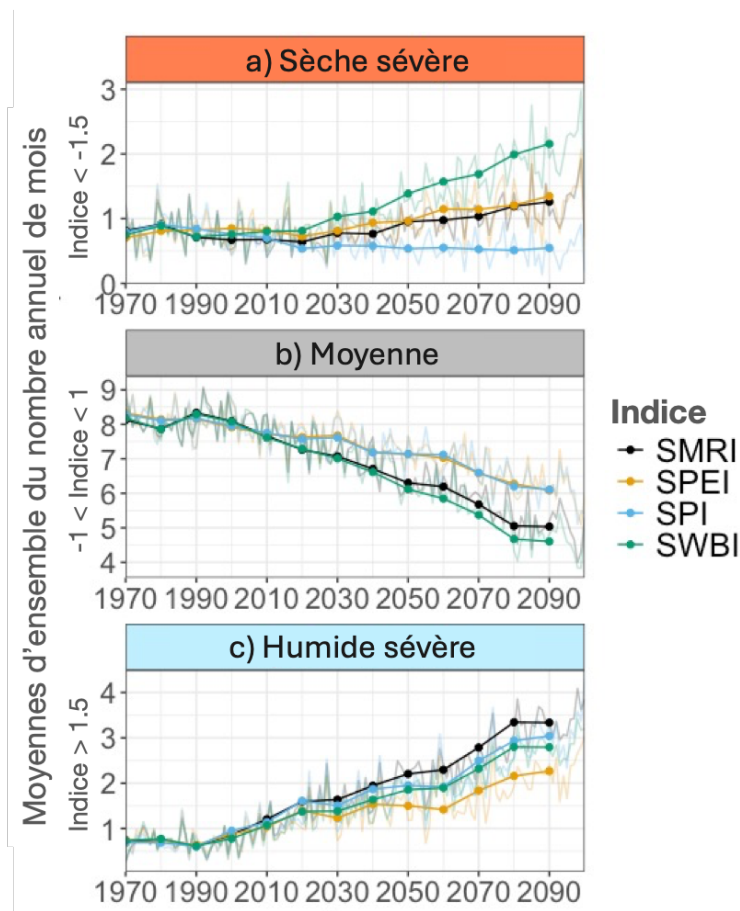


Figure 5.5 Moyennes d'ensemble du nombre annuel de mois avec a) des conditions sèches sévères (indice < -1,5), b) des conditions moyennes (-1 < indice < 1) et c) des conditions humides sévères (indice > 1,5) pour les quatre indices météorologiques normalisés calculés avec une période d'accumulation de 3 mois, selon SSP3-7.0. Les lignes en gras reliées par des points représentent les moyennes décennales – par exemple, un point en 2010 représente la moyenne du nombre annuel de mois au-dessus ou en dessous des seuils fixés pour les années 2010-2019 – et les lignes claires représentent les moyennes annuelles.

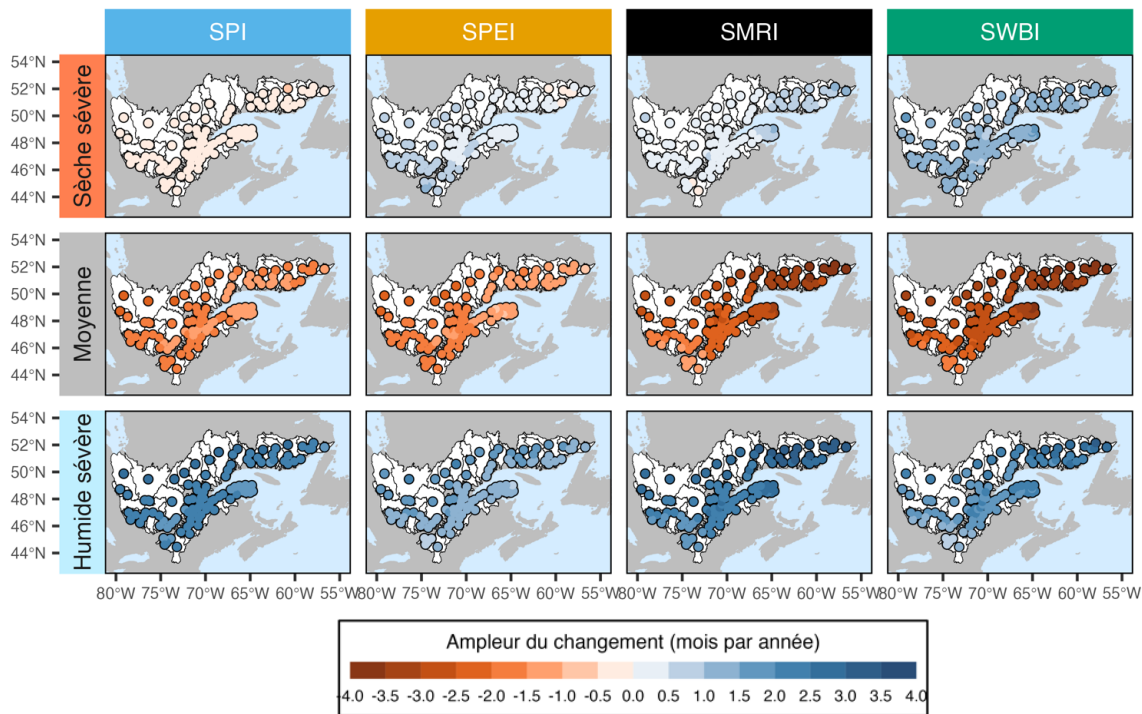


Figure 5.6. Ampleur du changement dans la fréquence des conditions moyennes et sévères, par bassin versant, selon les différents indices standardisés. Le changement représente la différence de moyenne entre le nombre de mois annuel pour la période « futur éloigné » (2070-2100) et la période de référence (1970-2020), selon les moyennes d'ensemble sous le scénario SSP3-7.0. Ainsi, une ampleur de changement de 1,0 signifie qu'en période future, le bassin versant se trouve dans les conditions concernées un mois de plus par année en moyenne par rapport à la période de référence, vice versa pour un changement de -1.0.

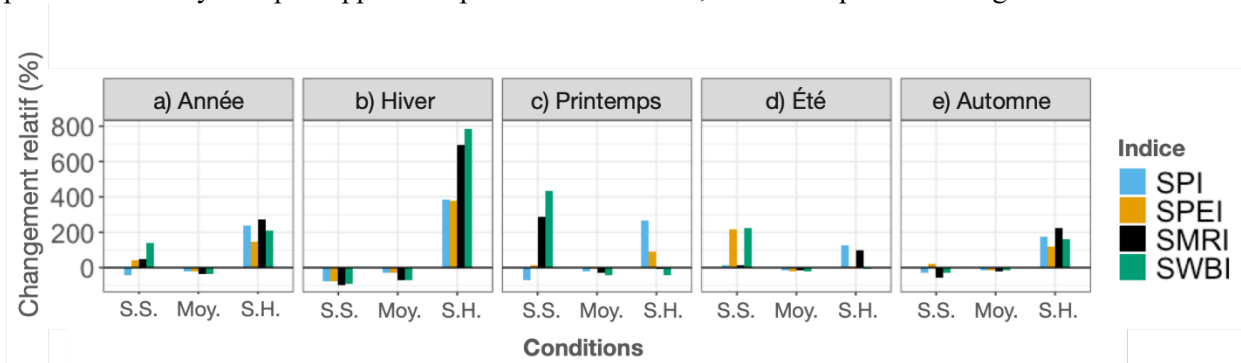


Figure 5.7 Changements relatifs entre la période de référence (1970-2010) et la période de futur éloigné (2070-2100) des conditions des conditions sèches sévères (S.S., indice < -1,5), des conditions moyennes (Moy., -1 < indice < 1) et des conditions humides sévères (S.H., indice > 1,5) pour a) l'année, b) l'hiver, c) le printemps, d) l'été et e) l'automne pour les quatre indices météorologiques normalisés calculés avec une période d'accumulation de 3 mois, selon SSP3-7.0.

5.4 Projections vers des sécheresses météorologiques plus courtes, mais plus fréquentes et plus intenses en climat futur

Selon les conditions annuelles moyennes, il est projeté que les événements de sécheresse soient plus fréquents, plus intenses, plus courts et avec peu de changement projeté pour la sévérité (Figure 5.8, Tableau 5.1c). Toutefois, les tendances projetées varient de manière importante selon les indices météorologiques. En effet, l'augmentation projetée de la fréquence et de l'intensité des sécheresses est plus importante avec le SWBI qu'avec les autres indices. À l'inverse, peu ou pas de changements sont projetés lorsqu'on considère le SPI basé uniquement sur les précipitations totales. La prise en compte de la fonte et de l'évapotranspiration a donc une influence importante sur les tendances en climat futur.

En climat futur, le **nombre d'événements** est projeté d'augmenter, avec une augmentation de +0,380 événement par an et par décennie selon le SWBI (Figure 5.8a). Cette augmentation est plus du double de la tendance projetée pour le SMRI (+0,140) et le SPEI (+0,190). L'augmentation du nombre d'événements est principalement projetée pour le printemps (SWBI=+264 %, Figure 5.9c), et dans une moindre mesure à l'été (SWBI=+23%, Figure 5.9d). Une diminution de la **durée** des sécheresses est projetée, principalement entre 2000 et 2030, alors que les indices météorologiques se stabilisent autour d'une durée moyenne de 5 mois à partir de 2030 (Figure 5.8 b). Cette tendance à la baisse est projetée de manière généralisée pour toutes les saisons (Figure 5.9). L'**intensité** des événements est projetée augmenter de manière importante, soit +0,067 par décennie pour le SWBI. L'intensité moyenne annuelle atteindrait ainsi 2,6 écarts-types pour la décennie se terminant en 2090 selon cet indice. L'augmentation de l'intensité est projetée pour toutes les saisons selon le SWBI, soit l'hiver (+67 %), le printemps (+38 %), l'été (+ 23 %) et l'automne (+ 7 %, Figure 5.9). La **sévérité** des événements de sécheresse est projetée d'augmenter selon le SWBI (+0,172 écart-type par décennie), alors qu'aucune tendance significative n'est projetée pour les indices SPEI et SMRI. L'augmentation de la sévérité est projetée toucher l'hiver (SWBI=+13 %) et le printemps (SWBI=+35 %) alors qu'à l'inverse, la sévérité est projetée diminuer à l'automne (SWBI=-34%, Figure 5.9). Ces changements relatifs varient légèrement d'un bassin versant à l'autre mais restent relativement homogènes (figure 5.10).

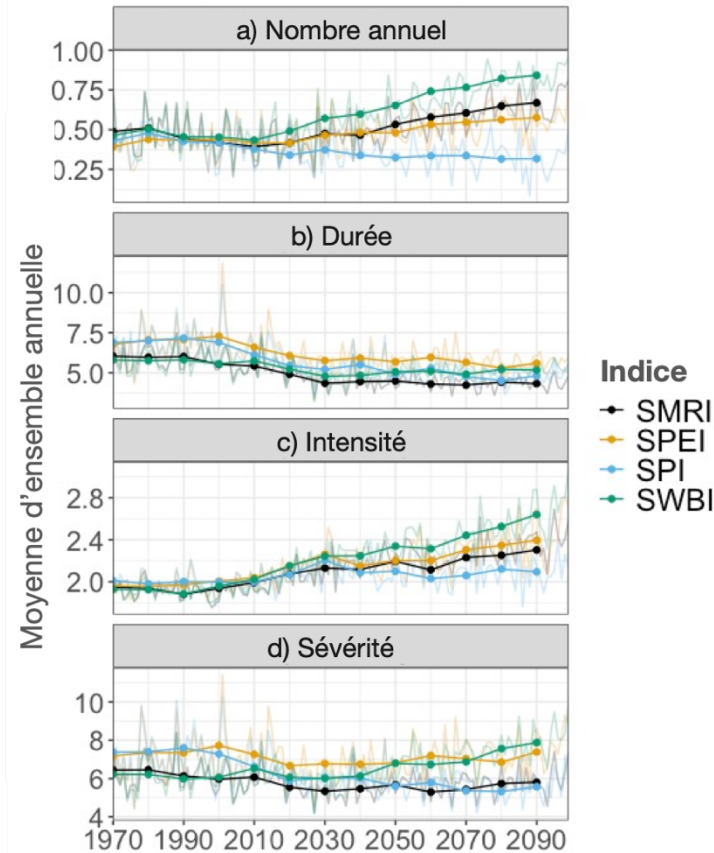


Figure 5.8 Moyennes d'ensemble des caractéristiques selon SSP3-7.0 pour a) le nombre annuel, b) la durée, c) l'intensité et d) la sévérité des événements de sécheresse pour les quatre indices météorologiques normalisés calculés avec une période d'accumulation de 3 mois. Les lignes en gras reliées par des points représentent les moyennes décennales – par exemple, un point en 2010 représente la moyenne du nombre annuel de mois au-dessus ou en dessous des seuils fixés pour les années 2010-2019 – et les lignes claires représentent les moyennes annuelles.

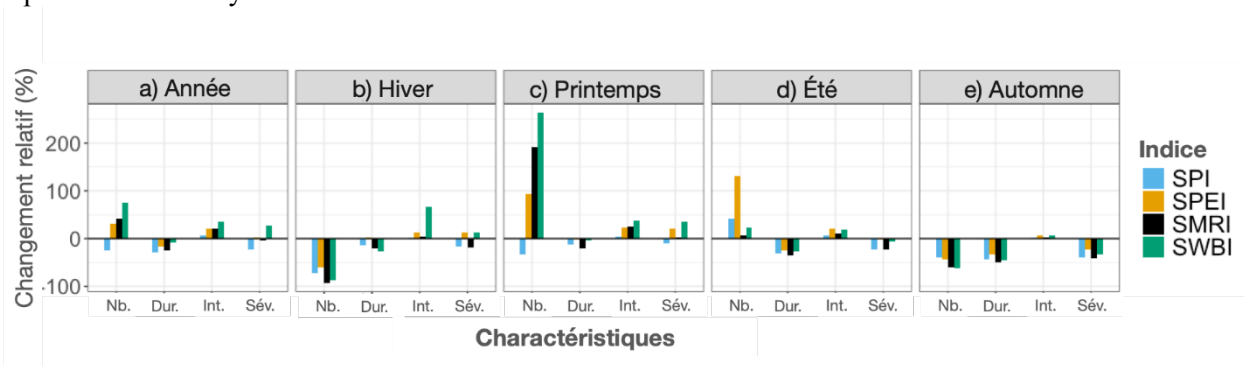


Figure 5.9 Changements relatifs du nombre annuel de sécheresses (Nb.), de leur durée (Dur.), de leur intensité (Int.) et de leur sévérité (Sév.) selon les quatre indices normalisés calculés avec une période d'accumulation de 3 mois, entre la période de référence (1970-2010) et la période de futur éloigné (2070-2100) selon le scénario SSP3-7.0, pour a) l'année, b) l'hiver, c) le printemps, d) l'été et e) l'automne, selon SSP3-7.0.

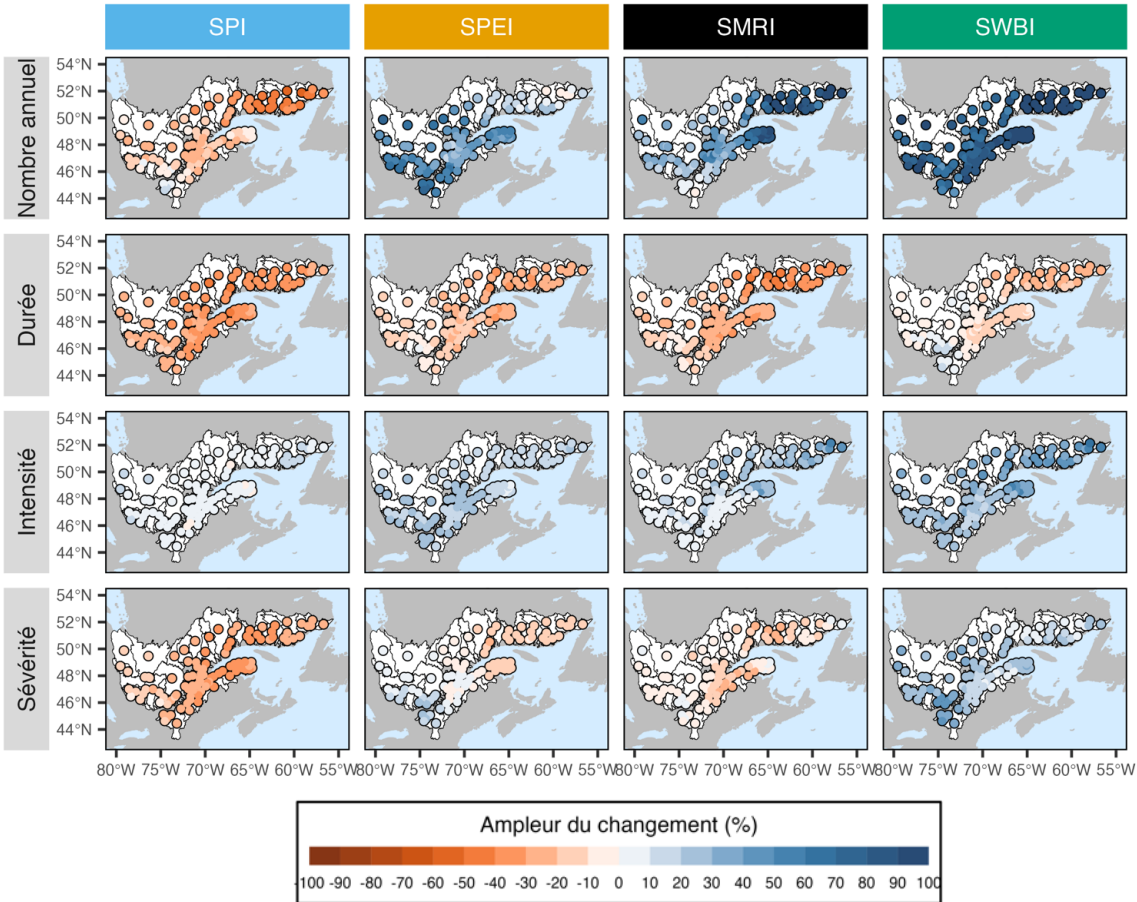


Figure 5.10. Changements relatifs entre la période « futur éloigné » (2070-2100) et la période de référence (1970-2020) dans les caractéristiques des sécheresses par bassin versant, selon les différents indices standardisés, sous le scénario SSP3-7.0. Ainsi, changement relatif de 10% signifie qu’en période future, les sécheresses sont 10% plus sévères en période future qu’en période de référence.

