

Détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC

Guide technique



Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par Yohann Tremblay, Marie-Catherine Talbot Poulin et John Molson du Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval, avec l'apport d'Yves Leblanc, consultant en hydrogéologie, et d'Isabelle Bédard, de Zêta Communication. L'Université Laval a été mandatée par la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Renseignements

Pour tout renseignement, vous pouvez communiquer avec le Centre d'information.

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Télécopieur : 418 646-5974

Courriel : info@environnement.gouv.qc.ca

Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Pour obtenir un exemplaire du document :

Visitez notre site Web :

www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines

Référence à citer

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
Détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC – Guide technique, 2019. 86 pages. [En ligne].
www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/drastringuide.pdf

Dépôt légal – 2019
Bibliothèque et Archives nationales du Québec

ISBN 978-2-550-84118-0 (en ligne)

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec – 2019

RÉSUMÉ

Ce guide technique décrit la méthodologie recommandée par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (ci-après le Ministère) pour la réalisation des études nécessaires à la détermination des aires de protection des sites de prélèvement d'eau souterraine destinée à la consommation humaine ainsi que pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine par la méthode DRASTIC, telle que prescrite par le [Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection](#) (chapitre Q-2, r.35.2) principalement pour les prélèvements de catégorie 1. Il détaille les meilleures pratiques afin que les travaux assurent l'obtention de résultats de qualité conformes aux règles de l'art, tout en standardisant la méthodologie et le contenu des études. Ce guide s'adresse ainsi aux professionnels qui doivent réaliser des études, qu'elles soient considérées comme sommaires ou détaillées selon le [Guide sur les études hydrogéologiques](#) (MELCC, à paraître). Il s'adresse également à ceux qui doivent évaluer la validité, que ce soit dans le cadre de demandes d'autorisation faites au Ministère pour de nouveaux prélèvements en eau ou préalablement à l'analyse quinquennale de vulnérabilité des sources telle que décrite dans le [Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec](#) (MELCC, 2018). Enfin, ce guide fournit des outils pour sensibiliser les municipalités et autres responsables des prélèvements en eau potable à l'importance et aux bénéfices réels, présents et futurs, de réaliser un travail de qualité.

Ce guide vise aussi à outiller les professionnels réalisant ces études afin que les informations présentées tiennent compte des changements des conditions environnementales, dont les changements climatiques, de l'occupation du territoire et de la démographie. En plus de la marche à suivre, le guide fait état des éléments qui devraient apparaître dans les rapports d'étude, quel que soit le cadre dans lequel l'étude aura été réalisée.

En introduction, le guide définit les objectifs visés par la détermination des aires de protection des prélèvements et l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine, et présente ensuite les exigences du [Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection](#) concernant ces aspects. Le guide met l'accent sur la démarche recommandée pour réaliser les travaux de détermination des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC. Plusieurs outils complémentaires utiles à la réalisation des travaux et à leur évaluation sont présents en annexes ou sont publiés séparément du présent guide.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	iii
Remerciements	x
Avant-propos	xi
Introduction	1
1. Aires de protection des prélèvements d'eau souterraine destinée à la consommation humaine	1
1.1. Vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine par la méthode DRASTIC	3
1.2. Historique et structure du guide	4
2. Cadre réglementaire pour les prélèvements d'eau souterraine	6
2.1. Aire de protection immédiate	7
2.2. Aires de protection intermédiaires	8
2.3. Aire de protection éloignée	8
2.4. Niveaux de vulnérabilité des aires basés sur l'indice DRASTIC	8
3. Marche à suivre	10
3.1. Étape 1 : Recherche des informations existantes	13
3.1.1. Description du site de prélèvement et de l'installation	13
3.1.2. Informations pour définir les enjeux de protection	14
3.1.3. Informations pour définir le système hydrogéologique et le modèle conceptuel	14
3.1.4. Présentation des données recueillies	16
3.2. Étape 2 : Enjeux de protection du prélèvement	19
3.2.1. Importance du prélèvement pour la communauté	20
3.2.2. La présence d'activités encadrées par réglementation visant la protection du prélèvement	21
3.2.3. Ampleur des problématiques de contamination potentielle	21
3.2.4. Présentation cartographique de certains enjeux de protection	22

3.3. Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel	23
3.3.1. La complexité de l'installation de prélèvement	25
3.3.2. Géométrie de l'aquifère	26
3.3.3. Direction d'écoulement	27
3.3.4. Conditions de confinement	27
3.3.5. Hypothèse du milieu poreux équivalent	28
3.3.6. Hétérogénéité de l'aquifère	30
3.3.7. Degré d'anisotropie des propriétés hydrauliques de l'aquifère	31
3.3.8. Représentation visuelle du modèle conceptuel	32
3.4. Étape 4 : Choix des méthodes de détermination des aires de protection	34
3.4.1. Les différentes approches	34
3.4.2. Critères de sélection des méthodes	35
3.5. Étape 5 : Acquisition et traitement des données	39
3.5.1. Identification des données manquantes	39
3.5.2. Visite du site de prélèvement d'eau et du territoire à l'étude	41
3.5.3. Détermination du débit journalier moyen d'exploitation	41
3.5.4. Forage et installation de puits d'observation	42
3.5.5. Levé piézométrique	44
3.5.6. Essais hydrauliques et autres mesures des propriétés hydrauliques de l'aquifère	45
3.5.7. Essais de traçage	47
3.5.8. Échantillonnage et analyse d'eau souterraine	47
3.5.9. Investigation géophysique	48
3.5.10. Levés structuraux	48
3.5.11. Évaluation de la recharge	48
3.5.12. Respect des conditions d'utilisation et des hypothèses simplificatrices des méthodes	52
3.5.13. Présentation des résultats de délimitation des aires de protection	54

3.6. Étape 7 : Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine par la méthode DRASTIC	57
3.6.1. La méthode DRASTIC	57
3.6.2. Présentation des résultats de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine	60
3.7. Étape 8 : Discussion sur la qualité et la pérennité des résultats	62
3.7.1. Discussion sur la qualité des résultats	63
3.7.2. Discussion sur la pérennité des résultats face aux changements des conditions dans le temps	65
Conclusion	67
Références bibliographiques	68
Annexe I : Listes des tableaux et des figures types	76
Annexe II : Liste de vérification des travaux réalisés	78
Annexe III : Critères de validité des hypothèses de milieu poreux équivalent homogène et d'isotropie	83
Annexe IV : Détermination des coefficients de ruissellement	84
Outils disponibles	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dimensions des aires de protection d'un prélèvement d'eau souterraine effectué à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire et leur niveau de vulnérabilité selon la catégorie du prélèvement _____	9
Tableau 2 : Tableau récapitulatif des données existantes recueillies et acquises lors des travaux _____	17
Tableau 3 : Approches et méthodes de détermination des aires de protection, classées en fonction de la précision croissante des résultats ____	35
Tableau 4 : Données nécessaires à chaque approche de détermination des aires de protection _____	40
Tableau 5 : Données nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine à l'aide de la méthode DRASTIC _____	41
Tableau 6 : Paramètres d'entrée utilisés et calibrés dans le calcul des aires de protection _____	55
Tableau 7 : Niveaux de vulnérabilité de l'eau souterraine prescrits par le RPEP selon les indices DRASTIC, pour les aires de protection des prélèvements de catégorie 1 _____	58
Tableau 8 : Résultat de l'indice DRASTIC et valeurs des paramètres d'entrée utilisées dans le calcul _____	61
Tableau 9 : Effet sur la superficie des aires d'une augmentation de valeur des principaux paramètres d'entrée utilisés pour la détermination des aires de protection _____	64

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Schématisation des aires de protection d'un site de prélèvement d'eau souterraine de catégorie 1 _____ 3
- Figure 2 : Marche à suivre pour la détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC _____ 11
- Figure 3 : Couverture des projets de caractérisation régionale de l'eau souterraine du Québec méridional _____ 16
- Figure 4 : Mise en perspective des coûts à court et à long terme : cas où une détermination de qualité des aires de protection est moins coûteuse à long terme qu'une détermination approximative _____ 20
- Figure 5 : Validation de l'hypothèse de limites infinies de l'aquifère à l'échelle des aires de protection : A) hypothèse valide lorsque les limites des aires de protection sont à l'intérieur des limites de l'aquifère; B) hypothèse non valide lorsque les aires de protection sont limitées par une barrière hydraulique _____ 26
- Figure 6 : Incertitude sur la délimitation des aires de protection liée à la direction d'écoulement : A) direction d'écoulement mal orientée entraînant la délimitation d'une mauvaise partie de territoire; B) et C) direction d'écoulement non uniforme dans l'aire de protection _____ 27
- Figure 7 : Continuité des conditions de confinement : A) aquitard épais et continu sur toute l'aire d'alimentation; B) aquitard non continu constitué par exemple de dépôts alluvionnaires, deltaïques ou glaciaires, ou présence de lentilles d'argile; C) aquitard non continu avec affleurement rocheux par endroit _____ 28
- Figure 8 : Résultats d'essais de pompage pour lesquels l'hypothèse du milieu poreux équivalent s'applique ou ne s'applique pas : A) graphiques débit-rabattement; B) courbes temps-rabattement (modifié de l'USEPA, 1991) _____ 30
- Figure 9 : Trois types d'hétérogénéité de l'aquifère : A) variation de l'épaisseur de l'aquifère qui fait varier sa transmissivité; B) aquifère multicouche aux conductivités hydrauliques différentes; C) changement latéral de conductivité hydraulique de l'aquifère _____ 31
- Figure 10 : Effet de l'anisotropie horizontale causée par des fractures préférentielles sur l'orientation des aires de protection (modifié de l'USEPA, 1991) _____ 32
-

Figure 11 : Exemple de coupe verticale représentant le modèle hydrogéologique conceptuel _____ 33

Figure 12 : Cheminement décisionnel pour le choix d'une méthode de calcul appropriée pour la détermination des aires de protection intermédiaires et éloignée d'un prélèvement de catégorie 1 _____ 37

Figure 13 : Illustration des aires de protection exclusives l'une de l'autre aux fins de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (ce qui est différent des aires inclusives illustrées à la Figure 1)___ 59

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce guide tiennent à souligner l'apport bénéfique de membres du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, dont Édith Bourque, Michel Ouellet, Diane Myrand et Ihssan Dawood de la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines, ainsi que Nicolas Roy du Pôle d'expertise municipale.

La contribution de Mélanie Raynauld et de René Lefebvre de l'INRS-ETE pour leurs précieux commentaires et suggestions est également à souligner. Finalement, les auteurs remercient des professionnels en hydrogéologie qui ont gracieusement fait une révision critique du guide, soit Dominique Proulx d'Arrakis Consultants inc., Julie Gauthier de Laforest Nova Aqua inc. et Jean-Marc Lauzon, Luc Champagne, Caroline Scalzo et Olivier Pontlevoy de TechnoRem inc.

AVANT-PROPOS

Le contenu du présent guide constitue les bonnes pratiques existantes lors de sa publication. Elles pourraient changer dans le temps. De plus, le guide ne constitue pas un document réglementaire. En cas de divergence entre le guide et un texte réglementaire, ce dernier prévaut.

INTRODUCTION

Les efforts requis et les coûts encourus pour l'établissement de systèmes d'approvisionnement et de distribution d'eau potable étant considérables, les propriétaires des prélèvements devraient s'assurer de protéger leurs investissements. Le traitement d'une eau brute de mauvaise qualité est très exigeant en matière d'équipements, de fonctionnement et d'entretien. De plus, la décontamination de l'eau souterraine est difficile, voire dans certains cas, impossible. Ainsi, une source d'approvisionnement alternative peut s'avérer la seule solution envisageable en cas de contamination. Le maintien de la qualité de la source est donc assurément rentable à long terme. La protection de la source d'eau potable constitue la première des barrières multiples visant à garantir une eau saine « de la source au robinet » en réduisant les risques de contamination ou de défaillance des systèmes d'approvisionnement (CCME, 2004). Selon le principe des barrières multiples, dans le cas où une barrière fait défaut, le maintien des autres barrières assure la protection de la santé des consommateurs.

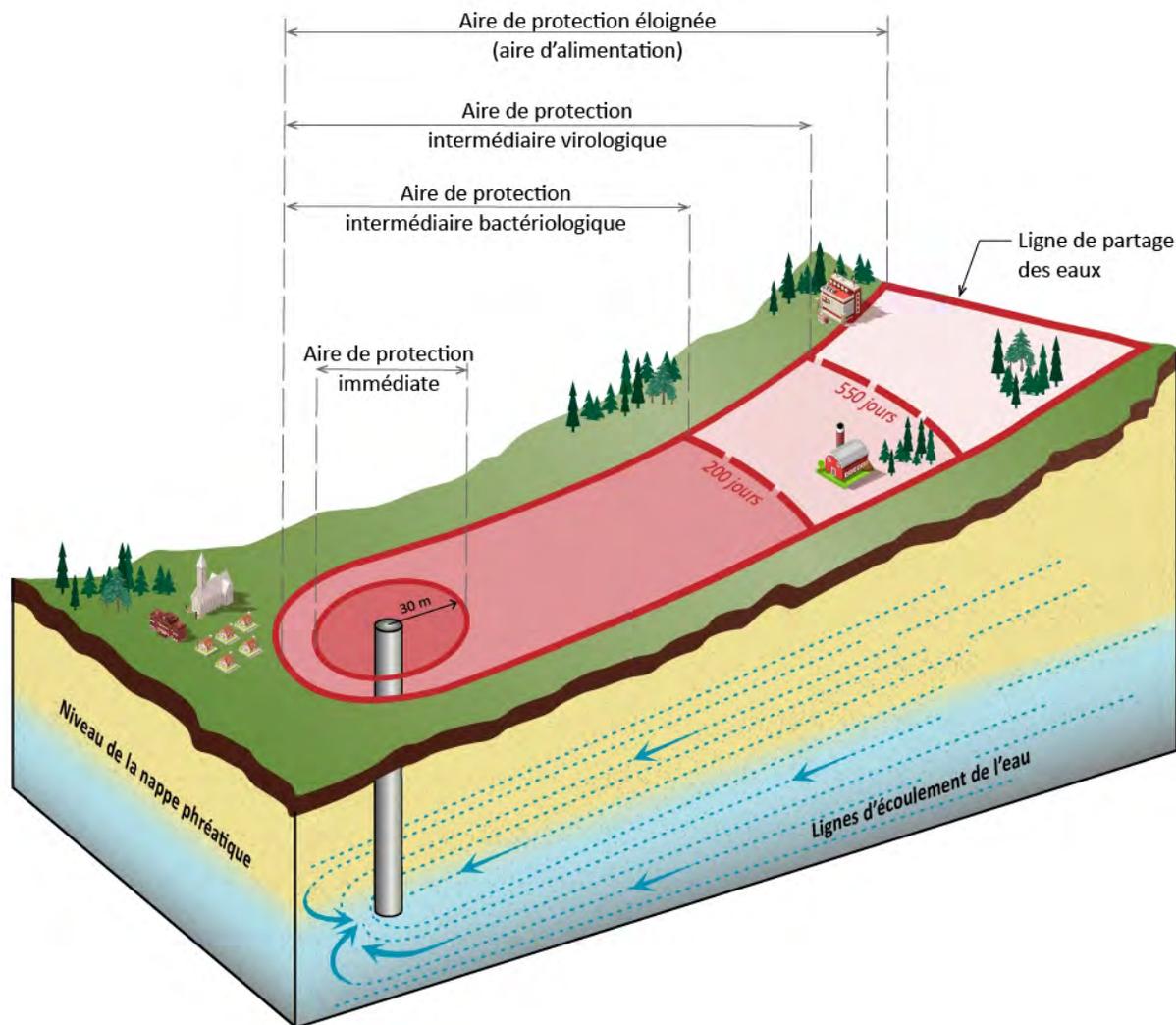
1. AIRES DE PROTECTION DES PRÉLÈVEMENTS D'EAU SOUTERRAINE DESTINÉE À LA CONSOMMATION HUMAINE

Les aires de protection sont des portions de l'aire de l'alimentation dans lesquelles les activités potentiellement polluantes doivent être restreintes ou interdites de manière à protéger le prélèvement d'eau. L'aire d'alimentation d'une source d'eau potable souterraine est définie comme étant la superficie du terrain au sein duquel les eaux souterraines y circulant vont éventuellement être captées par l'installation de prélèvement d'eau ([Figure 1](#)). Une aire de protection est représentée par une enveloppe en 2D à la surface du terrain.

Une détermination des aires de protection basée sur les directions d'écoulement et les temps de transport de l'eau reflétant dans la mesure du possible la réalité est essentielle, non seulement pour assurer la protection du prélèvement, mais également parce que la surprotection du prélèvement peut limiter le développement et avoir des conséquences économiques négatives importantes (ex. : acquisition de terrains, cessation d'activités agricoles et perte de revenu, frais supplémentaires liés à l'utilisation d'engrais non organiques, déplacement de pâturages, frais professionnels, etc.) (MDDELCC, 2016a). Cependant, la délimitation des aires de protection comporte inévitablement une part d'incertitude puisque le comportement de l'eau souterraine à travers les milieux géologiques doit être déduit et les valeurs des paramètres le décrivant doivent être estimées. Les informations et données ne sont disponibles qu'à des points précis du territoire, par exemple aux lieux des puits, forages, affleurements rocheux et levés géophysiques, ce qui implique que des interprétations doivent être faites entre ces « fenêtres » de données.

De manière générale, la fiabilité des interprétations est fonction de la densité et de la précision des données et informations utilisées et de leur quantité. L'incertitude qu'il est possible de tolérer dépend des enjeux de protection et de la complexité du système hydrogéologique.

Figure 1 : Schématisation des aires de protection d'un site de prélèvement d'eau souterraine de catégorie 1



1.1. Vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine par la méthode DRASTIC

La vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine, c'est-à-dire sa sensibilité naturelle à la contamination, doit être évaluée pour chaque aire de protection pour déterminer les terrains sur lesquels des mesures de protection devraient être mises en œuvre afin de réduire le risque de contamination. Cette vulnérabilité intrinsèque diffère de la vulnérabilité décrite dans le [Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec](#) (MELCC, 2018), qui implique une analyse de risque. Cette analyse comprend une identification des activités anthropiques, des événements potentiels et affectations du territoire susceptibles d'affecter la quantité d'eau prélevée ou sa qualité, une évaluation des menaces en découlant et l'identification des causes pouvant expliquer les problèmes de qualité de l'eau présents ou passés.

La méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) constitue une des méthodes largement employées pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine. Son utilisation est prescrite par le [Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection](#) (chapitre Q-2, r.35.2, ci-après le RPEP). Cette méthode permet d'évaluer, à l'aide de paramètres géologiques et hydrogéologiques, la susceptibilité d'un contaminant non défini qui serait mobilisé par l'eau à la surface à s'infiltrer dans le sol et à percoler verticalement jusqu'à la nappe. Plus un contaminant devra parcourir une grande distance et mettre du temps pour atteindre l'aquifère, moins l'eau souterraine sera vulnérable. Un temps de parcours élevé permet à certains polluants de s'atténuer et au responsable du prélèvement de disposer de davantage de temps pour intervenir.

1.2. Historique et structure du guide

L'Agence de protection de l'environnement des États-Unis a publié en 1987 un premier guide sur les méthodes de détermination des aires de protection des puits (USEPA, 1987). Près d'une décennie plus tard, le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec publiait un guide technique dans lequel une méthode simple de détermination des aires de protection, basée sur des équations analytiques, était suggérée (MEFQ, 1995). Cette méthode est encore largement utilisée aujourd'hui, bien que des méthodes plus précises existent et que des outils plus adéquats aient été créés. Plus récemment, le gouvernement québécois a publié un autre ouvrage portant sur les outils de détermination des aires de protection (Rasmussen *et al.*, 2006). Des notions de base en hydrogéologie, les paramètres géologiques influençant les propriétés hydrogéologiques d'un aquifère, les différents types d'aquifère du Québec et l'histoire géologique de la province y sont aussi présentés, ainsi que des méthodes d'investigation sur le terrain. De nombreuses méthodes de détermination des aires de protection y sont détaillées, sans toutefois que soient énoncées des directives claires par rapport aux attentes du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. L'objectif du présent guide n'est donc pas de reprendre l'ensemble de ces thèmes, mais plutôt de recommander une marche à suivre pratique pour la détermination des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC.

Dans le présent guide technique, les exigences du RPEP concernant les aires de protection et la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine sont résumées à la section [Cadre réglementaire pour les prélèvements d'eau souterraine](#). La section [Marche à suivre](#) détaille en huit étapes distinctes la méthodologie pour déterminer les aires de protection et les indices de vulnérabilité DRASTIC. La [Conclusion](#) du guide précède une liste de [Références bibliographiques](#). Enfin, plusieurs outils complémentaires sont présentés en [Annexes](#) ou sous forme d'[Outils disponibles](#) publiés séparément :

L'[Annexe I : Listes des tableaux et des figures](#) types qui devraient être inclus dans les rapports d'étude;

L'[Annexe II : Liste de vérification des travaux réalisés](#);

L'[Annexe III : Critères de validité des hypothèses de milieu poreux équivalent homogène et d'isotropie](#) (liste des principaux critères);

L'[Annexe IV : Détermination des coefficients de ruissellement](#) (gamme de valeurs de coefficients de ruissellement selon différents paramètres);

La [liste des données disponibles utiles en hydrogéologie](#);

Les [contextes hydrogéologiques généraux du sud du Québec](#)

Les fiches descriptives des [principales méthodes de détermination des aires de protection](#);

La Fiche descriptive de la [méthode DRASTIC pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine](#);

La fiche descriptive des méthodes d'[investigation géophysique appliquée à l'hydrogéologie](#).

2. CADRE RÉGLEMENTAIRE POUR LES PRÉLÈVEMENTS D'EAU SOUTERRAINE

En vertu de l'article 31.75 de la [Loi sur la qualité de l'environnement](#) (chapitre Q-2; ci-après la LQE), tout prélèvement d'eau, sauf exception, est subordonné à l'autorisation du ministre. Ce pouvoir d'autorisation doit être exercé de manière à assurer la protection des ressources en eau, en favorisant une gestion durable, équitable et efficace des ressources en eau du Québec, et en prenant en compte le principe de précaution ainsi que les effets du changement climatique (article 31.76 de la LQE).

Le [Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection](#) (chapitre Q-2, r.35.2), comme introduit à son article 1, prévoit les modalités relatives à cette autorisation, tout en prescrivant certaines normes applicables aux prélèvements d'eau, aux installations servant à les effectuer ou à des installations ou activités susceptibles de porter atteinte à la qualité de l'eau pouvant être prélevée à proximité. Le RPEP vise particulièrement à assurer la protection des eaux prélevées à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire. D'autres règlements contribuent aussi à cet objectif de protection en exigeant le respect d'une distance séparatrice entre certains usages ou activités (lieux d'enfouissement technique, carrières et sablières, entreposage de produits pétroliers, etc.) et un site de prélèvement d'eau souterraine.

Le présent guide s'intéresse exclusivement aux exigences réglementaires du RPEP liées à la détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC et s'avère donc utile dans deux cas particuliers :

- Pour réaliser les travaux lors de l'établissement d'un nouveau prélèvement d'eau, ou lors d'une modification ou d'une mise à jour pour un prélèvement existant;
- Pour évaluer la validité d'une étude réalisée dans le cadre d'une demande d'autorisation d'un prélèvement ou d'une analyse quinquennale de vulnérabilité du prélèvement (MELCC, 2018).

L'impact économique des contraintes prévues par le RPEP pour certaines activités effectuées dans les aires de protection doit être évalué (art. 7, 1^{er} al., par. 12). Cette exigence fait en sorte que les aires et la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine sont des renseignements qui doivent être fournis lors d'une demande d'autorisation de prélèvement d'eau prévue à l'article 31.75 de la LQE. Il en va de même lors du renouvellement de l'autorisation ou de sa modification, puisque l'article 10 du RPEP prévoit que les renseignements fournis lors de la demande initiale d'autorisation doivent être mis à jour.

La délimitation des aires de protection et la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine sont aussi des renseignements qui font partie des éléments que doit comprendre le rapport d'analyse de vulnérabilité d'un prélèvement exigé à l'article 68 du RPEP. Le [Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec](#) (MELCC, 2018) stipule que le professionnel réalisant cette analyse devrait préalablement s'assurer que la délimitation des aires de protection est adéquate.

La détermination des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC des prélèvements d'eau d'appoint (ou secondaires) qui sont utilisés régulièrement, chaque année ou presque, en complément ou en remplacement de l'installation de prélèvement principal est une exigence du RPEP. Ce n'est toutefois pas le cas pour les prélèvements d'eau d'urgence, utilisés

de façon exceptionnelle comme solution de recharge au prélèvement d'eau principal lorsque ce dernier fait face à un problème majeur non récurrent (situation d'urgence).

Les prélèvements qui servent à 20 personnes et moins et qui sont inférieurs à 75 000 litres par jour sont quant à eux soumis à une autorisation municipale. Les exigences réglementaires pour ces prélèvements sont documentées dans le [Guide technique – Prélèvement d'eau soumis à l'autorisation municipale](#) (MDDELCC, 2015b).

Le [Tableau 1](#) indique les trois catégories de prélèvement d'eau effectué à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire, telles qu'établies à l'article 51 du RPEP, et visées pour la détermination d'aires de protection. L'annexe 0.1 du [Règlement sur la qualité de l'eau potable](#) (chapitre Q-2, r.40; ci-après le RQEP) décrit le mode de calcul permettant de définir la clientèle approvisionnée par un prélèvement. Le [Guide d'interprétation du RQEP](#) (MDDELCC, 2016b) indique quelques précisions supplémentaires. L'article 3 du RPEP stipule que dans l'application de ces calculs, sont réputés constituer un seul prélèvement d'eau les prélèvements d'eau effectués à chacun des sites de prélèvement qui sont reliés à un même établissement, à une même installation ou à un même système d'aqueduc.

Les types d'aires de protection (immédiate, intermédiaire et éloignée) et leurs limites par rapport au site de prélèvement sont présentés dans le [Tableau 1](#) pour chaque catégorie de prélèvement, comme exigé aux articles 54, 57 et 65 du RPEP. Les niveaux de vulnérabilité des aires basés sur l'indice DRASTIC, prescrits à l'article 53, y sont aussi définis.

