



Canadian Council
of Ministers
of the Environment

Le Conseil canadien
des ministres
de l'environnement

SÉLECTION D'OUTILS POUR L'ÉVALUATION DES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DE L'EAU AUX FINS DE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

**PN 1465
ISBN 978-1-896997-81-0 PDF**

RÉSUMÉ

Les impacts des changements climatiques sont visibles partout au Canada. La planification de l'adaptation aux changements climatiques est le résultat de décisions stratégiques mûrement réfléchies, fondées sur une connaissance des conditions en évolution. Elle exige, des décideurs, de savoir dans quelle mesure un système est sensible et peut résister aux effets néfastes des changements climatiques.

Les gouvernements et les gestionnaires des ressources en eau peuvent utiliser les réseaux de surveillance de l'eau pour recueillir l'information nécessaire à la planification et à l'évaluation des méthodes possibles d'adaptation aux changements climatiques. Toutefois, à cause du manque de ressources, les autorités compétentes sont généralement incapables de perfectionner tous les réseaux de surveillance dans tous les bassins versants pour obtenir les données nécessaires à l'évaluation des impacts des changements climatiques et à l'adaptation.

Le document de référence *Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques* s'adresse aux gestionnaires des ressources en eau non spécialistes et aux planificateurs de l'adaptation aux changements climatiques. Le document vise à aider les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada à évaluer la capacité de leurs réseaux de surveillance de l'eau à fournir les données requises pour planifier les changements climatiques et s'y adapter. Il décrit des moyens pratiques et éprouvés qui permettront aux autorités compétentes d'établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques et d'évaluer ensuite la capacité de ces réseaux à fournir les données requises pour répondre aux besoins d'adaptation aux changements climatiques. Cependant, comme les impacts des changements climatiques varient d'un endroit à l'autre, les priorités et les évaluations seront inévitablement spécifiques à chaque province/territoire et à chaque région. Les méthodes de priorisation et d'évaluation aideront les autorités compétentes à déterminer s'ils doivent (et comment) ajouter ou supprimer des stations, ajouter des paramètres hydrologiques ou modifier la fréquence et la période d'échantillonnage pour, à terme, faciliter la planification de l'adaptation aux changements climatiques.

Établissement des priorités : Il existe plusieurs méthodes pour établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques, qui vont des méthodes qualitatives, comme les ateliers, à des analyses quantitatives rigoureuses ou la modélisation. Lors d'un examen, nous avons identifié trois méthodes qui requièrent une quantité limitée de données facilement accessibles et offrent une grande flexibilité en termes d'applicabilité sans exiger un niveau élevé de savoir-faire, à savoir :

- 1) la méthode d'évaluation économique de base pour les services écosystémiques
- 2) l'analyse ombrothermique
- 3) l'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau.

L'annexe A du document décrit les trois méthodes de priorisation pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques.

Évaluation des réseaux de surveillance existants : L'évaluation des réseaux existants de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques se base sur la capacité des réseaux de surveillance à fournir les données requises pour remplir les objectifs de gestion d'une province ou d'un territoire en matière d'adaptation aux changements climatiques. Un examen a permis de cerner trois méthodes d'évaluation en fonction des critères suivants : applicabilité à différentes échelles; besoins relativement modérés de savoir-faire et de données; et capacité de produire des résultats qui sont compatibles avec les objectifs de surveillance en termes de portée et de précision. Les trois méthodes sont les suivantes :

- 1) la méthode de l'audit
- 2) l'analyse de la dégradation du réseau, dite « méthode Monte-Carlo »
- 3) les méthodes d'analyses multivariées.

L'annexe B du document décrit les trois méthodes retenues pour évaluer les réseaux de surveillance de l'eau en fonction des données requises pour l'adaptation aux changements climatiques.

Les annexes A et B présentent une description détaillée de chacune des six méthodes, des renseignements généraux sur les concepts et les termes utilisés dans chaque méthode et des remarques sur les ressources requises ainsi que sur l'applicabilité et les limites de chaque méthode. Ils contiennent également des exemples illustrés extraits d'études ayant appliqué chaque méthode, de même que des références pour approfondir le sujet.

L'annexe C du document contient un glossaire, des sources d'information et un index par sujet. Les sources d'information sont présentées sous forme de liste annotée, organisée par thème.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	v
Préface.....	vi
Remerciements.....	vi
1. Introduction	1
2. Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau du Canada.....	5
3. Une vue d'ensemble de l'adaptation aux changements climatiques.....	12
4. Le rôle et l'utilité de la surveillance de l'eau dans l'adaptation aux changements climatiques	18
5. Établissement de priorités de surveillance.....	23
6. Évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques.....	26
7. Conclusions et prochaines étapes	31

Annexe A : Méthodes d'établissement des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau

A.1. Méthode d'évaluation économique de base des services écosystémiques	A-4
A.2. Analyse ombrothermique	A-19
A.3. Analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau.....	A-32

Annexe B : Méthodes pour évaluer les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques

B.1. Méthode de l'audit	B-3
B.2. Analyse de la dégradation du réseau – Monte Carlo	B-15
B.3. Méthodes d'analyses multivariées	B-28

Annexe C : Documentation d'accompagnement

C.1. Glossaire des principaux concepts et définitions	C-3
C.2. Sources d'information	C-19
C.3. Descriptions d'autres méthodes de priorisation	C-24
C.4. Descriptions d'autres méthodes d'évaluation des réseaux	C-33

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1 : La surveillance de l'eau et du climat dans le cycle hydrologique

Figure 4.2 : Exemple de cadre pour la planification de l'adaptation aux changements climatiques

Figure A1.1 : Procédure à suivre pour la MEEB

Figure A1.2 : Distribution de la valeur des services écosystémiques par hectare par unité de bassin versant

Figure A2.1 : Diagramme ombrothermique pour Penticton (Colombie-Britannique)

Figure A2.2 : Diagramme ombrothermique pour Barrie (Ontario)

Figure A2.3 : Diagramme ombrothermique pour St. John's (Terre-Neuve)

Figure A2.4 : Procédure à suivre pour la méthode de cartographie ombrothermique

Figure A2.5 : Indices ombrothermiques pour le mois de mai de l'année courante en Suisse

Figure A2.6 : Indices ombrothermiques projetés pour mai 2100 en Suisse

Figure A3.1 : Procédure à suivre pour l'AIVRE

Figure A3.2 : Indice de sensibilité aux fins de l'établissement de priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau en vue de l'adaptation aux changements climatiques dans un bassin versant quaternaire du sud de l'Ontario

Figure B1.1 : Procédure à suivre pour l'audit

Figure B1.2 : Coûts et avantages relatifs des modèles de réseaux

Figure B2.1 : Procédure à suivre pour l'ADR/Monte-Carlo

Figure B2.2 : Rapport entre EAM et N_s dans un réseau dégradé

Figure B3.1 : Représentation graphique du coefficient de corrélation de la première composante principale dans le plan des composantes principales 2 (axe des x) et 3 (axe des y)

Figure B3.2 : Procédure à suivre pour l'ACP

Figure B3.3 : Représentation graphique de l'exemple d'ACP

Figure B3.4 : Procédure à suivre pour l'analyse typologique

Figure B3.5 : Exemple de dendrogramme des débits de pointe annuels

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Impacts présents et prévus des changements climatiques au Canada

Tableau 3.1 : Exemples choisis de mesures d'adaptation prises au Canada dans le domaine de l'eau par des particuliers, des groupes communautaires, l'industrie et le gouvernement

Tableau A1.1 : Services écosystémiques

Tableau A1.2 : Services écosystémiques dans la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario

Tableau A1.3 : Services écosystémiques par type d'utilisation du sol dans la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario

Tableau A1.4 : Techniques d'évaluation économique des services écosystémiques non marchands

Tableau A1.5 : Valeurs des services écosystémiques non marchands par type de couverture terrestre – sous-bassins versants de la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario

Tableau A1.6 : Valeurs des services écosystémiques non marchands par type de couverture terrestre – bassin versant du lac Simcoe

Tableau A1.7 : Sommaire des caractéristiques de la méthode d'évaluation économique de base

Tableau A2.1 : Indices ombrothermiques pour trois endroits au Canada

Tableau A2.2 : Sommaire des caractéristiques de la méthode d'analyse ombrothermique

Tableau A3.1 : Indicateurs pour les ressources en eau

Tableau A3.2 : Sommaire des caractéristiques de l'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau

Tableau B1.1 : Critères d'audit des stations pour l'évaluation du réseau du Nouveau-Brunswick

Tableau B1.2 : Résumé des caractéristiques de la méthode de l'audit

Tableau B2.1 : Résumé des caractéristiques de l'ADR/Monte-Carlo

Tableau B3.1 : Coefficients de corrélation entre les composantes principales et les stations, calculés à partir de 80 séries pluviométriques de 10 jours au printemps – sans rotation de l'axe

Tableau B3.2 : Coefficients de corrélation entre les composantes principales et les stations, calculés à partir de 80 séries pluviométriques de 10 jours au printemps – après rotation Varimax des axes avec normalisation de Kaiser

Tableau B3.3 : Résumé de la sélection des stations pour le scénario A

Tableau B3.4 : Résumé des caractéristiques des méthodes d'analyses multivariées

Tableau C1 : Descriptions d'autres méthodes de priorisation

Tableau C2 : Descriptions d'autres méthodes d'évaluation de réseaux

PRÉFACE

Le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) est le principal forum intergouvernemental de discussion et d'action concertée au Canada pour les questions environnementales d'intérêt national. Les 14 gouvernements membres travaillent en partenariat à l'élaboration de normes et de pratiques environnementales cohérentes à l'échelle nationale.

Le présent document s'adresse aux gestionnaires des ressources en eau et aux décideurs désireux d'évaluer leurs réseaux de surveillance de l'eau dans une optique d'adaptation aux changements climatiques. Les méthodes décrites peuvent aider les décideurs à déterminer les sommes à investir aujourd'hui et dans l'avenir dans la surveillance de l'eau et à optimiser l'utilisation de leurs ressources limitées. Ainsi ce document pourra-t-il servir à l'ensemble des provinces et territoires canadiens dans leurs efforts constants pour assurer la surveillance de l'eau nécessaire à l'adaptation aux changements climatiques.

REMERCIEMENTS

Le présent document a été préparé par le Sous-groupe sur la surveillance de l'eau et les changements climatiques du Comité d'élaboration du programme de l'eau du CCME. Le CCME remercie Marbek Resource Consultants Ltd, TetraTech Wardrop et J.F. Sabourin and Associates Inc., en association avec Kidd Consulting et T.D. Graham & Associates, pour leurs contributions au document.

Le CCME remercie sincèrement les personnes suivantes pour leurs relectures du document : M. Alain Mailhot, Ph.D., *Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement*; M. Paulin Coulibaly, Ph.D., Université McMaster; M. Ashok K. Mishra, Ph.D., Université du Texas; et M. Don Burn, Ph.D., Université de Waterloo.

1. INTRODUCTION

Au Canada et partout dans le monde, les gouvernements prennent des mesures depuis plus de vingt ans pour comprendre le phénomène des changements climatiques et en atténuer les effets. Plus récemment, conscients que les changements climatiques se poursuivraient pendant de nombreuses décennies indépendamment du succès des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les gouvernements ont également commencé à s'intéresser à l'adaptation aux changements climatiques.

L'adaptation aux changements climatiques a été définie comme « un ajustement des décisions, des activités et des opinions aux changements constatés ou prévus des conditions climatiques, en vue d'en freiner les dommages ou de tirer profit des possibilités qu'ils présentent »¹. La variation des régimes de température et de précipitations causée par les changements climatiques peut entraîner une réduction de la couverture de neige, une diminution des glaciers, une dégradation de la glace dans le sol et du pergélisol, une réduction de la couverture de glace sur les cours d'eau et les lacs, une variation des niveaux et des débits des cours d'eau et des rivières ainsi que d'autres impacts. Ces changements ont des effets énormes sur les systèmes hydrologiques du Canada ainsi que sur les écosystèmes et les établissements humains que soutiennent ces systèmes. Pour s'adapter à ces changements, il nous faut d'abord observer les changements que subissent les systèmes hydrologiques et mettre ensuite en place des stratégies d'adaptation afin de réduire les risques pour les écosystèmes, les collectivités et l'économie.

L'objectif du présent document est d'améliorer notre capacité à nous adapter aux impacts des changements climatiques sur nos ressources en eau. Nous disposons d'un outil clé à cet égard – les réseaux de surveillance de l'eau, c'est-à-dire les centaines de stations, de sites et de relevés qui sont utilisés partout au pays pour mesurer des paramètres comme les précipitations, l'accumulation de neige, les débits des cours d'eau, les niveaux d'eau, la qualité de l'eau ainsi que la température du sol et de l'eau. Il y a quantité de réseaux de surveillance de l'eau au Canada, principalement des réseaux hydrologiques et climatologiques, dont certains sont en place depuis des dizaines d'années. Cependant, peu d'entre eux, voire aucun, n'ont au départ été conçus pour surveiller les impacts des changements climatiques ou pour nous aider à nous adapter à ces impacts.

Le présent document se penche sur la question suivante : « Comment pouvons-nous ajuster et perfectionner nos réseaux de surveillance de l'eau de manière à mieux soutenir la planification de l'adaptation aux changements climatiques et, de cette façon, réduire les risques associés aux impacts des changements climatiques? ».

1.1 OBJET DU DOCUMENT

Le document de référence *Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques* s'adresse aux gestionnaires des ressources en eau non spécialistes et aux planificateurs de l'adaptation aux changements climatiques. L'objectif du document est d'aider les provinces et les territoires canadiens à

évaluer la capacité de leurs réseaux de surveillance de l'eau à fournir les données requises pour planifier et élaborer des mesures d'adaptation possibles aux changements climatiques.

Le document vise à fournir aux lecteurs de l'information claire et simple sur les points suivants :

- les impacts probables des changements climatiques sur les ressources en eau du Canada;
- une vue d'ensemble de l'adaptation aux changements climatiques;
- le rôle et l'importance des réseaux de surveillance de l'eau dans l'adaptation aux changements climatiques;
- une approche de la planification de l'adaptation aux changements climatiques;
- des méthodes qui peuvent aider à établir des priorités pour la surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques;
- des méthodes pouvant servir à évaluer la capacité des réseaux de surveillance existants à fournir les données nécessaires à l'adaptation aux changements climatiques;
- des sources d'information possiblement utiles.

Le document est conçu pour servir à l'ensemble des provinces et territoires au Canada. Par conséquent, il s'inspire d'un éventail de perspectives et respecte la diversité de notre pays. Ce document n'est pas un recueil exhaustif de toutes les méthodes possibles pour prioriser et évaluer les réseaux de surveillance de l'eau. Il est évident que, pour relever les défis que présentent les changements climatiques, nous devons développer de nouvelles méthodes pour aborder des enjeux comme la surveillance intégrée des eaux.

L'intégration des divers aspects de la surveillance de l'eau (paramètres hydrométriques, de qualité de l'eau et météorologiques) dans un seul site permettra de comprendre les liens qui existent entre les différents éléments du cycle hydrologique. Les liens entre la qualité de l'eau et la quantité d'eau, les interactions eaux souterraines/eaux de surface et les impacts sur les écosystèmes sont des exemples de ces liens. De plus, la surveillance des changements observés dans l'utilisation du sol faciliterait l'évaluation de toute variation ou évolution des données de surveillance.

Il existe également un lien entre la surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques et la surveillance aux fins de la détection des changements climatiques. La détection des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau peut se faire sur des territoires non perturbés ou non bâtis, où il est plus facile d'attribuer les tendances observées aux changements climatiques. L'ampleur et l'orientation de ces tendances sont importantes pour la planification de l'adaptation aux changements climatiques.

1.2 DEFINITIONS

Changements climatiques

Il existe plusieurs définitions de « changements climatiques ». Dans le présent document, nous employons « changements climatiques » au sens de tout changement du climat dans le temps, qu'il soit le produit de facteurs naturels (c.-à-d. causé par la variabilité du climat), de l'activité humaine ou des deux. Cette définition est celle qui a été adoptée par Ressources naturelles Canada (RNC) dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada*², une évaluation nationale des risques et des possibilités actuelles et futures que présentent les changements climatiques, également utilisée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). La définition employée dans le présent document diffère cependant de celle utilisée dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, qui limite l'aire sémantique du terme aux changements climatiques qui peuvent être directement ou indirectement attribués à une activité humaine et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat³. La variabilité naturelle du climat désigne les variations climatiques naturelles qui se situent dans l'intervalle normal des valeurs extrêmes pour une région donnée.

Réseaux de surveillance de l'eau

Compte tenu de la taille du Canada et de la diversité de ses paysages, ses écorégions et ses ressources, les réseaux de surveillance de l'eau doivent parfois faire face à un large éventail d'enjeux hydriques. Les activités de surveillance ciblent la qualité de l'eau et la quantité d'eau (eaux douces, salées, de surface et souterraines), les zones côtières, les systèmes fluviaux, la couverture de neige, la toundra gelée et le pergélisol, les glaciers ainsi que les lacs.

Pour les besoins du présent document, il est admis que les réseaux de surveillance de l'eau – bien qu'ils ciblent essentiellement des paramètres hydrologiques et climatologiques – peuvent contrôler un plus large éventail de paramètres, à savoir :

- débits, niveaux et qualité des eaux de surface
- niveaux et qualité des eaux souterraines
- dynamique des lacs et des rivières
- dynamique et niveaux des océans
- impacts sur les zones côtières
- couverture de neige
- couverture de glace
- humidité du sol
- température de l'air
- température du sol et pergélisol
- précipitations.

La surveillance de certaines parties de la cryosphère – glace de mer, calottes de neige, glaciers, pergélisol, calottes glaciaires et nappes glaciaires – dépasse le cadre du présent document.

1.3 ORGANISATION DU DOCUMENT

Le document est structuré de façon à fournir :

- 1) un aperçu général et des exemples des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau du Canada
- 2) une explication de ce que l'on entend par adaptation et stratégies d'adaptation aux changements climatiques
- 3) une description du rôle et de l'utilité de la surveillance de l'eau dans l'adaptation aux changements climatiques
- 4) un aperçu du processus général de planification de l'adaptation aux changements climatiques et de la place qu'occupent, dans ce processus, les méthodes de priorisation et d'évaluation décrites dans le présent document
- 5) des aperçus des méthodes de priorisation et d'évaluation pour les réseaux de surveillance de l'eau. La dernière section présente des conclusions et des recommandations pour la suite des choses.

Les trois annexes fournissent un supplément d'information :

L'**annexe A** décrit trois méthodes pour établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Il contient un résumé et une description détaillée de chaque méthode, des renseignements généraux sur les concepts et les termes utilisés et des remarques sur les ressources requises ainsi que sur l'applicabilité et les limites de chaque méthode. Il contient également des exemples illustrés, tirés d'études ayant appliqué les méthodes, de même que des références pour le lecteur désireux d'obtenir des renseignements supplémentaires.

L'**annexe B** décrit trois méthodes pour évaluer l'efficacité avec laquelle les réseaux de surveillance de l'eau tiennent compte de l'adaptation aux changements climatiques. La section consacrée à chaque méthode fournit le même genre d'information que celle indiquée ci-dessus pour l'annexe A.

L'**annexe C** contient un glossaire, une liste annotée de sources d'information et les descriptions d'autres méthodes.

2. LES IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES RESSOURCES EN EAU DU CANADA

[Traduction]

L'eau est le principal vecteur par lequel les changements climatiques influencent l'écosystème terrestre et, par le fait même, la subsistance et le bien-être des collectivités. On peut anticiper que les hausses de températures et les modifications des conditions météorologiques extrêmes projetées affecteront l'abondance et la distribution des pluies, la fonte des neiges, le débit des cours d'eau et des eaux souterraines, et contribueront à une détérioration accrue de la qualité de l'eau.

UN Water Policy Brief 2010⁴

À l'avenir, les changements climatiques accentueront bon nombre des risques climatiques actuels. Ils présenteront également de nouveaux risques et de nouvelles possibilités et auront d'importantes conséquences pour les collectivités, les infrastructures et les écosystèmes au Canada. Comme le mentionne le rapport de 2007 de RNCan, *Vivre avec les changements climatiques au Canada*, on constate déjà les impacts des changements climatiques dans toutes les régions du Canada⁵. Les impacts des récents phénomènes météorologiques extrêmes, y compris ceux de l'été 2010 (les tempêtes tropicales sur la côte Est; la vague de chaleur [et la sécheresse] en juillet à Montréal; les pluies torrentielles et les inondations en Alberta et en Saskatchewan, qui contrastent avec les sécheresses de 2009; ainsi que les incendies de forêt au Québec et en Colombie-Britannique), mettent en évidence la vulnérabilité des collectivités et des infrastructures essentielles du Canada aux changements climatiques. L'éditeur de *Degrés de réchauffement – Résumé des effets du changement climatique prévus au Canada au cours du XXI^e siècle* a fait la déclaration suivante : « Il serait naïf de penser que chacun de ces phénomènes a été directement causé par les changements climatiques, mais raisonnable cependant de nous soucier du fait que les changements climatiques aient ouvert la voie à ces phénomènes. »⁶ [traduction].

Les experts du climat prévoient que les températures à la hausse, l'évolution des régimes de précipitations et la variation des degrés d'humidité qu'entraîneront les changements climatiques auront des impacts généralisés sur les ressources en eau partout au Canada. En ce qui concerne l'état des glaces, de la neige et des océans, les impacts [anticipés] sont les suivants : une diminution de l'étendue de la glace de mer dans l'Arctique en été; une fonte plus précoce des neiges au printemps dans la majeure partie du Canada; un recul des glaciers de montagne dans l'Ouest. Dans l'Ouest canadien, le ruissellement et le débit des cours d'eau subiront des fluctuations à cause de la variation des accumulations de neige et de la fonte des glaciers de montagne. Dans les Prairies, le risque de désertification augmentera⁷, tout comme la fréquence des sécheresses. Dans le Nord et l'Est du Canada, le ruissellement augmentera. Dans certaines régions du pays, la quantité réduite d'eau compromettra la qualité de l'eau⁸.

Parmi la longue liste d'impacts que pourraient avoir les changements climatiques sur les ressources en eau du Canada, les experts des changements climatiques ont pu identifier trois grands groupes d'impacts avec un degré élevé de certitude. Ces impacts sont les suivants :

- Une augmentation des pénuries d'eau, particulièrement pendant les mois d'été, devrait toucher les Prairies, le sud de l'Ontario, le Québec et la Nouvelle-Écosse.
- Une hausse de la fréquence des inondations devrait toucher la plupart des provinces en raison de l'élévation du niveau de la mer, d'une fréquence accrue d'inondations causées par des embâcles, des phénomènes météorologiques extrêmes, des épisodes de pluie sur neige et d'une hausse des précipitations hivernales.
- Le réchauffement du sol causera un large éventail d'impacts dans les régions nordiques, y compris la fonte de la glace dans le sol, qui stabilise actuellement les structures naturelles et bâties, et la libération de substances retenues dans les glaces du sol, notamment le méthane sous forme gazeuse.

Les impacts identifiés des changements climatiques sur les ressources en eau sont en majeure partie liés à des variations de la quantité d'eau. Dans les études d'impact des changements climatiques, les changements de qualité de l'eau sont souvent liés à des variations de la quantité d'eau. Par exemple, la qualité de l'eau peut se dégrader sous l'effet de débits réduits ou d'une surcharge attribuable à un ruissellement accru causé par des précipitations plus fréquentes et plus intenses.

Bien que les méthodes présentées dans le document mettent surtout l'accent sur la quantité d'eau, certaines méthodes peuvent prendre en considération la surveillance de la qualité de l'eau. La méthode de priorisation qui prend en considération la qualité de l'eau est l'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau (section 5.3). La méthode d'évaluation qui tient compte de la qualité de l'eau est l'audit (section 6.1).

Le tableau 1.1 donne des exemples des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau dans les régions et les 13 provinces et territoires du Canada. Ces exemples sont tirés de récentes études d'envergure nationale sur les impacts des changements climatiques, notamment :

- *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*⁹
- *Degrés de réchauffement – Résumé des effets du changement climatique prévus au Canada au cours du XXI^e siècle*¹⁰.

Tableau 1.1 : Impacts présents et prévus des changements climatiques au Canada

LIEU	IMPACTS
Canada atlantique	<ul style="list-style-type: none"> • On prévoit une augmentation du nombre et de l'intensité des tempêtes, une élévation du niveau de la mer et plus d'érosion côtière et d'inondations. Ces phénomènes auront un impact sur les collectivités côtières, de même que sur leurs infrastructures et leurs industries. • On prévoit des variations annuelles et saisonnières de précipitations qui,

LIEU	IMPACTS
	<p>combinées à l'augmentation de l'évapotranspiration, rendront les étés plus secs, en particulier dans les Maritimes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Une augmentation des débits des cours d'eau est prévue au Labrador, alors qu'une baisse est prévue dans le reste du Canada atlantique. • On prévoit que les ressources en eau seront davantage sollicitées à mesure que changeront les conditions et les besoins sous l'effet de facteurs aussi bien climatiques que non climatiques.
Nouveau-Brunswick	<ul style="list-style-type: none"> • Au cours du 21^e siècle, la côte du Nouveau-Brunswick pourrait connaître une élévation du niveau de la mer de 50 à 70 cm, ce qui accélérera l'érosion côtière. Dans le sud du Nouveau-Brunswick, la réduction ou la disparition de la couverture de glace aura également pour effet d'accroître l'érosion côtière. • Un réchauffement de l'eau est prévu dans les milieux d'eau douce et salée. • Un phénomène d'érosion côtière accéléré par l'élévation du niveau de la mer a déjà été observé dans l'est du Nouveau-Brunswick, dont certaines régions sont particulièrement sujettes aux ondes de tempêtes. Des températures d'eau nettement plus chaudes ont déjà été relevées dans certains cours d'eau, dont la rivière Miramichi.
Nouvelle-Écosse	<ul style="list-style-type: none"> • L'élévation du niveau de la mer devrait accélérer l'érosion des côtes. Parmi les autres impacts possibles figurent une fonte plus précoce des neiges, la variation des dates de prise et de rupture des glaces sur les cours d'eau, la variation des régimes temporels de précipitations et une infiltration accrue d'eau salée. • L'élévation du niveau de la mer est déjà apparente en Nouvelle-Écosse. Des chercheurs ont constaté que le niveau de la mer avait augmenté d'environ 0,3 m à Halifax au cours des 100 dernières années¹¹. Le niveau relatif de la mer le long de la côte est influencé par la montée des eaux et par l'affaissement de la masse terrestre du littoral attribuable aux changements provoqués par le relèvement isostatique (postglaciaire). Une érosion côtière, accélérée par l'élévation du niveau de la mer, a été observée le long de la côte sud de la Nouvelle-Écosse.
Terre-Neuve-et-Labrador	<ul style="list-style-type: none"> • Les changements climatiques soulèvent des préoccupations surtout sur les plans suivants : la qualité de l'eau, les débits, la stabilité des glaces et l'élévation du niveau de la mer; la fréquence accrue d'inondations à Terre-Neuve; la fréquence accrue de tempêtes; l'amincissement des

LIEU	IMPACTS
	<p>glaces sur les cours d'eau; une prise plus tardive des glaces; une fréquence accrue d'inondations causées par des embâcles; le réchauffement des eaux de surface.</p> <ul style="list-style-type: none"> Des modèles de changements climatiques prévoient que certaines régions de la province connaîtront une période de refroidissement sous l'effet de la fonte des neiges et de la migration des glaces en provenance du nord.
Île-du-Prince-Édouard	<ul style="list-style-type: none"> L'élévation du niveau de la mer est une source de préoccupation pour les deux grandes villes de la province, Charlottetown et Summerside, des villes côtières situées à des niveaux relativement bas. L'amincissement de la couverture de glace de mer aggravera l'érosion côtière dans le nord et l'est de l'Île-du-Prince-Édouard. L'Île-du-Prince-Édouard dépend presque entièrement des eaux souterraines pour son approvisionnement en eau douce. Les nappes souterraines pourraient baisser à cause d'une diminution des apports d'eau provenant des précipitations saisonnières, et ce, en raison d'une diminution des pluies estivales combinée à un ruissellement accru des pluies hivernales. Le risque accru d'infiltration d'eau salée est aussi un sujet de préoccupation. Un phénomène d'érosion côtière accélérée est déjà observé sur la côte nord de l'île.
Québec	<ul style="list-style-type: none"> L'élévation du niveau de la mer pourrait toucher les régions côtières de la province où l'eau souterraine est la principale source d'eau potable (p. ex., les Îles-de-la-Madeleine). Sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer, on prévoit une augmentation de l'érosion des berges dans les régions maritimes du Québec, le long du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent. Une augmentation de la fréquence et de l'intensité ou de la durée des conditions météorologiques extrêmes est prévue dans le sud du Québec. Des débits de pointe plus précoces et possiblement réduits au printemps, de même que des débits de pointe soudains et plus fréquents en été et à l'automne, sont également prévus. Les autres impacts prévus pour la province sont les suivants : augmentation des quantités de précipitations saisonnières, accompagnée de périodes de sécheresse; augmentation des débits de pointe en été et à l'automne, périodes d'étiage estivales plus intenses et rallongement des périodes de faible débit en été; augmentation des chutes de neige dans le nord de la province et diminution de la

LIEU	IMPACTS
	couverture de neige là où les hivers sont plus doux.
Ontario	<ul style="list-style-type: none"> Des pénuries d'eau plus fréquentes sont prévues dans le sud de la province à mesure qu'augmenteront les températures et les taux d'évaporation en été. Parmi les autres impacts importants, mentionnons une variation des régimes de précipitations (fréquence et intensité); des épisodes de précipitations plus intenses et à intervalle plus fréquent; une crue nivale printanière plus précoce et de plus faible amplitude (à cause de la fréquence accrue d'épisodes de gel-dégel); une diminution du taux d'humidité du sol; une évaporation et une évapotranspiration accrues. Des pénuries d'eau se sont déjà produites dans le sud de l'Ontario.
Prairies	<ul style="list-style-type: none"> L'augmentation des pénuries d'eau, particulièrement pendant les mois d'été, constitue la menace climatique la plus sérieuse dans les provinces des Prairies. Une augmentation de la fréquence des sécheresses et des inondations graves est prévue. Le stress subi par les habitats aquatiques perturbera les écosystèmes des Prairies.
Manitoba	<ul style="list-style-type: none"> Les études sur les changements climatiques prévoient les possibilités d'impacts suivantes au Manitoba : rupture des glaces plus précoce sur les lacs et cours d'eau; divers changements dans les précipitations moyennes annuelles hivernales, estivales et automnales; variations du débit annuel; et débit de pointe plus précoce au printemps.
Saskatchewan	<ul style="list-style-type: none"> Les pénuries d'eau en été sont le plus important impact prévu des changements climatiques en Saskatchewan, comme dans les autres provinces des Prairies. La plupart des modèles de changements climatiques corroborent les prévisions qui annoncent une augmentation des précipitations annuelles, une augmentation des précipitations hivernales et printanières et une diminution des précipitations estivales. La province connaît déjà un ruissellement printanier plus précoce que l'on peut considérer avec certitude comme un impact des changements climatiques qui continuera de se produire à l'avenir.

LIEU	IMPACTS
Alberta	<ul style="list-style-type: none"> • Parmi les changements climatiques prévus en Alberta, mentionnons la diminution ou le recul des glaciers; une hausse des températures; une variabilité accrue des températures et des précipitations; la diminution de la surface libre et de l'alimentation de la nappe aquifère; la réduction des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs; et la diminution des précipitations estivales. On prévoit également une augmentation des précipitations hivernales, dont une portion plus grande tombera sous forme de pluie; une diminution de la couverture de neige en hiver; une fonte des neiges et des crues printanières plus précoces; une baisse de l'humidité et une évapotranspiration accrue en été; et une diminution du ruissellement dans les plaines.
Colombie-Britannique	<ul style="list-style-type: none"> • Un grand nombre de régions et de secteurs de la Colombie-Britannique devraient connaître de plus en plus de pénuries d'eau et une concurrence croissante entre les diverses utilisations de cette ressource (par exemple, hydroélectricité, irrigation, collectivités, loisirs et normes de débit minimales). Une augmentation de la fréquence et de la durée des sécheresses est également prévue. • L'élévation du niveau de la mer et l'augmentation de l'intensité, de la fréquence ou de la gravité des tempêtes sont parmi les plus importants impacts prévus. Les conditions météorologiques extrêmes et les catastrophes naturelles connexes continueront d'avoir une incidence sur les infrastructures essentielles, ce qui affectera les collectivités, les industries et l'environnement. • La cryosphère – glaciers, pergélisol, glace et neige – connaît déjà un changement rapide, mais ce processus de changement est mal connu. Comme en Alberta, la fonte des glaciers est perçue comme un facteur sous-jacent de nombreux impacts prévus des changements climatiques. Un ruissellement accru, accompagné d'une augmentation des précipitations et d'une proportion accrue de précipitations tombant sous forme de pluie, pourrait entraîner des crues plus abondantes et compliquer la lutte contre les inondations dans cette province. Les pluies sont reconnues pour optimiser le transfert d'énergie vers la neige, ce qui a pour effet d'accélérer la fonte des neiges et ainsi d'augmenter le ruissellement et les débits des cours d'eau.
Nord canadien	<ul style="list-style-type: none"> • Des changements sont prévus dans les périodes et les volumes de précipitations, de débits et de ruissellement au nord du 60° parallèle. • Les changements d'origine climatique qui touchent le pergélisol, la glace de mer, la glace de lac et la couverture de neige ont des incidences importantes sur la conception et l'entretien des infrastructures.

LIEU	IMPACTS
Territoires du Nord-Ouest	<ul style="list-style-type: none"> • Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau devraient varier d'une région et d'une saison à l'autre. Plus particulièrement, les périodes et les volumes de précipitations, de débits et de ruissellements devraient subir des changements au nord du 60^e parallèle. • À l'instar des deux autres territoires, les Territoires du Nord-Ouest connaissent des changements climatiques très rapides. Les Territoires ont subi des hausses de températures moyennes annuelles qui varient entre +2 et +3 °C au cours des 70 dernières années¹². Outre la hausse de la température moyenne annuelle, les plus importants impacts observés sont l'augmentation des précipitations, une fonte plus précoce des neiges, l'amincissement des glaces de mer, la prise plus tardive des glaces, une élévation des ondes de tempête et un ruissellement printanier accru.
Nunavut	<ul style="list-style-type: none"> • Le Nunavut devrait continuer à connaître un réchauffement sérieux et rapide, qui aura d'importants impacts sur ses ressources en eau. Parmi ces impacts figurent une prise tardive et une rupture précoce des glaces à la surface des lacs, cours d'eau et océans; une augmentation des précipitations moyennes annuelles et du ruissellement annuel; et une évaporation et une évapotranspiration accrues.
Yukon	<ul style="list-style-type: none"> • Parmi les impacts prévus figure une hausse des débits de pointe dans les régions glaciaires; une baisse des débits de pointe dans les régions de pergélisol; une fréquence accrue d'embâcles; et une rupture plus précoce des glaces. • Ces impacts sont déjà observables. L'impact le plus important relevé par un expert local est l'importance croissante des bas débits en hiver partout sur le territoire sous l'effet du réchauffement et du dégel du pergélisol.

3. UNE VUE D'ENSEMBLE DE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

« Plusieurs options s'offrent à l'humanité, mais le passé n'en est pas une. »

Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007¹³

Comme mentionné plus haut, l'adaptation humaine aux changements climatiques se définit comme « un ajustement des décisions, des activités et des opinions aux changements constatés ou prévus des conditions climatiques, en vue d'en freiner les dommages ou de tirer profit des possibilités qu'ils présentent¹⁴ ». (Les systèmes naturels peuvent également s'adapter, par exemple lorsque l'éventail des espèces s'élargit sous l'effet du réchauffement des températures; cependant, ce phénomène ne fait pas l'objet du présent document).

Le GIEC a divisé l'adaptation humaine aux changements climatiques en trois catégories :

- **L'adaptation anticipative** est une adaptation proactive qui a lieu avant que les impacts des changements climatiques soient observables. Une municipalité qui encourage ou exige une plus grande économie d'eau avant la survenue d'un épisode de sécheresse est un exemple de ce genre d'adaptation.
- **L'adaptation autonome (ou spontanée)** n'est pas une réponse consciente aux stimuli climatiques, mais résulte de changements écologiques dans les systèmes naturels ou d'une évolution des conditions du marché ou de l'état de bien-être dans les *systèmes humains*. Un fermier qui change sa période de plantation ou son choix de cultures en fonction des variations du régime de précipitations est un exemple de ce genre d'adaptation.
- **L'adaptation planifiée** résulte d'une décision stratégique délibérée, basée sur une perception claire du fait que les conditions ont changé – ou sont sur le point de changer – et qu'il convient de prendre des mesures pour revenir, s'en tenir ou parvenir à la situation souhaitée. Un exemple de ce genre d'adaptation serait l'élaboration de nouvelles normes pour le dimensionnement des systèmes d'égouts pluviaux en réponse à l'augmentation probable des débits dans une région donnée¹⁵.

Les changements climatiques qui se produiront dans les prochaines décennies obligeront les pouvoirs publics, les collectivités, les entreprises et les particuliers à s'adapter à l'évolution des régimes de température et de précipitations et à la cascade d'impacts qu'entraîneront ces changements. La nature et l'intensité de ces impacts varieront d'une région à l'autre au pays. Pour assurer une adaptation planifiée, les décideurs doivent savoir dans quelle mesure un système est sensible et peut résister aux effets néfastes des changements climatiques, notamment à la variabilité du climat et aux conditions climatiques extrêmes. Il s'agit, en d'autres mots, d'évaluer la vulnérabilité d'un système aux changements climatiques. La vulnérabilité est fonction de l'**exposition** aux effets des changements climatiques, de la **sensibilité** du système et de sa **capacité d'adaptation**.

Vulnérabilité

La notion de vulnérabilité peut faciliter l'établissement de priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau. Les gestionnaires peuvent accorder une priorité plus élevée aux régions ou aux systèmes qui sont plus vulnérables aux effets néfastes des changements climatiques. Les niveaux d'exposition et de sensibilité aux changements d'origine climatique, de même qu'une capacité d'adaptation limitée, peuvent rendre certains systèmes et certaines populations **vulnérables** aux impacts des changements climatiques.

L'objectif du présent document n'est pas de fournir des conseils pour la réalisation d'évaluations de la vulnérabilité. Il est reconnu, cependant, qu'une évaluation de la vulnérabilité permet parfois d'identifier des régions vulnérables, où il est possible d'effectuer l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau.

L'**exposition**, l'une des composantes de la vulnérabilité, peut également faciliter l'établissement de priorités aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Il est notamment possible d'établir des projections régionales d'expositions futures aux impacts des changements climatiques. Ces projections pourraient laisser entrevoir des profils spatiaux ou temporels d'exposition différents des profils que nous voyons aujourd'hui. Pour permettre de telles projections, il faut réduire l'échelle des modèles climatiques planétaires de mondiale à régionale. Ces projections comportent cependant beaucoup d'incertitude. Pour le sud de l'Ontario, par exemple, nous croyons que la température globale de l'air augmentera sous l'effet des changements climatiques, mais nous ignorons si l'avenir sera plus chaud et plus sec ou encore plus chaud et plus humide. Il faudra du temps pour améliorer les projections régionales des impacts des changements climatiques.

La **sensibilité**, une autre composante de la vulnérabilité, est le degré auquel un système est influencé, positivement ou négativement, par la variabilité du climat ou les changements climatiques. Les effets des changements climatiques peuvent être directs (par exemple, la modification des rendements agricoles due à un changement de la valeur moyenne, de l'amplitude ou de la variabilité de la température) ou indirects (par exemple, les dommages causés par une fréquence accrue d'inondations côtières due à une élévation du niveau de la mer)¹⁶. Le concept de sensibilité facilite l'établissement de priorités de surveillance de l'eau. Par exemple, les réseaux hydrographiques sensibles aux changements climatiques auront des réponses qu'un réseau de surveillance est plus susceptible de détecter. Ces réponses peuvent être des indicateurs de préalerte et aider à comprendre la réponse d'un écosystème donné aux changements climatiques. La détection de ces réponses peut aider à guider les mesures d'adaptation ou d'atténuation.

La **capacité d'adaptation** est la capacité d'un système écologique ou humain de s'adapter à un environnement en changement. Les communautés de poissons d'eau froide, par exemple, ont une capacité limitée d'adaptation à la hausse des températures des cours d'eau; les espèces plus « généralistes » sont susceptibles d'avoir une meilleure capacité d'adaptation au réchauffement des cours d'eau. La capacité d'adaptation des systèmes humains est fonction de l'efficacité des outils dont disposent ces systèmes (information, technologie, ressources et capacité de

planification) pour relever les défis qui les attendent. Les réseaux de surveillance de l'eau qui fournissent de l'information utile à l'adaptation aux changements climatiques augmentent notre capacité d'adaptation comme société.

Incertitude

En raison du niveau élevé d'incertitude associé aux projections régionales de changements climatiques, certains spécialistes des changements climatiques recommandent de ne pas se baser essentiellement sur les conditions futures projetées pour prendre des décisions en matière d'adaptation. Les projections peuvent nous donner une idée des conséquences des changements climatiques pour les ressources en eau, mais la probabilité de voir ces conséquences se concrétiser demeure inconnue. Le risque se définit comme la probabilité de survenue d'un événement multipliée par la gravité de ses conséquences et, bien que l'évaluation du risque ait bel et bien un rôle à jouer dans l'adaptation aux changements climatiques, son application doit reposer sur une méthode justifiable. L'incertitude des projections de changements climatiques montre elle aussi l'importance cruciale de la surveillance.

L'incertitude qui entoure les impacts régionaux futurs a donné naissance au concept d'initiative « sans regret ». Une adaptation aux changements climatiques « sans regret » promeut des mesures d'adaptation qui procurent des avantages nets, que se concrétisent ou non les projections « incertaines » de changements climatiques¹⁷. Le perfectionnement des réseaux de surveillance en vue d'améliorer les prévisions de phénomènes extrêmes comme les inondations ainsi que la protection ou la restauration des systèmes déjà à risque sont des exemples de mesures dites « sans regret ». Les initiatives « sans regret » peuvent être utiles aux décideurs lors du processus d'évaluation ou d'amélioration des réseaux de surveillance ou encore lors de l'élaboration et de la mise en oeuvre de stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

Les collectivités et les sociétés s'adaptent depuis longtemps aux impacts des conditions météorologiques et du climat grâce à un éventail de pratiques, dont la gestion de l'eau. Selon certains chercheurs en changements climatiques, il existe un grand nombre de possibilités d'adaptation dans le secteur de l'eau¹⁸. Pour chacune des principales utilisations de l'eau, il existe un éventail de stratégies d'adaptation à la variabilité actuelle du climat, de même que de nombreuses options d'adaptations aux changements climatiques projetés.

Dans la plupart des cas, les mesures d'adaptation aux changements climatiques sont mises en oeuvre dans le cadre de mesures de gestion des répercussions, d'une planification des ressources ou d'initiatives associées au développement durable (voir le tableau 3.1). Les changements climatiques pourraient cependant entraîner des conséquences qui dépassent le champ de notre expérience passée¹⁹. Les réserves d'eau souterraine sont-elles en baisse? La qualité de l'eau dans les cours d'eau est-elle compromise? La fréquence ou l'intensité des inondations augmente-t-elle? L'élévation du niveau de la mer cause-t-elle des infiltrations d'eau salée dans les aquifères côtiers? La débâcle du printemps se produit-elle plus tôt qu'il y a 20 ans? Une adaptation bien planifiée exigera une base d'information solide, comme celle fournie par les réseaux de surveillance de l'eau.

Traiter l'adaptation séparément des autres aspects de la surveillance de l'eau est une option révolue. Aujourd'hui et à l'avenir, nous devons intégrer les changements climatiques à la planification, à l'évaluation et aux prises de décisions qui touchent la surveillance de l'eau. L'intégration (ou « mainstreaming ») ne saurait à elle seule relever ce défi parce qu'il ne s'agit pas seulement d'intégrer l'adaptation aux changements climatiques à la surveillance de l'eau, mais aussi d'utiliser les réseaux de surveillance pour faciliter la planification de cette adaptation.

Tableau 3.1 : Exemples choisis de mesures d'adaptation prises au Canada dans le domaine de l'eau par des particuliers, des groupes communautaires, l'industrie et le gouvernement²⁰

EXEMPLE D'ADAPTATION
Particuliers
<ul style="list-style-type: none"> Les maisons et les chalets sont construits plus loin de la côte.
Groupes communautaires et organisations
<ul style="list-style-type: none"> Les Yukonnais ont participé à la préparation du plan de lutte contre les changements climatiques de leur territoire. L'une des grandes priorités du plan est de permettre une adaptation efficace aux changements climatiques au Yukon. Les résidents de Pointe-du-Chêne, au Nouveau-Brunswick, ont aménagé un abri d'urgence en raison de l'augmentation des risques d'inondation et ont exercé des pressions sur leurs élus pour avoir des chemins d'accès moins vulnérables. Un groupe communautaire d'Annapolis Royal, en Nouvelle-Écosse, a fait dresser une carte des risques d'ondes de tempête, qui a entraîné une révision des mesures d'urgence.
Industrie
<ul style="list-style-type: none"> Dans plusieurs grands projets de construction d'infrastructures dans le Nord, on emploie des thermosiphons pour refroidir artificiellement le pergélisol dans des conditions de réchauffement climatique. Hydro Québec a modifié ses prévisions de demandes d'électricité en fonction de nouveaux scénarios climatiques. Certaines entreprises forestières ont commencé à équiper leurs véhicules de pneus à haute flottaison pour mieux manœuvrer sur des terrains mouillés ou détrempés, ce qui leur permet de travailler dans toutes sortes de conditions météorologiques.