5.5 Analyse de l’occurrence de sécheresse connue en climat futur

En 2021, le Québec a connu une de ses années les plus chaudes en plus de 100 ans avec une température moyenne surpassant de 2,5 °C la normale de 1981-2010. Cette anomalie s’est combinée à de très faible apport en eau printanier au sud de la province ainsi que des déficits de précipitations records dans le Sud-Ouest (MELCCFP, n.d.). Dans le contexte du projet, cette année a été utilisée comme modèle pour évaluer l’occurrence d’un événement de sécheresse connue en projection climatique. En d’autres mots, est-ce que l’on peut s’attendre à ressentir des événements semblables à celui de 2021 plus ou moins souvent dans le futur, au Québec méridional ?

Les sécheresses hydrologiques de 2021, détectées à partir des débits de l’atlas hydroclimatique, révèlent que 67 % des tronçons de rivière ont connu des conditions sévères et que 42 % ont subi des conditions extrêmes durant au moins un mois. De plus, 87% des bassins versants ont vécu au moins une sécheresse hydrologique sévère. En moyenne à l’échelle du Québec, les sécheresses sévères de l’année 2021 ont eu une sévérité de -8.64, une durée de 7.1 mois, une intensité de -2.0 et une étendue spatiale de 74% de la couverture du bassin versant (figure 5.11). La majorité des

bassins versants sont entrés en sécheresse hydrologique à partir du mois de mai (42% des bassins), mais 31% des bassins versants sont entrés en sécheresse en avril et 19% au mois de juin. De plus, 67% des sécheresses ont été classifiées comme influencées par la neige, dont 41% du type « Fonte », c'est-à-dire causées par un manque de précipitation neigeuse durant la saison hivernale, causant une crue printanière plus faible que la moyenne et se répercutant sur les débits de la saison estivale, puis 25% du type « hiver chaud ». Dans les autres cas, 32% des sécheresses ont été classés comme causés par un déficit de précipitation, dont la moitié (16%) ont été amplifiées par une évapotranspiration accrue (sécheresse atmosphérique) (figure 5.12).

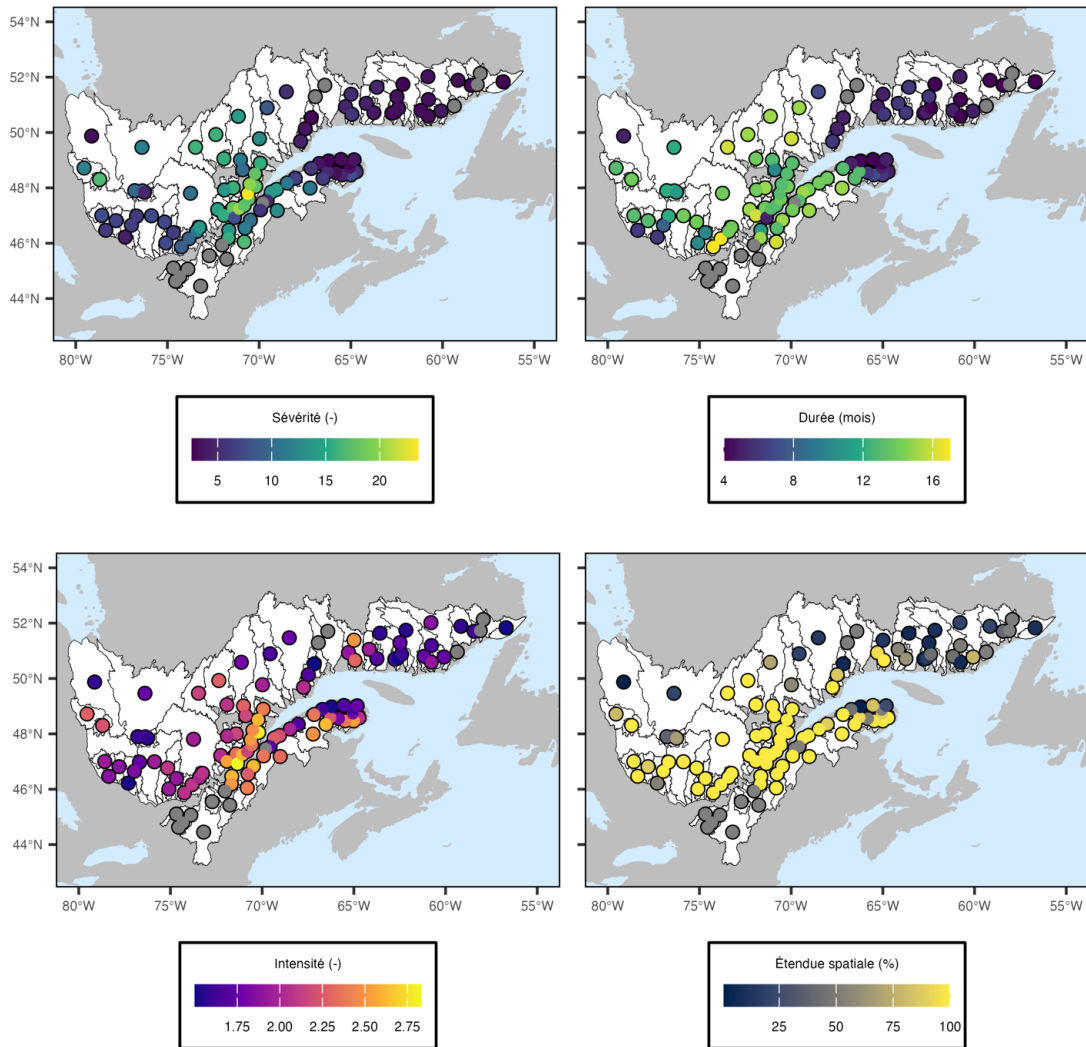


Figure 5.11. Caractéristiques des sécheresses hydrologiques de l'année 2021 au Québec méridional, identifié avec l'indice SSI à une période d'agrégation de 3 mois. Un point gris signifie qu'aucune sécheresse n'a été identifié dans le bassin versant durant cette année.

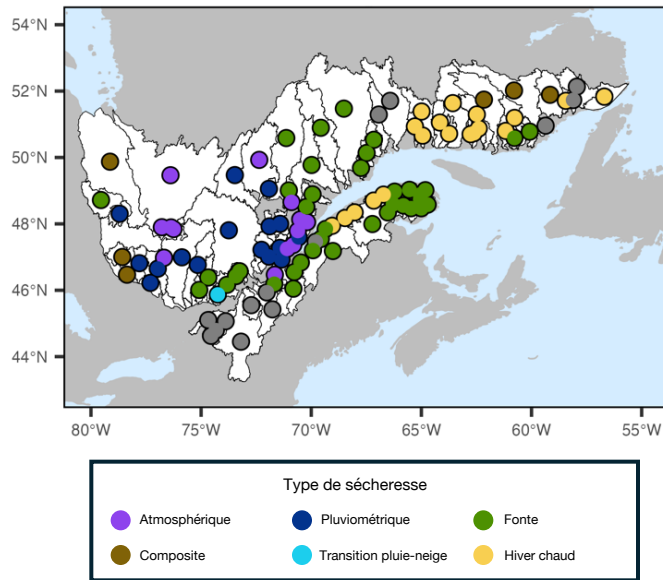


Figure 5.12. Type de sécheresse hydrologique de l'année 2021 pour chacun des bassins versants. Un point gris signifie qu'aucune sécheresse n'a été identifiée dans le bassin versant durant cette année.

Pour analyser l'occurrence de tels événements hydrologiques en projection climatique, les résultats de l'objectif 2 ont été mis en valeur. Ce projet a identifié l'indice SWBI à une période d'agrégation d'un mois comme étant le plus approprié pour décrire la propagation des conditions météo en sécheresse hydrologique. Ainsi, nous avons comptabilisé le nombre d'années où la période sèche identifiée dans la série temporelle de cet indice, en projection climatique, respectait les critères suivants : pour chaque bassin versant, (1) la période sèche a débuté à la même saison que celle ayant été associée à une sécheresse hydrologique de 2021 et (2) la sévérité, la durée et l'intensité de la période sèche sont plus grandes ou égales à celle ayant été associée à la sécheresse hydrologique. Ensuite, le nombre d'années entre 2030 et 2100 où ces conditions ont été remplies a été comptabilisé par bassin versant pour chaque modèle climatique. Une moyenne d'ensemble du nombre d'années a finalement été calculée pour chaque bassin versant. Par la suite, les probabilités que les sévérités des périodes sèches identifiées en projection climatique se propagent en sécheresse hydrologique ont été calculées à l'aide du modèle logistique présenté à objectif 2.

Entre 2030 et 2100, l'occurrence des événements similaires ou plus sévères à ceux ayant mené à la sécheresse de 2021 était en moyenne de 22 années, c'est-à-dire qu'elles ont été identifiées dans 31% des années de 2030-2100 (figure 5.13a). Cette occurrence était nettement plus élevée dans les bassins versants de la Côte-Nord, atteignant 40 années dans le pire des cas. Les sévérités moyennes des événements identifiés durant la période 2030-2100 variaient de 3,8 à 12,2, ce qui correspond à des probabilités de propagation variant de 61 à 100 %, avec une moyenne de 96 % (figure 5.13 b-c). La Côte-Nord se distingue une fois de plus avec des sévérités et des probabilités plus faibles que dans les autres régions du Québec. Bien que l'on ne puisse identifier les types de sécheresses hydrologiques en projection climatique, les analyses de l'évolution des indices ont révélé un couvert neigeux de plus en plus mince et une évapotranspiration accrue, ce qui mènerait

potentiellement à plus de sécheresses des types « fonte », « hiver chaud » et « atmosphérique », incidemment les trois types les plus fréquents durant l'année 2021 (figure 5.12).

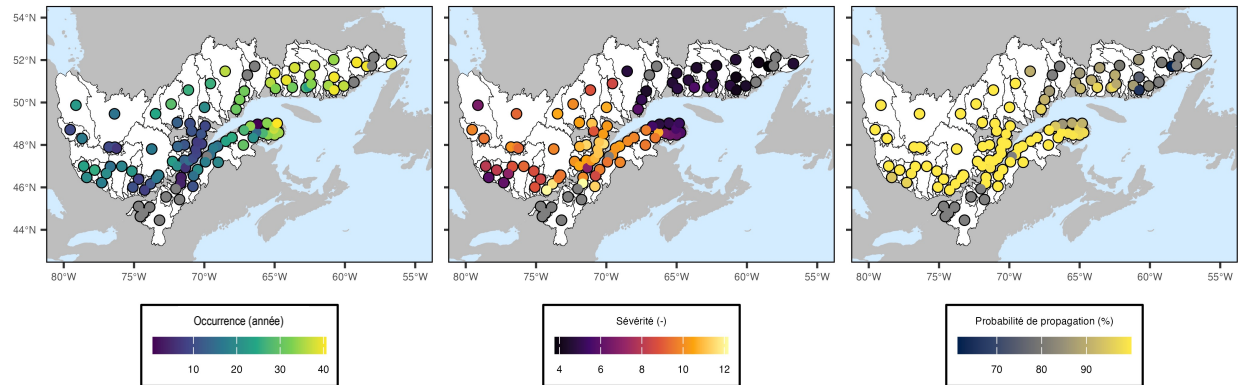


Figure 5.13. Occurrence, sévérité et probabilité de propagation des conditions de sécheresse identifié par l'indice SWBI à une période d'agrégation de 1 mois, en projection climatique sous le scénario SSP3-7.0, de 2030 à 2100. Un point gris signifie qu'aucune sécheresse n'a été identifié dans le bassin versant durant cette année.

OBJECTIF 3 – PRINCIPALES CONCLUSIONS

Indices météorologiques



- Les processus considérés comme la fonte ou l'évaporation influencent de manière importante les tendances projetées pour les indices météorologiques.
- Malgré une tendance annuelle plus humide, une amplification des conditions sèches sévères est projetée en climat futur, principalement au printemps et à l'été.
- Des sécheresses météorologiques plus courtes, mais plus fréquentes et plus intenses sont projetées en climat futur.
- Les changements attendus sont presque systématiquement plus prononcés dans les régions de la Côte-Nord et la Gaspésie, spécialement lorsque la fonte des neiges est considérée dans le calcul des indices,
- Les conditions de sécheresse ayant menés aux sécheresses hydrologiques de l'année 2021 ont été identifiés dans 31% des années de 2030 à 2100 sous le scénario SSP3-7.0.

6. Discussion

6.1. Utilisation des indices standardisés pour l'étude et la gestion des sécheresses

Les indices standardisés tels que ceux utilisés dans cette étude permettent de quantifier les anomalies en termes de déviation par rapport à la moyenne et peuvent être appliqués à différentes échelles temporelles et spatiales et pour différentes composantes (précipitation, précipitation-évaporation, ruissellement, etc.) du cycle hydrologique. Ainsi, ils offrent une approche simple (méthodologie facile d'application), versatile (applicable à diverses composantes du cycle de l'eau) et facile à interpréter pour étudier les sécheresses.

Le choix de ce projet de se tourner vers les indices standardisés tient de leur utilisation répandue dans les systèmes de surveillance et d'alerte à travers le monde. Par exemple, le SPI est recommandé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) comme indice universel pour le suivi des sécheresses (Hayes *et al.*, 2011). Le « US Drought Monitor » utilise divers indices dont le SPI pour le suivi des sécheresses (Svoboda *et al.*, 2002). L'outil de surveillance des sécheresses au Canada (Canada Drought Monitor) se base sur les centiles de précipitations et le SPEI. En Europe, la surveillance est faite à partir d'un indice composite (Combined Drought Indicator, CDI) qui intègre le SPI (Fioravanti *et al.*, 2025). Au Royaume-Uni, le système de suivi des sécheresses est basé sur des indices standardisés similaires à la présente étude, soit le SPI, le SSI et le SGI, intégrant ainsi les composantes de sécheresses météorologiques, hydrologiques et hydrogéologiques au sein d'une plate-forme commune (Barker *et al.*, 2022). Bachmair *et al.* (2016) ont recensé les indices les plus fréquemment utilisés pour la définition opérationnelle des sécheresses météorologiques dans les systèmes de surveillance et le SPI arrive au sommet, suivi de percentiles de précipitation et ensuite viennent le SPEI et le Palmer Drought Severity Index (PDSI). Ainsi, le choix de caractériser les sécheresses à partir d'indices standardisés fut largement guidé par leur compatibilité et leur interopérabilité avec les systèmes de surveillance et d'alerte existants à l'échelle nationale et internationale.

L'adoption des indices standardisés varie selon les domaines, avec généralement une large adoption dans les systèmes de surveillance ciblant les secteurs agricoles et forestiers (e.g. Bachmair *et al.*, 2018). L'utilisation d'indices standardisés est toutefois moins répandue dans les systèmes centrés sur l'hydrologie de surface. En effet, dans leur recension des systèmes de surveillance des sécheresses, Bachmair *et al.* (2016) concluent à l'utilisation majoritaire des centiles de débit alors que le SSI demeure relativement peu utilisé. Toutefois, le SSI présente l'avantage de permettre la caractérisation des sécheresses météorologiques et hydrologiques au sein d'un même cadre cohérent, applicable à différents secteurs. Cela est particulièrement pertinent dans le contexte canadien, où le Canada Drought Monitor repose déjà sur le SPEI. Par ailleurs, une étude en contexte nordique (Suède) a mis en évidence l'intérêt d'utiliser différents indices standardisés pour caractériser les sécheresses météorologiques, édaphiques et hydrologiques (Teutschbein *et al.*, 2023). Cette étude a permis de brosser un portrait global du nexus entre la sécurité de l'approvisionnement en eau, la sécurité alimentaire, la sécurité énergétique et la résilience des écosystèmes en Suède, soulignant les interactions entre ces différents secteurs dans un contexte de changements climatiques.

Le recours exclusif à des indices météorologiques ne permet pas de brosser un portrait complet des sécheresses, comme le montre la présente étude, dans laquelle seules 53 % des sécheresses météorologiques se propagent en sécheresses hydrologiques. Néanmoins, nos résultats démontrent qu'il est possible de développer un modèle statistique performant, capable de prédire l'occurrence et la sévérité des sécheresses hydrologiques à partir des seules conditions météorologiques. Ainsi, bien que les indices météorologiques apparaissent insuffisants lorsqu'ils sont considérés de manière isolée, leur contenu en information peut être exploité et traduit de manière pertinente pour caractériser les sécheresses hydrologiques.