Pour l'aire de protection immédiate des prélèvements de catégorie 1, de même que pour toutes les aires des prélèvements de catégories 2 et 3, la réglementation prescrit des distances fixes arbitraires, soit des aires de protection de forme simple circulaire, centrées sur le site de prélèvement. Toutefois, pour l'aire de protection éloignée de la catégorie 2, la distance fixe arbitraire ne s'applique que vers l'amont hydraulique, ce qui donne un demi-cercle, dont le site de prélèvement est situé au foyer de l'arc de cercle. Pour tous ces cas, la délimitation des aires est très simple (voir [Approche 1 : Rayon fixe arbitraire](#) pour plus de précisions).

L'utilisation de méthodes de détermination plus complexes nécessitant des calculs est requise pour les aires de protection intermédiaires et éloignée des prélèvements de catégorie 1. La démarche méthodologique proposée dans ce guide concerne donc spécifiquement ces cas. De plus, même si des rayons fixes arbitraires sont prescrits par le RPEP pour les catégories de prélèvement 2 et 3, les aires peuvent aussi être déterminées par un professionnel de la même manière que pour les prélèvements de catégorie 1.

2.1. Aire de protection immédiate

L'aire de protection immédiate permet de protéger l'intégrité de l'installation de prélèvement. Toute activité présentant un risque de contamination de l'eau y est interdite, sauf celles relatives à l'opération, à l'entretien, à la réparation ou au remplacement de l'installation de prélèvement d'eau ou des équipements accessoires.

Pour les prélèvements de catégorie 1 et 2, l'aire de protection immédiate correspond par défaut au territoire situé à l'intérieur d'un rayon de 30 m autour du site de prélèvement. Cette aire peut être délimitée autrement, sur la base d'une étude hydrogéologique préparée par un professionnel et conforme aux critères précisés à l'article 54 du RPEP. Dans ce cas, l'aire de protection immédiate peut être réduite à moins de 30 m.

Pour les prélèvements de catégorie 3, le rayon prescrit à l'article 54 du RPEP est de 3 m.

2.2. Aires de protection intermédiaires

L'approche prescrite par le RPEP pour la détermination des aires de protection intermédiaires des prélèvements de catégorie 1 est basée sur le temps de transport de l'eau souterraine. Il s'agit d'évaluer, pour une période de temps donnée, la distance qu'une particule d'eau présente dans l'aquifère doit parcourir pour atteindre l'installation de prélèvement. Cette approche peut être considérée comme conservatrice puisqu'elle ne considère pas le temps de parcours lié à la composante verticale de l'écoulement dans la zone vadose et dans l'aquifère, soit le temps de percolation depuis la surface jusqu'à la nappe, puis selon le cas, du toit de la nappe jusqu'à l'aquifère exploité. De plus, l'approche ne considère que le temps de transport de l'eau par le mécanisme de transport advectif. Elle néglige de considérer les mécanismes d'atténuation naturelle d'un contaminant qui serait présent dans l'eau, tels que la dispersion, la sorption, la biodégradation, les réactions chimiques et l'écoulement des liquides denses en phase non aqueuse. Ces mécanismes peuvent avoir une importance significative pour certains contaminants potentiels. Une telle approche se veut généralement sécuritaire tout en étant plus simple d'application.

Le temps de transport de 200 jours utilisé pour déterminer l'aire bactériologique ([Tableau 1](#)) est établi en fonction d'une estimation de la durée de vie maximale des bactéries pathogènes dans l'eau souterraine dans les conditions hydrogéologiques et climatiques du Québec. Pour l'aire virologique, le temps de transport de 550 jours ([Tableau 1](#)) correspond au seuil à partir duquel les virus pouvant être présents dans l'eau souterraine sont réputés être totalement inactifs ou sans danger pour la santé en cas d'ingestion. Notons que d'autres provinces canadiennes ont adopté des critères pour la détermination d'aires de protection basés sur des temps de transport, dont l'Ontario et la Nouvelle-Écosse, qui prescrivent un temps de transport de deux ans pour leur aire de protection microbiologique (bactériologique et virologique) (Nova Scotia Environment Water and Wastewater Branch, 2004; ministère de l'Environnement de l'Ontario, 2015).

2.3. Aire de protection éloignée

L'aire de protection éloignée des prélèvements de catégorie 1 correspond à l'aire d'alimentation ([Tableau 1](#)), soit la superficie du terrain au sein duquel les eaux souterraines y circulant vont éventuellement être captées par l'installation de prélèvement. Toute contamination provenant de la surface à l'intérieur de cette aire est susceptible d'affecter tôt ou tard le site de prélèvement. Les limites de l'aire d'alimentation correspondent à un temps de transport advectif pouvant tendre vers l'infini, ce qui est conservateur comparativement à des législations voisines du Québec, dont la Nouvelle-Écosse, le Nouveau-Brunswick et l'Ontario, qui considèrent un temps de transport de 25 ans pour l'aire de protection la plus éloignée (Nova Scotia Environment Water and Wastewater Branch, 2004; ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, 2005; ministère de l'Environnement de l'Ontario, 2015).

2.4. Niveaux de vulnérabilité des aires basés sur l'indice DRASTIC

Le RPEP prescrit l'utilisation de la méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine. Le résultat de la méthode DRASTIC permet de classer, pour chaque aire de protection d'un prélèvement de catégorie 1, la vulnérabilité selon l'un des trois niveaux suivants : faible, moyen ou élevé ([Tableau 1](#)). Pour les prélèvements de catégories 2 et 3, la vulnérabilité est considérée comme élevée par défaut, à moins qu'un professionnel ne l'évalue autrement, conformément à la méthode DRASTIC.

Tableau 1 : Dimensions des aires de protection d'un prélèvement d'eau souterraine effectué à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire et leur niveau de vulnérabilité selon la catégorie du prélèvement

Catégorie de prélèvement	Description	Aire de protection				Niveaux de vulnérabilité des aires de protection basés sur l'indice DRASTIC
		Immédiate	Intermédiaire		Éloignée	
			Bactériologique	Virologique		
1	Système d'aqueduc d'une municipalité alimentant plus de 500 personnes et au moins une résidence	30 m ⁽¹⁾	Temps de migration de l'eau souterraine de 200 jours ⁽²⁾	Temps de migration de l'eau souterraine de 550 jours ⁽²⁾	L'aire d'alimentation complète ^(2,3)	<p><u>Faible</u> : Indice égal ou inférieur à 100 sur l'ensemble de l'aire</p> <p><u>Moyen</u> : Indice inférieur à 180 sur l'ensemble de l'aire, sauf s'il s'agit d'un indice correspondant au niveau « faible »</p> <p><u>Élevé</u> : Indice égal ou supérieur à 180 sur une quelconque partie de l'aire</p>
2	<p>a) Système d'aqueduc d'une municipalité alimentant de 21 à 500 personnes et au moins une résidence</p> <p>b) Tout autre système d'aqueduc alimentant 21 personnes et plus et au moins une résidence</p> <p>c) Système indépendant d'un système d'aqueduc alimentant 21 personnes et plus et au moins un établissement d'enseignement, de détention ou de santé et de services sociaux</p>	30 m ⁽¹⁾	100 m ⁽⁴⁾	200 m ⁽⁴⁾	2 km en amont hydraulique ⁽⁴⁾	Élevé ⁽⁴⁾
3	<p>a) Système indépendant d'un système d'aqueduc alimentant exclusivement un ou des établissements utilisés à des fins de transformation alimentaire</p> <p>b) Système indépendant d'un système d'aqueduc alimentant exclusivement au moins une entreprise ou un établissement touristique ou touristique saisonnier</p> <p>c) Tout autre système alimentant 20 personnes et moins (incluant les puits individuels)</p>	3 m	30 m ⁽⁴⁾	100 m ⁽⁴⁾	<i>Non requis</i>	Élevé ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Sauf si déterminé autrement par un professionnel, en fonction de certaines situations, dans une étude hydrogéologique.

⁽²⁾ Déterminé par un professionnel, à l'aide de données recueillies dans un minimum de trois puits aménagés au sein de la formation géologique aquifère exploitée par l'installation de prélèvement d'eau et pouvant être utilisés à des fins d'observation des eaux souterraines.

⁽³⁾ Superficie de terrain au sein duquel les eaux souterraines y circulant vont éventuellement être captées par l'installation de prélèvement d'eau.

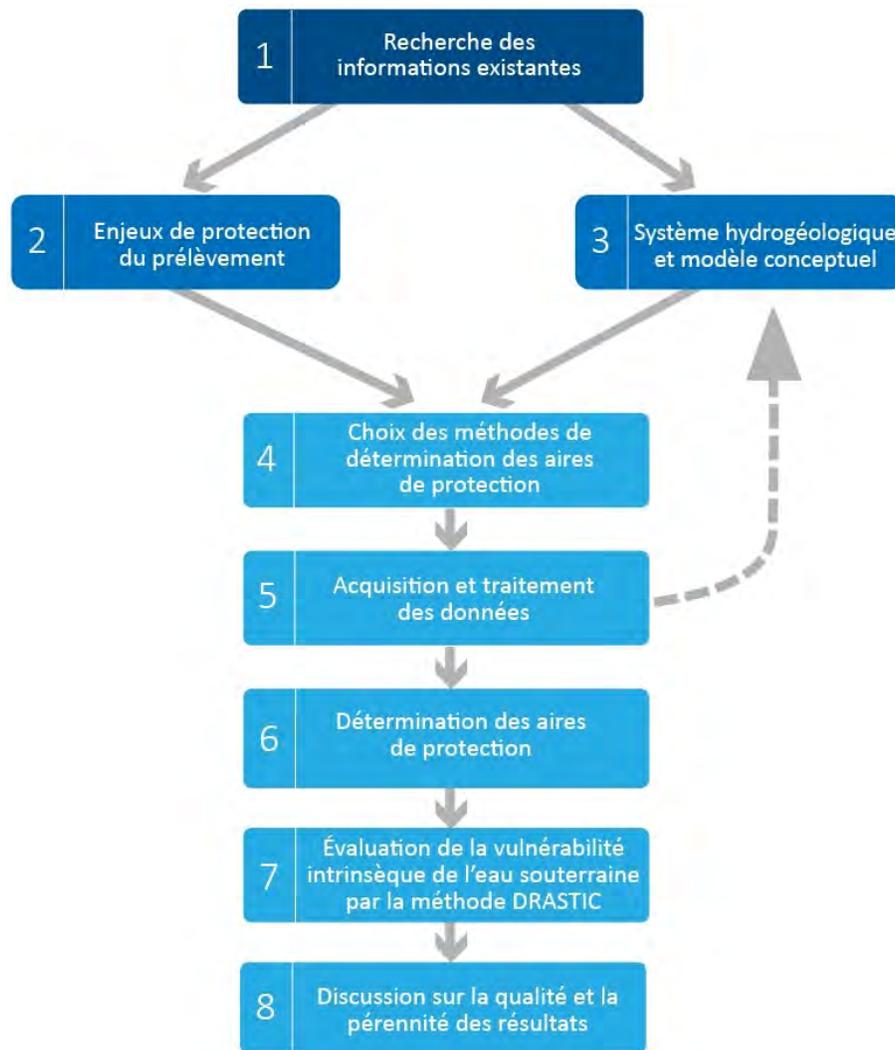
⁽⁴⁾ Sauf si déterminé par un professionnel conformément aux méthodes applicables aux prélèvements de catégorie 1.

3. MARCHE À SUIVRE

La marche à suivre pour la détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC est présentée de façon schématique à la [figure 2](#). Dans la poursuite de l'objectif commun d'assurer une protection adéquate du prélèvement d'eau souterraine, une réflexion éclairée en concertation avec le responsable du prélèvement devrait être faite concernant cette démarche. Le cheminement du professionnel mandaté pour cette étude n'est bien sûr pas si linéaire; les contraintes des enjeux de protection et du milieu physique sont confrontées à celles des ressources disponibles (coût, temps, expertise). Il s'agit d'une approche itérative qui nécessite un retour aux étapes précédentes dans plusieurs cas.

L'information présentée dans ce guide à chaque étape du cheminement n'est pas exhaustive et ne prévoit pas nécessairement toutes les situations. Le jugement du professionnel est essentiel et les choix effectués devraient être rapportés et discutés dans le rapport d'étude.

Figure 2 : Marche à suivre pour la détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC



La démarche débutera par une recherche et une analyse des données existantes. Tout d'abord, les informations transmises par le responsable du prélèvement concernant le puits d'exploitation et les données existantes sur le territoire à l'étude permettront de comprendre les enjeux de protection du prélèvement. Toutes les données disponibles sur le milieu physique seront aussi explorées afin de définir le modèle hydrogéologique conceptuel du secteur et d'évaluer la complexité du système hydrogéologique. Le choix de la méthode de détermination des aires de protection se fera par la suite en intégrant des critères définis par les enjeux de protection et la complexité du système hydrogéologique. Les données manquantes pour l'utilisation de la méthode choisie seront ensuite identifiées et cela sera suivi, si nécessaire, de travaux d'acquisition de nouvelles données et de leur traitement. Un retour à l'étape du modèle hydrogéologique conceptuel pourrait ensuite devoir être effectué à la lumière des nouvelles informations recueillies. Le choix de la méthode de détermination pourrait être révisé si le modèle conceptuel initial est modifié, ce qui nécessite parfois une nouvelle identification de données manquantes, l'acquisition de nouvelles données et un traitement supplémentaire des données.

Les aires de protection et la vulnérabilité intrinsèque DRASTIC seront ensuite déterminées. Une discussion sur la qualité des résultats et leur pérennité complétera l'analyse.

La présentation recommandée des données et des résultats est décrite au terme de chacune des étapes. Afin d'uniformiser la présentation des informations dans les rapports d'étude, une liste de tableaux et figures types que devraient contenir un rapport d'étude est fournie à l'[Annexe I : Listes des tableaux et des figures](#) types. Ce guide recommande les éléments que devrait contenir le rapport d'étude comme si l'étude de détermination des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC se déroulait de manière indépendante de toute autre étude hydrogéologique. Par exemple, afin de répondre aux exigences du RPEP, la mise à jour des aires de protection et des indices DRASTIC déterminés dans le cadre du précédent [Règlement sur le captage des eaux souterraines](#) (chapitre Q-2, r.6; ci-après le RCES) devrait nécessiter la réalisation de telles études indépendantes. Dans le cas où l'étude s'inscrit dans le cadre d'une caractérisation hydrogéologique plus complète lors d'une demande d'autorisation pour un nouveau prélèvement, telle que décrite dans le [Guide sur les études hydrogéologiques](#) (MELCC, à paraître), certains éléments seront déjà présentés dans une autre section de cette étude. Il n'apparaît alors pas utile de présenter à nouveau ces éléments et de doubler l'information.

L'[Annexe II : Liste de vérification des travaux réalisés](#) constitue un outil supplémentaire permettant d'encadrer la démarche. Le professionnel qui réalise l'étude peut y inscrire que les travaux ont été effectués selon la méthodologie recommandée. Si ce n'est pas le cas, il devrait justifier les raisons qui l'ont amené à procéder autrement. Cette liste pourrait aussi être utilisée lors de l'évaluation des demandes d'autorisation qui sont faites au Ministère pour de nouveaux prélèvements en eau. Cet outil est toutefois complémentaire à la lecture des rapports. Une réflexion basée uniquement sur cette liste ne constituerait pas une analyse complète.

3.1. Étape 1 : Recherche des informations existantes

Une recherche exhaustive des données disponibles permet de limiter et d'optimiser les travaux à réaliser. La [liste des données disponibles utiles en hydrogéologie](#) fournit les sources des données disponibles concernant la géologie, l'hydrogéologie, le climat, l'hydrologie et d'autres données cartographiques sur le territoire, y compris de l'information sur leur accessibilité. De nombreuses données de qualité sont maintenant accessibles directement sur Internet et souvent gratuitement.

Il est important d'impliquer le responsable du prélèvement dans le processus de recherche d'information. L'information dont il dispose est généralement plus précise et plus actuelle que celle qui se trouve dans les autres sources de données disponibles. De plus, l'implication du personnel de la municipalité dans le processus de recherche de données permet de le sensibiliser aux défis auxquels le professionnel fait face et à l'importance du mandat qui lui est accordé.

La recherche d'information doit viser un territoire plus vaste que celui qui est anticipé pour les aires de protection. Il faut aussi s'adresser aux municipalités et organismes présents sur les territoires avoisinants, car l'écoulement de l'eau fait fi des limites administratives.

3.1.1. Description du site de prélèvement et de l'installation

Tout d'abord, le site et l'installation de prélèvement devraient être décrits. Ces informations se trouvent en majeure partie dans le rapport de conception de l'installation. Il peut arriver dans le cas des puits existants que ces informations soient fragmentaires, elles devraient alors être acquises lors de l'[Étape 5 : Acquisition et traitement des données](#). Les renseignements suivants, ayant une incidence sur la détermination des aires de protection, sont minimalement attendus :

- Le type d'usage (utilisation permanente ou d'appoint);
- La catégorie de prélèvement (catégorie 1, 2 ou 3);
- La localisation du site de prélèvement (coordonnées géographiques et plan de localisation);
- Le type d'installation de prélèvement d'eau (puits tubulaire, puits de surface, puits à pointe filtrante, puits rayonnant, source à bassin unique, source à drains horizontaux, puits multiples, autre type d'aménagement);
- La profondeur de l'installation de prélèvement et la longueur de la crépine (ou de l'ouverture du puits dans le roc);
- Le type de milieu géologique (granulaire ou roc fracturé);
- Le débit de prélèvement autorisé ou demandé, le débit de capacité du puits et l'historique des débits prélevés (en litres/jour);
- Le schéma (vue en coupe), les photos et la description de l'état de l'installation de prélèvement d'eau et de son environnement immédiat (ex. : étanchéité, pente du terrain, etc.).

3.1.2. Informations pour définir les enjeux de protection

Pour la réalisation de l'[Étape 2 Enjeux de protection du prélèvement](#), les informations suivantes devraient aussi être recueillies auprès de la municipalité et d'autres sources de données :

- Le nombre de personnes approvisionnées et les différents usages (résidentiel, agricole, industriel, commercial et institutionnel);
- La présence ou non d'une source d'approvisionnement alternative en cas de problème (prélèvements d'appoint, d'urgence et autres réserves d'eau);
- Les autres puits d'alimentation présents dans le secteur;
- La présence d'activités réglementées (activités agricoles, exploration ou exploitation d'hydrocarbures, activités minières);
- La présence d'autres sources potentielles de contamination (sites contaminés, industries, secteurs résidentiels non raccordés à un réseau d'égout, etc.);
- Les problèmes affectant ou ayant affecté la quantité d'eau exploitée et sa qualité.

Les intervenants locaux étant les mieux placés pour fournir ces informations, une rencontre avec ces intervenants lors d'une visite sur le terrain est recommandée dès le début du mandat si les enjeux de protection sont importants.

3.1.3. Informations pour définir le système hydrogéologique et le modèle conceptuel

Pour la réalisation de l'[Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel](#), des informations détaillées sur le milieu naturel sont à recueillir. Les études issues des [Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines](#) (PACES) sont une source d'information à privilégier, car elles permettent une compréhension globale du contexte hydrogéologique de la zone d'étude. Les rapports de forage de même que les études hydrogéologiques réalisées dans le cadre de recherches en eau et de demandes d'autorisation de prélèvement sont aussi des sources d'information incontournables. Une recherche exhaustive des précédents rapports hydrogéologiques est donc nécessaire. Plusieurs autres sources de données sont proposées dans la [liste des données disponibles utiles en hydrogéologie](#).

Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES)

Les projets visaient à dresser un portrait réaliste et concret de la ressource eau souterraine des territoires municipalisés du Québec méridional, dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité. Les résultats issus des projets ont été publiés entre 2013 et 2015 pour les régions suivantes :

- Abitibi-Témiscamingue (deux rapports) (Cloutier et al., 2013; Cloutier et al., 2015),
- Outaouais (Comeau et al., 2013);
- Vaudreuil-Soulanges (Larocque et al., 2018);
- Montérégie Est (Carrier et al., 2013);
- Centre-du-Québec (deux rapports : Bécancour et Nicolet/Bas-Saint-François) (Larocque et al., 2013; Larocque et al., 2015b);
- Sud-ouest de la Mauricie (Leblanc et al., 2013);
- Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015);
- Communauté métropolitaine de Québec (Talbot Poulin et al., 2013);

- Saguenay–Lac-Saint-Jean (CERM-PACES, 2013);
- Charlevoix/Haute-Côte-Nord (CERM-PACES, 2015);
- Nord-est du Bas-Saint-Laurent (Buffin-Bélanger et al., 2015).

Les résultats sont présentés sous forme de cartes thématiques régionales et de rapports scientifiques et synthèses portant sur les thématiques suivantes :

- La topographie et l'hydrographie;
- Les limites administratives, l'occupation du sol et les affectations du territoire;
- Le couvert végétal et les milieux humides;
- La pédologie;
- La géologie du Quaternaire et l'épaisseur des dépôts meubles;
- La géologie et la topographie du roc;
- Le confinement des aquifères;
- La piézométrie;
- La vulnérabilité intrinsèque DRASTIC;
- Les activités potentiellement polluantes;
- L'utilisation de l'eau;
- La recharge et les résurgences.

Les données géospatiales permettant leur utilisation dans un système d'information géographique (SIG) sont accessibles. [Une base de données ponctuelles](#) provenant de différentes sources d'information est aussi disponible. Elle contient les données publiques utilisées pour la production des analyses cartographiques régionales (ex. : informations sur les puits, sources ou forages, stratigraphie, niveau de la nappe, analyses de qualité de l'eau et essais hydrauliques). La qualité des données qu'elle contient est variable, mais la fiabilité et la validité des données sont documentées.

Les résultats des PACES sont présentés à une échelle cartographique régionale afin d'établir un portrait hydrogéologique global de la région à l'étude (ex. : échelle au 1/100 000; mailles de 250 m x 250 m). Dans le cas de problématiques plus locales à l'échelle d'une propriété, d'une aire d'alimentation d'un puits ou d'un aquifère aux dimensions limitées, des études plus détaillées sont nécessaires pour caractériser le milieu hydrogéologique. Lorsque disponible pour la région concernée, les PACES sont une source d'information à privilégier, à consulter en premier lieu pour avoir un portrait général du contexte hydrogéologique régional, ainsi que pour accéder à des informations locales via sa base de données ponctuelles. Il permet aussi d'orienter la recherche d'information locale.

Les indices DRASTIC calculés à l'échelle régionale dans le cadre des PACES ne peuvent pas être employés pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine à l'échelle qui convient pour les aires de protection, mais sont tout de même utiles à des fins de comparaison.

Préalablement aux PACES, des projets régionaux similaires ont été réalisés par la Commission géologique du Canada, conjointement ou en collaboration avec le Ministère, dans les régions suivantes :

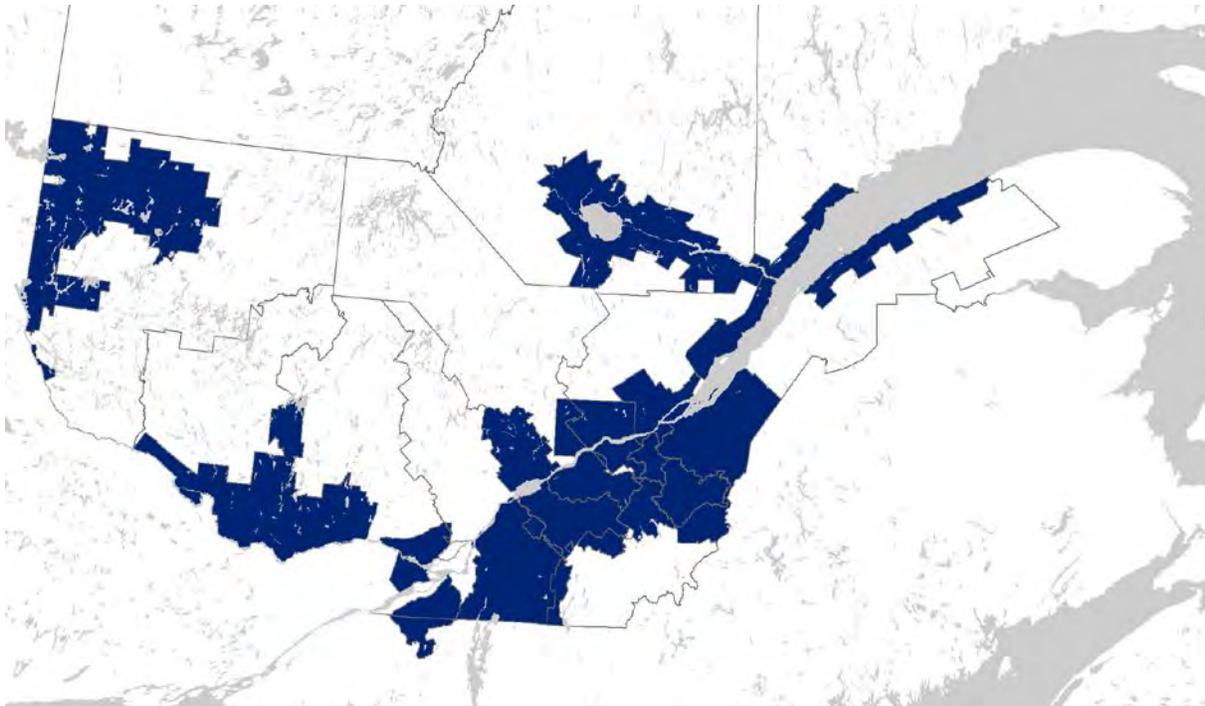
- Châteauguay (Côté et al., 2006);
- Portneuf (Beaudoin et al., 2000);

- Aquifère fracturé du sud-ouest québécois (secteur de Mirabel) (Savard et al., 2013);
- Basse et moyenne Chaudière (Carrier et al., 2014).

Les cartes, rapports et données sont accessibles par le [Réseau d'information sur les eaux souterraines](#) (RIES) (Ressources naturelles Canada, 2016).

À ce jour, la caractérisation régionale de l'eau souterraine a été réalisée pour environ 75 % du territoire municipalisé du sud du Québec ([Figure 3](#)).