Gouvernements

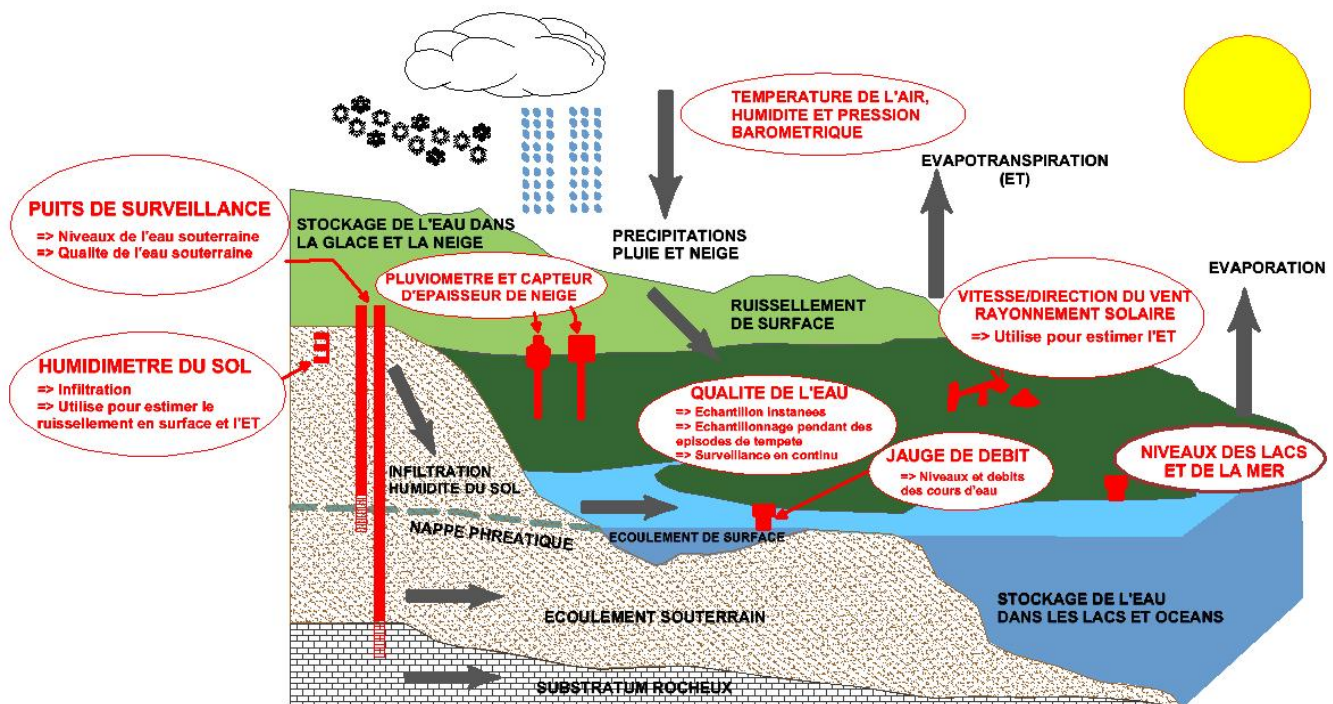
- Lors de la reconstruction d'une partie de l'autoroute de Yellowknife, aux Territoires du Nord-Ouest, des modifications ont été apportées à la conception et à la construction de l'autoroute pour réduire au minimum les effets futurs de la dégradation du pergélisol.
- En réponse aux effets de la fonte du pergélisol, la Société d'habitation des T.N.-O. (SHTNO) a réparé et remplacé des fondations sur pieux qui avaient été endommagées par des mouvements de terrain ou par des accumulations d'eau sous les bâtiments. Lorsque les conditions du sol sont moins stables, la SHTNO utilise maintenant des systèmes de fondations qui absorbent les pressions normalement imposées à un bâtiment par les mouvements de terrain.
- La municipalité de Sept-Îles réglemente la construction des nouvelles résidences le long de la côte pour éviter que ces résidences subissent des dommages à cause de l'érosion des berges.
- La municipalité régionale de Waterloo et la Ville de Guelph, en Ontario, ont mis en place des programmes de gestion des demandes d'approvisionnement en eau pour rendre la consommation, le stockage et la distribution de l'eau plus efficaces en prévision d'une diminution des réserves d'eau.
- Westbank, en Colombie-Britannique, a intégré les changements climatiques à un plan de gestion de l'eau, soit le Trepanier Landscape Unit Water Management Plan.
- Des compteurs d'eau ont été installés dans le district d'irrigation de Southeast Kelowna et dans plusieurs villes canadiennes (p. ex., Kelowna, en Colombie-Britannique, Sudbury, en Ontario, et Moncton, au Nouveau-Brunswick) afin de réduire la consommation d'eau.
- La municipalité de Regina, en Saskatchewan, a accentué ses mesures d'économie d'eau.
- Le district régional du Grand Vancouver tient compte des impacts de la réduction de l'accumulation annuelle de neige sur l'approvisionnement en eau pour planifier la capacité de stockage et les améliorations possibles.
- Au Nouveau-Brunswick, la Politique de protection des zones côtières établit des marges de retrait pour les structures permanentes et pourrait faciliter le retrait planifié.
- Halifax travaille à la création d'une nouvelle stratégie verte qui assurera la gestion des eaux d'orage grâce à des plans d'aménagement paysager différents. La Ville a également formé un comité qui réunit les services de police, d'incendie et autres services municipaux pour trouver des moyens de garder les services essentiels en activité pendant les phénomènes météorologiques extrêmes.

- Le ministère des Affaires municipales et communautaires des T.N.-O. a effectué une évaluation des infrastructures publiques dans les 33 collectivités des T.N.-O. aux fins de la planification de l'entretien des infrastructures. Les évaluations fournissent de l'information fondamentale sur l'état des infrastructures, qui permettra de mesurer les impacts des changements climatiques dans le temps.
- La stratégie de l'Alberta (*Water for Life Strategy*) vise à atténuer les impacts des changements climatiques dans des régions déjà soumises à des stress hydriques.
- Il y a dix ans, le ministère des Transports des T.N.-O. a commencé la construction de ponts aux points de passage des cours d'eau le long de la route d'hiver de la vallée du Mackenzie à cause de la courte période d'utilisation de cette route. Des ponts permanents réduisent le temps nécessaire à la construction de la route d'hiver, protègent les points de passage des cours d'eau contre la fonte précoce des neiges au printemps et prolongent la période d'utilisation de la route.
- Les changements climatiques et le réchauffement des températures pourraient créer de nouveaux débouchés agricoles au Yukon. Dans le *Plan d'action du gouvernement du Yukon sur le changement climatique*, la production et la vente locales de produits agricoles sont mentionnées comme des solutions pour réduire les frais de transport des aliments et accroître le développement durable local.

4. LE RÔLE ET L'UTILITÉ DE LA SURVEILLANCE DE L'EAU DANS L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les gouvernements et les gestionnaires des ressources en eau peuvent utiliser les réseaux de surveillance de l'eau pour recueillir l'information nécessaire à la planification et à l'évaluation des méthodes possibles d'adaptation aux changements climatiques. La nature et la portée des programmes de surveillance varieront d'une région à l'autre en fonction de la variation des conditions des écosystèmes et du climat, des objectifs de gestion et des méthodes d'adaptation préférées. Une liste des types de paramètres que l'on pourrait surveiller selon la région et les enjeux de l'adaptation se trouve dans la section 1 du présent document. La figure 4.1 illustre la relation entre le cycle hydrologique et les réseaux de surveillance de l'eau.

Figure 4.1 : La surveillance de l'eau et du climat dans le cycle hydrologique



Si certains aspects de la surveillance de l'eau sont particuliers à chaque province ou territoire; d'autres besoins de surveillance sont cependant communs à l'ensemble des provinces et territoires du Canada, car les activités de surveillance réalisées dans une optique d'adaptation s'intéressent à des aspects de l'eau et des ressources communs à tous, notamment :

- l'utilisation des ressources et l'approvisionnement en ressources (y compris l'eau souterraine et de surface)

- la gestion des conséquences (y a-t-il assez de données pour évaluer le risque d'inondation, les risques sanitaires associés à l'évacuation d'eaux usées, la sécurité des transports en hiver ou la perte de services dispensés par les systèmes hydrologiques?)
- la conservation des espèces menacées ou en voie de disparition et le maintien constant de la fonctionnalité des écosystèmes.

Quelle que soit la méthode utilisée pour planifier l'adaptation aux changements climatiques, l'accès à des données hydrologiques exactes, suffisantes et pertinentes est essentiel. Nous avons besoin de données de surveillance pour réduire l'incertitude associée aux effets hydrologiques des changements climatiques et pour étalonner et valider les modèles climatiques et hydrologiques. En outre, nous avons besoin de données de surveillance pour identifier les systèmes hydrologiques vulnérables et pour concevoir des stratégies d'adaptation dites « sans regret ». Enfin, nous avons besoin de données de surveillance pour évaluer l'efficacité des mesures d'adaptation mises en oeuvre.

Afin de surveiller les changements climatiques et leurs impacts, nous avons besoin de données de surveillance pour les importantes activités de gestion suivantes :

- la modélisation prédictive, pour établir les conditions initiales et limites, étalonner et valider les modèles hydrologiques ainsi que concevoir des modèles pour réduire l'échelle des scénarios de changements climatiques;
- la vérification au sol, pour estimer l'exactitude et l'incertitude des données de télédétection;
- l'évaluation du risque, pour définir les intervalles de récurrence, les critères de conception, les courbes intensité-durée-fréquence (IDF), etc.;
- la détection précoce, pour dégager de nouvelles tendances et à des fins explicatives;
- la préalerte, pour assurer une protection contre d'éventuels phénomènes hydrologiques (c.-à-d. surveillance des débits en amont des collectivités sujettes aux inondations);
- l'étude des tendances (p. ex., indicateurs de la disponibilité d'eau);
- l'attribution, pour comprendre la cause et l'effet (p. ex., la baisse du niveau des lacs est-elle attribuable à une baisse des précipitations, à une évapotranspiration accrue ou à ces deux causes?);
- la gestion des ressources, pour dresser un inventaire des évaluations dans un régime en changement.

Il convient également de prendre en considération les besoins spécifiquement associés à la planification de l'adaptation aux changements climatiques :

- fournir les données nécessaires à l'élaboration de plans d'adaptation aux changements climatiques;
- évaluer l'efficacité ou les effets de la mise en oeuvre de mesures d'adaptation;
- fournir les données nécessaires à l'amélioration et à l'étalonnage des modèles climatiques et hydrologiques.

Avant de prendre la décision de surveiller ou non un paramètre ou un groupe de paramètres hydrologiques particuliers aux fins de l'adaptation aux changements climatiques, il convient de se poser la question suivante : « De quelle gravité seraient les éventuels impacts des variations d'un paramètre hydrologique donné? ».

Pour surveiller les impacts hydrologiques des changements climatiques, les autorités compétentes peuvent identifier et prioriser à la fois les paramètres à mesurer et les endroits où seront prises les mesures. À cause du manque de ressources, il pourrait cependant s'avérer impossible d'améliorer tous les réseaux de surveillance dans tous les bassins versants pour obtenir des données sur les impacts des changements climatiques. Les décideurs pourraient choisir d'accorder priorité à la surveillance de certaines zones ou des bassins versants les plus vulnérables aux impacts des changements climatiques.

Une autre façon de procéder est de veiller à ce que les activités de surveillance se déroulent dans des types de bassins versants représentatifs de la province ou du territoire. Il serait également possible de prioriser la surveillance dans les régions où la population est plus dense (et la sensibilité, par conséquent, plus élevée) ou de prioriser la surveillance dans des régions riches en ressources (comme dans les zones de villégiature ou agricoles). Les méthodes de priorisation possibles pour les réseaux de surveillance de l'eau sont présentées à la section 5 du présent document et décrites en détail à l'annexe A.

Une fois les priorités établies pour les réseaux de surveillance de l'eau, la prochaine étape est d'évaluer les réseaux existants de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Les méthodes d'évaluation possibles sont présentées à la section 6 du présent document et décrites en détail à l'annexe B.

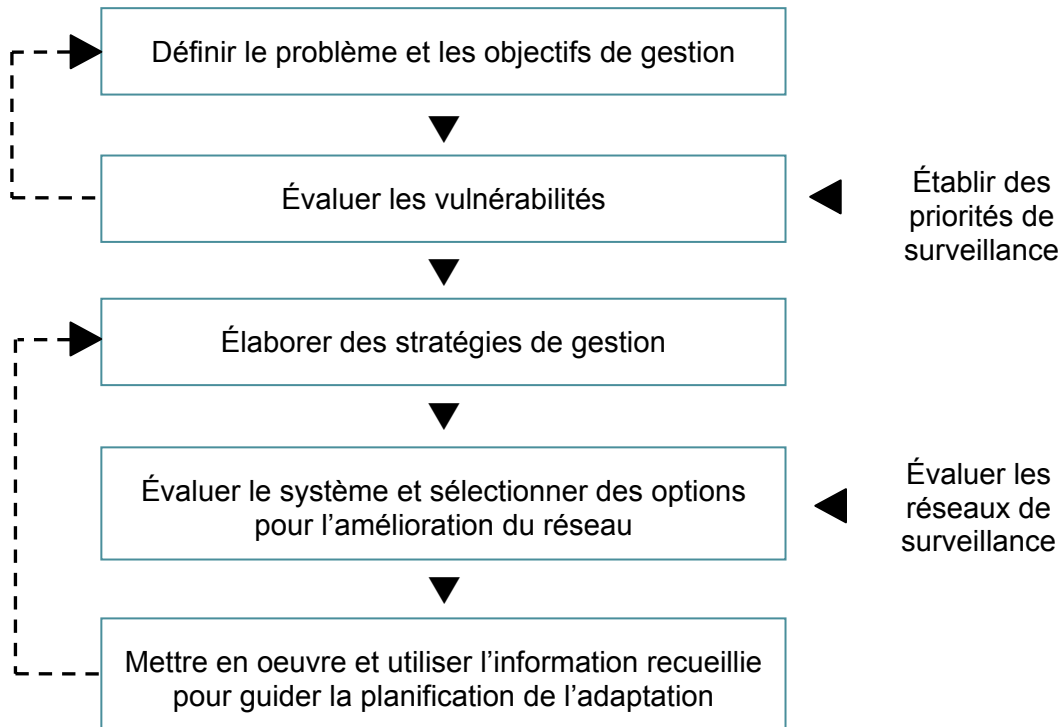
Pour commencer, toutefois, nous examinons le processus global utilisé pour la planification de l'adaptation aux changements climatiques et la place qu'occupent la priorisation et l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau dans ce processus.

4.1 INTÉGRATION DE LA PRIORISATION ET DE L'ÉVALUATION DES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DANS UN PROCESSUS DE PLANIFICATION DE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Dans la présente section, nous expliquons comment la priorisation et l'évaluation peuvent s'intégrer à un éventuel processus de planification de l'adaptation aux changements climatiques. La prise de décisions en matière d'adaptation aux changements climatiques – décider qui doit

faire quoi et quand – est une tâche difficile, qui peut s'accomplir de différentes façons. La figure 4.2 donne un exemple de méthode, qui fait appel à un « processus de décision structuré ».

Figure 4.2 : Exemple de cadre pour la planification de l'adaptation aux changements climatiques



Le processus de planification peut se dérouler en plusieurs étapes. Il s'agit généralement d'un processus itératif, possiblement assorti de boucles de rétroaction entre les étapes. Voici une brève description du contenu potentiel de ces étapes :

Définition du problème et des objectifs de gestion : Pour les décideurs, la première étape de la planification de l'adaptation consiste à définir le(s) problème(s) et à établir les objectifs de gestion pour remédier à ce(s) problème(s). Les décisions relatives à la planification de l'adaptation sont motivées non seulement par les impacts des changements climatiques, mais aussi par des questions techniques, de gestion et socioéconomiques. La planification de l'adaptation peut faire partie d'une grande stratégie d'adaptation aux changements climatiques qui repose sur un large éventail de sources d'information, notamment les projections des modèles de changements climatiques à échelle réduite. En général, cette étape du processus de planification repose sur une constante collaboration entre chercheurs, gestionnaires et décideurs, de même que sur la prise en compte des préoccupations du public et des intervenants.

Évaluation des vulnérabilités présentes et futures du système : Cette étape permet de définir les raisons qui motivent l'établissement de priorités aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Les gestionnaires peuvent évaluer les vulnérabilités du système en se basant sur les

données antérieures, les conditions actuelles et/ou les vulnérabilités projetées. Il faudra peut-être ajuster les priorités et les objectifs de gestion régionaux (et répéter la première étape) à mesure que les conditions évolueront au fil du temps.

- **Les méthodes de priorisation décrites dans la section 5 et l'annexe A du document peuvent aider à guider cette étape du processus de décision.**

Élaboration des stratégies de gestion : Pour chaque vulnérabilité d'un système, il existe généralement différentes stratégies ou mesures d'adaptation pour réduire les risques d'impacts négatifs. Dans les régions vulnérables aux inondations causées par les débordements de rivières, par exemple, les stratégies d'adaptation possibles incluraient notamment l'enlèvement des habitations situées dans la zone inondable, la construction d'ouvrages de protection contre les inondations et/ou l'établissement de nouvelles normes de construction qui réduisent le risque associé aux inondations. À cette étape de la planification de l'adaptation, les stratégies possibles sont évaluées en fonction de divers critères comme le coût, l'efficacité et l'impact social. Le résultat : un ensemble de stratégies de gestion dont on peut se servir pour adapter les systèmes aux principaux impacts des changements climatiques et pour réduire la vulnérabilité de ces systèmes à ces impacts.

Évaluer le système et sélectionner des options : Une fois que les stratégies de gestion de l'adaptation sont adoptées, les gestionnaires devront éventuellement s'assurer que les réseaux de surveillance de l'eau fourniront les données requises pour détecter les changements, suivre les tendances et évaluer l'efficacité des stratégies d'adaptation. Les réseaux surveillent-ils les bons paramètres, à la bonne fréquence et aux bons endroits, avec la bonne densité de stations et la bonne méthode, de manière à faciliter l'adaptation aux changements climatiques? Après avoir évalué les réseaux existants de surveillance de l'eau, les gestionnaires des ressources en eau d'une province ou d'un territoire pourraient recommander d'ajouter des paramètres à mesurer, d'accroître la fréquence des mesures, d'ajouter des stations de surveillance ou de déménager certaines stations.

- **Les résultats des méthodes d'évaluation de la gestion de l'eau, comme les méthodes décrites dans la section 6 et l'annexe B du document, aideront à guider cette étape du processus de décision.**

Mettre en oeuvre et utiliser l'information pour guider la planification de l'adaptation : Le point culminant du processus de planification de l'adaptation est la mise en oeuvre de stratégies ou de mesures d'adaptation qui reposent sur un solide système d'information. La mise en oeuvre, qui suit les principes de la gestion adaptative, inclut la surveillance continue, l'ajustement des mesures de gestion au fur et à mesure que des données de surveillance viendront alimenter le processus ainsi qu'un examen périodique des objectifs de gestion pour en vérifier la pertinence.

5. ÉTABLISSEMENT DE PRIORITÉS POUR LES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE

L'établissement de priorités de surveillance de l'eau pour faciliter l'adaptation aux changements climatiques commence par l'identification d'éventuels impacts des changements climatiques et par l'établissement d'objectifs de gestion. Que valorisons-nous? Qu'essayons-nous de protéger? En établissant des objectifs de gestion, les autorités compétentes pourraient tenir compte des impacts éventuels en conjonction avec un éventail de facteurs, notamment la rareté d'un écosystème donné, la représentativité de certains types d'écosystèmes, la vulnérabilité aux effets des changements climatiques, la valeur des ressources naturelles, la valeur de la fonction ou des services écosystémiques fournis par certains systèmes naturels, la sensibilité des ressources en eau aux impacts des changements climatiques (p. ex., détérioration ou appauvrissement) ou le rapport coûts-avantages et la probabilité de succès de la mise en oeuvre de stratégies d'adaptation dans une région donnée.

Il existe plusieurs méthodes pour établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques, qui vont de méthodes qualitatives comme les ateliers à des analyses quantitatives rigoureuses ou la modélisation. Le CCME a examiné diverses méthodes possibles pour établir des priorités. Il a examiné des méthodes qui s'appliquent à différentes échelles et fournissent des résultats fiables et documentables. La possibilité d'appliquer les méthodes à différentes échelles est un critère important parce que la taille, la complexité et la disponibilité des ressources de surveillance diffèrent énormément d'une province et d'un territoire à l'autre au Canada.

Le CCME a identifié trois méthodes qui exigent une quantité limitée de données facilement accessibles et offrent une grande flexibilité en termes d'applicabilité sans exiger un niveau élevé de savoir-faire, à savoir :

- 1) la méthode d'évaluation économique de base pour les services écosystémiques
- 2) l'analyse ombrothermique
- 3) l'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau.

Ces trois méthodes permettent également de produire des résultats compréhensibles pour le public. Elles sont décrites brièvement ci-dessous et en détail à l'annexe A. L'annexe C contient de brèves descriptions d'autres méthodes de priorisation et de la documentation sur ces méthodes.

5.1 MÉTHODES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DE BASE POUR LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les services écosystémiques sont les biens et les services que fournissent les systèmes naturels, comme le cycle des éléments nutritifs, l'approvisionnement en eau, la capacité d'auto-épuration et la protection contre les inondations. La méthode d'évaluation économique de base (MEEB) des services écosystémiques est conçue pour différencier des régions (p. ex., de grands bassins versants ou écorégions) en fonction des différences relatives observées entre les services

écosystémiques qu'elles fournissent. La MEEB détermine la valeur des services moyens (types et quantités) fournis par une utilisation donnée du sol (p. ex., milieu humide) dans un endroit donné (p. ex., les États-Unis). Par un processus connu sous le nom de « transfert des bénéfices », ces valeurs sont ensuite appliquées à tous les types d'utilisations similaires (milieu humide dans ce cas-ci) dans une autre région (p. ex., le sud du Québec ou l'Alberta). La valeur des services écosystémiques fournis par différentes utilisations du sol peut se mesurer en fonction de la distribution spatiale et de la valeur économique (\$ par hectare) des services. Lors de l'établissement de priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau, les services écosystémiques à prendre en considération sont ceux fournis par les systèmes hydrologiques.

Dans la méthode d'évaluation économique de base, on dresse une carte des utilisations du sol dans la région d'intérêt. Pour ce faire, on utilise des données généralement faciles d'accès sur les utilisations du sol (milieux humides, forêts, prairies, terres agricoles, sols dénudés, terres aménagées, etc.). Les services écosystémiques associés à ces utilisations sont ensuite évalués et cartographiés. Les cartes ainsi produites montrent les valeurs relatives et la distribution spatiale des services hydrologiques fournis. Savoir dans quelles régions est fourni tel ou tel type de services hydrologiques et la valeur relative de chacun d'eux peut aider à établir des priorités pour les réseaux de surveillance en vue de faciliter l'adaptation aux changements climatiques.

Une autre façon d'utiliser les résultats de la MEEB serait de se servir des valeurs économiques attribuées à différents types d'utilisations du sol comme facteurs de pondération dans d'autres méthodes de priorisation (p. ex., l'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau). Dans ce cas particulier, un milieu humide peut obtenir une pondération plus élevée qu'une forêt, et une forêt, une pondération plus élevée qu'une terre agricole ou un pâturage.

5.2 ANALYSE OMBROTHERMIQUE

Le bilan hydrique est l'une des principales conditions du milieu qui influencent la vulnérabilité d'une région aux changements climatiques. L'analyse ombrothermique fait appel à deux indicateurs – les précipitations (*ombro* = *pluie*) et la température (*thermique*) – pour évaluer l'étendue spatiale de la vulnérabilité d'une région aux changements climatiques. L'analyse ombrothermique utilise des indices d'humidité/d'aridité et des graphiques pour intégrer des données de température et de précipitations sur une période de temps donnée. À l'aide de données de température et de précipitations facilement accessibles, cette méthode permet de produire des graphiques et des cartes qui identifient des zones vulnérables possiblement sujettes à l'humidité (quantité excessive de pluie) ou à l'aridité (sécheresse). Connaître l'existence et l'emplacement de ces zones vulnérables dans une région donnée peut aider les gestionnaires à établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau afin de faciliter l'adaptation aux changements climatiques. L'analyse ombrothermique est souvent utilisée lorsque l'évaporation est difficile à calculer dans l'évaluation du bilan hydrique d'un écosystème.

Il y a deux méthodes d'analyse ombrothermique :

- la production de diagrammes ombrothermiques pour des emplacements particuliers;

- la production de cartes de vulnérabilité en fonction de l'indice ombrothermique, qui mesure les périodes critiques d'humidité (quantité excessive de pluie) et d'aridité (sécheresse).

5.3 ANALYSE DES INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAU

L'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau régionales (AIVRE) sert à évaluer, à l'échelle régionale, la vulnérabilité des ressources en eau et des ressources qui dépendent de l'eau aux impacts des changements climatiques. L'analyse fait appel à des indicateurs pour évaluer les aspects clés de l'approvisionnement en eau et de l'utilisation de l'eau (tels le débit, les pertes par évapotranspiration, la qualité de l'eau, les prélèvements d'eau et les agglomérations en zones inondables) afin d'identifier les bassins versants où les ressources en eau sont actuellement très vulnérables à un stress accru et dont la vulnérabilité serait éventuellement accentuée ou réduite par des variations des phénomènes climatiques moyens et extrêmes. L'AIVRE part du principe que les ressources en eau actuellement soumises à des stress sont plus susceptibles d'être vulnérables aux changements climatiques dans l'avenir que celles qui ne subissent pas de tels stress. L'identification des bassins versants qui sont possiblement vulnérables aux impacts négatifs des changements climatiques aide à prévoir dans quelles régions les changements climatiques risquent d'avoir les impacts les plus importants.

Cette méthode relativement simple fait appel aux données disponibles sur les ressources en eau pour produire des cartes SIG. Les cartes de vulnérabilités des bassins versants peuvent aider à établir des priorités pour les réseaux de surveillance en vue de faciliter l'adaptation aux changements climatiques.

6. EVALUATION DES RESEAUX DE SURVEILLANCE DE L'EAU AUX FINS DE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques consiste essentiellement à évaluer la capacité et le caractère adéquat des réseaux de surveillance. Le ou les réseaux peuvent-ils fournir les données requises? Les données sont-elles exactes, représentatives sur les plans spatial et temporel, et pertinentes en regard des objectifs et des buts de gestion établis par les autorités compétentes en matière d'adaptation aux changements climatiques?

Au moment d'évaluer les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques, il serait bon de tenir compte des points suivants :

- Le maintien d'un réseau dense de stations n'améliore pas nécessairement la qualité des données disponibles pour l'évaluation des tendances, la planification de l'adaptation, la projection de phénomènes extrêmes ou l'établissement de modèles hydrologiques ou climatiques.
- La suppression arbitraire de stations ne permet pas de garantir que les emplacements restants sont bien situés par rapport aux autres stations d'un réseau existant.
- Les données recueillies sur une longue période de temps et de façon uniforme sont très utiles voire indispensables pour dégager des tendances à long terme. Ce point est d'une importance cruciale considérant que les effets des changements climatiques doivent être pris en considération dans la planification des ressources en eau et de l'adaptation.

Le CCME a réalisé un examen des méthodes d'évaluation des réseaux de surveillance. L'examen du CCME, qui ciblait les réseaux de surveillance constitués d'installations fixes, a permis d'identifier un éventail de méthodes d'évaluation, qui allait d'audits qualitatifs assez simples à des méthodes complexes de statistique et de modélisation. L'examen a permis de cerner trois méthodes d'évaluation en fonction des critères suivants : applicabilité à différentes échelles; besoins relativement modérés de savoir-faire et de données; et capacité de produire des résultats compatibles avec les objectifs de surveillance visés en termes de portée et de précision. Les trois méthodes sont les suivantes :

- 1) la méthode de l'audit
- 2) l'analyse de la dégradation du réseau, dite « méthode Monte-Carlo »
- 3) les méthodes d'analyses multivariées.

Ces méthodes, particulièrement les deux premières, ont été sélectionnées en grande partie à cause de leur relative simplicité. Les trois méthodes sont décrites brièvement ci-dessous et en détail à l'annexe B. De brèves descriptions d'autres méthodes d'évaluation des réseaux de surveillance, accompagnées de références, sont présentées à l'annexe C.

Lorsque des priorités de surveillance ont été établies aux fins de l'adaptation aux changements climatiques, il est possible d'utiliser l'une ou l'autre des méthodes susmentionnées pour évaluer l'efficacité des réseaux dans les régions hautement prioritaires. Si la priorisation n'a pas été effectuée, les autorités compétentes pourraient envisager d'utiliser la méthode de l'audit pour commencer l'évaluation du réseau, car cette méthode permet d'identifier des zones sous-échantillonnées ou des stations qui fournissent des données inadéquates ou jugées non représentatives. Un échantillonnage inadéquat à une ou plusieurs stations de surveillance peut être rectifié en fonction des résultats de l'audit.

Si les résultats de l'audit révèlent l'existence de problèmes systémiques dans un ou des réseaux, notamment des cas de sous-représentation dans certaines zones ou de redondance dans d'autres, l'identification des stations à éliminer ou à déplacer demandera possiblement une analyse plus poussée. Dans de tels cas, une évaluation quantitative peut fournir les données requises. Pour les réseaux climatiques et hydrologiques, l'analyse de la dégradation du réseau est une méthode relativement facile à utiliser, qui demande un moindre investissement de temps, de ressources et de savoir-faire. Dans la plupart des cas, une analyse de la dégradation du réseau permet d'évaluer l'adéquation de la densité des réseaux existants dans les régions où l'échantillonnage est en général suffisant. Par contre, cette méthode ne donne pas d'indications directes sur l'emplacement optimal des stations à supprimer ou à ajouter.

Les méthodes d'analyses multivariées peuvent identifier des groupes de stations au comportement similaire (c.-à-d. des stations qui enregistrent des données similaires dans le temps). Ces méthodes permettent également d'identifier les régions faiblement représentées (qui comptent un nombre inférieur de stations comparativement aux variations temporelles et spatiales dans l'ensemble de données) et les régions qui sont fortement représentées et qui comptent éventuellement des stations redondantes.

6.1 MÉTHODE DE L'AUDIT

L'audit est une méthode qualitative relativement simple pour évaluer les réseaux de surveillance de l'eau dans une optique d'adaptation aux changements climatiques. Elle conjugue une connaissance spécialisée des réseaux existants à une évaluation méthodique et détaillée des stations existantes et proposées, qui repose sur des critères établis. Un certain nombre de modèles de réseaux sont ensuite évalués selon leur capacité d'atteindre les objectifs généraux du réseau et selon leur coût.

La méthode de l'audit, décrite en détail à l'annexe B du document, a été utilisée au Nouveau-Brunswick pour évaluer les stations de mesure du réseau hydrométrique provincial en vue de créer un réseau plus rentable²¹. Cette méthode peut facilement s'appliquer à l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Pour ce faire, il faut d'abord établir des critères d'évaluation. Ces critères doivent reposer sur des facteurs qui cadrent avec les priorités régionales d'adaptation aux changements climatiques. Parmi les critères possibles, mentionnons le « caractère adéquat » de l'emplacement des stations, la représentation de l'hydrologie régionale, l'utilité des stations pour les estimations (p. ex., pour les sites non jaugés) et la satisfaction des besoins des clients en matière de mesures et de

stratégies d'adaptation aux changements climatiques. Chaque station est ensuite auditée au cours d'une table ronde réunissant les exploitants et les gestionnaires responsables des réseaux, de même que des spécialistes des changements climatiques qui s'occupent de surveillance de l'eau. Les stations existantes et proposées se voient attribuer des notes en fonction des critères d'évaluation et sont classées en fonction du total de points accumulés pour chaque considération prioritaire. Les résultats de l'évaluation et du classement des stations servent à concevoir d'autres modèles de réseaux et des séries d'objectifs à utiliser pour prendre des décisions au sujet de la conception du réseau. Une analyse coûts-avantages peut être effectuée en comparant les avantages de chaque modèle (total des points d'audit de chaque station) et la hausse ou la baisse des coûts d'exploitation qu'entraînerait la mise en place du modèle.

6.2 ANALYSE DE LA DÉGRADATION DU RÉSEAU - MONTE CARLO

L'analyse de la dégradation du réseau (ADR) permet d'évaluer les réseaux de surveillance météorologique ou hydrométrique et de déterminer la densité de stations requise pour répondre à un ou plusieurs objectifs de surveillance donnés. L'ADR simule une diminution systématique ou « dégradation » de la densité des stations d'échantillonnage d'un réseau et, à chaque étape successive de dégradation, évalue le rendement du réseau dégradé par rapport à celui du réseau original. L'échantillonnage Monte-Carlo – sélection aléatoire de stations parmi toutes les stations existantes du réseau – sert à simuler la dégradation du réseau. Les réseaux dégradés ainsi créés sont des sous-ensembles du réseau complet offrant une densité de données spatiales ou temporelles inférieure à celle du réseau complet.

L'ADR a été utilisée dans de nombreuses applications. Dans le cas du Climate Reference Network (CRN) des États-Unis, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) s'en est servi pour déterminer la densité spatiale et le nombre total de stations de surveillance requises pour améliorer la capacité du réseau d'observer les changements climatiques et la variabilité temporelle aux États-Unis. Le CRN vise à produire des observations homogènes de la température et des précipitations à partir des données de stations de référence, qui peuvent être corrélées avec des observations historiques pour permettre une détection et une attribution adéquates des changements climatiques²². L'analyse réalisée pour le CRN divisait les 48 États en 115 cellules et créait à l'intérieur de chacune des réseaux hypothétiques de sous-échantillons de stations représentatifs, sélectionnés selon la méthode Monte-Carlo, à partir d'un réseau de référence de densité supérieure. Le nombre adéquat de stations pour le CRN a été défini comme étant le nombre de stations nécessaire pour reproduire, à l'intérieur de certaines limites d'erreur prédéterminées, les tendances annuelles observées de la température et des précipitations aux États-Unis. Même si l'étude était concentrée sur une définition du comportement climatique qui mettait l'accent sur les tendances, les chercheurs soutiennent que leur technique est applicable à d'autres mesures du comportement du climat²³.

L'ADR peut aussi servir à réaliser des analyses coûts-avantages des réseaux de surveillance et à définir le lien entre la densité des stations et le rendement du réseau.

Cette méthode d'évaluation part du principe que le réseau de surveillance complet existant, ou toute autre donnée d'échantillonnage, donne généralement une représentation raisonnable des

valeurs réelles des paramètres mesurés. Même si elle peut servir à évaluer l'adéquation de la densité des réseaux existants dans les régions où l'échantillonnage est généralement suffisant, l'ADR ne donne pas d'indications directes sur l'emplacement optimal des stations à supprimer ou à ajouter. Pour ce faire, une méthode de réduction de la variance/des erreurs ou une méthode de modélisation pourrait s'avérer nécessaire. Comme ces méthodes sont plus complexes, leur applicabilité devrait être évaluée au cas par cas. (À l'annexe C, dans la section *Sources d'information* et la sous-section *Méthodes d'évaluation*, voir sous *Méthodes de réduction de la variance et acquisition de données* ainsi que sous *Méthodes géostatistiques et réduction d'erreur*).

6.3 MÉTHODES D'ANALYSES MULTIVARIÉES

Les méthodes d'analyses multivariées sont des techniques statistiques utilisées pour évaluer le rapport statistique entre des variables. Dans le cas des réseaux de surveillance, les variables peuvent être des paramètres météorologiques ou hydrométriques. Les analyses multivariées peuvent servir à identifier des stations aux comportements similaires (c'est-à-dire des stations qui enregistrent des données similaires au fil du temps). La similarité des stations est appelée « homogénéité » et présente un intérêt pour la rationalisation des réseaux, car l'interpolation de données entre stations se fait idéalement entre des stations homogènes. Les méthodes d'analyses multivariées permettent aussi d'identifier les régions faiblement représentées (nombre inférieur de stations comparativement aux variations temporelles et spatiales dans l'ensemble de données) et les régions qui sont fortement représentées et qui comptent éventuellement des stations redondantes. Deux méthodes d'analyses multivariées sont brièvement décrites ci-après et présentées plus en détail à l'annexe B.

- 1) **Analyse en composantes principales (ACP) :** Cette méthode identifie les groupes de stations qui ont des propriétés spatiales et temporelles similaires. L'ACP pourrait notamment permettre d'identifier, à l'intérieur d'un même sous-bassin versant, des stations homogènes qui mesurent des précipitations annuelles moyennes similaires au fil du temps. Les résultats de l'analyse sont exprimés en coefficients de corrélation entre les stations et les composantes principales. Pour faciliter la comparaison, les coefficients sont présentés sous forme de tableaux et de diagrammes. L'ACP peut aussi servir à identifier les stations relativement homogènes et redondantes. On a appliqué cette méthode à des données pluviométriques dans la région des Appalaches au Québec pour identifier les stations homogènes et, de là, les stations redondantes qui pouvaient être fermées²⁴.
- 2) **Analyse typologique (AT) :** Cette méthode utilise des dendrogrammes (c.-à-d. des diagrammes en forme d'arbres) pour identifier les groupes de stations qui ont des propriétés spatiales et temporelles similaires. Par exemple, l'AT permettrait d'identifier deux stations hydrométriques homogènes qui sont situées à 5 kilomètres l'une de l'autre sur un segment de cours d'eau sans effluents et qui mesurent un débit annuel de pointe similaire au fil du temps. L'AT a été utilisée pour rationaliser un réseau de surveillance hydrométrique dans le bassin de la rivière Pembina et aux alentours dans le sud du Manitoba. Même si elle peut être utilisée pour identifier les stations redondantes, cette méthode ne permet pas de les différencier; il faut donc recourir à des critères externes pour sélectionner la ou les stations

les plus représentatives. Cela dit, l'AT pourrait être combinée à d'autres méthodes statistiques, par exemple les méthodes de réduction de la variance ou de réduction des erreurs, pour identifier la ou les stations fournissant le plus d'information. L'AT a été appliquée à des données hydrométriques du bassin de la rivière Pembina au Manitoba (Canada) et au Dakota du Nord (É.-U.) dans le cadre d'un processus de rationalisation visant à réduire le nombre de stations hydrométriques²⁵.

Lors de l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau, il convient de se rappeler que certaines stations de surveillance sont en place pour répondre à des besoins particuliers ou recueillent des données à long terme qui sont importantes aussi bien pour la détection des changements climatiques que pour l'adaptation aux changements climatiques.

7. CONCLUSIONS ET PROCHAINES ETAPES

En général, les spécialistes s'entendent sur la nature des impacts hydrologiques projetés des changements climatiques et sur le fait que certains de ces impacts sont déjà observables et mesurables. Il est généralement admis que les changements climatiques se poursuivront pendant de nombreuses décennies peu importe le succès des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Conscients de ce fait, les gouvernements s'intéressent à l'adaptation aux changements climatiques. L'adaptation aux changements climatiques est l'action d'ajuster des décisions, des activités et des opinions aux changements constatés ou prévus des conditions climatiques en vue d'en freiner les dommages ou de tirer profit des possibilités que présentent les impacts des changements climatiques.

Or, nous avons un excellent outil d'adaptation aux changements climatiques – les réseaux de surveillance de l'eau, c'est-à-dire les centaines de stations, de sites et de relevés qui sont utilisés partout au pays pour mesurer d'importants paramètres hydrologiques. Peu de ces réseaux, voire aucun, n'ont cependant été conçus au départ pour surveiller les impacts des changements climatiques ou pour nous aider à nous adapter à ces impacts. Le présent document fournit des conseils sur la façon de procéder pour ajuster ou perfectionner nos réseaux de surveillance de l'eau de manière à faciliter la planification de l'adaptation et à réduire les risques associés aux impacts des changements climatiques.

Un processus possible pour déterminer l'efficacité des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques (le processus décrit dans le présent document) est d'établir des priorités pour les réseaux de surveillance et d'évaluer ensuite la capacité de ces réseaux à fournir les données requises pour répondre aux besoins d'adaptation aux changements climatiques. Ce document décrit des méthodes pratiques et éprouvées pour mener à bien ces activités de priorisation et d'évaluation, méthodes qui sont conçues pour fonctionner dans toutes les provinces et territoires du Canada. Cependant, comme les impacts des changements climatiques varient d'un endroit à l'autre, les priorités et les évaluations seront inévitablement spécifiques à chaque province/territoire et à chaque région. Les méthodes de priorisation et d'évaluation aideront les autorités compétentes à déterminer s'il faut (et comment) ajouter ou supprimer des stations, ajouter des paramètres hydrologiques ou modifier la fréquence et la période d'échantillonnage.

À mesure que progressera l'évaluation des réseaux de surveillance hydrologique, nous proposons d'envisager les prochaines étapes suivantes :

- Bien que les paramètres requis varient beaucoup d'une province ou d'un territoire à l'autre, certains paramètres ont besoin de surveillance dans l'ensemble des provinces et territoires canadiens, ce qui pourrait offrir aux intéressés de grandes possibilités d'échanger des données, de l'information, des expériences, des idées et des solutions.
- Dans l'ensemble des provinces et territoires, les décideurs ont besoin de données de grande qualité, qui s'étendent sur de longues périodes, pour se préparer aux changements climatiques. À cette fin, nous devons assurer la comparabilité des données entre les stations,

la vérification de la qualité des données ainsi qu'un archivage des données qui permettra un accès à long terme de l'information pour les prises de décisions.

- Des exemples d'études de cas canadiennes et l'échange de connaissances entre les gouvernements pourraient rendre les méthodes de priorisation et d'évaluation des réseaux de surveillance décrites dans ce document encore plus utiles. Les exemples canadiens disponibles sont cités dans le document.
- Les examinateurs ont souligné le besoin de méthodes et d'information spécifiquement axées sur la surveillance de la cryosphère. Cette dernière pourrait cibler la couverture de neige; le bilan massique des glaciers; la superficie des glaciers; la couverture de glace des lacs, cours d'eau et océans; ainsi que la température, la superficie et la profondeur du pergélisol. Les provinces et territoires dont le réseau de lacs et de rivières dépend, pour son alimentation en eau, des glaciers ou de la glace de sol devront évaluer en détail la nécessité de surveiller la dégradation des glaces. Il serait peut-être possible d'adapter certaines des méthodes décrites dans le présent document aux fins de la priorisation et de l'évaluation des réseaux de surveillance de la cryosphère.
- Des examinateurs issus des gouvernements du Canada et du monde universitaire ont apporté une contribution extrêmement utile à la préparation du document. Ces collaborateurs ont non seulement suggéré des améliorations au document, mais ont aussi identifié des besoins en ce qui concerne l'évaluation des impacts des changements climatiques et l'élaboration de stratégies et de plans d'adaptation aux changements climatiques. Par exemple :
 - un cadre qui intègre la surveillance, la modélisation et la gestion contribuerait à faciliter l'élaboration et la mise en oeuvre de stratégies et de plans d'adaptation aux changements climatiques;
 - la gestion intégrée des ressources en eau pourrait jouer un grand rôle dans l'adaptation aux changements climatiques;
 - l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau pourrait se faire après une évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques et l'identification connexe de zones vulnérables ou prioritaires.

NOTES EN FIN DE CHAPITRE

- ¹ D.S. Lemmen, F.J. Warren et J. Lacroix. 2008. « Synthèse », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, p. 1-20.
- ² D.S. Lemmen et F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs). 2008. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 448 p.
- ³ Ibid.
- ⁴ *Climate Change Adaptation: The Pivotal Role of Water*, UN-Water Policy Brief, 2010.
<http://www.unwater.org/documents.html>
- ⁵ D.S. Lemmen F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs). 2008. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 448 p.
- ⁶ E. Harris. « Adapt and prosper », dans *Climate Futures – Can You Prosper in a Hotter, Wetter World?*, *Canadian Geographic*, octobre 2010, 130 (5):13.
- ⁷ D.S. Lemmen et F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs). 2008. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 448 p.
- ⁸ Ibid.
- ⁹ D.S. Lemmen et F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs). 2008. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 448 p.
- ¹⁰ Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE). 2010. *Degrés de réchauffement : un résumé des effets du changement climatique prévus au Canada au cours du XXI^e siècle* (diagramme), Canadian Geographic Enterprises.
- ¹¹ Ibid.
- ¹² D'après le rapport intitulé *NWT Climate Change Impacts and Adaptation*, paru en janvier 2008.
- ¹³ Sauchyn et Kulshreshtha. « Chapitre 7 », p. 295, dans D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), 2008, *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 448 p.
- ¹⁴ D.S. Lemmen et F.J. Warren et J. Lacroix. 2008. « Synthèse », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, p. 1-20.
- ¹⁵ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J. J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (éditeurs), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 967 p. plus annexes.
- ¹⁶ D.S. Lemmen et F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs). 2008. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 448 p.
- ¹⁷ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et

- C.E. Hanson (éditeurs), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 976 p. plus annexe.
- ¹⁸ R. de Loe, R. Kreutzwiser et L. Moraru. 2001. « Adaptation options for the near term: climate change and the Canadian water sector », *Global Environmental Change* 11 (2001), p. 231-245.
- ¹⁹ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éditeurs), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 976 p. plus annexe.
- ²⁰ Adaptation du tableau RS-5, d'après D.S. Lemmen, F.J. Warren et J. Lacroix, 2008, « Synthèse », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, p. 1-20.
Augmenté d'information puisée dans :
DeMont, J. « In the eye of the storm », dans *Climate Futures – Can You Prosper in a Hotter, Wetter World?*, *Canadian Geographic*, octobre 2010, 130 (5):58-66.
et
R. de Loe, R. Kreutzwiser et L. Moraru. 2001. « Adaptation options for the near term: climate change and the Canadian water sector », *Global Environmental Change* 11 (2001), p. 231-245.
et
Ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles des Territoires du Nord-Ouest. 2008. *NWT Climate Change Impacts and Adaptation Report 2008*, 31 p.
et
Gouvernement du Yukon. 2009. *Yukon Government Climate Change Action Plan*, février 2009, 45 p.
- ²¹ Z.K. Davar et W.A. Brimley. 1990. « Hydrometric network evaluation: audit approach ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116 (1) : 134-146.
- ²² M.J. Janis, K.G. Hubbard et K.T. Redmond. 2004. « Station density strategy for monitoring long-term climatic change in the contiguous United States », *Journal of Climate* 17:151-162.
- ²³ Ibid.
- ²⁴ G. Morin, J-P Fortin, W. Sochanska, J-P Lardeau et R. Charbonneau. 1979. « Use of principal component analysis to identify homogeneous precipitation stations for optimal interpolation », *Water Resources Research*, 15(6): 1841-1850.
- ²⁵ D. H. Burn et I.C. Goulter. 1991. « An approach to the rationalization of streamflow data collection networks », *J. Hydrol.*, 122: 71-91.
-

ANNEXE A

MÉTHODES D'ÉTABLISSEMENT DES PRIORITÉS POUR LES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DE L'EAU

TABLE DES MATIÈRES

Annexe A : Méthodes d'établissement des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau

A.1.	Méthode d'évaluation économique de base pour les services écosystémiques	A-4
A.2.	Analyse ombrothermique	A-19
A.3.	Analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau	A-33

Liste des figures

Figure A1.1 : Procédure à suivre pour la MEEB

Figure A1.2 : Distribution de la valeur des services écosystémiques annuels par hectare par unité de bassin versant

Figure A2.1 : Diagramme ombrothermique pour Penticton (Colombie-Britannique)

Figure A2.2 : Diagramme ombrothermique pour Barrie (Ontario)

Figure A2.3 : Diagramme ombrothermique pour St. John's (Terre-Neuve)

Figure A2.4 : Procédure de la méthode de cartographie ombrothermique

Figure A2.5 : Indices ombrothermiques pour le mois de mai de l'année courante en Suisse

Figure A2.6 : Indices ombrothermiques projetés pour mai 2100 en Suisse

Figure A3.1 : Procédure à suivre pour l'AIVRE

Figure A3.2 : Indice de sensibilité aux fins de l'établissement de priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau en vue de l'adaptation aux changements climatiques dans un bassin versant quaternaire du sud de l'Ontario

Liste des tableaux

Tableau A1.1 : Services écosystémiques

Tableau A1.2 : Services écosystémiques dans la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario

Tableau A1.3 : Services écosystémiques par type d'utilisation du sol dans la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario

Tableau A1.4 : Techniques d'évaluation économique des services écosystémiques non marchands

Tableau A1.5 : Valeurs des services écosystémiques non marchands par type de couverture terrestre – sous-bassins versants de la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario

Tableau A1.6 : Valeurs des services écosystémiques non marchands par type de couverture terrestre – bassin versant du lac Simcoe

Tableau A1.7 : Sommaire des caractéristiques de la méthode d'évaluation économique de base

Tableau A2.1 : Indices ombrothermiques pour trois endroits au Canada

Tableau A2.2 : Sommaire des caractéristiques de la méthode d'analyse ombrothermique

Tableau A3.1 : Indicateurs pour les ressources en eau

Tableau A3.2 : Sommaire des caractéristiques de l'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau

ANNEXE A : MÉTHODES D'ETABLISSEMENT DES PRIORITES POUR LES RESEAUX DE SURVEILLANCE DE L'EAU

Le CCME a identifié trois méthodes qui exigent une quantité limitée de données facilement accessibles et offrent une grande flexibilité en termes d'applicabilité sans exiger un niveau élevé de savoir-faire, à savoir :

- 1) la méthode d'évaluation économique de base pour les services écosystémiques
- 2) l'analyse ombrothermique
- 3) l'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau.

Ces trois méthodes permettent également de produire des résultats compréhensibles pour le public. L'annexe C fournit de brèves descriptions d'autres méthodes de priorisation et des références pour ces méthodes.