Par ailleurs, une caractérisation des sécheresses hydrologiques basée sur les indices météorologiques peut s'avérer particulièrement pertinente pour l'étude des changements climatiques, puisqu'elle repose sur des projections météorologiques fiables sans introduire l'incertitude de la chaîne de modélisation hydrologique. Toutefois, une comparaison explicite entre l'incertitude liée à la modélisation statistique et celle induite par la chaîne de modélisation hydrologique permettrait de mieux éclairer ce choix méthodologique. Enfin, une approche basée sur des indices météorologiques offre également un intérêt pour la prévision opérationnelle des sécheresses hydrologiques, car l'accès rapide aux données météorologiques permet d'anticiper efficacement l'apparition et l'évolution des anomalies météorologiques.

6.2. Considérations méthodologiques pour l'utilisation des indices standardisés

L'utilisation d'indices standardisés pour la caractérisation des sécheresses implique plusieurs considérations méthodologiques, tant en ce qui concerne les jeux de données utilisés, le choix des indices et leur mode de calcul.

Jeu de données

L'application des indices standardisés repose idéalement sur la disponibilité d'une période de référence suffisamment longue afin d'assurer un ajustement robuste de la distribution statistique. Un minimum de 30 ans est généralement recommandé (McKee *et al.*, 1993; World Meteorological Organization, 2012). Cette cible n'a toutefois pas pu être atteinte pour les données d'eau souterraine dans le cadre du présent projet, ce qui pourrait expliquer certains des défis rencontrés dans la caractérisation des sécheresses hydrogéologiques.

Dans un contexte d'analyse des changements climatiques, l'ajustement des distributions doit être réalisé exclusivement sur la période de référence, comme cela a été fait ici pour les indices météorologiques SPI, SPEI, SMRI et SWBI, ajustés sur la période 1970-2020. Il est également souhaitable que cette période de référence soit harmonisée entre les différents sites de mesure, c'est-à-dire qu'elle couvre les mêmes dates de début et de fin. Cette exigence est relativement simple à satisfaire lorsque des données météorologiques sont issues de grilles interpolées ou de réanalyses, mais elle devient plus contraignante lorsque des stations ponctuelles sont considérées, telles que les stations météorologiques ou hydrométriques.

Choix de l'indice

L'approche par indices standardisés se distingue par sa grande flexibilité et peut s'appliquer à toute variable d'intérêt, comme en témoigne la diversité d'indices existants (SPI, SPEI, SMRI, etc.). Il

est donc essentiel de sélectionner un indice qui reflète adéquatement la composante du cycle hydrologique la plus pertinente pour la ou les problématiques étudiées.

Dans la littérature, le SPEI est largement utilisé pour l'analyse de l'impact des changements climatiques sur les sécheresses météorologiques (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Han and Singh, 2023). Toutefois, en climat froid, il est crucial de tenir compte de la dynamique locale du cycle hydrologique, et en particulier du décalage temporel entre les précipitations solides et l'apport effectif en eau. À cet égard, l'inclusion d'un indice tenant explicitement compte de la neige apparaît essentielle. Les résultats de la présente étude montrent clairement que les conditions nivales peuvent influencer les sécheresses hydrologiques estivales (figure 4.1). Cette influence devient encore plus marquée en climat futur, où les trajectoires des indices divergent fortement en raison des processus considérés, notamment l'évapotranspiration potentielle et la fonte nivale (figures. 5.1 et 5.3). Plusieurs études recommandent ainsi l'intégration explicite de la neige dans le suivi des sécheresses (Zhang *et al.*, 2019)

Dans ce contexte, l'utilisation conjointe du SPEI et du SWBI apparaît comme une approche pertinente pour l'élaboration de portraits climatiques au Québec. Le SPEI s'est imposé comme un indice de référence pour le suivi des sécheresses et il est largement utilisé dans de nombreux systèmes de surveillance opérationnels. Il est bien adapté à l'analyse des conditions estivales, mais peut offrir un portrait incomplet lorsque la période d'agrégation recoupe des périodes dominées par les précipitations solides. Une mise en garde quant à cette limitation serait une manière appropriée d'encadrer l'interprétation de cet indice dans le contexte québécois. Le SWBI, proposé dans le cadre de la présente étude, est un indice seulement récemment développé, mais il s'inspire d'indices existants tels que le SMRI. Il permet une représentation adéquate de la dynamique nivale et apparaît ainsi bien adapté au contexte climatique québécois.

Période d'agrégation

Les indices standardisés peuvent être calculés pour différentes périodes d'agrégation (1, 3, 6 ou 12 mois) et celle-ci doit être sélectionnée selon l'échelle temporelle des variations attendues. Dans la présente étude, les sécheresses hydrologiques ont été caractérisées avec une période d'agrégation de trois mois (SSI-3). Les résultats ont démontré que les séries temporelles d'indices météorologiques agrégés sur trois mois présentaient la plus forte corrélation avec les séries SSI-3 (figure 4.3). Cependant, la période d'agrégation d'un mois a produit de meilleurs indicateurs de propagation selon les caractéristiques des sécheresses appariées (tableau 4.1). Ainsi, la période d'agrégation optimale dépend de l'objectif visé. La variabilité temporelle des débits est mieux capturée à l'échelle de trois mois, tandis qu'un système de prédiction de la sévérité des sécheresses hydrologiques pourrait tirer avantage d'une période d'un mois. Toutefois, les indicateurs de propagation associés à une agrégation sur trois mois étant très similaires à ceux obtenus avec une période d'un mois, l'agrégation de trois mois constitue un compromis raisonnable.

Au-delà de leur performance vis-à-vis des sécheresses hydrologiques, l'intérêt d'une période d'accumulation de trois mois réside également dans le fait que les courtes périodes d'agrégation sont les plus fortement corrélées à certains impacts, notamment le stress de la végétation (Bachmair *et al.*, 2018). Cela vient appuyer l'utilisation répandue des indices SPI-3 et SPEI-3 dans les

systèmes de surveillance. Une période d'agrégation de trois mois apparaît ainsi comme un compromis pertinent pour plusieurs applications. Additionnement, l'ajustement des distributions est simplifié et plus fiable en cette période d'agrégation, spécialement pour les indices tenant compte de la neige (SMRI, SWBI). Dans ce cas, la faible variabilité dans la fonte des neiges rend l'ajustement difficile avec de faibles périodes d'agrégation (moins de trois mois). Toutefois, si l'agrégation de trois mois est privilégiée, il devient essentiel de représenter adéquatement les processus de fonte nivale. À titre d'exemple, le SPEI-3 calculé sur des périodes printanières ne permet pas de brosser un portrait fidèle des apports. À l'inverse, des périodes d'agrégation plus longues (6 ou 12 mois) sont moins sensibles à la phase des précipitations et aux processus de fonte, mais au prix d'une moindre réactivité aux variations à court terme.

Choix de la distribution

Le choix de la distribution statistique utilisée influence fortement la valeur des indices standardisés. Dans la présente étude, nous avons réalisé un ajustement local en sélectionnant, pour chaque tronçon de rivière (SSI) et pour chaque bassin versant (indices météorologiques), la distribution avec le meilleur ajustement. La distribution Tweedie, reconnue pour sa grande flexibilité, a notamment été considérée. Une telle approche permet ainsi de maximiser la qualité de l'ajustement, ce qui est particulièrement pertinent dans des contextes variés. Toutefois, dans un contexte opérationnel, il est fréquent d'adopter une distribution unique par indice afin de simplifier le calcul et d'assurer une cohérence entre les sites où les points de grille adjacents, même si cette approche peut conduire à un ajustement moins satisfaisant. Cette approche peut fonctionner adéquatement pour les indices simples (e.g. SPI) mais est à prendre avec prudence avec le SSI où l'ajustement des distributions sur les débits est souvent problématique (Svensson *et al.*, 2017). Des enjeux similaires ont été rencontrés durant ce projet lors de l'ajustement des indices, d'où le choix d'avoir suivi une approche multidistribution. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les répercussions de la qualité de l'ajustement pour les indices standardisés et ainsi guider la méthodologie à privilégier dans le choix de la distribution.

6.3. Au-delà de l'étiage : une vision annuelle des sécheresses

Dans le cadre de ce projet, nous avons fait le choix d'étudier les sécheresses sur l'ensemble de l'année plutôt que de nous limiter aux seules périodes d'étiage. D'autres études en contexte nordique ont fait un choix méthodologique similaire (Teutschbein *et al.*, 2024). Bien que l'étiage soit généralement considéré comme la période avec le plus fort potentiel de conflits d'usage, un portrait annuel des sécheresses apparaît essentiel. En effet, en dehors des périodes d'étiage, les anomalies hydrologiques peuvent avoir des conséquences majeures sur plusieurs secteurs, notamment la production hydroélectrique, la navigation et divers usages industriels. Les anomalies hydrologiques à différents moments de l'année peuvent aussi avoir d'importantes conséquences pour les écosystèmes (Stubbington *et al.*, 2024; Ramos-Sánchez *et al.*, 2025).

Par ailleurs, les sécheresses observées durant l'étiage peuvent avoir débuté avant cette période et s'étendre bien au-delà de celle-ci, ce qui rend nécessaire une analyse à l'échelle annuelle. Par exemple, les travaux de classification de la présente étude ont montré l'importance de considérer les anomalies temporelles (sécheresse d'hiver chaud, sécheresse d'hiver froid, figure 4.1) afin de bien situer le contexte des événements de sécheresse. À titre d'exemple, même si l'année 2025

n'est pas incluse dans la présente étude, elle illustre la pertinence d'une approche annuelle : une sécheresse débutant à l'été peut se prolonger en hiver lorsque les apports sous forme de précipitations solides ne contribuent pas à rehausser les niveaux d'eau, pouvant ainsi prolonger les conditions de déficit. Se concentrer uniquement sur la période d'été ne permettrait pas de capturer cette dynamique essentielle à la compréhension des sécheresses hydrologiques.

6.4. Seuils de sécheresse et implications pour la gestion

La gestion de l'eau en contexte de sécheresse repose sur la capacité à identifier de manière fiable les périodes où la disponibilité en eau devient insuffisante pour répondre aux besoins des usages humains et des écosystèmes. Une disponibilité en eau insuffisante peut découler d'un déficit d'apport, d'une demande excessive ou d'une gestion inadéquate. Dans le cadre de ce projet, c'est principalement la composante liée au déficit d'apport qui a été étudiée, mais une bonne compréhension des enjeux de demande et de gestion est essentielle pour assurer une gestion adéquate des sécheresses.

Un cadre de gestion approprié pour la gestion des sécheresses requiert une définition opérationnelle pour déterminer le début et la fin des événements et ainsi guider la mise en œuvre de mesures de gestion. La présente étude a retenu des seuils issus de la littérature pour définir une sécheresse, soit une valeur d'indice standardisé inférieure à -1,5. Toutefois, l'utilisation de seuils explicitement reliés à des impacts serait plus pertinente, bien que peu de systèmes opérationnels semblent opter pour une telle approche (Bachmair et al., 2016). En effet, la connaissance de seuils explicitement reliés aux impacts est généralement très limitée. Or, une bonne connaissance de tels seuils serait particulièrement pertinente pour la gestion des écosystèmes, dont les besoins en eau peuvent rapidement être négligés en contexte de déficit (Ramos-Sánchez et al., 2025).

Une approche objective et locale pour la définition de seuils de sécheresse est généralement recommandée (Quiring, 2009). À cet égard, des travaux récents visent à relier les indices standardisés à des impacts concrets pour la société et les écosystèmes (Shyrokaya et al., 2024, 2025). De tels travaux requièrent toutefois une documentation systématique des impacts associés aux sécheresses, ce qui est demeuré encore rare. Certaines initiatives récentes, comme la European Drought Impact Database (Stahl et al., 2016, 2025) visent à combler cette lacune qui limite actuellement la validation et l'ajustement des outils de gestion.

7. Conclusion

Ce projet a permis de brosser un portrait complet des sécheresses hydrologiques au Québec méridional dans un contexte de climat en changement. En combinant des données historiques sur les eaux de surface (1970-2022) et souterraines (2012-2021) avec des projections climatiques jusqu'en 2100, cette étude a répondu à trois principaux objectifs, c'est-à-dire de caractériser les sécheresses hydrologiques et hydrogéologiques, identifier leurs déterminants météorologiques et quantifier leur évolution en climat futur. Les résultats associés à ces objectifs ont permis de faire ressortir des messages importants.

Les sécheresses sont des phénomènes variables et imprévisibles

L'analyse des données historiques a révélé que les sécheresses hydrologiques présentent une grande variabilité spatiale et temporelle. Certains événements historiques sont très localisés tandis que d'autres affectent la quasi-totalité d'un bassin versant. Cette variabilité est importante quant à la détection et la gestion des sécheresses. Il a été démontré que se fier à une seule station de mesure peut conduire à une sous-détection des événements de sécheresse à l'échelle du bassin versant. Ce résultat justifie le maintien de réseaux de surveillance denses et bien distribués, ou alternativement de soigneusement considérer les limites des interprétations tirées d'une seule station lors de la prise de décision. Pour les eaux souterraines, l'étude démontre une cohérence temporelle plus élevée des sécheresses entre les différents types d'aquifères lors d'événements majeurs, comme celui de 2021 qui a touché l'ensemble de la région étudiée.

La neige joue un rôle central dans le déclenchement des sécheresses

Une contribution importante du projet réside dans l'identification du rôle prépondérant de la neige comme déterminant des sécheresses hydrologiques au Québec. Plus de la moitié des sécheresses historiques sont liées aux processus de neige, une proportion qui augmente substantiellement au printemps. De plus, les indices météorologiques intégrant à la fois la fonte des neiges et l'évapotranspiration se révèlent nettement plus performants que les indices basés uniquement sur les précipitations pour prédire les sécheresses hydrologiques. Le modèle statistique développé avec ces indices montre qu'une augmentation d'un écart-type dans la sévérité des conditions météorologiques sèches multiplie par cinq le risque de débits sévèrement inférieurs à la normale. Ces résultats mettent de la lumière sur la façon dont les sécheresses devraient être comprises et anticipées au Québec, c'est-à-dire avec une meilleure considération de la saisonnalité de l'apport en eau dans les systèmes hydrologiques affectés par la fonte des neiges.

Un avenir climatique paradoxal

Les projections climatiques révèlent une évolution paradoxale qui nécessite une interprétation nuancée pour la gestion de l'eau. Bien que les conditions moyennes tendent vers plus d'humidité à l'échelle annuelle, les tendances varient considérablement selon les saisons. Les indices intégrant la fonte des neiges projettent des conditions nettement plus sèches au printemps, tandis que ceux considérant l'évapotranspiration suggèrent un assèchement estival. Ces divergences soulignent que différents processus hydrologiques domineront selon les saisons, nécessitant des stratégies

d'adaptation différenciées. D'autre part, les conditions extrêmes s'amplifieront substantiellement malgré des moyennes plus humides. Les périodes sèches sévères deviendront beaucoup plus fréquentes au printemps et en été, précisément lorsque les besoins en eau sont les plus importants. Simultanément, les conditions humides extrêmes s'intensifieront en hiver et en automne, créant potentiellement de nouveaux défis de gestion. Enfin, les événements de sécheresse météorologique eux-mêmes changeront de nature : ils seront plus fréquents, plus intenses, mais de plus courte durée. Cette évolution vers des événements plus extrêmes, mais plus brefs complique la gestion prévisionnelle et nécessite des capacités de réaction rapide.

Implication pour la gestion de l'eau

La forte variabilité spatiale des sécheresses et les limites de détection basées sur des stations isolées recommandent le maintien et le développement de réseaux de surveillance denses. Les investissements dans ces infrastructures sont essentiels pour détecter les sécheresses et coordonner les adaptations locales. De plus, l'amplification projetée de la fréquence et l'intensité des sécheresses, particulièrement au printemps, nécessitent une révision des approches de gestion. Cette période parfois considérée comme à faible risque pourrait connaître des stress hydriques accrus. Une gestion adaptative tenant compte de ces nouvelles réalités saisonnières sera essentielle pour maintenir la sécurité de l'approvisionnement en eau en saison estivale. Finalement, la diminution projetée du couvert neigeux au printemps représente un changement fondamental du cycle hydrologique québécois. Les infrastructures et systèmes de gestion conçus en fonction du régime nival actuel devront être réévalués et adaptés progressivement si une telle réalité se manifeste. Cette transformation aura des répercussions sur tous les usages de l'eau, de l'hydroélectricité à l'approvisionnement municipal ainsi que par les écosystèmes aquatiques.

En conclusion

Face à un climat en changement, le Québec méridional fera face à une réalité hydrologique plus contrastée : des extrêmes amplifiés, tant secs qu'humides, coexisteront avec des conditions moyennes plus humides. Les processus nivaux, qui ont historiquement joué un rôle déterminant dans le régime hydrologique régional, subiront des transformations qui modifieront la dynamique de la disponibilité de l'eau. Cette nouvelle réalité mandate une adaptation proactive et différenciée selon les saisons. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet fournissent aux décideurs des moyens d'anticiper ces changements et de planifier en conséquence. La poursuite de la surveillance, l'amélioration continue des capacités de prévision et l'intégration de ces connaissances dans les pratiques de gestion constitueront des éléments clés pour assurer la résilience des systèmes hydriques québécois. Le défi principal ne réside pas dans une raréfaction généralisée de l'eau, mais plutôt dans une redistribution temporelle et une amplification des extrêmes qui nécessiteront une gestion plus dynamique et adaptative des ressources disponibles.