Figure 3 : Couverture des projets de caractérisation régionale de l'eau souterraine du Québec méridional



3.1.4. Présentation des données recueillies

Les données recueillies durant cette étape de recherche des informations existantes devraient être fournies dans le rapport d'étude. Une présentation sous forme de tableau récapitulatif est recommandée (ex. : [Tableau 2](#)). Ce tableau sera bonifié et complété à la suite de l'[Étape 5 : Acquisition et traitement des données](#) et permettra de repérer facilement les données utilisées pour la détermination des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC.

Il est recommandé de géoréférencer les données recueillies pour pouvoir les intégrer dans un SIG et en faciliter l'interprétation.

La présentation des données devrait inclure non seulement les valeurs retenues, mais aussi une évaluation de la qualité des données, soit leur variabilité, leur incertitude et l'identification de la source des données ou de la méthode de mesure ou de calcul. La qualité des données est une information précieuse qui influencera le choix des travaux de terrain à réaliser ainsi que la fiabilité

de la délimitation des aires de protection et de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine.

La variabilité des données est fonction de l'amplitude des variations des valeurs recueillies ou mesurées en différents endroits de l'aquifère ou selon différentes méthodes. Dans le cas de valeurs tirées de la littérature, cette variabilité peut parfois être très élevée. Par exemple, la porosité d'un grès peut varier d'un ordre de grandeur (ex. : de 3,5 à 35 %). Pour une propriété mesurée dans l'aquifère, comme la conductivité hydraulique, il s'agit des valeurs minimales et maximales mesurées.

L'incertitude de la donnée fait référence à la précision de la méthode de mesure s'il s'agit d'une donnée acquise par des travaux. Il s'agit plutôt de la fiabilité de la source de l'information s'il s'agit d'une donnée recueillie parmi les informations existantes. Par exemple, la mesure directe d'un paramètre comme l'épaisseur saturée d'un aquifère de sable au droit d'un puits d'exploitation a une faible incertitude, alors que l'estimation de la recharge par la méthode du bilan en eau possède une plus grande incertitude. Aussi, une grande incertitude est associée à une description stratigraphique provenant du Système d'information hydrogéologique à cause de sa faible fiabilité, tandis que description provenant de la base de données géotechnique du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports est caractérisée par une plus faible incertitude, étant donné la meilleure fiabilité des données.

Pour l'évaluation d'un paramètre hydrogéologique, le fait de choisir une donnée de piètre qualité ou peu précise (par exemple une donnée générale tirée de la littérature) constitue un manquement aux bonnes pratiques lorsqu'une donnée plus pertinente ou plus précise est accessible. Il revient au professionnel de juger du niveau de qualité des données requises pour les calculs et de justifier le choix des données utilisées.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des données existantes recueillies et acquises lors des travaux

Donnée	Valeurs retenues	Variabilité	Incertainde	Source
Débit journalier moyen d'exploitation (Q)				
Conductivité hydraulique de l'aquifère (K)				
Direction d'écoulement				
Gradient hydraulique de l'aquifère (i)				
Précipitations totales annuelles moyennes (P)				
...				

L'Annexe III du [Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec](#) (MELCC, 2018) décrit la structure physique des données préconisée pour la représentation de la description et la localisation d'un site de prélèvement d'eau souterraine dans un format géographique numérique. Un fichier en format « shapefile » est attendu.

Une carte de localisation du secteur d'étude devrait être présentée à l'échelle régionale. Les limites administratives, les voies principales de communication, l'hydrographie et les bassins versants sont entre autres des éléments importants à y intégrer. L'installation de prélèvement devrait être représentée sur un plan plus précis, mais sur un territoire plus large que celui des aires de protection (échelle suggérée : 1/20 000). On devrait y retrouver des détails permettant de repérer différentes caractéristiques du terrain, telles que les courbes de niveau topographique, les cours d'eau et plans d'eau, les routes et les bâtiments. Des indications toponymiques des lieux et des objets faciliteront également le repérage. En plus de rapporter les coordonnées géographiques du site de prélèvement, on recommande de le localiser à l'aide de l'imagerie aérienne agrandie sur la zone à proximité de l'installation.

Une coupe verticale de l'installation de prélèvement d'eau est attendue. La stratigraphie peut être montrée sur ce schéma, sinon le rapport de forage indiquant la nature des matériaux géologiques en profondeur devrait être présenté. Généralement, ces informations se retrouvent dans le rapport de conception de l'installation. Dans le cas où l'information n'est pas disponible (ex. : rapport perdu), il est important de recommander au responsable du prélèvement de réaliser des travaux permettant de recouvrer cette connaissance essentielle.

3.2. Étape 2 : Enjeux de protection du prélèvement

La protection adéquate d'un prélèvement en eau souterraine exige que les aires de protection soient délimitées de façon sécuritaire, tout en réduisant au minimum les impacts sur l'économie et le développement des communautés. Un certain degré d'incertitude est toutefois tolérable puisque les critères utilisés par le RPEP pour la délimitation des aires ne prennent en considération que le mécanisme de transport advectif en plus d'ignorer le transport vertical, rendant ainsi l'approche prudente et sécuritaire. De plus, selon le principe de barrières multiples, la protection de la qualité de la source d'eau potable constitue une des barrières, et non la seule, visant à réduire les risques de contamination ou de défaillance des systèmes d'approvisionnement.

Une réflexion qualitative mettant en perspective les coûts d'une étude approfondie à court terme avec les coûts à plus long terme que pourrait entraîner une détermination trop approximative des aires de protection devrait être réalisée par le responsable du prélèvement préalablement à la définition du mandat à confier au professionnel en hydrogéologie ([Figure 4](#)). Cette réflexion devrait donc comprendre l'évaluation sommaire des :

- Coûts associés à une contamination potentielle;
- Coûts socioéconomiques associés à une surprotection du prélèvement;
- Coûts que pourrait engendrer la nécessité de refaire une étude de meilleure qualité dans le futur.

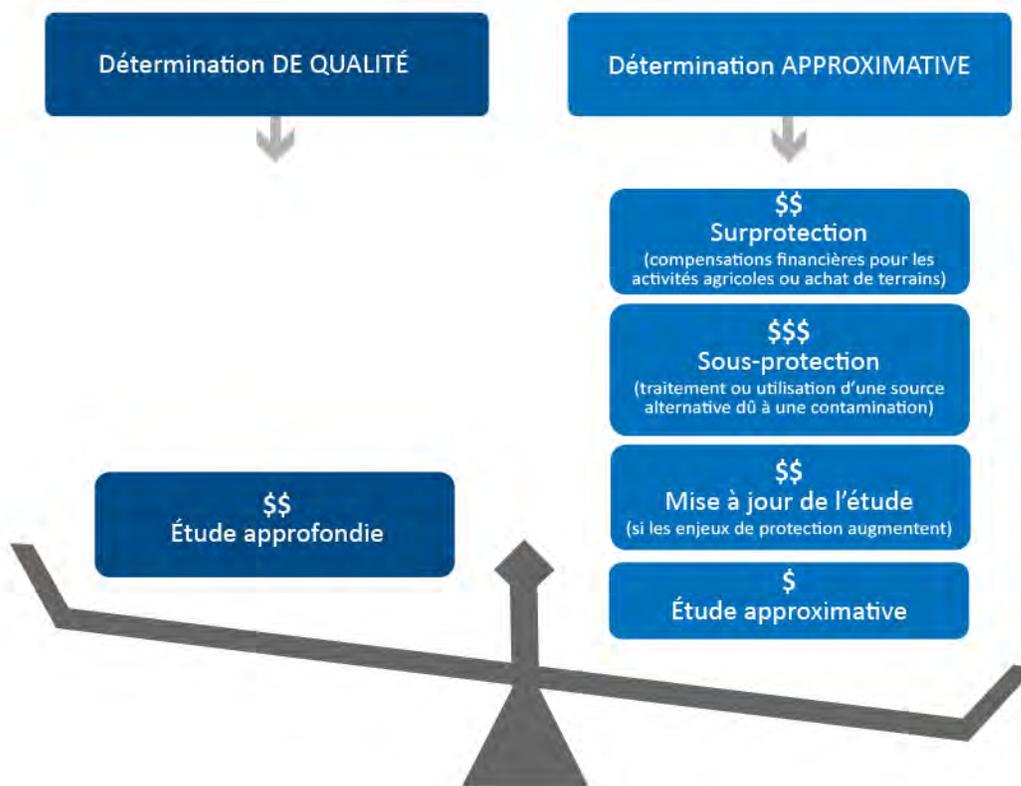
À court terme, il pourrait paraître plus avantageux d'opter pour une étude approximative, qui occasionnerait des coûts moins élevés, mais à plus long terme, l'étude plus approfondie et conséquemment plus onéreuse pourrait s'avérer plus rentable. Par exemple, des compensations récurrentes pourraient devoir être versées aux agriculteurs par la municipalité telles que décrites dans le [Guide sur les principes d'atténuation et de compensation des activités agricoles relativement aux installations de prélèvement d'eau](#) (MDDELCC, 2016a). Des aires fiables seraient dans ce cas profitables. Aussi, l'analyse de vulnérabilité de la source (MELCC, 2018) doit, tous les cinq ans, comprendre une validation des aires de protection. Il est plausible que les enjeux de protection du prélèvement augmentent et fassent qu'une étude plus approfondie devienne nécessaire. En réalisant une étude approfondie dès le départ, on réduit grandement les risques de devoir payer pour une étude ultérieure.

Nonobstant la réflexion qualitative ci-dessus, les enjeux de protection devraient être évalués par le professionnel dans le cadre de l'étude de détermination des aires de protection et des indices DRASTIC. Cette évaluation influencera, entre autres, le choix des méthodes de détermination des aires. Plusieurs facteurs humains sont déterminants lors de la définition des enjeux de protection du prélèvement. Des enjeux de protection importants nécessitent des efforts plus grands afin de s'assurer que la délimitation des aires de protection reflète plus justement la réalité en ce qui a trait aux conditions d'écoulement.

Pour définir l'ampleur des enjeux de protection du prélèvement, les trois facteurs suivants devraient être considérés :

- L'importance du prélèvement pour la communauté;
- La présence d'activités sujettes à des prescriptions réglementaires visant la protection du prélèvement;
- L'ampleur des problématiques de contamination potentielle.

Figure 4 : Mise en perspective des coûts à court et à long terme : cas où une détermination de qualité des aires de protection est moins coûteuse à long terme qu'une détermination approximative



3.2.1. Importance du prélèvement pour la communauté

L'importance du prélèvement pour la communauté dépend de la quantité d'eau prélevée, du nombre de personnes approvisionnées et des autres usages de l'eau (institutionnel, commercial, industriel ou agricole). Elle est aussi fonction de l'existence ou de l'absence d'une source d'approvisionnement alternative (prélèvement d'appoint ou secondaire, d'urgence et autres réserves d'eau). Le responsable du prélèvement sera en mesure de fournir ces informations. Ainsi, plus le prélèvement est important pour la communauté, plus les enjeux de protection sont grands.

L'importance de l'aquifère exploité peut aussi être estimée à l'aide du nombre de puits dans le secteur d'étude et de leur densité. Ainsi, un aquifère très exploité revêt une plus grande importance pour la communauté et devrait être l'objet d'une caractérisation plus détaillée.

3.2.2. La présence d'activités encadrées par réglementation visant la protection du prélèvement

La précision avec laquelle les aires de protection sont délimitées a une influence sur les activités encadrées par le RPEP (activités agricoles, forages gaziers ou pétroliers) qui pourront avoir cours sur le territoire. Une délimitation trop approximative peut entraîner la surprotection de certaines zones avec des conséquences économiques. À l'inverse, une sous-protection met en danger la santé des consommateurs. D'autres règlements peuvent restreindre certains usages et activités (ex. : lieux d'enfouissement, carrières et sablières, entreposage de produits pétroliers, etc.) à proximité des sites de prélèvement. Lorsqu'il y a présence d'activités sujettes à des prescriptions réglementaires visant la protection du prélèvement dans le secteur présumé des aires de protection, les enjeux deviennent importants et il est recommandé de réaliser une étude approfondie.

3.2.3. Ampleur des problématiques de contamination potentielle

Une évaluation de l'ampleur des problématiques de contamination potentielle devrait être faite à partir d'un inventaire sommaire des activités potentiellement polluantes et des problèmes affectant ou ayant affecté la quantité d'eau exploitée ou sa qualité. Il s'agit d'une analyse de risque semblable, mais beaucoup plus simple que celle décrite dans le [Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec](#) (MELCC, 2018). Plus les problèmes sont graves et nombreux, plus les enjeux de protection sont élevés.

Les activités potentiellement polluantes devraient être identifiées principalement en amont hydraulique du site de prélèvement en eau souterraine. À ce stade du processus, cet inventaire sommaire se fait sur une zone élargie, car beaucoup d'incertitudes demeurent sur la configuration de l'aquifère exploité, les directions d'écoulement, ainsi que sur la taille et la forme des aires de protection.

Les sources de contamination potentielle peuvent être des activités anthropiques actuelles, passées ou futures. Les eaux de surface et la composition des formations aquifères peuvent aussi avoir un effet sur la qualité de l'eau souterraine. Par exemple, pour les zones agricoles, l'inventaire sommaire implique de localiser et de connaître la nature des activités, mais ne nécessite pas l'identification détaillée des produits utilisés pour la fertilisation. Aussi, à titre d'exemple, l'emplacement des routes principales et des voies ferrées suffit sans qu'il soit nécessaire de connaître leur fréquence d'utilisation et les produits qui y sont transportés. Les activités industrielles, les lieux d'enfouissement et les sites contaminés devraient aussi être répertoriés, de même que les secteurs résidentiels non raccordés à un réseau d'égout. Enfin, il importe d'inventorier les cours d'eau et plans d'eau à proximité du site de prélèvement, car les eaux de surface pourraient constituer un vecteur de contaminants pour les eaux souterraines si elles sont sous leur influence directe, c'est-à-dire si le pompage de l'eau souterraine induit un appel d'eau de surface vers le puits.

Pour connaître les problèmes affectant ou ayant affecté la quantité d'eau exploitée ou sa qualité, les rapports d'analyse de qualité de l'eau brute du puits d'exploitation et des autres puits dans le même aquifère devraient être consultés. Ces rapports d'analyse peuvent aussi servir à évaluer si les eaux souterraines sont sous influence directe des eaux de surface, comme détaillé dans un protocole du [Guide de conception des installations de production d'eau potable](#) (MDDELCC, 2015c). Des discussions avec le responsable du prélèvement, les opérateurs de l'installation ou des résidents de longue date pourraient aussi permettre de fournir des renseignements sur la présence de problèmes récurrents ou de problèmes majeurs survenus par le passé.

3.2.4. *Présentation cartographique de certains enjeux de protection*

Une carte du territoire à l'échelle de la zone d'étude élargie incluant la localisation de l'ensemble des puits répertoriés, les activités encadrées par réglementation et visant la protection du prélèvement, et les activités potentiellement polluantes sommairement inventoriées est recommandée. Selon la quantité d'informations disponibles et répertoriées, les puits existants sur le territoire pourraient être présentés sur un plan à part. Aussi, un zoom présenté sur les activités à proximité du site de prélèvement est pertinent, par exemple à l'échelle des aires de protection intermédiaires attendues.

3.3. Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel

Le modèle hydrogéologique conceptuel consiste en une représentation schématique du milieu hydrogéologique comportant tous les éléments permettant de comprendre la configuration du système aquifère exploité et les processus influençant le comportement de l'eau souterraine sur le territoire, notamment les informations sur l'installation de prélèvement, les matériaux géologiques et les conditions d'écoulement. L'élaboration du modèle conceptuel est en quelque sorte le reflet des hypothèses de base à partir desquelles la démarche se poursuivra. À ce stade, plusieurs contextes hydrogéologiques peuvent être envisagés. Les étapes subséquentes de la marche à suivre à la [Figure 2](#) permettront de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses. Ainsi un retour à cette étape-ci est nécessaire après l'[Étape 5 : Acquisition et traitement des données](#) afin de valider le modèle.

Cette réflexion devrait se faire d'abord sur une zone élargie afin d'englober avec certitude les aires de protection et de mieux définir les limites hydrogéologiques naturelles du système. L'information contenue dans le document [Contextes hydrogéologiques généraux du sud du Québec](#), qui décrit brièvement les principaux types d'aquifères que l'on trouve au Québec, présente une séquence stratigraphique typique et résume l'histoire géologique récente, ne constitue toutefois pas une description exhaustive de tous les contextes possibles. Les coupes hydrogéologiques et les cartes thématiques des PACES présentent aussi différents contextes hydrogéologiques régionaux. Bien que ces contextes soient présentés à l'échelle régionale et qu'ils peuvent varier à l'échelle plus locale des aires de protection, leur consultation est fortement recommandée.

L'élaboration du modèle conceptuel permet d'anticiper la complexité du système hydrogéologique et de faire ressortir clairement les éléments qu'il faudra investiguer davantage. Le choix de la méthode de détermination des aires de protection dépendra de cette complexité. La quantité de données à recueillir et leur qualité dépendent aussi de cette complexité, qui est déterminante pour l'incertitude liée aux résultats. Par exemple, un empilement complexe de dépôts meubles demandera des efforts supplémentaires; davantage de données stratigraphiques seront requises pour connaître autant la géométrie de l'aquifère, son homogénéité que la continuité de son confinement. Une piézométrie presque plane demandera aussi plus d'effort pour bien caractériser la direction d'écoulement; des mesures précises des niveaux d'eau seront nécessaires et la mise en place de piézomètres supplémentaires pourrait être requise.

Une fois que la synthèse et l'interprétation de l'ensemble des données recueillies sont réalisées, les éléments suivants, tous nécessaires à la détermination des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC, devraient être pris en considération pour l'élaboration du modèle hydrogéologique conceptuel :

Territoire et installation de prélèvement :

- Localisation des puits d'exploitation et d'observation :
 - Type d'installation de prélèvement et caractéristiques de l'installation (ex. : profondeur, longueur de la crépine, etc.);
 - Topographie;
 - Localisation des cours d'eau, plans d'eau et milieux humides;
 - Type de sol.

- Matériaux géologiques :
 - Nature du milieu aquifère exploité (granulaire, roc fracturé);
 - Géométrie de l'aquifère (épaisseur, étendue et limites hydrogéologiques);
 - Hétérogénéité de l'aquifère;
 - Degré de l'anisotropie des propriétés hydrauliques de l'aquifère;
 - Validité de l'hypothèse du milieu poreux équivalent (pour le roc fracturé);
 - Valeurs des propriétés hydrauliques de l'aquifère et du milieu géologique environnant;
 - Confinement de l'aquifère (continuité et niveau de confinement).

- Conditions d'écoulement :
 - Niveaux piézométriques (incluant les variations temporelles typiques);
 - Direction(s) d'écoulement;
 - Gradients hydrauliques (horizontal et vertical);
 - Lignes de partage des eaux souterraines;
 - Lien hydraulique avec le milieu géologique environnant l'aquifère et avec les eaux de surface;
 - Zones de recharge préférentielle;
 - Zones de résurgence.

Complexité du système hydrogéologique

La complexité du système hydrogéologique est déterminée en considérant les facteurs suivants :

- La complexité de l'installation de prélèvement;
- La géométrie de l'aquifère;
- La direction d'écoulement;
- Les conditions de confinement;
- La validité de l'hypothèse du milieu poreux équivalent (pour les aquifères de roc);
- L'hétérogénéité de l'aquifère;
- Le degré d'anisotropie des propriétés hydrauliques de l'aquifère.

Le système hydrogéologique devrait être considéré comme complexe s'il n'y a pas suffisamment de données pour prouver le contraire.

3.3.1. La complexité de l'installation de prélèvement

Une installation de prélèvement complexe rend le système hydrogéologique complexe aux fins de la délimitation des aires de protection, ce qui nécessite des travaux plus détaillés. On peut considérer une installation comme complexe dans les cas suivants :

- Puits multiples;
- Puits sous l'influence d'autres installations de prélèvement;
- Puits rayonnants (puits « caissons »);
- Puits sous l'influence directe de l'eau de surface;
- Champs de captage avec filtration en berge;
- Puits recoupant plusieurs aquifères;
- Drains horizontaux de captage;
- Captage de résurgences.

Un puits est considéré comme étant sous l'influence d'un autre puits lorsque leurs cônes de rabattement se recoupent. Les puits multiples entrent ainsi automatiquement dans cette catégorie. Il importe d'intégrer chaque puits ayant une influence sur le prélèvement dans le calcul des aires de protection afin de prendre en compte les effets mutuels de chacun en pompage simultané.

Le RQEP prescrit qu'une installation de prélèvement d'eau souterraine dont la qualité microbiologique est susceptible d'être altérée par de l'eau de surface (eau souterraine sous l'influence directe de l'eau de surface : ESSIDES) comme établi par le protocole 6.6 du [Guide de conception des installations de production d'eau potable](#) (MDDELCC, 2015c) doit utiliser un système de traitement prévu pour de l'eau de surface. Une installation de prélèvement d'eau souterraine peut parfois capter en partie de l'eau de surface, mais sans effet sur la qualité microbiologique de l'eau et donc sans que l'eau de l'installation soit considérée comme ESSIDES. Pour tous ces cas, le RQEP ne prescrit pas de disposition particulière quant à la détermination de leurs aires de protection et pour l'analyse subséquente de la vulnérabilité de la source. Une installation souterraine est ainsi réputée prélever de l'eau souterraine et est soumise aux exigences de la section II du chapitre VI du RQEP, même si une partie de l'eau prélevée provient d'un plan d'eau de surface.

Le professionnel qui délimite des aires de protection pour un prélèvement d'eau souterraine qui capte de l'eau de surface (ESSIDES ou non) devrait recommander au responsable du prélèvement et au professionnel qui réalisera l'analyse quinquennale de vulnérabilité de surveiller les activités potentiellement polluantes pouvant survenir dans l'eau de surface, car certains contaminants persistants pourraient migrer jusqu'au prélèvement d'eau souterraine.

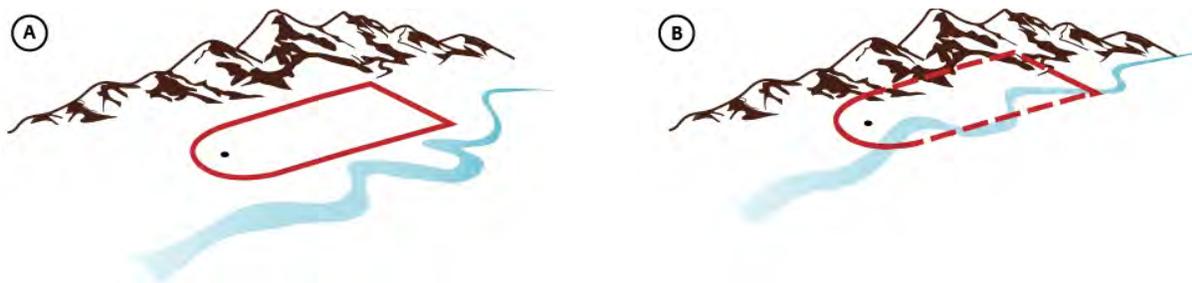
3.3.2 Géométrie de l'aquifère

Certaines méthodes de détermination des aires de protection ([Étape 4 : Choix des méthodes de détermination des aires de protection](#)) posent comme hypothèses que l'épaisseur de l'aquifère sur toute l'étendue des aires de protection est constante et que les limites de l'aquifère dans l'espace sont infinies. Ces hypothèses devraient être validées pour que le système hydrogéologique soit considéré comme simple.

L'extrapolation d'une épaisseur uniforme de l'aquifère sur l'ensemble des aires de protection doit être faite avec prudence. Les informations provenant de plusieurs forages bien répartis sur le territoire présumé de l'aire d'alimentation devraient être utilisées.

Bien qu'il soit évident que l'hypothèse de limites infinies ne peut pas être validée à l'échelle de l'aquifère, elle peut l'être à l'échelle des aires de protection lorsque les limites des aires présumées demeurent à l'intérieur des limites de l'aquifère ([Figure 5A](#)). Dans le cas où les aires de protection sont limitées par une barrière hydraulique, par exemple un cours d'eau ou un changement de lithologie diminuant la conductivité hydraulique de deux ordres de grandeur ou plus ([Figure 5B](#)), l'hypothèse de limites infinies ne peut pas être considérée comme vraie; le système hydrogéologique est alors considéré comme étant complexe.

Figure 5 : Validation de l'hypothèse de limites infinies de l'aquifère à l'échelle des aires de protection : A) hypothèse valide lorsque les limites des aires de protection sont à l'intérieur des limites de l'aquifère; B) hypothèse non valide lorsque les aires de protection sont limitées par une barrière hydraulique



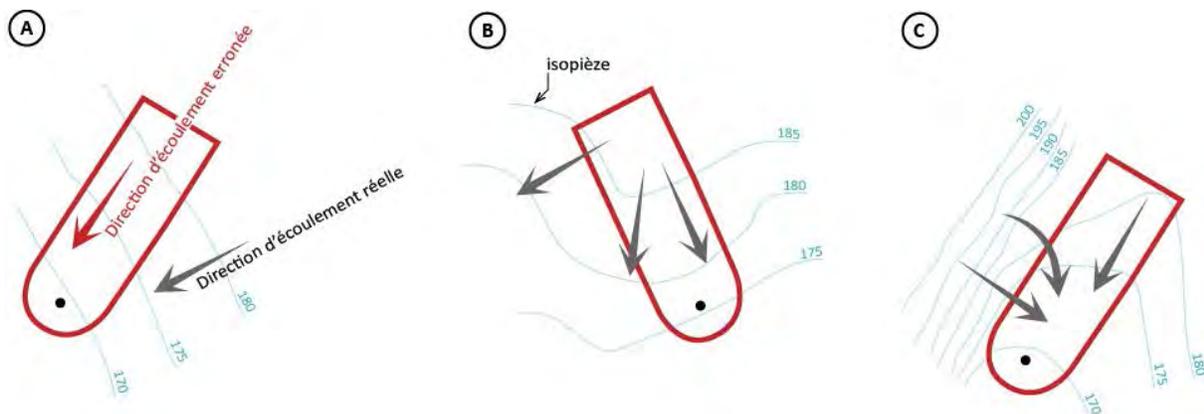
3.3.3. Direction d'écoulement

La direction d'écoulement précise est parfois difficile à prédire, particulièrement lorsque les mesures de niveaux de la nappe de seulement trois puits d'observation sont utilisées. L'[Étape 5 : Acquisition et traitement des données](#) contient de nombreuses indications pour disposer judicieusement de nouveaux puits d'observation et exploiter efficacement les données disponibles. La direction d'écoulement est critique pour le positionnement des aires de protection dans l'espace. En effet, une différence de quelques degrés peut entraîner la délimitation d'une portion de territoire différente ([Figure 6A](#)). Cela est d'autant plus vrai pour une aire d'alimentation beaucoup plus longue que large. Lorsque l'incertitude sur la direction d'écoulement est importante, le contexte hydrogéologique devrait être perçu comme étant complexe.