Chacune des méthodes a été appliquée à différentes échelles. La méthode d'évaluation économique de base pour les services écosystémiques est souvent appliquée à l'échelle régionale ou à l'échelle du bassin versant. L'analyse ombrothermique a été appliquée à des régions où les paramètres climatiques de base de la température et des précipitations présentent d'importants écarts. Cette situation est plus susceptible de se produire à l'échelle régionale ou nationale. L'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau a été appliquée à toutes les échelles, de l'échelle nationale à l'échelle du bassin versant.

Selon l'ampleur de l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau, on pourra utiliser de concert différentes méthodes de priorisation. Par exemple, on peut utiliser la méthode d'analyse ombrothermique pour identifier des zones prioritaires à l'échelle régionale ou nationale. Ensuite, on pourra poursuivre l'évaluation de ces zones prioritaires avec l'une ou l'ensemble des autres méthodes.

A.1. METHODE D'EVALUATION ECONOMIQUE DE BASE POUR LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES

La présente section contient de l'information détaillée sur la façon d'utiliser la méthode d'évaluation économique de base des services écosystémiques pour établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. La méthode d'évaluation économique de base (MEEB) des services écosystémiques est conçue pour différencier des régions, notamment de grands ou multiples bassins versants ou des écorégions, en fonction des différences relatives qui existent entre les services écosystémiques qu'elles fournissent.

Les services écosystémiques désignent les biens et les services fournis par les systèmes naturels, comme le cycle des éléments nutritifs, l'approvisionnement en eau, la capacité d'auto-épuration et la protection contre les inondations. La MEEB détermine la valeur des quantités et des types moyens de services fournis par une utilisation donnée du sol (p. ex., milieu humide) dans un endroit donné (p. ex., les États-Unis). Par un processus connu sous le nom de « transfert des

bénéfices », ces valeurs sont ensuite appliquées à tous les types d'utilisations similaires (milieu humide dans ce cas-ci) dans une autre région (p. ex., le sud du Québec). La valeur des services écosystémiques fournis par différentes utilisations du sol peut se mesurer en fonction de la distribution spatiale et de la valeur économique des services (\$ par hectare). Lors de l'établissement de priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau, les services écosystémiques à prendre en considération sont ceux fournis par les systèmes hydrologiques.

Dans la méthode d'évaluation économique de base, on dresse une carte des utilisations du sol dans la région d'intérêt. Pour ce faire, on utilise des données généralement faciles d'accès sur les utilisations du sol (milieux humides, forêts, prairies, terres agricoles, sols dénudés, terres aménagées, etc.). Les services écosystémiques associés à ces utilisations sont ensuite évalués et cartographiés. Les cartes ainsi créées montrent les valeurs relatives et la distribution spatiale des services hydrologiques¹ fournis. Savoir dans quelles régions est fourni tel ou tel type de services hydrologiques et la valeur relative de chacun d'eux peut aider à établir des priorités pour les réseaux de surveillance en vue de faciliter l'adaptation aux changements climatiques.

1.1 RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

Comme mentionné plus haut, les « services écosystémiques » désignent les biens et les services fournis par les systèmes naturels. Ils sont également connus sous le nom de « capital naturel »². Les services écosystémiques sont fournis à plusieurs échelles (de planétaire à locale en passant par régionale). Le tableau A1.1 présente diverses catégories de services écosystémiques et des exemples de services appartenant à ces catégories.

Certains des services écosystémiques fournis par les systèmes naturels sont des services fournis directement aux humains, comme la fourniture d'eau potable, de bois d'œuvre et de nourriture. La valeur de ces types de services est relativement facile à estimer. La valeur d'autres services écosystémiques moins concrets, notamment le cycle des aliments nutritifs et la protection contre les inondations, est plus difficile à évaluer.

Les services hydrologiques (comme l'approvisionnement en eau, la protection contre les inondations, la capacité d'auto-épuration et l'assainissement de l'eau) sont essentiels à l'environnement, aux collectivités et à l'économie. Ces services écosystémiques sont très utiles et souvent très sensibles aux changements climatiques.

Tableau A1.1 : Services écosystémiques

CATÉGORIE DE SERVICE ÉCOSYSTÉMIQUE	EXEMPLES DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES
Services d'approvisionnement	<ul style="list-style-type: none">• Nourriture• Eau potable• Bois d'œuvre• Fibres

CATÉGORIE DE SERVICE ÉCOSYSTÉMIQUE	EXEMPLES DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES
Régulation des processus ou fonctions écologiques dont dépendent les humains	<ul style="list-style-type: none"> • Régulation du climat • Auto-épuration • Protection contre les inondations • Assainissement de l'eau • Régulation des incendies
Services de soutien	<ul style="list-style-type: none"> • Cycle des éléments nutritifs • Genèse du sol
Services culturels	<ul style="list-style-type: none"> • Bien-être • Nourriture spirituelle • Lieux de loisir

Il y a deux façons d'estimer la valeur des services écosystémiques :

- 1) Une évaluation originale, qui se fait en recueillant des données primaires particulières sur les services écosystémiques fournis dans toutes les régions d'intérêt. Ce genre d'analyse peut être très coûteux.
- 2) Une évaluation par transfert de bénéfices qui, à partir de diverses études, détermine la valeur économique des services hydrologiques pour une utilisation donnée du sol et transfère ensuite la valeur obtenue à tous les types d'utilisations similaires du sol.

La MEEB décrite ici utilise la seconde méthode. La méthode d'évaluation économique par transfert de bénéfices comporte cependant certaines faiblesses. Celles-ci sont décrites dans la section A1.4.

Dans la MEEB, des ensembles standards de services écosystémiques sont identifiés pour chaque type d'utilisation du sol. Par exemple, les terres forestières sont associées à l'ensemble de services suivants : régulation du climat, régulation des crues, cycle des éléments nutritifs et services de loisirs/d'écotourisme.

1.2 LA METHODE D'EVALUATION ECONOMIQUE DE BASE EN DETAIL

Dans la MEEB, l'établissement de priorités pour les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques se base sur la distribution spatiale et l'évaluation quantitative des services écosystémiques associés aux systèmes hydrologiques. L'évaluation quantitative tient compte des types (moyens) et de la valeur des services fournis par différents types d'utilisations du sol. La figure A1.1 résume les étapes de la MEEB.

Figure A1.1 : Procédure à suivre pour la MEEB

ÉTAPES		
Étape 1	Établir des objectifs régionaux de gestion	
	▼	
Étape 2	Examiner les données des cartes d'utilisations du sol	
	▼	
Étape 3	Combiner les cartes d'utilisations du sol	
	▼	
Étape 4	Identifier l'ensemble des services hydrologiques et écosystémiques associés aux systèmes hydrologiques pour chacune des utilisations du sol	
	▼	
Étape 5	Estimer la valeur des services hydrologiques	
	▼	
	Étape 5a	Attribuer une valeur économique à chaque service hydrologique fourni par les différentes utilisations du sol
		▼
	Étape 5b	Calculer la valeur, par unité de surface, de chaque combinaison service hydrologique – utilisation du sol
		▼
	Étape 5c	Calculer la valeur totale, par unité de surface, de chaque utilisation du sol
		▼
	Étape 5d	Calculer la valeur totale, par unité de surface, de chaque sous-région
		▼
	Étape 5e	Cartographier la valeur totale, par unité de surface, de chaque sous-région
		▼
Étape 6	Interpréter les résultats	
	▼	

ÉTAPES	
Étape 7	Prioriser les sites de surveillance

Étape 1 - Établir des objectifs régionaux de gestion : Les autorités compétentes établissent des objectifs régionaux de gestion qui cadrent avec les plans, les énoncés de politique et les conditions du milieu actuels. C'est une étape clé dans l'établissement de priorités de surveillance de l'eau qui aideront à lutter contre les changements climatiques. En général, les enjeux environnementaux, techniques, de gestion et socioéconomiques sont pris en compte dans l'établissement des objectifs régionaux de gestion.

Étape 2 - Examiner les données des cartes d'utilisations du sol : Examiner les cartes d'utilisations du sol de la région d'intérêt (le territoire, l'écorégion ou un grand bassin versant). L'examen porte sur la couverture (la superficie couverte par les cartes disponibles), sur l'exactitude (dans quelle mesure les cartes reflètent-elles les conditions actuelles) ainsi que sur la précision/l'échelle. Il se peut que des cartes soient disponibles auprès de diverses sources (nationales, provinciales, régionales ou locales).

Étape 3 - Combiner les cartes d'utilisations du sol : Les différentes cartes d'utilisations du sol sont fondues en une seule carte d'un choix d'utilisations. Les utilisations du sol choisies cadrent avec les objectifs régionaux de gestion (étape 1) et pourraient inclure des catégories comme les milieux humides, les forêts et les zones urbaines. La carte d'utilisations du sol est dressée dans un environnement SIG.

Étape 4 - Identifier l'ensemble des services hydrologiques et écosystémiques associés aux systèmes hydrologiques pour chacune des utilisations du sol : Identifier l'ensemble des services hydrologiques et écosystémiques associés aux systèmes hydrologiques pour chacune des utilisations du sol. Pour ce faire, on effectue une analyse documentaire des publications pertinentes. À partir de l'information obtenue, on pourrait dresser une carte illustrant la distribution spatiale des services fournis par les diverses utilisations du sol.

Étape 5a - Attribuer une valeur économique à chaque service hydrologique fourni par les différentes utilisations du sol : Des valeurs économiques sont attribuées à chaque service hydrologique fourni par chaque utilisation du sol. Cette étape exige une analyse documentaire des études qui établissent les valeurs économiques des activités ou fonctions écologiques que l'on peut associer à un service écosystémique en particulier. La valeur des services écosystémiques doit être calculée à partir des données de sites d'étude que l'on peut associer à un type de paysage particulier.

Étape 5b - Calculer la valeur, par unité de surface, de chaque combinaison service hydrologique – utilisation du sol : La valeur par unité de surface de chaque combinaison service hydrologique - utilisation du sol est calculée en divisant la valeur estimative d'un service hydrologique donné par la superficie occupée par le type d'utilisation du sol pertinent. Cette étape produit une valeur constante par unité de surface pour chaque combinaison service

hydrologique - utilisation du sol (c.-à-d. la valeur de protection contre les inondations par hectare de terres forestières).

Étape 5c - Calculer la valeur totale, par unité de surface, de chaque utilisation du sol : La valeur, par unité de surface, de chaque utilisation du sol est calculée en établissant la somme des valeurs, par unité de surface, de tous les services hydrologiques présents dans chaque type d'utilisation du sol (c.-à-d. la valeur de tous les services hydrologiques fournis par hectare de terres forestières).

Étape 5d - Calculer la valeur totale, par unité de surface, de chaque sous-région : La valeur par unité de surface des sous-régions (p. ex., écorégions ou bassins versants) est déterminée en calculant la moyenne pondérée de la valeur, par unité de surface, de chacune des utilisations du sol présentes dans cette sous-région (c.-à-d. la valeur des services hydrologiques combinés par hectare de terres d'une sous-région).

Étape 5e – Cartographier la valeur totale, par unité de surface, de chaque sous-région : Les valeurs par unité de surface des sous-régions sont cartographiées dans un environnement SIG.

Étape 6 – Interpréter les résultats : Les résultats sont interprétés en regard des objectifs régionaux de gestion.

Étape 7 – Prioriser les sites de surveillance : Les emplacements des sites de surveillance existants sont superposés aux résultats cartographiés pour identifier quelles sont les parties de la région couvertes ou non par des réseaux de surveillance de l'eau. Les zones où la surveillance a besoin d'amélioration sont également identifiées.

L'exemple de la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario

La Ceinture de verdure entoure une région du sud de l'Ontario connue sous le nom de « Golden Horseshoe ». Le Golden Horseshoe désigne les terres qui décrivent un arc autour de l'extrémité ouest du lac Ontario. Cette région, qui abrite environ le quart de la population humaine du pays, est la plus densément peuplée au Canada³. D'une superficie de 0,73 million d'hectares, la Ceinture de verdure s'étend sur environ 325 kilomètres et est composée d'espaces verts protégés, de terres agricoles, de collectivités, de forêts, de milieux humides et de bassins versants.

En 2008, la David Suzuki Foundation a analysé les services écosystémiques fournis dans la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario. Des chercheurs ont déterminé les types d'utilisations du sol présentes dans la région à l'étude à partir de données provinciales sur la couverture terrestre. Ils ont ensuite estimé la valeur par unité de surface d'un large éventail de services écosystémiques fournis par des sous-bassins versants de la Ceinture de verdure. Même si l'étude ne visait pas précisément à établir des priorités pour les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques, les auteurs mentionnent que les résultats peuvent aider à établir des priorités d'investissement⁴. L'étude souligne l'importance et l'utilité des services écosystémiques dans l'aménagement du territoire et les décisions d'orientation générale prises par les différents ordres de gouvernement.

Le tableau A1.2 dresse une liste des fonctions écosystémiques et des services écosystémiques correspondants analysés dans l'étude. Les services hydrologiques clés sont ombragés. La disponibilité d'eau est également importante pour d'autres fonctions, telle la production alimentaire.

Tableau A1.2 : Services écosystémiques dans la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario⁵

FONCTIONS	SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES
Régulation des gaz	Protection contre les rayons UVB par l'ozone, maintien de la qualité de l'air
Régulation du climat	Maintien d'un climat favorable, régulation du dioxyde de carbone, formation de nuages
Prévention des perturbations	Protection contre les tempêtes, lutte contre les inondations, rétablissement après une sécheresse
Régulation de l'eau	Drainage, irrigation naturelle, transport
Approvisionnement en eau	Stockage de l'eau dans les bassins versants, les réservoirs et les aquifères
Rétention du sol	Prévention de la perte de sol ou de dommages au sol par l'érosion/envasement, stockage de limon dans les lacs et les milieux humides, sauvegarde des terres arables
Genèse du sol	Sauvegarde de la productivité des terres arables, sauvegarde de sols productifs à l'état naturel
Cycle des éléments nutritifs	Sauvegarde de sols sains et d'écosystèmes productifs; fixation de l'azote
Traitement des matières résiduelles	Lutte contre la pollution/détoxification, filtration des particules de poussière, réduction de la pollution par le bruit
Pollinisation	Pollinisation des espèces végétales sauvages et des cultures
Lutte biologique	Lutte contre les ravageurs et les maladies, réduction des herbivores (dégâts aux cultures)
Habitat	Diversité biologique et génétique, pépinières, refuges, habitat pour les espèces migratoires
Production alimentaire	Production d'aliments (agriculture, parcours naturel), récolte d'espèces sauvages (p. ex., petits fruits, poisson, champignons)
Matières premières	Bois d'œuvre, combustibles, fourrage, engrais, ressources ornementales
Ressources génétiques	Amélioration de la résistance des cultures aux agents pathogènes

FONCTIONS	SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES
	et aux ravageurs, soins de santé
Ressources médicinales	Médicaments et produits pharmaceutiques, modèles et outils chimiques
Loisirs	Écotourisme, observation de la faune, pêche sportive, baignade, nautisme, etc.
Éducation, culture et spiritualité	Possibilités de développement cognitif : paysage, motivation culturelle, sensibilisation à l'environnement, valeur spirituelle, connaissances scientifiques, sites autochtones

Les chercheurs ont associé des services écosystémiques potentiels à chaque type de couverture terrestre. Ces services apparaissent dans le tableau A1.3. Les services hydrologiques clés sont ombragés. Les autres services peuvent également impliquer des systèmes hydrologiques.

Tableau A1.3 : Services écosystémiques par type d'utilisation du sol dans la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario⁶

Service écosystémique	Forêts	Prairies	Cours d'eau	Milieux humides	Terres cultivées	Parcs urbains
Eau douce	●		●	●		
Qualité de l'air	●					●
Lutte contre l'érosion	●	●		●		
Régulation du climat planétaire	●			●		
Régulation du climat local	●	●				●
Protection contre les tempêtes				●		
Lutte antiparasitaire	●	●			●	
Lutte contre la pollution	●		●		●	
Traitement des matières résiduelles				●		
Régulation des crues	●		●	●		
Rétention des sédiments	●	●	●	●		
Régulation des maladies			●			
Cycle des éléments nutritifs	●	●	●		●	
Produits médicinaux	●					
Loisirs/écotourisme	●	●	●	●		●

Service écosystémique	Forêts	Prairies	Cours d'eau	Milieux humides	Terres cultivées	Parcs urbains
Esthétique	●	●	●		●	
Spiritualité	●	●	●			
Culture/patrimoine	●	●	●	●	●	●
Éducation	●	●	●	●	●	●

Les chercheurs ont ensuite attribué une valeur monétaire à chaque service écosystémique. Cette tâche peut parfois s'avérer difficile compte tenu du manque relatif de données économiques, particulièrement dans le cas des valeurs non marchandes. Le tableau A1.4 énumère certaines des techniques mises au point par des économistes pour déterminer la valeur économique des services écosystémiques non marchands.

Tableau A1.4 : Techniques d'évaluation économique des services écosystémiques non marchands⁷

TECHNIQUES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES NON MARCHANDS
Coût évité (CE) : Les services écosystémiques permettent à la société d'éviter des coûts qu'elle aurait dû engager en l'absence de ces services. Par exemple, une île-barrière offre une protection contre les inondations qui réduit les dommages aux propriétés le long de la côte.
Coût de remplacement (CR) : Les services pourraient être remplacés par des systèmes de confection humaine. Par exemple, le cycle des éléments nutritifs assure un traitement des résidus qui pourrait être remplacé par des systèmes de traitement coûteux.
Revenu net des facteurs (RNF) : Les services entraînent une augmentation des revenus. Par exemple, l'amélioration de la qualité de l'eau augmente les prises des pêches commerciales et, par conséquent, les revenus de la pêche.
Coût de transport : Si un déplacement est nécessaire pour profiter d'une offre de services, le coût de ce déplacement peut représenter la valeur implicite de ce service. Par exemple, les lieux de loisirs attirent des visiteurs de régions éloignées qui doivent attribuer à ces lieux une valeur au moins égale à ce qu'ils sont prêts à payer pour s'y rendre.
Prix hédoniques (PH) : La valeur d'un service peut se refléter dans les prix que paient les gens pour des biens connexes. Cette méthode est souvent utilisée pour estimer la valeur des propriétés. Par exemple, le prix des maisons le long des côtes tend à dépasser celui des maisons de l'arrière-pays.

TECHNIQUES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES NON MARCHANDS

Évaluation contingente (EC) : On peut estimer la valeur d'un service en échafaudant des scénarios hypothétiques dans le cadre de sondages visant à évaluer différentes possibilités d'utilisations du sol. Cette méthode est souvent utilisée pour des services moins concrets comme l'habitat faunique ou la biodiversité. Par exemple, certaines personnes seraient prêtes à payer pour assurer une meilleure préservation des plages et des berges.

Après avoir calculé la valeur monétaire de chaque service écosystémique, les chercheurs ont additionné les valeurs par unité de surface de tous les services écosystémiques pour chaque type d'utilisation du sol recensé dans les sous-bassins versants de la Ceinture de verdure.

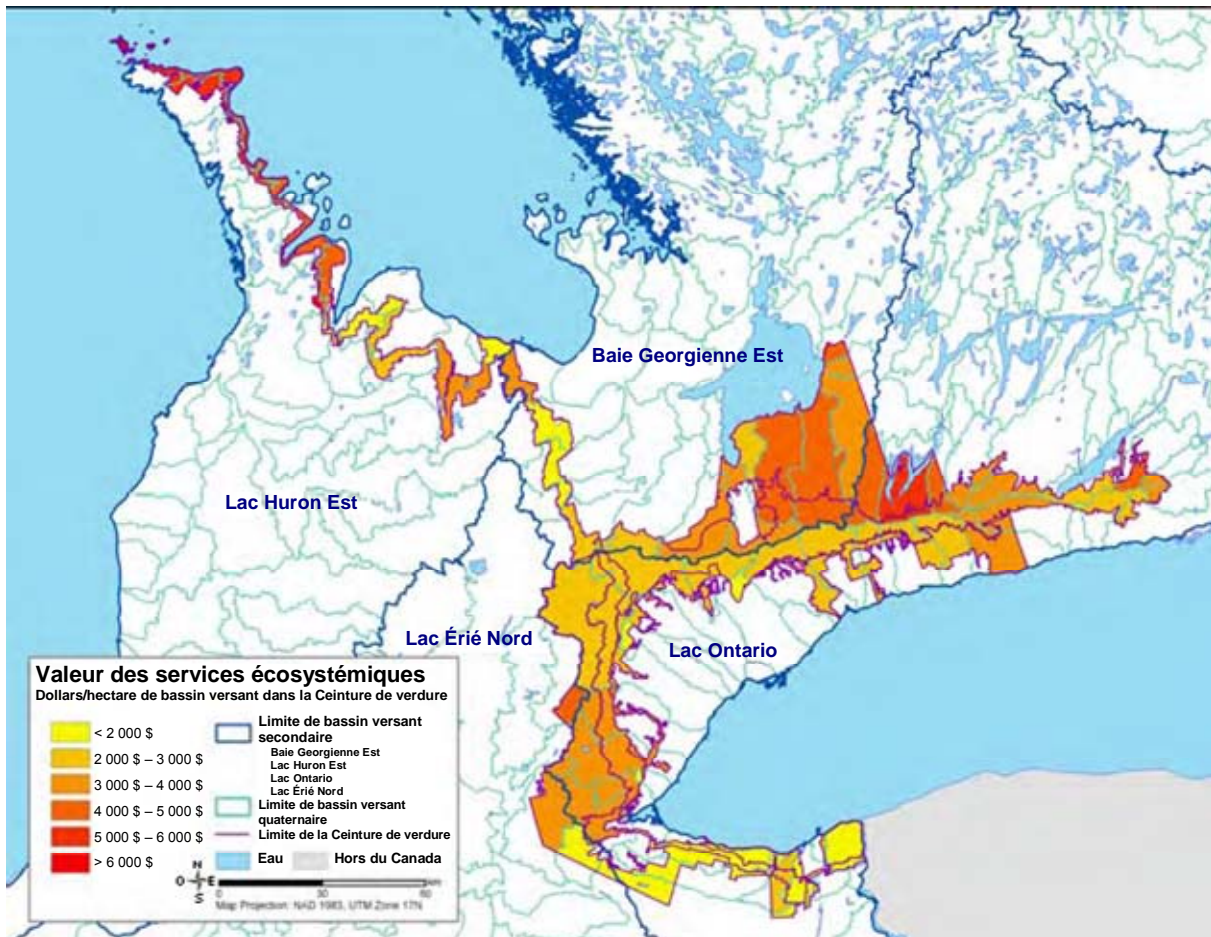
Le tableau A1.5 indique la valeur des différents types de couvertures terrestres recensés dans les sous-bassins versants de la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario.

Tableau A1.5 : Valeurs des services écosystémiques non marchands par type de couverture terrestre – sous-bassins versants de la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario⁸

TYPE DE COUVERTURE TERRESTRE	SUPERFICIE (hectare)	VALEUR PAR HECTARE (\$/hectare/an)	VALEUR TOTALE (\$million/an)
Milieux humides	94 014	14 153	1 331
Forêts	182 594	5 414	989
Prairies	441	1 618	0,71
Cours d'eau	7 821	335	2,60
Terres agricoles	384 378	477	183
Terres improductives	78 889	1 667	132
Haies	7 039	1 678	11,80
Vergers	5 202	494	2,60
Autres	42	0	0
TOTAL	760 420	3 487	2 652

La distribution de la valeur des services écosystémiques annuels par hectare et unité de bassin versant est illustrée dans la figure A1.2. La valeur des services écosystémiques annuels varie d'environ 2 000 \$/hectare à plus de 6 000 \$/hectare.

Figure A1.2 : Distribution de la valeur des services écosystémiques par hectare par unité de bassin versant



L'exemple du lac Simcoe

En 2008, la firme Natural Capital Research & Consulting a été la première à utiliser la méthode d'évaluation économique de base pour estimer la valeur d'un bassin versant du sud de l'Ontario. L'étude a analysé la valeur des biens et services écosystémiques fournis par le bassin versant du lac Simcoe, dont une section se trouve dans la Ceinture de verdure de la région du Grand Toronto. La portion analysée du bassin versant du lac Simcoe couvrait une superficie totale de 3 307 kilomètres carrés. Le tableau A1.6 indique les valeurs établies pour les différents types de couvertures terrestres recensés dans le bassin versant du lac Simcoe.

Tableau A1.6 : Valeurs des services écosystémiques non marchands par type de couverture terrestre – bassin versant du lac Simcoe⁹

TYPE DE COUVERTURE TERRESTRE	SUPERFICIE (hectare)	VALEUR PAR HECTARE (\$/hectare/an)	VALEUR TOTALE (million \$/an)
Forêts	66 379	4 798	319
Prairies	8 353	2 727	23
Milieux humides	38 974	11 172	435
Eau	72 141	1 428	103
Terres agricoles	96 202	529	51
Haies/forêts de culture	3 855	1 453	5,60
Pâturages	24 447	1 479	36
Parcs urbains	3 363	824	2,77
TOTAL	330 741	2 948	975

1.3 RESSOURCES REQUISES

La méthode d'évaluation économique de base exige les ressources suivantes :

Données et logiciels :

- Des cartes de la couverture terrestre qui offrent une bonne couverture spatiale des milieux humides, prairies, forêts, terres agricoles, sols dénudés, terres aménagées, etc. sont nécessaires. Les cartes doivent être assez précises pour permettre l'identification des services hydrologiques.
- De la documentation sur les types et la valeur des services hydrologiques recensés dans chaque type d'utilisation du sol est nécessaire.
- Équipement logiciel SIG.

Niveau d'effort et de savoir-faire :

- Compétences de base en SIG et en analyse pour l'évaluation des services écosystémiques.

1.4 APPLICABILITÉ, LIMITES ET SOLUTIONS

L'évaluation des services écosystémiques fournis par des utilisations particulières du sol est un concept relativement nouveau, qui n'a pas été largement éprouvé. La MEEB est toutefois applicable à une grande échelle (p. ex., échelle provinciale/territoriale), qui couvre plusieurs types d'utilisations représentatives du sol, et à une échelle légèrement plus petite (p. ex., grands bassins versants, bassins versants combinés ou écorégions).

La méthode comporte cependant certaines limites¹⁰. La MEEB peut conduire à une surestimation ou une sous-estimation des valeurs pour les raisons suivantes :

- les parcelles de terre qui sont classées dans le même type d'utilisation du sol ne sont pas toutes de la même valeur (p. ex., les forêts caducifoliées et les forêts de conifères n'ont pas la même valeur, mais sont classées dans les « terres forestières »);
- la taille d'une parcelle de terre classée dans une utilisation spécifique du sol peut influencer sa capacité à fournir des services écosystémiques (p. ex., un milieu humide de petite taille risque d'offrir des services de traitement et de stockage de l'eau moins efficaces qu'un grand);
- l'état d'une parcelle de terre classée dans une utilisation spécifique du sol peut influencer sa capacité à fournir des services écosystémiques (p. ex., une forêt qui a subi des coupes à blanc offrira des services de contrôle de l'érosion moins efficaces qu'une forêt d'arbres matures);
- la proximité des zones urbaines peut influencer la capacité d'une parcelle de terre classée dans une utilisation spécifique du sol à fournir des services écosystémiques (p. ex., les services d'écotourisme fournis par une forêt située près d'un centre urbain risquent d'avoir moins de valeur que ceux d'une forêt protégée).

Ces points faibles n'affectent pas sérieusement l'établissement des priorités pour les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation des changements climatiques, car l'important dans ce cas-là, ce sont les différences relatives et non les valeurs absolues. En outre, quand la MEEB est appliquée à une échelle régionale, le profil spatial des différences relatives observées dans la distribution des services écosystémiques est tel qu'il peut réduire au minimum les inconvénients du transfert de bénéfices moyens.

1.5 EN RÉSUMÉ

La MEEB est une méthode relativement simple qui prend en considération la valeur des services écosystémiques fournis par différents types d'utilisations du sol. Dans le présent document, une attention spéciale est accordée aux services écosystémiques liés aux systèmes hydrologiques, parce que ces services sont sensibles aux changements climatiques. Pour estimer la valeur des services hydrologiques, on détermine la valeur des services moyens (types, quantités) fournis par certaines utilisations du sol, puis on applique la valeur de ces services à tous les types d'utilisations similaires. La valeur des services hydrologiques peut se mesurer en fonction de la distribution spatiale et de la valeur économique des services (\$ par hectare ou possiblement \$ par hectare par unité de temps).

La MEEB fait appel à des cartes de la couverture terrestre généralement faciles d'accès, qui permettent notamment de distinguer les milieux humides, les forêts, les prairies, les terres agricoles, les sols dénudés et les terres aménagées. Cette méthode nécessite un équipement logiciel de base et un équipement logiciel SIG, de même que des compétences de base en analyse et SIG. Il faut également posséder des documents qui font état des types et de la valeur des

services hydrologiques associés aux différents types d'utilisations du sol. La MEEB peut s'appliquer à l'échelle provinciale/territoriale, à de grands bassins versants ou à des écorégions.

Les cartes peuvent illustrer la valeur combinée des différents services hydrologiques fournis et leur distribution spatiale. Connaître l'emplacement des zones qui fournissent un niveau élevé de services hydrologiques peut aider à établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Le tableau A1.7 résume les besoins en matière de données (type, quantité, complexité), de savoir-faire, d'effort initial et de logiciels pour la MEEB.

Tableau A1.7 : Sommaire des caractéristiques de la méthode d'évaluation économique de base

CARACTÉRISQUE	BESOINS
Types de critères / paramètres	Valeurs des services écosystémiques basées sur la distribution des différentes utilisations du sol, déterminées en fonction des types moyens et des valeurs relatives des services hydrologiques fournis par certaines catégories d'utilisations du sol.
Données requises	Couverture spatiale des données d'utilisations du sol (milieux humides, forêts, prairies, terres agricoles, sols dénudés, terres aménagées, etc.) assez détaillée pour permettre de différencier les types d'utilisations en fonction des types de services hydrologiques généralement fournis. Des documents de référence qui précisent les types de services hydrologiques associés aux différents types d'utilisations du sol et leur valeur.
Logiciels	Logiciels de base de données, SIG et de calcul de base.
Savoir-faire	Savoir-faire en gestion des données et compétences de base en analyse et en SIG. Compréhension de la technique du transfert des bénéfices.
Échelle	L'évaluation des services écosystémiques est un concept relativement nouveau, qui n'a pas été largement éprouvé. Il semble toutefois que la MEEB s'applique mieux sur une grande échelle, qui couvre plusieurs types d'utilisations représentatives du sol. Elle s'applique à l'échelle provinciale/territoriale et possiblement à une échelle légèrement plus petite (p. ex., grands ou multiples bassins versants et écorégions)

NOTES EN FIN DE CHAPITRE

- ¹ Il peut également s'agir de services écosystémiques spécifiquement hydrologiques. Par exemple, la « production alimentaire » qui dépend d'un approvisionnement en eau par irrigation peut être une priorité de gestion. Ainsi donc, les services d'approvisionnement en eau et de production alimentaire peuvent tous deux servir à l'évaluation. Cela dépendra des objectifs de gestion de l'autorité compétente.
- ² R. Costanza et J. Farley. 2007. « Ecological economics of coastal disasters: Introduction to the special issue », *Ecological Economics*, 63:249-253.
- ³ S.J. Wilson (Natural Capital Research and Consulting). *Ontario's Wealth, Canada's Future: Appreciating the Value of the Greenbelt's Eco-Services*, septembre 2008, 61 p.
- ⁴ Ibid.
- ⁵ D'après S.J. Wilson (Natural Capital Research and Consulting), *Ontario's Wealth, Canada's Future: Appreciating the Value of the Greenbelt's Eco-Services*, septembre 2008, 61 p. et R.S. de Groot, 2002, « A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services », *Ecological Economics*, 41: 393-408.
- ⁶ S.J. Wilson (Natural Capital Research and Consulting). *Ontario's Wealth, Canada's Future: Appreciating the Value of the Greenbelt's Eco-Services*, septembre 2008, 61 p.
- ⁷ Ibid.
- ⁸ Ibid.
- ⁹ D'après S.J. Wilson (Natural Capital Research and Consulting), *Lake Simcoe Basin's Natural Capital: The Value of the Watershed's Ecosystem Services*, coll. « Friends of the Greenbelt Foundation Occasional Paper Serie », juin 2008, 45 p.
- ¹⁰ Les limites sont analysées dans les publications suivantes :
E.W. Koch, E.B. Barbier, B.R. Silliman, D.J. Reed, G.M.E. Perillo, S.D. Hacker, E.F. Granek, J.H. Primavera, N. Muthiga, S. Polasky, B.S. Halpern, C.J. Kennedy, C.V. Kappel, et E. Wolanski. 2009. « Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection », *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1):2937.
et
M.L. Plummer. 2009. « Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection », *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1):38-45.

A.2. ANALYSE OMBROTHERMIQUE

La présente section explique en détail comment utiliser l'analyse ombrothermique pour établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. L'analyse ombrothermique fait appel à deux indicateurs – les précipitations (*ombro* = *pluie*) et la température (*thermique*) – pour évaluer l'étendue spatiale de la vulnérabilité d'une région aux changements climatiques. L'analyse ombrothermique utilise des indices d'humidité/aridité et des graphiques pour intégrer des données de température et de précipitations sur une période de temps donné. À l'aide de données de température et de précipitations facilement accessibles, cette méthode permet de produire un indice qui peut identifier des zones vulnérables possiblement sujettes à l'humidité (quantité excessive de pluie) ou à l'aridité (sécheresse). Elle peut également utiliser des données de températures et de précipitations issues de modèles climatiques pour calculer un indice ombrothermique projeté. Les écarts entre les indices présents et projetés peuvent aider à identifier des zones potentiellement vulnérables. Connaître l'existence et l'emplacement de zones vulnérables dans une région donnée peut aider les gestionnaires à établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques.

Il y a deux façons de réaliser une analyse ombrothermique :

- la création de diagrammes ombrothermiques pour des emplacements particuliers;
- la création de cartes de vulnérabilité en fonction de l'indice ombrothermique, qui mesure les périodes critiques d'humidité (quantité excessive de pluie) et d'aridité (sécheresse).

2.1 RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

Au terme de son examen des différentes méthodes d'établissement des priorités, le CCME a conclu que l'analyse ombrothermique était une bonne méthode parce qu'elle pouvait facilement intégrer les deux principaux facteurs climatiques, qui sont les extrants les plus fiables des modèles de changements climatiques : la température et les précipitations. Cette particularité permet de comparer facilement les conditions climatiques présentes et projetées. Pour être d'une utilité optimale dans le contexte canadien, la méthode a cependant besoin de modifications. Le pourquoi de ces modifications est expliqué ci-après.

Le concept d'analyse ombrothermique a été développé en 1953 par deux célèbres botanistes, Bagnouls et Gaussen, qui ont été les premiers à utiliser des diagrammes ombrothermiques et l'indice ombrothermique. La méthode avait été conçue pour la région méditerranéenne.

L'**indice ombrothermique** ou indice d'humidité/aridité de Bagnouls-Gaussen (IBG) est calculé à partir de donnée de température et de précipitations. Cet indice représente la somme, pour les 12 mois de l'année, de la différence entre la température mensuelle moyenne de l'air (en °C) multipliée par 2 et le total des précipitations mensuelles moyennes (en mm), le tout multiplié par la proportion des mois de l'année pendant lesquels le double de la valeur de la température

(en °C) est supérieur à la valeur des précipitations (en mm). L'équation de l'indice est la suivante :

Équation 2.1 : Indice ombrothermique annuel

$$I_{\text{annuel}} = \sum_{i=1}^{12} (2T_i - P_i) \times k$$

Où

I_{annuel} est l'indice ombrothermique annuel d'humidité/aridité

T_i est la température mensuelle moyenne du mois i (en °C)

P_i est le total des précipitations moyennes du mois i (en mm)

k est la proportion de mois où $2T_i$ est supérieur à P_i

i est le mois 1, 2, ..., 12

La fonction première de l'indice est de donner un instantané du stress hydrologique que subissent la croissance des végétaux et la biomasse. Selon Bagnouls et Gaussen, les régions sèches affichent des valeurs mensuelles de $2T_i$ supérieures à P_i . Normalement, cette situation ne se produit qu'à de rares endroits au Canada, plus particulièrement dans le climat sec du plateau intérieur de la Colombie-Britannique (Kamloops, Kelowna, Penticton), dans le sud de l'Alberta (Medicine Hat) et possiblement dans le sud de la Saskatchewan. Partout ailleurs au Canada, les valeurs mensuelles de $2T_i$ sont censées être inférieures à P_i . Ceci montre que la quantité d'eau est plus abondante dans la plupart des régions canadiennes que dans la région méditerranéenne pour laquelle l'indice a été conçu à l'origine.

Pour rendre cette méthode applicable aux conditions canadiennes, il est possible de la modifier en se basant sur une analyse du bilan hydrique. Le bilan hydrique est l'un des concepts fondamentaux de l'hydrologie. Il désigne la quantité d'eau qui entre et qui sort d'un écosystème et est fonction des précipitations, du ruissellement, de l'évapotranspiration et du stockage. Le principal apport d'eau vient des précipitations et, dans un milieu naturel, la principale perte vient de l'évapotranspiration¹. L'analyse du bilan hydrique peut servir à prédire où il y aura pénuries d'eau et aider à gérer l'approvisionnement en eau. Il sert également à des applications agricoles (comme l'irrigation), l'évaluation du ruissellement et diverses analyses de l'écosystème. On peut estimer le bilan hydrique d'une région en comparant les précipitations moyennes mensuelles au potentiel mensuel moyen d'évaporation et de stockage.

Le facteur $2T_i$ utilisé dans le calcul de l'indice ombrothermique peut être vu comme une estimation de l'évapotranspiration, qui est l'un des principaux éléments du bilan hydrique. Le facteur 2 utilisé pour multiplier la température s'applique aux conditions méditerranéennes et doit être adapté aux conditions canadiennes. Pour obtenir un facteur adapté aux conditions canadiennes, on a déterminé l'évapotranspiration potentielle pour trois endroits au Canada, à

¹ C'est le cas pour la majeure partie du pays, où l'évapotranspiration est responsable de la perte de 50 à 60 % de l'apport total des précipitations. Le ruissellement, les débits entrants et sortants ainsi que les réserves d'eau des lacs sont également d'importants éléments du bilan hydrique.

savoir Penticton (Colombie-Britannique), Barrie (Ontario) et St. John's (Terre-Neuve-et-Labrador).

L'évapotranspiration potentielle a été calculée pour chacun de ces endroits à l'aide d'un modèle simple de bilan hydrique mis au point par le United States Geological Survey (le programme est disponible à http://www.brr.cr.usgs.gov/projects/SW_MoWS/software/thorn_s/thorn.shtml). Pour déterminer l'évapotranspiration potentielle, les données d'entrée du modèle de bilan hydrique sont la température et les précipitations moyennes mensuelles pour la période allant de 1971 à 2000 ainsi que la latitude de la station météorologique (disponibles à http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals/index_f.html).

Les **diagrammes ombrothermiques** sont des graphiques climatiques simples, qui illustrent la variation mensuelle de la température moyenne multipliée par un facteur et les précipitations sur une période d'un an. Les figures A2.1, A2.2 et A2.3 donnent des exemples de diagrammes ombrothermiques en plus d'indiquer l'évapotranspiration potentielle calculée pour les trois endroits susmentionnés au Canada à partir des données de 1971 à 2000.

Figure A2.1 : Diagramme ombrothermique pour Penticton (Colombie-Britannique)

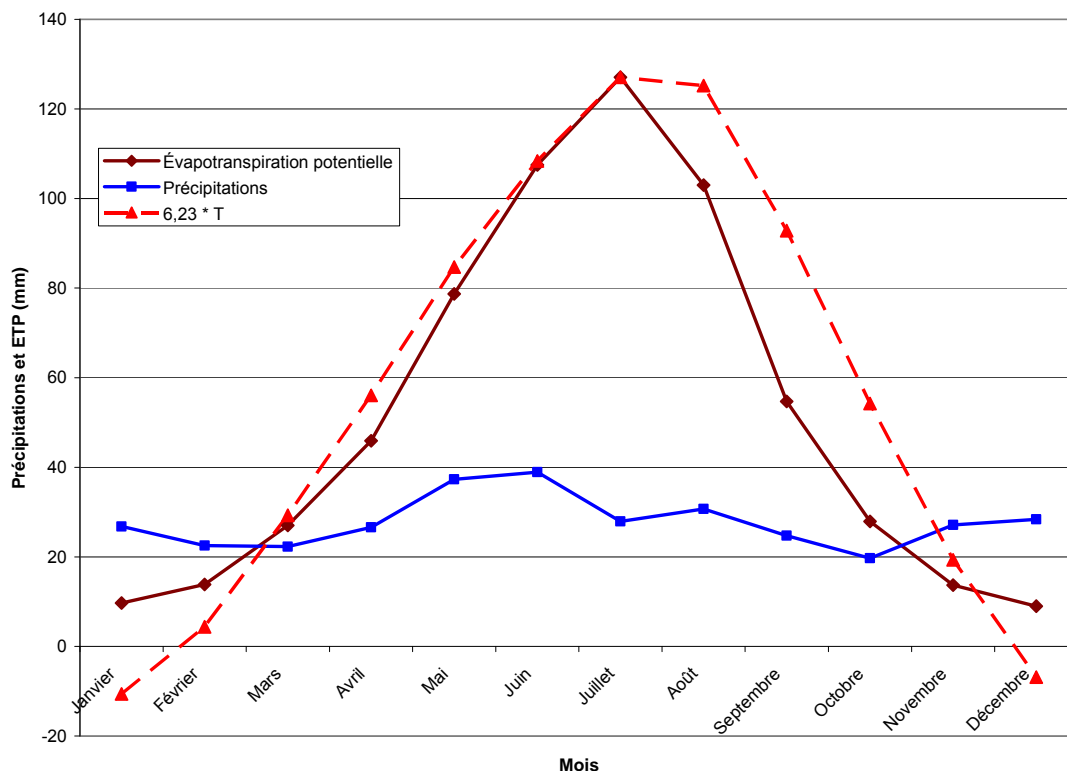


Figure A2.2 : Diagramme ombrothermique pour Barrie (Ontario)

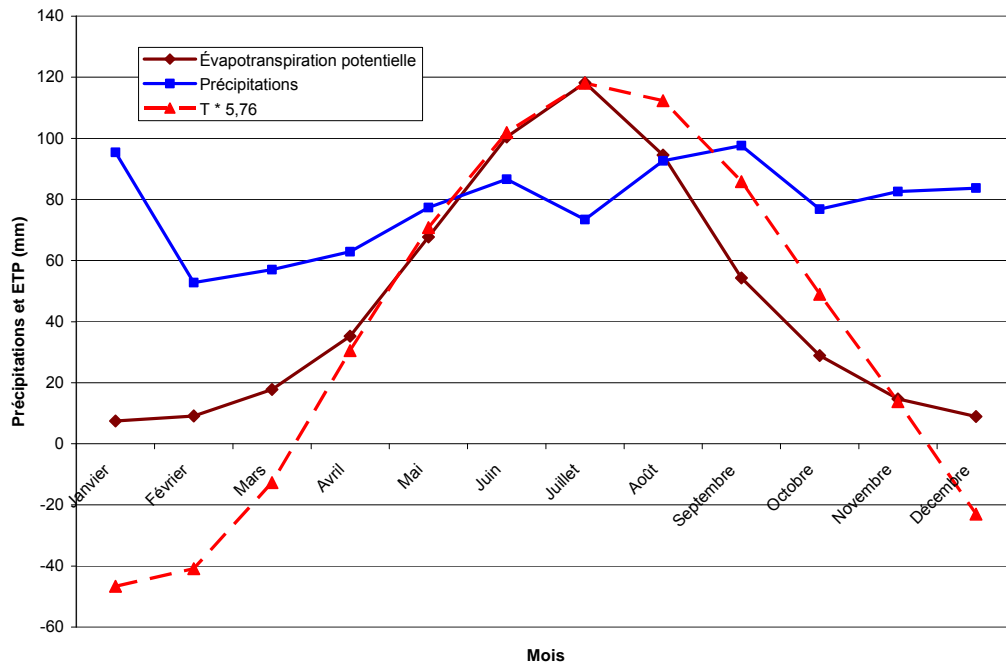
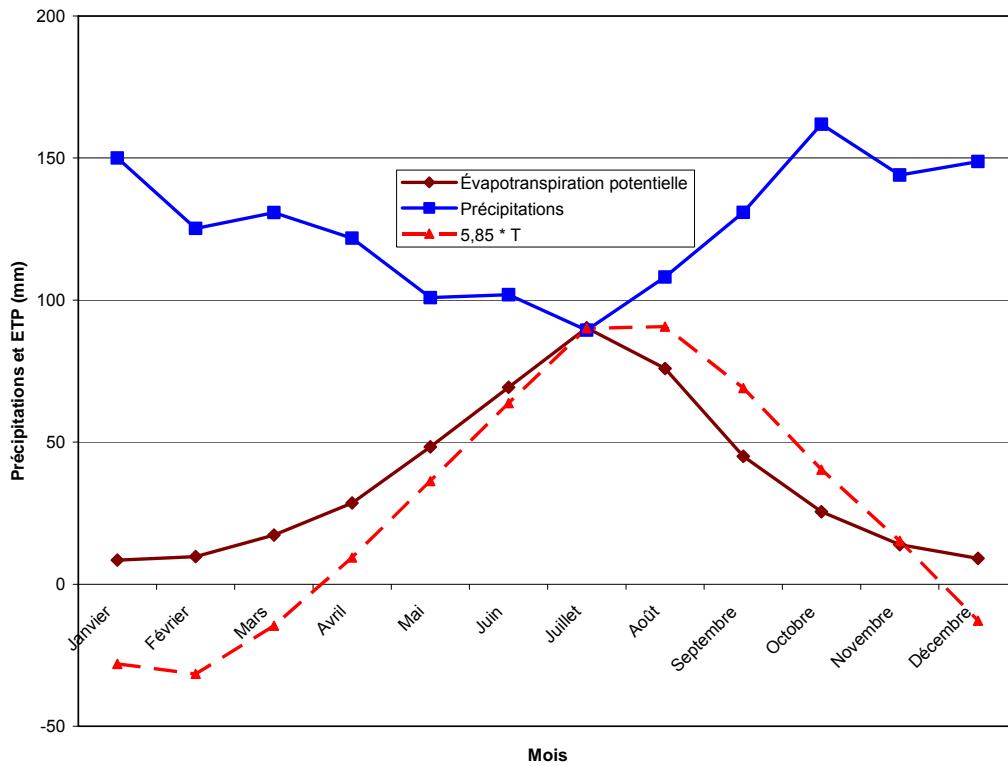


Figure A2.3 : Diagramme ombrothermique pour St. John's (Terre-Neuve-et-Labrador)



Pour estimer l'évapotranspiration potentielle à partir de la température pour les endroits susmentionnés au Canada, un facteur de multiplication de 5,76 à 6,23 a été utilisé. Même avec ce facteur augmenté, il est possible que l'indice ombrothermique annuel calculé avec l'équation 2.1 modifiée ne convienne pas à tous les endroits au Canada. Dans certaines régions, comme Terre-Neuve-et-Labrador et les régions nordiques, l'évapotranspiration potentielle pourrait être inférieure aux précipitations durant l'année. Dans ce cas, la valeur de k dans l'équation 2.1 serait de 0 et invaliderait le calcul.