8. Références

- Bachmair S, Stahl K, Collins K, Hannaford J, Acreman M, Svoboda M, Knutson C, Smith KH, Wall N, Fuchs B, et al. 2016. Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *WIREs Water* **3** (4): 516–536 DOI: 10.1002/wat2.1154
- Bachmair S, Tanguy M, Hannaford J, Stahl K. 2018. How well do meteorological indicators represent agricultural and forest drought across Europe? *Environmental Research Letters* **13** (3): 034042 DOI: 10.1088/1748-9326/aaafda
- Barker LJ, Fry M, Hannaford J, Nash G, Tanguy M, Swain O. 2022. Dynamic High Resolution Hydrological Status Monitoring in Real-Time: The UK Water Resources Portal. *Frontiers in Environmental Science* **10**: 752201 DOI: 10.3389/fenvs.2022.752201
- Barker, L. J., Hannaford, J., Chiverton, A., & Svensson, C. (2016). From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences*, *20*(6), 2483-2505.
- Beguiría, S., Vicente - Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, *34*(10), 3001-3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Bi, D., Dix, M., Marsland, S., O'Farrell, S., Sullivan, A., Bodman, R., ... & Heerdegen, A. (2020). Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian community climate and earth system simulator coupled model. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, *70*(1), 225-251.
- Bloomfield, J. P., & Marchant, B. P. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(12), 4769-4787.
- Bond N R, Lake P S and Arthington A H (2008) The impacts of drought on freshwater ecosystems: an Australian perspective. *Hydrobiologia*, *600*, 3–16.
- Brooks, M. E., Kristensen, K., van Benthem, K. J., Magnusson, A., Berg, C. W., Nielsen, A., Skaug, H. J., Maechler, M., & Bolker, B. M. (2017). glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *The R Journal*, *9*, 378–400. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
- Brunner, M. I., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2022). Moderate and severe hydrological droughts in Europe differ in their hydrometeorological drivers. *Water Resources Research*, *58*(10), e2022WR032871.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping : How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, *28*(17), 6938-6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>

- Cherchi, A., Fogli, P. G., Lovato, T., Peano, D., Iovino, D., Gualdi, S., ... & Navarra, A. (2019). Global mean climate and main patterns of variability in the CMCC-CM2 coupled model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *11*(1), 185-209.
- Dunn, P. K., & Smyth, G. K. (2005). Series evaluation of Tweedie exponential dispersion models. *Statistics and Computing*, *15*, 267–280.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, *9*, 1937–1958.
- Fioravanti G, Toreti A, Cammalleri C, Muñoz CA, Bavera D, De Jager A, Hrast Essenfelder A, Di Ciollo C, Masante D, Magni D, et al. 2025. A dataset for monitoring agricultural drought in Europe. *Scientific Data* **12** (1): 308 DOI: 10.1038/s41597-024-04199-8
- Fluss, R., Faraggi, D., & Reiser, B. (2005). Estimation of the Youden Index and its associated cutoff point. *Biometrical Journal: Journal of Mathematical Methods in Biosciences*, *47*(4), 458-472.
- Gottlieb, A.R., Mankin, J.S. Evidence of human influence on Northern Hemisphere snow loss. *Nature* **625**, 293–300 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06794-y>
- Gudmundsson, L., & Stagge, J. H. (2016). SCI : Standardized climate indices such as SPI, SRI or SPEI. R package version 1.0-2 [Software]. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=SCI>
- Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., von Storch, J. S., Brüggemann, N., ... & Stössel, A. (2019). Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the high-resolution model intercomparison project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development*, *12*(7), 3241-3281.
- Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M. A., Abe, M., ... & Kawamiya, M. (2020). Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development*, *13*(5), 2197-2244.
- Han J, Singh VP. 2023. A review of widely used drought indices and the challenges of drought assessment under climate change. *Environmental Monitoring and Assessment* **195** (12): 1438 DOI: 10.1007/s10661-023-12062-3
- Haslinger, K., Koffler, D., Schöner, W., & Laaha, G. (2014). Exploring the link between meteorological drought and streamflow: Effects of climate-catchment interaction. *Water Resources Research*, *50*(3), 2468-2487.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. (2011). The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *92*(4), 485–488.
- Heilbron, D. C. (1994). Zero-altered and other regression models for count data with added zeros. *Biometrical Journal*, *36*(5), 531-547.

Hipel, K. W., & McLeod, A. I. (1994). *Time series modelling of water resources and environmental systems* (Vol. 45). Elsevier.

Komatsu, H. (2005). Forest categorization according to dry - canopy evaporation rates in the growing season: Comparison of the Priestley – Taylor coefficient values from various observation sites. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(19), 3873-3896. <https://doi.org/10.1002/hyp.5869>

Kuiper, N. H. (1960). Tests concerning random points on a circle. *Indagationes Mathematicae (Proceedings)*, 63, 38–47. [https://doi.org/10.1016/S0019-3577\(60\)80034-5](https://doi.org/10.1016/S0019-3577(60)80034-5)

Jabbari, A., Music, B., Huard, D., Craig, J. R., Turcotte, R., Bizhani Manzar, M., ... & Anctil, F. (2024). Multimodel implementation of the Raven HBV-EC model for streamflow simulation and uncertainty quantification. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4775444>

Laaha, G., Gauster, T., Tallaksen, L. M., Vidal, J. P., Stahl, K., Prudhomme, C., ... & Wong, W. K. (2017). The European 2015 drought from a hydrological perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 3001-3024.

Lee, W. L., Wang, Y. C., Shiu, C. J., Tsai, I. C., Tu, C. Y., Lan, Y. Y., ... & Hsu, H. H. (2020). Taiwan Earth System Model Version 1: Description and evaluation of mean state. *Geoscientific Model Development*, 13(9), 3887-3904.

Lorenzo-Lacruz J, Morán-Tejeda E, Vicente-Serrano S M and López-Moreno J I (2013) Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 119–34.

Lytle D A and Poff N L (2004) Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, 19, 94–100.

[MELCCFP] Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. (n.d.). *2021 : le Québec connaît sa deuxième année la plus chaude et abrite le point le plus anormalement chaud sur Terre*. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2021/bilan.htm>

[MELCCFP] ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. (2023a). Atlas hydroclimatique du Québec méridional, Séries temporelles de débits (1970-2023) [Données]. Retrieved from <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/carte-portrait/index.htm>

[MELCCFP] ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. (2023 b). Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec, [Données], dans Données Québec, 2023, mis à jour le 07 janvier 2025. [<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/rsesq/>].

[MRNF] Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. (2019a) Géobase du réseau hydrographique du Québec, version 1.1 [Données]. Direction de la référence géographique. <https://mrnf.gouv.qc.ca/repertoire-geographique/reseau-hydrographique-grhq/>

[MRNF] Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts. (2019 b). Forêt ouverte [Données]. Retrieved from <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca>

[MRNF] Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. (2022) Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec, <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/zones-vegetation-domaines-bioclimatiques/>

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).

Mingelbier M, Trencia G, Dumas R, Dumas B, Mailhot Y, Bouchard C, Manolesco DC, Brodeur P, Hudon C, Ouelette G. 2001. Avis scientifique concernant la mortalité massive des carpes dans le Saint-Laurent durant l'été 2001. Société de la faune et des parcs du Québec, ministère de l'Environnement, Biodôme de Montréal, Environnement Canada. 25 p.

Mosley L M (2015) Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth-Science Reviews*, 140, 203–14.

Mullahy, J. (1986). Specification and testing of some modified count data models. *Journal of econometrics*, 33(3), 341-365.

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349-4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

Perumean-Chaney, S. E., Morgan, C., McDowall, D., & Aban, I. (2013). Zero-inflated and overdispersed: what's one to do?. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 83(9), 1671-1683.

Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92.

Quiring SM. 2009. Developing Objective Operational Definitions for Monitoring Drought. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48 (6): 1217–1229 DOI: 10.1175/2009JAMC2088.1

Ramos-Sánchez C, De Stefano L, Werner M. 2025. Does drought management care for nature? Identifying gaps in the consideration of freshwater ecosystems. *Environmental Research Letters* 20 (5): 053001 DOI: 10.1088/1748-9326/adc1e4

R Core Team. (2016). R : A language and environment for statistical computing (version 4.3.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.

[RNCAN] Natural Resources Canada (2013). Canadian Digital Elevation Model Product Specifications. Government technical report, Government of Canada, Natural Resources Canada, Canada Centre for Mapping and Earth observation, Sherbrooke (QC), Canada. Retrieved from https://ftp.geogratis.gc.ca/pub/nrcan_rncan/elevation/cdem_mnec/doc/CDEM_product_specs.pdf

- Sattar, M. N., Lee, J. Y., Shin, J. Y., & Kim, T. W. (2019). Probabilistic characteristics of drought propagation from meteorological to hydrological drought in South Korea. *Water Resources Management*, 33, 2439-2452.
- Seland, Ø., Bentsen, M., Olivié, D., Toniazzo, T., Gjermundsen, A., Graff, L. S., ... & Schulz, M. (2020). Overview of the Norwegian Earth System Model (NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK, historical, and scenario simulations. *Geoscientific Model Development*, 13(12), 6165-6200.
- Shyrokaya A, Messori G, Pechlivanidis I, Pappenberger F, Cloke HL, Di Baldassarre G. 2024. Significant relationships between drought indicators and impacts for the 2018–2019 drought in Germany. *Environmental Research Letters* 19 (1): 014037 DOI: 10.1088/1748-9326/ad10d9
- Shyrokaya A, Pappenberger F, Messori G, Pechlivanidis I, Cloke H, Di Baldassarre G. 2025. How good is my drought index? Evaluating predictability and ability to estimate impacts across Europe. *Environmental Research Letters* 20 (3): 034051 DOI: 10.1088/1748-9326/adb869
- Simeone C E, Hammond J C, Archfield S A, Broman D, Condon L E, Eldardiry H, Olson C G and Steyaert J C (2024) Declining Reservoir Reliability and Increasing Reservoir Vulnerability: Long - Term Observations Reveal Longer and More Severe Periods of Low Reservoir Storage for Major United States Reservoirs. *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL109476.
- Stahl K, Kohn I, Blauhut V, Urquijo J, De Stefano L, Acácio V, Dias S, Stagge JH, Tallaksen LM, Kampragou E, et al. 2016. Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16 (3): 801–819 DOI: 10.5194/nhess-16-801-2016
- Stahl K, Szillat K, Blauhut V, Hlavsova M, Rossi L, Masante D, Toreti A. 2025. Towards an operational European Drought Impacts Database (EDID) DOI: 10.5194/egusphere-2025-4806
- Staudinger, M., Stahl, K., & Seibert, J. (2014). A drought index accounting for snow. *Water Resources Research*, 50(10), 7861-7872. <https://doi.org/10.1002/2014WR015549>
- Stubbington R, England J, Sarremejane R, Watts G, Wood PJ. 2024. The effects of drought on biodiversity in UK river ecosystems: Drying rivers in a wet country. *WIREs Water* 11 (5): e1745 DOI: 10.1002/wat2.1745
- Svensson, C., Hannaford, J., & Prosdocimi, I. (2017). Statistical distributions for monthly aggregations of precipitation and streamflow in drought indicator applications. *Water Resources Research*, 53, 999–1018. <https://doi.org/10.1002/2016WR019778>
- Svoboda M, LeComte D, Hayes M, Heim R, Gleason K, Angel J, Rippey B, Tinker R, Palecki M, Stooksbury D, et al. 2002. THE DROUGHT MONITOR. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8): 1181–1190 DOI: 10.1175/1520-0477-83.8.1181
- Swart, N. C., Cole, J. N., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., ... & Winter, B. (2019). The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4823-4873.

- Teutschbein C, Grabs T, Giese M, Todorović A, Barthel R. 2024. Drought propagation in high-latitude catchments: Insights from a 60-Year Analysis Using Standardized Indices DOI: 10.5194/egusphere-2024-2742
- Teutschbein, C., Jonsson, E., Todorović, A., Tootoonchi, F., Stenfors, E., & Grabs, T. (2023). Future drought propagation through the water-energy-food-ecosystem nexus—A Nordic perspective. *Journal of Hydrology*, 617, 128963.
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., et al. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6 [Dataset]. *Scientific Data*, 9, 262.
- Van Loon A F and Laaha G (2015) Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 526, 3–14.
- Van Vliet M T H, Sheffield J, Wiberg D and Wood E F (2016) Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide. *Environ. Res. Lett.*, 11, 124021.
- Vicente-Serrano, S. M., McVicar, T. R., Miralles, D. G., Yang, Y., & Tomas-Burguera, M. (2020). Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(2), e632.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23 (7): 1696–1718 DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1
- Wan W, Zhao J, Popat E, Herbert C and Döll P (2021) Analyzing the Impact of Streamflow Drought on Hydroelectricity Production: A Global - Scale Study. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028087.
- Wang T, Tu X, Singh V P, Chen X, Lin K, Lai R and Zhou Z (2022) Socioeconomic drought analysis by standardized water supply and demand index under changing environment. *Journal of Cleaner Production*, 347, 131248.
- Wickham, H., Chang, W., & Wickham, M. H. (2016). Package ‘ggplot2’ [Software]. *Create elegant data visualisations using the grammar of graphics. Version*, 2(1), 1-189.
- Wlostowski A N, Jennings K S, Bash R E, Burkhardt J, Wobus C W and Aggett G (2022) Dry landscapes and parched economies: A review of how drought impacts nonagricultural socioeconomic sectors in the US Intermountain West. *WIREs Water*, 9, e1571.
- World Meteorological Organization. 2012. *Standardized precipitation index user guide*. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.
- Wood, S. N. (2017). *Generalized additive models: an introduction with R*. Chapman and Hall/CRC.
- Wood, S. N. (2011). Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 73(1), 3-36

Zhang B, Xia Y, Huning LS, Wei J, Wang G, AghaKouchak A. 2019. A Framework for Global Multicategory and Multiscalar Drought Characterization Accounting for Snow Processes. *Water Resources Research* **55** (11): 9258–9278 DOI: 10.1029/2019WR025529

Ziehn, T., Chamberlain, M. A., Law, R. M., Lenton, A., Bodman, R. W., Dix, M., ... & Srbinovsky, J. (2020). The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, *70*(1), 193-214.