Dans certains cas, la direction d'écoulement est non uniforme et change à l'échelle des aires de protection ([Figure 6B et Figure C](#)), ce qui fait que le système hydrogéologique est plus complexe et que certaines méthodes de détermination des aires de protection ne peuvent être utilisées. Dans les cas plus complexes, la piézométrie devrait être étudiée à différentes échelles, car les directions d'écoulement peuvent être variables et imprévisibles.

En nappe libre, lorsque l'incertitude sur la direction d'écoulement demeure importante malgré les données disponibles, la topographie générale de la surface du sol peut être utilisée pour la préciser. Le professionnel doit toutefois au préalable s'assurer que toutes les sources de données possibles ont été investiguées.

Figure 6 : Incertitude sur la délimitation des aires de protection liée à la direction d'écoulement : A) direction d'écoulement mal orientée entraînant la délimitation d'une mauvaise partie de territoire; B) et C) direction d'écoulement non uniforme dans l'aire de protection



3.3.4. Conditions de confinement

Il importe de caractériser, avec le plus de précision possible, les conditions de confinement de l'aquifère, tant sur le plan du niveau de confinement (confiné, semi-confiné, non confiné) que sur le plan de la continuité du confinement. Les conditions de confinement devraient être définies selon la résolution spatiale de l'information disponible.

Pour le choix de la méthode de détermination des aires de protection et pour le calcul des indices de vulnérabilité DRASTIC, l'aquifère devrait être considéré comme confiné uniquement lorsque l'aquitard est épais (ex. : 5 m et plus selon la plupart des PACES) et qu'il est continu sur toute

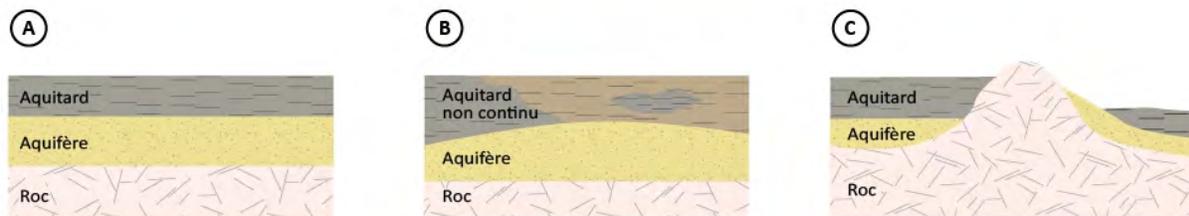
l'aire d'alimentation du puits (Figure 7A). À ce stade de la démarche, l'aire d'alimentation du puits étant encore inconnue, il faut donc considérer un territoire élargi principalement en amont hydraulique du puits. Dans certains contextes hydrogéologiques, le jugement professionnel permet d'avoir une certitude suffisante sur la continuité de l'aquitard. Dans d'autres cas, lorsque la couche aquitard est par exemple faite de dépôts alluvionnaires, deltaïques ou glaciaires (Figure 7B), ou lorsque le roc est affleurant par endroits (Figure 7C), sa continuité ne peut pas être présumée à l'échelle des aires de protection. Le confinement devrait donc être considéré comme étant discontinu.

Un aquifère dont les conditions de confinement, quel que soit le niveau, sont discontinues sur l'aire d'alimentation implique que le système hydrogéologique est complexe. Inversement, un système hydrogéologique simple devrait nécessairement être constitué d'un aquifère aux conditions de confinement continues.

Il n'est pas sécuritaire de considérer une couche de roc comme étant confinante, même si son épaisseur est importante. En effet, la présence ponctuelle et imprévisible de fractures d'écoulement préférentiel ne permet pas de poser cette hypothèse avec suffisamment de certitude.

Des conditions de semi-confinement correspondent à la présence d'une couche peu perméable ou d'un aquitard peu épais sur toute l'aire de protection. Généralement, un aquifère semi-confiné devrait être considéré comme étant non confiné lors des calculs des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC, puisque la couche semi-confinante permet la percolation d'une quantité notable d'eau.

Figure 7 : Continuité des conditions de confinement : A) aquitard épais et continu sur toute l'aire d'alimentation; B) aquitard non continu constitué par exemple de dépôts alluvionnaires, deltaïques ou glaciaires, ou présence de lentilles d'argile; C) aquitard non continu avec affleurement rocheux par endroit



3.3.5. Hypothèse du milieu poreux équivalent

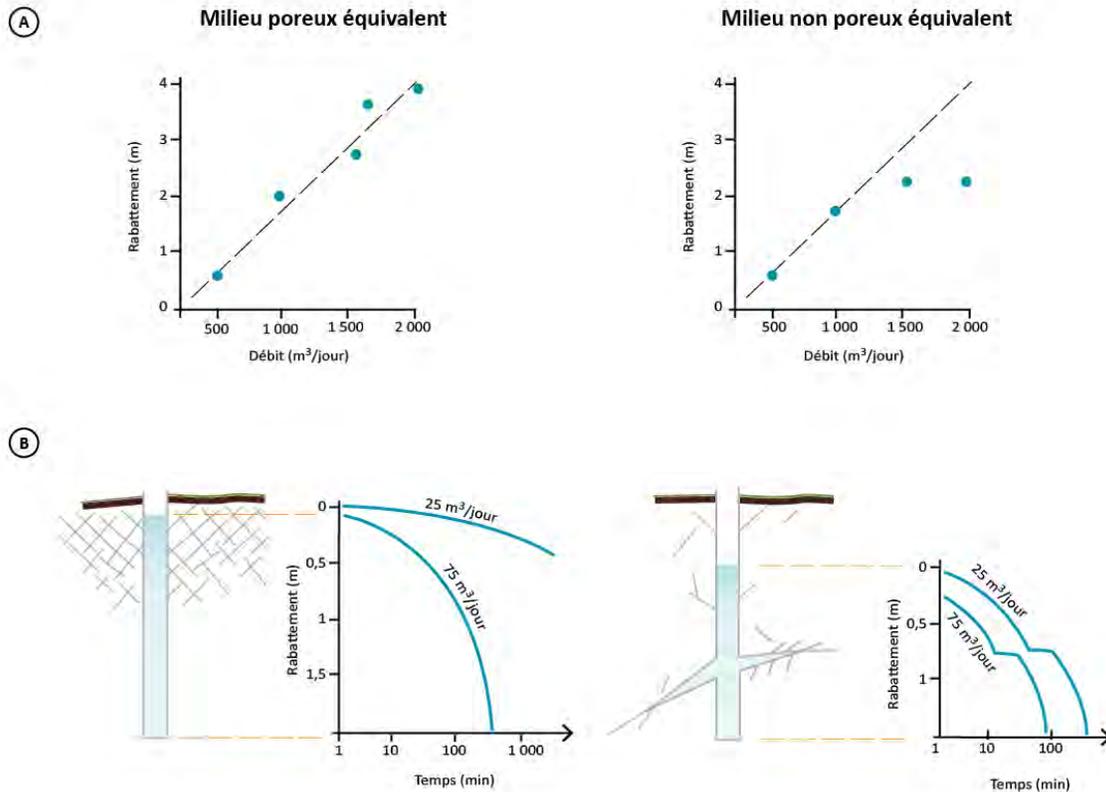
Pour caractériser les aquifères de roc fracturé, des méthodes complexes basées sur la connaissance des propriétés du réseau de fractures (longueur, orientation, pendage, ouverture, rugosité des parois et connectivité) devraient, en théorie, être utilisées. La quantité de données nécessaires à une telle caractérisation est toutefois considérable. Heureusement, il est souvent raisonnable de considérer le roc fracturé comme un milieu poreux équivalent aux fins d'analyse de l'écoulement souterrain. Cette hypothèse simplificatrice considère que la densité, l'ouverture et la connectivité des fractures sont suffisamment élevées pour assumer qu'à l'échelle d'observation, les processus d'écoulement et de transport sont équivalents à ceux présents dans un milieu poreux granulaire. L'utilisation de méthodes de caractérisation hydrogéologique et d'analyse plus accessibles et moins coûteuses est alors possible. Les méthodes de détermination des aires de protection recommandées dans ce guide ([Étape 4 : Choix des méthodes de](#)

[détermination des aires de protection](#)) considèrent d'ailleurs toutes un milieu poreux équivalent. Quelques modèles numériques conçus spécifiquement pour la modélisation d'écoulement en milieu rocheux sont introduits par Rasmussen *et al.* (2006).

Les critères de validité de l'hypothèse de milieu poreux équivalent concernent la fracturation, la réponse aux essais de pompage, la piézométrie, la conductivité hydraulique, la vitesse d'écoulement et la composition chimique de l'eau souterraine. Ils sont exposés à l'[Annexe III : Critères de validité des hypothèses de milieu poreux équivalent homogène et d'isotropie](#). Ils sont présentés de façon détaillée dans USEPA (1991), Rasmussen *et al.* (2006), Vernoux *et al.* (2007), Savard *et al.* (2008) et Science Advisory Board for Contaminated Sites in British Columbia (2010). La validité de l'hypothèse dépend fortement de l'échelle d'observation. Les critères sont subjectifs et il est difficile, en pratique, de les valider tous. Il n'est pas nécessairement recommandé d'engager des frais importants pour tenter de valider cette hypothèse, mais les critères observables à partir des données disponibles devraient être vérifiés. Si un critère démontre clairement un problème ou si un doute demeure sur la validité de l'hypothèse, le système hydrogéologique devrait être considéré comme étant complexe et être caractérisé davantage.

La [Figure 8](#) illustre des exemples de critères de validité de l'hypothèse de milieu poreux équivalent basés sur les résultats d'essais de pompage.

Figure 8 : Résultats d'essais de pompage pour lesquels l'hypothèse du milieu poreux équivalent s'applique ou ne s'applique pas : A) graphiques débit-rabatement; B) courbes temps-rabatement (modifié de l'USEPA, 1991)

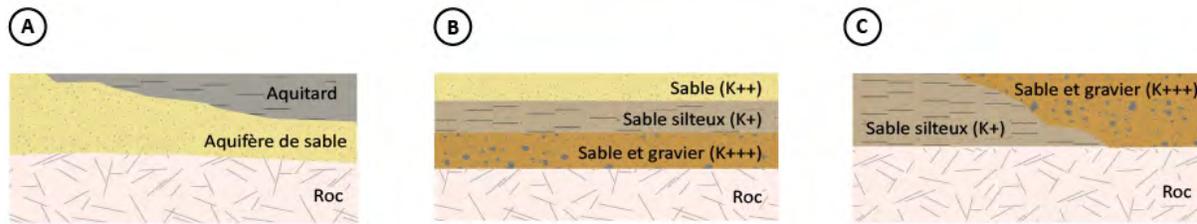


3.3.6. Hétérogénéité de l'aquifère

L'hypothèse d'homogénéité de l'aquifère devrait être vérifiée autant pour les aquifères granulaires que pour les aquifères de roc fracturé. La [Figure 9](#) illustre trois types d'hétérogénéité que l'on trouve : une variation de l'épaisseur de l'aquifère qui fait varier sa transmissivité, un aquifère multicouche aux conductivités hydrauliques différentes et un changement latéral de la conductivité hydraulique de l'aquifère. Lorsqu'au moins une de ces hétérogénéités est observée, le système hydrogéologique devient complexe et ne respecte plus les conditions d'utilisation de certaines méthodes de détermination des aires de protection. Par contre, dans un modèle numérique, l'hétérogénéité peut être intégrée en subdivisant le domaine en plusieurs parties homogènes.

Pour un aquifère de roc fracturé, les notions d'homogénéité et de milieu poreux équivalent sont intimement liées et dépendent fortement de l'échelle d'observation. Lorsqu'observé de très près, aucun aquifère de roc fracturé ne peut être considéré comme un milieu poreux équivalent homogène, car les quelques fractures présentes dominant l'écoulement. Par contre, il est souvent raisonnable d'estimer qu'à l'échelle des aires de protection, le milieu est homogène.

Figure 9 : Trois types d'hétérogénéité de l'aquifère : A) variation de l'épaisseur de l'aquifère qui fait varier sa transmissivité; B) aquifère multicouche aux conductivités hydrauliques différentes; C) changement latéral de conductivité hydraulique de l'aquifère



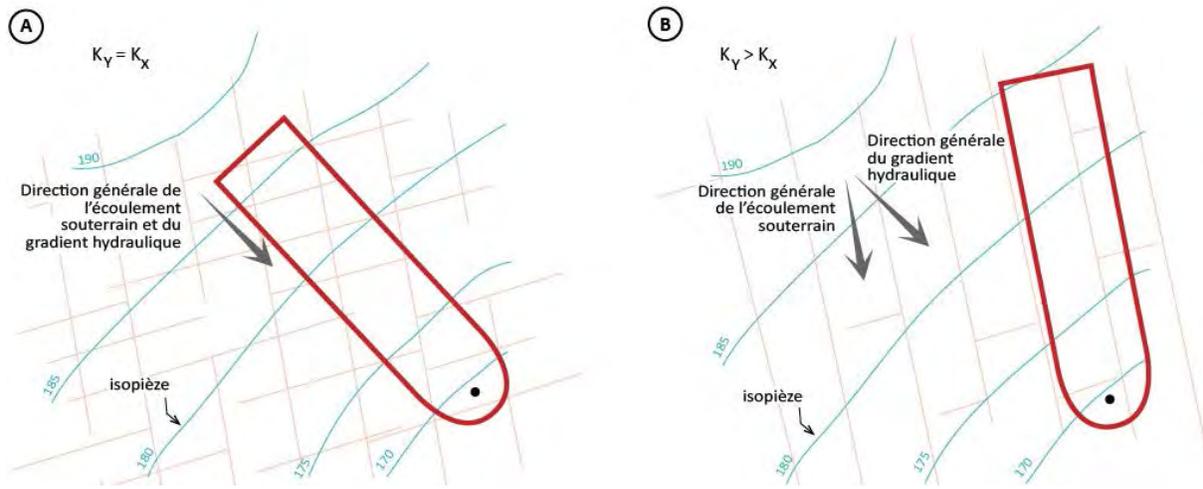
3.3.7. Degré d'anisotropie des propriétés hydrauliques de l'aquifère

Les propriétés hydrauliques de l'aquifère identiques dans toutes les directions sont dites isotropes. L'isotropie des propriétés hydrauliques est une hypothèse sous-jacente à plusieurs méthodes de détermination des aires de protection. Elle devrait être vérifiée autant pour les milieux granulaires que fracturés, bien que ces derniers se révèlent plus régulièrement anisotropes. Les critères de validité de l'hypothèse de conditions isotropes sont exposés à l'[Annexe III : Critères de validité des hypothèses de milieu poreux équivalent homogène et d'isotropie](#). Il est à noter que, pour un roc fracturé, le non-respect de cette hypothèse d'isotropie n'empêche pas la validation de l'hypothèse de milieu poreux équivalent.

Lorsque le milieu n'est pas isotrope, c'est-à-dire que les propriétés hydrauliques de l'aquifère varient selon la direction, le système hydrogéologique est considéré comme complexe. Il est tout de même possible d'utiliser certaines méthodes de détermination applicables au milieu poreux, pourvu que l'anisotropie de l'aquifère soit caractérisée et intégrée au modèle de calcul. La réalisation de levés structuraux (USEPA, 1991; Rasmussen *et al.*, 2006) constitue une technique utile permettant de caractériser l'anisotropie due à la fracturation.

La [Figure 10](#) montre un exemple de l'effet de l'anisotropie horizontale sur la direction d'écoulement qui peut s'avérer différente de la direction du gradient hydraulique. Dans un tel cas, le fait d'ignorer l'anisotropie entraîne une délimitation de l'aire de protection erronée. Si l'investigation de l'anisotropie n'est pas possible, par manque de données par exemple, cette incertitude majeure sur la direction de l'écoulement devra être intégrée dans le résultat en adoptant une approche prudente et conservatrice. Il est à noter que l'anisotropie est surtout observée entre les directions horizontale et verticale, notamment pour les dépôts meubles et les roches stratifiées.

Figure 10 : Effet de l'anisotropie horizontale causée par des fractures préférentielles sur l'orientation des aires de protection (modifié de l'USEPA, 1991)



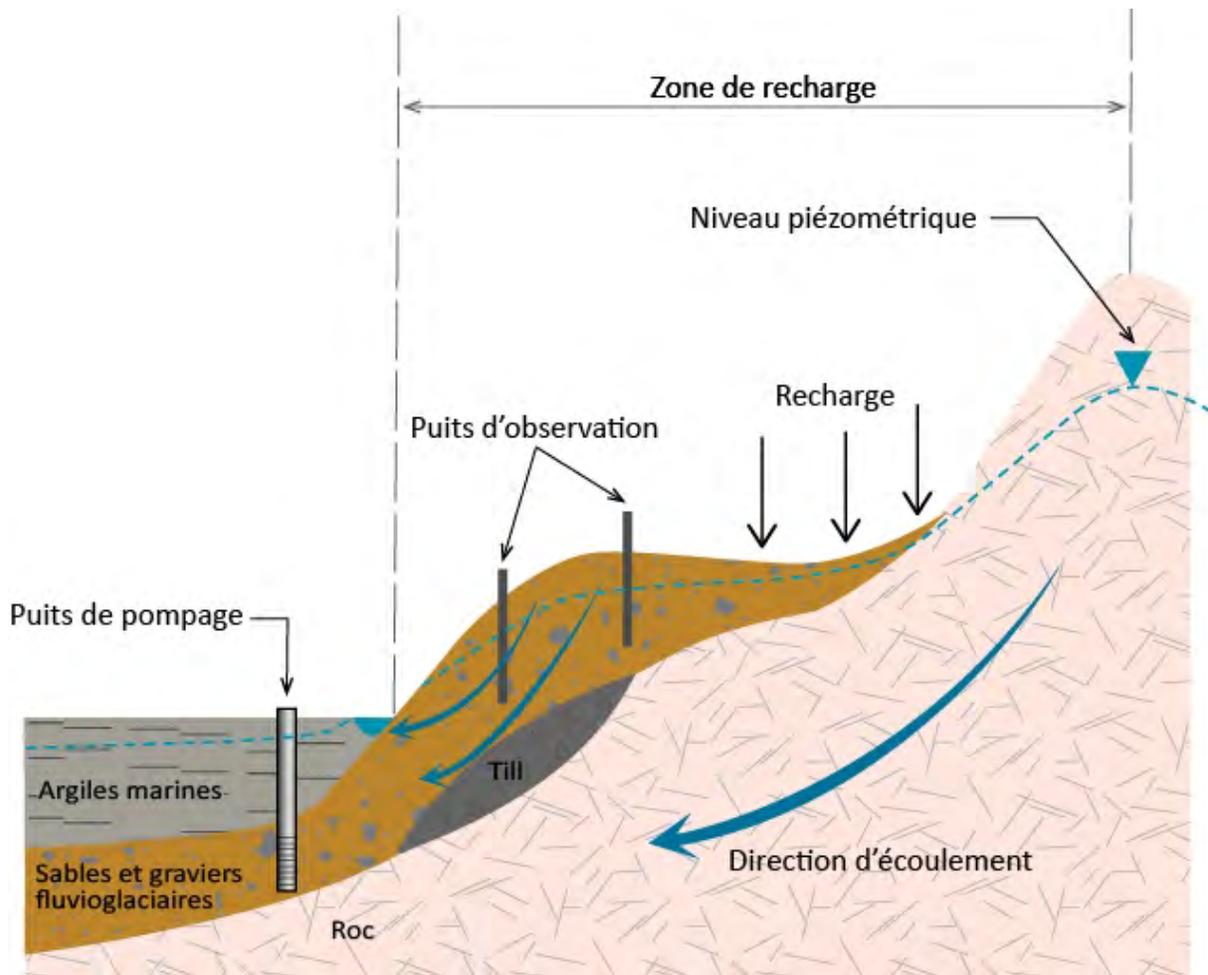
3.3.8. Représentation visuelle du modèle conceptuel

Dès le début de la réflexion, il est pertinent d'illustrer le modèle conceptuel sous la forme d'une ou de plusieurs coupes verticales (Figure 11) et d'un plan. Les représentations préliminaires sont des outils de travail importants, mais qui ne nécessitent pas une présentation visuelle soignée. Des dessins faits à la main sont adéquats. Des points d'interrogation peuvent faire ressortir les informations manquantes.

Le modèle conceptuel définitif validé après l'[Étape 5 : Acquisition et traitement des données](#) devrait être présenté dans le rapport d'étude final. La ou les coupes verticales devraient être positionnées parallèlement à la direction d'écoulement principale et leur localisation apparaître sur la représentation en plan. Un facteur d'exagération verticale pourrait être utilisé, en prenant soin d'identifier les échelles. Toutes les unités hydrogéologiques pertinentes devraient être incluses et les directions d'écoulement identifiées avec des flèches. La localisation des données utilisées devrait apparaître sur les représentations du modèle conceptuel, ce qui permet de juger de sa fiabilité. Une présentation visuelle soignée est utile à la compréhension du lecteur. Pour la représentation en plan, l'usage d'un SIG est fortement recommandé.

D'autres informations permettant de définir le système hydrogéologique devraient être cartographiées. Au minimum, le rapport d'étude devrait présenter la topographie de la surface, la géologie du socle rocheux et les dépôts meubles en surface.

Figure 11 : Exemple de coupe verticale représentant le modèle hydrogéologique conceptuel



3.4. Étape 4 : Choix des méthodes de détermination des aires de protection

Autant pour la détermination des aires de protection que pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine, de nombreuses méthodes existent et sont reconnues par le milieu scientifique. Pour la délimitation des aires de protection, le RPEP n'impose pas l'utilisation d'une méthode particulière. Le choix d'une méthode devrait donc être fait par le professionnel qui réalise l'étude tout en respectant plusieurs critères liés aux milieux humain et naturel. Pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque, l'utilisation de la méthode DRASTIC est obligatoire et n'est donc pas concernée par cette étape de la méthodologie.

Les méthodes de délimitation des aires de protection existantes visent toutes à définir les aires mais à un degré d'incertitude variable. De façon générale, il est justifié d'utiliser une méthode plus complexe et de réaliser une étude plus approfondie lorsque les enjeux de protection sont importants et que le système hydrogéologique est complexe. Les caractéristiques et les propriétés du milieu doivent être mieux définies lorsque des méthodes plus complexes sont utilisées. La qualité des données utilisées permet également d'augmenter la fiabilité des aires de protection définies.

Lors du choix de la méthode à utiliser, il importe de considérer que la sous-estimation des aires entraînera une protection inadéquate de la source d'eau potable, tandis que la surestimation pourrait causer des contraintes financières importantes, entre autres en ce qui a trait aux compensations pour les agriculteurs (MDDELCC, 2016a). Des aires de protection mal orientées (c.-à.-d. ne respectant pas le sens d'écoulement) pourraient avoir pour effet une combinaison de ces conséquences.

3.4.1. Les différentes approches

Le Ministère recommande l'emploi de méthodes spécifiques décrites dans le présent guide et résumées dans le [Tableau 3](#). Les approches 1 à 3 sont des méthodes simples tandis que les approches 4 et 5 sont plus complexes. Certaines méthodes ne s'appliquent qu'à un type d'aire, par exemple l'aire de protection éloignée seulement, alors que d'autres permettent de déterminer toutes les aires.

L'approche par rayon fixe arbitraire (approche 1) est appropriée, comme édicté par le RPEP, pour l'aire de protection immédiate des prélèvements de catégorie 1, de même que pour toutes les aires des prélèvements de catégories 2 et 3. Les méthodes de délimitation nécessitant des calculs (approches 2 à 5) sont requises pour les aires de protection intermédiaires et éloignée des prélèvements de catégorie 1. Elles peuvent aussi s'appliquer aux prélèvements des autres catégories lorsque le choix est fait de ne pas déterminer les aires de protection à partir de rayons fixes arbitraires. Il est alors nécessaire de réaliser une étude hydrogéologique. Le cheminement décisionnel qui suit (Figure 12) concerne donc spécifiquement ces cas où une méthode devrait être choisie parmi celles recommandées dans le [Tableau 3](#).

Les [fiches descriptives des principales méthodes de détermination des aires de protection](#) présentent la description détaillée des méthodes, les données nécessaires à leur utilisation, leurs conditions d'utilisation et hypothèses simplificatrices, leurs avantages et désavantages, et leurs références.

D'autres méthodes non décrites dans ce guide sont valides et pourraient être utilisées. Par exemple, bien que MODFLOW et FEFLOW soient les deux modèles numériques les plus utilisés

au Québec, de nombreux autres modèles numériques peuvent être utiles pour déterminer les aires de protection (IGWMC, 2017; USEPA, 2017a; USEPA, 2017b; USGS, 2017). Aussi, pour remplacer les méthodes plus approximatives, la méthode HYBRID (Paradis et Martel, 2007; Paradis *et al.*, 2007) pourrait être employée. Elle utilise de façon complémentaire la cartographie hydrogéologique et les méthodes avec calculs simples du rayon fixe calculé et d'équations analytiques afin de prendre en compte le bilan hydrique du puits et la recharge de l'aquifère. Cette méthode a été conçue et testée dans le contexte québécois des basses-terres du Saint-Laurent, autant pour des aquifères granulaires (Paradis, 2000) que de roc fracturé (Karanta, 2002).

Si une autre méthode que celles décrites dans ce guide était utilisée, le professionnel devrait présenter une discussion justifiant la pertinence d'utiliser cette méthode. Il devrait aussi s'assurer d'inclure dans le rapport d'étude la description sommaire de la méthode (accompagnée idéalement d'une illustration) et la référence complète, indiquer les données nécessaires, présenter les calculs et définir les conditions d'utilisation et les hypothèses simplificatrices.