Pour ces régions, l'indice ombrothermique peut être calculé sur une base mensuelle avec une équation qui exclut le facteur k, comme suit :

Équation 2.2 : Indice ombrothermique mensuel

$$I_i = \sum_{i=1}^{12} 2T_i - P_i$$

Où

I_i est l'indice ombrothermique d'humidité/aridité calculé sur une base mensuelle

T_i est la température moyenne de l'air du mois i (°C)

P_i est les précipitations totales du mois i (mm)

i est le mois (1, 2,... ou 12)

Tableau A2.1 Indices ombrothermiques pour trois endroits au Canada

Endroit	Facteur (multiplié par la température mensuelle)	k (nombre de mois où le facteur * la temp. est supérieur aux précipitations)	Indice ombrothermique annuel (I_{annuel})	Indice ombrothermique mensuel (I_i)
Penticton (C.-B.)	6,23	8	3 253	644
Barrie (Ont.)	5,76	3	-522	-174
St. John's (T.-N.-L.)	5,85	1	-1 186	-1 186

Selon les résultats des études, un indice positif ($I_i > 0$) indique une situation de sécheresse, comme le montrent les indices calculés pour Penticton. De même, des conditions excessivement pluvieuses sont associées à de faibles valeurs de l'indice mensuel ($I_i < -400$). L'indice ombrothermique mensuel permet d'obtenir une fourchette de valeurs qui peut aider à identifier des zones susceptibles d'être plus vulnérables aux changements climatiques. Les valeurs supérieures de l'indice indiquent des conditions plus sèches (Penticton), tandis que les valeurs inférieures indiquent des conditions plus humides (St. John's).

2.2 LA CARTOGRAPHIE OMBROTHERMIQUE EN DETAIL

La figure A2.4 résume les étapes de la méthode de cartographie ombrothermique. Des étapes supplémentaires pourraient être nécessaires dépendamment des objectifs de gestion établis à l'étape n° 1.

Figure A2.4 : Procédure de la méthode de cartographie ombrothermique

ÉTAPES	
Étape 1	Établir des objectifs régionaux de gestion
	▼
Étape 2	Examiner les données de température et de précipitations
	▼
Étape 3	(Si possible) Interpoler des données de température et de précipitations
	▼
Étape 4	(Facultative) Obtenir des projections de changements climatiques
	▼
Étape 5	Produire des diagrammes ombrothermiques
	▼
Étape 6	Calculer l'indice ombrothermique
	▼
Étape 7	Cartographier l'indice ombrothermique dans l'espace
	▼
Étape 8	Interpréter les résultats
	▼
Étape 9	Prioriser les sites de surveillance

Étape 1 - Établir des objectifs régionaux de gestion : Les autorités compétentes établissent des objectifs régionaux de gestion qui cadrent avec les plans, les énoncés de politique et les conditions du milieu actuels. C'est une étape clé dans l'établissement de priorités de surveillance de l'eau qui aideront à lutter contre les changements climatiques. En général, les enjeux environnementaux, techniques, de gestion et socioéconomiques sont pris en compte dans l'établissement des objectifs régionaux de gestion.

Étape 2 - Examiner les données de température et de précipitations : L'examen des données de température et de précipitations disponibles est une étape essentielle. Parmi les données disponibles utilisables, mentionnons les normales climatiques canadiennes de 1971 à 2000 et les valeurs des températures et des précipitations moyennes mensuelles. Les données de 1 480 stations météorologiques réparties dans l'ensemble du Canada sont facilement accessibles auprès d'Environnement Canada (http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals/index_f.html). Les données de température et de précipitations peuvent être compilées dans une base de données, des tableurs ou une plateforme SIG.

Étape 3 (si possible) - Interpoler des données de température et de précipitations : Si la zone d'étude est étendue et compte plusieurs stations climatiques, l'interpolation spatiale de données de température et de précipitations peut se faire dans un environnement SIG. Pour rendre l'interpolation possible, les stations doivent être situées dans la zone d'étude et les données doivent être représentatives des normales de température et de précipitations de la zone d'étude.

Étape 4 (facultative) - Obtenir des projections de changements climatiques : Si disponibles, des projections des régimes régionaux de température et de précipitations aideront à déterminer les impacts probables des changements climatiques.

Étape 5 - Produire des diagrammes ombrothermiques : Les diagrammes ombrothermiques servent notamment à identifier des zones possiblement vulnérables aux changements climatiques. À des fins de comparaison, il faut garder les échelles constantes d'un graphique à l'autre. Dans les climats froids et les climats froids tempérés, Bagnoulds et Gaussen (1957) recommandent d'ajuster le diagramme ombrothermique pour tenir compte des précipitations de neige qui s'accumulent sur le sol pendant la saison froide. Au printemps, la fonte des neiges provoque une humidité abondante qui contribue à la croissance des plantes d'une façon semblable à la pluie.

Étape 6 - Calculer l'indice ombrothermique : L'indice ombrothermique est calculé dans une base de données, un tableur ou un environnement SIG. Dans les régions où l'évapotranspiration potentielle est inférieure aux précipitations, l'indice doit être calculé sur une base mensuelle à l'aide de l'équation 2.2. Là où l'évapotranspiration potentielle est supérieure aux précipitations, l'indice peut être calculé sur une base annuelle à l'aide de l'équation 2.1.

Étape 7 - Cartographier l'indice ombrothermique dans l'espace : À cette étape, les résultats de l'indice ombrothermique sont cartographiés. Le choix des mois ou des saisons à cartographier dans un environnement SIG doit cadrer avec les objectifs régionaux de gestion établis à l'étape 1. Une interpolation spatiale de l'indice ombrothermique est possible entre les stations. L'étape 7

peut s'appliquer aussi bien aux conditions réelles que futures. L'établissement de cartes distinctes pour les moyennes de température et de précipitations peut également aider à établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau.

Étape 8 - Interpréter les résultats : Les résultats sont interprétés en regard des objectifs régionaux de gestion. Les indices ombrothermiques cartographiés identifieront les régions les plus vulnérables aux changements climatiques (c.-à-d. les régions qui connaîtront des conditions de sécheresse ou de pluies excessives). À cette étape, l'évolution des valeurs d'indices ombrothermiques dans le temps est basée sur les conditions climatiques projetées.

Étape 9 - Prioriser les sites de surveillance : Les emplacements des sites de surveillance existants sont superposés aux indices ombrothermiques cartographiés pour identifier les régions qui sont ou ne sont pas couvertes par des réseaux de surveillance de l'eau.

L'exemple de la Suisse

En Suisse, des chercheurs ont cartographié des valeurs d'indices ombrothermiques (étape 7) pour évaluer la vulnérabilité du milieu naturel aux changements climatiques dans les conditions présentes et futures¹. Priceputu et Greppin (2005) ont cartographié les valeurs d'indices ombrothermiques mensuels et saisonniers de 2000. Ils ont également cartographié les valeurs d'indices ombrothermiques mensuels projetées pour 2100 en utilisant des modèles d'évolution du rapport température/précipitations dans un effort pour prédire les impacts des changements climatiques dans l'espace.

Les figures A2.5 et A2.6 montrent les indices ombrothermiques calculés pour les conditions du mois de mai de l'année courante (selon les données de la période 1951-2000) et les conditions projetées pour 2100 en Suisse. Dans les figures, les plus faibles valeurs d'indices ombrothermiques sont < -300 (zones bleu foncé), tandis que les valeurs d'indices les plus élevées sont > 0 (zones en rouge). Les zones en bleu représentent des régions qui connaissent actuellement des conditions de pluies excessives, tandis que les zones en rouge subissent des sécheresses. La ligne noire est la frontière suisse. Après comparaison des figures A2.5 et A2.6, il appert que les auteurs de l'étude prévoient une importante évolution des conditions climatiques dans l'avenir.

La littérature contient de nombreux exemples de l'application de l'analyse ombrothermique dans des études climatiques. (À l'annexe C, dans la section *Sources d'information* et la sous-section *Méthodes d'évaluation*, voir sous *Analyse ombrothermique*).

Figure A2.5 : Indices ombrothermiques pour le mois de mai de l'année courante en Suisse²

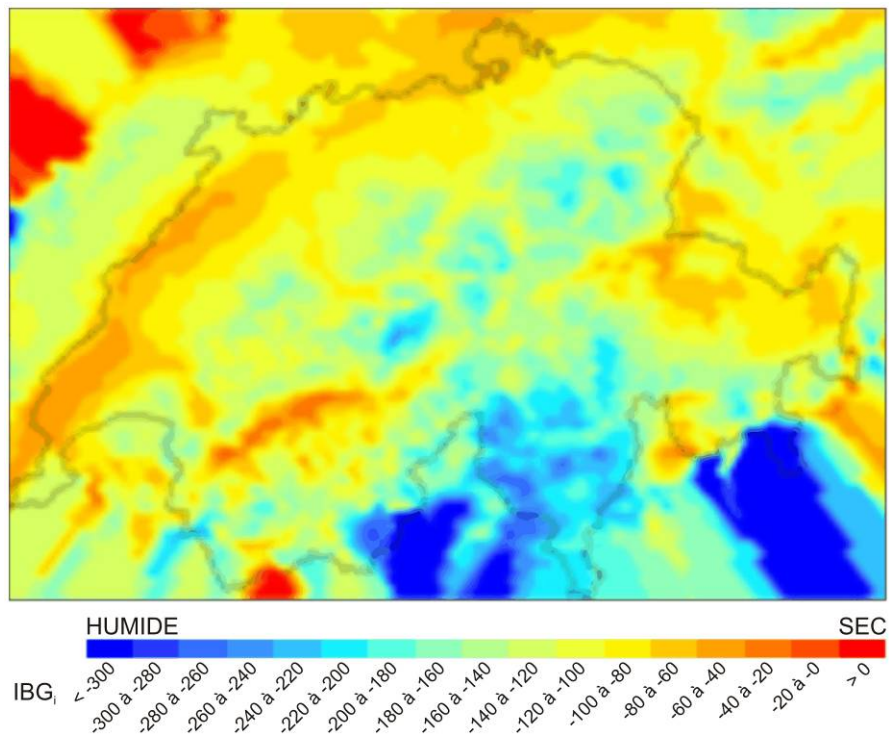
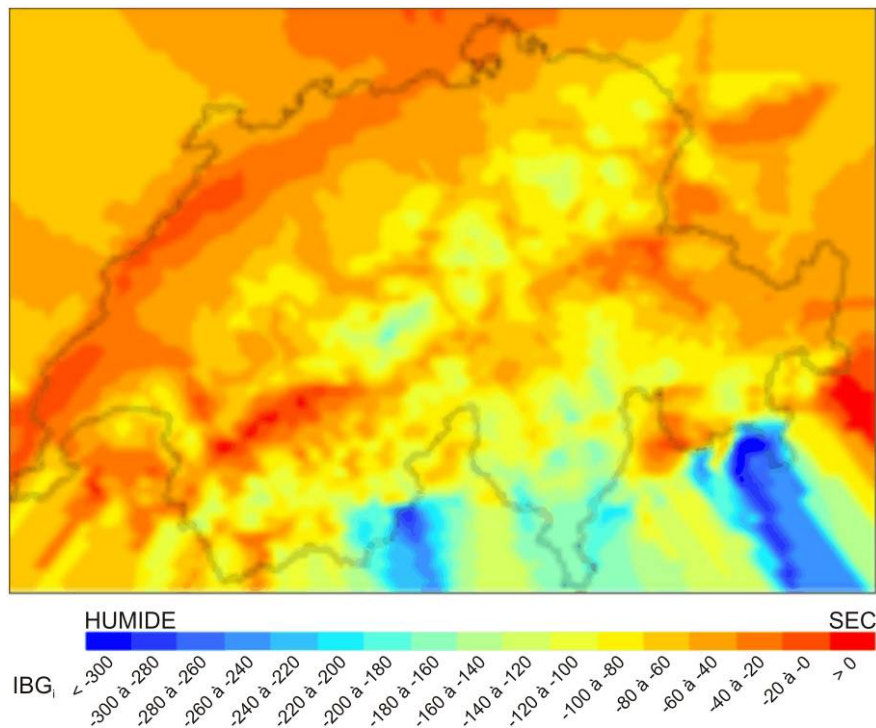


Figure A2.6 : Indices ombrothermiques projetés pour mai 2100 en Suisse³



2.3 RESSOURCES REQUISES

Pour effectuer une analyse ombrothermique, les ressources suivantes sont nécessaires :

Données et logiciels :

- Au moins 30 ans de données climatologiques antérieures sur la température et les précipitations. Il s'agit de la période de mesure standard pour déterminer les normales climatiques; les périodes de mesure de cette durée sont en général facilement accessibles⁴.
- Des logiciels de statistique, de calcul et de création graphique pour créer des graphiques ombrothermiques.
- Interpolation de données issues de stations climatologiques/météorologiques irrégulièrement réparties sur une grille régionale régulière aux fins de l'analyse spatiale⁵.
- (Facultatif) – Des projections des changements climatiques au niveau des températures et des précipitations futures dans chaque région, obtenues à partir des résultats de modèles climatiques planétaires à l'échelle réduite par des moyens statistiques ou calculées à partir de modèles climatiques régionaux, si disponibles. Priceputu et Greppin (2005) ont utilisé les résultats de deux scénarios pour déterminer les intervalles de changements projetés.
- Un logiciel SIG (p. ex., ArcGIS) pour cartographier les régions et les valeurs de l'indice ombrothermique d'humidité/aridité.

Niveau d'effort et de savoir-faire :

- Pour les autorités compétentes qui disposent de données de température et de précipitations distribuées dans l'espace ainsi que de projections régionales de changements climatiques (facultatives), l'analyse ombrothermique exigera une certaine familiarité avec les données de température et de précipitations et des compétences en analyse et en SIG.
- Les autorités qui devront calculer les données de température et de précipitations distribuées dans l'espace auront besoin d'une personne possédant une expérience en modélisation. Le niveau d'effort requis risque d'être relativement élevé.

2.4 APPLICABILITÉ, LIMITES ET SOLUTIONS

L'analyse ombrothermique est une bonne façon de faciliter l'établissement des priorités régionales pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques au Canada pour les raisons suivantes :

- La température et les précipitations sont des variables climatiques primordiales, et les projections de changements climatiques sont basées sur des modèles de circulation générale (MCG) et sur des modèles réduits à l'échelle régionale. La température et les précipitations

influencent les régimes et sont des facteurs de changement dans les régimes hydrologiques, influençant le ruissellement, les régimes saisonniers et spatiaux de débit et les événements épisodiques.

- L'analyse ombrothermique présente une analyse comparative des régimes moyens de température et de précipitations dans le temps et l'espace qui permet raisonnablement de prédire des conditions d'excès ou de pénurie d'eau. Par conséquent, cette méthode s'applique aux régions susceptibles d'être sensibles aux variations de température et de précipitations causées par les changements climatiques.
- La cartographie ombrothermique est flexible, mais s'applique mieux à l'échelle régionale ou provinciale/territoriale. Les limites d'échelle dépendent parfois du terrain – de grandes différences dans les régimes de température et de précipitations risquent en effet d'être plus visibles sur de courtes distances dans des régions à haut relief.

Conçu au départ pour les climats méditerranéens secs, l'indice ombrothermique annuel doit être modifié pour convenir aux conditions relativement riches en eau de la plupart des régions canadiennes, à l'exception peut-être de quelques régions au climat continental sec. En supposant que les endroits les plus vulnérables aux impacts des changements climatiques liés à l'eau sont ceux qui connaissent le plus de périodes de sécheresse ou de pluies excessives, les valeurs d'indices ombrothermiques minimales et maximales peuvent être cartographiées et servir d'indicateurs pour détecter les impacts des changements climatiques. Les valeurs d'indices ombrothermiques peuvent être cartographiées par mois ou par saisons selon les objectifs visés.

Dans l'avenir, on pourrait mettre au point d'autres indices température-précipitations ou du bilan hydrique pour mieux représenter les climats du Canada et les vulnérabilités aux changements climatiques qui leur sont associées.

2.5 EN RESUME

Les précipitations et l'évaporation sont les principaux éléments du bilan hydrique d'un écosystème. Le bilan hydrique est l'une des principales conditions du milieu qui influencent la vulnérabilité d'une région donnée aux changements climatiques. L'analyse ombrothermique est une méthode relativement simple. Elle fait appel à des données de température et de précipitations généralement faciles d'accès pour produire des diagrammes et un indice d'humidité/aridité qui peuvent servir à évaluer l'exposition et la sensibilité d'une région aux changements climatiques en fonction des précipitations et de la température – des facteurs qui influencent le potentiel d'évaporation. L'identification des régions vulnérables aux changements climatiques peut aider à établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques.

Le tableau A2.2 résume les besoins en matière de données (type, quantité, complexité), de savoir-faire, d'effort initial et de logiciels pour l'analyse ombrothermique.

Tableau A2.2 : Sommaire des caractéristiques de la méthode d'analyse ombrothermique

CARACTÉRISQUE	BESOINS
Types de critères / paramètres	Une analyse de diagrammes et de valeurs d'indices ombrothermiques, qui donne une mesure intégrée de la température et des précipitations dans le temps et, par conséquent, une indication de la sensibilité aux changements climatiques.
Données requises	Des données climatologiques antérieures relatives à la température et aux précipitations, interpolées sur une grille régionale régulière aux fins de l'analyse spatiale; des projections de changements climatiques pour les températures et les précipitations futures.
Logiciels	Un logiciel SIG pour cartographier les régions et les résultats de l'indice ombrothermique d'humidité/aridité; un logiciel de gestion de base de données pour la manipulation des données de température et de précipitations; un logiciel de statistique, de calcul ou de création graphique pour la création des graphiques ombrothermiques.
Savoir-faire	Compétences en analyse et SIG; Si les données distribuées dans l'espace doivent être calculées, on aura besoin d'une personne possédant une expérience en modélisation.
Échelle	Méthode flexible sur le plan spatial, mais qui s'applique mieux à grande échelle – échelle régionale ou provinciale/territoriale, selon les conditions du terrain.

NOTES EN FIN DE CHAPITRE

- ¹ A. M. Priceputu et H. Greppin. 2005. « Modelling Climate Change Impacts and Vulnerability in Switzerland », chapitre 14, dans A. Haurie et L. Viguier, *Coupling of Climate and Economic Dynamics: Essays on Integrated Assessment*, p. 355-381.
- ² Image fournie gracieusement par le professeur H. Greppin, Département de botanique et de biologie végétale, Université de Genève, Suisse.
- ³ Ibid.
- ⁴ Les normales climatiques canadiennes de 1971 à 2000, y compris les valeurs des températures et précipitations moyennes mensuelles, sont facilement accessibles auprès d'Environnement Canada pour 1 480 stations météorologiques réparties dans l'ensemble du Canada - http://www.climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals/index_f.html
- ⁵ D. Gyalistras. 2003. « Development and validation of a high-resolution monthly gridded temperature and precipitation data set for Switzerland (1951-2000) », *Clim. Res.* 25:55-83, cité dans Priceputu et Greppin (2005). L'article analyse la préparation des données de température et de précipitations telle que pratiquée en Suisse. Autres exemples : L'application du Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model (PRISM) par le PRISM Climate Group, Université de l'Oregon, <http://www.prismclimate.org> (documentation : <http://prism.oregonstate.edu/docs/index.phtml>) pour l'établissement d'une grille régulière de températures et de précipitations, basée sur la topographie et interpolée à partir des données de stations météorologiques aux États-Unis.

A.3. ANALYSE DES INDICATEURS DE VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU

La présente section explique en détail comment utiliser l'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau (AIVRE) pour établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Des chercheurs ont appliqué l'AIVRE à la zone continentale des États-Unis pour évaluer, à l'échelle régionale, la vulnérabilité des ressources en eau et des ressources qui dépendent de l'eau aux impacts des changements climatiques. L'analyse fait appel à des indicateurs pour évaluer les aspects clés de l'approvisionnement en eau et de l'utilisation de l'eau (tels le débit, les pertes par évapotranspiration, la qualité de l'eau, les prélèvements d'eau et les agglomérations en zones inondables) afin d'identifier les bassins versants où les ressources en eau sont actuellement très vulnérables à un stress accru et dont la vulnérabilité serait éventuellement accentuée ou réduite par des variations des phénomènes climatiques moyens et extrêmes. L'AIVRE suppose que l'identification des bassins versants possiblement vulnérables aux impacts négatifs des changements climatiques aidera à prévoir dans quelles régions les changements climatiques risquent d'avoir les impacts les plus importants.

Dans l'AIVRE, la vulnérabilité est exprimée comme une mesure relative de l'importance des impacts que pourraient avoir des variations hydrologiques sur les ressources ou les systèmes hydrologiques d'un bassin versant donné. Par exemple, une vulnérabilité faible reçoit un score de 1, tandis qu'une vulnérabilité élevée reçoit un score de 3. Cette notation permet un classement relatif de la vulnérabilité des bassins versants d'une région donnée. L'étude de cas présentée dans cette section est, en fait, une analyse de la sensibilité, car elle porte uniquement sur la mesure relative de l'importance des impacts que pourraient avoir des variations hydrologiques sur les ressources ou les systèmes hydrologiques d'un bassin versant; elle ne se penche pas sur l'exposition ou la capacité d'adaptation, les deux autres éléments de la vulnérabilité.

L'AIVRE est une méthode relativement simple, qui fait appel aux données disponibles sur les ressources en eau pour produire des cartes SIG. Les cartes de vulnérabilités des bassins versants peuvent aider à établir des priorités pour les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques.

3.1 RENSEIGNEMENTS GENERAUX

L'AIVRE part du principe que les ressources en eau actuellement soumises à des stress sont plus susceptibles d'être vulnérables aux changements climatiques dans l'avenir que celles qui ne subissent pas de tels stress¹. Des gestionnaires de l'eau des États-Unis ont établi des indicateurs pour évaluer les vulnérabilités régionales possibles des bassins versants aux États-Unis sur la base des conditions climatiques existantes². Les indicateurs de vulnérabilité ont été choisis en fonction des critères suivants :

- la pertinence de l'indicateur considérant l'aspect ou les aspects des ressources en eau susceptible (s) d'être touché (s) par les changements climatiques projetés;

- la transparence de la mesure sur le plan de l'entrée, de la formulation et de l'interprétation des données;
- la faisabilité, déterminée en fonction des données disponibles et des délais à respecter.

Les indicateurs utilisés aux États-Unis sont résumés dans le tableau A3.1. Les indicateurs ont été rangés dans deux catégories, selon qu'ils se rapportaient davantage au groupe 1 ou 2 :

- 1) l'approvisionnement en eau, la distribution de l'eau ou l'utilisation avec consommation d'eau; ou
- 2) l'utilisation sans consommation d'eau, la qualité de l'eau et le soutien aux écosystèmes.

Trois classes de vulnérabilité ont été assignées à chaque indicateur (1 = faible, 2 = moyenne et 3 = élevée). Des intervalles numériques ont été établis pour chaque classe en fonction d'avis d'experts, des connaissances scientifiques disponibles et de la concordance avec les conditions de la région à l'étude. Parmi les indicateurs qui pourraient faciliter l'établissement des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques, mentionnons les suivants :

- **Niveau d'exploitation (prélèvement d'eau) comparativement au débit** : Les utilisations avec consommation et sans consommation d'eau sont parfois plus vulnérables aux changements climatiques; l'adaptabilité risque de représenter un plus grand défi dans les bassins versants fortement exploités, car il y a moins d'eau à « gaspiller » dans ces bassins.
- **Variabilité naturelle des cours d'eau à débit non régulé** : Les cours d'eau à débit fortement variable sont susceptibles d'être plus vulnérables aux petites variations hydrologiques causées par les changements climatiques.
- **Taux de sécheresse** : Les zones qui reçoivent peu de précipitations et ont un fort potentiel d'évapotranspiration sont plus vulnérables aux impacts des changements climatiques qui touchent la productivité agricole, le développement des écosystèmes et les utilisations humaines.
- **Tarissement de la nappe souterraine** : Lorsque les taux de prélèvements risquent de dépasser la recharge, accroître l'utilisation de l'eau souterraine pourrait être une stratégie d'adaptation difficile à mettre en pratique.
- **Flexibilité institutionnelle** : La vulnérabilité aux changements climatiques et la capacité à s'y adapter peuvent se mesurer en fonction de la capacité des instances à utiliser des stratégies comme les transferts d'eau ainsi que l'achat et la vente de droits d'utilisation de l'eau. Cet indicateur ne s'applique pas aux instances qui n'utilisent pas de « systèmes de commercialisation de l'eau » et de « droits d'utilisation de l'eau ». (Il s'agit d'un indicateur de la capacité d'adaptation.)
- **Risque d'inondation** : La vulnérabilité (et l'adaptabilité) aux changements climatiques est influencée par la taille de la population en zone inondable, qui est plus vulnérable aux inondations que pourraient causer les changements climatiques.

- ***Sensibilité thermique de l'écosystème*** : Les écosystèmes se sont adaptés aux conditions climatiques actuelles et risquent d'être perturbés par les variations importantes de température associées aux changements climatiques. Par exemple, les communautés aquatiques sont plus vulnérables dans les cours d'eau où la température de l'eau est proche des seuils de tolérance des populations aquatiques. (Il s'agit d'un indicateur de la capacité d'adaptation.)
- ***Oxygène dissous*** : Les communautés aquatiques sont plus vulnérables dans les cours d'eau où les concentrations d'oxygène dissous sont faibles.
- ***Espèces en péril*** : Les espèces en péril sont plus vulnérables dans les bassins versants qui comptent actuellement le plus grand nombre d'espèces menacées et en voie de disparition dépendantes de l'eau.
- ***Jours de gel/dégel*** : Les écosystèmes risquent d'être plus vulnérables aux changements climatiques dans les régions qui enregistrent un plus grand nombre de jours de gel/dégel.
- ***Probabilité d'épisodes de pluie sur neige*** : Les écosystèmes risquent d'être plus vulnérables aux changements climatiques dans les régions qui présentent de plus fortes probabilités d'épisodes de pluie sur neige.
- ***Probabilité d'épisodes de gel du sol*** : Les écosystèmes risquent d'être plus vulnérables aux changements climatiques dans les régions qui présentent de plus fortes probabilités d'épisodes de gel du sol.

Tableau A3.1 : Indicateurs pour les ressources en eau³

INDICATEUR	DESCRIPTION	SEUIL DES CRITÈRES* 1=Vulnérabilité faible; 2=Vulnérabilité moyenne; 3=Vulnérabilité élevée
INDICATEURS POUR L'APPROVISIONNEMENT EN EAU, LA DISTRIBUTION ET L'UTILISATION DE L'EAU AVEC CONSOMMATION		
Niveau d'exploitation Q_P/Q_D	Ratio entre le total des prélèvements annuels d'eau de surface et souterraine en 1990 (Q_P) et le débit annuel moyen non régulé (Q_D).	Classement de vulnérabilité : 1 (< 0,2), 2 (0,2-0,85), 3 (> 0,85). Ce ratio indique dans quelle mesure les ressources en eau d'un bassin versant sont exploitées à des fins de consommation.
Variabilité naturelle $\sigma Q_D/Q_D = CV$	Coefficient de variation (CV) du débit non régulé, qui représente le ratio entre l'écart-type du débit annuel non régulé (σQ_D) et le débit annuel moyen non régulé (Q_D).	Classement de vulnérabilité : 1 (< 33 %), 2 (33-67 %), 3 (> 67 %). Des ratios relativement élevés indiquent des régions d'une extrême variabilité et, par conséquent, d'une plus grande vulnérabilité aux petits changements hydrologiques.
Taux de sécheresse ($P-Q_S$)/P	Proportion des précipitations moyennes annuelles totales (P) perdues par évapotranspiration (ET), où ET correspond à $P-Q_S$.	Classement de vulnérabilité : 1 (< 63 %), 2 (63-78 %), 3 (> 78 %). Les régions qui subissent les plus grandes pertes par évapotranspiration sont les plus vulnérables aux variations relativement faibles de précipitations.
Tarissement de la nappe Q_{ES}/Q_{Base}	Ratio entre les prélèvements moyens d'eau souterraine (Q_{ES}) en 1990 et le débit de base annuel moyen (Q_{Base}), qui indique dans quelle mesure le taux d'utilisation de la nappe souterraine risque d'en dépasser la recharge.	Classement de vulnérabilité : 1 (< 8 %), 2 (8-25 %), 3 (> 25 %). Les régions qui enregistrent des taux élevés de tarissement sont vulnérables à des changements hydrologiques à long terme.
Flexibilité de l'utilisation de l'eau par l'industrie	Proportion de la quantité annuelle moyenne d'eau utilisée par l'industrie qui est consommée (c.-à-d. qui ne retourne pas au réseau).	Classement de vulnérabilité : 1 (< 20 %), 2 (20-40 %), 3 (> 40 %). Des taux élevés d'utilisation avec consommation dans l'industrie peuvent indiquer une utilisation intensive de technologies d'économie d'eau relativement coûteuses et, par conséquent, une capacité moindre à réaliser des économies d'eau supplémentaires en périodes de faibles apports en eau.
Flexibilité institutionnelle	Score de flexibilité exprimé par un chiffre entier (de 0 à 5) assigné à chaque état selon son degré relatif d'obstacles au commerce de l'eau.	Classement de vulnérabilité : 1 (score 0 ou 1), 2 (score 2 ou 3), 3 (score 4 ou 5). Les instances qui disposent de systèmes flexibles d'échange de droits ou de commercialisation de l'eau sont moins vulnérables et mieux adaptées aux changements hydrologiques.

INDICATEUR	DESCRIPTION	SEUIL DES CRITÈRES* 1=Vulnérabilité faible; 2=Vulnérabilité moyenne; 3=Vulnérabilité élevée
INDICATEURS POUR L'UTILISATION SANS CONSOMMATION, LA QUALITÉ DE L'EAU ET LE SOUTIEN AUX ÉCOSYSTÈMES		
Risque d'inondation	Population habitant dans une zone de crue à récurrence de 500 ans.	Classement de vulnérabilité : 1 (< 20 000), 2 (20 000-200 000), 3 (> 200 000).
Navigation	Dépenses annuelles moyennes engagées pour des travaux de dragage dans des cours d'eau navigables.	Classement de vulnérabilité : 1 (< 2 millions \$), 2 (2-20 millions \$), 3 (> 20 millions \$). Des dépenses plus élevées indiquent l'importance relative du cours d'eau et l'ampleur des efforts actuellement déployés pour le nettoyer. Des débits plus élevés pourraient entraîner des dépôts de sédiments plus importants, tandis que des cours d'eau à faible débit pourraient exiger des travaux de dragage supplémentaires pour demeurer navigables.
Sensibilité thermique de l'écosystème	Sensibilité à la variation des températures extrêmes. Vulnérabilité combinée à deux sous-indicateurs : Chaleur – Le nombre moyen de jours par année où la température maximale est supérieure à 35 °C. Froid – Le nombre moyen de jours par année où la température moyenne est inférieure à 0 °C.	Classement de vulnérabilité : Classement le plus élevé entre les classements obtenus pour les sous-indicateurs de vulnérabilité à la chaleur et au froid. Vulnérabilité à la chaleur : 1 (< 15 jours), 2 (15-40 jours), 3 (> 40 jours). La chaleur extrême est une importante source de stress pour les écosystèmes. Même les régions adaptées à des températures relativement élevées risquent de ne pas tolérer facilement une hausse, même petite, des températures maximales. Vulnérabilité au froid : 1 (< 32 jours), 2 (32-85 jours), 3 (> 85 jours). De nombreux écosystèmes, particulièrement les lacs et les forêts, ont des besoins particuliers en périodes de temps froid.
Oxygène dissous	Pourcentage d'observations de concentrations ambiantes inférieures à 5 mg/L.	Classement de vulnérabilité : 1 (< 3 %), 2 (3-15 %), 3 (> 15 %). Une hausse des températures entraîne une baisse des concentrations d'oxygène dissous dans les cours d'eau, ce qui cause des perturbations dans la faune aquatique.
Sensibilité en période de faible débit	Débit de base moyen non régulé en L/km ² , la part du débit d'un cours d'eau qui provient des nappes souterraines.	Classement de vulnérabilité : 1 (> 2,580 L/km ²), 2 (0,711-2,580 L/km ²), 3 (< 0,711L/km ²). Le débit de base donne une indication de la capacité d'un bassin versant à maintenir un débit minimal en périodes de faible débit. Les écosystèmes aquatiques qui font partie de bassins versants dont le débit de base est relativement faible sont plus vulnérables à de graves et longues périodes de sécheresse.

INDICATEUR	DESCRIPTION	SEUIL DES CRITÈRES* 1=Vulnérabilité faible; 2=Vulnérabilité moyenne; 3=Vulnérabilité élevée
Espèces en péril	Nombre d'espèces des milieux aquatiques/humides qui sont en péril, menacées ou en voie de disparition	Classement de vulnérabilité : 1 (< 7 espèces), 2 (7-13 espèces), 3 (> 13 espèces).

*Les classements de vulnérabilité ont généralement été établis après un examen de la distribution des données.

3.2 L'ANALYSE DES INDICATEURS DE VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU EN DETAIL

La figure A3.1 résume les étapes de l'AIVRE. Des étapes supplémentaires pourraient être nécessaires dépendamment des objectifs de gestion établis à l'étape n° 1.

Figure A3.1 : Procédure à suivre pour l'AIVRE

ÉTAPES	
Étape 1	Établir des objectifs régionaux de gestion
	▼
Étape 2	Examiner les données disponibles sur les ressources en eau
	▼
Étape 3	Sélectionner les bons indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau
	▼
Étape 4	Recueillir une sélection de données sur les ressources en eau
	▼
Étape 5	Établir des classes de vulnérabilité
	▼
Étape 6	Calculer les valeurs des indicateurs
	▼
Étape 7	Attribuer une classe de vulnérabilité aux valeurs d'indicateurs
	▼
Étape 8	(Facultative) Combiner les classes d'indicateurs pour former un indice
	▼
Étape 9	Cartographier les classes de vulnérabilité dans l'espace
	▼
Étape 10	Interpréter les résultats

ÉTAPES	
	▼
Étape 11	Prioriser les sites de surveillance

Étape 1 - Établir des objectifs régionaux de gestion : Les autorités compétentes établissent des objectifs régionaux de gestion qui cadrent avec les plans, les énoncés de politique et les conditions du milieu actuels. C'est une étape clé dans l'établissement de priorités de surveillance de l'eau qui aideront à lutter contre les changements climatiques. Parmi les impacts existants et potentiels des changements climatiques sur les ressources en eau à considérer pourraient figurer la fréquence accrue d'inondations et de sécheresses, une recharge à la baisse de la nappe, la baisse des niveaux d'eau souterraine, la baisse des débits de base, la détérioration de la qualité de l'eau, une plus grande utilisation de l'eau pendant l'été malgré une réduction de la quantité d'eau disponible, etc. En général, les enjeux environnementaux, techniques, de gestion et socioéconomiques sont pris en compte dans l'établissement des objectifs régionaux de gestion.

Étape 2 - Examiner les données disponibles sur les ressources en eau : Cet examen sert à déterminer quels sont les ensembles de données disponibles, la période de mesure et la couverture spatiale des données disponibles sur les ressources en eau.

Étape 3 - Sélectionner les bons indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau : La sélection de la série d'indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau se fait en fonction de la concordance des indicateurs avec les objectifs régionaux de gestion établis (étape 1) et des résultats de l'examen des données disponibles sur les ressources en eau (étape 2).

Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau sont également à prendre en considération. Parmi les impacts potentiels, mentionnons la fréquence accrue d'inondations et de sécheresses, une recharge à la baisse de la nappe souterraine (qui entraîne une réaction en chaîne – baisse des niveaux d'eau souterraine, baisse des débits de base, baisse des débits en été et, enfin, détérioration de l'habitat), la détérioration de la qualité de l'eau, une plus grande utilisation de l'eau pendant l'été malgré une réduction de la quantité d'eau disponible, etc.

Étape 4 - Recueillir une sélection de données sur les ressources en eau : Les données requises pour analyser les indicateurs sélectionnés sont entrées dans une base de données, un tableur ou un logiciel SIG.

Étape 5 - Établir des classes de vulnérabilité : À cette étape, on établit des classes de vulnérabilité (vulnérabilité faible, moyenne et élevée) pour chaque indicateur de vulnérabilité des ressources en eau. Les auteurs de l'étude des États-Unis ont établi les intervalles de valeurs de leurs classes à la lumière d'avis d'experts⁴. Leurs intervalles, qui apparaissent dans le tableau A3.1, peuvent servir de point de départ.

Étape 6 - Calculer les valeurs des indicateurs : Les valeurs du ou des indicateurs sont mesurées ou calculées dans une base de données ou un tableur. Les auteurs de l'étude américaine mentionnent que l'on peut grouper les indicateurs qui se rapportent à un élément d'intérêt en

particulier (p. ex., approvisionnement en eau, distribution et utilisation avec consommation d'eau) pour former un indice, si désiré⁵.

Étape 7 - Attribuer une classe de vulnérabilité aux valeurs d'indicateurs : Les valeurs d'indicateurs mesurées ou calculées sont assignées à une classe de vulnérabilité dans la base de données ou le tableur.

Étape 8 (facultative) - Combiner les classes d'indicateurs pour former un indice : Si désiré, on peut grouper les indicateurs qui se rapportent à un aspect particulier (p. ex., approvisionnement en eau, distribution et utilisation avec consommation d'eau) pour former un indice⁶.

Étape 9 - Cartographier les classes de vulnérabilité dans l'espace : Des cartes SIG des classes de vulnérabilité sont créées pour chacun des aspects sélectionnés des ressources en eau (indicateur ou indice) pour illustrer les profils régionaux de vulnérabilité ou de sensibilité relative aux changements climatiques des fonctions d'intérêt des ressources en eau. Les indicateurs ou indices peuvent également être cartographiés en SIG.

Étape 10 – Interpréter les résultats : Les résultats sont interprétés en fonction des objectifs régionaux de gestion.

Étape 11 – Prioriser les sites de surveillance : Les emplacements des sites de surveillance existants sont superposés aux cartes des classes de vulnérabilités pour identifier les régions qui sont couvertes ou non par des réseaux de surveillance.

L'exemple du sud de l'Ontario

En 2010, le ministère de l'Environnement de l'Ontario a effectué une AIVRE pour évaluer la sensibilité de certains bassins versants du sud de l'Ontario aux changements climatiques. Les cinq indicateurs utilisés ont reçu un score de 1 (sensibilité faible) à 3 (sensibilité élevée). Les indicateurs ont été sélectionnés en fonction de leur concordance avec deux réseaux de surveillance, des impacts potentiels des changements climatiques et des données disponibles à l'échelle du sud de l'Ontario⁷.

Les indicateurs de sensibilité des ressources en eau sélectionnés étaient les suivants :

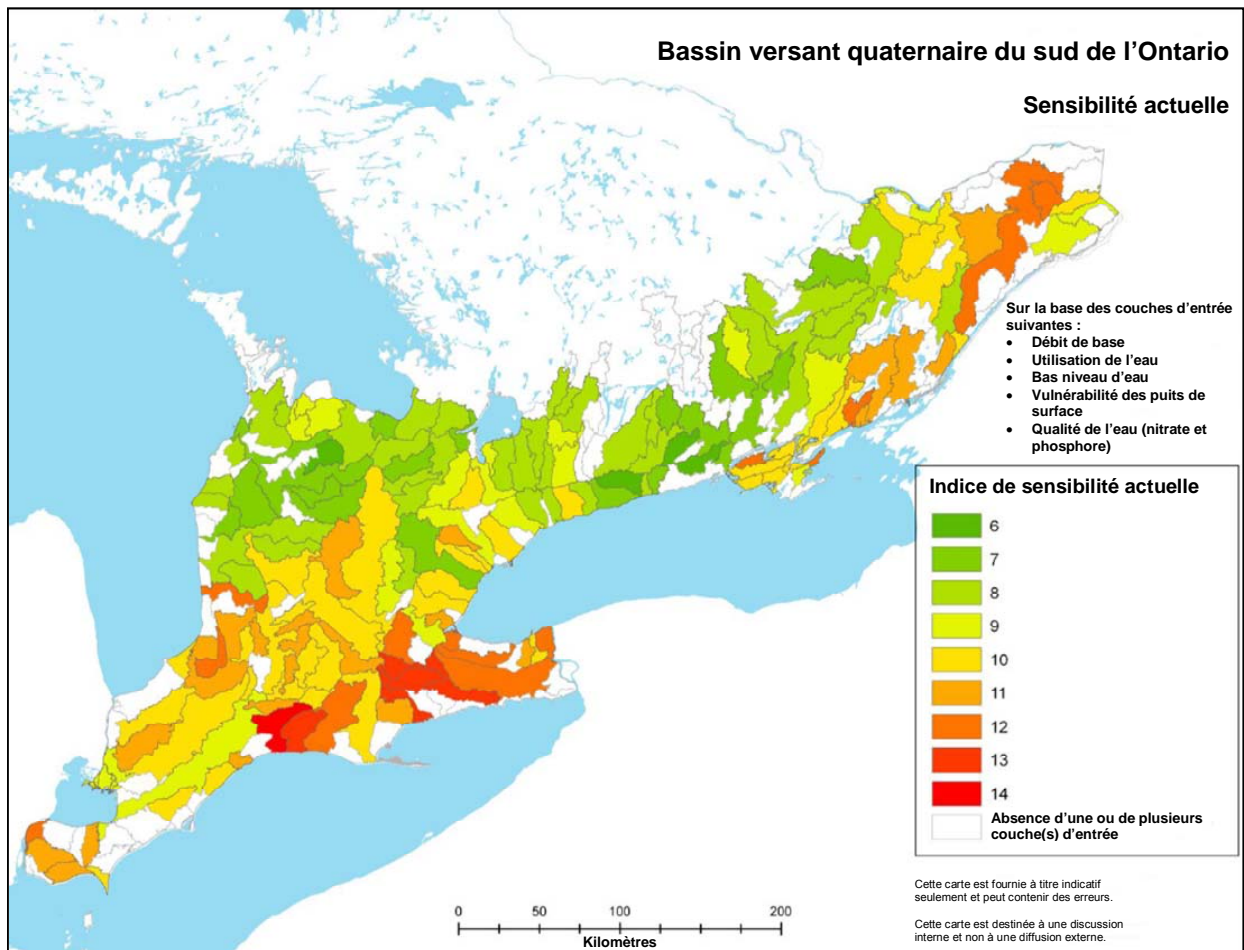
- bas niveau d'eau/sécheresse
- vulnérabilité des puits de surface
- utilisation/demande d'eau
- apport du débit de base
- qualité de l'eau des cours d'eau.

Des scores ont été attribués aux différents indicateurs pour chaque sous-bassin versant du sud de l'Ontario pour lesquels des données étaient disponibles. Le score final de chaque sous-bassin – son indice de sensibilité – est la somme des scores de tous les indicateurs. La figure A3.2 montre les résultats cartographiés de l'indice de sensibilité. Les sous-bassins à la sensibilité la plus faible ont reçu un score de 6 et ceux à la sensibilité la plus élevée, un score de 14. Les scores totaux ont permis d'identifier les bassins versants qui étaient très sensibles aux impacts des changements climatiques liés aux indicateurs choisis. Les résultats servent à établir des priorités pour deux réseaux de surveillance de l'eau (l'un dédié à la surveillance de l'eau souterraine et l'autre, à la surveillance de la qualité des eaux de surface) qui seront utilisés pour la détection des changements climatiques et l'adaptation aux changements climatiques dans le bassin des Grands Lacs.

Le ministère évaluera les réseaux de surveillance existants et recommandera des améliorations sur la base des critères suivants :

- une évaluation de la sensibilité locale
- les impacts potentiels des changements climatiques
- les caractéristiques des bassins versants d'après des études sur la protection des sources d'eau et les connaissances locales.

Figure A3.2 : Indice de sensibilité aux fins de l'établissement de priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau en vue de l'adaptation aux changements climatiques dans un bassin versant quaternaire du sud de l'Ontario⁸



3.3 RESSOURCES REQUISES

L'AIVRE exige les ressources suivantes :

Données et logiciels :

- Les données nécessaires à une AIVRE varieront selon les indicateurs sélectionnés, qui sont à leur tour fonction des conditions observées sur le territoire concerné et des objectifs régionaux de gestion. La réalisation de ce genre d'évaluation de la vulnérabilité exige plusieurs ensembles de données. Un examen de la disponibilité et de la qualité des données relatives aux ressources en eau est nécessaire, et une bonne couverture spatiale est essentielle.

- Cette méthode exige des logiciels de base pour la gestion des données et le calcul des indicateurs et des indices (équipement logiciel de base de données ou de calcul). Un équipement logiciel SIG est également nécessaire, de même que le savoir-faire technique pour utiliser les logiciels requis.

Niveau d'effort et de savoir-faire :

- Dépendamment des objectifs régionaux de gestion établis, l'AIVRE pourrait exiger des connaissances spécialisées en écologie, en hydrologie, en hydrogéologie et en hydraulique pour l'élaboration et l'évaluation des indicateurs ainsi que pour l'établissement des classes de vulnérabilité.

3.4 APPLICABILITE, LIMITES ET SOLUTIONS

Cette méthode convient bien à l'évaluation de la sensibilité et de la vulnérabilité des bassins versants à l'échelle régionale ainsi qu'à l'établissement de priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. L'AIVRE a d'abord été appliquée à l'échelle du bassin versant. Elle a également été appliquée à l'échelle nationale aux États-Unis⁹, mais pourrait aussi s'appliquer à l'échelle régionale, comme le montre l'analyse du bassin versant quaternaire du sud de l'Ontario¹⁰.

L'AIVRE comporte cependant les limites suivantes :

- la sélection des indicateurs se fait à la lumière d'avis d'experts – d'autres choix seraient possibles
- la définition des classes de vulnérabilité est également fondée sur le jugement
- les indices groupés sont simplement des moyennes des indicateurs, sans pondération¹¹.

3.5 EN RESUME

L'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau est une méthode relativement simple pour évaluer les vulnérabilités régionales des bassins versants aux impacts des changements climatiques. Elle fait appel à des indicateurs de vulnérabilité basés sur des données facilement accessibles sur les ressources en eau, notamment des données sur le débit, la cartographie des zones inondables, les prélèvements d'eau, les précipitations et l'évapotranspiration. Les indicateurs sont sélectionnés en fonction des objectifs régionaux de gestion et de la disponibilité d'ensembles de données pertinentes. L'évaluation de la vulnérabilité se fait en mesurant ou en calculant les valeurs des indicateurs, en les assignant à une classe de vulnérabilité et en cartographiant les résultats. Cette méthode requiert un équipement logiciel de base pour la gestion de base de données ou le calcul, de même que des compétences en analyse et en SIG. La méthode s'applique à l'échelle nationale et régionale.

Dépendamment des objectifs régionaux de gestion établis, cette méthode pourrait exiger des connaissances spécialisées en écologie, en hydrologie, en hydrogéologie et en hydraulique pour l'élaboration et l'évaluation des indicateurs.

Le tableau A3.2 résume les besoins en matière de données (type, quantité, complexité), de savoir-faire, d'effort initial et de logiciels pour l'AIVRE.

Tableau A3.2 : Sommaire des caractéristiques de l'analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau

CARACTÉRISTIQUE	BESOINS
Types de critères / paramètres	Des indicateurs de vulnérabilité et de sensibilité pour évaluer les vulnérabilités régionales des bassins versants aux changements climatiques.
Données requises	Les données requises sont déterminées en fonction des indicateurs sélectionnés; de nombreux ensembles de données possiblement requis, avec une bonne couverture spatiale (p. ex., débit, densité de la population, désignations des zones inondables, prélèvements annuels d'eau de surface et d'eau souterraine, précipitations et évapotranspiration, etc.).
Logiciels	Logiciels de base pour la gestion des données et le calcul des indicateurs et des indices; logiciel SIG.
Savoir-faire	Connaissances spécialisées en SIG, gestion des données et analyses statistiques; besoin de connaissances en écologie/hydrogéologie pour élaborer et évaluer les indicateurs.
Échelle	Peut s'appliquer à l'échelle du bassin versant, régionale et nationale.