9. Liste des figures

FIGURE 1.1 VUE D'ENSEMBLE DU PROJET ET ORGANISATION DES DIFFÉRENTES SECTIONS DU RAPPORT.....	10
FIGURE 2.1 ZONE D'ÉTUDE DES EAUX DE SURFACE MONTRANT LA SÉLECTION DES 109 BASSINS VERSANTS POUR LA CARACTÉRISATION DES SÉCHERESSES HYDROLOGIQUES, INCLUANT LES 6718 TRONÇONS DE COURS D'EAU TIRÉS DE L'ATLAS HYDROCLIMATIQUE DU QUÉBEC MÉRIDIONAL (MELCCFP, 2023A). LA TOPOGRAPHIE EST TIRÉE DU MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉLÉVATION DU CANADA (RNCAN, 2013).....	11
FIGURE 2.2 ZONE D'ÉTUDE DES EAUX SOUTERRAINES MONTRANT LES 66 PUIITS SÉLECTIONNÉS POUR LA CARACTÉRISATION DES SÉCHERESSES HYDROLOGIQUES.....	12
FIGURE 2.3 PROCESSUS EN DEUX ÉTAPES POUR IDENTIFIER LES ÉPISODES DE SÉCHERESSE HYDROLOGIQUES À A) L'ÉCHELLE DU TRONÇON ET B) L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT. LE PANNEAU (A) ILLUSTRE COMMENT DEUX ÉPISODES DE SÉCHERESSE SONT IDENTIFIÉS À PARTIR D'UNE SÉRIE CHRONOLOGIQUE DE L'INDICE DE DÉBIT NORMALISÉ (SSI) POUR LE TRONÇON NO 1 ET ENSUITE CARACTÉRISÉS SELON LEUR DURÉE ET LEUR SÉVÉRITÉ. LE PANNEAU (B) MONTRE COMMENT LES ÉVÉNEMENTS À L'ÉCHELLE DU TRONÇON SONT AGRÉGÉS POUR DÉFINIR LES ÉVÉNEMENTS À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT. LORSQUE PLUSIEURS ÉVÉNEMENTS PROVENANT DU MÊME TRONÇON ONT ÉTÉ REGROUPÉS EN UN SEUL ÉVÉNEMENT À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT (ÉVÉNEMENT NO 2, TRONÇON 4), LEUR DURÉE ET LEUR SÉVÉRITÉ ONT ÉTÉ ADDITIONNÉES. LES CARACTÉRISTIQUES DE CHAQUE ÉVÉNEMENT À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT ONT ÉTÉ CALCULÉES, COMME LES VALEURS MÉDIANES DES ÉVÉNEMENTS CORRESPONDANTS À L'ÉCHELLE DU TRONÇON.	19
FIGURE 2.4 CONDITIONS DE CORRESPONDANCE DES ÉPISODES DE SÉCHERESSE HYDROGÉOLOGIQUE(SMI-x ($x = 1, 3, 6, 12$) VS. SGI-1). IL A ÉTÉ DÉMONTRÉ QUE LES ALIGNEMENTS POSSIBLES DES ÉPISODES DE SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE CORRESPONDENT AUX ÉPISODES DE SÉCHERESSE HYDROGÉOLOGIQUES.	20
FIGURE 2.5 ARBRE DE DÉCISION DE LA CLASSIFICATION DES ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE. LES SÉCHERESSES HYDROLOGIQUES SONT CLASSÉES EN FONCTION DES PRÉCIPITATIONS, DE L'ÉVAPORATION POTENTIELLE ET DU COUVERT DE NEIGE. *LA FIN DE LA SAISON NEIGEUSE A LIEU APRÈS LA DERNIÈRE OCCURRENCE DE PRÉCIPITATIONS SOLIDES POUR CHAQUE BASSIN VERSANT.	24
FIGURE 3.1 FRÉQUENCES RELATIVES PAR CATÉGORIE (AFFICHÉES SOUS FORME DE BARRES ET DE LIGNES SUPERPOSÉES) DE L'INDICE DE DÉBIT NORMALISÉ (SSI) POUR LES TRONÇONS NE SUBISSANT PAS DE SÉCHERESSE LORS D'ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSE À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT. LES BARRES GRISÉS REPRÉSENTENT L'ENSEMBLE DE LA ZONE D'ÉTUDE ET LA LIGNE COLORÉE EN POINTILLÉS FAIT RÉFÉRENCE AUX QUATRE SAISONS D'OCCURRENCE DES SÉCHERESSES.	30
FIGURE 3.2 RELATION ENTRE L'ÉTENDUE SPATIALE DES SÉCHERESSES (PROPORTION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE TOUCHÉE PAR LA SÉCHERESSE POUR UN ÉVÉNEMENT DONNÉ) ET LEUR SÉVÉRITÉ (SOMME DES VALEURS ABSOLUES DE SSI PENDANT L'ÉVÉNEMENT) SELON LA SAISON D'OCCURRENCE. LA SÉVÉRITÉ EST REPRÉSENTÉE SUR L'AXE Y À L'AIDE D'UNE ÉCHELLE LOGARITHMIQUE (LOGARITHME NATUREL) ($e^1 \sim 3, e^2 \sim 10, e^3 \sim 30$).	31
FIGURE 3.3 CHRONOLOGIE DES ÉPISODES DE SÉCHERESSE DES EAUX SOUTERRAINES IDENTIFIÉS PAR LE SGI D'UN MOIS (SGI-1).	31
FIGURE 3.4 LA COUVERTURE DE SÉCHERESSE, DÉFINIE COMME LE POURCENTAGE DE PUIITS EN SÉCHERESSE DANS DEUX TYPES D'AQUIFÈRES (A) CHAQUE MOIS ET (B) À DIFFÉRENTES SAISONS. DJF = DÉCEMBRE-JANVIER-FÉVRIER, MAM = MARS-AVRIL-MAI, JJA = JUIN-JUILLET-AOÛT, SON = SEPTEMBRE-OCTOBRE-NOVEMBRE.	32
FIGURE 3.5 RÉPARTITION SPATIALE DES CARACTÉRISTIQUES DE LA SÉVÉRITÉ DE LA SÉCHERESSE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LES PUIITS DU SUD DU QUÉBEC INCLUANT LA SÉVÉRITÉ MOYENNE, MAXIMALE ET L'ÉCART TYPE. LES ANALYSES ONT ÉTÉ RÉALISÉES SUR UNE PÉRIODE COMMUNE DE 10 ANS.	34
FIGURE 3.6 RELATION ENTRE LE NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSE IDENTIFIÉE PAR BASSIN VERSANT LORSQUE TOUS LES TRONÇONS DISPONIBLES SONT UTILISÉS (AXE DES X) ET LORSQUE (A) SEUL LE TRONÇON LE PLUS EN AVAL D'UN BASSIN VERSANT EST UTILISÉ OU (B) UN TRONÇON SÉLECTIONNÉ AU HASARD EST UTILISÉ. DANS (B), LES POINTS ET LES LIGNES POINTILLÉES REPRÉSENTENT LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE DU NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSE IDENTIFIÉE À PARTIR DE CHAQUE ÉCHANTILLONNAGE. LA COULEUR DES POINTS DE DONNÉES REPRÉSENTE L'AIRE DE DRAINAGE DU BASSIN VERSANT.	35

FIGURE 3.7 PROPORTION D'ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSE DÉTECTÉS À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT EN UTILISANT UN NOMBRE CROISSANT DE TRONÇONS SÉLECTIONNÉS AU HASARD. L'AXE DES X (TAUX DE DÉTECTION DE LA SÉCHERESSE) REPRÉSENTE LE RAPPORT ENTRE LE NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS DÉTECTÉS À L'AIDE D'UN NOMBRE RÉDUIT DE TRONÇONS ET LE NOMBRE TOTAL D'ÉVÉNEMENTS DÉTECTÉS À L'AIDE DE TOUS LES TRONÇONS. L'AXE DES Y REPRÉSENTE LE NOMBRE DE TRONÇONS PAR 100 KM ² D'AIRES DE DRAINAGE DU BASSIN VERSANT.	36
FIGURE 4.1 RÉPARTITION DES TYPES DE SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE POUR LES ÉVÉNEMENTS RÉPERTORIÉS DANS LES 109 BASSINS VERSANTS DU QUÉBEC MÉRIDIONAL ENTRE 1970 ET 2022. LES SÉCHERESSES LIÉES À LA PLUIE SONT CATÉGORISÉES EN SÉCHERESSE DE TRANSITION PLUIE-NEIGE, SÉCHERESSE ATMOSPHÉRIQUE OU SÉCHERESSE DUE À UN DÉFICIT PLUVIOMÉTRIQUE. LES SÉCHERESSES LIÉES À LA NEIGE SONT CATÉGORISÉES EN SÉCHERESSE DE FONTE, SÉCHERESSE D'HIVER CHAUD, SÉCHERESSE D'HIVER FROID, SÉCHERESSE COMPOSITE.	39
FIGURE 4.2. TYPES DE SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE DOMINANTS PAR BASSIN VERSANT À L'ÉCHELLE DU QUÉBEC MÉRIDIONAL. CHAQUE POINT IDENTIFIE LE TYPE PLUS FRÉQUENT PAR BASSIN VERSANT PAR SA COULEUR, ET LA FORME DU POINT CARACTÉRISE LA PROPORTION RELATIVE DU TYPE DOMINANT. LE TYPE DOMINANT EST REPRÉSENTÉ POUR A) TOUTES SAISONS CONFONDUES PUIS B-E) PAR SAISON.	40
FIGURE 4.3 CORRÉLATION ENTRE L'INDICE NORMALISÉ DE DÉBIT (SSI, PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS) ET DIFFÉRENTS INDICES MÉTÉOROLOGIQUES POUR DIFFÉRENTES PÉRIODES D'ACCUMULATION (1, 3 ET 6 MOIS). LES INDICES MÉTÉOROLOGIQUES CONSIDÉRÉS SONT : L'INDICE NORMALISÉ DE PRÉCIPITATION (SPI), L'INDICE NORMALISÉ DE PRÉCIPITATION-ÉVAPORATION (SPEI), L'INDICE NORMALISÉ DE FONTE ET RUISSELLEMENT (SMRI) ET L'INDICE NORMALISÉ DE BILAN HYDRIQUE (SWBI). LES POINTS REPRÉSENTENT LES 109 BASSINS VERSANTS DE LA ZONE D'ÉTUDE.	41
FIGURE 4.4 COMPILATION DES INDICES MÉTÉOROLOGIQUES PRÉSENTANT LA PLUS FORTE CORRÉLATION AVEC L'INDICE NORMALISÉ DE DÉBIT (SSI, PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS) POUR LES 109 BASSINS VERSANTS POUR CHAQUE MOIS AINSI QUE POUR L'ENSEMBLE DE LA SÉRIE TEMPORELLE DE 1970 À 2022 (TS). LES INDICES MÉTÉOROLOGIQUES CONSIDÉRÉS SONT : L'INDICE NORMALISÉ DE PRÉCIPITATION (SPI), L'INDICE NORMALISÉ DE PRÉCIPITATION-ÉVAPORATION (SPEI), L'INDICE NORMALISÉ DE FONTE ET RUISSELLEMENT (SMRI) ET L'INDICE NORMALISÉ DE BILAN HYDRIQUE (SWBI).	41
FIGURE 4.5 MODÈLE DE RÉGRESSION LOGISTIQUE POUR LA PREMIÈRE ÉTAPE DU MODÈLE HURDLE MONTRANT LA PROBABILITÉ QU'UNE PÉRIODE SÈCHE D'UN POINT DE VUE MÉTÉOROLOGIQUE (SWBI < 0) SE TRANSFORME EN SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE. LES COURBES SONT REPRÉSENTÉES POUR CHAQUE SAISON OÙ SURVIENT UNE PÉRIODE SÈCHE, LA PÉRIODE ESTIVALE ÉTANT PRISE COMME RÉFÉRENCE DANS LE MODÈLE. LES ZONES OMBRAGÉES INDIQUENT LES INTERVALLES DE CONFIANCE À 95 % DU MODÈLE.	44
FIGURE 4.6 MODÈLE ADDITIF GÉNÉRALISÉ POUR LA DEUXIÈME ÉTAPE DU MODÈLE HURDLE MONTRANT LA RELATION ENTRE LA SÉVÉRITÉ DE LA PÉRIODE SÈCHE D'UN POINT DE VUE MÉTÉOROLOGIQUE (SWBI < 0) ET LA SÉVÉRITÉ DE LA SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE, LORSQU'UNE PÉRIODE SÈCHE S'EST EFFECTIVEMENT TRANSFORMÉE EN SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE. LES ZONES OMBRAGÉES INDIQUENT LES INTERVALLES DE CONFIANCE À 95 % DU MODÈLE. LES TRIANGLES NOIRS REPRÉSENTENT LES VALEURS PRÉDITES PAR LE MODÈLE, TANDIS QUE LES CERCLES GRIS REPRÉSENTENT LES OBSERVATIONS.	45
FIGURE 4.7 CORRÉLATION ENTRE LES INDICES NORMALISÉS MÉTÉOROLOGIQUES ET LE SGI POUR DES PÉRIODES D'ACCUMULATION DE 1, 3, 6 ET 12 MOIS.	46
FIGURE 4.8 COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES ATTRIBUTS DE LA SÉCHERESSE DES EAUX SOUTERRAINES (DURÉE, SÉVÉRITÉ ET INTENSITÉ) ET LES INDICES DE SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE (SPI, SPEI, SWBI) POUR UNE SÉRIE DE SEUILS D'APPARITION. LE SEUIL D'APPARITION DÉFINIT LA VALEUR DE L'INDICE À PARTIR DE LAQUELLE UNE SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE EST CONSIDÉRÉE COMME AYANT COMMENCÉ. LES MARQUEURS « x » INDIQUENT DES CORRÉLATIONS STATISTIQUEMENT SIGNIFICATIVES (p < 0,05). CHAQUE PANNEAU CORRESPOND À UNE CARACTÉRISTIQUE DIFFÉRENTE DE LA SÉCHERESSE DES EAUX SOUTERRAINES. VAR (SPI) INDIQUE LA VARIABILITÉ DE LA CORRÉLATION ENTRE LE SPI ET LE SGI.	47
FIGURE 4.9 LES DÉLAIS DE PROPAGATION ENTRE LES DIFFÉRENTS INDICES DE SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE STANDARDISÉS (SPI : INDICE DE PRÉCIPITATIONS STANDARDISÉ, SPEI : INDICE DE PRÉCIPITATIONS ET D'ÉVAPOTRANSPIRATION STANDARDISÉ, SWBI : INDICE DE BILAN HYDRIQUE STANDARDISÉ) ET SGI-1 DANS LES AQUIFÈRES CAPTIFS ET LIBRES.	48
FIGURE 4.10 CHRONOLOGIE DES ÉPISODES DE SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE, IDENTIFIÉS PAR DIFFÉRENTS INDICES DE SÉCHERESSE STANDARDISÉS (SPI, SPEI, SWBI ET SGI) DANS DIVERS PUIITS D'AQUIFÈRES LIBRES.	

LES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUES SONT DÉFINIES COMME DES ANOMALIES NÉGATIVES, AVEC DES SEUILS DE DÉCLENCHEMENT ET DE SÉVÉRITÉ FIXÉS À 0.	48
FIGURE 4.11 CHRONOLOGIE DES ÉPISODES DE SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE, IDENTIFIÉS PAR DIFFÉRENTS INDICES DE SÉCHERESSE STANDARDISÉS (SPI, SPEI, SWBI ET SGI) DANS DIVERS PUIITS D'AQUIFÈRES CAPTIFS. LES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUES SONT DÉFINIES COMME DES ANOMALIES NÉGATIVES, AVEC DES SEUILS DE DÉCLENCHEMENT ET DE SÉVÉRITÉ FIXÉS À 0.	49
FIGURE 4.12 BOÎTES À MOUSTACHES COMPARANT LA DURÉE, L'INTENSITÉ ET LA SÉVÉRITÉ DES ÉPISODES DE SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE APPARIÉS (A) ET NON APPARIÉS (NON APPARIÉ, NA), SELON TROIS INDICES DE SÉCHERESSE (SPI, SPEI ET SWBI) ET DEUX TYPES D'AQUIFÈRES (NON CONFINÉS ET CONFINÉS). LES DIFFÉRENCES (Δ) (ABSOLUES ET EN POURCENTAGE) ENTRE LES GROUPES A ET NA SONT INDIQUÉES SOUS CHAQUE PAIRE DE BOÎTES À MOUSTACHES. LES ASTÉRISQUES INDIQUENT LES NIVEAUX DE SIGNIFICATION : ***p < 0,001, **p < 0,01, *p < 0,05, NS : NON SIGNIFICATIF.	51
FIGURE 5.1 MOYENNES D'ENSEMBLE DES QUATRE INDICES NORMALISÉS CALCULÉES À L'ÉCHELLE ANNUELLE (PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 12 MOIS), AVEC LA DISTRIBUTION DES MOYENNES D'ENSEMBLE ANNUELLES POUR LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2020) ET LA PÉRIODE DE FUTUR ÉLOIGNÉ (2070-2100) SELON SSP3-7.0. LA LIGNE HORIZONTALE NOIRE (VALEUR D'INDICE = 0) REPRÉSENTE LA MOYENNE DE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE, ET CHAQUE VALEUR D'INDICE REPRÉSENTE LE NOMBRE D'ÉCARTS-TYPES DE DÉVIATION PAR RAPPORT À CELLE-CI. LES INDICES MÉTÉOROLOGIQUES CONSIDÉRÉS SONT : L'INDICE NORMALISÉ DE PRÉCIPITATION (SPI), L'INDICE NORMALISÉ DE PRÉCIPITATION-ÉVAPORATION (SPEI), L'INDICE NORMALISÉ DE FONTE ET RUISSELLEMENT (SMRI) ET L'INDICE NORMALISÉ DE BILAN HYDRIQUE (SWBI).	54
FIGURE 5.2. AMPLEUR DU CHANGEMENT DES VALEURS D'INDICE ANNUEL (PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 12 MOIS) PAR BASSIN VERSANT SELON LES DIFFÉRENTS INDICES STANDARDISÉS. LE CHANGEMENT REPRÉSENTE LA DIFFÉRENCE DE MOYENNE ENTRE LA PÉRIODE « FUTUR ÉLOIGNÉ » (2070-2100) ET LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2020), SELON LES MOYENNES D'ENSEMBLE SOUS LE SCÉNARIO SSP3-7.0. AINSI, UNE AMPLEUR DE CHANGEMENT DE 1,0 SIGNIFIE QUE LES CONDITIONS REPRÉSENTÉES PAR L'INDICE CONCERNÉ SONT PLUS ÉLEVÉES D'UNE MAGNITUDE D'UN ÉCART-TYPE EN PÉRIODE FUTURE, PAR RAPPORT À LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE.	54
FIGURE 5.3 MOYENNES D'ENSEMBLE DES QUATRE INDICES NORMALISÉS CALCULÉES À L'ÉCHELLE SAISONNIÈRE (PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS) SELON SSP3-7.0 POUR A) L'HIVER, B) LE PRINTEMPS, C) L'ÉTÉ ET D) L'AUTOMNE. LA LIGNE HORIZONTALE NOIRE (VALEUR D'INDICE = 0) REPRÉSENTE LA MOYENNE DE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE, ET CHAQUE VALEUR D'INDICE REPRÉSENTE LE NOMBRE D'ÉCARTS-TYPES DE DÉVIATION PAR RAPPORT À CELLE-CI. LES INDICES MÉTÉOROLOGIQUES CONSIDÉRÉS SONT : L'INDICE NORMALISÉ DE PRÉCIPITATION (SPI), L'INDICE NORMALISÉ DE PRÉCIPITATION-ÉVAPORATION (SPEI), L'INDICE NORMALISÉ DE FONTE ET RUISSELLEMENT (SMRI) ET L'INDICE NORMALISÉ DE BILAN HYDRIQUE (SWBI).	55
FIGURE 5.4. AMPLEUR DU CHANGEMENT DES VALEURS D'INDICE SAISONNIERS (PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS) PAR BASSIN VERSANT ET PAR SAISON, SELON LES DIFFÉRENTS INDICES STANDARDISÉS. LE CHANGEMENT REPRÉSENTE LA DIFFÉRENCE DE MOYENNE ENTRE LA PÉRIODE « FUTUR ÉLOIGNÉ » (2070-2100) ET LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2020), SELON LES MOYENNES D'ENSEMBLE SOUS LE SCÉNARIO SSP3-7.0. AINSI, UNE AMPLEUR DE CHANGEMENT DE 1,0 SIGNIFIE QUE LES CONDITIONS REPRÉSENTÉES PAR L'INDICE CONCERNÉ SONT PLUS ÉLEVÉES D'UNE MAGNITUDE D'UN ÉCART-TYPE EN PÉRIODE FUTURE, PAR RAPPORT À LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE, ET VICE VERSA POUR UN CHANGEMENT DE -1.0.	56
FIGURE 5.5 MOYENNES D'ENSEMBLE DU NOMBRE ANNUEL DE MOIS AVEC A) DES CONDITIONS SÈCHES SÉVÈRES (INDICE < -1,5), B) DES CONDITIONS MOYENNES (-1 < INDICE < 1) ET C) DES CONDITIONS HUMIDES SÉVÈRES (INDICE > 1,5) POUR LES QUATRE INDICES MÉTÉOROLOGIQUES NORMALISÉS CALCULÉS AVEC UNE PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS, SELON SSP3-7.0. LES LIGNES EN GRAS RELIÉES PAR DES POINTS REPRÉSENTENT LES MOYENNES DÉCENNALES – PAR EXEMPLE, UN POINT EN 2010 REPRÉSENTE LA MOYENNE DU NOMBRE ANNUEL DE MOIS AU-DESSUS OU EN DESSOUS DES SEUILS FIXÉS POUR LES ANNÉES 2010-2019 – ET LES LIGNES CLAIRES REPRÉSENTENT LES MOYENNES ANNUELLES.	58
FIGURE 5.6. AMPLEUR DU CHANGEMENT DANS LA FRÉQUENCE DES CONDITIONS MOYENNES ET SÉVÈRES, PAR BASSIN VERSANT, SELON LES DIFFÉRENTS INDICES STANDARDISÉS. LE CHANGEMENT REPRÉSENTE LA DIFFÉRENCE DE MOYENNE ENTRE LE NOMBRE DE MOIS ANNUEL POUR LA PÉRIODE « FUTUR ÉLOIGNÉ » (2070-2100) ET LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-	