Tableau 3 : Approches et méthodes de détermination des aires de protection, classées en fonction de la précision croissante des résultats

Approche	Méthodes	Aires de protection concernées – catégories de prélèvement
Approche 1	Rayon fixe arbitraire	<ul style="list-style-type: none"> • Immédiate – cat. 1, 2, 3 • Intermédiaires – cat. 2, 3 • Éloignée – cat. 2, 3
Approche 2	Équation du cylindre	<ul style="list-style-type: none"> • Intermédiaires – cat. 1
	Équation d'infiltration	<ul style="list-style-type: none"> • Éloignée – cat. 1
Approche 3	Équation du temps de transport	<ul style="list-style-type: none"> • Intermédiaires – cat. 1
	Équation d'écoulement uniforme	<ul style="list-style-type: none"> • Éloignée – cat. 1
Approche 4	Piézométrie et limites hydrauliques	<ul style="list-style-type: none"> • Éloignée – cat. 1
Approche 5	MODFLOW	<ul style="list-style-type: none"> • Intermédiaires – cat. 1 • Éloignée – cat. 1
	FEFLOW	<ul style="list-style-type: none"> • Intermédiaires – cat. 1 • Éloignée – cat. 1

3.4.2. Critères de sélection des méthodes

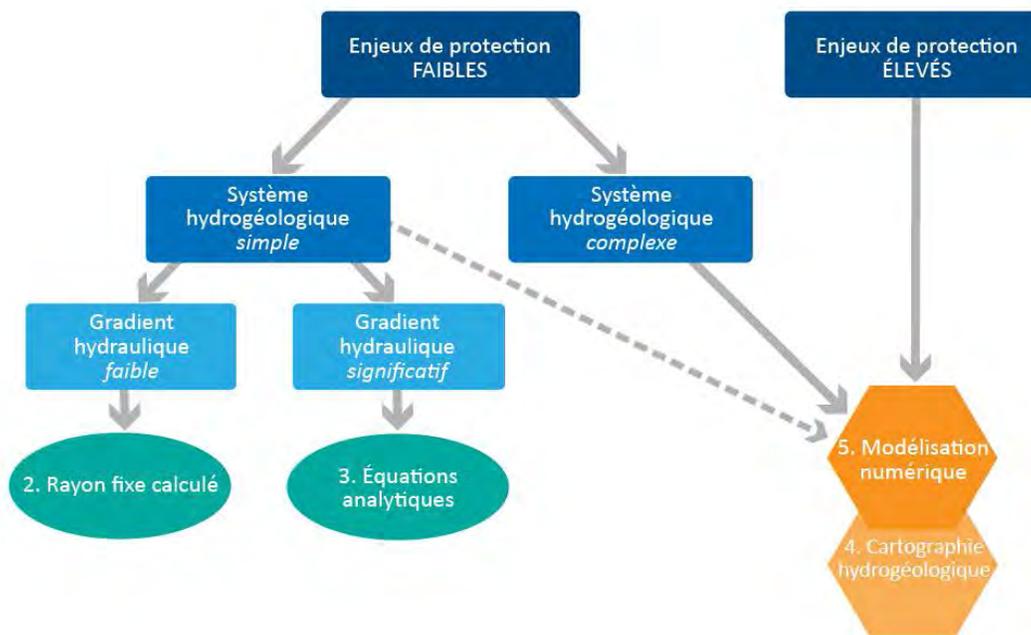
Le cheminement décisionnel à privilégier pour sélectionner la méthode adéquate afin de déterminer les aires de protection intermédiaires et éloignée des prélèvements de catégorie 1 est résumé à la [Figure 12](#). Le choix des méthodes de détermination est fonction du milieu humain, soit des enjeux de protection du prélèvement, ainsi que du milieu naturel, soit de la complexité du système hydrogéologique. Le gradient hydraulique entre aussi en ligne de compte dans le choix des méthodes. Le professionnel qui choisirait de procéder autrement devrait justifier sa décision dans le rapport d'étude hydrogéologique.

Pour une détermination plus précise, qui devrait être sécuritaire tout en réduisant au minimum les conséquences pour certaines activités encadrées par des règlements à l'intérieur des aires de protection et visant la protection du prélèvement, une étude employant des approches telles que la cartographie hydrogéologique ou la modélisation numérique (approches 4 et 5) est à privilégier. Il est d'ailleurs recommandé d'employer ces méthodes dans toutes les circonstances. Les modèles numériques sont aujourd'hui raisonnablement accessibles, tant en ce qui concerne le coût d'achat que l'effort d'apprentissage fait par un spécialiste en hydrogéologie. De plus, lorsque le système hydrogéologique n'est pas très complexe, les temps de préparation des données d'entrée (ex. : maillage, attribution des propriétés) des modèles et de calculs peuvent être relativement courts. Toutefois, le cheminement décisionnel laisse la possibilité d'utiliser des méthodes plus approximatives (approches 2 et 3) lorsque les enjeux de protection sont faibles et le système hydrogéologique peu complexe.

Il peut être nécessaire de réviser le choix de la méthode sélectionnée à la suite des étapes subséquentes de la démarche. Plusieurs possibilités de méthodes peuvent être initialement envisagées. Le choix final se fera à la suite de l'[Étape 5 : Acquisition et traitement des données](#) et de la validation du modèle conceptuel (retour à l'[Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel](#)).

Le professionnel mandaté pour déterminer les aires de protection d'une installation de prélèvement d'eau souterraine devrait s'assurer que les hypothèses sous-jacentes à la méthode de détermination choisie sont respectées (voir les fiches descriptives des méthodes). Dans le cas contraire, le résultat obtenu risque d'être erroné.

Figure 12 : Cheminement décisionnel pour le choix d'une méthode de calcul appropriée pour la détermination des aires de protection intermédiaires et éloignée d'un prélèvement de catégorie 1



La flèche pointillée indique que même lorsque les enjeux de protection sont faibles et que le système hydrogéologique est simple, il est recommandé de considérer l'emploi d'une méthode offrant des résultats plus précis.

Enjeux de protection

À l'[Étape 2 : Enjeux de protection du prélèvement](#), plusieurs facteurs humains sont évalués, dont l'importance du prélèvement pour la communauté, la présence d'activités sujettes à une réglementation dans le secteur et visant la protection du prélèvement, et l'ampleur des problématiques de contamination potentielle. La combinaison de ces facteurs renseigne sur l'importance des enjeux de protection. Cette réflexion étant qualitative, le jugement professionnel est primordial et la conclusion de ce raisonnement devrait être indiquée dans le rapport pour justifier le choix de la méthode. Lorsque les enjeux sont élevés, le risque économique associé à une surprotection du territoire et celui associé à une contamination potentielle en cas de sous-protection du territoire préconisent nécessairement une étude plus approfondie employant des méthodes de détermination des aires de protection plus précises (approches 4 et 5).

Les menaces actuelles et anticipées et les événements potentiels qui seront répertoriés lors de l'étude décrite dans le [Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec \(MELCC, 2018\)](#) pourront préciser l'ampleur des problématiques de contamination potentielle évaluée à l'[Étape 2 : Enjeux de protection du prélèvement](#). Si une méthode approximative a été utilisée pour déterminer les aires de protection et que le risque global de contamination s'avérait élevé à la suite de cette étude, une délimitation plus précise des aires de protection serait requise.

Complexité du système hydrogéologique

Un système hydrogéologique simple repose sur les hypothèses suivantes, telles que définies à l'[Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel](#) :

- Une installation de prélèvement simple;
- Une épaisseur constante de l'aquifère et des limites de l'aquifère infinies à l'échelle des aires de protection;
- Une direction d'écoulement relativement certaine et uniforme;
- Des conditions de confinement continues;
- Un milieu poreux équivalent;
- Un aquifère homogène;
- Des propriétés hydrauliques isotropes.

Lorsque l'une des hypothèses ci-dessus n'est pas respectée, ou si les données ne sont pas suffisantes pour en juger, le système hydrogéologique est considéré comme complexe et une étude plus approfondie employant les méthodes par cartographie hydrogéologique (approche 4) ou modélisation numérique (approche 5) est à privilégier. Le professionnel qui choisirait de procéder autrement devrait justifier sa décision dans le rapport d'étude hydrogéologique.

Dans le cas de la méthode par cartographie hydrogéologique, comme elle ne permet pas de calculer les temps de transport et de déterminer les aires de protection intermédiaires, elle doit être combinée avec une autre approche. L'utilisation d'une méthode approximative, comme l'équation analytique du temps de transport, peut alors être valide si le système hydrogéologique à l'échelle des aires de protection intermédiaires est considéré comme étant simple. Cela peut parfois être le cas, même si le système hydrogéologique à l'échelle de l'aire d'alimentation est jugé complexe, car les conditions hydrogéologiques à proximité du site de prélèvement peuvent être relativement uniformes. De plus, les données sont souvent plus nombreuses et fiables près du site de prélèvement, ce qui permet de juger de la complexité du système à proximité du site de prélèvement, alors qu'à l'échelle de l'aire d'alimentation, la quantité de données et leur qualité sont souvent insuffisantes pour en juger.

Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique influence le choix de la méthode uniquement dans les cas où l'emploi de méthodes approximatives est possible (approches 2 et 3), soit lorsque les enjeux de protection sont faibles et que le système hydrogéologique est simple. Les équations analytiques (approche 3) devraient être employées si le gradient hydraulique est significatif. Par contre, lorsque le gradient hydraulique est faible (par exemple moins de 0,001), signifiant une surface piézométrique quasi horizontale, les aires deviennent presque circulaires. Ce sont alors les méthodes du rayon fixe calculé (approche 2) qui devraient être utilisées.

À ce jour, l'approche par équations analytiques a été employée la plupart du temps au Québec. Toutefois, les conditions d'utilisation et les hypothèses simplificatrices de ces méthodes approximatives limitent les possibilités de les employer. Elles sont plutôt adéquates lorsque les enjeux de protection sont faibles et que le système hydrogéologique est simple. Dans le cadre de la délivrance d'autorisations et de l'analyse quinquennale de la vulnérabilité, les évaluations devraient s'assurer de prendre en compte ces considérations.

3.5. Étape 5 : Acquisition et traitement des données

Cette section présente de l'information sur les bonnes pratiques, des recommandations et des mises en garde concernant l'acquisition de nouvelles données hydrogéologiques. Le traitement des données hydrogéologiques, qu'elles proviennent de travaux de terrain réalisés dans le cadre du mandat en cours ou qu'elles aient été recueillies d'autres sources, est aussi abordé. L'utilité spécifique des différents types de données pour la détermination des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC est exposée dans cette section de manière à favoriser une planification efficace des travaux de terrain et une exploitation maximale de l'ensemble des données recueillies. La présente section ne constitue toutefois pas une description détaillée des méthodes de terrain pour la réalisation des travaux en hydrogéologie ni des procédures pour l'interprétation des résultats. Le lecteur est invité à consulter les références citées dans chaque sous-section pour de l'information à ce sujet.

3.5.1. Identification des données manquantes

À la suite du choix préliminaire de la ou des méthodes qui seront utilisées pour la détermination des aires de protection, les données manquantes requises peuvent être identifiées. Le [Tableau 4](#) synthétise les données nécessaires pour chaque méthode. Cette information est détaillée dans les [fiches descriptives des principales méthodes de détermination des aires de protection](#).

Tableau 4 : Données nécessaires à chaque approche de détermination des aires de protection

Approche	Données nécessaires
Approche 1 : Rayon fixe arbitraire	Aucune
Approche 2 : Rayon fixe calculé	<ul style="list-style-type: none"> • Débit journalier moyen d'exploitation (Q) • Longueur de la crépine (H) • Porosité efficace (n_e) • Recharge (R)
Approche 3 : Équations analytiques	<ul style="list-style-type: none"> • Direction moyenne d'écoulement • Gradient hydraulique horizontal de l'aquifère (i) • Débit journalier moyen d'exploitation (Q) • Conductivité hydraulique (K) • Épaisseur saturée (b) • Porosité efficace (n_e)
Approche 4 : Cartographie hydrogéologique	<ul style="list-style-type: none"> • De nombreux points de mesure de niveau d'eau • Géométrie et structure de l'aquifère et limites du système d'écoulement
Approche 5 : Modélisation numérique	<ul style="list-style-type: none"> • Direction d'écoulement • De nombreux points de mesure de niveau d'eau • Gradients hydrauliques (horizontaux et verticaux) de l'aquifère (i) • Débit journalier moyen d'exploitation (Q) • Conductivité hydraulique (K_x, K_y, K_z) • Coefficient d'emmagasinement (S et/ou S_s) • Porosité efficace (n_e) • Recharge (R) • Géométrie et structure de l'aquifère et limites du système d'écoulement

Les données nécessaires pour chaque paramètre DRASTIC, telles que décrites à l'[Étape 7 : Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine par la méthode DRASTIC](#), sont indiquées dans le [Tableau 5](#). La méthode DRASTIC est détaillée dans la [fiche descriptive de la méthode DRASTIC pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine](#).

Tableau 5 : Données nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine à l'aide de la méthode DRASTIC

Paramètre DRASTIC	Données nécessaires
D : Profondeur de la nappe	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur de la nappe (nappe libre) • Profondeur du toit de l'aquifère (nappe captive)
R : Recharge annuelle	<ul style="list-style-type: none"> • Recharge
A : Milieu aquifère	<ul style="list-style-type: none"> • Stratigraphie de l'aquifère
S : Type de sol	<ul style="list-style-type: none"> • Données pédologiques
T : Pente du terrain	<ul style="list-style-type: none"> • Topographie
I : Impact de la zone vadose	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur de la nappe (nappe libre) • Profondeur du toit de l'aquifère (nappe captive) • Stratigraphie de la zone vadose
C : Conductivité hydraulique de l'aquifère	<ul style="list-style-type: none"> • Conductivité hydraulique de l'aquifère

3.5.2. Visite du site de prélèvement d'eau et du territoire à l'étude

En premier lieu, pour un prélèvement existant, une inspection de l'installation de prélèvement et de son environnement immédiat devrait être faite afin de prendre connaissance de son état et de rencontrer l'opérateur du système d'approvisionnement. Une visite du territoire, sur une zone élargie qui inclut les aires de protection présumées, devrait aussi être faite pour vérifier les hypothèses posées afin de définir de façon préliminaire le contexte hydrogéologique. Cette visite peut être combinée à celle de l'[Étape 1 : Recherche des informations existantes](#).

Des photos de l'installation et de son environnement immédiat devraient être prises. Si d'anciennes photos sont disponibles, elles devraient être intégrées au rapport final. Des photos devraient aussi illustrer les différentes caractéristiques des milieux naturel et humain, notamment les activités potentiellement polluantes inventoriées (ex. : réservoir d'hydrocarbure).

Au cours de la visite, le professionnel devrait, entre autres, vérifier la conformité des installations par rapport aux critères suivants :

- Vérifier que l'aménagement ne présente pas de risque de contamination directe par la tête du puits ou par son environnement immédiat;
- Vérifier l'absence de toute source potentielle de contaminants;
- Vérifier que l'accès est contrôlé.

Bien qu'il ne soit plus obligatoire de clôturer l'aire de protection immédiate, cette pratique demeure conseillée.

3.5.3. Détermination du débit journalier moyen d'exploitation

L'article 68 du RPEP prévoit l'analyse de vulnérabilité de la source et la révision des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC tous les cinq ans. Il est donc implicite de viser

à ce que les aires soient appropriées, minimalement jusqu'à la mise à jour de l'analyse, cinq ans plus tard. Il est toutefois économiquement souhaitable pour la communauté et le responsable du prélèvement de viser un horizon temporel plus grand lors de l'étude de détermination des aires de protection et des indices de vulnérabilité DRASTIC. Lorsqu'on prévoit une consommation d'eau sur une plus longue période, la probabilité de refaire une nouvelle étude tous les cinq ans est amoindrie s'il n'y a pas de changement significatif quant à l'utilisation du sol ou aux enjeux de protection.

Selon le [Guide de conception des installations de production d'eau potable](#) (MDDELCC, 2015c), les installations de production d'eau potable doivent tenir compte de la prévision des besoins en eau sur une période de 30 ans. Il est recommandé de considérer les mêmes prévisions à long terme de la consommation lors de la détermination des aires de protection. L'évaluation des besoins à long terme a normalement été réalisée lors de la conception du site de prélèvement d'eau souterraine. Pour un site existant dont l'aménagement remonte à plusieurs années, il serait approprié que le responsable du prélèvement consacre des ressources pour mettre à jour cette évaluation. Celle-ci devrait suivre la méthodologie décrite dans le [Guide de conception des installations de production d'eau potable](#) (MDDELCC, 2015c), basée sur les prévisions définissant les nouveaux usagers et les consommations de référence pour chacune des catégories d'usagers. Ces catégories d'usagers incluent la consommation résidentielle, industrielle, commerciale, institutionnelle et municipale ainsi que les pertes d'eau.

À défaut de consacrer des ressources suffisantes pour réaliser une évaluation détaillée, le professionnel réalisant l'étude de détermination des aires de protection devrait minimalement faire une analyse sommaire basée sur l'historique des débits prélevés et les prévisions démographiques de la communauté. Puisque l'incertitude des prévisions d'une telle analyse sommaire sera importante, il est recommandé de déterminer les aires de protection selon différents scénarios de consommation.

L'utilisation du débit journalier maximal autorisé n'est pas appropriée pour déterminer les aires de protection puisqu'il est basé sur les besoins de pointe journalière. Si l'on considère l'inertie d'un système aquifère, c'est le volume journalier moyen sur une période d'une année, qui est à utiliser.

Le débit journalier moyen d'exploitation qui doit être utilisé pour déterminer les aires de protection correspond au débit qui est calculé en fonction d'une période d'une année pendant laquelle les besoins en eau seront maximaux, soit selon les prévisions de consommation de l'horizon temporel des 30 années à venir.

3.5.4. Forage et installation de puits d'observation

Selon les articles 57 et 65 du RPEP, pour les prélèvements de catégorie 1, les données recueillies dans un minimum de trois puits aménagés au sein de l'aquifère exploité par l'installation de prélèvement d'eau et pouvant être utilisés à des fins d'observation des eaux souterraines doivent être utilisées afin de déterminer les aires de protection intermédiaires et éloignée. Il peut s'agir de puits existants (puits d'observation, piézomètres ou puits résidentiels) ou de nouveaux puits (puits d'observation ou piézomètres) aménagés spécifiquement aux fins du projet.

Puisque les données doivent être recueillies dans un minimum de trois puits, la détermination de la direction d'écoulement ne peut être basée uniquement sur la topographie du terrain.

La nécessité d'aménager de nouveaux puits ou non dépendra des caractéristiques des puits déjà en place. Lorsque l'installation des nouveaux puits s'avère nécessaire, le professionnel responsable de l'étude devrait s'assurer de planifier ces installations de façon optimale afin d'obtenir le plus de données utiles possible pour caractériser l'aquifère. En plus de permettre de mesurer le niveau piézométrique, le forage d'un puits d'observation devrait permettre de réaliser des essais hydrauliques, de prélever des échantillons d'eau souterraine, d'observer la stratigraphie, de déterminer l'épaisseur de l'aquifère, de caractériser les fractures d'écoulement préférentiel et de recueillir des échantillons de sédiments ou de roche qui permettront de mieux connaître les propriétés des matériaux, telles que la granulométrie, la fracturation, la porosité et la conductivité hydraulique.

Localisation des puits d'observation

Pour déterminer adéquatement une direction d'écoulement dans les aires de protection, les puits d'observation utilisés devraient répondre aux critères suivants :

- Être répartis en amont hydraulique du site de prélèvement ou, lorsque l'amont hydraulique est incertain, être répartis de telle sorte que le puits d'exploitation se situe au centre de la configuration des puits d'observation, par exemple lorsque la topographie de surface est plane;
- Être distancés suffisamment, particulièrement si le gradient hydraulique est faible;
- Être disposés en un triangle le plus équilatéral possible et couvrant une portion importante de l'aire d'alimentation (en longueur et en largeur);
- Être à des profondeurs similaires dans la même unité hydrostratigraphique, et cela implique que la stratigraphie du puits d'observation devrait être connue;
- Les niveaux d'eau mesurés dans les puits d'observation ne devraient pas être sous l'influence d'un pompage. Si le pompage du puits d'exploitation est en cours, il est primordial que les puits d'observation soient suffisamment éloignés du puits d'exploitation pour que les mesures de niveau d'eau ne soient pas influencées par le rabattement dû au pompage. Sinon, les niveaux d'eau pourraient indiquer un sens d'écoulement radial vers le puits (depuis toutes les directions, à 360°);
- Pour pouvoir utiliser le puits d'exploitation comme un des trois puits d'observation, son niveau piézométrique devrait être statique afin de déterminer le sens d'écoulement « naturel » de l'eau souterraine. Le pompage du puits devrait donc avoir été à l'arrêt depuis suffisamment de temps pour que la remontée du niveau d'eau soit complète;
- Rentabiliser les travaux en priorisant par exemple un emplacement du puits d'observation en aval d'une ou de plusieurs activités potentiellement polluantes afin de constituer un puits d'alerte.

Puisque les informations de suivi sur la qualité de l'eau sont nécessaires dans le cadre de l'analyse quinquennale de la vulnérabilité, la localisation des puits d'observation devrait être optimisée pour atteindre cet objectif. Le Guide sur les études hydrogéologiques (MELCC, à paraître) décrit les éléments que devrait comprendre le programme de suivi du prélèvement (monitoring).

Il est important que la localisation horizontale et surtout l'altitude des puits d'observation soient précises. En cas de doute, il peut être nécessaire de faire arpenter les puits ou d'utiliser des techniques de géolocalisation précises (comme le DGPS). Par exemple, lorsque le gradient hydraulique est faible, une erreur, même de faible amplitude, sur l'altitude des puits pourrait entraîner une interprétation erronée des directions d'écoulement et donc une mauvaise délimitation des aires.

Une erreur dans la direction d'écoulement peut avoir un effet important dans la forme des aires et entraîner la protection de zones qui ne contribuent pas à l'alimentation du prélèvement et inversement l'absence de protection de zones contributrices.

Méthodes de forage et aménagement des puits d'observation

Selon le [Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères granulaires](#) (Michaud *et al.*, 2008), les facteurs techniques suivants devraient être considérés pour le choix d'une méthode de forage :

- L'objectif du forage : pour l'installation de puits d'observation uniquement ou aussi pour l'échantillonnage de sédiments ou de roc, l'échantillonnage d'eau ou la réalisation d'essais hydrauliques;
- Le type de matériau géologique rencontré;
- La profondeur de forage et la profondeur de la nappe;
- La disponibilité des divers types d'équipement de forage;
- L'accessibilité du terrain;
- Le coût et le temps requis pour le forage.

Les techniques de forage sont décrites dans plusieurs ouvrages, dont Rasmussen *et al.* (2006) et Michaud *et al.* (2008). Le [Cahier 3 : Échantillonnage des eaux souterraines du Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales](#) (MDDEP, 2011) décrit les règles de l'art pour l'aménagement de puits d'observation.

Malgré une planification adéquate des travaux de forage et d'installation des puits d'observation, il est possible que les données recueillies dans les puits d'observation aménagés mettent en évidence la nécessité de réaliser des travaux de caractérisation complémentaires, voire d'aménager de nouveaux puits.

3.5.5. Levé piézométrique

Selon la méthode de détermination des aires de protection envisagée et la quantité de puits d'observation disponible, le levé piézométrique devrait être réalisé pour permettre au minimum de déterminer une direction d'écoulement générale ou mieux, d'établir la surface piézométrique (direction d'écoulement en tout point) de l'aquifère exploité sur l'ensemble de l'aire d'alimentation, pas seulement à proximité du puits de pompage.

Pour effectuer un levé de qualité et établir la surface piézométrique, les recommandations suivantes s'appliquent :

- Les mesures de niveau d'eau ne devraient pas être sous l'influence du pompage du puits d'exploitation ou d'autres puits à proximité, car la surface piézométrique et la direction d'écoulement « naturelle » sont recherchées;

- Les mesures de niveau piézométrique devraient être synchrones, particulièrement dans le cas d'un aquifère montrant de grandes variations de niveau d'eau, ce qui est souvent le cas pour les aquifères de roc fracturé;
- Il faut considérer uniquement les niveaux d'eau pris dans le même aquifère (ou du moins dans des aquifères en lien hydraulique clairement défini) et à des profondeurs similaires, car il pourrait y avoir des gradients verticaux;
- La localisation et l'altitude des points de mesure devraient être précises.
- Il faut utiliser le plus grand nombre de données possible (ex. : puits répertoriés par le Système d'information hydrogéologique ou autres bases de données de la liste des données disponibles utiles en hydrogéologie);
- Les points de mesure devraient être répartis le plus possible sur l'ensemble du territoire à l'étude;
- L'élévation des plans d'eau et cours d'eau peut être employée si elle correspond à l'élévation de la piézométrie lorsque le lien hydraulique avec l'aquifère est démontré;
- Pour les aquifères en nappe libre, la piézométrie ressemble à une version adoucie de la topographie et la ligne de partage des eaux souterraines est semblable à celle pour les eaux de surface.

Il peut être difficile de respecter l'ensemble de ces critères dans la pratique et la qualité de certaines données peut être moins bonne. Ces données piézométriques peuvent tout de même être utiles à l'interprétation de la surface piézométrique, pourvu que le professionnel porte un jugement critique sur la mesure. Par exemple, l'emploi des niveaux d'eau répertoriés dans le SIH pourrait être valide si la topographie est accidentée et si plusieurs valeurs semblables sont observées dans les puits à proximité. Par contre, si la topographie est plane, ou si la variabilité des mesures est importante entre les puits à proximité, l'incertitude des mesures est trop importante pour qu'on considère cette source de données. Tremblay *et al.* (2015) décrivent une procédure semi-automatique efficace pour valider les mesures de niveau d'eau issues du SIH à utiliser dans l'estimation d'une surface piézométrique.

Interaction entre l'eau de surface et l'eau souterraine

Lorsque des cours d'eau ou des plans d'eau se trouvent à proximité du site de prélèvement d'eau souterraine et sont en lien hydraulique avec l'aquifère, il est pertinent de comprendre l'interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Le pompage du puits pourrait faire que l'eau de surface alimente en partie l'installation de prélèvement et qu'elle soit une source potentielle de contamination des eaux souterraines. Les méthodes suivantes sont décrites dans Rasmussen *et al.* (2006) :

- La mesure de flux de filtration (seepage test);
- La mesure du gradient hydraulique vertical avec des mini piézomètres dans le lit d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau;
- L'interprétation des données hydrogéochimiques de l'eau de surface et de l'eau souterraine.