NOTES EN FIN DE CHAPITRE

- ¹ B. Hurd, N. Leary, R. Jones et J. Smith. 1999. « Relative regional vulnerability of water resources to climate change », *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6):1399-1409.
- ² Ibid.
- ³ D'après B. Hurd, N. Leary, R. Jones et J. Smith, « Relative regional vulnerability of water resources to climate change », 1999, *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6):1399-1409.
- ⁴ B. Hurd, N. Leary, R. Jones, and J. Smith. 1999. « Relative regional vulnerability of water resources to climate change », *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6):1399-1409.
- ⁵ Ibid.
- ⁶ Ibid.
- ⁷ S.M. MacRitchie, P.K. Goel, G. Kaltenecker, F. Fleischer, A. Jamieson, M. Millar, L. Ramanathan, C. Worte, D. Grgic et K. Zaletnik Hering. 2010. *An approach for evaluating two monitoring networks for climate change detection and adaptation in Great Lakes watersheds in Ontario*, affiche, IAGLR, mai 2010.
- ⁸ Ibid.
- ⁹ B. Hurd, N. Leary, R. Jones et J. Smith. 1999. « Relative regional vulnerability of water resources to climate change », *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6):1399-1409.
- ¹⁰ S.M. MacRitchie, P.K. Goel, G. Kaltenecker, F. Fleischer, A. Jamieson, M. Millar, L. Ramanathan, C. Worte, D. Grgic et K. Zaletnik Hering. 2010. *An approach for evaluating two monitoring networks for climate change detection and adaptation in Great Lakes watersheds in Ontario*, affiche, IAGLR, mai 2010.
- ¹¹ B. Hurd, N. Leary, R. Jones et J. Smith. 1999. « Relative regional vulnerability of water resources to climate change », *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6):1399-1409.

ANNEXE B

Méthodes pour évaluer les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques

TABLE DES MATIÈRES

Annexe B : Méthodes pour évaluer les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques

B.1. Méthode de l'audit	B-3
B.2. Analyse de la dégradation du réseau (ADR) – Monte-Carlo	B-15
B.3. Analyses multivariées.....	B-27

Liste des figures

Figure B1.1 : Procédure à suivre pour l'audit
Figure B1.2 : Coûts et avantages relatifs des modèles de réseaux
Figure B2.1 : Procédure à suivre pour l'ADR/Monte-Carlo
Figure B2.2 : Rapport entre EAM et N_s dans un réseau dégradé
Figure B3.1 : Représentation graphique du coefficient de corrélation de la première composante principale dans le plan des composantes principales 2 (axe des x) et 3 (axe des y)
Figure B3.2 : Procédure à suivre pour l'ACP
Figure B3.3 : Représentation graphique de l'exemple d'ACP
Figure B3.4 : Procédure à suivre pour l'analyse typologique
Figure B3.5 : Exemple de dendrogramme des débits de pointe annuels

Liste des tableaux

Tableau B1.1 : Critères d'audit des stations pour l'évaluation du réseau du Nouveau-Brunswick
Tableau B1.2 : Résumé des caractéristiques de la méthode de l'audit
Tableau B2.1 : Résumé des caractéristiques de l'ADR/Monte-Carlo
Tableau B3.1 : Coefficients de corrélation entre les composantes principales et les stations, calculés à partir de 80 séries pluviométriques de 10 jours au printemps – sans rotation de l'axe
Tableau B3.2 : Coefficients de corrélation entre les composantes principales et les stations, calculés à partir de 80 séries pluviométriques de 10 jours au printemps – après rotation Varimax des axes avec normalisation de Kaiser
Tableau B3.3 : Résumé de la sélection des stations pour le scénario A
Tableau B3.4 : Résumé des caractéristiques des méthodes multivariées

ANNEXE B : METHODES POUR ÉVALUER LES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DE L'EAU AUX FINS DE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Trois méthodes d'évaluation ont été retenues après examen des critères suivants : applicabilité à différentes échelles; besoins relativement modérés de savoir-faire et de données; et capacité de produire des résultats qui sont compatibles avec les objectifs de surveillance en fait de portée et de précision. Les trois méthodes sont les suivantes :

- 1) la méthode de l'audit;
- 2) l'analyse de la dégradation du réseau (ADR), dite « méthode Monte-Carlo »;
- 3) les analyses multivariées.

Ces méthodes, particulièrement les deux premières, ont été sélectionnées en grande partie à cause de leur relative simplicité. De brèves descriptions d'autres méthodes d'évaluation des réseaux de surveillance, accompagnées de références, sont présentées à l'annexe C.

Pour savoir laquelle des méthodes statistiques choisir (entre la Monte-Carlo et les deux méthodes d'analyses multivariées décrites plus loin), on pourrait mettre chacune à l'essai avec le même ensemble de données. La méthode optimale serait celle qui produirait les résultats présentant le moins de variance.

B.1. MÉTHODE DE L'AUDIT

La méthode de l'audit est une façon relativement simple d'évaluer les réseaux de surveillance de l'eau dans une optique d'adaptation aux changements climatiques. Elle conjugue une connaissance spécialisée des réseaux existants à une évaluation méthodique et détaillée des stations existantes et proposées selon des critères établis. Un certain nombre de modèles de réseaux sont ensuite évalués selon leur capacité d'atteindre les objectifs généraux du réseau et selon leur coût.

La méthode de l'audit décrite ici a été utilisée au Nouveau-Brunswick pour évaluer les stations de mesure du réseau hydrométrique provincial en vue de créer un réseau plus rentable¹. La méthode peut facilement s'appliquer à l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de la planification de l'adaptation aux changements climatiques. Il faut d'abord établir des critères pour l'évaluation. Ces critères doivent reposer sur des facteurs qui cadrent avec les priorités régionales d'adaptation aux changements climatiques. Parmi les critères possibles, mentionnons le « caractère adéquat » de l'emplacement des stations, la représentation de l'hydrologie régionale, l'utilité des stations pour les estimations (p. ex., pour les sites non jaugés) et la satisfaction des besoins des clients en matière de mesures et de stratégies d'adaptation aux changements climatiques. Chaque station est ensuite auditée au cours d'une table ronde réunissant les exploitants et les gestionnaires responsables des réseaux, mais aussi des spécialistes des changements climatiques qui s'occupent de surveillance de l'eau. Les stations existantes et proposées se voient attribuer des notes en fonction des critères d'évaluation et sont classées en fonction du total des points accumulés pour chaque considération prioritaire. Les résultats de l'évaluation et du classement des stations servent à concevoir d'autres modèles de

réseaux et des séries d'objectifs à utiliser pour prendre des décisions au sujet de la conception du réseau. Une analyse coûts-avantages peut être effectuée en comparant les avantages de chaque modèle (total des points d'audit de chaque station) et la hausse ou la baisse des coûts d'exploitation qu'entraînerait la mise en place du modèle.

1.1 RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

L'évaluation du réseau de surveillance de l'eau du Nouveau-Brunswick a commencé par certaines analyses et évaluations. L'une d'elles a consisté à examiner les principes de base de la conception hydrométrique et à voir dans quelle mesure le réseau actuel respectait ces principes. Les spécialistes des ressources hydriques qui ont effectué l'évaluation au Nouveau-Brunswick ont décrit les critères de conception de réseau qu'ils ont utilisés². Ils ont étudié diverses méthodes pour établir les critères du réseau pour les besoins hydrologiques régionaux. Enfin, les chercheurs ont élaboré un réseau hypothétique « minimal » en utilisant des zones physiographiques-climatiques comme unités hydrologiques représentatives; enfin, ils ont élaboré un réseau « cible » ou « optimal » fondé sur des régions hydrologiques qui se prêtaient à l'établissement de relations pour l'estimation du débit aux sites non jaugés.

Pour d'autres renseignements sur la conception de réseaux hydrométriques, voir l'annexe C, section *Sources d'information*, sous *Réseaux de surveillance de l'eau et conception de réseaux*.

1.2 LA MÉTHODE DE L'AUDIT EN DÉTAIL

La figure B1.1 résume la procédure à suivre pour cette méthode. Pour le processus d'audit décrit ici, on utilise une table ronde ou un atelier pour effectuer l'évaluation ou l'« audit » des stations. Les stations existantes et proposées sont évaluées en fonction des mêmes facteurs. Les stations proposées sont celles qui pourraient avoir été suggérées par les évaluations préalables ou celles qui sont nécessaires pour répondre à des besoins actuellement non comblés.

Figure B1.1 : Procédure à suivre pour l'audit³

ÉTAPES	
Étape 1	Établir les buts de la surveillance et les objectifs du réseau
	▼
Étape 2	(Facultative) Si l'information requise est indisponible, réaliser des évaluations et des recherches; l'audit intégrera ces résultats
	▼
Étape 3	Établir des critères pour l'évaluation de chacune des stations du réseau

ÉTAPES	
	▼
Étape 4	Organiser les stations de surveillance
	▼
Étape 5	Convoquer une table ronde
	▼
Étape 6	Évaluer chacune des stations
	▼
Étape 7	Coter les stations et attribuer des points d'audit
	▼
Étape 8	Recenser les « contraintes pratiques »
	▼
Étape 9	Concevoir d'autres modèles de réseaux
	▼
Étape 10	Évaluer les impacts et les implications financières des autres modèles
	▼
Étape 11	Faire des recommandations sur les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques

Étape 1 – Établir les buts de la surveillance et les objectifs du réseau : Les buts de la surveillance et les objectifs du réseau sont utilisés dans l'évaluation. Les buts de la surveillance comprennent en général la détection des tendances et l'évaluation de l'efficacité des stratégies de gestion aux fins d'adaptation. Ils influent aussi sur le choix des critères d'évaluation à utiliser dans l'analyse.

Étape 2 (facultative) – Si l'information requise est indisponible, réaliser des évaluations et des recherches; ces résultats seront intégrés dans l'audit : Les types d'évaluations à réaliser dépendent du type de réseau(x) de surveillance à évaluer, de l'état des connaissances du ou des réseaux existants ainsi que des buts de la surveillance et des critères d'évaluation.

Étape 3 – Établir des critères pour l'évaluation de chacune des stations du réseau : Les critères dépendront des buts de la surveillance et des critères d'évaluation, ainsi que de la nature et des caractéristiques du réseau de surveillance. Voici quelques exemples de critères : caractéristiques du site, applicabilité des données aux sites non jaugés, besoins de stratégies

d'adaptation aux changements climatiques identifiés par les clients ainsi que valeur et importance régionale des ressources en eau et des services connexes.

Étape 4 – Organiser les stations de surveillance : « Organiser » les stations de surveillance de façon à les regrouper pour faciliter les délibérations au sujet du classement. Les stations hydrométriques peuvent être organisées en fonction des bassins versants. L'audit peut porter aussi bien sur des stations proposées que sur des stations existantes.

Étape 5 – Convoquer une table ronde : Organiser une table ronde ou un atelier pour réaliser l'audit. Doivent y participer notamment les personnes qui connaissent suffisamment le ou les réseaux audités et qui ont l'expertise pour évaluer les stations selon les critères choisis; par exemple les exploitants et gestionnaires responsables des réseaux et les spécialistes de la planification de l'adaptation aux changements climatiques.

Étape 6 – Évaluer chacune des stations : Évaluer (noter) individuellement la conformité de chaque station aux critères d'évaluation; attribuer une note aux stations proposées et existantes.

Étape 7 – Coter les stations et attribuer des points d'audit : Le classement sera fonction de la moyenne composée des points accumulés pour l'ensemble des critères. Plus le total des points accumulés à l'audit par une station est élevé, plus la valeur relative des avantages dérivés de la station est élevée elle aussi. Classer la totalité des stations proposées et des stations existantes selon les points d'audit accumulés par chaque station.

Étape 8 – Recenser les « contraintes pratiques » : Cette étape donne l'occasion de qualifier le classement en fonction de certaines contraintes. Par exemple, les organismes responsables du réseau peuvent devoir conserver certaines stations à cause d'engagements officiels et juridiques.

Étape 9 – Construire d'autres modèles de réseaux : Une stratégie de mesure simple fondée sur le rang obtenu à l'audit pourrait inclure le plus grand nombre de stations permis par les niveaux de financement et les budgets d'exploitation, en ordre descendant de points obtenus à l'évaluation. Toutefois, l'intégration des « contraintes pratiques » pourrait modifier ce type de modèle. Divers modèles sont envisageables, d'une surveillance minimale visant l'adaptation aux changements climatiques (qui comprend des engagements officiels) à une démarche exhaustive abordant tous les besoins identifiés, y compris un réseau « optimal » dédié à l'adaptation.

Étape 10 – Évaluer les impacts et les implications financières des autres modèles : Évaluer les impacts et les implications financières de chaque modèle de réseau (c.-à-d., hausse ou baisse des coûts d'exploitation) par rapport à l'ensemble des objectifs du réseau. On peut effectuer une analyse coûts-avantages en comparant les avantages de chaque modèle (total des points attribués à une station à l'audit) et la hausse ou la baisse des coûts d'exploitation provoquée par la mise en place du modèle (c.-à-d., l'ajout de nouvelles stations pour remédier aux lacunes ou la fermeture de stations devenues superflues pour un modèle donné).

Étape 11 – Faire des recommandations sur les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques : À partir des résultats de l'audit, et en tenant compte des buts de la surveillance et des objectifs du réseau établis à l'étape 1, formuler des

recommandations sur les besoins en matière de réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques.

L'exemple du Nouveau-Brunswick⁴

L'exemple suivant décrit de quelle façon la méthode de l'audit a permis d'évaluer le réseau de stations hydrométriques au Nouveau-Brunswick.

Dans le cadre de cette évaluation, on a réalisé des évaluations préalables dont les résultats ont été utilisés pendant l'audit. Pendant ces évaluations, les tâches suivantes ont été exécutées :

- Élaboration de critères pour un réseau régional minimal et pour un réseau régional cible, et identification de réseaux appropriés qui pourraient satisfaire à ces critères. Comparaison de ces réseaux appropriés et du réseau actuel pour repérer les éléments déficients ou redondants de ce dernier.
- Réalisation d'enquêtes auprès des utilisateurs pour déterminer si le réseau actuel répond à leurs besoins.

À l'aide de la méthode de l'audit, on a ensuite intégré les résultats de ces évaluations et d'autres facteurs. Chacune des stations du réseau a ensuite été « auditée » selon une série de critères (les « considérations prioritaires »), qui sont présentés dans le tableau B1.1.

Tableau B1.1 : Critères d'audit des stations pour l'évaluation du réseau du Nouveau-Brunswick⁵

CRITÈRES « CONSIDÉRATIONS PRIORITAIRES »	EXPOSÉ RAISONNÉ
POUR LES CARACTÉRISTIQUES DU SITE	
Débit annuel moyen < 25 m ³ /s; de 25 à 125 m ³ /s; > 125 m ³ /s	Les grands versants donnent un échantillon plus représentatif pour la province dans son ensemble.
Niveau d'eau seulement	Ces stations fournissent moins d'information que les stations hydrométriques.
Qualité des registres	Plus les registres sont de qualité plus l'information est utile.
Période de mesure (années) 0 à 5 6 à 10 11 à 15 16 à 25	Les courtes périodes de mesure doivent être « prolongées » pour la création d'un registre. Une fois le registre établi, il perd de la valeur, à l'exception des registres de longue durée, qui sont utiles pour le calcul d'indices.

CRITÈRES « CONSIDÉRATIONS PRIORITAIRES »	EXPOSÉ RAISONNÉ
26 à 40 Plus de 40	
Proximité d'une station climatique	Les stations dont les registres peuvent être mis facilement en corrélation avec des données météorologiques comparatives ont une valeur informative ajoutée.
BESOINS IDENTIFIÉS DES CLIENTS – HYDROLOGIE RÉGIONALE	
Besoins identifiés pour un réseau hydrométrique minimal	Seules les stations jugées essentielles pour l'hydrologie régionale ont obtenu ces points.
Priorité pour l'hydrologie régionale (importance pour les estimations)	Les stations qui contribueraient à renforcer la capacité de transfert de données ont été notées ici.
Importance pour les stations de surveillance/inventaires qui recueillent des données à long terme aux fins du calcul des indices	Principalement les stations formant le réseau utilisé pour le calcul des indices nationaux, ainsi que certaines autres qui sont importantes pour les régions transfrontalières.
Importance pour les besoins « spéciaux » des régions (données sur de petits bassins, projets pilotes techniques, etc.)	Comprend aussi les études spéciales et les responsabilités des autorités compétentes.
Priorité des clients : Approvisionnement en eau « Autres » infrastructures (transports, égouts, etc.) Inondations Impacts environnementaux Pêche Énergie Navigation et loisirs	Selon les enquêtes auprès des utilisateurs et l'audit des stations; pondération établie par consensus des membres de l'équipe.
Répond aussi à un besoin opérationnel identifié	Points supplémentaires attribués aux stations qui répondaient à la fois à des besoins régionaux et à des besoins opérationnels.

CRITÈRES « CONSIDÉRATIONS PRIORITAIRES »	EXPOSÉ RAISONNÉ
BESOINS IDENTIFIÉS DES CLIENTS – OPÉRATIONNELS	
Importance pour des obligations ou responsabilités fédérales (traités, accords, conseils, etc.)	Seules les stations appuyant des engagements fédéraux officiels étaient incluses ici.
Importance pour des responsabilités provinciales (accords, conseils, etc.)	Seules les stations appuyant des engagements provinciaux officiels étaient incluses ici.
Priorité des clients : Approvisionnement en eau Autres infrastructures (transports, égouts, etc.) Inondations Impacts environnementaux Pêche Énergie Navigation et loisirs	Selon les enquêtes auprès des utilisateurs et l'audit des stations; pondération établie par consensus des membres de l'équipe.
Utilité pour des besoins identifiés en matière d'hydrologie régionale	Points supplémentaires attribués aux stations qui répondent à la fois à des besoins régionaux et à des besoins opérationnels.
IMPORTANCE RÉGIONALE DES RESSOURCES EN EAU	
Densité de population	Calcul au prorata à partir de l'indicateur général de l'intensité d'utilisation de l'eau.
Utilisation de l'eau par les municipalités	Calcul au prorata à partir de l'inventaire de l'approvisionnement en eau de surface; rajusté pour les sources à l'extérieur du bassin.
Utilisation de l'eau dans l'industrie	Calcul au prorata à partir d'un inventaire des approvisionnements d'eau de surface fondé sur une enquête auprès d'utilisateurs industriels.
Priorité pour la pêche	Inventaire des terres du Canada, données généralisées, pêche sportive.
Potentiel hydroélectrique Majeur Petite échelle Aucun identifié	Selon un inventaire ministériel des sites présentant un potentiel majeur et selon l'étude du cabinet d'experts-conseils Acres sur les sites présentant un potentiel à petite échelle.
Pression économique	Selon les inventaires des travaux d'immobilisations existants et proposés.

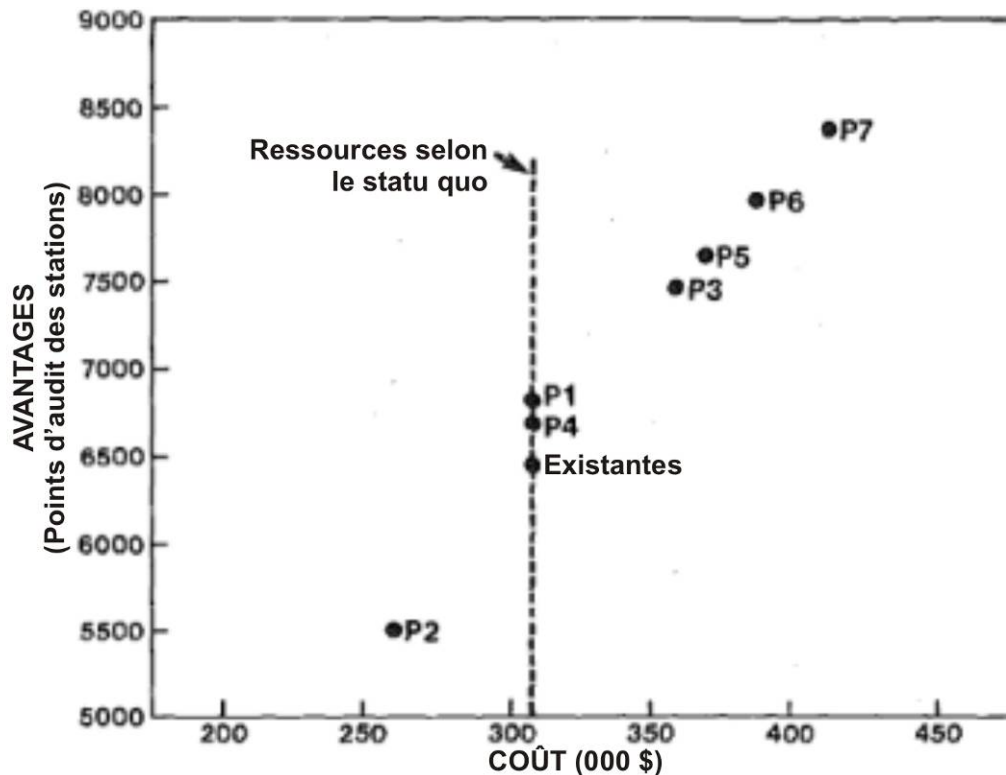
CRITÈRES « CONSIDÉRATIONS PRIORITAIRES »	EXPOSÉ RAISONNÉ
Inondation	Sites prioritaires identifiés par les ministères fédéraux et provinciaux.
Enjeux/problèmes liés à la qualité de l'eau	Selon les valeurs ambiantes et les sources ponctuelles connues de polluants.
Risque de pénurie d'eau	Modèle d'analyse de l'utilisation d'eau fondé sur des projections de forte croissance et des hypothèses de débits faibles.

Une table ronde réunissant tous les membres de l'équipe d'étude et les exploitants et gestionnaires responsables du réseau a été convoquée pour l'audit. Les stations existantes et proposées étaient organisées par bassin versant. Les participants ont évalué leur conformité aux critères d'évaluation et leur capacité de répondre aux objectifs du réseau. Les décisions ont été prises par consensus. L'établissement d'un consensus, l'échange d'information et la nature généralement intégratrice de l'exercice ont été vus comme l'un des aspects les plus utiles de tout le processus d'évaluation⁶.

Les stations ont été notées en fonction des critères et classées selon la moyenne composée des points accumulés. D'autres modèles de réseaux ont été identifiés à l'aide du classement des stations par ordre de priorité. Ces autres modèles répondaient à différents objectifs, depuis la prestation minimale d'un mandat de « biens publics » jusqu'à une prestation « tout incluse » des besoins recensés, y compris la constitution d'un réseau hydrométrique régional « optimal ». Au final, la démarche a permis de définir les améliorations précises à apporter au réseau pour répondre aux besoins hydrométriques. Ces améliorations ont été présentées sous forme d'une liste de scénarios de réaménagement du réseau pouvant servir de guide de gestion.

Le processus d'audit n'a pas attribué une valeur monétaire aux avantages, seulement un classement des modèles par valeur relative. Une analyse coûts-avantages a été réalisée en comparant le total des points d'audit des stations (avantages) à l'augmentation ou à la diminution des coûts de mise en œuvre qu'entraînerait l'ajout de nouvelles stations ou la fermeture de stations existantes selon les exigences du nouveau modèle de réseau. La figure B1.2 montre une représentation graphique de cette analyse.

Figure B1.2 : Coûts et avantages relatifs des modèles de réseau⁷



Les spécialistes des ressources hydriques qui ont analysé l'exemple du Nouveau-Brunswick ont conclu que l'application du processus d'audit à l'évaluation de réseau procurait des outils de gestion importants :

- un exposé raisonné pour réaffecter les ressources actuelles vers des secteurs plus prioritaires
- un classement des priorités pour l'affectation de ressources additionnelles
- un classement des priorités pour une réduction imposée des ressources.

1.3 RESSOURCES REQUISES

La méthode de l'audit exige les ressources suivantes :

Données et logiciels :

- Les données requises dépendent du cadre d'évaluation et des critères utilisés. Au minimum, l'audit nécessite de l'information sur le réseau hydrologique et les résultats d'enquêtes/de sondages réalisés auprès de spécialistes ou d'exploitants, de scientifiques du secteur public et d'utilisateurs des données.

- Un logiciel de base pour la compilation est indispensable; un logiciel de gestion de l'information et de cartographie/SIG serait un atout.

Niveau d'effort et de savoir-faire :

- Connaissance spécialisée du ou des réseaux à évaluer, p. ex., savoir si les emplacements des stations conviennent, si les données du réseau sont représentatives de l'hydrologie régionale et utiles à des fins d'estimation et si elles peuvent être appliquées à des secteurs non jaugés, etc.
- Capacité d'organiser et de diriger une table ronde aux fins de l'audit.
- Capacité d'utiliser un logiciel pour compiler les résultats. La capacité d'utiliser des systèmes de gestion de l'information et des logiciels de cartographie/SIG est un atout.

1.4 APPLICABILITÉ, LIMITES ET SOLUTIONS

La méthodologie de l'audit est flexible. Les objectifs peuvent être établis sur mesure pour répondre aux priorités de gestion, tout comme la forme des résultats. Le cadre d'évaluation peut facilement être adapté et appliqué à la plupart des situations⁸.

Les autorités pourraient envisager d'utiliser la méthode de l'audit comme première étape dans l'évaluation de l'adéquation d'un réseau de surveillance hydrométrique ou climatologique. Un audit peut révéler des cas de sur-échantillonnage ou de sous-échantillonnage et indiquer les parties du réseau qui fournissent des données jugées non représentatives ou inadéquates par les exploitants ou utilisateurs. Un échantillonnage inadéquat à une ou plusieurs stations de surveillance peut être rectifié en fonction des résultats de l'audit.

1.5 EN RÉSUMÉ

La méthode de l'audit est une façon relativement simple d'évaluer les réseaux de surveillance de l'eau dans une optique d'adaptation aux changements climatiques. Elle conjugue une connaissance spécialisée des réseaux existants à une évaluation méthodique et détaillée des stations existantes et proposées, fondée sur des critères établis. Pour commencer, il faut établir les buts de la surveillance et les critères d'évaluation. Les exploitants et gestionnaires responsables du réseau de surveillance de l'eau et les spécialistes de la planification de l'adaptation aux changements climatiques sont convoqués à une table ronde où ils évaluent chaque station, existante ou proposée, selon sa conformité aux critères d'évaluation et sa capacité d'atteindre les objectifs du réseau. Un rang est attribué à chaque station du réseau en fonction des points obtenus à l'audit. Les résultats de l'évaluation et le classement des stations servent à concevoir d'autres modèles de réseaux. Ces modèles sont évalués selon leur capacité d'atteindre les objectifs du réseau. On peut effectuer une analyse coûts-avantages en comparant les avantages de chaque modèle à ses coûts de mise en place.

La méthode de l'audit exige une connaissance spécialisée du réseau à évaluer et des critères soigneusement définis. Elle nécessite aussi une capacité d'organiser et de diriger une table ronde pour effectuer l'audit. Un logiciel de base est nécessaire pour la compilation des résultats de l'audit. Un logiciel SIG/de cartographie et de gestion de l'information serait un atout, ainsi que la capacité de les utiliser.

La méthode de l'audit peut s'appliquer à des projets de diverses envergures, depuis les grandes initiatives nationales jusqu'aux petits projets régionaux.

Le tableau B1.2 résume les besoins en matière de données (type, quantité, complexité), de savoir-faire, d'effort initial et de logiciels.

Tableau B1.2 Résumé des caractéristiques de la méthode de l'audit

CARACTÉRISTIQUE	BESOINS
Données requises	Information sur le réseau hydrologique; résultats d'enquêtes/de sondages réalisés auprès de spécialistes ou d'exploitants, de scientifiques du secteur public, d'utilisateurs des données et de spécialistes des changements climatiques et de la planification de l'adaptation aux changements climatiques.
Logiciels	Logiciel de base pour la compilation; un logiciel de gestion de l'information et de cartographie/SIG serait un atout.
Savoir-faire	Connaissance spécialisée du ou des réseaux à évaluer, p. ex., savoir si les emplacements des stations conviennent, si les données du réseau sont représentatives de l'hydrologie régionale et utiles à des fins d'estimation et si elles peuvent être appliquées à des secteurs non jaugés, etc.; et capacité d'organiser et de diriger une table ronde aux fins de l'audit.
Applicabilité	Réseaux météorologiques ou hydrologiques.
Échelle	Méthode relativement indépendante de l'échelle : applicable à l'échelle requise par l'autorité, que ce soit au niveau national, régional, du bassin versant ou à plus petite échelle.

NOTES EN FIN DE CHAPITRE

- ¹ Z.K. Davar et W.A. Brimley. 1990. « Hydrometric network evaluation: audit approach », *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116 (1):134-146.
- ² Ibid.
- ³ Z.K. Davar et W.A. Brimley. 1990. « Hydrometric network evaluation: audit approach », *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116 (1):134-146.
- ⁴ Ibid.
- ⁵ Après le tableau 2 dans Z.K. Davar et W.A. Brimley. 1990. « Hydrometric network evaluation: audit approach », *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116 (1):134-146.
- ⁶ Z.K. Davar et W.A. Brimley. 1990. « Hydrometric network evaluation: audit approach », *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116 (1):134-146.
- ⁷ Figure 2 dans Z.K. Davar et W.A. Brimley. 1990. « Hydrometric network evaluation: audit approach », *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116 (1):134-146.
- ⁸ Z.K. Davar et W.A. Brimley. 1990. « Hydrometric network evaluation: audit approach », *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116 (1):134-146.

B.2. ANALYSE DE LA DÉGRADATION DU RÉSEAU – MONTE-CARLO

L'analyse de la dégradation du réseau (ADR) permet d'évaluer les réseaux de surveillance météorologique ou hydrométrique et de déterminer la densité de stations requise pour répondre à un ou plusieurs objectifs de surveillance donnés. L'ADR simule une diminution systématique ou « dégradation » de la densité des stations d'échantillonnage d'un réseau et, à chaque étape successive de dégradation, évalue le rendement du réseau dégradé par rapport à celui du réseau original. L'échantillonnage Monte-Carlo – sélection aléatoire de stations parmi toutes les stations existantes du réseau – sert à simuler la dégradation du réseau. Les réseaux dégradés ainsi créés sont des sous-ensembles du réseau complet offrant une densité de données spatiales ou temporelles inférieure à celle du réseau complet.

L'ADR a été utilisée dans de nombreuses applications. Pour le Climate Reference Network (CRN) des États-Unis, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) s'en est servie pour déterminer la densité spatiale et le nombre total de stations de surveillance requises pour améliorer la capacité d'observer la variabilité temporelle et l'évolution du climat aux États-Unis. Le CRN a pour but de fournir des observations homogènes de la température et des précipitations enregistrées par les stations de référence qui peuvent être associées à des observations historiques pour permettre une détection et une attribution adéquates des changements climatiques¹. L'analyse réalisée pour le CRN divisait les 48 États en 115 cellules de grille et créait à l'intérieur de chacune d'elles des réseaux hypothétiques de sous-échantillons de stations représentatifs, sélectionnés selon la méthode Monte-Carlo, à partir d'un réseau de référence de densité supérieure. Le nombre adéquat de stations pour le CRN a été défini comme étant le nombre de stations nécessaire pour reproduire, à l'intérieur de certaines limites d'erreur prédéterminées, les tendances annuelles observées de la température et des précipitations aux États-Unis. Même si l'étude était concentrée sur une définition du comportement climatique qui mettait l'accent sur les tendances, les chercheurs soutiennent que leur technique est applicable à d'autres mesures du comportement du climat².

L'ADR peut aussi servir à réaliser des analyses coûts-avantages des réseaux de surveillance et à établir le rapport entre la densité des stations et le rendement du réseau.

Cette méthode d'évaluation part du principe qu'un réseau de surveillance complet, ou toute autre donnée d'échantillonnage, donne généralement une représentation raisonnable des valeurs réelles des paramètres mesurés. Même si elle peut servir à évaluer l'adéquation de la densité des réseaux existants dans les régions où l'échantillonnage est généralement suffisant, l'ADR ne fournit pas directement d'indications sur l'emplacement optimal des stations à supprimer ou à ajouter.

2.1 RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

Analyse du réseau dégradé à l'aide de la technique Monte-Carlo de rééchantillonnage

La technique d'échantillonnage Monte-Carlo utilise un programme informatique pour choisir au hasard certaines stations du réseau complet afin de créer de nouveaux réseaux « dégradés » de moindre densité spatiale, temporelle ou spatio-temporelle. Pour déterminer la capacité du réseau

réduit à détecter des variations temporelles des valeurs des paramètres, on compare ses prévisions à celles que fournit le réseau complet. La différence est estimée à l'aide des résultats de l'échantillonnage aléatoire répété de même taille. Par exemple, l'échantillonnage peut être répété (disons cent fois ou plus) pour chaque réseau de résolution spatiale moindre comptant un nombre de stations donné. Chaque échantillonnage réalisé pour un réseau d'une taille donnée est appelé « réalisation ». La différence entre les résultats du réseau complet et ceux de chaque réalisation du réseau réduit est mesurée par une valeur appelée « erreur absolue moyenne » (EAM), qui mesure l'efficacité avec laquelle le réseau dégradé prédit les tendances qui avaient été prédites à l'aide des données collectées par le réseau complet.

L'EAM est calculée au moyen de l'équation suivante :

Équation B2.1 : Erreur absolue moyenne

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - f_i|$$

Où

EAM est l'erreur absolue moyenne dans les tendances d'un paramètre
f_i est la valeur prédite de la tendance d'un paramètre pour une réalisation donnée d'un réseau dégradé
y est la valeur prévue de la tendance d'un paramètre (selon le réseau complet)
i est la réalisation (1, 2, ... *n*)
n est le nombre de réalisations (100 dans l'exemple américain)

La taille acceptable du réseau dégradé est déterminée en fonction d'une EAM admissible.

Comme nous l'avons dit précédemment, la technique d'échantillonnage Monte-Carlo a été utilisée dans le cadre d'une ADR pour estimer la densité de stations nécessaire au CRN aux États-Unis. Elle a servi à évaluer le rendement d'un réseau dégradé (un réseau composé d'un nombre réduit de stations) comparativement au rendement d'un réseau complet (un réseau composé de la totalité des stations utilisables dans une région)³. Parce qu'elles reposent sur un moins grand nombre de données, les prédictions des tendances de la température et des précipitations annuelles du réseau dégradé devraient être moins précises que celles du réseau complet. Les auteurs de l'étude américaine ont attribué les avantages suivants à la méthode d'échantillonnage Monte-Carlo :

- étalement de l'effet des configurations multiples et des réseaux à distribution spatiale faible et inégale;
- réduction de l'influence des registres des stations non homogènes non détectées⁴.

2.2 L'ADR EN DÉTAIL

La procédure à suivre pour l'ADR/méthode Monte-Carlo est résumée à la figure B2.1. L'analyse décrite ici utilise les tendances de la température et des précipitations annuelles observées comme mesures pour comparer les réseaux dégradés au réseau complet. D'autres mesures du comportement du climat pourraient être utilisées⁵.

Figure B2.1 : Procédure à suivre pour l'ADR/méthode Monte-Carlo

ÉTAPES		
Étape 1	Établir les buts de la surveillance et les critères d'évaluation	
	▼	
Étape 2	Sélectionner le ou les réseaux de surveillance à évaluer et le ou les paramètres à utiliser dans l'analyse (température, précipitations ou débit)	
	▼	
Étape 3	Examiner et compiler des données de surveillance historiques pour les paramètres choisis	
	▼	
Étape 4	Effectuer l'échantillonnage et l'analyse Monte-Carlo comme suit :	
	▼	
	Étape 4a	Au moyen d'un échantillonnage aléatoire des stations de l'ensemble du réseau, choisir le nombre de stations voulu pour le réseau réduit; cette étape est à répéter pour chaque modèle de réseau de taille différente
		▼
	Étape 4b	Calculer la moyenne de la valeur de paramètre pour chaque année d'enregistrement afin de générer un « ensemble de séries chronologiques » de la moyenne spatiale du paramètre
		▼
	Étape 4c	Calculer les tendances pour chaque ensemble de séries chronologiques du modèle de réseau dégradé
		▼
	Étape 4d	Répéter les étapes 4a à 4c de façon à créer des réalisations multiples du modèle de réseau dégradé et calculer l'EAM pour les tendances
		▼

ÉTAPES		
	Étape 4e	Répéter les étapes 4a à 4d pour les modèles de réseaux dégradés de chaque taille possible.
		▼
	Étape 4f	À l'aide d'une analyse de régression, déterminer le rapport entre l'EAM et la taille du réseau dégradé.
		▼
	Étape 4g	À partir du rapport obtenu à l'étape 4f, déterminer le nombre de stations requises pour les valeurs d'EAM sélectionnées pour le paramètre
		▼
Étape 5		Faire des recommandations sur les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques

Étape 1 – Établir les buts de la surveillance et les critères d'évaluation : Les buts de la surveillance comprennent en général la détection des tendances et l'évaluation de l'efficacité des stratégies de gestion aux fins d'adaptation. Les buts définis influenceront sur le choix des critères d'évaluation à utiliser dans l'analyse. Pour la méthode décrite ici, les critères d'évaluation pourraient être les différences entre les tendances de la température et des précipitations annuelles calculées à l'aide du réseau dégradé et les tendances fournies par le réseau complet.

Étape 2 – Sélectionner le ou les réseaux de surveillance à évaluer et le ou les paramètres à utiliser dans l'analyse (température, précipitations ou débit) : Identifier le ou les réseaux de surveillance à évaluer en fonction des buts de la surveillance définis à l'étape 1. Sélectionner le ou les paramètres à utiliser dans l'analyse (température, précipitations ou débit). Le choix des paramètres dépendra à la fois des buts de la surveillance et des critères d'évaluation établis à l'étape 1.

Étape 3 – Examiner et compiler des données de surveillance historiques pour les paramètres choisis : Fournir de l'information sur les ensembles de données disponibles, la période de mesure et la couverture spatiale du ou des paramètres choisis. (*Nota* : Une partie de cette information a peut-être déjà été récupérée pour établir les critères d'évaluation de l'étape 1.) Il serait utile à ce stade d'avoir un plan montrant l'emplacement des stations disponibles. Les données requises pour analyser le ou les paramètres choisis peuvent être compilées sous forme de base de données ou de tableur(s).

Étape 4 – Effectuer l'échantillonnage et l'analyse Monte-Carlo comme suit :

Étape 4a – Au moyen d'un échantillonnage aléatoire des stations de l'ensemble du réseau, choisir le nombre de stations voulu pour le réseau réduit; cette étape est à répéter pour chaque modèle de réseau de taille différente : Un sous-ensemble d'un certain nombre (N_s) de stations est choisi au hasard parmi toutes les stations du réseau afin de créer un modèle de réseau de taille réduite. Cette tâche s'effectue à l'aide d'un logiciel avancé ayant les capacités d'analyse

statistique et d'échantillonnage nécessaires à l'utilisation de la méthode Monte-Carlo. L'échantillonnage se fait sans remplacement, de sorte qu'une station ne peut être incluse plus d'une fois dans le même échantillon.

Étape 4b – Calculer la moyenne de la valeur de paramètre pour chaque année d'enregistrement afin de générer un « ensemble de séries chronologiques » de la moyenne spatiale du paramètre : Les ensembles de séries chronologiques de la moyenne spatiale du paramètre pour le modèle sont compilés. Les ensembles de séries chronologiques d'un échantillon de réseau dégradé d'une taille donnée sont composés des séries annuelles et de la valeur moyenne du paramètre calculée à partir des valeurs collectées pour ce paramètre pendant cette période.

Étape 4c – Calculer les tendances pour chaque ensemble de séries chronologiques du modèle de réseau dégradé : Les tendances (p. ex., la variation de la température moyenne dans le temps) sont calculées pour chaque ensemble de séries chronologiques du même modèle de réseau dégradé.

Étape 4d – Répéter les étapes 4a à 4c de façon à créer des réalisations multiples du modèle de réseau dégradé et calculer l'EAM pour les tendances : Les étapes 4a à 4c sont répétées 100 fois afin de générer des réalisations multiples du modèle de réseau dégradé, et l'EAM est calculée pour les 100 tendances associées au modèle de réseau dégradé de N_s stations.

Étape 4e – Répéter les étapes 4a à 4d pour les modèles de réseaux dégradés de chaque taille possible.

Étape 4f – À l'aide d'une analyse de régression, déterminer le rapport entre l'EAM et la taille du réseau dégradé : À cette étape, une régression entre l'EAM et la taille du réseau dégradé est obtenue en utilisant chacune des 100 réalisations de chaque taille de réseau dégradé. L'analyse de régression est une technique mathématique utilisée pour déterminer le rapport entre une variable dépendante et une variable indépendante. Aux fins de l'analyse de régression, on produit un diagramme mettant en parallèle les valeurs d'EAM et le nombre de stations. Le diagramme montre comment le nombre de stations requises varie selon une plage de niveaux prédéterminés d'erreur (EAM).

Étape 4g – À partir du rapport obtenu à l'étape 4f, déterminer le nombre de stations requises pour les valeurs d'EAM sélectionnées pour le paramètre : Utiliser la régression obtenue à l'étape 4f ou une représentation graphique de cette régression afin de déterminer le nombre de stations requises pour les valeurs d'EAM sélectionnées pour le paramètre.

Étape 5 – Faire des recommandations sur les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques : Faire des recommandations sommaires concernant la taille que devrait avoir le réseau dégradé selon les buts de la surveillance et les critères d'évaluation établis à l'étape 1.

Le centre-nord du Nouveau-Mexique, exemple américain

L'exemple suivant montre comment l'ADR/Monte-Carlo a été appliquée à des stations de surveillance dans une région du centre-nord du Nouveau-Mexique. La région était l'une des 115 cellules de grille de l'étude du CRN mentionnée précédemment. Dans cette étude, chaque cellule de grille s'étendait sur 2,5 degrés de latitude et 3,5 degrés de longitude⁶.

Pour l'ensemble de l'étude et pour voir dans quelle mesure la représentativité des données diminue en fonction de la réduction de la densité de surveillance, les chercheurs ont utilisé l'ADR/Monte-Carlo pour réduire systématiquement la résolution du réseau en éliminant sélectivement certaines stations du réseau initial complet. Ils ont conclu que la densité idéale du réseau de surveillance climatique serait la densité de stations pour laquelle les données (après analyse) reproduiraient les tendances observées par le réseau complet à l'intérieur d'une certaine marge d'erreur.

Le réseau complet du centre-nord du Nouveau-Mexique se composait de 38 stations qui mesuraient la température (et les précipitations) depuis 30 ans. Une simple analyse de régression des données de ces stations a révélé une augmentation des températures annuelles moyennes au cours de ces 30 années. La technique de rééchantillonnage de Monte-Carlo a été utilisée pour évaluer le rendement des réseaux dégradés dans les conditions suivantes⁷ :

- 1) Un rééchantillonnage aléatoire du réseau complet de 38 stations ($N = 38$) a été effectué, sans remplacement (c'est-à-dire sans utiliser la même station plus d'une fois dans un même échantillon). Le sous-ensemble comptait N_s stations, où N_s est supérieur ou égal à 1, et N_s est inférieur à N . Pour cet exemple, nous pouvons assumer que le premier échantillon comptait trois stations sélectionnées au hasard ($N_s = 3$) ayant une série chronologique de températures annuelles moyennes de 1971 à 2000.

Par exemple, les séries chronologiques des trois stations choisies au hasard pourraient ressembler à ce qui suit⁸ :

$$\begin{aligned} T_1 &= \{(1971, 11,21 \text{ }^\circ\text{C}); (1972, 11,26 \text{ }^\circ\text{C}); (1973, 11,35 \text{ }^\circ\text{C}); \dots (2000, 11,50 \text{ }^\circ\text{C})\} \\ T_2 &= \{(1971, 10,91 \text{ }^\circ\text{C}); (1972, 11,30 \text{ }^\circ\text{C}); (1973, 11,41 \text{ }^\circ\text{C}); \dots (2000, 11,53 \text{ }^\circ\text{C})\} \\ T_3 &= \{(1971, 11,84 \text{ }^\circ\text{C}); (1972, 11,43 \text{ }^\circ\text{C}); (1973, 11,29 \text{ }^\circ\text{C}); \dots (2000, 11,47 \text{ }^\circ\text{C})\} \end{aligned}$$

Les séries chronologiques illustrent (l'année et la température moyenne calculée à partir des données de surveillance de cette station pour cette année); (l'année et la température moyenne...); etc.

- 2) Les ensembles de séries chronologiques de la moyenne spatiale des températures ont été compilés à partir des données du réseau de trois stations. À titre d'exemple, un ensemble de séries chronologiques de la première réalisation du réseau de trois stations choisies au hasard se calcule comme suit :

Équation B2.2 : Ensemble de séries chronologiques

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 T_j$$

Où

\hat{T}_1 est un ensemble de séries chronologiques dérivées de la première réalisation de trois stations choisies au hasard

T_j est une série chronologique de la j^{e} station

j est la station (dans ce cas-ci 1, 2, 3)

L'ensemble de séries chronologiques suivant illustre cette étape pour la première réalisation à partir des séries chronologiques susmentionnées T1, T2 et T3 :

$$\hat{T}_1 = \{(1971, 11,32 \text{ }^{\circ}\text{C}); (1972, 11,33 \text{ }^{\circ}\text{C}); (1973, 11,35 \text{ }^{\circ}\text{C}); \dots (2000, 11,50 \text{ }^{\circ}\text{C})\}^9$$

- 3) Les tendances pour chaque réalisation d'un ensemble de séries chronologiques de N_s -stations ont ensuite été calculées. La tendance est essentiellement la pente du rapport entre la température prédite et le temps exprimé en années. Par exemple, la tendance dans le premier ensemble de séries chronologiques pourrait être une hausse de température d'environ 0,01 °C par année (ou 0,1 °C pour une période de dix ans).
- 4) Les étapes 1 à 3 ont été répétées 100 fois afin de générer des réalisations multiples pour un réseau dégradé de N_s -stations ($N_s = 3$ dans le cas présent).
- 5) Pour chaque réseau dégradé de N_s -stations, l'EAM pour les tendances a été calculée comme suit :

Équation B2.3 : EAM pour les tendances

$$EAM_s = \frac{1}{100} \sum_{k=1}^{100} \left| \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta t} - \frac{\Delta \hat{T}_k}{\Delta t} \right|$$

Où

EAM_s est l'erreur absolue moyenne pour les tendances pour le réseau de N_s -stations

$\Delta \bar{T} / \Delta t$ est la tendance de la température pour la série chronologique du réseau complet

$\Delta \hat{T}_k / \Delta t$ est la tendance de la température pour la k^e réalisation d'un réseau de N_s -stations

j est la réalisation (1, 2, ... 100)

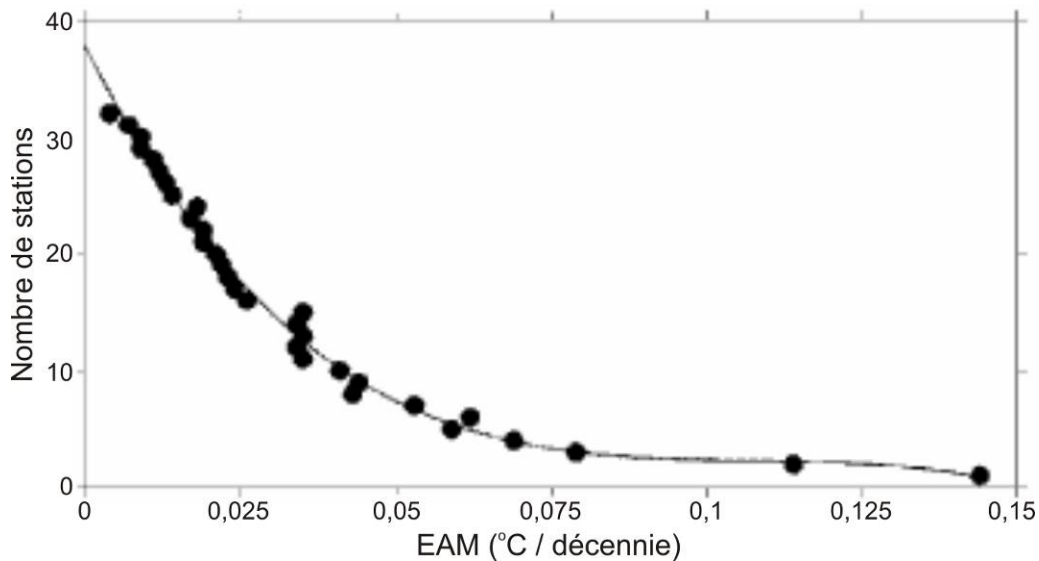
Pour $N_s = 3$, l'EAM calculée était d'environ 0,079 °C par période de dix ans (comme le montre la figure B2.2).