- 2020), SELON LES MOYENNES D'ENSEMBLE SOUS LE SCÉNARIO SSP3-7.0. AINSI, UNE AMPLIEUR DE CHANGEMENT DE 1,0 SIGNIFIE QU'EN PÉRIODE FUTURE, LE BASSIN VERSANT SE TROUVE DANS LES CONDITIONS CONCERNÉES UN MOIS DE PLUS PAR ANNÉE EN MOYENNE PAR RAPPORT À LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE, VICE VERSA POUR UN CHANGEMENT DE -1.0. 59
- FIGURE 5.7** CHANGEMENTS RELATIFS ENTRE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2010) ET LA PÉRIODE DE FUTUR ÉLOIGNÉ (2070-2100) DES CONDITIONS DES CONDITIONS SÈCHES SÉVÈRES (S.S., INDICE < -1,5), DES CONDITIONS MOYENNES (MOY., -1 < INDICE < 1) ET DES CONDITIONS HUMIDES SÉVÈRES (S.H., INDICE > 1,5) POUR A) L'ANNÉE, B), L'HIVER, C) LE PRINTEMPS, D) L'ÉTÉ ET E) L'AUTOMNE POUR LES QUATRE INDICES MÉTÉOROLOGIQUES NORMALISÉS CALCULÉS AVEC UNE PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS, SELON SSP3-7.0. 59
- FIGURE 5.8** MOYENNES D'ENSEMBLE DES CARACTÉRISTIQUES SELON SSP3-7.0 POUR A) LE NOMBRE ANNUEL, B) LA DURÉE, C) L'INTENSITÉ ET D) LA SÉVÉRITÉ DES ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSE POUR LES QUATRE INDICES MÉTÉOROLOGIQUES NORMALISÉS CALCULÉS AVEC UNE PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS. LES LIGNES EN GRAS RELIÉES PAR DES POINTS REPRÉSENTENT LES MOYENNES DÉCENNALES – PAR EXEMPLE, UN POINT EN 2010 REPRÉSENTE LA MOYENNE DU NOMBRE ANNUEL DE MOIS AU-DESSUS OU EN DESSOUS DES SEUILS FIXÉS POUR LES ANNÉES 2010-2019 – ET LES LIGNES CLAIRES REPRÉSENTENT LES MOYENNES ANNUELLES. 61
- FIGURE 5.9** CHANGEMENTS RELATIFS DU NOMBRE ANNUEL DE SÉCHERESSES (Nb.), DE LEUR DURÉE (Dur.), DE LEUR INTENSITÉ (Int.) ET DE LEUR SÉVÉRITÉ (Sév.) SELON LES QUATRE INDICES NORMALISÉS CALCULÉS AVEC UNE PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS, ENTRE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2010) ET LA PÉRIODE DE FUTUR ÉLOIGNÉ (2070-2100) SELON LE SCÉNARIO SSP3-7.0, POUR A) L'ANNÉE, B) L'HIVER, C) LE PRINTEMPS, D) L'ÉTÉ ET E) L'AUTOMNE, SELON SSP3-7.0. 61
- FIGURE 5.10.** CHANGEMENTS RELATIFS ENTRE LA PÉRIODE « FUTUR ÉLOIGNÉ » (2070-2100) ET LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2020) DANS LES CARACTÉRISTIQUES DES SÉCHERESSES PAR BASSIN VERSANT, SELON LES DIFFÉRENTS INDICES STANDARDISÉS, SOUS LE SCÉNARIO SSP3-7.0. AINSI, CHANGEMENT RELATIF DE 10% SIGNIFIE QU'EN PÉRIODE FUTURE, LES SÉCHERESSE SONT 10% PLUS SÉVÈRE EN PÉRIODE FUTURE QU'EN PÉRIODE DE RÉFÉRENCE. 62
- FIGURE 5.11.** CARACTÉRISTIQUES DES SÉCHERESSES HYDROLOGIQUES DE L'ANNÉE 2021 AU QUÉBEC MÉRIDIONAL, IDENTIFIÉ AVEC L'INDICE SSI À UNE PÉRIODE D'AGRÉGATION DE 3 MOIS. UN POINT GRIS SIGNIFIE QU'AUCUNE SÉCHERESSE N'A ÉTÉ IDENTIFIÉ DANS LE BASSIN VERSANT DURANT CETTE ANNÉE. 63
- FIGURE 5.12.** TYPE DE SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE DE L'ANNÉE 2021 POUR CHACUN DES BASSINS VERSANTS. UN POINT GRIS SIGNIFIE QU'AUCUNE SÉCHERESSE N'A ÉTÉ IDENTIFIÉ DANS LE BASSIN VERSANT DURANT CETTE ANNÉE. 64
- FIGURE 5.13.** OCCURRENCE, SÉVÉRITÉ ET PROBABILITÉ DE PROPAGATION DES CONDITIONS DE SÉCHERESSE IDENTIFIÉ PAR L'INDICE SWBI À UNE PÉRIODE D'AGRÉGATION DE 1 MOIS, EN PROJECTION CLIMATIQUE SOUS LE SCÉNARIO SSP3-7.0, DE 2030 À 2100. UN POINT GRIS SIGNIFIE QU'AUCUNE SÉCHERESSE N'A ÉTÉ IDENTIFIÉ DANS LE BASSIN VERSANT DURANT CETTE ANNÉE. 65
- FIGURE C1.** MOYENNES D'ENSEMBLE DES QUATRE INDICES NORMALISÉS CALCULÉES À L'ÉCHELLE ANNUELLE (PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 12 MOIS), AVEC LA DISTRIBUTION DES MOYENNES D'ENSEMBLE ANNUELLES POUR LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2020) ET LA PÉRIODE DE FUTUR ÉLOIGNÉ (2070-2100) SELON SSP2-4.5. LA LIGNE HORIZONTALE NOIRE (VALEUR D'INDICE = 0) REPRÉSENTE LA MOYENNE DE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE, ET CHAQUE VALEUR D'INDICE REPRÉSENTE LE NOMBRE D'ÉCARTS-TYPES DE DÉVIATION PAR RAPPORT À CELLE-CI. 91
- FIGURE C2.** MOYENNES D'ENSEMBLE DES QUATRE INDICES NORMALISÉS CALCULÉES À L'ÉCHELLE SAISONNIÈRE (PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS) SELON SSP2-4.5 POUR A) L'HIVER, B) LE PRINTEMPS, C) L'ÉTÉ ET D) L'AUTOMNE. LA LIGNE HORIZONTALE NOIRE (VALEUR D'INDICE = 0) REPRÉSENTE LA MOYENNE DE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE, ET CHAQUE VALEUR D'INDICE REPRÉSENTE LE NOMBRE D'ÉCARTS-TYPES DE DÉVIATION PAR RAPPORT À CELLE-CI. 91
- FIGURE C3.** MOYENNES D'ENSEMBLE DU NOMBRE ANNUEL DE MOIS AVEC A) DES CONDITIONS SÈCHES SÉVÈRES (INDICE < -1,5), B) DES CONDITIONS MOYENNES (-1 < INDICE < 1) ET C) DES CONDITIONS HUMIDES SÉVÈRES (INDICE > 1,5) POUR LES QUATRE INDICES MÉTÉOROLOGIQUES NORMALISÉS CALCULÉS AVEC UNE PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS, SELON SSP2-4.5. LES LIGNES EN GRAS RELIÉES PAR DES POINTS REPRÉSENTENT LES MOYENNES DÉCENNALES – PAR EXEMPLE, UN POINT EN 2010 REPRÉSENTE LA MOYENNE DU NOMBRE ANNUEL DE MOIS AU-DESSUS OU EN DESSOUS DES SEUILS FIXÉS POUR LES ANNÉES 2010-2019 – ET LES LIGNES CLAIRES REPRÉSENTENT LES MOYENNES ANNUELLES. 93
- FIGURE C4.** CHANGEMENTS RELATIFS ENTRE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2010) ET LA PÉRIODE DE FUTUR ÉLOIGNÉ (2070-2100) DES CONDITIONS DES CONDITIONS SÈCHES SÉVÈRES (S.S., INDICE < -1,5), DES CONDITIONS MOYENNES (MOY., -

1 < INDICE < 1) ET DES CONDITIONS HUMIDES SÉVÈRES (S.H., INDICE > 1,5) POUR A) L'ANNÉE, B), L'HIVER, C) LE PRINTEMPS, D) L'ÉTÉ ET E) L'AUTOMNE POUR LES QUATRE INDICES MÉTÉOROLOGIQUES NORMALISÉS CALCULÉS AVEC UNE PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS, SELON SSP2-4.5.	93
FIGURE C5. MOYENNES D'ENSEMBLE DES CARACTÉRISTIQUES SELON SSP2-4.5 POUR A) LE NOMBRE ANNUEL, B) LA DURÉE, C) L'INTENSITÉ ET D) LA SÉVÉRITÉ DES ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSE POUR LES QUATRE INDICES MÉTÉOROLOGIQUES NORMALISÉS CALCULÉS AVEC UNE PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS. LES LIGNES EN GRAS RELIÉES PAR DES POINTS REPRÉSENTENT LES MOYENNES DÉCENNALES – PAR EXEMPLE, UN POINT EN 2010 REPRÉSENTE LA MOYENNE DU NOMBRE ANNUEL DE MOIS AU-DESSUS OU EN DESSOUS DES SEUILS FIXÉS POUR LES ANNÉES 2010-2019 – ET LES LIGNES CLAIRES REPRÉSENTENT LES MOYENNES ANNUELLES.....	94
FIGURE C6. CHANGEMENTS RELATIFS DU NOMBRE ANNUEL DE SÉCHERESSES (Nb.), DE LEUR DURÉE (Dur.), DE LEUR INTENSITÉ (Int.) ET DE LEUR SÉVÉRITÉ (Sév.) SELON LES QUATRE INDICES NORMALISÉS CALCULÉS AVEC UNE PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS, ENTRE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2010) ET LA PÉRIODE DE FUTUR ÉLOIGNÉ (2070-2100) SELON LE SCÉNARIO SSP2-4.5, POUR A) L'ANNÉE, B) L'HIVER, C) LE PRINTEMPS, D) L'ÉTÉ ET E) L'AUTOMNE.	94
FIGURE C7 AMPLEUR DU CHANGEMENT DES VALEUR D'INDICE ANNUEL (PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 12 MOIS) PAR BASSIN VERSANT SELON LES DIFFÉRENTS INDICES STANDARDISÉS. LE CHANGEMENT REPRÉSENTE LA DIFFÉRENCE DE MOYENNE ENTRE LA PÉRIODE « FUTUR ÉLOIGNÉ » (2070-2100) ET LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2020), SELON LES MOYENNES D'ENSEMBLE SOUS LE SCÉNARIO SSP2-4.5.	95
FIGURE C8. AMPLEUR DU CHANGEMENT DES VALEURS D'INDICE SAISONNIERS (PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS) PAR BASSIN VERSANT ET PAR SAISON, SELON LES DIFFÉRENTS INDICES STANDARDISÉS. LE CHANGEMENT REPRÉSENTE LA DIFFÉRENCE DE MOYENNE ENTRE LA PÉRIODE « FUTUR ÉLOIGNÉ » (2070-2100) ET LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2020), SELON LES MOYENNES D'ENSEMBLE SOUS LE SCÉNARIO SSP2-4.5.....	95
FIGURE C9. AMPLEUR DU CHANGEMENT DANS LA FRÉQUENCE DES CONDITIONS MOYENNES ET SÉVÈRES, PAR BASSIN VERSANT, SELON LES DIFFÉRENTS INDICES STANDARDISÉS. LE CHANGEMENT REPRÉSENTE LA DIFFÉRENCE DE MOYENNE ENTRE LE NOMBRE DE MOIS ANNUEL POUR LA PÉRIODE « FUTUR ÉLOIGNÉ » (2070-2100) ET LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2020), SELON LES MOYENNES D'ENSEMBLE SOUS LE SCÉNARIO SSP2-4.5.....	96
FIGURE C10. CHANGEMENTS RELATIFS ENTRE LA PÉRIODE « FUTUR ÉLOIGNÉ » (2070-2100) ET LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE (1970-2020) DANS LES CARACTÉRISTIQUES DES SÉCHERESSE PAR BASSIN VERSANT, SELON LES DIFFÉRENTS INDICES STANDARDISÉS, SOUS LE SCÉNARIO SSP2-4.5.	97
FIGURE C11. OCCURRENCE, SÉVÉRITÉ ET PROBABILITÉ DE PROPAGATION DES CONDITIONS DE SÉCHERESSE IDENTIFIÉ PAR L'INDICE SWBI À UNE PÉRIODE D'AGRÉGATION DE 1 MOIS, EN PROJECTION CLIMATIQUE SOUS LE SCÉNARIO SSP2-4.5, DE 2030 À 2100. UN POINT GRIS SIGNIFIE QU'AUCUNE SÉCHERESSE N'A ÉTÉ IDENTIFIÉ DANS LE BASSIN VERSANT DURANT CETTE ANNÉE.	97

9. Liste des tableaux

TABLEAU 2.1 INDICES NORMALISÉS POUR LES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES CONSIDÉRÉES. LES COULEURS ASSOCIÉES SONT UTILISÉES À TRAVERS L'ARTICLE POUR FACILITER LA LECTURE DES FIGURES. LE TYPE D'INDICE DISTINGUE LES INDICES CALCULÉS POUR DES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES. PARMIS LES INDICES MÉTÉOROLOGIQUES, ON RETROUVE DES INDICES INFLUENCÉS PAR L'ÉVAPORATION POTENTIELLE (ETP) OU PAR LA FONTE.	14
TABLEAU 3.1 CARACTÉRISTIQUES DES SÉCHERESSES HYDROLOGIQUES À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT POUR UNE PÉRIODE D'ACCUMULATION DE 3 MOIS. LES VALEURS MÉDIANES (MÉD.), MOYENNES (MOY.) ET LE COEFFICIENT DE VARIATION (CV) SONT PRÉSENTÉS.....	29
TABLEAU 3.2 PARAMÈTRES DE RÉGRESSION ESTIMÉS, ERREURS TYPES, VALEURS Z, VALEURS P ET INTERVALLES DE CONFIANCE À 95 % DU MODÈLE LINÉAIRE MIXTE ÉVALUANT L'INFLUENCE DE L'ÉTENDUE SPATIALE ET DE L'OCCURRENCE SUR LA SÉVÉRITÉ DES SÉCHERESSES HYDROLOGIQUES ASSOCIÉES AUX EAUX DE SURFACE. LES VALEURS ESTIMÉES DE LA VARIANCE (Σ) POUR Σ_{DBASSIN} ET $\Sigma_{\text{ANNÉE}}$ SONT RESPECTIVEMENT DE 0,018 ET 0,031. LA VALEUR R^2 ESTIMÉE EST DE 0,37 (N = 2864).	30
TABLEAU 3.3 CARACTÉRISTIQUES DES ÉPISODES DE SÉCHERESSE DES EAUX SOUTERRAINES À L'ÉCHELLE ANNUELLE ET SAISONNIÈRE.	33
TABLEAU 4.1 CORRÉLATION ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES (DURÉE, SÉVÉRITÉ, INTENSITÉ) DES PÉRIODES SÈCHES D'UN POINT DE VUE MÉTÉOROLOGIQUE ET DES SÉCHERESSES HYDROLOGIQUES AINSI QUE LES CARACTÉRISTIQUES DE PROPAGATION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUES EN SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE. POUR CHAQUE MÉTRIQUE, LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE POUR LES 109 BASSINS VERSANTS SONT PRÉSENTÉS. DANS CHAQUE COLONNE, L'INDICE LE PLUS PERFORMANT (VALEUR LA PLUS ÉLEVÉE) A ÉTÉ SURLIGNÉ EN VERT, TANDIS QUE LE MOINS PERFORMANT (VALEUR LA PLUS FAIBLE) A ÉTÉ SURLIGNÉ EN ORANGE. PLUSIEURS CELLULES SONT SURLIGNÉES DANS LA MÊME COLONNE SI LES VALEURS SONT IDENTIQUES.	42
TABLEAU 4.2 TAUX DE CORRESPONDANCE ENTRE LES ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE ET LES SÉCHERESSES HYDROGÉOLOGIQUES SELON LE TYPE D'AQUIFÈRE.....	50
TABLEAU 5.1 TENDANCE DÉCENNALE ENTRE 1970 ET 2100 A) DES INDICES MÉTÉOROLOGIQUES NORMALISÉS, B) DES OCCURRENCES DE CONDITIONS SÈCHES/HUMIDES ET C) DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSES SELON LES MOYENNES D'ENSEMBLE DES QUATRE INDICES NORMALISÉS SELON LE SSP3-7.0. UNE ÉTOILE INDIQUE UNE TENDANCE SIGNIFICATIVE SELON LE TEST NON PARAMÉTRIQUE DE MANN-KENDALL. LES TENDANCES ONT ÉTÉ QUANTIFIÉES À L'AIDE DE LA MÉTHODE D'ESTIMATION NON PARAMÉTRIQUE DE LA PENTE DE SEN.	57
TABLEAU B1. SYMBOLES ET VARIABLES UTILISÉS DANS LE CALCUL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE DE PRIESTLEY-TAYLOR (ÉQUATIONS B1-B13).	90
TABLEAU C1 TENDANCE DÉCENNALE ENTRE 1970 ET 2100 A) DES INDICES MÉTÉOROLOGIQUES NORMALISÉS, B) DES OCCURRENCES DE CONDITIONS SÈCHES/HUMIDES ET C) DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉVÉNEMENTS DE SÉCHERESSES SELON LES MOYENNES D'ENSEMBLE DES QUATRE INDICES NORMALISÉS SELON LE SSP2-4.5. UNE ÉTOILE INDIQUE UNE TENDANCE SIGNIFICATIVE SELON LE TEST NON PARAMÉTRIQUE DE MANN-KENDALL. LES TENDANCES ONT ÉTÉ QUANTIFIÉES À L'AIDE DE LA MÉTHODE D'ESTIMATION NON PARAMÉTRIQUE DE LA PENTE DE SEN.	92