3.5.6. Essais hydrauliques et autres mesures des propriétés hydrauliques de l'aquifère

Les essais hydrauliques permettent de déterminer certaines propriétés hydrauliques des aquifères, telles que la porosité efficace, la conductivité hydraulique, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement. Les types d'essais, leur description et leur utilité sont résumés

dans le [Guide sur les études hydrogéologiques](#) (MELCC, à paraître). Ce document aborde également certaines conditions d'utilisation de ces essais, les éléments de planification pour la réalisation des essais et la documentation et l'interprétation des essais. La réalisation des essais devrait être conforme au [Guide des essais de pompage et leurs interprétations](#) (Chapuis, 1999), qui décrit différents essais servant à tester la capacité d'un puits et à établir les propriétés hydrauliques d'un aquifère.

Un ou plusieurs essais de pompage sont toujours réalisés avant la mise en fonction du puits d'exploitation afin de déterminer sa capacité de production, soit le débit que l'installation est susceptible de soutenir, et de connaître les propriétés hydrauliques de l'aquifère à proximité du puits. Il est primordial de recueillir ces données pour l'étude de détermination des aires de protection. Si ces essais ne semblent pas avoir été réalisés selon les règles de l'art et conformément au [Guide des essais de pompage et leurs interprétations](#) (Chapuis, 1999), il est nécessaire de les reprendre.

Lorsque l'aquifère est hétérogène, il est nécessaire de recueillir les propriétés hydrauliques dans plusieurs puits d'observation répartis dans l'aquifère.

Des essais de perméabilité (*slug test*) peuvent être réalisés dans plusieurs puits d'observation afin d'obtenir une valeur locale de conductivité hydraulique et de vérifier l'homogénéité des propriétés hydrauliques de l'aquifère ou de vérifier l'étanchéité de la couche de confinement. Ces essais sont de courte durée (quelques minutes à quelques heures selon les propriétés de l'aquifère), nécessitent peu de matériel pour leur réalisation et sont peu coûteux. Toutefois, la géométrie précise du puits devrait être connue pour leur interprétation adéquate.

Il est aussi possible d'évaluer certaines propriétés hydrauliques de l'aquifère en laboratoire, par exemple, par l'analyse granulométrique des dépôts meubles ou par des essais en colonne.

Enfin, des valeurs de référence tirées de la littérature peuvent parfois être utilisées lorsque des valeurs mesurées ne sont pas disponibles ou sont trop coûteuses à obtenir. Dans ces cas, comme l'incertitude sur la valeur utilisée est très élevée, d'autant plus pour le roc fracturé, il est recommandé d'employer des valeurs sécuritaires et d'être très prudent dans l'interprétation des résultats des aires de protection et des indices DRASTIC. Plusieurs ouvrages en hydrogéologie rapportent des valeurs représentatives de la conductivité hydraulique et de la porosité efficace pour les dépôts meubles et le roc fracturé (ex. : Morris et Johnson, 1967; Freeze et Cherry, 1979; Health, 1983; Domenico et Schwartz, 1990).

La porosité fait référence au pourcentage des vides par unité de volume d'un milieu géologique. Pour les méthodes par équations analytiques, la porosité efficace, aussi appelée effective ou de drainage (*specific yield*) devrait plutôt être utilisée. Il s'agit du pourcentage du volume du milieu géologique qui contient de l'eau qui peut se drainer par gravité, ce qui indique la quantité d'eau disponible pour le pompage. En ce qui concerne spécifiquement le roc, la porosité efficace dépend davantage de la porosité secondaire (de fracture) que de la porosité primaire (intergranulaire ou de matrice).

Puisque la porosité efficace détermine le volume d'eau disponible dans le milieu géologique, elle influe grandement sur la vitesse d'écoulement, donc les temps de transport à partir desquels les aires de protection intermédiaires sont déterminées. Il est primordial d'utiliser une valeur réaliste et de justifier le choix de cette valeur dans le rapport d'étude. Par exemple, une porosité efficace de plus de quelques unités de pourcentage est peu probable dans le roc fracturé, à part pour certains types de roche spécifiques comme le grès, le calcaire ou le basalte.

3.5.7. Essais de traçage

Les essais de traçage permettent de déterminer la porosité efficace de l'aquifère, la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine ou le temps de transfert, d'évaluer les propriétés dispersives du milieu et de vérifier le lien hydraulique entre différents points d'un aquifère. Il existe différents types d'essais de traçage décrits dans Rasmussen *et al.* (2006) qui nécessitent l'injection d'une substance (le traceur) dans l'aquifère. Les essais de traçage traditionnels présentent l'inconvénient d'être longs à réaliser et demandent des précautions particulières dans les aquifères exploités pour la consommation humaine afin de prévenir la contamination. Dans de tels cas, des études récentes ont démontré que l'utilisation de traceurs non nuisibles à la santé humaine tels que la chaleur serait possible (Anderson, 2005; Divine et McDonnell, 2005; Cox *et al.*, 2007; Saar, 2011). Par ailleurs, la technique d'essais de traçage par dilution en puits unique (Brouyère *et al.*, 2008) permettrait d'obtenir des valeurs de flux d'écoulement lors d'essais de courte durée.

Les essais de traçage sont un outil très performant permettant de caractériser directement l'écoulement de l'eau souterraine. Dans le cadre d'une étude visant la détermination des aires de protection, il peut s'avérer coûteux de réaliser de tels essais. Toutefois, si des essais de traçage ont été réalisés dans le secteur d'étude, il est primordial de considérer les résultats.

3.5.8. Échantillonnage et analyse d'eau souterraine

Pour la détermination des aires de protection, l'information concernant la qualité de l'eau souterraine de l'aquifère exploité sert d'abord à constater les problématiques avérées qui influencent les enjeux de protection du prélèvement (voir [l'Étape 2 : Enjeux de protection du prélèvement](#)). Les problèmes de qualité de l'eau peuvent ne pas provenir d'une contamination anthropique et être de source naturelle. L'analyse des données recueillies sur un territoire plus large permettra de distinguer les problématiques locales de celles qui sont plus régionales. Les rapports des PACES et l'étude de Choinière et Beaumier (1997) fournissent des données géochimiques de référence.

Les analyses géochimiques, microbiologiques et isotopiques de l'eau peuvent également fournir de précieux indices utiles à la délimitation des aires de protection concernant le contexte hydrogéologique général. Qu'elles proviennent de données disponibles recueillies ou qu'elles aient été analysées lors de cette étude, les informations sur la géochimie de l'eau devraient être mises en perspective pour appuyer les hypothèses du modèle hydrogéologique conceptuel posées précédemment ([Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel](#)). Dans le cas de contradiction entre le modèle hydrogéologique conceptuel et les indices issus des données géochimiques, il est nécessaire d'investiguer davantage et de remettre en question certaines hypothèses. Le [Guide sur les études hydrogéologiques](#) (MELCC, à paraître) explique l'utilité des indicateurs géochimiques, isotopiques et du type d'eau dans la compréhension des conditions hydrogéologiques.

Exemple : Selon la définition du modèle hydrogéologique conceptuel, l'aquifère exploité serait confiné de façon continue. Par contre, la composition de l'eau souterraine montrerait une eau jeune de type Ca-HCO₃ avec un pH légèrement acide. Il faudrait alors soupçonner que la zone de recharge est à proximité du prélèvement et que le confinement est possiblement discontinu. Dans ce cas, il serait nécessaire d'investiguer davantage pour vérifier la continuité du confinement.

La présence de contaminants microbiologiques dans l'eau prélevée pourrait indiquer qu'il s'agit d'un aquifère non confiné, à moins qu'un problème de scellement de puits ou d'influence des eaux de surface ne soit décelé.

3.5.9. Investigation géophysique

Le principal objectif d'une investigation géophysique de proche surface est de déterminer la nature du sous-sol. Une investigation géophysique appliquée à l'hydrogéologie peut fournir de nombreuses informations utiles telles que le type des dépôts, la présence et la localisation d'un aquifère ou d'un aquitard, la géométrie de cet aquifère (extension latérale et variabilité de l'épaisseur), la profondeur de la nappe, la profondeur du roc et les structures sédimentaires des dépôts.

Pour qu'une investigation géophysique d'un site d'étude soit couronnée de succès, les objectifs de cette investigation, notamment en ce qui concerne les cibles à identifier dans le sous-sol, devraient être clairement établis. Un maximum d'informations sur ces cibles devrait être disponible, dont notamment des rapports de forages du site d'étude, afin que la sélection des méthodes à employer soit optimale. Les contraintes associées à l'accessibilité du site d'étude et à la présence d'infrastructures civiles à l'origine de bruit anthropique devraient être connues pour le déploiement des équipements géophysiques sur le terrain.

Le document [Investigation géophysique appliquée à l'hydrogéologie](#) (Richard Fortier, 2017) détaille les étapes d'une investigation géophysique. Cela inclut des informations sur le processus d'appel d'offres de services et les éléments qui affectent les coûts d'une investigation géophysique. Les méthodes usuelles d'investigation géophysique sont décrites, accompagnées d'indications concernant les contextes hydrogéologiques où ces méthodes peuvent être utiles.

3.5.10. Levés structuraux

Dans un aquifère en milieu fracturé, il est nécessaire de connaître suffisamment le réseau de fractures pour pouvoir déterminer les directions d'écoulement privilégiées et statuer sur les hypothèses du milieu poreux équivalent, de l'homogénéité et de l'isotropie ([Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel](#)). À cette fin, des levés de fractures peuvent être réalisés à partir du puits d'exploitation, des puits d'observation ou de toute surface rocheuse naturelle ou artificielle. Ces levés sont décrits dans Rasmussen et al. (2006). Lorsque de telles données sont disponibles pour le secteur d'étude, il est important de les consulter.

3.5.11. Évaluation de la recharge

L'évaluation de la recharge de l'aquifère est requise par plusieurs méthodes de détermination des aires de protection ainsi que pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque DRASTIC. Malheureusement, il n'est pas possible de la mesurer sur le terrain et il faut faire appel à des méthodes d'estimation, telles que résumées dans Scanlon *et al.* (2002). Des guides de cartographie hydrogéologique décrivent aussi des méthodes d'évaluation de la recharge ([Michaud](#)

[et al., 2008; Savard et al., 2008](#)). Quelques-unes des méthodes les plus couramment utilisées sont décrites brièvement dans les paragraphes suivants. Le niveau de fiabilité des résultats obtenus de ces méthodes varie grandement. Généralement, la combinaison de plusieurs méthodes permet d'obtenir une valeur plus représentative.

Pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque DRASTIC ([Étape 7 : Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine](#) par la méthode DRASTIC), la recharge doit être définie par un intervalle de valeurs (0-50, 50-100, 100-180, 180-250 ou 250 mm/an et plus). Ce classement constitue la précision minimale qui devrait être obtenue pour l'estimation de la recharge.

Pour la délimitation des aires de protection, la recharge devrait être déterminée plus précisément si la méthode utilisée requiert ce paramètre. La résolution spatiale pour le calcul de la recharge dépendra de la résolution spatiale des données d'entrée disponibles pour son estimation et de l'homogénéité du milieu. Pour un milieu hétérogène qui requiert l'utilisation d'une méthode de détermination des aires précise, il serait opportun de diviser le territoire en zones similaires et de calculer la recharge pour chacune d'elles ou encore de discrétiser la zone d'étude en une grille où la recharge est estimée pour chaque maille.

Bilan hydrique

L'établissement d'un bilan hydrique permet d'estimer la recharge annuelle de l'aquifère. Tous les termes du bilan doivent alors être évalués et la recharge est obtenue par différence. Dans sa forme la plus simple, lorsqu'on combine les ruissellements hypodermiques et de surface et qu'on néglige la variation de l'emmagasinement d'eau dans le sous-sol, l'équation du bilan est la suivante :

$$R = P - ET - R_{ui}$$

où :

- R est l'infiltration verticale ou la recharge,
- P est les précipitations,
- ET est l'évapotranspiration et
- R_{ui} est le ruissellement.

Précipitations (P)

La valeur des précipitations totales annuelles est facilement accessible sur les sites gouvernementaux renseignant sur les données climatiques ([Liste des données disponibles utiles en hydrogéologie](#)). Il est recommandé d'utiliser les normales climatiques basées sur une période de 30 ans lorsqu'elles sont disponibles.

Évapotranspiration (ET)

L'évapotranspiration peut être estimée en évaluant l'évapotranspiration potentielle (ETP) par la méthode de Thornthwaite (1948), qui nécessite très peu de données, soit les températures mensuelles, la latitude et le mois. D'autres méthodes plus complètes peuvent aussi être utilisées si plus de données sont disponibles (Healy, 2010).

Ruissellement (Rui)

Il existe plusieurs méthodes pour estimer le ruissellement. L'une des méthodes communément utilisées est celle des coefficients de ruissellement (C) que l'on doit multiplier par les précipitations (P) pour obtenir le ruissellement (Rui). Pour des valeurs typiques de coefficient de ruissellement en fonction des types de surfaces, d'occupation du sol, de sols, de végétation et de pentes, on doit se référer à l'[Annexe IV : Détermination des coefficients de ruissellement](#), issue du [Guide de gestion des eaux pluviales](#) (Gouvernement du Québec, 2014).

Hydrogramme des puits

La méthode de l'hydrogramme de puits pour estimer la recharge est décrite par Healy et Cook (2002). Pour appliquer cette méthode, des données de suivi continu de niveau d'eau doivent être disponibles pour un puits aménagé dans l'aquifère sur une période d'au moins un an. De tels suivis sont réalisés, entre autres, par le Ministère, avec son [Réseau de suivi sur les eaux souterraines du Québec](#).

L'application de la méthode consiste simplement en une analyse graphique du niveau d'eau en fonction du temps. Toutefois, cette méthode s'applique uniquement en conditions naturelles (aquifère non influencé par un pompage). Elle requiert aussi de connaître la porosité efficace de l'aquifère. Enfin, la méthode s'applique mieux aux aquifères de dépôts meubles dont la nappe est peu profonde et dont la réaction aux précipitations est forte.

Séparation de l'hydrogramme de crue

Lorsqu'une station hydrométrique fournissant des données de débit en continu d'un cours d'eau est présente dans le bassin versant dans lequel se trouve l'aquifère, la recharge peut être estimée par la séparation de l'hydrogramme de crue. Cette technique est décrite par Domenico et Schwartz (1990) et consiste à faire une évaluation graphique de la portion du débit qui provient des eaux souterraines. Toutefois, le résultat obtenu par cette méthode sera une valeur moyenne de recharge sur le bassin versant de la station hydrométrique. Pour utiliser cette valeur, le professionnel devrait être en mesure de démontrer que les conditions locales sur les aires de protection du prélèvement sont représentatives des conditions sur le bassin versant, lequel est souvent beaucoup plus grand.

Mesures directes du flux d'infiltration et autres mesures dans la zone non saturée

Le flux d'infiltration se mesure directement par l'installation de lysimètres (Healy, 2010). D'autres méthodes mesurant la teneur en eau et la tension de l'eau dans le sol de la zone non saturée, combinées à des essais de laboratoire, permettent aussi de faire cette évaluation (Healy, 2010; Murray, 2016). Ce sont des méthodes généralement utilisées en agronomie. Les résultats de telles études réalisées sur le territoire à investiguer sont une source d'information intéressante pour l'évaluation de la recharge.

Modélisation numérique

Des modèles numériques d'infiltration permettent d'estimer les composantes du bilan hydrologique, dont la recharge (ex. : HELP (« Hydrologic Evaluation of Landfill Performance »)) (Schroeder *et al.*, 1994)). Ces modèles nécessitent l'intégration d'une grande quantité de

données (météorologiques, végétation, occupation du sol, pédologie, géologie) et des efforts de calage importants, mais procurent des résultats qui sont parfois très fiables.

Lorsque les aires de protection sont déterminées par un modèle numérique d'écoulement (ex. : MODFLOW (USGS, 2016)), une valeur de recharge moyenne peut être déterminée par calibration du modèle ou modélisation inverse. Il s'agit d'ajuster la recharge du modèle jusqu'à obtenir le meilleur calibrage possible des données de niveau d'eau et de débit, s'il y a lieu. Il est toutefois préférable d'avoir d'autres valeurs de recharge indépendantes d'un modèle pour valider la fiabilité et pour réduire la non-unicité du modèle.

Valeur de référence de la littérature

La recharge a été estimée dans tous les projets régionaux des PACES. Toutefois, la fiabilité de cette estimation varie d'une région à l'autre en fonction de la méthode utilisée allant de la modélisation numérique à des méthodes plus simples comme celle du calcul du bilan hydrique. Ces valeurs peuvent servir d'estimation de la recharge pour la délimitation des aires de protection ou de valeurs de comparaison des valeurs obtenues par les autres méthodes. Elles pourraient aussi, dans certains cas, être utilisées directement pour la détermination des indices DRASTIC. Le professionnel devrait alors être en mesure de démontrer que les conditions locales sur les aires de protection du prélèvement sont semblables aux conditions régionales considérées pour le calcul de la recharge des PACES.

Dans tous les cas, le professionnel devrait indiquer comment l'estimation de la recharge a été réalisée et discuter de la qualité des résultats en fonction de la fiabilité de la méthode et de l'incertitude des données en intrant.

Un système hydrogéologique bénéficie d'une certaine inertie par rapport aux variations des conditions environnementales et anthropiques. La recharge est le paramètre naturel le plus susceptible de varier et d'affecter la disponibilité de l'eau souterraine, la délimitation des aires de protection et la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine. La possibilité que les changements climatiques et l'urbanisation puissent modifier la recharge devrait être considérée lors de l'évaluation de ce paramètre. Le jugement du professionnel est requis pour déterminer une valeur sécuritaire.

Présentation des données acquises

Les données acquises devraient être intégrées au [Tableau 2](#) récapitulatif présenté à l'[Étape 1 : Recherche des informations existantes](#), accompagné d'un plan de localisation de l'ensemble des travaux réalisés et de l'album photographique. Si des forages ont été réalisés dans le cadre du projet, leur installation devrait être présentée sous forme de schéma en coupe. Les graphiques incluant les données nécessaires à l'interprétation des essais hydrauliques devraient faire partie intégrante du rapport d'étude, de même que les rapports d'analyse de la qualité de l'eau et des illustrations schématisques des levés géophysiques et structuraux.

Les résultats des interprétations des données devraient être cartographiés lorsque possible. Les cartes thématiques de l'épaisseur des sédiments, des niveaux de confinement et leur continuité, de la profondeur des niveaux d'eau, de la surface piézométrique, de la recharge distribuée et des zones préférentielles de recharge et de résurgence sont conçues grâce à des interprétations et elles permettent de mieux définir le contexte hydrogéologique.

Étape 6 : Détermination des aires de protection

Avant d'entamer les calculs de détermination des aires de protection, le modèle hydrogéologique conceptuel ([Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel](#)) et le choix des méthodes de détermination des aires de protection ([Étape 4 : Choix des méthodes de détermination des aires de protection](#)) devraient être confirmés. Si ce n'est pas le cas, un retour en arrière dans la démarche s'avère nécessaire.

L'application des méthodes de détermination des aires de protection et leurs calculs sont détaillés dans les [Fiches descriptives des principales méthodes de détermination des aires de protection](#). Les fiches présentent, pour chaque type de méthode, un résumé des méthodes, le type d'aire qu'elles permettent de déterminer (immédiate, intermédiaires, éloignée), la liste des données nécessaires, une description des méthodes, un schéma explicatif, les équations, les conditions d'utilisation et les hypothèses simplificatrices, les avantages et les désavantages, ainsi que les références.

La localisation des données utilisées pour faire les interprétations (ex. : mesures de niveau piézométrique) devrait toujours apparaître sur les produits cartographiques afin de juger de la fiabilité des résultats.

Les aires de protection devraient être délimitées pour chaque prélèvement autorisé par le Ministère. Si les aires de prélèvements voisins se recoupent, elles devraient être présentées de manière combinée. Superposer les aires de protection déterminées par équations analytiques constitue une mauvaise pratique. Une méthode comme la modélisation qui prend en compte les effets mutuels de chacun des puits en pompage simultané est recommandée.

3.5.12. Respect des conditions d'utilisation et des hypothèses simplificatrices des méthodes

Le respect des conditions d'utilisation et des hypothèses simplificatrices des méthodes est très important. Il peut toutefois être raisonnable de faire preuve d'une certaine flexibilité, car certaines conditions sont rarement ou jamais respectées dans la pratique. Par exemple, il est présumé par les approches simples 2 et 3 que le puits est ouvert sur toute l'épaisseur saturée de l'aquifère. Dans la pratique, cette condition n'est jamais respectée à cause du rabattement de la nappe dû au pompage du puits. Ces approches pourraient tout de même être employées, si par exemple le puits est ouvert sur au moins la moitié de l'épaisseur de l'aquifère, mais en faisant preuve de prudence quant à l'interprétation du résultat obtenu.

Bien que le questionnement sur les conditions d'utilisation et les hypothèses simplificatrices de la méthode employée ait été effectué plus tôt dans la démarche, le professionnel devrait valider à nouveau le respect de celles-ci au regard du résultat obtenu. Par exemple, une aire circulaire ou parabolique dont les limites latérales calculées dépassent les limites de l'aquifère exploité est invalide. Aussi, une aire qui est beaucoup plus longue que large, par exemple de plus de deux ordres de grandeur, est peu probable. Une comparaison critique du résultat avec d'autres cas concrets tirés de la littérature ou en cohérence avec les phénomènes connus est donc essentielle. Les éléments à discuter pour juger de la qualité et de la validité des résultats obtenus sont présentés à l'[Étape 8 : Discussion sur la qualité et la pérennité des résultats](#).

Complexité de l'installation de prélèvement

Le cas d'un prélèvement d'une source (résurgence naturelle d'eau souterraine) constitue un cas complexe tel que décrit à l'[Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel](#). En effet, la portion aval des aires de protection d'une source peut être difficile à déterminer. Il n'est pas valide d'utiliser une approche par rayon calculé ou par équations analytiques et de tronquer l'aire circulaire ou parabolique, car le rayon ou la largeur calculé à la hauteur du site de prélèvement serait exagéré. Une modélisation est requise dans ce cas.

Les aires de protection délimitées pour les puits multiples et les puits sous l'influence d'autres installations de prélèvement sont très vulnérables au changement. En effet, dans le cas d'une augmentation ou d'une diminution importante du pompage d'un puits voisin (ou pire son abandon), les limites des aires pourraient ne plus être adéquates. Il est recommandé de réaliser plusieurs scénarios pour prévoir les conséquences de ces changements. La modélisation numérique est, dans ce cas, nettement avantageuse, car une fois le modèle conçu, il devient relativement simple et rapide de réaliser ces scénarios.

Si un cours d'eau ou un plan d'eau est présent à proximité du site de prélèvement, il peut être possible que le cône de rabattement soit ouvert sur le cours d'eau ou le plan d'eau et qu'une part de l'eau exploitée provienne directement de l'eau de surface. Dans ce cas, le volume d'eau de surface pompé devrait être estimé par modélisation numérique et la taille des aires de protection serait plus petite. Seules les portions terrestres des aires de protection devraient être cartographiées lorsque le plan d'eau ou le cours d'eau constitue une limite hydraulique à l'écoulement souterrain.

Géométrie de l'aquifère

L'hypothèse d'un aquifère aux limites infinies à l'échelle des aires de protection devrait être respectée pour certaines méthodes simples de détermination. Lorsque l'aquifère est limité latéralement par une barrière hydraulique (ex. : cours d'eau, crête piézométrique ou changement marqué de lithologie), l'utilisation des approches par équations analytiques et rayon fixe calculé n'est pas recommandée. Le fait de tronquer latéralement les aires calculées ne constitue pas une solution adéquate, car cela réduit la surface des aires sans considérer qu'en réalité, cette troncature entraîne un agrandissement de l'aire ailleurs. Dans ces cas, la modélisation numérique ou la cartographie hydrogéologique devrait être employée.

Lors de l'utilisation de l'approche par équations analytiques, la limite amont de l'aire d'alimentation devrait être établie à la ligne de partage des eaux souterraines. Une aire ouverte est invalide, car certaines activités sont prosrites dans l'aire de protection éloignée pour les puits de catégories 1 et 2 en vertu du RPEP (article 66).

Hypothèse de milieu poreux équivalent, d'homogénéité et d'isotropie

Pour les études dans des aquifères en milieu fracturé, la meilleure pratique est de rapporter des indications concernant la validité des hypothèses du milieu poreux équivalent, d'homogénéité et d'isotropie. Il n'est pas rare que les propriétés hydrauliques d'un aquifère fracturé soient anisotropes, ce qui peut avoir un effet sur l'orientation des aires de protection ([Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel](#)).

Pour des puits ouverts au roc, l'épaisseur de l'aquifère saturé peut être importante. Dans ce cas, il faut être très prudent lors de l'utilisation de valeurs de propriétés hydrauliques, car elles auront une grande influence sur le résultat (ex. : une faible augmentation de conductivité hydraulique ou une faible diminution de porosité efficace fera que l'eau souterraine atteindra le puits plus rapidement). S'il est établi avec une certitude raisonnable que l'eau souterraine provient préférentiellement d'une zone du roc plus fracturée, présentant typiquement une conductivité hydraulique de deux ordres de grandeur ou plus que les zones moins fracturées, il est préférable d'utiliser les propriétés hydrauliques correspondant à cette zone combinées à une épaisseur saturée de l'aquifère limitée à cette zone. Dans le cas contraire où l'aquifère de roc semble uniformément fracturé sur toute son épaisseur, alors les propriétés hydrauliques moyennes typiques du type de roc en question devraient être employées, jumelées à une épaisseur saturée correspondant à toute l'ouverture du puits au roc.

Un puits recoupant plusieurs aquifères, que ce soit un puits avec plusieurs crépines dans des aquifères différents ou un puits ouvert au roc et qui recoupe deux zones fracturées hydrauliquement isolées l'une de l'autre, ne respecte pas l'hypothèse d'homogénéité. La modélisation numérique s'avère nécessaire.