- 6) Les étapes 1 à 4 ont été répétées pour toutes les tailles possibles de réseau dégradé ($N_s = 1, 2, \dots 37$).
- 7) Une régression a ensuite été effectuée entre les valeurs d'EAM et N_s , à l'aide d'un polynôme de quatrième degré qui permet une meilleure adéquation que les polynômes de degrés inférieurs. Un polynôme de quatrième degré peut être exprimé comme suit :

$$N_s = a_0 + a_1 EAM_s^1 + \dots + a_4 EAM_s^4$$

La figure B2.2 montre le rapport obtenu pour le centre-nord du Nouveau-Mexique.

Figure B2.2 : Rapport entre EAM et N_s dans un réseau dégradé¹⁰



- 8) À l'aide d'un diagramme comme celui de la figure B2.2 ou en utilisant la régression polynomiale, on peut déterminer le nombre de stations nécessaires pour arriver à une EAM donnée. Par exemple, si trois stations sont réputées nécessaires pour prédire les tendances de la température entre 1971 et 2000 dans le centre-nord du Nouveau-Mexique avec une EAM_s de 0,080 °C, alors le réseau dégradé devra compter au moins 15 stations pour arriver à une EAM_s de moins de 0,025 °C.

Résultats pour l'ensemble des États-Unis

Dans l'étude générale, une analyse des tendances de la température et des précipitations aux États-Unis réalisée à l'aide de l'ADR/Monte-Carlo a révélé qu'un réseau de 327 stations pour les États contigus permettait de détecter les tendances sur 10 ans dans les limites d'erreur acceptables de 0,10 °C pour la température et de 2,0 % des précipitations annuelles moyennes.

Autres études

Des ADR ont été utilisées dans des applications semblables. Par exemple, et aussi à l'échelle nationale aux États-Unis, cette méthode a été utilisée pour déterminer la densité du réseau qui permettrait de reproduire la variabilité interannuelle des données sur la température et les précipitations¹¹.

Une analyse Monte-Carlo a aussi été effectuée aux États-Unis pour évaluer les effets d'une densité de stations limitée sur les incertitudes associées aux variations temporelles de la fréquence des épisodes de précipitations abondantes observées entre 1895 et 2004¹².

2.3 RESSOURCES REQUISES

L'ADR/Monte-Carlo nécessite les ressources suivantes :

Données et logiciels :

- Les données requises dans une ADR dépendent des buts de la surveillance et du ou des paramètres choisis (température, précipitations, débit, etc.).
- La méthode nécessite une gestion de données de base, un logiciel de gestion de bases de données ou un tableur et un logiciel de pointe pour les calculs. Le logiciel statistique doit avoir les capacités d'analyse statistique et d'échantillonnage nécessaires à l'utilisation de la méthode Monte-Carlo. Un logiciel SIG pourrait être utilisé pour la présentation cartographique des réseaux existants et proposés.

Niveau d'effort et de savoir-faire :

- Savoir-faire technique nécessaire à l'utilisation du logiciel statistique requis et à la détermination de l'EAM.

Nota : Dépendamment des objectifs de gestion et des critères d'évaluation sélectionnés, une ADR/Monte-Carlo peut nécessiter une connaissance avancée en modélisation hydrologique si les tendances des changements climatiques sont évaluées à l'aide de modèles hydrologiques de bassins versants distribués¹³.

2.4 APPLICABILITÉ, LIMITES ET SOLUTIONS

Cette méthode est indiquée lorsqu'il faut réduire le nombre de stations d'un réseau composé de nombreuses stations. Elle permet d'évaluer le rendement des réseaux dégradés et de garantir qu'ils peuvent encore répondre aux objectifs régionaux de gestion de l'adaptation aux changements climatiques.

L'ADR peut s'utiliser à l'échelle nationale ou dans de petites régions qui comptent plusieurs stations. Dans l'exemple américain, la méthode a été appliquée à une échelle de grille de 2,5 degrés de latitude sur 3,5 degrés de longitude, mais les résultats ont été compilés à l'échelle nationale.

Comme nous le mentionnions au début de la présente section, l'ADR ne donne pas une idée précise de l'emplacement optimal des stations à supprimer ou à ajouter. S'il faut un soutien analytique pour éclairer cette démarche, il est recommandé d'envisager des méthodes de réduction des erreurs ou de modélisation.

2.5 EN RÉSUMÉ

L'ADR est une méthode dont l'utilisation est assez répandue et qui peut être utile dans un projet de réduction du nombre de stations d'un réseau. La dégradation de la densité du réseau peut servir à établir le rapport entre la densité de stations et le rendement du réseau dans une analyse coûts-avantages. Elle permet d'évaluer le rendement des réseaux dégradés et de garantir qu'ils peuvent encore assurer le niveau de surveillance nécessaire aux stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

Pour utiliser l'ADR, il faut disposer de données historiques (pour les précipitations, la température et le débit, etc.) fournies par l'ensemble du réseau de surveillance ou un autre échantillonnage représentatif, afin de pouvoir calculer les différences statistiques entre les données historiques et les données des sous-ensembles. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de diagrammes de valeurs estimées et d'estimations de l'EAM pour les différents modèles de réseaux dégradés. La méthode nécessite un logiciel de gestion de bases de données simple ou un tableur, ainsi qu'un logiciel statistique avancé. De solides compétences en statistiques sont nécessaires à la réalisation de l'analyse. Le concept peut s'appliquer à l'échelle du pays ou de petites régions.

Le tableau B2.1 résume les besoins en matière de données (type, quantité, complexité), de savoir-faire, d'effort initial et de logiciels.

Tableau B2.1 Résumé des caractéristiques de l'ADR/Monte-Carlo

CARACTÉRISTIQUES	BESOINS
Données requises	Données météorologiques (température, précipitations, etc.) ou données hydrométriques (débit, etc.).
Logiciels	Logiciel de base pour la gestion de données et logiciel statistique avancé; un SIG serait un atout.
Savoir-faire	Compréhension de la technique d'échantillonnage Monte-Carlo; connaissance de la statistique pour effectuer les calculs d'EAM; compétence dans l'utilisation des logiciels requis.
Applicabilité	Réseaux météorologiques ou hydrologiques.

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe B

Échelle	Échelle nationale ou inférieure.
---------	----------------------------------

NOTES DE FIN DE CHAPITRE

- ¹ M.J. Janis, K.G. Hubbard et K.T. Redmond. 2004. « Station density strategy for monitoring long-term climatic change in the contiguous United States », *Journal of Climate*, 17:151-162.
- ² Ibid.
- ³ Ibid.
- ⁴ Expliqué dans M.J. Janis, K.G. Hubbard et K.T. Redmond. 2004. « Station density strategy for monitoring long-term climatic change in the contiguous United States », *Journal of Climate*, 17:151-162.
La technique suppose que les stations sont homogènes à l'intérieur d'un réseau défini. Cela dit, si les stations ne sont pas homogènes dans la région, la méthode atténue les incidences qu'une station pourrait avoir sur le reste du réseau.
- ⁵ Ibid.
- ⁶ M.J. Janis, K.G. Hubbard et K.T. Redmond. 2004. « Station density strategy for monitoring long-term climatic change in the contiguous United States », *Journal of Climate*, 17:151-162.
- ⁷ D'après M.J. Janis, K.G. Hubbard et K.T. Redmond. 2004. « Station density strategy for monitoring long-term climatic change in the contiguous United States », *Journal of Climate*, 17:151-162.
- ⁸ Cette série chronologique a été créée par JFSA à partir d'un ensemble de données fictives pour montrer en quoi consiste une série chronologique.
- ⁹ Ibid.
- ¹⁰ M.J. Janis, K.G. Hubbard et K.T. Redmond. 2004. « Station density strategy for monitoring long-term climatic change in the contiguous United States », *Journal of Climate*, 17:151-162.
- ¹¹ R.S. Vose et M.J. Menne, 2004. « A method to determine station density requirements for climate observing networks », *Journal of Climate*, 17:2961-2971.
- ¹² K.E. Kunkel, T.R. Karl et D.R. Easterling, 2007. « A Monte Carlo assessment of uncertainties in heavy precipitation frequency variations », *Journal of Hydrometeorology*, 8:1152-1160.
- ¹³ Un exemple d'étude Monte-Carlo fondée sur un modèle hydrologique distribué à base physique, qui simule l'écoulement de surface et le débit d'un cours d'eau, est décrit dans W. F. Krajewski, V. Lakshmi, K. P. Georgakakos et S. C. Jain, 1991, « A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model », *Water Resour. Res.*, 27(1), 119-128. L'évaluation de l'adéquation de la densité inférieure de données était fondée sur les caractéristiques hydrologiques, dont le débit de pointe, le temps de réponse et les volumes totaux de ruissellement.

B.3. LES ANALYSES MULTIVARIÉES

Les méthodes d'analyses multivariées sont des techniques statistiques utilisées pour évaluer le rapport statistique entre des variables. Les deux méthodes décrites ici, soit l'analyse en composantes principales et l'analyse typologique, peuvent servir à identifier des groupes de stations aux comportements similaires (c'est-à-dire des stations qui enregistrent des données similaires au fil du temps). La similarité des stations est appelée « homogénéité » et présente un intérêt pour la rationalisation des réseaux, car l'interpolation de données entre stations se fait idéalement entre des stations homogènes.

Les méthodes d'analyses multivariées permettent aussi d'identifier les régions faiblement représentées (nombre inférieur de stations comparativement aux variations temporelles et spatiales dans l'ensemble de données) et les régions fortement représentées, qui comptent possiblement des stations redondantes. Cette capacité est utile pour évaluer les réseaux de surveillance et les optimiser aux fins de l'adaptation aux changements climatiques.

Il faut toutefois reconnaître que ces méthodes supposent une « stationnarité » des séries chronologiques, qui n'est plus valide dans un contexte de changements climatiques.

Les analyses multivariées reposent sur des données météorologiques ou hydrométriques :

- 1) **Analyse en composantes principales (ACP) :** Cette méthode identifie les groupes de stations qui ont des propriétés spatiales et temporelles similaires. Elle pourrait notamment permettre d'identifier les stations homogènes, par exemple deux stations qui sont situées à moins d'un kilomètre l'une de l'autre sur un terrain plat et qui mesurent des précipitations annuelles moyennes similaires au fil du temps. Les résultats de l'analyse sont exprimés en coefficients de corrélation entre les stations et les composantes principales (un concept expliqué dans la section 3.1). Pour faciliter la comparaison, les coefficients sont présentés sous forme de tableaux et de diagrammes. L'ACP peut aussi servir à identifier les stations relativement homogènes et redondantes. On a appliqué cette méthode à des données pluviométriques dans la région des Appalaches au Québec pour identifier les stations homogènes et, de là, les stations redondantes qui pouvaient être fermées¹.
- 2) **Analyse typologique (AT) :** Cette méthode utilise des dendrogrammes (c.-à-d. des diagrammes en forme d'arbres) pour identifier les groupes de stations qui ont des propriétés spatiales et temporelles similaires. Par exemple, l'AT permettrait d'identifier deux stations hydrométriques homogènes qui sont situées à 5 kilomètres l'une de l'autre sur un segment de cours d'eau sans effluents et qui mesurent un débit annuel de pointe similaire au fil du temps. L'AT a été utilisée pour rationaliser un réseau de surveillance hydrométrique dans le bassin de la rivière Pembina et aux alentours, dans le sud du Manitoba. Même si elle peut être utilisée pour identifier les stations redondantes, cette méthode ne permet pas de les différencier; il faut donc recourir à des critères externes pour sélectionner la ou les stations les plus représentatives. Cela dit, l'AT pourrait être combinée à d'autres méthodes statistiques, par exemple les méthodes de réduction de la variance ou de réduction des erreurs, pour identifier la ou les stations fournissant le plus

d'information. L'AT a été appliquée à des données hydrométriques du bassin de la Pembina au Manitoba (Canada) et au Dakota du Nord (É.-U.), dans le cadre d'un processus de rationalisation visant à réduire le nombre de stations hydrométriques².

Ces deux méthodes d'analyses multivariées s'appliquent à des échelles multiples. Toutes deux nécessitent l'utilisation d'un logiciel statistique avancé, d'un logiciel SIG et d'un logiciel de gestion et de base de données. L'utilisation du logiciel statistique et du logiciel de gestion de données nécessite un savoir-faire. Des compétences en matière de SIG sont nécessaires pour la présentation des résultats. L'application des deux méthodes d'évaluation exige des compétences supérieures en matière de statistique et d'analyse. La sélection finale des stations est laissée au jugement de l'utilisateur.

3.1 RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est un moyen d'analyser de grands ensembles de données empiriques pour en dégager les tendances. C'est aussi une façon de représenter les données de manière à faire ressortir leurs similitudes et leurs différences. Il peut être difficile de discerner ces types de tendances dans de grands ensembles de données multidimensionnelles. L'un des avantages de l'ACP, c'est qu'une fois les tendances dégagées, la méthode comprime les données en réduisant le nombre de dimensions, sans perdre beaucoup d'informations³.

Dans l'ACP, les procédures mathématiques impliquent plusieurs séries d'analyses statistiques. Des variables possiblement corrélées, par exemple les données pluviométriques enregistrées à différentes stations, sont transformées en un plus petit nombre de variables non corrélées appelées composantes principales (ou axes). La première composante principale explique le maximum de la variabilité des données, et chaque composante suivante explique le maximum possible de la variabilité restante. La variabilité se quantifie à l'aide de mesures statistiques appelées somme des carrés et coefficients de corrélation (deux concepts expliqués ci-dessous). La première composante principale est l'axe pour lequel la somme des carrés des projections des points sur cet axe est maximisée.

Par un processus appelé « transformation linéaire orthogonale », on passe d'un nombre maximal de variables à un nombre réduit de variables. Les transformations linéaires orthogonales projettent les données sur un nouveau plan caractérisé par la variance maximale de chaque composante principale. *Nota* : « Orthogonal » signifie perpendiculaire et « plan » désigne une surface abstraite comme celles qui sont utilisées en géométrie.

Ainsi, la première composante principale (de niveau ou d'ordre $k = 1$) est choisie pour expliquer, le plus possible, la variabilité des données provenant des différentes stations. Chaque composante principale suivante (les composantes principales d'ordre $k = 2, 3, \dots$) est choisie pour expliquer le plus possible la variabilité qui reste. La méthode utilise des programmes informatiques pour identifier les composantes principales et calculer les statistiques de corrélation. La première composante principale est l'axe pour lequel la somme des carrés des

projections des points sur cet axe est maximisée. La somme des carrés (SC) se définit comme suit :

Équation B3.1 : Somme des carrés

$$SC = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

Où

SC est la somme des carrés

X_i est le i^{e} point de données

\bar{X} est la moyenne des données

i est le point de données

n est le nombre de points de données

Pour définir la deuxième composante principale ou axe (d'ordre $k=2$), on procède à une nouvelle projection des points, cette fois-ci sur un plan qui est orthogonal par rapport au premier axe. Le deuxième axe est aussi défini de façon à maximiser la somme des carrés des projections des points sur cet axe. Les axes suivants sont définis de la même façon que le deuxième axe. Chaque composante principale successive explique une partie de moins en moins importante de la variabilité (ou variance totale) des données.

Une fois les composantes principales obtenues, on calcule un coefficient de corrélation entre la variable (par exemple, les précipitations) et la composante principale d'ordre k . Le coefficient de corrélation s'exprime comme suit :

Équation B3.2 : Coefficient de corrélation⁴

$$r_{jk} = C_{jk} \lambda_k^{1/2}$$

Où

r_{jk} est le coefficient de corrélation entre la variable et la composante principale d'ordre k

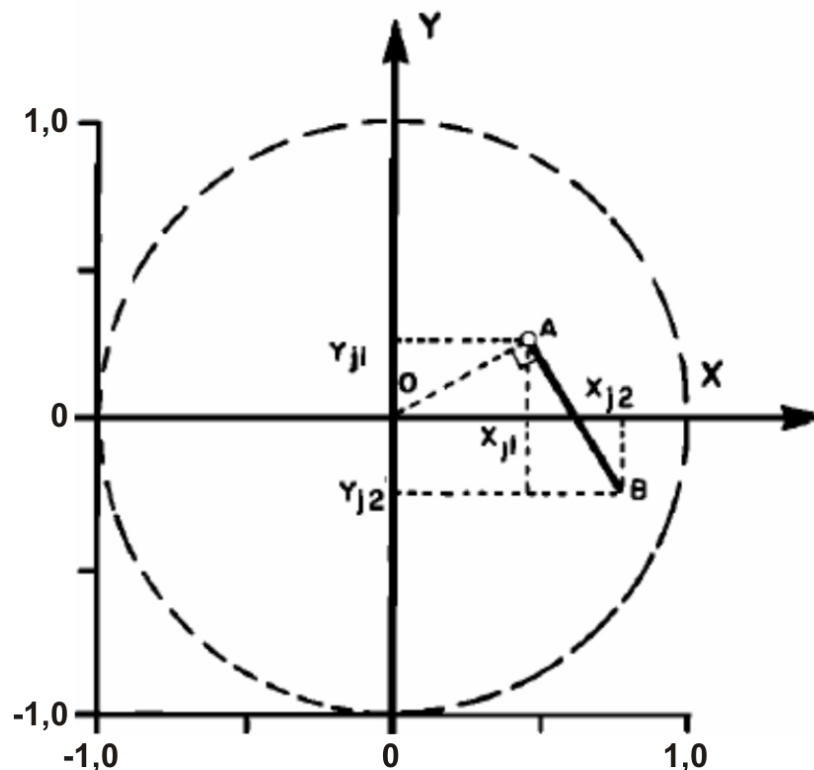
C_{jk} est le vecteur propre entre la station j et la composante principale

λ_k est la valeur propre de la composante principale k

« Vecteur propre » et « valeur propre » sont des termes de mathématiques. « Propre » signifie caractéristique ou inné. Les vecteurs propres qui ont les valeurs propres les plus grandes correspondent aux dimensions qui ont la corrélation la plus forte dans l'ensemble de données. Les résultats d'une ACP sont les coefficients de corrélation entre les stations et les composantes principales. La méthode d'analyse multivariée ACP part du principe que les stations dont les coefficients de corrélation des premières composantes principales sont similaires peuvent être regroupées parce qu'elles ont un certain degré d'homogénéité statistique. Le nombre de composantes principales à étudier dépend généralement de la variance totale expliquée souhaitée.

Dans l'ACP, on utilise des représentations graphiques, car le simple examen de tableaux permet difficilement de repérer les stations homogènes. Les résultats sont habituellement présentés dans le diagramme tridimensionnel dans lequel chaque axe est une composante principale. La figure B3.1 illustre une autre méthode, peut-être plus significative, qui peut être utilisée pour la représentation graphique des résultats d'une ACP. Sur la figure, une station j est représentée par le vecteur AB dans le plan des composantes principales 2 et 3.

Figure B3.1 : Représentation graphique du coefficient de corrélation de la première composante principale dans le plan des composantes principales 2 (axe des x) et 3 (axe des y)⁵



Les coordonnées des points A et B s'expriment comme suit :

Équations B3.3 et B3.4 : Points pour le vecteur AB⁶

Équation B3.3 :

$$\text{Point A} = (X_{j1}, Y_{j1}) = (C_{j2}\lambda_2^{1/2}, C_{j3}\lambda_3^{1/2})$$

Équation B3.4 :

$$\text{Point B} = (X_{j2}, Y_{j2}) = \left(X_{j1} \pm \frac{C_{j1}\lambda_1^{1/2}}{[1 + (X_{j1}/Y_{j1})^2]^{1/2}}, Y_{j1} - (X_{j1}/Y_{j1})(X_{j2} - X_{j1}) \right)$$

Nota : Toutes les variables ont déjà été définies.

La figure montre que, pour respecter l'orthogonalité des composantes principales, le vecteur AB est tracé perpendiculairement au vecteur OA, qui représente les corrélations multiples entre la station j et la première composante principale. Toutes les composantes principales peuvent être représentées de cette façon. Sur cette figure, le cercle centré sur l'origine représente des coefficients de corrélation multiples égaux à 1. Lorsque tous les vecteurs qui représentent chaque station d'un réseau sont tracés, on reconnaît les stations homogènes au peu de distance qui les séparent les unes des autres dans le diagramme.

Les auteurs de l'étude sur la rivière Eaton, décrite ici dans la section 2.2, ont ajouté une étape à leur ACP, appelée méthode Varimax, qui définit davantage le groupage des stations. La méthode Varimax redistribue la variance totale expliquée au moyen d'une rotation des axes principaux⁷. La méthode d'ACP décrite ici ne comprend pas la méthode Varimax, mais son application est décrite dans Morin et coll. (1979). (À l'annexe C, section *Sources d'information*, sous-section *Méthodes d'évaluation*, voir sous *Analyses multivariées*).

Analyse typologique

L'analyse typologique (AT) est une technique utilisée pour regrouper les stations similaires (p.ex., les grappes de stations à classer dans diverses catégories hydrologiques ou météorologiques). L'AT peut servir à vérifier si toutes les régions géographiques sont représentées dans un réseau⁸. On trouve plusieurs méthodes typologiques dans la littérature. L'approche hiérarchique présentée ici est dite « méthode du lien moyen ». Sa procédure (son algorithme) peut se résumer comme suit⁹ :

- 1) Définir la mesure de similarité entre toutes les paires de groupes de stations où une station donnée n'est qu'un cas particulier d'un groupe. Les mesures de similarité sont représentées par une matrice inférieure avec diagonale des valeurs de similarité entre toutes les paires possibles de stations. La mesure de similarité se définit comme suit :

- 2) Identifier les deux groupes, A et B , où le r_{XY} est un maximum, et remplacer A et B par un nouveau groupe C composé des stations du groupe A ou B ou des groupes A et B (le groupe C désigne l'union des groupes A et B ou, mathématiquement, $C = A \cup B$).
- 3) Pour chaque groupe non compris dans le groupage fait à l'étape 2, calculer les nouvelles valeurs de r_{XC} comme suit :
- 4) À l'aide des valeurs de similarité actualisées, répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un seul groupe.

Équation B3.5 : Mesure de similarité r_{XY}

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^{n_X} \sum_{j=1}^{n_Y} r_{ij}}{n_X n_Y}$$

Où

r_{XY} est la mesure de similarité entre toutes les paires de groupes où une station donnée n'est qu'un cas particulier d'un groupe

r_{ij} est le coefficient de corrélation entre les stations i et j

X est un groupe de stations

Y est un autre groupe de stations

i est une station du groupe de stations X

j est une station du groupe de stations Y

n_X est le nombre de stations dans le groupe de stations X

n_Y est le nombre de stations dans le groupe de stations Y

Équation B3.6 : Mesure de similarité r_{XC}

$$r_{XC} = \frac{\sum_{i=1}^{n_X} \sum_{j=1}^{n_C} r_{ij}}{n_X n_C}$$

Où

r_{XC} est la mesure de similarité regroupée entre le groupe X non compris dans l'étape 2 et le nouveau groupe C

r_{ij} est la mesure de similarité entre les stations i et j

X est un groupe de stations non comprises dans l'étape 2

C est le nouveau groupe de stations $= A \cup B$

i est une station du groupe de stations X

j est une station du groupe de stations C

n_X est le nombre de stations dans le groupe de stations X

n_C est le nombre de stations dans le groupe de stations C

La procédure ci-dessus est incluse dans les logiciels statistiques existants.

À chaque étape du processus de groupage, une station de chaque groupe est retenue. Cette station est identifiée dans une deuxième phase non incluse dans l'algorithme hiérarchique. Le choix d'une station donnée parmi un groupe de stations similaires peut reposer sur plusieurs facteurs, dont la longueur de la période de mesure d'une station, la qualité de ses données, les contraintes économiques, les utilisateurs et utilisations des données ainsi qu'une mesure de la similarité globale de la station aux autres stations du groupe. D'autres considérations sont débattues par les auteurs de l'évaluation du réseau hydrométrique¹⁰.

Une matrice de similarité peut être utilisée pour examiner la polyvalence des données hydrométriques. Cette matrice permet d'examiner différentes composantes des mesures hydrométriques, comme les données sur le débit faible (p. ex., débits annuels faibles), les données sur le débit moyen (p. ex., débits annuels moyens) et les données sur le débit élevé (p. ex., débits journaliers moyens maximaux). La matrice de similarité se définit comme suit :

Équation B3.7 : Matrice de similarité

$$r_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w^k r_{ij}^k$$

Où

r_{ij} est la mesure de la matrice de similarité entre les stations i et j

r_{ij}^k est la corrélation entre les stations i et j pour la composante de similarité k

w^k est une pondération de la composante k qui reflète l'importance relative de cette composante

K est le nombre de composantes incluses dans la similarité composite de la paire de stations

i et j sont les stations faisant l'objet d'une analyse des similarités

3.2 LES MÉTHODES D'ANALYSES MULTIVARIÉES EN DÉTAIL

Analyse en composantes principales

La figure B3.2 résume les étapes de l'ACP.

Figure B3.2 : Procédure à suivre pour l'ACP

ÉTAPES		
Étape 1	Établir les buts de la surveillance et les critères d'évaluation.	
	▼	
Étape 2	Sélectionner le ou les réseaux de surveillance à évaluer et le ou les paramètres à utiliser dans l'analyse (p. ex., les précipitations).	
	▼	
Étape 3	Examiner et compiler des données de surveillance historiques pour les paramètres choisis.	
	▼	
Étape 4	Effectuer l'ACP comme suit :	
	▼	
	Étape 4a	Déterminer la composante principale, l'axe pour lequel la somme des carrés des projections des points sur cet axe est maximale.
		▼
	Étape 4b	Calculer les coefficients de corrélation entre les stations et la composante principale.
		▼
	Étape 4c	Calculer la variance expliquée pour la composante principale.
		▼
	Étape 4d	Déterminer le prochain axe en projetant les points sur un plan qui est orthogonal par rapport à la composante principale actuelle (ou axe).
		▼
	Étape 4e	Répéter les étapes 4a à 4d pour chacune des composantes principales suivantes (d'ordre 2, 3, etc.) jusqu'à ce que la variance totale expliquée atteigne un niveau acceptable.

ÉTAPES		
		▼
	Étape 4f	Produire une représentation graphique des résultats
		▼
	Étape 4g	(Facultative) Transposer les limites de confiance sur le diagramme
		▼
	Étape 4h	(Facultative) Effectuer une rotation de l'axe pour redistribuer la variance totale expliquée
		▼
	Étape 4i	Identifier les stations homogènes
		▼
Étape 5	Sélectionner les stations représentatives	
		▼
Étape 6	Faire des recommandations sur les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques	

Étape 1 – Établir les buts de la surveillance et les critères d'évaluation : Les buts de la surveillance comprennent en général la détection des tendances et l'évaluation de l'efficacité des stratégies de gestion aux fins d'adaptation. Ils influent aussi sur le choix des critères d'évaluation à utiliser dans l'analyse. La méthode d'ACP décrite ici permet d'identifier les groupes de stations dont les données ont des comportements similaires et de repérer les stations possiblement redondantes d'un réseau de surveillance existant.

Étape 2 – Sélectionner le ou les réseaux de surveillance à évaluer et le ou les paramètres à utiliser dans l'analyse (p. ex., précipitations) : Identifier le ou les réseaux de surveillance à évaluer en fonction des buts de la surveillance définis à l'étape 1. Sélectionner le ou les paramètres à utiliser dans l'analyse (p. ex., précipitations) Le choix des paramètres dépendra à la fois des buts de la surveillance et des critères d'évaluation établis à l'étape 1.

Étape 3 – Examiner et compiler des données de surveillance historiques pour les paramètres choisis : L'examen et la compilation des données paramètres disponibles fourniront de l'information sur les ensembles de données disponibles, la période de mesure et la couverture spatiale du ou des paramètres choisis. (*Nota* : Une partie de cette information a peut-être déjà été recueillie pour établir les critères d'évaluation de l'étape 1.) Il serait utile à ce stade d'avoir un plan montrant l'emplacement des stations disponibles. Les données requises pour analyser le ou les paramètres choisis peuvent être compilées sous forme de base de données ou de tableurs.

Étape 4 - Effectuer l'ACP comme suit :

Étape 4a - Déterminer la composante principale, l'axe pour lequel la somme des carrés des projections des points sur cet axe est maximale : Déterminer la composante principale à l'aide de l'équation B3.1. On utilise à cette fin un logiciel statistique avancé d'ACP.

Étape 4b - Calculer les coefficients de corrélation entre les stations et la composante principale : Les coefficients de corrélation entre les stations et la composante principale se calculent à l'aide du logiciel d'ACP (équation B3.2).

Étape 4c - Calculer la variance expliquée pour la composante principale : La variance expliquée pour la composante principale se calcule à l'aide du logiciel d'ACP.

Étape 4d – Déterminer le prochain axe en projetant les points sur un plan qui est orthogonal par rapport à l'axe actuel : Les points sont projetés sur un plan qui est orthogonal par rapport à l'axe actuel pour déterminer la prochaine composante principale.

Étape 4e – Répéter les étapes 4a à 4d pour chacune des composantes principales suivantes (d'ordre 2, 3, etc.) jusqu'à ce que la variance totale expliquée atteigne un niveau acceptable. Le niveau acceptable reste à définir.

Étape 4f – Produire une représentation graphique des résultats : Les résultats sont habituellement présentés dans un diagramme tridimensionnel où chaque axe est une composante principale. L'autre méthode pouvant être utilisée pour illustrer visuellement les résultats d'une ACP est présentée à la section 3.1. D'autres renseignements sont fournis par les chercheurs qui ont utilisé l'ACP dans l'étude des réseaux pluviométriques¹¹.

Étape 4g (facultative) – Transposer les limites de confiance sur le diagramme : Transposer sur le diagramme une limite de confiance de 80 % (ou autre). D'autres renseignements sont fournis par les chercheurs qui ont utilisé l'ACP dans l'étude des réseaux pluviométriques¹².

Étape 4h (facultative) – Effectuer une rotation de l'axe pour redistribuer la variance totale expliquée : En effectuant une rotation de l'axe des composantes principales pour redistribuer la variance totale entre les axes principaux, il est possible d'accroître l'objectivité du processus de groupage. Cette rotation peut se faire à l'aide de la méthode Varimax.

Étape 4i – Identifier les stations homogènes : Les groupes de stations similaires (homogènes) sont identifiés dans un tableau des coefficients de corrélation et des représentations graphiques.

Étape 5 – Sélectionner les stations représentatives : Avant de réduire le nombre de stations d'un réseau, il faut identifier les stations qui sont représentatives. On peut tenir compte à cette fin de l'emplacement géographique et des conditions locales.

Étape 6 – Faire des recommandations sur les réseaux de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques : Des recommandations sommaires concernant des groupes de stations homogènes potentiels sont formulées en fonction des buts de la surveillance

et des critères d'évaluation établis à l'étape 1. L'ACP peut être combinée à d'autres méthodes d'évaluation des réseaux de surveillance.

ACP du réseau pluviométrique de la rivière Eaton

L'ACP a été appliquée au réseau pluviométrique de la rivière Eaton dans les Appalaches québécoises. Dans leur publication, Morin et coll. (1979) présentent un exemple dans lequel quatre-vingt (80) séries de données sur les précipitations cumulées en 10 jours ont été analysées pour le printemps (et l'été). Ces séries pluviométriques avaient été enregistrées par 14 stations pendant 10 ans, soit entre 1966 à 1975 (à raison de huit séries de 10 jours par année entre le 75^e et le 154^e jour de l'année). L'exemple a été créé par les auteurs à titre indicatif. Le tableau B3.1 présente les résultats des coefficients de corrélation pour le printemps.

Tableau B3.1 : Coefficients de corrélation entre les composantes principales et les stations, calculés à partir de 80 séries pluviométriques de 10 jours au printemps – sans rotation de l'axe¹³

NUMÉRO DE LA STATION	COMPOSANTES PRINCIPALES			COEFFICIENT DE CORRÉLATION MULTIPLE
	1	2	3	
1	0,887	0,304	0,260	0,974
2	0,945	-0,116	0,184	0,970
3	0,937	0,000	-0,186	0,956
4	0,907	-0,327	-0,022	0,965
5	0,948	0,146	-0,028	0,960
6	0,940	-0,162	0,177	0,971
7	0,945	0,072	0,039	0,949
8	0,945	-0,008	-0,121	0,953
9	0,950	0,043	-0,068	0,954
10	0,968	0,063	-0,015	0,971
11	0,952	-0,170	0,111	0,973
12	0,928	0,037	-0,209	0,952
13	0,971	0,051	-0,123	0,980
14	0,968	0,069	0,017	0,971
Valeur propre	12,244	0,310	0,262	
Variance expliquée (%)	88,9	2,2	1,9	
Variance totale expliquée (%)	88,9	91,1	93,0	

Dans l'exemple ci-dessus, il a suffi de trois composantes pour expliquer 93 % de la variance totale. La figure B3.3 est une représentation graphique des résultats. Les chercheurs l'ont créée parce que la lecture des résultats présentés dans le tableau B3.1 leur permettait difficilement d'identifier les stations possédant un comportement similaire.

Dans cette figure, les extrémités externes des vecteurs représentant les coefficients de corrélation multiple sont relativement proches du cercle des corrélations parfaites. Ceci montre que trois composantes sont amplement suffisantes pour expliquer la variabilité aux sites des stations.

Les chercheurs ont identifié quatre groupes de stations similaires en comparant les positions relatives des vecteurs représentant les stations : groupe 1 (station 1); groupe 2 (stations 5, 7, 10 et 14); groupe 3 (stations 3, 8, 9, 12 et 13) et groupe 4 (stations 2, 4, 6 et 11). Il convient de noter que ce groupage est quelque peu arbitraire puisque le réseau aurait pu être divisé en groupes plus petits. Le groupage est fondé sur le jugement des professionnels et devrait être fait en fonction des objectifs de surveillance régionale identifiés.

Les auteurs de l'étude sur la rivière Eaton ont utilisé la méthode Varimax (dont il est question à la fin de la section 3.1) pour expliquer davantage leurs groupages. Dans la méthode Varimax, une rotation des axes principaux est effectuée. Le tableau B3.2 présente les coefficients de corrélation entre les nouveaux axes principaux et les stations. Dans le tableau, le coefficient de corrélation le plus élevé entre chacune des stations a été marqué d'un astérisque. À partir des coefficients de corrélation marqués d'un astérisque, on peut identifier trois groupes : le groupe A (station 1), le groupe B (stations 3, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13 et 14) et le groupe C (stations 2, 4, 6 et 11). Le groupe B est en fait une combinaison des groupes 2 et 3 susmentionnés et pourrait également être divisé en deux sous-groupes. Ces trois groupes sont aussi représentés dans la figure B3.3.

Figure B3.3 : Représentation graphique de l'exemple d'ACP¹⁴

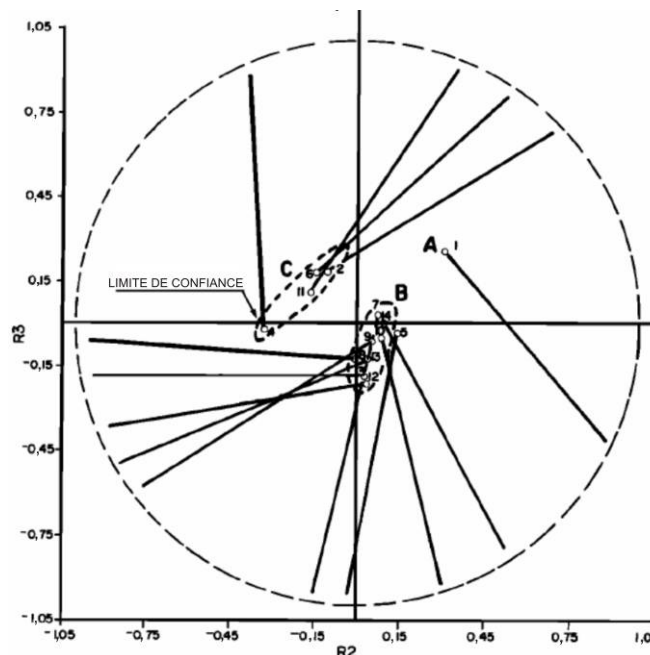


Tableau B3.2 : Coefficients de corrélation entre les composantes principales et les stations, calculés à partir de 80 séries pluviométriques de 10 jours au printemps – après rotation Varimax des axes avec normalisation de Kaiser¹⁵

NUMÉRO DE LA STATION	COMPOSANTES PRINCIPALES		
	1	2	3
1	0,408	0,359	0,808*
2	0,430	0,689*	0,531
3	0,727*	0,485	0,387
4	0,527	0,766*	0,260
5	0,639*	0,427	0,575
6	0,423	0,719*	0,496
7	0,573*	0,502	0,567
8	0,681*	0,515	0,423
9	0,653*	0,494	0,489
10	0,628*	0,506	0,542
11	0,480	0,712*	0,458
12	0,745*	0,444	0,393
13	0,709*	0,485	0,473
14	0,603*	0,511	0,564

Nota : Le coefficient de corrélation le plus élevé entre chacune des stations est marqué d'un astérisque (*).

Les auteurs de l'étude du réseau pluviométrique de la rivière Eaton ont déterminé les limites de confiance, représentées par des ellipses sur la figure B3.3. Des limites de confiance de 80 % ont donc été établies pour les groupes B et C, ce qui a permis de déterminer que la station 5 ne peut pas être considérée comme faisant partie du groupe B. On note aussi que les ellipses ont une forme allongée. Lorsque tel est le cas, il est préférable de garder plus d'une station pour représenter le groupe. Les auteurs de l'étude estiment qu'il peut être utile de prendre en compte l'emplacement géographique pour établir le groupage final des stations. L'étude a montré quelles stations étaient redondantes et pourraient être fermées au besoin.

Analyse typologique

Les étapes de l'analyse typologique sont résumées dans la figure B3.4.

Figure B3.4 : Procédure à suivre pour l'AT

ÉTAPES		
Étape 1	Établir les buts de la surveillance et les critères d'évaluation	
	▼	
Étape 2	Sélectionner le ou les réseaux de surveillance à évaluer et le ou les paramètres à utiliser dans l'analyse (p. ex., le débit)	
	▼	
Étape 3	Examiner et compiler des données de surveillance historiques pour les paramètres choisis	
	▼	
Étape 4	Effectuer l'AT :	
	▼	
	Étape 4a	Calculer la mesure de similarité entre toutes les paires de groupes de stations
		▼
	Étape 4b	(Facultative) Si plus d'une caractéristique de débit est étudiée, calculer la matrice de similarité pour les composantes multiples (ou caractéristique de débit)
		▼
	Étape 4c	Repérer les deux groupes ayant la mesure de similarité la plus élevée et les combiner en un seul groupe
		▼
	Étape 4d	Calculer la mesure de similarité globale entre tous les groupes qui n'ont pas été combinés à l'étape 4c et le nouveau groupe formé à l'étape 4c
		▼
	Étape 4e	Répéter les étapes 4c et 4d jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un seul groupe
		▼
	Étape 4f	Dessiner le dendrogramme à partir du groupage des stations obtenu aux étapes 4a à 4e
		▼
	Étape 4g	Repérer les points de rupture sur le dendrogramme

ÉTAPES		
		▼
	Étape 4h	Déterminer le nombre de stations à conserver dans le réseau rationalisé
		▼
Étape 5	Identifier les stations qui pourraient être conservées dans le réseau de surveillance	
		▼
Étape 6	Faire des recommandations sur les stations à conserver dans le réseau de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques	

Étape 1 – Établir les buts de la surveillance et les critères d'évaluation : Les buts de la surveillance comprennent en général la détection des tendances et l'évaluation de l'efficacité des stratégies de gestion aux fins d'adaptation. Ils influent aussi sur le choix des critères d'évaluation à utiliser dans l'analyse.

Étape 2 – Sélectionner le ou les réseaux de surveillance à évaluer et le ou les paramètres à utiliser dans l'analyse (p. ex., débit) : Identifier le ou les réseaux de surveillance à évaluer en fonction des buts de la surveillance définis à l'étape 1. Sélectionner les caractéristiques de débit pour lesquelles des similarités seront définies (débit annuel moyen, débit annuel faible, etc.). Les débits annuels extrêmes et moyens sont les caractéristiques le plus souvent utilisées. Par exemple, si dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques l'approvisionnement en eau est une préoccupation, alors le débit annuel moyen pourra présenter un intérêt. Par contre, si c'est la prévision des crues qui est l'enjeu, alors on pourra s'intéresser davantage aux débits de pointe annuels. Le choix des paramètres dépendra à la fois des buts de la surveillance et des critères d'évaluation établis à l'étape 1.

Étape 3 – Examiner et compiler des données de surveillance historiques pour les paramètres choisis : L'examen et la compilation des données paramètres disponibles fourniront de l'information sur les ensembles de données disponibles, la période de mesure et la couverture spatiale du ou des paramètres choisis. (*Nota* : Une partie de cette information a peut-être déjà été recueillie pour établir les critères d'évaluation de l'étape 1.) Il serait utile à ce stade d'avoir un plan montrant l'emplacement des stations disponibles. Les données requises pour analyser le ou les paramètres choisis peuvent être compilées sous forme de base de données ou de tableur.

Étape 4 – Effectuer l'analyse typologique : Effectuer l'AT à l'aide d'un logiciel statistique, comme suit :

Étape 4a – Calculer la mesure de similarité entre toutes les paires de groupes de stations : La mesure de similarité entre toutes les paires de groupes de stations se calcule à l'aide de l'équation B3.5.

Étape 4b (facultative) – Si plus d'une caractéristique de débit est étudiée, calculer la matrice de similarité pour les composantes multiples (ou caractéristique de débit) : Si plus d'une caractéristique de débit est étudiée, calculer la matrice de similarité pour les composantes multiples (ou caractéristique de débit) à l'aide de l'équation B3.7.

Étape 4c – Repérer les deux groupes ayant la mesure de similarité la plus élevée et les combiner en un seul groupe.

Étape 4d – Calculer la mesure de similarité globale entre tous les groupes qui n'ont pas été combinés à l'étape 4c et le nouveau groupe formé à l'étape 4c : Calculer la mesure de similarité globale entre tous les groupes qui n'ont pas été combinés à l'étape 4c et le nouveau groupe formé à l'étape 4a ou 4b (selon le scénario).

Étape 4e – Répéter les étapes 4c et 4d jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un seul groupe.

Étape 4f – Dessiner le dendrogramme à partir du groupage des stations obtenu aux étapes 4a à 4e : Dessiner le dendrogramme (ou arbre) à partir du groupage des stations obtenu aux étapes 4a à 4e.

Étape 4g – Repérer les points de rupture sur le dendrogramme : Repérer les points de rupture sur le dendrogramme. On peut obtenir des points de rupture chaque fois que les stations sont regroupées pour former des grappes dans le dendrogramme.

Étape 4h – Déterminer le nombre de stations à conserver dans le réseau rationalisé : Déterminer le nombre de stations à conserver dans le réseau rationalisé selon les points de rupture et les buts de la surveillance identifiés à l'étape 1.

Étape 5 – Identifier les stations qui pourraient être conservées dans le réseau de surveillance : Même si cette méthode permet d'identifier les stations redondantes, elle ne permet pas de les différencier. Dans une démarche de rationalisation, il faut donc utiliser des critères externes pour choisir les stations à conserver. On peut utiliser à cette fin les critères énumérés à l'étape 1.

Étape 6 – Faire des recommandations sur les stations à conserver dans le réseau de surveillance aux fins de l'adaptation aux changements climatiques : Des recommandations sommaires concernant les stations à conserver dans un réseau de surveillance sont formulées en fonction des buts de la surveillance et des critères d'évaluation établis à l'étape 1. L'AT peut être combinée à d'autres méthodes statistiques, par exemple les méthodes de réduction de la variance ou de réduction des erreurs, pour identifier la ou les stations qui fournissent le plus d'information.

Analyse typologique, exemple du débit de la rivière Pembina

Cette méthode a été appliquée aux données sur le débit du bassin versant de la rivière Pembina, qui s'étend des deux côtés de la frontière qui sépare le Manitoba (Canada) du Dakota du Nord (États-Unis)¹⁶.

Au total, 22 stations hydrométriques ont été analysées pour identifier les grappes de stations qui entrent dans diverses catégories de données hydrométriques. Les trois scénarios suivants ont été étudiés :

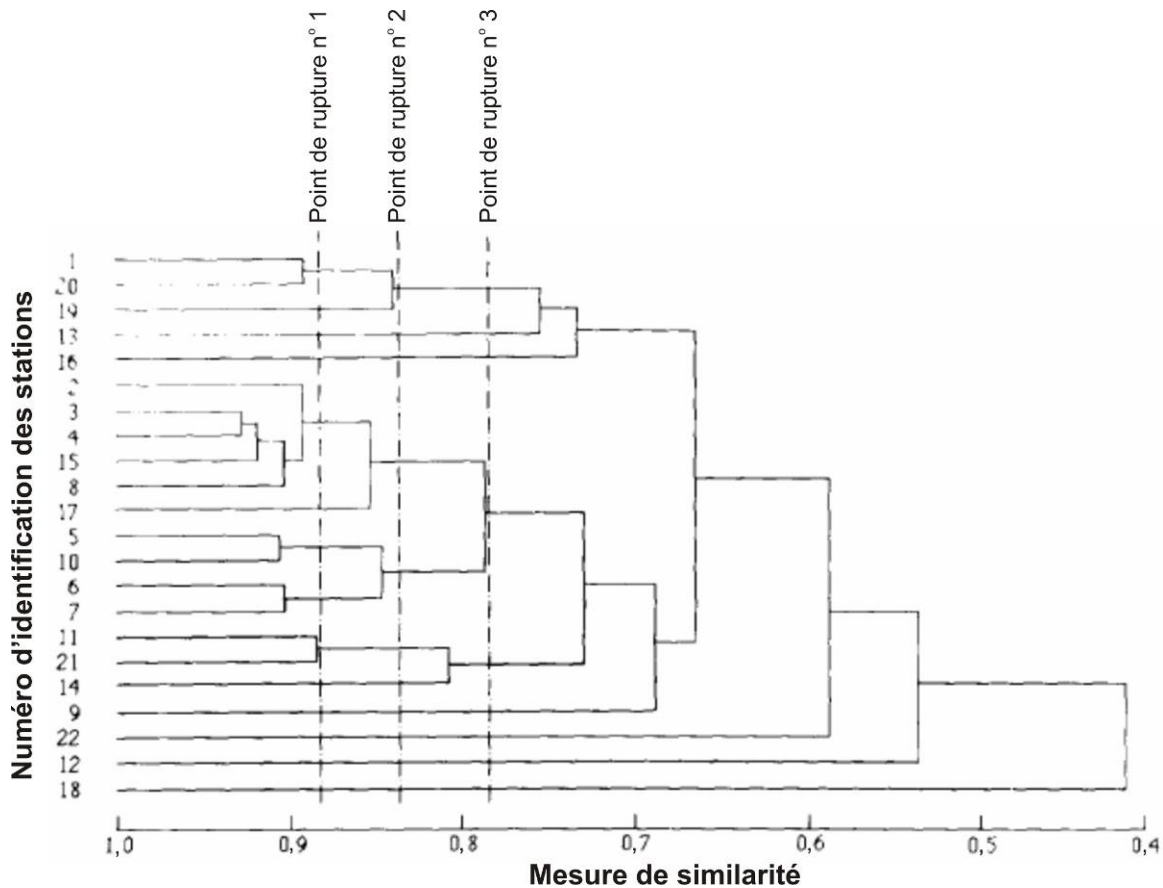
Scénario A : Similarité des extrêmes (débit de pointe) seulement. Ce scénario pourrait s'appliquer aux réseaux de surveillance conçus pour améliorer la prévision des crues et leur analyse à des fins d'adaptation aux changements climatiques.