Annexe A : Pseudo-code du modèle de neige simplifié à partir du module neige du modèle hydrologique HBV-EC

La fonte de la neige a été calculée à l'aide d'une version simplifiée du module neige du modèle hydrologique HBV-EC. Ce module comprend un composant d'accumulation de neige (discrétisant les précipitations en pluie/neige selon des seuils de température) ainsi qu'un composant de fonte basé sur une approche degré-jour, avec des paramètres calibrés spécifiquement pour notre région d'étude (Jabbari et al 2024).

Les précipitations sont ajoutées à l'accumulation de neige (A) lorsque la température de l'air (T_a) ($^{\circ}\text{C}$) est inférieure à la température seuil (TT) ($^{\circ}\text{C}$). La fonte de la neige est contrainte par l'accumulation neige du jour précédent et calculée à l'aide d'un facteur degré-jour (C_m) ($\text{mm}/\text{jour}\cdot^{\circ}\text{C}$), également lorsque T_a est inférieure à TT . La teneur en eau liquide (S_l) du manteau neigeux est déterminée en prenant en compte des précipitations (P) (mm), la fonte (M) (mm) et le regel (R) (mm), et est limitée par la capacité de rétention en eau (C_{wh}) (-). La contribution au ruissellement de surface (Q) (mm) correspond à toute l'eau excédant la capacité C_{wh} du manteau neigeux.

Les paramètres calibrés pour la région d'étude tirée de Jabbari et al. (2024) sont les suivant :

- $TT = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $C_{wh} = 0,04$
- $C_{fr} = 0,05$
- $C_m = 6,177\ 241 \text{ mm}/\text{day } ^{\circ}\text{C}$

Pseudo-code du modèle de neige/

if $T_{a,t} < T_T$ **then**

$$\begin{aligned} R_t &= \min [S_{l,t-1}, C_{fr}C_m(T_T - T_{a,t})] \\ A_t &= A_{t-1} + P_t + R_t \\ S_{l,t} &= S_{l,t-1} - R_t \end{aligned}$$

else

$$\begin{aligned} M_t &= \min [A_{t-1}, C_m(T_T - T_{a,t-1})] \\ A_t &= A_{t-1} - M_t \\ S_{l,t} &= S_{l,t-1} + P_t + M_t \end{aligned}$$

if $S_{l,t} > C_{wh}A_t$ **then**

$$\begin{aligned} Q_t &= S_{l,t} - C_{wh}A_t \\ S_{l,t} &= C_{wh}A_t \end{aligned}$$

end if

end if

Annexe B – Calcul de l'évapotranspiration potentielle avec l'équation de Priestley-Taylor

L'évapotranspiration potentielle (ETP) de Priestley-Taylor est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$PET = \frac{\alpha_{pt}\Delta R_n}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (B1)$$

Le coefficient de Priestley-Taylor (α_{pt}) a été paramétré selon le couvert forestier dominant du Québec et ses régions bioclimatiques (MRNF, 2019b). Les coefficients sélectionnés étaient de 0,82, 0,65 et 0,55 pour les forêts tempérées de feuillus, tempérées de conifères et boréales de conifères, respectivement (Komatsu, 2005).

Toutes les autres variables nécessaires à son calcul ainsi que leurs équations sont détaillées ci-dessous :

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (B2)$$

$$d_r = 1 + 0.33 \cos\left(\frac{2\pi}{365J}\right) \quad (B3)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365J} - 1.39\right) \quad (B4)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (B5)$$

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5}Z)R_a \quad (B6)$$

$$e_{as} = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_a}{T_a + 237.3}\right) \quad (B7)$$

$$e_a = \frac{RH}{100} e_{as} \quad (B8)$$

$$R_{nl} = \sigma T_a^4 (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \quad (B9)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (B10)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (B11)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_a}{T_a + 237.3}\right)\right]}{(T_a + 237.3)^2} \quad (B12)$$

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \times 10^{-3} \quad (B13)$$

Tableau B1. Symboles et variables utilisés dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle de Priestley-Taylor (équations B1-B13).

Abréviation	Description	Unités
Δ	Pente de la courbe de pression de vapeur saturante	kPa °C ⁻¹
α	Albédo de surface	-
α_{pt}	Coefficient de Priestley-Taylor	-
δ	Déclinaison solaire	rad
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (4 903 x 10 ⁻⁹)	MJ m ⁻² °K ⁻⁴
ε	Rapport des masses moléculaires de la vapeur d'eau et de l'air sec (0,622)	-
γ	Constante psychrométrique	kPa °C ⁻¹
λ	Chaleur latente de vaporisation ($\approx 2,45$)	MJ Kg ⁻¹
ω_s	Angle horaire du coucher du soleil	rad
φ	Latitude	rad
c_p	Chaleur spécifique de l'air	MJ Kg ⁻¹ °C ⁻¹
d_r	Distance relative inverse Terre-Soleil	-
e_{as}	Pression de vapeur de saturation à la température de l'air	kPa
e_a	Pression de vapeur de l'air	kPa
G_{sc}	Constante solaire (0.0820)	MJ m ⁻² min ⁻¹
J	Jour de l'année	-
P	Pression atmosphérique	kPa
PET	Évapotranspiration potentielle	mm
R_a	Rayonnement extraterrestre	MJ m ⁻²
RH	Humidité relative	%
R_n	Rayonnement net	MJ m ⁻²
R_{nl}	Rayonnement à ondes longues net	MJ m ⁻²
R_{ns}	Rayonnement à ondes courtes net	MJ m ⁻²
R_s	Rayonnement à ondes courtes entrant	MJ m ⁻²
R_{so}	Rayonnement solaire en ciel dégagé	MJ m ⁻²
T_a	Température de l'air	°C
Z	Élévation au-dessus du niveau de la mer	m

Annexe C – Résultats de l'objectif 3 (section 5) avec le scénario d'émission SSP2-4.5

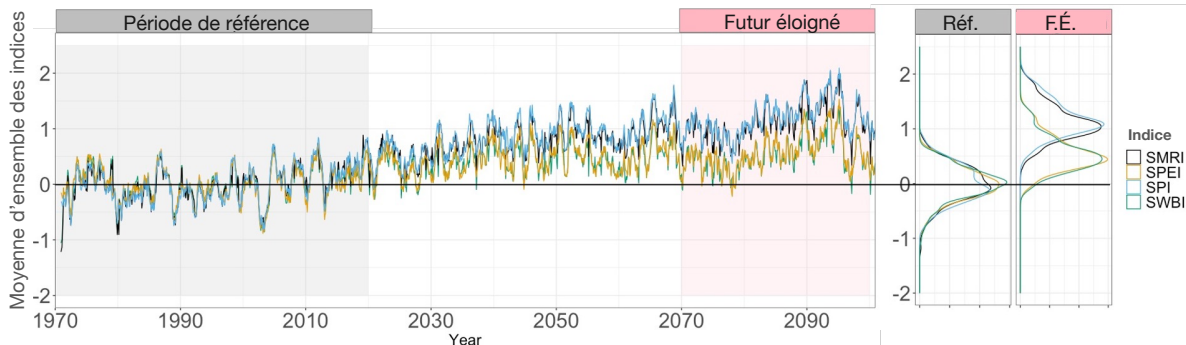


Figure C1. Moyennes d'ensemble des quatre indices normalisés calculées à l'échelle annuelle (période d'accumulation de 12 mois), avec la distribution des moyennes d'ensemble annuelles pour la période de référence (1970-2020) et la période de futur éloigné (2070-2100) selon SSP2-4.5. La ligne horizontale noire (valeur d'indice = 0) représente la moyenne de la période de référence, et chaque valeur d'indice représente le nombre d'écart-types de déviation par rapport à celle-ci.

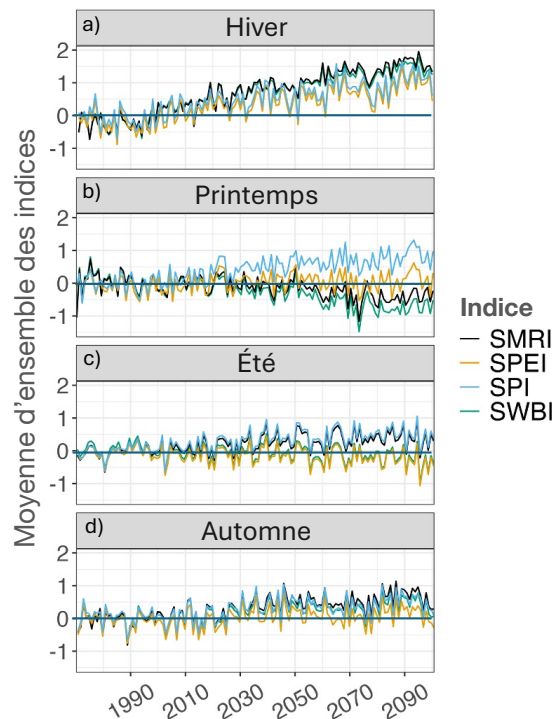


Figure C2. Moyennes d'ensemble des quatre indices normalisés calculées à l'échelle saisonnière (période d'accumulation de 3 mois) selon SSP2-4.5 pour a) l'hiver, b) le printemps, c) l'été et d) l'automne. La ligne horizontale noire (valeur d'indice = 0) représente la moyenne de la période de référence, et chaque valeur d'indice représente le nombre d'écart-types de déviation par rapport à celle-ci.

Tableau C1. Tendance décennale entre 1970 et 2100 a) des indices météorologiques normalisés, b) des occurrences de conditions sèches/humides et c) des caractéristiques des événements de sécheresses selon les moyennes d'ensemble des quatre indices normalisés selon le SSP2-4.5. Une étoile indique une tendance significative selon le test non paramétrique de Mann-Kendall. Les tendances ont été quantifiées à l'aide de la méthode d'estimation non paramétrique de la pente de Sen.

Variables	Période ou caractéristique	SPI	SPEI	SMRI	SWBI
a) Indices (nb d'écart-type par décennie)	Annuel (fig. 5.1)	0,132*	0,060*	0,132*	0,060*
	Hiver (fig. 5.2a)	0,105*	0,105*	0,165*	0,150*
	Printemps (fig. 5,2 b)	0,080*	0,019*	-0,047*	-0,081*
	Été (fig. 5.2c)	0,050*	-0,019*	0,044*	-0,024*
	Automne (fig. 5.2d)	0,044*	0,021*	0,065*	0,043*
b) Occurrence annuelle (nb de mois par année par décennie)	Conditions sèches sévères (3M, fig. 5.3a)	-0,040*	0,014*	0,015*	0,071*
	Conditions moyennes (3M, fig. 5,3 b)	-0,141*	-0,161*	-0,246*	-0,257*
	Conditions humides sévères (3M, fig. 5.3c)	0,189*	0,115*	0,220*	0,167*
c) Caractéristiques des événements de sécheresse (par décennie)	Nombre annuel d'événements (fig. 5.4a)	-0,190*	0,050*	0,010*	0,280*
	Durée (mois, fig. 5,4 b)	-0,210*	-0,128*	-0,188*	-0,089*
	Intensité (nb d'écart-type, fig. 5.4c)	0,054*	0,035*	0,032*	0,009*
	Sévérité (nb d'écart-type, fig. 5.4d)	-0,185*	-0,0044	-0,094	0,060*

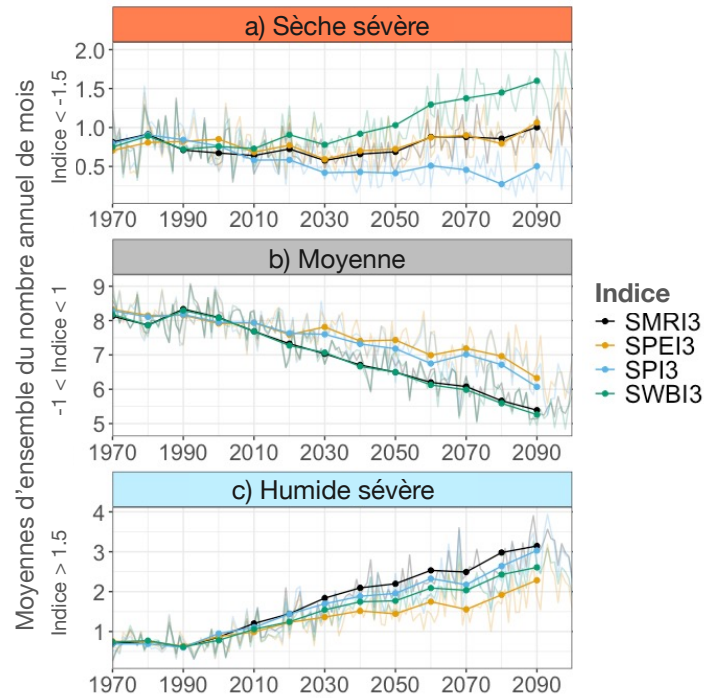


Figure C3. Moyennes d'ensemble du nombre annuel de mois avec a) des conditions sèches sévères (indice < -1,5), b) des conditions moyennes (-1 < indice < 1) et c) des conditions humides sévères (indice > 1,5) pour les quatre indices météorologiques normalisés calculés avec une période d'accumulation de 3 mois, selon SSP2-4.5. Les lignes en gras reliées par des points représentent les moyennes décennales – par exemple, un point en 2010 représente la moyenne du nombre annuel de mois au-dessus ou en dessous des seuils fixés pour les années 2010-2019 – et les lignes claires représentent les moyennes annuelles.

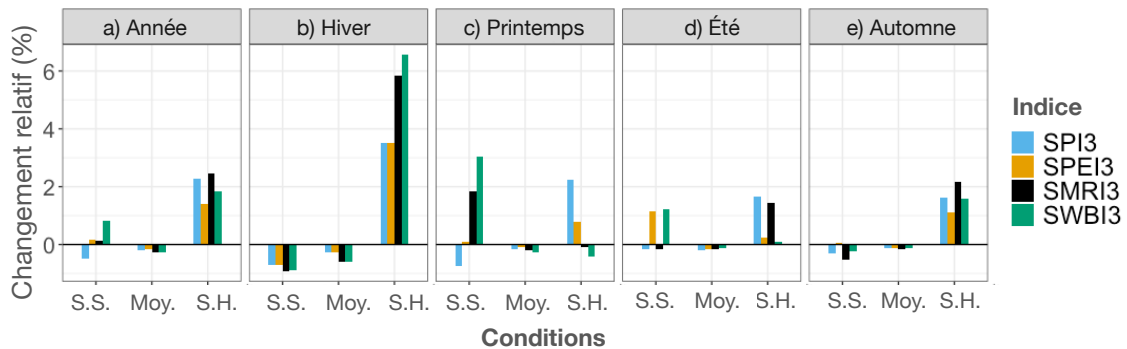


Figure C4. Changements relatifs entre la période de référence (1970-2010) et la période de futur éloigné (2070-2100) des conditions des conditions sèches sévères (S.S., indice < -1,5), des conditions moyennes (Moy., -1 < indice < 1) et des conditions humides sévères (S.H., indice > 1,5) pour a) l'année, b) l'hiver, c) le printemps, d) l'été et e) l'automne pour les quatre indices météorologiques normalisés calculés avec une période d'accumulation de 3 mois, selon SSP2-4.5.