Des facteurs de sécurité pourraient être employés pour différents paramètres utilisés pour la détermination des aires de protection, spécifiquement pour les méthodes les plus approximatives. Puisqu'il n'est pas possible de recommander des facteurs pour chaque paramètre et qui s'appliqueraient dans tous les cas, le professionnel devra faire preuve de jugement et considérer l'ampleur des enjeux de protection, la compréhension du système hydrogéologique et la précision de la méthode.

Peu importe la méthode utilisée, sa complexité et le nombre de paramètres hydrogéologiques qu'elle intègre, la qualité du résultat dépendra de la qualité des données en intrant. Cette mise en garde concerne autant les méthodes de détermination approximative que les méthodes plus précises telles que la modélisation numérique.

3.5.13. Présentation des résultats de délimitation des aires de protection

Les valeurs des paramètres d'entrée utilisées (et calibrés dans le cas de la modélisation numérique) dans les calculs à faire lors du processus de détermination des aires de protection devraient être clairement présentées sous forme de tableau, accompagnées de leur variabilité, d'une évaluation de l'incertitude et de l'identification de la source des données (ex. : [Tableau 6](#)). Les calculs permettant la délimitation des aires de protection devraient faire partie intégrante du rapport d'étude.

Tableau 6 : Paramètres d'entrée utilisés et calibrés dans le calcul des aires de protection

Donnée	Valeurs retenues	Variabilité	Incertitude	Source
Débit journalier moyen d'exploitation (Q)				
Conductivité hydraulique moyenne (K)				
Porosité efficace (n_e)				
Charge hydraulique amont (h_1)				
Charge hydraulique aval (h_2)				
Distance entre les points de mesure des charges hydrauliques (Δl)				
...				

Afin qu'un regard critique puisse être porté sur les aires de protection, notamment lors de l'analyse quinquennale de vulnérabilité des sources d'eau potable et qu'elles puissent être mises à jour au besoin, la description détaillée de la méthode de calcul des aires et des intrants utilisés devrait être consignée dans l'étude, même lorsqu'une méthode approximative a été utilisée. Il peut s'agir d'un fichier Excel suffisamment documenté pour qu'un tiers puisse refaire les calculs. Si un modèle numérique a été conçu, la documentation décrivant les propriétés et conditions limites utilisées devrait aussi être présentée dans l'étude. Les fichiers matriciels et vectoriels du modèle numérique pourraient faire partie des exigences du responsable du prélèvement selon le contrat de service.

Les résultats des aires de protection devraient toujours être accompagnés d'une description sommaire de la méthode utilisée, de ses conditions d'utilisation et de ses hypothèses simplificatrices.

L'Annexe III du [Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec](#) (MELCC, 2018) décrit la structure physique des données préconisée pour la représentation des aires de protection dans un format géographique numérique. Un fichier de format « shapefile » est attendu. Un canevas de fichier est proposé sur le site Web du Ministère à l'adresse suivante : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/prelevements/analyse-vulnerabilite.htm>.

Le RPEP exige la représentation des aires de protection à l'aide d'un plan de localisation, mais ne précise pas son échelle cartographique. Puisque l'objectif est ultimement de pouvoir gérer les activités humaines potentiellement polluantes sur les territoires des aires, l'échelle devrait être assez précise pour les repérer. Par exemple, les lots et les parcelles agricoles individuels devraient être visibles, d'autant plus sur les aires intermédiaires puisque les activités agricoles y sont réglementées. Plusieurs cartes pourraient être nécessaires s'il existe une différence importante entre la taille des aires de protection. Deux plans de localisation sont souvent suffisants, soit un premier comprenant les aires immédiate et intermédiaires (échelle généralement entre 1/1 000 et 1/10 000) et un second

comprenant toutes les aires, dont l'aire éloignée (échelle généralement entre 1/10 000 et 1/40 000). Des agrandissements pourraient aussi être présentés pour des zones d'intérêt, par exemple où se retrouve une concentration d'activités réglementées potentiellement polluantes sur l'aire d'alimentation.

La présentation cartographique des aires de protection devrait être réalisée à l'aide d'un SIG. Certains modules cartographiques associés aux modèles numériques permettent aussi une présentation soignée. Les fichiers cartographiques en format commun (ex. : « shapefile ») devraient être remis en annexe du rapport d'étude. Ceux-ci faciliteront les travaux d'analyse de vulnérabilité de la source et de gestion du territoire. Cette information a un caractère public, comme défini à l'article 8 du RPEP.

Les métadonnées des documents cartographiques devraient être présentées en respectant les règles de l'art. Elles devraient être remises au responsable du prélèvement (le client) en accompagnement des fichiers numériques. Cette information a un caractère public, comme défini à l'article 8 du RPEP.

Puisque des implications réglementaires sont concernées, le responsable du prélèvement et les gestionnaires du territoire devraient pouvoir identifier clairement les limites des aires de protection. L'utilisation de pointillés est donc à proscrire.

3.6. Étape 7 : Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine par la méthode DRASTIC

La vulnérabilité intrinsèque se définit comme la sensibilité de l'eau souterraine à la contamination. Selon l'article 53 du RPEP, le niveau de vulnérabilité doit être classé comme « faible », « moyen » ou « élevé » pour chaque aire de protection. En fonction de ces niveaux, des restrictions sur certaines activités anthropiques s'appliquent, dont :

- L'épandage et le stockage, à même le sol, de boues provenant d'ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées ou de tout autre système de traitement ou d'accumulation d'eaux usées sanitaires;
- L'épandage et le stockage, à même le sol, de déjections animales, de matières fertilisantes azotées, de compost de ferme ou de matières résiduelles fertilisantes;
- L'aménagement d'une cour d'exercice, d'un ouvrage de stockage de déjections animales, d'un bâtiment d'élevage d'animaux ou d'une aire de compostage;
- L'aménagement d'une parcelle ou d'un pâturage.

En outre, les niveaux de vulnérabilité intrinsèque influenceront l'évaluation de la gravité des conséquences des activités anthropiques et des événements potentiels réalisée lors de l'analyse quinquennale de vulnérabilité de la source (MELCC, 2018).

3.6.1. La méthode DRASTIC

Pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine, l'emploi de la méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) est prescrit par le RPEP. Elle est basée sur le calcul d'un indice qui varie entre 23 et 226; plus l'indice est élevé, plus l'eau souterraine est sensible à la pollution. Il s'agit d'une approche empirique, non fondée sur les processus physiques. L'évaluation de l'indice est faite à partir de sept paramètres hydrogéologiques et géologiques, dont chacun correspond à une lettre de l'acronyme anglophone DRASTIC :

- D : Profondeur de la nappe (*Depth to water table*);
- R : Recharge ou infiltration efficace (*Recharge*);
- A : Nature du milieu aquifère (*Aquifer media*);
- S : Type de sol (*Soil media*);
- T : Pente du terrain (*Topography*);
- I : Nature de la zone vadose ou non saturée (*Impact of vadose zone*);
- C : Conductivité hydraulique de l'aquifère (*Conductivity*).

L'application de la méthode DRASTIC, y compris la liste des données nécessaires, un schéma explicatif, les équations, les conditions d'utilisation et les hypothèses simplificatrices, et la description de chacun des sept paramètres, est détaillée dans la [Fiche descriptive de la méthode DRASTIC pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine](#).

Pour les prélèvements de catégorie 1, les plages des indices DRASTIC présentées dans le [Tableau 7](#) permettent de classer la vulnérabilité pour chaque aire de protection selon l'un des trois niveaux de vulnérabilité. Pour les prélèvements de catégories 2 et 3, la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine est considérée comme élevée par défaut. Elle peut toutefois être évaluée autrement par un professionnel selon la même méthode que pour les prélèvements de catégorie 1.

Tableau 7 : Niveaux de vulnérabilité de l'eau souterraine prescrits par le RPEP selon les indices DRASTIC, pour les aires de protection des prélèvements de catégorie 1

Niveau de vulnérabilité	Indice DRASTIC
Faible	≤ 100 sur l'ensemble de l'aire de protection
Moyen	< 180 sur l'ensemble de l'aire de protection, mais > 100 sur une quelconque partie de l'aire de protection
Élevé	≥ 180 sur une quelconque partie de l'aire de protection

Les trois niveaux de vulnérabilité définis par le RPEP correspondent chacun à des types de contraintes pour certaines activités pouvant avoir lieu dans les aires de protection. Le niveau « moyen » couvre un large intervalle d'indices DRASTIC (de 100 à 180 inclusivement). Un indice DRASTIC près de 180 pourrait être jugé relativement élevé. Le niveau « moyen » permet la réalisation d'une activité à risque, telle la fertilisation avec des déjections animales dans l'aire de protection intermédiaire bactériologique à plus de 100 m du prélèvement, mais sur recommandation d'un professionnel (ex. : agronome – article 64 du RPEP). Ce professionnel devrait faire preuve de jugement et ne pas formuler les mêmes recommandations lorsque l'indice DRASTIC est plus près de 180 que de 100. Le professionnel réalisant l'étude de détermination des aires de protection devrait fournir le meilleur éclairage possible à celui qui devra formuler des recommandations sur la réalisation de l'activité à risque.

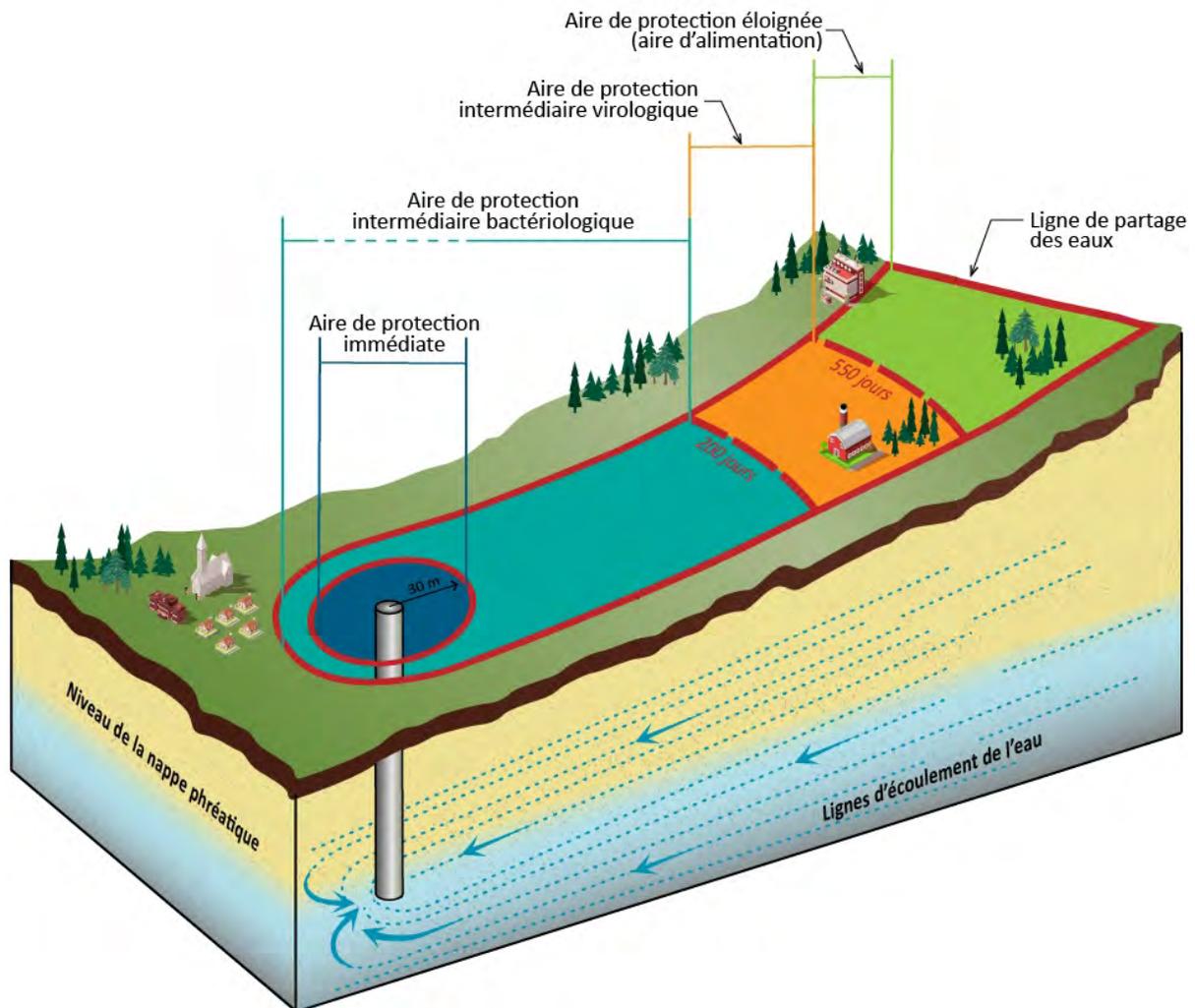
En 2002, le RCES prescrivait l'emploi de la méthode DRASTIC pour les aires de protection intermédiaires. Le RPEP exige que l'évaluation soit maintenant réalisée indépendamment pour les quatre aires de protection (immédiate, intermédiaire bactériologique, intermédiaire virologique et éloignée).

Ce ne sont pas seulement les informations sur le milieu géologique et les conditions hydrogéologiques observées au droit du puits d'exploitation qui devraient être considérées pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine pour les quatre aires de protection, mais bien les informations récoltées sur l'ensemble du territoire des aires de protection. L'utilisation de données identiques pour les quatre aires est généralement inadéquate.

Aux fins de l'évaluation de la vulnérabilité, les aires de protection sont exclusives l'une de l'autre, c'est-à-dire qu'elles commencent à la limite amont de l'aire précédente et se prolongent jusqu'à la limite aval de l'aire suivante (voir [Figure 13](#)). Pour ce qui est de l'aire immédiate, elle s'étend du site du prélèvement jusqu'à une distance de 30 m. En ce qui a trait à l'aire intermédiaire bactériologique, elle s'étend de la distance de 30 m jusqu'à celle correspondant à un temps de parcours de l'eau souterraine de 200 jours. L'aire intermédiaire virologique s'étend quant à elle de la distance correspondant à un temps de parcours de 200 jours jusqu'à celle correspondant à un temps de parcours de 550 jours. Enfin, en ce qui concerne l'aire éloignée, elle s'étend de la distance correspondant à un temps de parcours de 550 jours jusqu'à la limite de partage des eaux.

Pour déterminer le niveau de vulnérabilité de l'eau souterraine d'une aire de protection, il faut considérer que les aires sont exclusives. Ainsi, il ne faut pas prendre en compte les indices DRASTIC calculés sur l'aire de protection précédente. Par exemple, si le niveau de vulnérabilité de l'eau souterraine de l'aire intermédiaire virologique se révèle être élevé, car au moins un indice DRASTIC est de 180 ou plus sur une quelconque partie de cette aire, le niveau de vulnérabilité sur l'aire éloignée n'est pas nécessairement élevé. Il pourrait même être faible si tous les indices qui y sont calculés sont de 100 ou moins.

Figure 13 : Illustration des aires de protection exclusives l'une de l'autre aux fins de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (ce qui est différent des aires inclusives illustrées à la [Figure 1](#))



Pour réaliser une évaluation des indices DRASTIC de qualité, les éléments suivants devraient être pris en compte :

- Exploiter toutes les données hydrogéologiques pertinentes recueillies pour la détermination des aires de protection;
- Être en cohérence avec le modèle hydrogéologique conceptuel présenté;
- Réaliser l'évaluation à une résolution témoignant de l'importance des enjeux de protection, de la complexité du milieu hydrogéologique et du niveau de détails des données disponibles;
- Utiliser un SIG.

De plus, l'hétérogénéité du système hydrogéologique devrait impérativement être considérée dans l'évaluation des indices DRASTIC. Les cotes des paramètres de DRASTIC peuvent différer d'une portion de territoire à l'autre, à l'intérieur de la même aire de protection. Dans ce cas, des indices distincts devraient être calculés pour chacune de ces portions de territoire.

Une évaluation détaillée est particulièrement importante lorsque les enjeux de protection sont élevés, car les résultats auront une grande influence sur les décisions des gestionnaires du territoire.

Les conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC ([Fiche descriptive de la méthode DRASTIC pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine](#)) devraient être expliquées dans le rapport d'étude, car les choix de gestion du territoire sur les aires de protection seront grandement dépendants de la bonne compréhension de cette évaluation. De plus, afin de juger de la fiabilité des indices DRASTIC calculés, le professionnel devrait écrire clairement dans le rapport d'étude les sources d'information utilisées, car l'estimation de la vulnérabilité dépend largement de la quantité de données utilisées et de leur qualité. Enfin, l'utilisation de données trop approximatives dans le calcul des indices peut avoir comme résultat que la vulnérabilité d'une aire de protection sera mal évaluée (par exemple un niveau « faible » plutôt que « moyen »), ce qui peut avoir une incidence importante sur la protection de la santé des consommateurs.

Comme pour la détermination des aires de protection, la qualité des valeurs des indices DRASTIC dépendra de la qualité des données utilisées en intrant.

3.6.2. Présentation des résultats de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine

Au minimum, pour chacune des aires de protection, les résultats des indices DRASTIC devraient être clairement présentés sous forme de tableau incluant les valeurs des paramètres d'entrée, les cotes retenues pour les calculs, la variabilité des cotes, une évaluation de leur incertitude et l'identification des sources des données (ex. : [Tableau 8](#)).

Lorsque les indices ont été calculés selon un maillage ou un zonage plus raffiné que les aires, pour chacun des sept paramètres DRASTIC, il y a plusieurs valeurs des paramètres d'entrée et cotes retenues par aire de protection, donnant plusieurs indices DRASTIC calculés par aire. Leur présentation sous forme de tableau devient difficile. Dans ces cas, les cartes intermédiaires des cotes de chacun des sept paramètres DRASTIC devraient plutôt être présentées.

Tableau 8 : Résultat de l'indice DRASTIC et valeurs des paramètres d'entrée utilisées dans le calcul

Paramètre DRASTIC	Valeurs ou description retenue	Cote retenue (c)	Variabilité de la cote	Incertitude sur la cote	Source	Poids (p)	Indice (c x p)
D : Profondeur de la nappe							
R : Recharge annuelle							
A : Milieu aquifère							
S : Type de sol							
T : Pente du terrain							
I : Impact de la zone vadose							
C : Conductivité hydraulique de l'aquifère							

Indice DRASTIC

Les résultats des indices DRASTIC devraient toujours être accompagnés d'une description sommaire de la méthode, de ses conditions d'utilisation et des hypothèses simplificatrices.

Le rapport d'étude devrait contenir la cartographie des indices DRASTIC calculés et distribués sur les aires de protection afin que le responsable du prélèvement et les gestionnaires du territoire puissent visualiser les portions de l'aire d'alimentation où la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine est plus ou moins élevée. L'Annexe IV du [Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec](#) (MELCC, 2018) décrit la structure recommandée pour la compilation des niveaux de vulnérabilité des aires de protection. Les niveaux de vulnérabilité devraient aussi être présentés sous forme de carte.

Les échelles des plans de localisation devraient être les mêmes que celles utilisées pour la représentation des aires de protection (voir l'[Étape 6 : Détermination des aires de protection](#)).

Le responsable du prélèvement (le client) devrait recevoir les feuilles de calcul des indices DRASTIC, ainsi que les fichiers cartographiques en format commun (ex. : « shapefile ») et leurs métadonnées. Ces informations ont un caractère public, comme défini à l'article 8 du RPEP.

3.7. Étape 8 : Discussion sur la qualité et la pérennité des résultats

Toutes les méthodes de détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine permettent d'estimer les aires avec une certaine incertitude qui dépend de :

- L'incertitude des données d'entrée et du modèle conceptuel;
- La méthode utilisée.

Plus les données d'entrée sont imprécises et variables, plus l'aire de protection est approximative. L'élaboration du modèle hydrogéologique conceptuel permet de déterminer les données pertinentes et valides à utiliser dans le calcul des aires. Une bonne compréhension du contexte hydrogéologique est donc importante pour réduire l'incertitude sur les aires de protection.

Comme on l'a vu à l'[Étape 4 : Choix des méthodes de détermination des aires de protection](#), plus la méthode est complexe et plus elle permet l'intégration des caractéristiques du milieu, plus sa fiabilité est élevée. Certaines approches simples, comme celles basées sur des équations analytiques, sont plus approximatives que celles par cartographie hydrogéologique ou par modélisation numérique. Le respect des conditions d'utilisation des méthodes et de leurs hypothèses simplificatrices est primordial.

Le rapport d'étude devrait inclure une discussion sur la qualité des résultats de délimitation des aires de protection et des indices DRASTIC qui, pour être complète, pourrait comprendre :

- Des considérations sur la qualité des données d'entrée utilisées;
- Une étude de sensibilité des paramètres d'entrée;
- Une mise en perspective des résultats obtenus;
- Une analyse des conséquences potentielles de l'incertitude.

Le contenu proposé pour chacun de ces aspects de la discussion est décrit dans la section qui suit. Il s'agit des éléments qu'il serait profitable d'aborder dans le rapport d'étude pour permettre au lecteur d'interpréter les résultats de la manière la plus adéquate possible. Selon les cas, il pourrait être peu utile de consacrer des ressources pour répondre à tous les aspects proposés pour la discussion. Par exemple, tenter de quantifier les effets du changement climatique ou de l'occupation du territoire peut s'avérer complexe. Des mises en garde dans le rapport d'étude concernant ces éléments seraient toutefois minimalement attendues (ex. : « *Les résultats pourraient ne plus être valides dans le cas d'un changement des conditions environnementales ou d'occupation du territoire* »).

L'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine à l'aide de la méthode DRASTIC donne aussi un résultat imprécis qui dépend du nombre de données utilisées en intrant et de leur qualité. La précision dépend aussi de l'échelle spatiale employée (ex. : une seule valeur pour l'ensemble de l'aire éloignée ou une valeur par maille de 5 m sur 5 m). Enfin, la méthode elle-même est approximative puisqu'elle définit subjectivement des poids pour les paramètres hydrogéologiques et utilise des cotes au lieu des valeurs réelles des propriétés hydrauliques. Comme pour les aires de protection, cette incertitude devrait être mise en perspective dans la discussion.

Il n'y a pas de modèle précis pour la discussion de la qualité des résultats. La part du jugement professionnel est très importante. L'objectif principal consiste à bien communiquer que les aires de protection et l'évaluation de la vulnérabilité DRASTIC sont approximatives et que la gestion des activités humaines sur l'aire d'alimentation devrait prendre en compte cette incertitude.

3.7.1. Discussion sur la qualité des résultats

Considérations sur la qualité des données d'entrée

La qualité des données d'entrée, incluant leur variabilité et une évaluation de leur incertitude, devrait être discutée et les choix des sources d'information justifiés. Par exemple, si on augmente le nombre de mesures piézométriques à partir de données provenant du SIH, cela devrait être clairement indiqué dans le rapport d'étude et le professionnel devrait justifier qu'il est raisonnable d'utiliser ces données dont la fiabilité individuelle est relativement faible. Rappelons que la qualité de l'estimation dépend largement de la qualité des données en intrant, peu importe la précision de la méthode, sa complexité et le nombre de paramètres hydrogéologiques qu'elle intègre.

Des valeurs de référence tirées de la littérature peuvent parfois être utilisées lorsque des valeurs mesurées ne sont pas disponibles ou sont trop coûteuses à obtenir. Dans ces cas, il est recommandé d'employer des valeurs sécuritaires et être très prudent dans l'interprétation des résultats des aires de protection et des indices DRASTIC.

Étude de sensibilité des paramètres d'entrée

Les méthodes de détermination des aires de protection sont très sensibles aux variations de certains paramètres, dont les propriétés hydrauliques de l'aquifère (particulièrement la conductivité hydraulique et la porosité), rendant critiques les incertitudes sur ces paramètres. Bien que le terme « étude de sensibilité » soit généralement utilisé en modélisation, celle-ci peut être faite pour toutes les méthodes, y compris DRASTIC. Il s'agit simplement d'observer l'incidence de la variation des différents paramètres d'entrée (à l'intérieur de plages de valeurs réalistes) sur le résultat. Il est alors possible de déterminer quels paramètres ont une influence décisive sur la délimitation des aires de protection et le niveau de vulnérabilité intrinsèque. Le [Tableau 9](#) montre l'effet général d'une hausse de valeur d'un paramètre d'entrée sur la superficie des aires de protection.

Tableau 9 : Effet sur la superficie des aires d'une augmentation de valeur des principaux paramètres d'entrée utilisés pour la détermination des aires de protection

Augmentation de la valeur du paramètre	Effet sur la superficie des aires de protection
Débit journalier moyen d'exploitation (Q)	Augmentation
Porosité efficace (n_e)	Augmentation
Conductivité hydraulique (K)	Diminution
Épaisseur saturée (b)	Diminution
Gradient hydraulique horizontal de l'aquifère (i)	Diminution
Recharge (R)	Diminution

Si une grande incertitude existe sur les paramètres d'entrée (ex. : utilisation de valeurs tirées de la littérature), des valeurs sécuritaires plutôt que des valeurs moyennes devraient être attribuées à ces paramètres pour les calculs. L'étude de sensibilité permettra d'établir ces valeurs sécuritaires à partir de la plage de valeurs possibles (variabilité) de chacun des paramètres.

La délimitation finale des aires de protection à l'aide de valeurs sécuritaires entraîne des aires de protection plus grandes que celles utilisant des valeurs moyennes. Avec cette approche sécuritaire, plus d'activités humaines risquent d'avoir cours dans les aires de protection, ce qui peut augmenter les enjeux de protection. Cela pourrait inciter le responsable du site de prélèvement d'eau souterraine à consacrer plus de ressources au travail de délimitation afin d'en améliorer la précision.

Le RPEP ne fixe pas d'objectif relatif à un niveau d'incertitude qui s'appliquerait aux aires de protection. Il n'y a donc pas de cible de pourcentage d'incertitude, de largeur de zone tampon ou autre manière de présenter l'incertitude des aires de protection; le choix de la présentation revient au jugement du professionnel qui réalise l'étude. Des statistiques simples sur la forme et la superficie des aires de protection de différents scénarios pourraient être une façon de présenter les résultats de l'étude de sensibilité. Des rapports de superficie commune entre l'aire retenue et les aires orientées selon les variabilités minimale et maximale de la direction d'écoulement pourraient aussi être présentés. Rappelons que les limites des aires de protection doivent être identifiées clairement et que l'utilisation de pointillés est à proscrire.