Scénario B : Similarité des valeurs saisonnières (débits annuels) seulement. Ce scénario pourrait s'appliquer aux réseaux de surveillance conçus pour aborder les problèmes d'approvisionnement en eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques.

Scénario C : Similarité des extrêmes et des valeurs saisonnières pondérés de façon égale. Ce scénario pourrait s'appliquer aux réseaux de surveillance conçus pour répondre à divers besoins aux fins de l'adaptation aux changements climatiques.

La figure B3.5 est le dendrogramme obtenu pour la similarité des débits de pointe annuels (scénario A). Elle montre l'ordre dans lequel les stations ont été successivement groupées (mises en grappes) à diverses valeurs de similarité. Chaque ligne horizontale du diagramme représente un groupe d'au moins une station pouvant se trouver n'importe où sur l'axe des mesures de similarité. C'est à partir de ces groupes qu'on peut sélectionner les stations représentatives. Trois points de rupture sont identifiés sur la figure B3.5. Ces points de rupture peuvent servir à déterminer le nombre de stations de chaque groupe et à les identifier en suivant l'arborescence jusqu'à l'extrême gauche, où les numéros de station sont indiqués. Par exemple, si l'on suit la première ligne horizontale du haut qui croise la ligne verticale appelée point de rupture n° 2, on peut identifier une grappe de trois stations (stations 1, 20 et 19). De gauche à droite, le diagramme montre comment les petites grappes finissent par entrer dans des grappes plus volumineuses. Par exemple, au point de rupture n° 3, la grappe de stations 5, 10, 6 et 7 rejoint la grappe de stations 3, 4, 15, 8, 2 et 17.

Figure B3.5 : Exemple de dendrogramme des débits de pointe annuels¹⁷



Dans l'exemple ci-dessus (figure B3.5), le point de rupture n° 3 pourrait être utilisé si l'on veut conserver 9 des 22 stations puisqu'il y a 9 lignes horizontales (ou grappes) qui croisent la ligne verticale du point de rupture n° 3. Plusieurs de ces grappes se composent d'une seule station (stations 13, 16, 9, 22, 12 et 18), deux se composent de trois stations (stations 1, 20 et 19; et stations 11, 21 et 14) et la plus grande compte 10 stations (2, 3, 4, 15, 8, 17, 5, 10, 6 et 7).

Dans le même exemple, si on souhaite conserver neuf stations (point de rupture n° 3), alors il faudrait choisir une station dans chacune des grappes composées de plus d'une station. Les auteurs de l'étude ont utilisé une démarche de rationalisation qui tient compte de considérations externes pour la sélection de stations représentatives. Voici quelques-uns des critères utilisés¹⁸ :

- 1) Similarité globale aux autres stations de la grappe. La similarité globale peut être donnée par la corrélation de chaque station avec la première composante principale de la matrice de similarité pour les stations de la grappe.
- 2) Nombre et type d'utilisation des données à la station.
- 3) Utilisateurs uniques des données.
- 4) Durée de la période de mesure.
- 5) Qualité des données à une station.

- 6) Zone de drainage associée à la station et emplacement dans le bassin versant par rapport aux autres stations déjà choisies parmi d'autres grappes.
- 7) Caractéristique temporelle de la station (saisonnière ou annuelle).
- 8) Considérations liées à la régulation du débit (station avec ou sans régulation).
- 9) Couverture spatiale des sites.

Le tableau B3.3 résume les conclusions de l'étude pour le scénario A.

Tableau B3.3 : Résumé de la sélection des stations pour le scénario A¹⁹

N° de point de rupture	Mesure de similarité	N° de grappe	Stations dans la grappe	Station sélectionnée	Raisons	Stations restantes
1	0,884	1	1, 20	1	1 a l'enregistrement le plus long et est la plus en aval	14
		2	11, 21	21	21 est active	
		3	6, 7	7	7 est active et a un enregistrement plus long	
		4	3, 4, 15, 8, 2	4	4 donne de meilleures prévisions des données des autres stations; B est le seul utilisateur; emplacement de la station	
		5	5, 10	10	10 est une station tributaire; le bras principal est couvert par d'autres stations	
2	0,840	1	1, 20, 19	1	1 a l'enregistrement le plus long et est la plus en aval	11
		2	11, 21	21	21 est active	
		3	3, 4, 15, 8, 2, 17	4	4 donne de meilleures prévisions des données des autres stations; B est le seul utilisateur; emplacement de la station	
		4	5, 10, 6, 7	7	7 a une utilisation unique; plus grand nombre d'utilisateurs; deuxième rang pour la valeur prédictive	

N° de point de rupture	Mesure de similarité	N° de grappe	Stations dans la grappe	Station sélectionnée	Raisons	Stations restantes
3	0,787	1	1, 20, 19	1	1 a l'enregistrement le plus long et est la plus en aval	9
		2	11, 21, 14	14	14 est à l'intérieur du bassin versant	
		3	3, 4, 15, 8, 2, 17, 5, 10, 6, 7	4	4 se trouve sur le bras principal, dans une section non jaugée de la rivière; B est un utilisateur unique; premier rang pour la valeur prédictive	

3.3 RESSOURCES REQUISES

Les méthodes d'analyses multivariées nécessitent les ressources suivantes :

Données et logiciels :

- Diverses données doivent être utilisées dans les méthodes multivariées, mais on privilégie actuellement les données météorologiques (précipitations) dans le cas de l'ACP et les données hydrométriques (débit) dans le cas de l'AT. Les besoins en matière de données varient selon les objectifs de surveillance identifiés.
- La méthode nécessite un tableur ou un logiciel de base de données simple pour la gestion de données et un logiciel d'appui relativement avancé pour l'ACP et le calcul des groupages. Si l'on utilise un logiciel statistique, celui-ci doit permettre l'ACP ou l'AT. Un logiciel SIG pourrait être utilisé pour la présentation des résultats.

Niveau d'effort et de savoir-faire :

- Un savoir-faire et des compétences multiples en analyse et en statistique sont requis, ainsi que les compétences et le savoir-faire techniques pour utiliser les logiciels nécessaires. Pour procéder à la sélection finale des stations, il faut connaître le ou les réseaux et pouvoir porter un jugement professionnel. Des compétences en SIG pour la présentation des résultats pourraient être requises.

3.4 APPLICABILITÉ, LIMITES ET SOLUTIONS

L'analyse multivariée est une bonne méthode à utiliser pour identifier les stations homogènes d'un réseau composé d'un grand nombre de stations. L'ACP a été appliquée à des stations pluviométriques pendant un intervalle de temps précis afin de définir les groupes de stations partageant une météorologie semblable. Elle peut aussi servir à identifier les stations redondantes. L'AT a été appliquée à des données hydrométriques afin d'identifier les stations homogènes dans un processus de rationalisation visant à réduire le nombre de stations hydrométriques. Elle peut servir à identifier les régions qui sont mal représentées et celles qui comportent des stations redondantes. L'AT n'identifiera pas explicitement le nombre optimal de stations à conserver dans un réseau et ne fournira pas non plus l'information requise pour sélectionner les stations redondantes dans une région. Il faut donc l'associer à des méthodes de réduction de la variance ou de réduction des erreurs (c'est-à-dire, réduction de la variance, acquisition de données, méthodes géostatistiques et réduction des erreurs; à l'annexe C, section *Sources d'information*, voir sous *Méthodes d'évaluation*) pour déterminer quelles stations fournissent le plus d'information et lesquelles pourraient être éliminées²⁰.

Les méthodes d'analyses multivariées s'appliquent à différentes échelles (nationale, régionale ou locale) là où il y a suffisamment de stations. Les réseaux de stations de mesure homogènes se caractérisent par des coefficients de corrélation élevés dans le cas de l'ACP et par des mesures de similarité élevées dans le cas de l'AT.

3.5 EN RÉSUMÉ

Les méthodes d'analyses multivariées sont des techniques statistiques d'usage assez courant qui peuvent servir à identifier les stations homogènes d'un réseau (celles qui ont enregistré des données similaires au fil du temps) ou à déterminer comment réduire ou accroître le nombre de stations d'un réseau. Elles permettent de vérifier si des réseaux existants peuvent assurer la surveillance nécessaire aux stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

Ces méthodes reposent sur des données couramment accessibles et de grands ensembles de données, par exemple des registres pluviométriques et hydrométriques. Elles nécessitent un logiciel élémentaire de gestion de bases de données ou un tableur, ainsi qu'un logiciel statistique avancé. Des capacités analytiques et statistiques de même niveau sont nécessaires pour la réalisation de l'analyse. Les concepts peuvent s'appliquer à différentes échelles, selon le nombre de stations disponibles.

Le tableau B3.4 résume les besoins en matière de données (type, quantité, complexité), de savoir-faire, d'effort initial et de logiciels.

Tableau B3.4 : Résumé des caractéristiques des méthodes multivariées

CARACTÉRISTIQUES	BESOINS
Données requises	Données diverses; généralement utilisées avec des données météorologiques (précipitations) ou hydrométriques (débit).
Logiciels	Logiciel d'appui de base pour la gestion de données et logiciel statistique avancé permettant l'ACP et l'AT; un SIG serait un atout pour la présentation des résultats.
Savoir-faire	Multiples compétences analytiques et statistiques; jugement professionnel et connaissance du ou des réseaux pour effectuer la sélection finale des stations; compétences en SIG pour la présentation des résultats.
Applicabilité	Réseaux climatologiques, hydrologiques ou autres
Échelle	Échelles multiples

NOTES EN FIN DE CHAPITRE

- ¹ G. Morin, J.-P. Fortin, W. Sochanska, J.-P. Lardeau et R. Charbonneau. 1979. « Use of principal component analysis to identify homogeneous precipitation stations for optimal interpolation », *Water Resources Research*, 15(6): 1841-1850.
- ² D. H. Burn et I.C. Goulter. 1991. « An approach to the rationalization of streamflow data collection networks », *J. Hydrol.*, 122: 71-91.
- ³ , L.I. Smith. 2002. « A tutorial on principal components analysis », séance de tutorat pour le cours COSC4053, 26 février 2002, département d'informatique de l'Université d'Otago, Nouvelle- Zélande, 26 p.
http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf
- ⁴ G. Morin, J.-P. Fortin, W. Sochanska, J.-P. Lardeau et R. Charbonneau. 1979. « Use of principal component analysis to identify homogeneous precipitation stations for optimal interpolation », *Water Resources Research*, 15(6): 1841-1850.
- ⁵ Ibid.
- ⁶ Ibid.
- ⁷ Morin et coll., 1979, citent les sources suivantes pour la présentation visuelle des résultats :
D. Duband. *Contrôle d'homogénéité des séries d'écoulement dans les Pyrénées, Reconstitution de données*, rapport interne, Électr. de France, Serv. énerg. et prévision, Grenoble, juin 1973.
et
D. Duband. *Analyse en composantes principales des séries pluviométriques des Alpes-Est Massif Central-Cévennes*, rapport interne, Électr. de France, Serv. énerg. et prévision, Grenoble, juillet 1974.
- ⁸ A.K. Mishra et P. Coulibaly. 2009. « Developments in hydrometric network design: A review », *Rev. Geohys.*, 47: RG2001, doi:10.1019/2007RG000243.
- ⁹ D'après D. H. Burn et I.C. Goulter. 1991. « An approach to the rationalization of streamflow data collection networks », *J. Hydrol.*, 122: 71-91.
et
I.T. Jolliffe. 1972. « Discarding variables in a principal component analysis. I: Artificial data », *Appl. Statist.*, 21: 160-173.
- ¹⁰ D. H. Burn et I.C. Goulter. 1991. « An approach to the rationalization of streamflow data collection networks », *J. Hydrol.*, 122: 71-91.
- ¹¹ G. Morin, J.-P. Fortin, W. Sochanska, J.-P. Lardeau et R. Charbonneau. 1979. « Use of principal component analysis to identify homogeneous precipitation stations for optimal interpolation », *Water Resources Research*, 15(6): 1841-1850.
- ¹² Ibid.
- ¹³ Ibid.
- ¹⁴ Ibid.
- ¹⁵ Ibid.
- ¹⁶ Ibid.

¹⁷ Ibid.

¹⁸ D. H. Burn et I.C. Goulter. 1991. « An approach to the rationalization of streamflow data collection networks », *J. Hydrol.*, 122: 71-91.

¹⁹ Ibid

²⁰ Ibid.

ANNEXE C

Documentation d'accompagnement

TABLE DES MATIÈRES

Annexe C : Documentation d'accompagnement

C.1	Glossaire des principaux concepts et définitions	C-3
C.2	Sources d'information	C-19
C.3	Descriptions d'autres méthodes de priorisation	C-24
C.4	Descriptions d'autres méthodes d'évaluation de réseau.....	C-32

Liste des tableaux

Tableau C1. Descriptions d'autres méthodes de priorisation

Tableau C2. Descriptions d'autres méthodes d'évaluation de réseau

C.1. GLOSSAIRE DES PRINCIPAUX CONCEPTS ET DEFINITIONS

Les termes suivants ont été définis aux fins du présent document :

Adaptation : Accommodation des systèmes naturels ou des systèmes humains aux stimuli climatiques réels ou prévus ou à leurs effets, afin d'en atténuer les inconvénients ou d'en exploiter les avantages. On distingue plusieurs sortes d'adaptation, notamment l'adaptation anticipatoire, autonome et planifiée¹.

Capacité d'adaptation : La totalité des possibilités, des ressources et des institutions propres à un pays, une région, une collectivité ou un groupe, permettant de mettre en œuvre des mesures efficaces d'adaptation¹.

Algorithme : Ensemble de règles opératoires propres à un calcul ou à un traitement informatique, définies en vue d'obtenir un résultat déterminé¹⁵.

Indice annuel d'humidité/d'aridité de Bagnouls et Gaussen (ou indice ombrothermique annuel) : Cet indice représente la somme, pour les 12 mois de l'année, de la différence entre la température mensuelle moyenne de l'air (en °C) multipliée par 2 et le total des précipitations mensuelles moyennes (en mm), le tout multiplié par la proportion des mois de l'année pendant lesquels le double de la valeur de la température (en °C) est supérieur à la valeur des précipitations (en mm)³.

Adaptation anticipative : Adaptation qui a lieu avant que les effets des changements climatiques soient observables⁴.

Aquifère : Couche de roche ou de sédiment contenant de l'eau et pouvant permettre le captage de l'eau; ce sont généralement des dépôts meubles ou du grès, du calcaire ou du granite. L'aquifère peut être « captif » ou « libre ». Un aquifère à nappe libre est alimenté directement par les précipitations locales et par les cours d'eau et les lacs avoisinants, le taux de recharge étant fonction de la perméabilité des roches et des sols susjacents^{4,5}.

Aridité (d'un sol ou d'un climat) : Insuffisance en eau résultant de la faiblesse (ou de l'absence) des précipitations et qui se traduit par la disparition de la végétation³¹.

Méthode de l'audit : Méthode d'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau qui conjugue une connaissance spécialisée des réseaux existants à une évaluation méthodique et détaillée des stations existantes et proposées selon des critères établis. Voir section B1 : *Méthode de l'audit*.

Adaptation autonome (ou spontanée) : Réaction aux changements climatiques survenant après coup; par exemple, l'adaptation spontanée de la végétation. Il est normal qu'un écosystème soit un peu « en retard » par rapport aux conditions du milieu¹.

Groupement à liens moyens : Méthode de groupage hiérarchique⁶.

Débit de base : Part de l'écoulement qui n'est pas attribuable au ruissellement direct des précipitations ni à la fonte des neiges et provient habituellement des nappes souterraines⁷.

Situation de départ (ou de référence) : Situation par rapport à laquelle un éventuel changement est mesuré. Il peut s'agir d'une « situation de départ actuelle », c.-à-d. de conditions actuelles observables, ou d'une « situation de départ future » correspondant à un ensemble projeté de conditions futures, à l'exception du principal facteur d'intérêt. D'autres interprétations des conditions de référence peuvent donner lieu à de multiples situations de départ¹.

Méthode d'évaluation économique de base (MEEB) : Méthode d'analyse conçue pour différencier des régions, notamment de grands ou de multiples bassins versants ou des écorégions, en fonction des différences relatives qui existent entre les services écosystémiques qu'elles fournissent. C'est l'une des méthodes qui servent à établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Voir la section 8 : *Méthode d'évaluation économique de base pour les services écosystémiques*.

Transfert de bénéfices : Application de valeurs monétaires issues d'une étude particulière à un autre cadre décisionnel, souvent dans une zone géographique autre que celle de l'étude d'origine⁸.

Vulnérabilité biophysique : voir *Vulnérabilité*.

Climat : Au sens étroit du terme, le climat désigne en général « le temps moyen » ou, plus précisément, une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers voire à des millions d'années. Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, la hauteur de précipitation et le vent. Dans un sens plus large, le climat désigne l'état du système climatique, y compris sa description statistique¹.

Changement climatique : Changement de l'état du climat qui peut être identifié (p. ex., à l'aide d'essais statistiques) par des changements de la moyenne ou de la variabilité de ses propriétés, et qui persiste pendant une période prolongée, typiquement des décennies, voire plus longtemps. Un changement climatique peut être dû à des processus internes normaux ou à des forces externes, ou à des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des terres. Il est à noter que la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) définit le terme comme tout « changement attribué directement ou indirectement à une activité humaine susceptible d'altérer la composition de l'atmosphère mondiale et qui vient s'ajouter à la variabilité naturelle du climat constatée au cours de périodes comparables ». La CCNUCC établit ainsi une distinction entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines susceptibles d'altérer la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat attribuable à des causes naturelles¹.

Adaptation aux changements climatiques : Voir *changement climatique* et *adaptation*.

Impacts (ou effets) des changements climatiques : Impacts des changements climatiques sur les systèmes naturels et les systèmes humains. Selon que l'on tient compte ou non de l'adaptation, on peut établir une distinction entre impacts potentiels et impacts résiduels¹.

Modèle climatique : Représentation numérique du système climatique basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et leurs processus, aussi bien d'interaction que de rétroaction, et qui tient compte de la totalité ou d'une partie de ses propriétés connues. Le système climatique peut être représenté par des modèles de complexité variable. Les modèles de circulation générale à couplage atmosphère-océan (MCGAO) fournissent une représentation d'ensemble du système climatique. Les modèles plus complexes incorporent des éléments chimiques et biologiques actifs¹.

Normale climatique : Calculs arithmétiques basés sur les valeurs observées pour un lieu donné au cours d'une période spécifiée et servant à décrire les caractéristiques climatiques du lieu. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) estime qu'une période de 30 ans suffit à éliminer les variations qui surviennent d'année en année. Aussi, la période climatologique standard de l'OMM utilisée pour le calcul des normales correspond à des périodes de 30 années consécutives (p. ex., du 1^{er} janvier 1901 au 31 décembre 1930) et devrait être mise à jour chaque décennie¹.

Projection climatique : Réponse calculée du système climatique à des scénarios d'émissions ou de concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols ou à des scénarios de forçage radiatif, souvent fondés sur des simulations établies à l'aide de modèles climatiques. Les projections climatiques reposent sur des hypothèses concernant, par exemple, l'évolution socio-économique et technologique future qui peut se produire ou non et, par conséquent, elles comportent un haut degré d'incertitude¹.

Scénario climatique : Représentation vraisemblable et souvent simplifiée du climat futur, fondée sur un ensemble cohérent et intrinsèquement homogène de relations climatiques et d'hypothèses concernant le forçage radiatif. Les scénarios climatiques sont généralement destinés à servir explicitement d'entrées pour des modèles d'impacts des changements climatiques. Un « scénario de changements climatiques » correspond à la différence entre un scénario climatique et le climat actuel¹.

Variabilité du climat : Voir *Variabilité naturelle du climat*

Grappe ou groupe : Sous-ensemble naturel d'une population utilisé en statistique à des fins d'échantillonnage ou d'analyse².

Analyse typologique (AT) : Méthode qui fait appel à des dendrogrammes (c.-à-d. des diagrammes en forme d'arbres) pour identifier les groupes de stations aux propriétés spatiales et temporelles similaires. C'est l'une des méthodes d'analyses multivariées utilisées pour évaluer les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Voir la section B3 : *Analyses multivariées*.

Dendrogramme (ou arbre de classification) : Représentation graphique qui comporte des ramifications semblables à celles d'un arbre, montrant comment les stations sont amalgamées successivement en groupes, ou grappes, à diverses valeurs de la mesure de similarité.

Limites de confiance (en statistique) : Terme de statistique désignant une paire de nombres qui prédit l'intervalle de valeurs dans lequel se trouve un paramètre particulier avec un niveau de confiance donné (probabilité).

Utilisation d'eau avec consommation : Quantité d'eau prélevée ou retenue d'une source (lac, cours d'eau ou aquifère) et qui est perdue ou non retournée à la source en raison de son intégration à un procédé ou produit. Certaines définitions incluent les pertes imputables à l'évaporation⁵.

Variables corrélées (en statistique) : Variables ayant un rapport réciproque ou un lien entre elles.

Coefficient de corrélation (en statistique) : Mesure de la corrélation entre deux ou plusieurs variables aléatoires, pouvant prendre des valeurs allant de -1 à +1¹⁵.

Coût-avantage : Désigne le rapport entre le coût d'une initiative et la valeur des avantages qui en découlent².

Infrastructure essentielle : Les installations, réseaux, moyens et biens physiques, et ceux liés au domaine de la technologie de l'information, dont la défaillance ou la destruction entraînerait de graves répercussions sur la santé, la sécurité ou le bien-être économique de la population, ou encore sur le bon fonctionnement des gouvernements du pays¹.

Cryosphère : Parties de la surface de la Terre qui sont composées d'eau gelée, p. ex., la couverture de glace des eaux et des terres, la couverture nivale, les glaciers et le gélisol (ce qui englobe le pergélisol).

Réseau dégradé : Réseau de moindre densité¹¹.

Désertification : Dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches due à divers facteurs, dont les variations du climat et l'activité humaine. Pour sa part, la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification définit la dégradation des terres comme la diminution ou la disparition, dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, de la productivité biologique ou économique et de la complexité des terres cultivées non irriguées, des terres cultivées irriguées, des parcours, des pâturages, des forêts ou des surfaces boisées du fait de l'utilisation des terres ou d'un ou de plusieurs phénomènes, notamment de phénomènes dus à l'activité de l'homme et à ses modes de peuplement tels que : i) l'érosion des sols causée par le vent ou l'eau; ii) la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques ou économiques des sols; et iii) la disparition à long terme de la végétation naturelle¹⁰.

Matrice diagonale (mathématiques) : Matrice carrée dont toutes les valeurs sont nulles, sauf celles de la diagonale¹⁵.

Réduction d'échelle : Méthode permettant d'obtenir des informations à l'échelle locale ou régionale (10 à 100 km) à partir de modèles ou d'analyses de données à plus grande échelle¹.

Sécheresse : Phénomène qui se produit lorsque les précipitations sont sensiblement inférieures aux niveaux normaux enregistrés et qui provoque des déséquilibres hydrologiques importants souvent défavorables aux systèmes de production et aux ressources terrestres. Il y a plusieurs façons de définir la sécheresse (p. ex., sécheresse agricole, sécheresse météorologique et sécheresse hydrologique). Une sécheresse sérieuse est une sécheresse prolongée et très étendue qui dure beaucoup plus longtemps que la normale, habituellement une décennie ou plus¹.

Taux de sécheresse : Proportion des précipitations moyennes annuelles perdues par évapotranspiration, où « évapotranspiration » désigne les précipitations moins l'écoulement annuel moyen non régulé⁹.

Services écosystémiques : Processus ou fonctions écologiques qui représentent un intérêt, pécuniaire ou non, pour des individus ou pour une société dans son ensemble. On distingue: 1) les services de soutien tels que le maintien de la productivité ou de la biodiversité; 2) les services d'approvisionnement, par exemple en aliments, en fibres ou en poisson; 3) les services de régulation tels que la régulation climatique ou le piégeage du carbone, et 4) les services culturels tels que le tourisme ou les activités à caractère spirituel et esthétique¹.

Vecteur propre (en mathématiques et en physique) : Vecteur qui est transformé par un opérateur donné en un multiple scalaire de lui-même².

Valeur propre (en mathématiques et en physique) : Chacune des valeurs d'un paramètre pour laquelle une équation différentielle a une solution non nulle (une fonction propre) dans certaines conditions; tout nombre tel qu'une matrice donnée moins ce nombre multiplié par une matrice unité a un déterminant nul².

Données empiriques : Données qui, plutôt que de reposer sur la théorie ou la logique pure, sont fondées sur l'observation ou l'expérience ou vérifiables par ces moyens².

Ensemble de séries chronologiques (ou temporelles) : Groupe de plusieurs séries de valeurs quantitatives fondées sur des observations réalisées dans le temps, souvent à intervalles égaux¹¹.

Méthode de réduction des erreurs : Méthode/technique statistique utilisée pour évaluer les réseaux de surveillance. À l'annexe C, section *Sources d'information*, voir la sous-section *Méthodes géostatistiques et réduction des erreurs* sous *Méthodes d'évaluation*.

Évapotranspiration : Processus combiné d'évaporation à la surface de la Terre et de transpiration de la végétation¹.

Exposition : La nature et le degré auxquels un système est exposé à des variations climatiques significatives¹.

Phénomène météorologique extrême : Un événement rare selon les statistiques relatives à sa fréquence en un lieu donné. Si les définitions du mot « rare » varient considérablement, un phénomène météorologique extrême devrait normalement être aussi rare, sinon plus, que les dixième ou quatre-vingt-dixième percentiles. Par définition, les caractéristiques de ce qu'on appelle « condition météorologique extrême » varient d'un endroit à l'autre¹.

Rétroaction : Un mécanisme d'interaction entre les processus d'un système est appelé rétroaction lorsque le résultat d'un processus initial provoque, dans un second processus, des changements qui agissent à leur tour sur le processus initial. Une rétroaction positive renforce le processus initial, et une rétroaction négative l'atténue¹.

Plaine ou zone inondable : Terre bordant un cours d'eau, faite des sédiments déposés lors de débordements du cours d'eau et sujette à l'inondation au moment de la crue¹⁵.

Périodes de gel et de débâcle : Période de l'année au cours de laquelle la glace se forme sur les systèmes d'eaux superficielles, lacs, cours d'eau et mers; et période au cours de laquelle la glace se retire (débâcle)¹.

Modèles de circulation générale (MCG et MCGAO) : Voir *Modèle climatique*.

Système d'information géographique (SIG) : Système d'information portant sur l'acquisition, le stockage, l'analyse, la gestion et la restitution des données géographiques¹⁵.

Gaz à effet de serre (GES) : Constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. La vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre. L'atmosphère contient, en outre, nombre de gaz de serre produits entièrement par l'activité humaine, tels les halocarbones et toute autre substance contenant du chlore et du brome¹.

Maille (ou cellule de grille) : Unité qui représente une position unique dans un tableau de cellules (carrées) de taille égale disposées en rangées et en colonnes. Chaque maille est géoréférencée selon son emplacement xy. Aussi désignée sous le nom de pixel dans les SIG matriciels.

Tarissement de la nappe : Ratio entre les prélèvements moyens d'eau souterraine et le débit de base moyen annuel, qui indique dans quelle mesure le taux d'utilisation de la nappe souterraine risque d'en dépasser la recharge¹².

Méthode des prix hédonistes : Fixation du prix d'un bien marchand en fonction de ses caractéristiques ou des services qu'il fournit. Par exemple, le prix d'une voiture reflète les

caractéristiques de la voiture (transport, confort, style, luxe, économie de carburant, etc.). Cette méthode est utilisée pour estimer la valeur économique des services écosystémiques qui influent directement sur les prix du marché. Elle est surtout appliquée aux écarts observés dans les prix des habitations qui reflètent la valeur des qualités du milieu¹³.

Algorithme hiérarchique : Technique utilisée pour regrouper des stations de mesure similaires¹⁴.

Pneu à grande portance : Pneu forestier dont la semelle est surdimensionnée dans le but de diminuer la pression au sol lors de travaux en terrain marécageux ou sur sol fragile¹⁵.

Homogène : En statistique, la question de l'homogénéité se pose au moment de la description des propriétés d'un ensemble de données ou de plusieurs ensembles de données et se rapporte à la validité de l'hypothèse selon laquelle un ensemble de données complet a les mêmes propriétés statistiques que n'importe laquelle de ses parties. Dans les méta-analyses, qui combinent les données de plusieurs études, l'homogénéité mesure les différences ou similarités entre les diverses études.

Services hydrologiques : Vaste gamme de services, allant de l'approvisionnement en eau domestique à l'atténuation des dégâts causés par les crues, etc. Ce groupe de services variés peut se diviser en cinq grandes catégories : l'amélioration de l'approvisionnement en eau avec consommation, l'amélioration de l'approvisionnement en eau sans consommation, l'atténuation des dégâts causés par l'eau, les services culturels et les services de soutien liés à l'eau¹⁷.

Systèmes hydrologiques : Cycle selon lequel l'eau des océans et l'eau présente à la surface des terres émergées s'évapore, se déplace dans l'atmosphère sous la forme de vapeur d'eau, se condense pour former des nuages, retombe sous forme de pluie ou de neige, est interceptée par les arbres et la végétation, s'écoule par ruissellement à la surface des terres émergées, s'infiltre dans les sols, réalimente les nappes souterraines, se déverse dans les cours d'eau et, pour finir, se jette dans les océans, d'où elle s'évapore de nouveau (AMS, 2000). Les différents systèmes participant au cycle hydrologique sont habituellement qualifiés de systèmes hydrologiques¹⁸.

Hydrométrie : Relatif à la mesure des différents éléments du cycle hydrologique. Les données hydrométriques désignent des données sur le débit et le niveau d'eau (voir http://www.wateroffice.ec.gc.ca/index_f.html).

Réseau hydrométrique : Groupe d'activités de collecte de données pour différents éléments du cycle hydrologique, qui sont conçues et dirigées de façon à atteindre un objectif unique ou une série d'objectifs compatibles¹⁹.

Méthodes d'acquisition de données : Méthodes statistiques utilisées pour l'évaluation des réseaux de surveillance. À l'annexe C, section *Sources d'information*, voir la sous-section *Réduction de la variance et acquisition de données* sous *Méthodes d'évaluation*.

Inhomogène : Sans uniformité de caractère ou de contenu; non homogène².

Courbe intensité-durée-fréquence (IDF) : Courbes graphiques établies en traçant point par point les intensités des précipitations de diverses durées. L'analyse statistique (séries des maximums annuels ou séries à durée partielle) se fait à partir des données pluviométriques; la transposition graphique des résultats se fait à partir des distributions théoriques de plusieurs durées de pluies présélectionnées. De l'information sur le rapport IDF de pluies violentes de diverses durées est nécessaire à la conception hydraulique de structures destinées à limiter le ruissellement (réservoirs de régularisation à débit non réglable, égouts, etc.)²¹.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) : Commission établie en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) avec fonction d'évaluer les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique nécessaires à la meilleure compréhension des changements climatiques, des conséquences possibles de ce changement et des stratégies éventuelles d'adaptation et d'atténuation¹.

Relèvement isostatique (rebond post-glaciaire) : Soulèvement de masses terrestres consécutif à la fonte des calottes glaciaires. Ces masses terrestres, alors déprimées sous les charges de glace, se sont relevées au cours de la période post-glaciaire sous l'effet du phénomène d'isostasie.

Intégration : Dans le contexte de l'adaptation, l'intégration (« mainstreaming ») se rapporte à la prise en considération de l'adaptation (ou des risques d'ordre climatique) de façon à ce que ce concept soit pris en compte au moment de l'élaboration des politiques, des programmes et des activités, à tous les niveaux du processus de prise de décisions. Le but est de faire du processus d'adaptation une composante des cadres de prise de décisions et de planification en place¹.

Erreur absolue moyenne (EAM) : Une statistique utilisée dans l'analyse de la dégradation du réseau. Voir la section B2 : Analyse de la dégradation du réseau – Monte-Carlo.

Atténuation : Toute mesure destinée à réduire ou à éliminer définitivement le risque et les dangers à long terme que les changements climatiques présentent pour la vie humaine ou pour les biens.

Échantillonnage Monte-Carlo (en statistique) : Méthode d'échantillonnage statistique qui fournit une approximation probabilistique de la solution à un problème.

Indice mensuel d'humidité/d'aridité de Bagnouls et Gaussen (ou indice ombrothermique mensuel) : Valeur représentant la différence entre la température mensuelle moyenne de l'air (en °C) multipliée par 2 et la moyenne des précipitations mensuelles totales (en mm)³. Voir la section A2 : *Analyse ombrothermique*.

Données multidimensionnelles : Données de multiples dimensions.

Analyses multivariées : Techniques statistiques consistant à analyser plus d'une variable statistique à la fois et pouvant servir à évaluer les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Voir la section B3 : *Analyses multivariées*.

Capital naturel : S'entend des écosystèmes naturels de la Terre, considérés comme des marchandises ou des biens qui fournissent des ressources et une gamme de services⁹.

Variabilité naturelle du climat : Variations climatiques naturelles qui se situent dans l'intervalle normal des valeurs extrêmes pour une région donnée.

Revenu net des facteurs : Technique d'évaluation des services écosystémiques non marchands⁹. À la section A1 *Méthode d'évaluation économique de base des services écosystémiques*, voir l'encadré *L'exemple de la Ceinture de verdure du sud de l'Ontario*.

Analyse de la dégradation du réseau (ADR) : L'ADR simule une diminution systématique ou « dégradation » de la densité des stations d'échantillonnage d'un réseau et, à chaque étape successive de dégradation, évalue le rendement du réseau dégradé par rapport à celui du réseau original. C'est l'une des méthodes d'analyses multivariées utilisées pour évaluer les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Voir la section B2 *Analyse de la dégradation du réseau – Monte-Carlo*.

Valeur non marchande : Valeur monétaire des biens et services écologiques qui ne font pas l'objet d'un commerce, par exemple l'air pur, l'eau saine et des populations de poissons et d'animaux en bonne santé. L'attribution d'une valeur monétaire à ces biens et services se fait selon des méthodes d'évaluation économique des actifs non marchands²³.

Politique/mesure de type « sans regret » : Politique ou mesure procurant des avantages nets sur le plan social et économique que se produisent ou non des changements climatiques¹.

Analyse ombrothermique : Méthode d'analyse qui utilise deux paramètres – les précipitations et la température – pour évaluer la sensibilité d'une région aux changements climatiques. C'est l'une des méthodes utilisées pour établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Voir la section A2 *Analyse ombrothermique*.

Diagramme ombrothermique : Diagramme qui montre la variation mensuelle des températures et précipitations moyennes sur une période d'un an.

Indice ombrothermique : Se reporter à *indice annuel d'humidité/d'aridité de Bagnouls et Gaussen* et à *indice mensuel d'humidité/d'aridité de Bagnouls et Gaussen*.

Transformation linéaire orthogonale (en mathématiques) : Transformation linéaire qui préserve un produit intérieur symétrique. En particulier, une transformation orthogonale (techniquement, une transformation orthonormale) préserve la longueur des vecteurs et les angles entre les vecteurs. Voir la section B3 *Analyses multivariées*.

Cercle des corrélations parfaites (dans l'analyse en composantes principales) : Cercle représentant la corrélation parfaite entre deux variables. Voir la section B3 *Analyses multivariées*.

Pergélisol : Sol (sol proprement dit ou roche, y compris la glace et les substances organiques) dont la température reste égale ou inférieure à 0°C pendant au moins deux années consécutives¹.

Physiographique : Qui a trait à la géographie physique, ou classification des modelés selon leur histoire et leurs structures géologiques.

Polynôme (en mathématiques) : Expression de plus de deux termes algébriques, notamment la somme de plusieurs termes qui contiennent différentes puissances de la ou des mêmes variables².

Composante principale (ou axe principal) : Une composante principale correspond à une ligne qui traverse la moyenne multidimensionnelle et qui réduit au minimum la somme des carrés des distances entre les points et la ligne. Voir la section B3 *Analyses multivariées*.

Analyse en composantes principales (ACP) : Moyen de dégager les tendances de données et de représenter les données de manière à faire ressortir leurs similitudes et leurs différences²⁴. C'est l'une des méthodes d'analyses multivariées utilisées pour évaluer les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Voir la section B3 *Analyses multivariées*.

Rationalisation : Dans la rationalisation d'un réseau de surveillance, par exemple, il s'agit d'accroître l'efficacité du réseau et d'optimiser la collecte d'information, éventuellement en diminuant le nombre de sites de collecte de données.

Réalisation (en statistique) : Série particulière qui pourrait être générée par un processus aléatoire spécifié².

Période de récurrence : Le temps moyen qui doit s'écouler jusqu'à la prochaine occurrence d'un événement défini. Lorsque celui-ci fait preuve d'une distribution géométrique, la période de récurrence est égale à l'inverse de la probabilité que l'événement se produise au cours de la prochaine période de temps (c.-à-d., $T = 1/P$, où T est la période de retour, en nombre d'intervalles de temps, et P est la probabilité de la prochaine occurrence de l'événement dans un intervalle de temps donné)¹.

Stations superflues : Stations qui pourraient être éliminées du réseau de surveillance sans entraîner une grande perte d'information¹⁴.

Régression (en statistique) : Mesure du rapport entre la valeur moyenne d'une variable (p. ex., le résultat) et les valeurs correspondantes des autres variables (p. ex., le temps et le coût)².

Résilience : Capacité d'un système social ou écologique d'absorber des perturbations tout en conservant sa structure de base et ses modes de fonctionnement ainsi que sa capacité de s'organiser et de s'adapter au stress et au changement¹.

Risque (climatique) : Une combinaison de la probabilité (probabilité d'occurrence) et des conséquences d'un événement défavorable (p. ex., danger relié au climat)¹.

Infiltration d'eau salée : Phénomène par lequel de l'eau salée, plus dense, repousse des eaux douces de surface ou souterraines, généralement dans des zones côtières ou estuariennes, soit en raison d'une diminution de l'influence continentale (du fait d'une réduction du ruissellement et de l'alimentation connexe de la nappe phréatique ou encore d'un prélèvement excessif d'eau dans les aquifères, etc.), soit en raison d'une influence maritime croissante (du fait de l'élévation relative du niveau de la mer, etc.)¹.

Scénario : Description vraisemblable et souvent simplifiée de ce qui peut se produire à l'avenir, fondée sur un ensemble cohérent et intrinsèquement homogène d'hypothèses concernant les principales relations et forces motrices en jeu. Les scénarios peuvent être établis à partir de projections, mais sont souvent fondés sur des informations complémentaires provenant d'autres sources, parfois accompagnées d'un « canevas circonstancié » du sujet en question¹.

Élévation du niveau de la mer : Augmentation du niveau moyen de l'océan. L'élévation eustatique du niveau de la mer est l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale attribuable à une augmentation du volume des océans. L'élévation relative du niveau de la mer correspond à une augmentation locale du niveau de l'océan par rapport à la terre, qui peut être provoquée par la montée des eaux océaniques ou par une subsidence des terres émergées. Dans les zones sujettes à de rapides soulèvements des terres, le niveau relatif de la mer peut s'abaisser¹.

Sensibilité : Degré auquel un système est touché, de façon favorable ou défavorable, par la variabilité du climat ou les changements climatiques. Les effets peuvent être directs (p. ex., la modification des rendements agricoles due à un changement de la valeur moyenne, de l'amplitude ou de la variabilité de la température) ou indirects (p. ex., les dommages causés par une augmentation de la fréquence des inondations côtières en raison d'une élévation du niveau de la mer)¹.

Matrice de similarité : Matrice de variables qui expriment la similarité entre deux points de données.

Mesure de similarité (en analyse typologique) : Mesure statistique de la corrélation entre toutes les paires de tous les groupes de stations possibles. Voir la section B3 *Analyses multivariées*, sous *Renseignements généraux*.

Envasement : Dépôt ou accumulation de sédiments en suspension touchant tout un plan d'eau stagnante ou une bonne partie de celui-ci; notamment l'étranglement, le colmatage ou le recouvrement des fonds à l'amont d'un barrage ou à tout autre point de ralentissement du courant d'eau, ou dans un réservoir. Le terme comprend souvent des particules sédimentaires de diverses tailles, allant de l'argile colloïdale au sable¹⁶.

Capacité d'adaptation d'une société : Capacité qui dépend de plusieurs facteurs, dont le niveau d'éducation, l'accès à la technologie, l'efficacité et la force des institutions de la société. Se reporter à la définition de *capacité d'adaptation*¹.

Couverture spatiale : Région de la surface terrestre ou gamme d'altitudes que couvre un ensemble de données²⁵.

Résolution spatiale : La définition de ce terme varie selon le domaine. En télédétection, la résolution spatiale se définit par rapport au diamètre de la surface de la Terre qui peut être distinguée et est souvent comparable à la taille de la zone couverte par un pixel. En collecte de données, la résolution spatiale peut désigner la densité du réseau de mesure.

Onde de tempête : Terme qui désigne habituellement une élévation temporaire du niveau de la mer, à un endroit donné, en raison de conditions météorologiques extrêmes (basse pression atmosphérique ou vents forts). L'onde de tempête est définie comme étant la différence entre la marée effective et la marée habituellement prévue à l'endroit et au moment considérés. Des ondes de tempête à effet négatif peuvent aussi se produire et peuvent causer des problèmes sérieux à la navigation¹.

Somme des carrés : Représente la somme des carrés des différences entre la moyenne d'un ensemble de données et les valeurs individuelles de l'ensemble de données.

Système : Une entité constituée de composantes diverses, mais reliées, qui fonctionnent comme un ensemble complexe. Le système climatique, les écosystèmes et les économies de marché en sont des exemples¹.

Thermosiphon : Système passif d'échange de chaleur dans lequel un fluide caloporteur circule dans un circuit fermé vertical sous le seul effet de la convection naturelle sans qu'une pompe traditionnelle soit nécessaire²⁶.

Série chronologique ou temporelle (en statistique) : Série de valeurs quantitatives fondées sur des observations réalisées dans le temps, souvent à intervalles égaux².

Tendance (en statistique) : Pente de la régression linéaire calculée sur une période donnée²⁷.

Toundra : Zone dépourvue d'arbres, généralement plane ou onduleuse, caractéristique des régions arctiques et subarctiques (p. ex., la toundra arctique). Sa végétation se compose de mousses, de lichens et de divers arbustes, et son sous-sol est constitué par du pergélisol¹⁶.

Incertitude : Expression du degré auquel une valeur demeure inconnue. L'incertitude peut provenir d'un manque d'information ou d'un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. Elle peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'erreurs chiffrables dans les données, d'une définition trop imprécise des concepts ou de la terminologie employés ou encore de projections incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives (p. ex., un ensemble de valeurs calculées à l'aide de divers modèles) ou par des énoncés qualitatifs (p. ex., expression de l'opinion d'une équipe d'experts)¹.

Variables non corrélées : Variables qui n'ont pas de rapport réciproque ni de lien entre elles.

Site non jaugé : Site où il ne se fait pas de collecte de données.

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques : Convention adoptée le 9 mai 1992 à New York et signée en 1992 lors d'un sommet à Rio de Janeiro par plus de 150 pays et par la Communauté européenne. Son objectif ultime est de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau susceptible d'empêcher les perturbations de nature anthropique du système climatique de devenir dangereuses. Elle contient des engagements pour toutes les Parties. La Convention est entrée en vigueur en mars 1994¹.

Variance (en statistique) : Quantité égale au carré de l'écart-type².

Réduction de la variance (en mathématiques, plus précisément dans la théorie des méthodes Monte-Carlo) : Technique permettant d'améliorer la précision des estimations qui peuvent être obtenues pour un nombre donné d'itérations. Chaque variable aléatoire issue de la simulation est associée à une variance qui limite la précision des résultats de la simulation. Voir la section B2 *Analyse de la dégradation du réseau – Monte-Carlo*.

Méthode Varimax (dans l'analyse en composantes principales) : Dans cette méthode, la variance totale expliquée est redistribuée au moyen d'une rotation des axes principaux. Voir la section B3 *Analyses multivariées*.

Vecteur (en mathématiques) : Grandeur orientée qui possède une valeur numérique et sert notamment à déterminer la position d'un point dans l'espace par rapport à un autre².

Vulnérabilité : Mesure dans laquelle un système est sensible – ou incapable de faire face – aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de la variation du climat à laquelle le système considéré est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation¹.

Bilan hydrique : État des apports et des pertes d'eau, ainsi que des changements dans les divers éléments du cycle hydrologique⁵.

Droits relatifs à l'eau : (L'usage américain est expliqué dans la section A3 *Analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau*). Le droit d'utiliser, selon sa priorité, une certaine quantité d'eau²⁸; ou le droit d'utiliser l'eau dérivée à un endroit précis dans une source d'eau et de la destiner à des usages bénéfiques reconnus à des endroits déterminés²⁹.

(Usage canadien) Les principes des droits des riverains, qui sont issus de la common law, servent de fondement aux régimes de permis d'utilisation de l'eau en vigueur en Ontario, au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse, à l'Île-du-Prince-Édouard et à Terre-Neuve-et-Labrador. En vertu de la common law, qui existait avant que les droits relatifs à l'eau n'aient été adoptés par voie législative, les personnes qui possèdent ou occupent des terres en bordure de lacs et de cours d'eau ont le droit de jouir du débit naturel de l'eau (intacte en quantité et en qualité) qui longe ou traverse leur terrain. Les provinces ont la responsabilité d'administrer l'eau et de superviser son attribution et doivent exercer leur compétence législative sur l'eau de manière équitable pour tous.

Au Québec, l'octroi de permis d'utilisation de l'eau obéit aux principes du Code civil. Le Code civil du Québec stipule que l'eau n'appartient à personne et est d'usage collectif. La province joue donc un rôle de protecteur de l'intérêt commun en cette matière.

Tous les régimes provinciaux et territoriaux d'attribution de l'eau comportent un système d'octroi de licences ou de permis d'utilisation tant pour l'eau de surface que souterraine, et ce, partout sauf en Colombie-Britannique, où rien n'est prescrit pour l'eau souterraine.

Des droits de licence d'utilisation, qui varient beaucoup au demeurant, sont perçus dans chaque province et territoire. Il s'agit la plupart du temps de droits ponctuels à régler au moment de la demande, auxquels s'ajoutent parfois des frais annuels. Les droits sont fixes dans certaines provinces et variables dans d'autres selon le volume d'eau utilisé et le type d'usage : utilisation industrielle, production d'électricité, agriculture, etc. Règle générale, il s'agit de droits modestes allant de vingt à quelques milliers de dollars. Dans certains cas, comme en Ontario et en Saskatchewan, certaines activités bien précises, l'agriculture notamment, sont exemptes de tels droits. Les recettes des droits d'utilisation sont généralement versées au trésor de la province. L'Île-du-Prince-Édouard, une exception notable, utilise les recettes des permis de prélèvement d'eau pour éponger les coûts associés à l'administration et à la mise en œuvre du programme gouvernemental de surveillance de l'eau³⁰.

Bassin versant : Territoire dont les eaux se déversent vers un lieu donné comme un cours d'eau, un lac ou un ouvrage artificiel¹⁵.

Analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau : Méthode qui fait appel à des indicateurs pour évaluer les aspects clés de l'approvisionnement en eau et de l'utilisation de l'eau (tels le débit, les pertes par évapotranspiration, la qualité de l'eau, les prélèvements d'eau et les agglomérations en zones inondables) afin d'identifier les bassins versants où les ressources en eau sont actuellement très vulnérables à un stress accru et dont la vulnérabilité serait éventuellement accentuée ou réduite par des variations des phénomènes climatiques moyens et extrêmes. C'est l'une des méthodes qui servent à établir des priorités pour les réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques. Voir la section A3 *Analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau*.