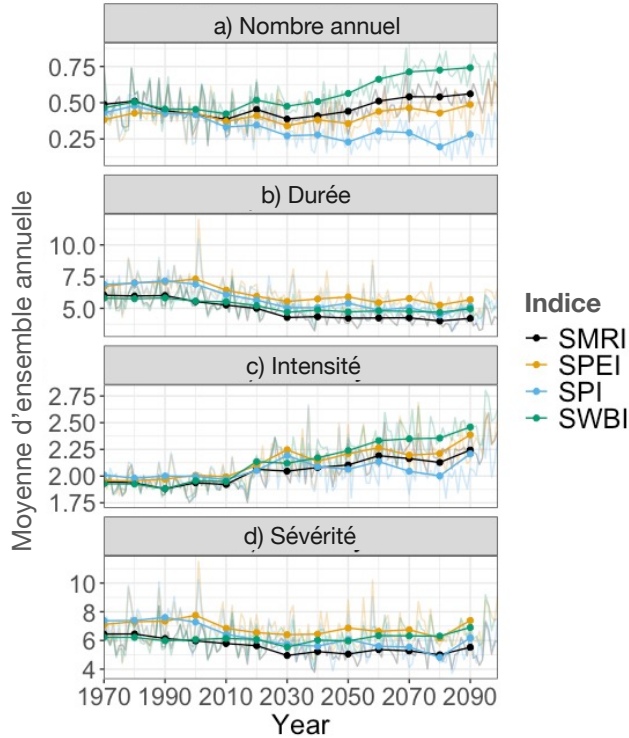


Figure C5. Moyennes d'ensemble des caractéristiques selon SSP2-4.5 pour a) le nombre annuel, b) la durée, c) l'intensité et d) la sévérité des événements de sécheresse pour les quatre indices météorologiques normalisés calculés avec une période d'accumulation de 3 mois. Les lignes en gras reliées par des points représentent les moyennes décennales – par exemple, un point en 2010 représente la moyenne du nombre annuel de mois au-dessus ou en dessous des seuils fixés pour les années 2010-2019 – et les lignes claires représentent les moyennes annuelles.

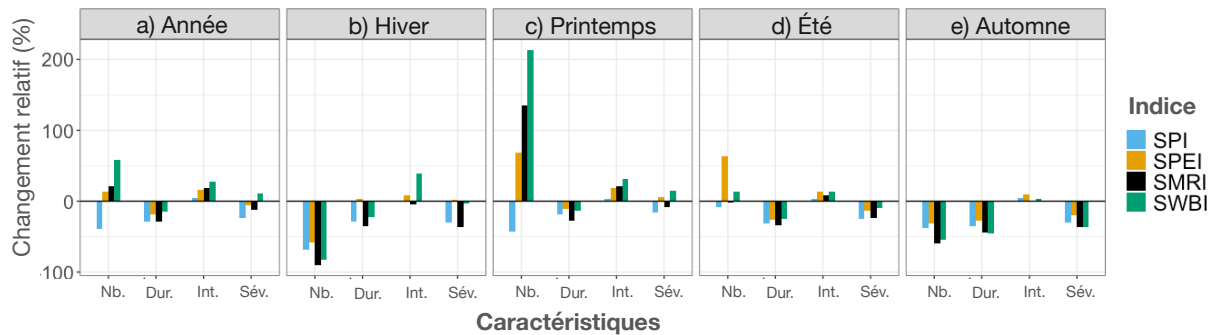


Figure C6. Changements relatifs du nombre annuel de sécheresses (Nb.), de leur durée (Dur.), de leur intensité (Int.) et de leur sévérité (Sév.) selon les quatre indices normalisés calculés avec une période d'accumulation de 3 mois, entre la période de référence (1970-2010) et la période de futur éloigné (2070-2100) selon le scénario SSP2-4.5, pour a) l'année, b) l'hiver, c) le printemps, d) l'été et e) l'automne.

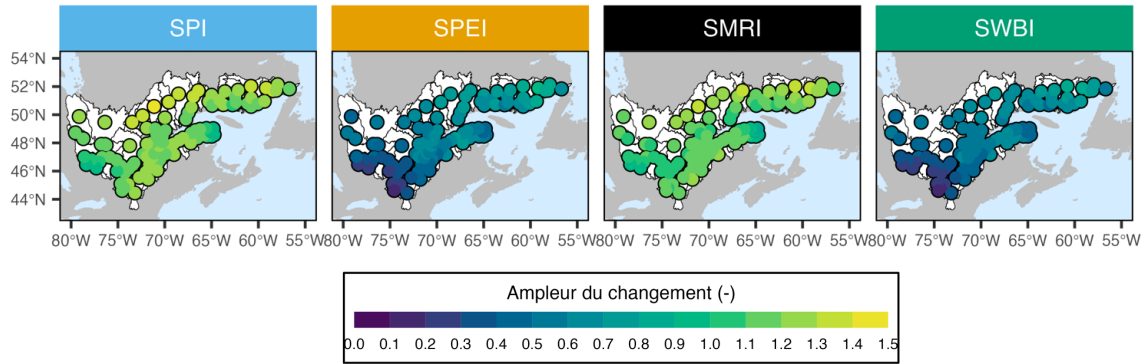


Figure C7 Ampleur du changement des valeurs d'indice annuel (période d'accumulation de 12 mois) par bassin versant selon les différents indices standardisés. Le changement représente la différence de moyenne entre la période « futur éloigné » (2070-2100) et la période de référence (1970-2020), selon les moyennes d'ensemble sous le scénario SSP2-4.5.

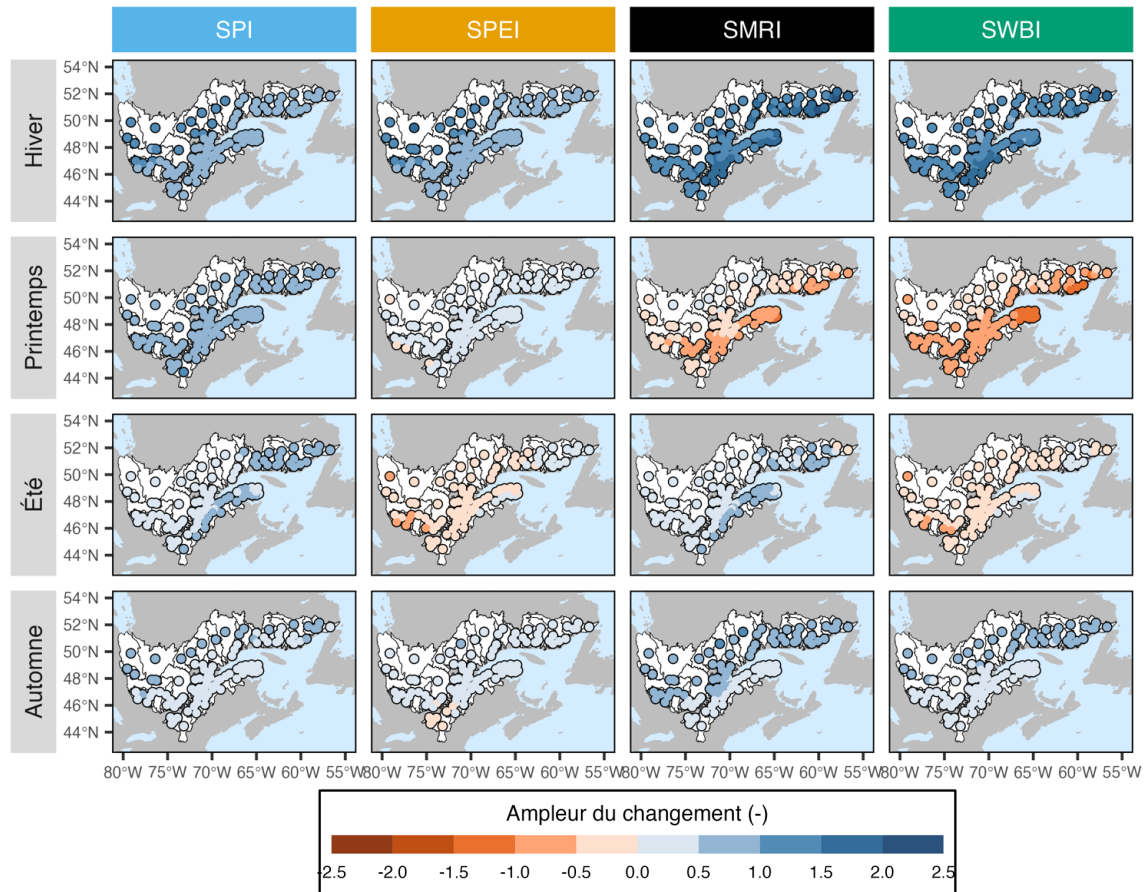


Figure C8. Ampleur du changement des valeurs d'indice saisonniers (période d'accumulation de 3 mois) par bassin versant et par saison, selon les différents indices standardisés. Le changement représente la différence de moyenne entre la période « futur éloigné » (2070-2100) et la période de référence (1970-2020), selon les moyennes d'ensemble sous le scénario SSP2-4.5.

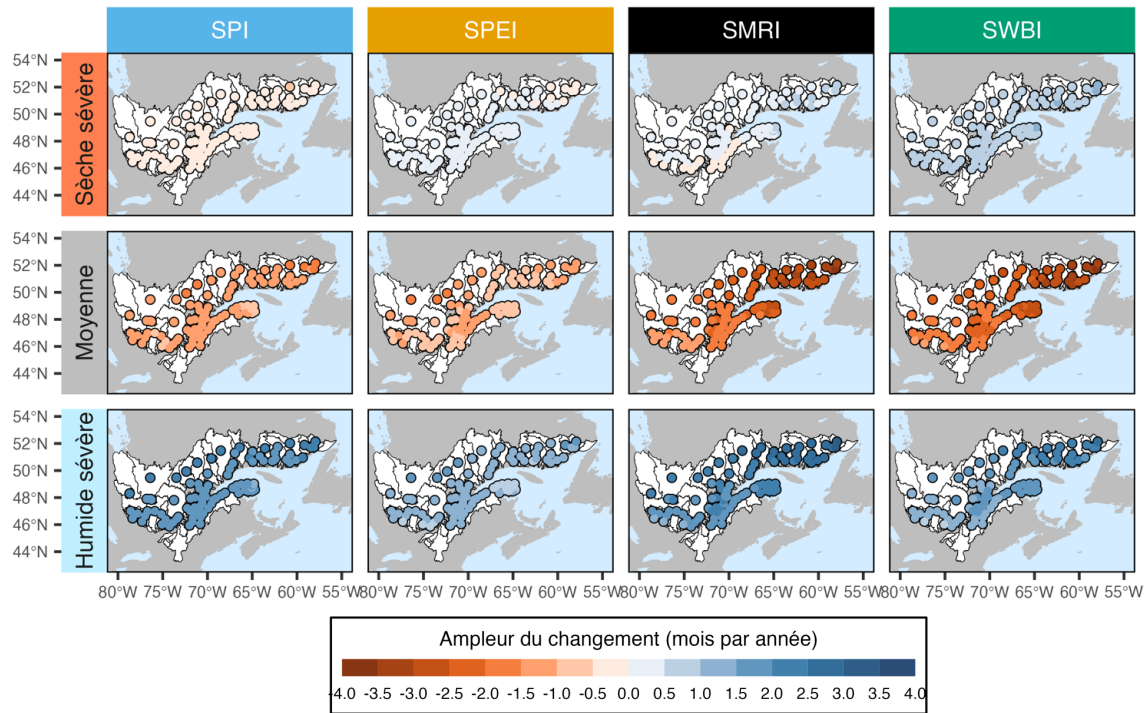


Figure C9. Ampleur du changement dans la fréquence des conditions moyennes et sévères, par bassin versant, selon les différents indices standardisés. Le changement représente la différence de moyenne entre le nombre de mois annuel pour la période « futur éloigné » (2070-2100) et la période de référence (1970-2020), selon les moyennes d'ensemble sous le scénario SSP2-4.5.

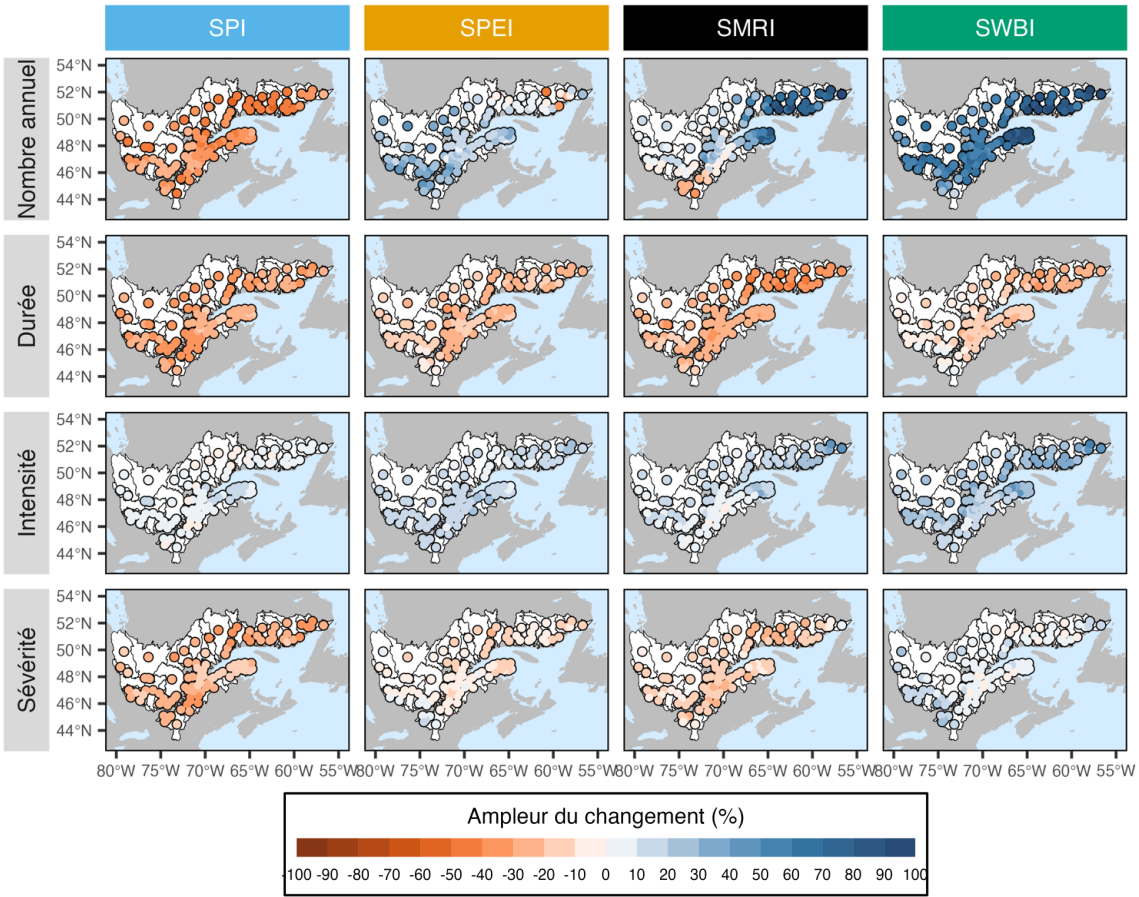


Figure C10. Changements relatifs entre la période « futur éloigné » (2070-2100) et la période de référence (1970-2020) dans les caractéristiques des sécheresse par bassin versant, selon les différents indices standardisés, sous le scénario SSP2-4.5.

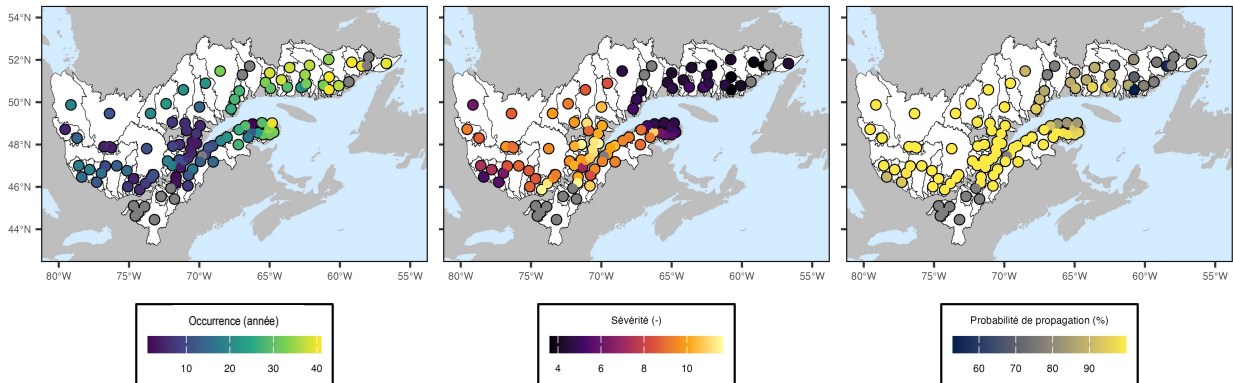


Figure C11. Occurrence, sévérité et probabilité de propagation des conditions de sécheresse identifié par l'indice SWBI à une période d'agrégation de 1 mois, en projection climatique sous le scénario SSP2-4.5, de 2030 à 2100. Un point gris signifie qu'aucune sécheresse n'a été identifié dans le bassin versant durant cette année.