Stress hydrique : Une région est soumise à un stress hydrique lorsque le taux d'alimentation en eau douce par rapport à celui des prélèvements auxquels elle est sujette fait en sorte que son développement risque de s'en trouver sérieusement ralenti. Des prélèvements d'eau représentant plus de 20 % de l'alimentation en eau renouvelable sont considérés comme un indice de stress hydrique. Les cultures sont soumises à un stress hydrique si l'humidité du sol, donc l'évapotranspiration effective, est inférieure à ses besoins potentiels¹.

NOTES EN FIN DE CHAPITRE

- ¹ D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.). 2008. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 448 p.
- ² D'après la définition du dictionnaire Oxford en ligne, 2010, <http://oxforddictionaries.com>, Oxford University Press.
- ³ D'après A. Priceputu et H. Greppin. 2005. « Modelling climate change impacts and vulnerability in Switzerland », dans *Coupling of Climate and Economic Dynamics : Essays on Integrated Assessment*, Heidelberg, EEU: Springer-Verlag, p. 355-381.
- ⁴ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2007. *Annexe 1 : glossaire*, en ligne à <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-annex-fr.pdf>.
- ⁵ Glossaire des ressources en eau du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, http://www.mnr.gov.on.ca/en/Business/Water/2ColumnSubPage/STEL02_179252.html.
- ⁶ I.T. Jolliffe. 1972. « Discarding variables in a principal component analysis. I: Artificial data. », *Appl. Statist.*, 21:160-173.
- ⁷ *Glossary of Meteorology*, American Meteorological Society, en ligne à <http://amsglossary.allenpress.com/glossary>.
- ⁸ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2007. *Annexe 1 : glossary*, en ligne à <http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/ar4-wg3.pdf>.
- ⁹ S.J. Wilson (Natural Capital Research and Consulting). *Ontario's Wealth, Canada's Future: Appreciating the Value of the Greenbelt's Eco-Services*, septembre 2008, rapport produit pour la Fondation David Suzuki. 41 p.
- ¹⁰ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2007. *Annexe 1 : glossaire*, en ligne à <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-annex-fr.pdf>
- ¹¹ D'après M.J. Janis, K.G. Hubbard et K.T. Redmond. 2004. « Station density strategy for monitoring long-term climatic change in the contiguous United States », *Journal of Climate*, 17:151-162.
- ¹² B. Hurd, N. Leary, R. Jones et J. Smith. 1999. « Relative regional vulnerability of water resources to climate change », *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6):1399-1409.
- ¹³ <http://www.ecosystemvaluation.org>, glossaire. Site Web sur l'évaluation économique des écosystèmes, conçu et rédigé par Dennis M. King, Ph.D., Université du Maryland, et Marisa J. Mazzotta, Ph.D. avec l'assistance technique de maître Kenneth J. Markowitz. Site publié en 2000, financé par le ministère de l'Agriculture des É.-U., le Natural Resources Conservation Service et la National Oceanographic and Atmospheric Administration.
- ¹⁴ D. H. Burn et I. C. Goulter. 1991. « An approach to the rationalization of streamflow data collection networks », *J. Hydrol.*, 122:71-91.
- ¹⁵ Le grand dictionnaire terminologique, OLF, en ligne à <http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>.
- ¹⁶ M. Gary, R. McAfee Jr. et Wolf, C.L. (éditeurs). 1977. *Glossary of Geology*, American Geological Institute, Washington, D.C., 805 p.

- ¹⁷ K. A. Brauman, G. C. Daily, T. Ka'eo Duarte et H. A. Mooney. 2007. « The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services », *Annual Review of Environment and Resources*, 32:67-98.
- ¹⁸ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2007 : *Annexe 2 : glossaire*, en ligne : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf
- ¹⁹ Organisation météorologique mondiale (OMM). 1994. *Guide to Hydrological Practices*, 5^e édition, WMO Publ. 168, 770 p.
- ²⁰ www.hydroquebec.com
- ²¹ M. Bara, S. Kohnova, L. Gaal, J. Szolgay et K. Hlavcova. 2009. « Estimation of IDF curves of extreme rainfall by simple scaling in Slovakia », *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 39(3):187–206.
- ²² D'après *Québec ville fortifiée – Patrimoine géologique et historique – Parcours découverte*, <http://www.cgq-qgc.ca/index.php?q=fr/pourtous>.
- ²³ GreenFacts – Facts on Health and the Environment, site Web fourni par un organisme sans but lucratif indépendant, <http://www.greenfacts.org/glossary/mno/non-market-value.htm>.
- ²⁴ D'après L.I. Smith. 2002. « A tutorial on principal components analysis », séance de tutorat pour le cours COSC4053, 26 février 2002, département d'informatique de l'Université d'Otago, Nouvelle-Zélande, 26 p.
- ²⁵ www.eosweb.larc.nasa.gov/HBDOCS/terms_glossary.html – Cette interface utilisateur en ligne fournit des données et des métadonnées aux scientifiques 24 heures sur 24.
- ²⁶ <http://www.glossary.com/reference.php?q=Thermosyphon>.
- ²⁷ D. Gyalistras. 2003. « Development and validation of a high-resolution monthly gridded temperature and precipitation data set for Switzerland (1951–2000) », *Climate Research*, 25:55–83.
- ²⁸ <http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/04717.html>.
- ²⁹ <http://www.waterrights.utah.gov/wrinfo/glossary.htm#W>.
- ³⁰ Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie. *Courant de changement : La pérennité de l'eau et des secteurs des ressources naturelles du Canada*, <http://nrtee-trnee.ca/wp-content/uploads/2011/08/courant-de-changement-rapport-eau-fra.pdf>.
- ³¹ Le Larousse, en ligne à <http://www.larousse.fr/>.

C.2. SOURCES D'INFORMATION

IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ADAPTATION

Lemmen, D.S., F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.). 2008. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 448 p.

Pearson, D. et I. Burton, (coprésidents du Comité d'experts sur l'adaptation au changement climatique), 2009. *Adaptation au changement climatique en Ontario – rapport du Comité d'experts sur l'adaptation au changement climatique*, produit pour le ministère de l'Environnement, Ontario.

Société géographique royale du Canada et Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie. 2010. *Degrés de réchauffement : Résumé des effets du changement climatique prévus au Canada au cours du XXI^e siècle*.

RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DE L'EAU ET CONCEPTION DE RÉSEAUX

Brimley, B., J-F. Cantin, D. Harvey, M. Kowalchuk, P. Marsh, T. Ouarda, B. Phinney, P. Pilon, M. Renouf, B. Tassone, R. Wedel et T. Yuzyk. 1999. *Establishment of the reference hydrometric basin network (RHBN) for Canada*, Environnement Canada, 20 janvier 1999.

Mishra, A.K. et P. Coulibaly. 2010. « Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds », *Journal of Hydrology* (janvier 2010), 380 (3-4), p. 420-437.

Mishra, A.K. et P. Coulibaly. 2009. « Developments in hydrometric network design: a review », *Rev. Geophys.* 47, RG2001, doi:10.1029/2007RG000243.

Pyrce, R.S. 2004. *Review and Analysis of Stream Gauge Networks for the Ontario Stream Gauge Rehabilitation Project*, Watershed Science Centre, Université Trent, produit pour la Section des ressources en eau du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, et avec son appui, (Peterborough, Ontario), rapport du WSC n° 01-2004.

MÉTHODES D'ÉTABLISSEMENT DE PRIORITÉS

Méthode d'évaluation économique de base pour les services écosystémiques

Alpizar, F. et R. Madrigal. 2008. « Constructing Payment Systems for Ecological Services at the Local Level: Methodological Approach and Some Lessons Learned », document présenté dans le cadre d'*Economics and Conservation in the Tropics: A Strategic Dialogue*.

Brauman, K. A., G. C. Daily, T. Ka'eo Duarte et H. A. Mooney. 2007. « The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services », *Annual Review of Environment and Resources* 32, p. 67-98.

Costanza, R. et J. Farley. 2007. « Ecological economics of coastal disasters: Introduction to the special issue », *Ecological Economics* 63, p. 249-253.

Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton et M. van den Belt. 1997. « The value of the world's ecosystem services and natural capital », *Nature* 387 (15 mai), p. 253-259.

Costanza R., O. Pérez-Maqueo, M. L. Martinez, P. Sutton, S. J. Anderson et K. Mulder. 2008. « The Value of Coastal Wetlands for Hurricane Protection », *Ambio* 37(4), p. 241-248.

Dorner W., K. Spachinger, M. Porter et R. Metzka. 2008. « Proving the ecosystem value through hydrological modeling », document présenté à l'occasion de la 24^e conférence des pays danubiens et publié dans *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 4, 11 p.

Koch, E.W., E.B Barbier, B.R. Silliman, D.J. Reed, G.M.E. Perillo, S.D. Hacker, E.F. Granek, J.H. Primavera, N. Muthiga, S. Polasky, B.S. Halpern, C.J. Kennedy, C.V Kappe et E. Wolanski. 2009. « Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection », *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(1):2937, 9 p.

Plummer, M.L. 2009. « Assessing benefit transfer for the valuation of ecosystem services », *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(1), p. 38-45.

Wilson S.J. (Natural Capital Research and Consulting). *Ontario's Wealth, Canada's Future: Appreciating the Value of the Greenbelt's Eco-Services*, septembre 2008, rapport publié par la fondation David Suzuki (en ligne), 45 p.

Analyse ombrothermique

Bagnouls, F. et H. Gaussen. 1957. « Les climats biologiques et leur classification », *Annales de Géographie* 66(355), p. 193-220.

Blume, H. 1968. « Zur Problematik des Schichtstufenreliefs auf den Antillen », *Geologische Rundschau* 58(1), p. 82-97.

Carles, J. « Saison sèche et indice xérothermique », *Revue de géographie de Lyon* 29(3), p. 269.

Gyalistras, D. 2003. « Development and validation of a high-resolution monthly gridded temperature and precipitation data set for Switzerland (1951–2000) », *Climate Research*, vol. 25, 8 octobre 2003, p. 55-83.

Ozenda, P. et J.L. Borel. 2000. « Une carte écologique de l'Europe : pourquoi et comment? », Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Séries III - *Sciences de la Vie* 323(11), p. 983-994.

Priceputu, A. M. et H. Greppin. 2005. « Modelling Climate Change Impacts and Vulnerability in Switzerland », chapitre 14 de *Coupling of Climate and Economic Dynamics: Essays on Integrated Assessment*. Haurie A. et L. Viguié, p. 355-381.

Priceputu, A. M. et H. Greppin. 2004. « Assessing Biophysical Vulnerability to Climate Change in Switzerland », Université de Genève. Affiche présenté lors de la séance d'information SIG à l'UNIGE.

Villers, L., N. Arizpe, R. Orellana, E. Conde et J. Hernandez. 2009. « Impacts of Climate Change on Coffee Flowering and Fruit Development in Veracruz, Mexico », *Interciencia* 34(5), p. 322-329.

Analyse des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau

Eriksen, S.H. et P.M. Kelly. 2004. « Developing Credible Vulnerability Indicators for Climate Adaptation Policy Assessment », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12, p. 495-524.

Fontaine, M. M. et A. C. Steinemann. 2009. « Assessing Vulnerability to Natural Hazards: Impact-Based Method and Application to Drought in Washington State », *Natural Hazards Rev.* 10(1), p. 11-18.

Hurd, B., N. Leary, R. Jones et J. Smith. 1999. « Relative Regional Vulnerability of Water Resources to Climate Change », *Journal of the American Water Resources Association* 35(6), p. 1399-1409.

Kreutzweiser, R., L. Moraru, R. de Loë, B. Mills et K. Schaefer. 2003. « Drought Sensitivity of Municipal Water Supply Systems in Ontario », *The Great Lakes Geographer* 9.2, p. 59-70.

MacRitchie, S.M., P.K. Goel, G. Kaltenecker, F. Fleischer, A. Jamieson, M. Millar, L. Ramanathan, C. Wort, D. Grgic, K. Zaletnik Hering. 2010. *An approach for evaluating two monitoring networks for climate change detection and adaptation in Great Lakes watersheds in Ontario*.

MÉTHODES D'ÉVALUATION

Méthode de l'audit

Barnes, N. et T. Day. 1995. « Consultations on Water Monitoring In Canada: The CWRA Experience », *Canadian Water Resources Journal* 20(3), p. 139-144.

Burn, D.H. 1997. « Hydrological information for sustainable development », *Hydrological Sciences Journal* 42(2):481-492.

Davar, Z.K. et W.A. Brimley. 1990. « Hydrometric network evaluation: audit approach », *Journal of Water Resources Planning and Management* 116 (1), p. 134-146.

Mishra, A.K. et P. Coulibaly. 2009. « Developments in Hydrometric Network Design: A Review », *Reviews of Geophysics* 47, RG2001, 24 p.

Analyse de la dégradation du réseau – Monte-Carlo

Janis, M.J., K.G. Hubbard et K.T. Redmond. 2004. « Station Density Strategy for Monitoring Long-Term Climatic Change in the Contiguous United States », *Journal of Climate* 17, p. 151-162.

Krajewski, W. F., V. Lakshmi, K. P. Georgakakos et S. C. Jain. 1991. « A Monte-Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model », *Water Resour. Res.* doi:10.1029/90WR01977, 27(1), p. 119- 128.

Kunkel et coll. 2007. « A Monte-Carlo assessment of uncertainties in heavy precipitation frequency variations », *Journal of Hydrometeorology* 8(5), p. 1152-1160.

Mahmood, R., S.A. Foster et D. Logan. 2006. « The geoprofile metadata, exposure of instruments, and measurement bias in climate record revisited », *International Journal of Climatology* 26(8), p. 1091-1124.

Melvin, M.J., A.I. Zygielbaum, D. Gutzmer, S. Rentschler, J. Bower, K.G Hubbard. 2008. « Network requirements for sensor accuracy and precision: a case study to assess atmospheric variability in simple terrain », *International Journal of Climatology* 28(2), p. 267-272.

Vose, R.S. et M.J. Menne. 2004. « A Method to Determine Station Density Requirements for Climate Observing Networks », *Journal of Climate* 17(15), p. 2961-2971.

Analyses multivariées

Burn, D. H. et I. C. Goulter. 1991. « An approach to the rationalization of streamflow data collection networks », *J. Hydrol.* 122, p. 71-91.

Burn, D.H. 1997. « Hydrological information for sustainable development », *Hydrological Sciences* 42(4), p. 481-492.

Jolliffe, I.T., 1972. « Discarding variables in a principal component analysis. I: Artificial data », *Appl. Statist.* 21, p. 160-173.

Mishra, A.K. et P. Coulibaly. 2009. « Developments in Hydrometric Network Design: A Review », *Reviews of Geophysics* 47, RG2001, 24 p.

Mishra, A.K. et P. Coulibaly. 2010. « Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds », *Journal of Hydrology* (janvier 2010), 380 (3-4), p. 420-437.

Morin, G., J. P. Fortin, W. Sochanska, J. P. Lardeau et R. Charbonneau. 1979. « Use of principal component analysis to identify homogenous precipitation stations for optimal interpolation », *Water Resour. Res.* 15(6), p. 1841-1850.

D'après Smith, L.I. 2002. « A tutorial on principal components analysis », séance de tutorat pour COSC4053, 26 février 2002, département d'informatique de l'Université d'Otago, Nouvelle-Zélande, 26 p.

Westmacott, J.R. et D.H. Burn. 1997. « Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson River Basin », *Journal of Hydrology* 202(1-4), p. 263-279.

Yang, Y. et D.H. Burn. 1994. « An entropy approach to data collection network design », *Journal of Hydrology* 157(1-4), p. 307-324.

Méthodes géostatistiques et réduction des erreurs

Bastin, G., C. D. Lorent et M. Gevers. 1984. « Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations », *Water Resour. Res.* 20, 463-470.

Cheng, K-S, Y-C Lin et J-J Liou. 2008. « Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics », *Hydrol. Process.* 22:2554-2564.

Morrissey, L. M., J. A. Maliekal, J. S. Greene et J. Wang. 1995. « The uncertainty of simple spatial averages using rain gauge networks », *Water Resour. Res.* 31(8), 2011-2018.

Nour, M. H., D. W. Smit et M. G. El-Din. 2006. « Geostatistical mapping of precipitation: Implications for rain gauge network design », *Water Sci. Technol.* 53(10), 101-110.

Réduction de la variance et acquisition de données

Fiering, M. B. 1965. « An optimization scheme for gauging », *Water Resour. Res.* 1(4), 463-470.

Matalas, N. C. et E. J. Gilroy. 1968. « Some comments on regionalization in hydrologic studies », *Water Resour. Res.*, 4(6), 1361-1369.

Rouhani, S. 1985. « Variance-reduction analysis », *Water Resour. Res.*, 21:837-846.

C.3. DESCRIPTIONS D'AUTRES MÉTHODES DE PRIORISATION

Tableau C1. Descriptions d'autres méthodes de priorisation

Méthode/ références	Types de critères/ paramètres employés	Données requises	Logiciel	Savoir-faire	Considérations relatives à l'échelle
Stratégie de la Nouvelle-Zélande pour la biodiversité (Leathwick et Julian, 2009)	Représentativité fondée sur le type de réseau hydrographique, l'étendue de la protection actuelle, la valeur ajoutée (dans quelle mesure la protection de la biodiversité serait-elle améliorée)	Données spatiales pertinentes (SIG ou autre outil cartographique) pour définir les régions (p. ex., écozones) ou les classes (types) de bassins versants ou cours d'eau, p. ex., des données sur l'élévation, la pente, la vitesse du courant, les grandes caractéristiques géologiques, la taille du bassin versant, l'influence des eaux souterraines, l'altitude, les types de sol et de végétation, les zones climatiques et le type d'utilisation du territoire, etc.	Système REC (classification des milieux fluviaux) ou autres bases de données; logiciel de sélection (conçu spécialement à cette fin en Nouvelle-Zélande, pourrait être disponible) ou autre logiciel d'aide à la décision (si on souhaite en utiliser un). Le logiciel de sélection peut être remplacé par un SIG et un tableur.	Compétences en gestion de données, en analyse (de base) et en SIG. Connaissance scientifique de la région et des processus pertinents (science des changements climatiques, interactions Terre-atmosphère, processus des biomes végétaux); connaissance des analyses de classification, de la manipulation de base de données et des logiciels de sélection ou logiciels d'aide à la décision (si on souhaite en utiliser un). Autrement, aucune connaissance spécialisée en modélisation.	Le concept de représentativité s'applique à diverses échelles (tronçon de cours d'eau, bassin versant, écorégion) et pourrait être adapté aux fins de l'établissement des priorités entre les régions d'une province ou d'un territoire, où les régions pourraient être définies selon les paramètres utilisés pour définir la représentativité.
Allemagne – TERENO (Bogena et coll., non daté)	Représentativité en fonction principalement des biomes dominants, des processus terrestres dominants et des différents rôles des eaux souterraines et superficielles, des sols et des facteurs atmosphériques; régions déjà affectées par le changement environnemental ou susceptibles d'y être particulièrement sensibles à l'avenir.	Cartes ou données compatibles avec les SIG sur certains ou l'ensemble des facteurs suivants (ou d'autres facteurs selon la région): écorégions (ou zones biogéographiques), élévation, répartition des biomes végétaux, types de sol, contributions des eaux souterraines à l'hydrologie, utilisations des eaux souterraines et superficielles, types d'utilisation du territoire, données qui caractérisent les perturbations existantes (p. ex., développement industriel, rejets, exploitation minière, coupe de bois, croissance démographique et urbanisation), distributions des aires d'étude/de surveillance	Base de données et logiciel de SIG	Compétences en gestion de données, en analyse (de base) et en SIG. Connaissance scientifique de la région et des processus pertinents (science des changements climatiques, interactions Terre-atmosphère, processus des biomes végétaux); aucune compétence spécialisée en modélisation ou en analyse.	Mêmes considérations que ci-dessus

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe C

Méthode/ références	Types de critères/ paramètres employés	Données requises	Logiciel	Savoir-faire	Considérations relatives à l'échelle
		actuelles, distributions des universités et institutions de recherche connexes, distributions des régions ou variables climatiques.			
Modélisation du Natural Capital Project (projet sur le capital naturel) (Nelson et coll., 2009).	Valeurs des services écosystémiques ayant pour fondement l'utilisation ou occupation du territoire, estimées à l'aide d'une modélisation spatialement explicite prenant en compte les processus qui déterminent la production de la catégorie de services visés par l'étude (p. ex., les services liés à la quantité d'eau et à sa qualité).	Besoin d'un large éventail de données, par exemple sur l'utilisation ou occupation du territoire, les types de sol, l'élévation et l'aspect de la surface (ou topologie), le couvert végétal, les précipitations, le débit, la pente et éventuellement d'autres données selon les paramètres et les services dont on souhaite estimer la valeur.	Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST), logiciel conçu par le Natural Capital Project, à l'Université Stanford.	Si cette suite de modélisation est disponible, on aura besoin du savoir-faire nécessaire à l'exécution du modèle; connaissance de base en gestion de données et en analyse. Des compétences en gestion de données et en SIG sont requises, ainsi que les logiciels pertinents.	Le recours à la modélisation pour estimer la valeur de services écosystémiques permet d'obtenir des données spatiales plus détaillées et plus précises, du fait de l'intégration de processus pour estimer la variation spatiale, mais ce niveau de détail accru est obtenu par une modélisation à l'échelle du bassin versant. Cette échelle se prête à l'établissement de priorités au niveau provincial/territorial, mais nécessiterait de multiples applications de modélisation – et donc des efforts substantiels.
Équipe d'analyse et de modélisation avancées des écosystèmes terrestres (Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modeling team) (ATEAM) (Schroter et coll., 2005).	Changements futurs et valeurs des services écosystémiques, d'après les modifications de l'utilisation du territoire qu'entraîneraient les changements climatiques projetés, en tenant compte aussi de l'évolution prévue du marché et d'autres facteurs socio-économiques.	Beaucoup de données d'entrée (voir le tableau 5 dans Schroter et coll., 2005). Pour les autres exigences en matière de données et de savoir-faire, on se reportera à la modélisation du projet Natural Capital dont il est question dans la section 3.3.2.	L'ATEAM a utilisé une série de modèles, en estimant rigoureusement chaque lien dans la chaîne, y compris un ensemble complexe de modèles d'écosystèmes (bassins hydrologiques, systèmes agricoles, systèmes forestiers, etc.) pour estimer les impacts écologiques prévus des changements climatiques futurs d'après les projections de MCG. Les résultats sont utilisés pour estimer les changements	Savoir-faire considérable en modélisation, notamment en modélisation climatique, un large éventail de méthodes de modélisation des écosystèmes. Savoir-faire également requis en manipulation de base de données et en SIG, entre autres.	L'ATEAM a conçu cette approche pour une application continentale (européenne). Elle pourrait s'utiliser à l'échelle provinciale/territoriale, quoi qu'il s'agisse d'une méthode de modélisation rigoureuse et complexe conçue pour des chercheurs, qui est probablement beaucoup plus détaillée que nécessaire pour l'établissement de priorités.

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe C

Méthode/ références	Types de critères/ paramètres employés	Données requises	Logiciel	Savoir-faire	Considérations relatives à l'échelle
			d'utilisation du territoire (entre autres) et, de là, la variation des services écosystémiques. Il faut différents modèles pour chaque catégorie de services écosystémiques à évaluer. Pour l'eau, on a utilisé MacPDM (voir le tableau 6 dans Schroter et coll., 2005), un modèle hydrologique qui simule les variations du débit et des indicateurs de vulnérabilité des ressources en eau selon les changements climatiques et d'utilisation du sol qui ont été définis.		
Tendances empiriques et modèles conceptuels (Agence de protection de l'environnement des États-Unis, 2008, Ohlson et coll., 2005, Johnson et Weaver, 2009)	La vulnérabilité ou la sensibilité aux changements climatiques en tant que paramètres pour l'établissement de priorités.	Les besoins en matière de données varient selon les systèmes à évaluer, mais peuvent comprendre des données sur la géologie, la topographie, l'utilisation du sol, la répartition de la population, la température du cours d'eau, la pente, les débits (p. ex., volume moyen, débit de base), la concentration en éléments nutritifs et bien d'autres données. L'analyse des tendances empiriques exige des ensembles de données couvrant une longue période.	Un SIG serait utile, mais non indispensable. Un savoir-faire en analyse et en gestion de données est requis.	Connaissance spécialisée du système à évaluer, comprenant habituellement un savoir-faire dans de multiples domaines. Besoin également de savoir-faire en analyse et gestion de données.	La modélisation conceptuelle est souple, mais dans le contexte présent se prêterait mieux à une application dans un bassin versant.
Réseaux de Bayes, réseaux neuronaux et méthodes des ensembles flous	La vulnérabilité ou la sensibilité aux changements climatiques en tant que paramètres pour l'établissement des priorités.	Le type de données utiles au développement du modèle bayésien dépend des systèmes à évaluer, mais peut comprendre des données sur la géologie, la topographie, l'utilisation du territoire, les distributions de la population, la température du	Divers logiciels peuvent aider au développement et à la présentation des modèles bayésiens (pour des évaluations, voir www.csse.monash.edu.au/bai/ ou http://people.cs.ubc.ca/~murphyk/Bayes/bnsoft.html ; pour une liste	Le développement de modèles bayésiens ou neuronaux nécessiterait une connaissance approfondie du système à évaluer, couvrant vraisemblablement de multiples domaines, et donc nécessitant de multiples experts	La modélisation bayésienne et le développement de réseaux neuronaux sont souples, mais dans le contexte présent, se prêteraient mieux à une application dans un bassin versant.

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe C

Méthode/ références	Types de critères/ paramètres employés	Données requises	Logiciel	Savoir-faire	Considérations relatives à l'échelle
		cours d'eau, la pente, les débits (p. ex., volume moyen, débit de base), la concentration en éléments nutritifs et bien d'autres données.	des logiciels offerts et pour des hyperliens, aller à directory.google.com/Top/Computers/Artificial_Intelligence/Belief_Networks/Software/). Un logiciel spécial n'est pas indispensable, mais serait utile. Un SIG peut être utile, mais n'est pas essentiel. Besoin d'un logiciel d'analyse et de gestion de données.	locaux/régionaux. Il faut aussi une connaissance du théorème de Bayes et de la logique bayésienne pour structurer le modèle.	
Modélisation de systèmes intégrés pour l'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques – exemple brésilien (Krol et coll., 2006)	Vulnérabilité des systèmes hydrologiques aux changements climatiques	Très exigeant en données du fait de la complexité des modèles, qui sont couplés. Données pour paramètres de modélisation comprenant séries chronologiques de données quotidiennes historiques (ou reconstruites) sur la température, les précipitations, l'humidité de l'air et la vitesse du vent; futures conditions climatiques prédites à partir de scénarios statistiques (ou d'une autre technique) associant des observations quotidiennes de longue durée aux tendances climatiques de MCG; données sur les sols, la topographie (relief), le couvert végétal, les débits d'eau, l'utilisation d'eau, la connectivité latérale et les caractéristiques du réservoir; données démographiques, prélèvements d'eau, données sur l'irrigation, rendement des cultures et plusieurs autres sources de données; futures	SIM (modèle intégré pour milieu semi-aride) utilisé dans cet exemple brésilien; ou éventail semblable de modèles couplés à adapter ou à concevoir.	Connaissance avancée en modélisation dans plusieurs disciplines (hydrologie, agriculture, socio-économie).	Applicable à l'échelle régionale ou provinciale/territoriale ou du bassin versant.

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe C

Méthode/ références	Types de critères/ paramètres employés	Données requises	Logiciel	Savoir-faire	Considérations relatives à l'échelle
		projections de la croissance et de la distribution de la population.			
Vulnérabilité des systèmes hydrologiques aux changements climatiques – exemple de la sécheresse du Yorkshire (Fowler et coll., 2003)	Vulnérabilité, fiabilité et résilience (selon les indices applicables établis à partir de sorties du modèle) d'un système d'approvisionnement en eau en regard des changements climatiques ou des stress climatiques actuels.	Variété et quantité de données appréciables, y compris projections régionalisées des changements climatiques; séries chronologiques de données climatiques historiques; données pour le calage du modèle hydrologique d'un bassin versant ou d'un autre système d'intérêt de plus grande envergure; et données sur les caractéristiques du système d'approvisionnement en eau (capacités du réservoir, conditions d'exploitation, etc.)	Plusieurs modèles sont nécessaires, qui doivent être adaptés à chaque application, y compris un modèle de précipitation, un modèle d'évapotranspiration, un modèle hydrologique de bassin versant et un modèle de système d'approvisionnement en eau.	Diversité appréciable de savoir-faire en modélisation et de compétences liées à la gestion de données, à l'analyse et au SIG.	Démarche de modélisation appliquée au niveau régional et englobant plus d'un bassin fluvial. Applicable donc à l'échelle provinciale, mais aussi éventuellement à l'échelle du bassin versant.
Sensibilité d'un grand bassin fluvial aux changements climatiques – exemple du fleuve Columbia (Miles et coll., 2000)	Vulnérabilité/sensibilité aux changements climatiques et fiabilité du système d'approvisionnement en eau.	Données hydrométriques et ensemble de données hydrométriques reconstruites à partir des registres; données fiables sur les utilisations de l'eau et l'évapotranspiration des réservoirs mesurée à des températures et à des débits différents (en appui à l'estimation des débits naturels); données à long terme sur des indices climatiques (ENSO, Oscillation décennale du Pacifique, etc.)	Exploitation et modèle hydrologique du réservoir ColSim (ou d'un autre modèle hydrologique ou exploitation de réservoirs pertinents à l'échelle régionale).	Savoir-faire pour estimer les débits naturels à partir des débits mesurés.	Application régionale à grande échelle (bassin fluvial couvrant plusieurs États).
Méthode pour évaluer les effets des changements climatiques sur un cours d'eau aménagé pour la production d'énergie	Effets des modifications du régime hydrologique imputables aux changements climatiques sur divers aspects de la production d'énergie hydroélectrique.	Ensemble de données variables actuelles (historiques); données pour la création ou le calage de modèle (p. ex., information sur le tracé du réseau hydrographique, vue en coupe du chenal, enregistrements du débit, etc.); information sur les	Le Modèle régional canadien du climat pour la projection des séries chronologiques de données sur la température et les précipitations à une échelle réduite; un modèle hydrologique calibré à l'échelle du bassin versant ou du bassin fluvial à	Bonnes capacités de gestion de données et d'analyse statistique; savoir-faire pour la manipulation des données d'entrée, l'exécution du modèle hydrologique, l'analyse et l'interprétation des sorties du modèle, et éventuellement pour	Application axée surtout sur les bassins fluviaux ou bassins versants.

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe C

Méthode/ références	Types de critères/ paramètres employés	Données requises	Logiciel	Savoir-faire	Considérations relatives à l'échelle
hydroélectrique – rivière Péribonka, Québec, Canada (Minville et coll., 2009)		règles d'exploitation du réservoir.	l'étude, éventuelles caractéristiques opérationnelles du réservoir ou d'un autre système hydrologique (dans cet exemple, on utilise le modèle conceptuel distribué Hydrotel); un modèle d'optimisation pour la projection de l'adaptation des règles d'exploitation à l'évolution future du régime hydrologique; logiciel de gestion de données et d'analyse statistique.	caler ou même développer ledit modèle; savoir-faire nécessaire à l'exécution d'un modèle d'optimisation.	

Références

- Bogena, H. et H. Vereecken. 2008. *Global change and hydrology : on the importance of hydrologic observation*, exposé donné pendant l'atelier inaugural de TERENO, 22 septembre 2008, association Helmolz.
- Bogena, H.R., S. Attinger, O. Bens, T. Blume, A. Brauer, P. Dietrich, D. Doktor, S. Emeis, M. Frenzel, J. Friesen, A. Graf, I. Hajnsek, P. Haschberger, A. Hildebrandt, R. Kiese, S. Klotz, O. Kolditz, R. Kunkel, H. Kunstmann, A. Lücke, M. Mauder, J.C. Munch, C. Ohl, H. Papen, E. Priesack, T. Pütz, K. Rink, H.P. Schmid, R. Steinbrecher, G. Teutsch, J. Vanderborght, H.-J. Vogel, H. Vereecken, S. Zacharias et B. Zehner. Sans date (reçu par télétexte de H. Bogena, en nov. 2009). Plan de mise en œuvre de TERENO. 108 p.
- Fowler, H.J., C. G. Kilsby et P. E. O'Connell. 2003. « Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system ». *Water Resources Research*, 39(8):1222-1233.
- Johnson, T.E. et C.P. Weaver. 2009. « A Framework for Assessing Climate Change Impacts on Water and Watershed Systems », *Environmental Management* (2009), 43:118–134.
- Krol, M., A. Jaeger, A. Bronstert et A. Guntner. 2006. « Integrated modelling of climate, water, soil, agricultural and socio-economic processes: A general introduction of the methodology and some exemplary results from the semi-arid north-east of Brazil », *Journal of Hydrology*, 328:417–431.
- Leathwick, J. et K. Julian. 2009. « Setting priorities for protecting rivers and streams », *Water & Atmosphere*, 17(1):14-15.
- Miles, Edward L., A.K. Snover, A.F. Hamlet, B. Callahan et D. Fluharty. 2000. « Pacific Northwest Regional Assessment : The Impacts of Climate Variability and Climate Change on the Water Resources of the Columbia River Basin », *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2):399-420.
- Nelson, E., G. Mendoza, J. Regetz, S. Polasky, H. Tallis, D.R. Cameron, K.M.A. Chan, G.C. Daily, J. Goldstein, P.M. Kareiva, E. Lonsdorf, R. Naidoo, T.H. Ricketts et M.R. Shaw. 2009. « Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales », *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1):4-11.
- Ohlson, D.W., G.A. McKinnon et K.G. Hirsch. 2005. « A structured decision-making approach to climate change adaptation in the forest sector », *The Forestry Chronicle*, 81(1):97-103.
- Schröter, D., L. Acosta-Michlik, A.W. Arnell et coll. 2005. Rapport final de l'ATEAM 2004 section 5 et annexes 1 à 6, contrat n° EVK2-2000-00075, www.pik-potsdam.de/ateam/.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2008. *Application of watershed ecological risk assessment methods to watershed management*, National Center for Environmental Assessment, Washington, DC; EPA/600/R-06/037F, fourni par le National Technical Information Service, Springfield, VA, et en ligne au <http://www.epa.gov/ncea>.

C.4. DESCRIPTIONS D'AUTRES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE RÉSEAUX

Tableau C2. Descriptions d'autres méthodes d'évaluation de réseaux

Méthode	Exemples/ Références	Données requises	Logiciels	Savoir-faire	Applicabilité (p. ex., types d'instruments de mesure)	Échelle
Réduction de la variance/ méthodes d'acquisition de données	Fiering (1965), Matalas 1968), Rouhani (1985)	Séries chronologiques de données de jauges, selon des paramètres d'intérêt tels que débit de l'eau de surface, données relatives aux nappes phréatiques (puits) ou données sur les précipitations ou la température. Éventuelles données touchant les bassins versants (p. ex., superposition de données de SIG) et autres délimitations de strates	AKRIP (acronyme d'un programme de krigeage), ou autre logiciel statistique; logiciel de gestion de bases/données	Multiples capacités statistiques et analytiques, y compris en analyse de corrélation croisée, krigeage, algèbre matricielle (analyses de variogrammes), algorithmes itératifs pour réduire au minimum les écarts de krigeage; modélisation statistique/de régression aux fins de simulation de données (p. ex., débits) dans des secteurs non jaugés à partir de données de jauges	Par exemple des données hydrologiques et climatologiques de jauges	La plupart des approches de réduction de la variance sont sensibles aux importants changements dans les valeurs qui contribuent à la variance et à la covariance. Par conséquent, il s'agit probablement de méthodes qui se prêtent mieux à une application dans un bassin versant ou dans des secteurs stratifiés selon des caractéristiques physiques qui sont à l'origine de la variance hydrologique et climatologique
Méthodes géostatistiques et réduction des erreurs	Bastin et coll. (1984), Morrissey et coll. (1995), Cheng et coll. (2008), Nour et coll. (2006)	Données de pluviomètres (ou autres); données touchant les bassins versants (p. ex., superposition de données de SIG) et autres délimitations de strates	Logiciel statistique avancé; logiciel de gestion de bases/données	Multiples capacités statistiques et analytiques, y compris en calcul de krigeage et de variogramme connexe; sous-échantillonnage itératif de données de jauges existantes aux fins de synthèse d'ensembles de données provenant de sous-ensembles de réseaux; calcul de l'erreur-type et de l'erreur dans les partitions (ou sous-groupes) de données; interpolation spatiale de valeurs de données (modélisation	Réseaux pluviométriques; Pourraient probablement être appliquées à d'autres données de jauges	Même si elle met davantage l'accent sur l'estimation des erreurs, la méthode de réduction des erreurs est quand même sensible aux importants changements qui surviennent dans les sources de la variance des caractéristiques liées aux stations et dans la variabilité connexe des données de

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe C

Méthode	Exemples/ Références	Données requises	Logiciels	Savoir-faire	Applicabilité (p. ex., types d'instruments de mesure)	Échelle
				statistique); simulation statistique de séries chronologiques pour des sous-ensembles de données; analyse des tendances et estimation des erreurs connexes; utilisation de données de SIG pour l'étude de secteurs quadrillés et sous-ensembles; superposition et comparaison des résultats. Exécution de modèles pour générer des données chronologiques sur les précipitations (p. ex., ETGA (modèle de l'Expérience tropicale du Programme de recherches atmosphériques globales (GARP) dans l'Atlantique))		jauges. Par conséquent, ces méthodes peuvent être appliquées à des bassins versants ou sous-régions, ou à des secteurs stratifiés spatialement, c'est-à-dire que la méthode pourrait être appliquée sur de grands espaces si les données sont stratifiées (au moyen de diverses méthodes possibles)
Interpolation et réduction des erreurs	Milewska et Hogg (2001), Moss et Tasker (1991), Moss (1982), Tasker (1986), Vose et Menne (2004), Hutchinson, et coll. (2009)	Séries chronologiques de données climatiques par station (températures, précipitations); séries chronologiques de données hydrologiques provenant de jauges; données de SIG relatives à des secteurs d'étude aux fins de présentation des résultats et d'analyse spatiale	Logiciel statistique avancé; ANUSPLN; logiciel de SIG; logiciel de gestion de bases/données	Multiples capacités statistiques et analytiques, notamment en application des méthodes d'interpolation (p. ex., interpolation point à point de Gandin, interpolation point à secteur de Kagan; régressions régionales; analyse des erreurs d'interpolation; estimation par les moindres carrés généralisés; modélisation de régression; estimation et analyse des erreurs; lissage par interpolation de type plaque mince à trois variables (généralisation de la régression linéaire multivariée). Analyse spatiale (SIG) de la distribution géographique des résultats	Réseaux climatologiques, réseaux hydrologiques	Diverses échelles – on peut appliquer la méthode de Milewska et Hogg (2001) sur une grande échelle (à l'échelle nationale, p. ex., méthodes d'approximation élaborées pour tenir compte de la non-conformité aux suppositions en matière de variation). On peut étendre l'exemple de Vose et Menne (2004) à l'échelle nationale en appliquant la stratification par quadrillage régulier. On

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe C

Méthode	Exemples/ Références	Données requises	Logiciels	Savoir-faire	Applicabilité (p. ex., types d'instruments de mesure)	Échelle
						peut appliquer les méthodes d'analyse NARI et NAUGLS à une région ou un bassin versant
Densité des réseaux climatologiques en tant que donnée entrée dans les modèles hydrologiques	St-Hilaire et coll. (2003), Dong et coll. (2005), Anctil et coll. (2006)	Données climatologiques; données hydrologiques; données de caractérisation des bassins versants aux fins de calage des modèles	Modèle hydrologique HSAMI; modèle des précipitations/ruissellements de réseau neuronal pour prévoir les écoulements fluviaux; ou autre modèle hydrologique; logiciel statistique avancé; logiciel de gestion de bases/données	Compétences en modélisation et évaluation des modèles. Multiples capacités statistiques et analytiques, y compris les méthodes de calcul de krigeage et de variogramme connexe; techniques de création de sous-échantillons de séries de données statistiques; algorithmes d'optimisation	Réseaux climatologiques, réseaux hydrologiques	Au niveau des bassins versants
Méthodes de modélisation	Strobl et coll. (2006)	Données hydrologiques; vaste quantité de données de caractérisation des bassins versants compatibles avec les SIG (types de sol, topographie/élévation, utilisation du sol, permis de déversement, etc.)	Méthode des points de prélèvement critiques (CSP) au moyen du modèle d'analyse des stations de surveillance de la qualité de l'eau (WQMSA)	Modélisation basée sur les modèles de SIG, de logique floue et de simulation	Réseaux hydrologiques	Au niveau des bassins versants ou sous-bassins versants

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe C

Méthode	Exemples/ Références	Données requises	Logiciels	Savoir-faire	Applicabilité (p. ex., types d'instruments de mesure)	Échelle
Méthodes d'entropie et de théorie de l'information	Markus et coll. (2003), Husain (1989), Caselton et Husain (1980), Husain (1987)	Données hydrologiques	Logiciels statistiques et analytiques avancés; logiciel d'application GLS (GLSNET); logiciel de gestion de bases/données	Multiples capacités statistiques et analytiques, connaissance des formules et analyses d'entropie; interpolation des données, techniques d'inversement des étapes.	Réseaux hydrologiques	Au niveau des bassins versants
Méthodes d'optimisation	Mishra et Coulibaly (2009), et Langbein (1979), Mooley et Mohamed Ismail (1981)	Données hydrologiques	Varient, il peut s'agir de logiciels générant de l'information quantitative, conceptuelle ou statistique, de gestion de données ou de tabulation	Capacités statistiques et analytiques, spécialement en application méthodes d'optimisation.	Réseaux hydrologiques; réseaux climatologiques	Multiples
BASINS/CAT	Imhoff et coll. (2007)	Un grand nombre des types de données requises aux fins d'inclusion dans des modèles, y compris les cartes, les températures et les précipitations par secteur de bassin versant, sont déjà intégrées et disponibles dans le système aux États-Unis. Ces données seraient requises ici si l'on décidait d'utiliser cette forme de modélisation au Canada. On a besoin d'une source de données climatiques chronologiques et	Modèle BASINS ou autre modèle hydrologique de bassins versants, calé pour chaque bassin versant à évaluer; outil d'évaluation climatique (CAT); logiciels de gestion des données et d'analyse; logiciel de SIG.	Savoir-faire en modélisation hydrologique, et capacité d'exécuter l'outil d'évaluation climatique (CAT); gestion et analyse des données, et compétences liées aux SIG.	Réseaux hydrologiques	Le modèle BASINS est un modèle de bassins versants, mais peut également être appliqué à des sous-bassins versants (p. ex., bassins hydrographiques dans un gros bassin versant). Il faut tenir compte du fait que dans le cas de très gros bassins versants ou bassins fluviaux, la collecte de données, le calage des modèles et la vérification avec des données historiques

Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques – Annexe C

Méthode	Exemples/ Références	Données requises	Logiciels	Savoir-faire	Applicabilité (p. ex., types d'instruments de mesure)	Échelle
		historiques interpolées spatialement. Les données requises pour créer et caler le modèle en fonction d'un bassin versant incluraient diverses mesures physiques, dont les liens dans le réseau, les profils de chenal, les données sur le débit prélevées à différents endroits dans le bassin versant aux fins de calage, etc.				concernant les débits peuvent constituer un projet d'envergure. Même si un tel effort générerait certainement de précieuses données suite à l'application des modèles et concernant les relations en matière de sensibilité, il s'agirait d'une façon longue et coûteuse de définir les priorités régionales. Pour obtenir de l'information sur les sensibilités relatives aux changements climatiques de l'ensemble des bassins versants au sein d'une province ou d'un territoire, chaque bassin versant devrait faire l'objet de modélisation.

Références

- Bastin, G., C. D. Lorent et M. Gevers. 1984. « Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations ». *Water Resour. Res.*, 20, 463–470.
- Caselton, W. F. et T. Husain. 1980. « Hydrologic networks: Information transmission », *J. Water Resour. Plann. Manage Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 106(2):503–520.
- Cheng, K-S, Y-C Lin et J-J Liou. 2008. « Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics », *Hydrol. Process.*, 22:2554–2564.
- Fiering, M. B. 1965. « An optimization scheme for gaging », *Water Resources Research* 1(4):463–470.
- Husain, T. 1987. « Hydrologic network design formulation », *Can. Water Resour. J.*, 12(1):44–59.
- Husain, T. 1989. « Hydrologic uncertainty measure and network design », *Water Resour. Bull.*, 25(3):527–534.
- Imhoff, J.C., J.L. Kittle, M.R. Gray et T.E. Johnson, 2007. « Using the Climate Assessment Tool (CAT) in U.S. EPA BASINS integrated modeling system to assess watershed vulnerability to climate change », *Water Science & Technology*, vol. 56, n° 8, p. 49–56 © IWA Publishing 2007 doi:10.2166/wst.2007.595
- Langbein, W. B. 1979. « Overview of the Conference on Hydrologic Data Networks », *Water Resour. Res.*, 15(6):1867–1871.
- Hutchinson, M.F., D.W. McKenney, K. Lawrence et J.H. Pedlar. 2009. « Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum–Maximum Temperature and Precipitation for 1961–2003 ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48:725–741.
- Markusa, M., H.V. Knappa et G.D. Tasker. 2003. « Entropy and generalized least square methods in assessment of the regional value of stream gages ». *Journal of Hydrology*, 283:107–121.
- Matalas, N. C. et E. J. Gilroy. 1968. « Some comments on regionalization in hydrologic studies », *Water Resour. Res.*, 4(6):1361–1369.
- Milewska, E. et W.D. Hogg. 2001. « Spatial Representativeness of a Long-Term Climate Network in Canada », *Atmosphere-Ocean* 39 (2):145–161.
- Mishra, A.K. et P. Coulibaly. 2009. « Developments in hydrometric network design: a review ». *Rev. Geophys.*, 47, RG2001, doi:10.1029/2007RG000243.

- Mooley, D. A. et P. M. Mohamed Ismail. 1981. « Network density for the estimation of areal rainfall ». *Hydrol. Sci. J.*, 26(4):369–378.
- Morrissey, L. M., J. A. Maliekal, J. S. Greene et J. Wang. 1995. « The uncertainty of simple spatial averages using rain gauge networks », *Water Resour. Res.*, 31(8):2011 –2018.
- Moss, M. E. 1982. *Concepts and techniques in hydrological network design*, Public.MO. 580.
- Moss, M. E. et G. D. Tasker. 1991. « An intercomparison of hydrological network-design technologies ». *Hydrol. Sci. J.*, 36:209–221.
- Nour, M. H., D. W. Smit et M. G. El-Din. 2006. « Geostatistical mapping of precipitation: Implications for rain gauge network design », *Water Sci. Technol.*, (10), 101 – 110.
- Rouhani, S. 1985. « Variance-reduction analysis », *Water Resour. Res.*, 21:837–846.
- Strobl, R.O., P.D. Robillard, R.D. Shannon, R.L. Day et A.J. McDonnell. 2006. « A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: part I », *Environmental Monitoring and Assessment*, 112:137–158.
- Strobl, R.O., P.D. Robillard, R.D. Shannon, R.L. Day et A.J. McDonnell. 2006. « A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: part II », *Environmental Monitoring and Assessment*, 122:319-334.
- Tasker, G. D. 1986. « Generating efficient gauging plans for regional information », *Integrated Design of Hydrological Networks*, éd. M.E. Moss, Proc Budapest Symp. IAHS Publ. n° 158, 269-281.
- Vose, R.S. et M.J. Menne. 2004. « A Method to Determine Station Density Requirements for Climate Observing Networks », *Journal of Climate*, 17:2961-2971.