Mise en perspective des résultats obtenus

Minimalement, la quantité d'eau prélevée (débit) devrait être comparée avec la quantité d'eau provenant des précipitations qui s'infiltrent dans l'aire d'alimentation (recharge). Pour ce faire, il s'agit de multiplier la recharge annuelle estimée par la superficie de l'aire éloignée. Le bilan de masse devrait concorder. Dans le cas contraire, le professionnel devrait s'interroger sur la fiabilité du résultat de l'aire d'alimentation ou de la recharge. Une discussion dans le rapport d'étude à ce propos est attendue. Une recharge plus élevée peut signifier une aire d'alimentation trop vaste. Inversement, une recharge plus faible peut vouloir dire que l'aire d'alimentation ne couvre pas une assez grande surface. Cela pourrait aussi indiquer le captage d'eau provenant d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau de surface. Dans ce cas, il est pertinent de quantifier l'apport d'eau de surface au prélèvement d'eau souterraine.

La mise en perspective des résultats obtenus pourrait également se faire en comparaison avec différentes méthodes de détermination des aires de protection. Afin de détecter des erreurs flagrantes et de valider la forme des aires et leur direction, il peut être pertinent de comparer les aires déterminées à l'aide d'une méthode précise (ex. : modélisation numérique) avec celles délimitées par des méthodes plus approximatives (ex. : équations analytiques). Si une nouvelle délimitation des aires devait être faite à la suite de l'analyse critique demandée dans le cadre de l'analyse quinquennale de la vulnérabilité (MELCC, 2018), une discussion qui compare les anciennes aires et les nouvelles est attendue dans le rapport d'étude. Enfin, les résultats peuvent être mis en perspective en les comparant avec d'autres cas concrets tirés de la littérature ou basés sur l'expérience du professionnel. Les modèles hydrogéologiques conceptuels devraient être similaires pour que cette comparaison soit utile.

Analyse des conséquences potentielles de l'incertitude

En comparant les pires scénarios de l'étude de sensibilité, le professionnel est en mesure d'évaluer subjectivement les conséquences potentielles de l'incertitude sur les délimitations des aires et d'émettre des recommandations au responsable du prélèvement. Par exemple, une importante source de contamination potentielle pourrait se situer à l'extérieur d'une aire de protection initialement délimitée, mais très près de sa limite. Le professionnel, à la suite de son étude de sensibilité, remarquerait qu'une grande incertitude existe sur les paramètres hydrauliques de l'aquifère et que ces paramètres ont une influence majeure sur le résultat. Une approche sécuritaire devrait être prise dans la délimitation finale de l'aire de protection et des recommandations devraient être formulées concernant le suivi de la qualité de l'eau en aval de cette source potentielle de contamination.

Dans la discussion, il faut aussi considérer la tolérance à l'incertitude, qui est dépendante des enjeux de protection tels que définis à l'[Étape 2 : Enjeux de protection du prélèvement](#). Il est parfois raisonnable de tolérer une plus grande incertitude sur la délimitation des aires de protection lorsque l'importance du prélèvement pour la communauté est faible, qu'il y a peu d'activités encadrées par réglementation visant la protection du prélèvement dans le secteur et que l'ampleur des problématiques de contamination potentielle est limitée.

3.7.2. Discussion sur la pérennité des résultats face aux changements des conditions dans le temps

Les changements climatiques

Les changements climatiques sont souvent cités comme un enjeu environnemental majeur auquel il faut faire face. Cependant, comparativement à l'eau de surface, l'eau souterraine bénéficie d'une certaine inertie et est peu affectée à court terme par les changements climatiques de température et de précipitation. La recharge des aquifères est le principal processus affecté par les changements climatiques.

Comme spécifié dans le [Guide de conception des installations de production d'eau potable](#) (MDDELCC, 2015c), les installations de production d'eau potable doivent tenir compte des besoins en eau sur une période de 30 ans. Les modèles prédisant les impacts à long terme d'une augmentation de la température et de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations sur les sources d'eau souterraine sont encore peu développés pour le Québec. À long terme, l'effet des changements climatiques sur la recharge pourrait être marqué dans certains secteurs. De plus, dans certains contextes hydrogéologiques, par exemple dans des contextes insulaires comme les îles de la Madeleine ou l'île d'Orléans, la quantité d'eau

souterraine et sa qualité sont vulnérables à d'autres effets des changements climatiques, comme l'augmentation du niveau marin, l'érosion côtière ou des changements de salinité de l'eau.

Le [Guide sur les études hydrogéologiques](#) (MELCC, à paraître) présente une liste de travaux de référence concernant les effets des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine.

Les changements démographiques et d'occupation du territoire

Les changements démographiques et d'occupation du territoire peuvent affecter la délimitation des aires de protection de plusieurs manières :

- Une augmentation du débit de pompage due à une augmentation de la population approvisionnée par le prélèvement fait augmenter la taille des aires de protection intermédiaires et éloignée;
- Des changements d'occupation du sol, par exemple l'urbanisation d'un nouveau secteur, viennent modifier le bilan en eau, à cause de l'imperméabilisation des sols et de la diminution de la recharge;
- Les enjeux de protection du prélèvement peuvent évoluer rapidement dans le temps et nécessiter d'utiliser une méthode de délimitation des aires précise;
- De nouvelles activités potentiellement polluantes peuvent s'ajouter au fil du temps à l'intérieur et à proximité des aires de protection;
- L'importance du prélèvement pour la communauté peut aussi évoluer, par exemple si la communauté abandonne l'usage d'un puits d'appoint et que le prélèvement devient la source unique d'approvisionnement.

La direction d'écoulement est un paramètre qui pourrait changer dans le temps puisque les niveaux piézométriques utilisés pour sa détermination peuvent varier en fonction des épisodes de précipitation, des saisons, des années et aussi des changements climatiques. Une attention particulière devrait être portée sur cet aspect lors de l'évaluation critique des aires de protection devant être faite tous les cinq ans. Des efforts suffisants doivent être déployés pour procéder à un transfert d'informations complet au responsable du prélèvement afin de faciliter cette évaluation.

Les changements démographiques et d'occupation du sol sont plus faciles à prévoir que les changements climatiques sur les prochaines 30 années. Leur influence sur la disponibilité de l'eau souterraine et la délimitation des aires semble plus importante. Il sera opportun de considérer les changements des conditions survenues dans le temps lorsque les aires de protection et les indices de vulnérabilité DRASTIC seront réévalués tous les cinq ans dans le cadre de l'analyse de vulnérabilité des sources d'alimentation en eau potable.

CONCLUSION

La détermination des aires de protection d'un prélèvement d'eau souterraine ainsi que l'établissement de leur niveau de vulnérabilité intrinsèque sont des travaux préalables à l'analyse quinquennale de la vulnérabilité de la source destinée à l'alimentation en eau potable (MELCC, 2018). Cette démarche s'inscrit dans le cadre de la protection de la source d'eau potable qui constitue la première des barrières multiples visant à garantir une eau saine « de la source au robinet » (CCME, 2004). Différentes méthodes de calcul permettent de délimiter des aires de protection des prélèvements, telles que définies par le RPEP. Le choix d'une méthode par le professionnel qui réalise les travaux doit être fait en fonction de plusieurs critères liés aux milieux humain et naturel, et en s'assurant de respecter les conditions d'utilisation et les hypothèses simplificatrices de la méthode. Quant à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine, le RPEP prescrit l'emploi de la méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) qui permet d'évaluer, à l'aide de paramètres géologiques et hydrogéologiques, la susceptibilité d'un contaminant qui serait mobilisé par l'eau à la surface à s'infiltrer dans le sol et à percoler verticalement jusqu'à la nappe. La marche à suivre recommandée dans ce guide technique vise les prélèvements de catégorie 1. Elle comprend huit étapes établies afin d'assurer l'obtention de résultats de qualité conformes aux règles de l'art, tout en standardisant la méthodologie et le contenu des études. Ainsi, les professionnels qui réalisent les études et ceux qui les évaluent dans le cadre d'une demande d'autorisation de prélèvement ou de l'analyse quinquennale de vulnérabilité d'une source destinée à l'alimentation en eau potable sont les lecteurs visés par le guide. Les auteurs espèrent de plus sensibiliser les municipalités et autres responsables des prélèvements d'eau souterraine à l'importance et aux bénéfices réels, présents et futurs, d'un travail de qualité.

Lors de l'évaluation des enjeux de protection, l'établissement de l'incertitude relative à la délimitation des aires de protection constitue une étape cruciale à la définition de l'ampleur des travaux à entreprendre. La quantité de données disponibles et leur qualité jouent aussi un rôle majeur. La complexité du système hydrogéologique intervient dans le choix de la méthode de détermination des aires. Ainsi, seul un système hydrogéologique simple combiné à des enjeux de protection faibles justifiera d'employer des méthodes simples nécessitant peu de travaux. Dans la plupart des cas, ce sont plutôt des études plus approfondies basées sur des méthodes plus fiables comme la modélisation numérique qui sont attendues.

Le rapport d'étude devrait comprendre une discussion portant sur les résultats obtenus lors des travaux de délimitation des aires de protection et de l'évaluation des indices DRASTIC, incluant des considérations sur la qualité des données d'entrée utilisées, une étude de sensibilité des paramètres d'entrée, une mise en perspective des résultats et une analyse des conséquences potentielles de l'incertitude. Cette discussion permettra au responsable d'un prélèvement d'eau souterraine et au professionnel qui réalisera l'analyse quinquennale de vulnérabilité de la source destinée à l'alimentation en eau potable de bien comprendre les limites de l'étude et l'ampleur des incertitudes liées aux résultats présentés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLER, L., T. BENNET, J.H. LEHR et R. PETTY. *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*, Office of Research and Development, Environmental Protection Agency, 1987, 622 pages. [En ligne]. <http://rdn.bc.ca/cms/wpattachments/wplD3175atID5999.pdf>.
- ANDERSON, M.P. "Heat as a Ground Water Tracer", *Ground Water*, vol. 43, n° 6, 2005, pages 951-968.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE) et WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*, American Society of Civil Engineers, New York, 1992, 724 pages. [En ligne]. http://www.waterboards.ca.gov/losangeles/water_issues/programs/stormwater/municipal/AdminRecordOrderNoR4_2012_0175/2001LAMS4_AR/Items%20532%20to%20553_reduced.pdf.
- ASSOCIATION DE ROUTES ET TRANSPORT DU CANADA (ARTC). *Drainage manual*, 2 volumes, Ottawa, 1982.
- BEAR, J., et M. JACOBS. "On the movement of water bodies injected into aquifers", *Journal of Hydrology*, vol. 3, n° 1, 1965, pages 37-57.
- BEAUDOIN, F., E. BOISVERT, A. M. BOLDUC, E. BOURQUE, M. CLOUTIER, A. DOIRON, N. FAGNAN, R. FORTIER, D. LAROSE-CHARENTE, R. LEFEBVRE, R. MARTEL, Y. MICHAUD, V. MURAT, D. PARADIS, M. PARENT et R. THERRIEN. (auteurs par ordre alphabétique). *Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf*, Documents divers, Commission géologique du Canada, 1998-2000. [En ligne]. http://gin.gw-info.net/service/api_ngwds:def/en/brief/pr_portneuf.html (page consultée le 06/09/2017).
- BROUYÈRE, S., J. BATLLE-AGUILAR, P. GODERNIAUX et A. DASSARGUES. "A new tracer technique for monitoring groundwater fluxes: the finite volume point dilution method", *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 95, 2008, pages 121-140.
- BUFFIN-BÉLANGER, T., G. CHAILLOU, C.-A. CLOUTIER, M. TOUCHETTE, B. HÉTU et R. MCCORMACK. *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) – Rapport final*, 2015, 199 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/BasStLaurent/BSL-scientif-UQAR-201503.pdf>.
- CARRIER, A., N. BENOÎT, M. NASTEV, N. ROY, E. BEAUDOIN, P. GIGUÈRE et P. BOUFFARD. *Atlas des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Chaudière : secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière*, Commission géologique du Canada, Dossier public 7284, 2014, 199 pages. [En ligne]. <http://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/fullf.web&search1=R=292860f>.
- CARRIER, M.-A., R. LEFEBVRE, C. RIVARD, M. PARENT, J.-M. BALLARD, N. BENOIT, H. VIGNEAULT, C. BEAUDRY, X. MALET, M. LAURENCELLE, J.-S. GOSSELIN, P. LADEVÈZE, R. THÉRIAULT, E. GLOAGUEN, I. BEAUDIN, A. MICHAUD, A. PUGIN, R. MORIN, H. CROW, J. BLESER, A. MARTIN et D. LAVOIE. *Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada*. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du MDDEFP et du Programme de Cartographie des eaux souterraines de la CGC, Rapport final INRS R-1433, soumis en juin 2013,

- 2013, 283 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/MonteregieEst/MON-scientif-INRS-201306.pdf>.
- CERM-PACES. *Résultats du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de la région Saguenay–Lac-Saint-Jean*, Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi, 2013, 308 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/SaguenayLacStJean/SLSJ-scientif-UQAC-2013.pdf>.
- CERM-PACES. *Résultats du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de Charlevoix, Charlevoix-Est et La Haute-Côte-Nord*, Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi, 2015, 294 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/CharlevoixHauteCoteNord/CHCN-scientif-UQAC-201503.pdf>.
- CHAPUIS, R. P. *Guide des essais de pompage et leurs interprétations*, Publications du Québec, 1999, 156 pages. [En ligne] http://www.environnement.gouv.qc.ca/Eau/souterraines/guide_pompage/index.htm (page consultée le 07/02/2017).
- CHOINIÈRE, J., et M. BEAUMIER. *Bruits de fond géochimiques pour différents environnements géologiques au Québec*, Services des minéraux industriels et de l'assistance à l'exploration, ministère des Ressources naturelles du Québec, 1997, 67 pages.
- CLOUTIER, V., D. BLANCHETTE, P.-L. DALLAIRE, S. NADEAU, E. ROSA et M. ROY. *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 1)*. Rapport final déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche P001. Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013, 135 pages, 26 annexes, 25 cartes thématiques (1:100 000). [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/Abitibi/ABI-scientif-UQAT-201309.pdf>.
- CLOUTIER, V., ROSA, E., NADEAU, S., DALLAIRE, P.-L., BLANCHETTE, D., ET ROY, M. *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 2)*. Rapport final déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche, P002.R3. Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2015, 313 pages, 15 annexes, 24 cartes thématiques (1:100 000). [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/Abitibi/ABI-scientif-UQAT-201503.pdf>.
- COMEAU, G., M.-C. TALBOT POULIN, Y. TREMBLAY, S. AYOTTE, J. MOLSON, J.-M. LEMIEUX, N. MONTCOUDIOL, R. THERRIEN, R. FORTIER, P. THERRIEN et G. FABIEN-OUELLET. *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais*. Rapport final, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, 2013, 148 pages, 24 annexes, 25 cartes. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/Outaouais/OUT-scientif-UVAL-201307.pdf>.
- CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT (CCME). *De la source au robinet : guide d'application de l'approche à barrières multiples pour une eau potable saine*, CCME, 2004, 274 pages. [En ligne]. http://www.ccme.ca/files/Resourcess/fr_water/fr_source_to_tap/mba_guidance_doc_f.pdf.

- CÔTÉ, M.-J., Y. LACHANCE, C. LAMONTAGNE, M. NASTEV, R. PLAMONDON et N. ROY. *Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay*. Collaboration étroite avec la Commission géologique du Canada et l'Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2006, 64 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/atlas/chateauguay/index.htm> (page consultée le 24/07/2016).
- COX, M.H., G.W. SU et J. CONSTANTZ. "Heat, Chloride, and Specific Conductance as Ground Water Tracers near Streams", *Ground Water*, vol. 45, 2007, pages 187-195.
- DICKINSON, J.E., R.T. HANSON, S.W. MEHL et M.C. HILL. *MODPATH-LGR – Documentation of a Computer Program for Particle Tracking in Shared-Node Locally Refined Grids by using MODFLOW-LGR*, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A38, 2011, 42 pages. [En ligne]. <http://pubs.usgs.gov/tm/tm6a38/tm6-a38.pdf>.
- DIERSCH, H.-J. G. *FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*, Springer Berlin Heidelberg, 2014, 996 pages.
- DIVINE, C.E., et J.J. MCDONNELL. "The future of applied tracers in hydrogeology", *Hydrogeology Journal*, vol. 13, 2005, pages 255-258. [En ligne]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.687.4309&rep=rep1&type=pdf>.
- DOMENICO, P.A., et F.W. SCHWARTZ. *Physical and chemical hydrogeology*, John Wiley and Sons Inc., 1990, 824 pages.
- FORTIER, R., [*Investigation géophysique appliquée à l'hydrogéologie*](#), département de géologie et de génie géologique, Université Laval, 2017, 8 pages.
- FREEZE, R.A., et J.A. CHERRY. *Ground Water*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979, 604 pages.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Guide de gestion des eaux pluviales – Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain*, élaboré pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs et le ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire dans le cadre d'un mandat confié à RÉSEAU environnement, 2014, 386 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide-gestion-eaux-pluviales.pdf>.
- GRUBB, S. "Analytical model for estimation of steady-state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers", *Ground Water*, vol. 31, n° 1, 1993, pages 27-32. [En ligne]. <http://info.ngwa.org/gwol/pdf/930657859.PDF>.
- HEALTH, R.C. *Basic Ground-Water Hydrology*, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 1983, 86 pages. [En ligne]. https://pubs.er.usgs.gov/djvu/WSP/wsp_2220.pdf.
- HEALY, R.W., et P.G. COOK. "Using groundwater levels to estimate recharge", *Hydrogeology Journal*, vol. 10, n° 1, 2002, pages 91-109.
- HEALY, R.W. *Estimating Groundwater Recharge*, United States Geological Survey, Cambridge University Press, 2010, 256 pages.
- INTEGRATED GROUNDWATER MODELING CENTER (IGWMC). *About us*, Integrated Groundwater Modeling Center, Colorado School of mines, 2017. [En ligne]. <http://igwmc.mines.edu/AboutUs.html> (page consultée le 24/02/2017).

ISAAKS, E.H., et M.R. SRIVASTAVA. *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 1989, 561 pages.

KARANTA, G. *Étude comparative de méthodes de détermination de périmètres de protection autour des ouvrages de captage dans les aquifères captifs fracturés du sud-ouest du Québec*, Mémoire de maîtrise, INRS – Eau Terre Environnement, 2002, 76 pages. [En ligne]. <http://espace.inrs.ca/349/1/T000303.pdf>.

LAROCQUE, M., S. GAGNÉ, L. TREMBLAY et G. MEYZONNAT. *Projet de connaissances des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour – Rapport scientifique*. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 2013, 213 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/Becancour/BEC-scientif-UQAM-201303.pdf>.

LAROCQUE, M., G. MEYZONNAT, M.-A. OUELLET, M.-H. GRAVELINE, S. GAGNÉ, D. BARNETCHE et S. DORNER. *Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone de Vaudreuil-Soulanges – Rapport scientifique*. Rapport déposé au ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018, 202 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/VaudreuilSoulanges/VS-scientif-UQAM-201503.pdf>.

LAROCQUE, M., S. GAGNÉ, D. BARNETCHE, G. MEYZONNAT, M.-H. GRAVELINE et M.-A. OUELLET. *Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François – Rapport final*. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2015b, 258 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/NicoletStFrancois/NSF-scientif-UQAM-201503.pdf>.

LEBLANC, Y., G. LÉGARÉ, K. LACASSE, M. PARENT et S. CAMPEAU. *Caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie*. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Département des sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, 2013, 134 pages, 15 annexes et 30 documents cartographiques (1:100 000). [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/Mauricie/MAU-scientif-UQTR-201306.pdf>.

LEFEBVRE, R., J.-M. BALLARD, M.-A. CARRIER, H. VIGNEAULT, C. BEAUDRY, L. BERTHOT, G. LÉGARÉ-COUTURE, M. PARENT, M. LAURENCELLE, X. MALET, A. THERRIEN, A. MICHAUD, J. DESJARDINS, A. DROUIN, M. H. CLOUTIER, J. GRENIER, M.-A. BOURGAULT, M. LAROCQUE, S. PELLERIN, M.-H. GRAVELINE, D. JANOS et J. MOLSON. *Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada*. Projet réalisé conjointement par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Rapport final INRS R-1580, soumis au MDDELCC en mars 2015, 2015. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/ChaudiereAppalaches/CHA-scientif-INRS-201503.pdf>.

MCDONALD, M.G., et A.W. HARBAUGH. *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*, U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A, 1988, 588 pages. [En ligne]. http://pubs.usgs.gov/twri/twri6a1/pdf/TWRI_6-A1.pdf.

MICHAUD, Y., R. LEFEBVRE et R. MCCORMACK. (éditeurs scientifiques). *Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères granulaires*, Bibliothèque et Archives nationales du Québec,

- 2008, 167 pages. [En ligne]. http://www.environnement.gouv.qc.ca/EAU/souterraines/aquiferes/guide_granulaires.pdf.
- MIKE POWERED BY DHI. *FEFLOW 7.0 User Guide*, 2016, 124 pages. [En ligne]. <https://www.mikepoweredbydhi.com/download/product-documentation> (page consultée le 23/06/2016).
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE DU QUÉBEC (MEFQ). *Guide – Les périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau souterraine*, Direction des politiques des secteurs agricole et naturel du ministère de l'Environnement et de la Faune, Les Publications du Québec, Sainte-Foy, 1995, 54 pages.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'ONTARIO. *Technical Rules: Assessment Report. Clean Water Act, 2006*, 2015. [En ligne]. <https://www.ontario.ca/page/technical-rules-assessment-report> (page consultée le 08/10/2016).
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU NOUVEAU-BRUNSWICK. *Protection des sources municipales d'eau potable – Survol du Programme de protection des champs de captage du Nouveau-Brunswick*, 2005, 17 pages. [En ligne]. <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Water-Eau/ProtectionSourcesMunicipalesEauPotable.pdf>.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC). *Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec*, 2018, 189 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/prelevements/guide-analyse-vulnerabilite-des-sources.pdf>.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC). *Guide sur les études hydrogéologiques*, à paraître.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (MTQ). *Manuel de conception des ponceaux*, Service de l'hydraulique, Québec, 1995.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC). *Guide technique – Prélèvement d'eau soumis à l'autorisation municipale*, 2015b. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/guide.pdf>.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC). *Guide de conception des installations de production d'eau potable*, 2015c. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/> (page consultée le 17/10/2016).
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC). *Guide sur les principes d'atténuation et de compensation des activités agricoles relativement aux installations de prélèvement d'eau*, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2016a, 42 pages et 2 annexes. [En ligne]. http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/guide_compensation.pdf.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC). *Guide d'interprétation du Règlement sur la qualité de l'eau potable*, Direction de l'eau potable et des eaux souterraines, 2016b, 127 pages. [En ligne]. http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/reglement/guide_interpretation_RQEP.pdf.

- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS (MDDEP). *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales – Cahier 3 – Échantillonnage des eaux souterraines*, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2011, 60 pages, 1 annexe. [En ligne]. http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/eaux_soutC3.pdf.
- MORRIS, D.A., et A.I. JOHNSON. *Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials, as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey*, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1839-D, 1967, 42 pages. [En ligne]. <https://pubs.usgs.gov/wsp/1839d/report.pdf>.
- MURRAY, R. *Bilan hydrologique d'un bassin versant dans la région d'Umiujaq au Québec nordique*, Mémoire de maîtrise interuniversitaire en sciences de la Terre, Université Laval, 2016.
- NOVA SCOTIA ENVIRONMENT WATER AND WASTEWATER BRANCH. *Developing a Municipal Source Water Protection Plan: A Guide for Water Utilities and Municipalities. Step 2 – Delineate a Source Water Protection Area Boundary*, 2004, 15 pages. [En ligne]. <http://www.gov.ns.ca/nse/water/docs/WaterProtectionPlanStep2.pdf>.
- PARADIS, D. *Comparaison de méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien*, Mémoire de maîtrise, INRS – Géoressources, 2000, 142 pages. [En ligne]. <http://espace.inrs.ca/327/1/Tg00007.pdf>.
- PARADIS, D., et R. MARTEL. *HYBRID: A Wellhead Protection Delineation Method for Aquifers of Limited Extent*, Geological Survey of Canada, Technical Note 1, 2007, 5 pages. [En ligne]. http://publications.gc.ca/collections/collection_2007/nrcan-rcan/M41-10-1-2007E.pdf.
- PARADIS, D., R. MARTEL, G. KARANTA, R. LEFEBVRE, Y. MICHAUD, R. THERRIEN et M. NASTEV. "Comparative study of methods for WHPA delineation", *Ground Water*, vol. 45, n° 2, 2007, pages 158-167.
- RASMUSSEN, H., A. ROULEAU et S. CHEVALIER. (éditeurs scientifiques). *Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine*, Document diffusé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2006, 311 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protoc/outils.pdf>.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Réseau d'information sur les eaux souterraines – Groundwater Network*, 2016. [En ligne]. http://gin.gw-info.net/service/api_ngwds:gin2/fr/gin.html (page consultée le 21/06/2016).
- SAAR, M. "Review: geothermal heat as a tracer of large-scale groundwater flow and as a means to determine permeability fields", *Hydrogeology Journal*, vol. 19, 2011, pages 31–52. [En ligne]. https://www.esci.umn.edu/orgs/geofluids/pubs/2011_Saar_HJ.pdf.
- SAVARD, M.M., R. LEFEBVRE, R. MARTEL, M. OUELLET et C. LAMONTAGNE. (éditeurs scientifiques). *Guide méthodologique pour la caractérisation des aquifères en roches sédimentaires fracturées*, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2008, 162 pages. [En ligne]. http://www.environnement.gouv.qc.ca/EAU/souterraines/aquiferes/guide_fractures.pdf.
- SAVARD, M.M., M. NASTEV, D. PARADIS, R. LEFEBVRE, R. MARTEL, V. CLOUTIER, V. MURAT, É. BOURQUE, M. ROSS, K. LAUZIÈRE, M. PARENT, A. HAMEL, J. M. LEMIEUX, R. THERRIEN, A. BOLDUC, M. ROCHER, O. SLAD HERSI, D. KIRKWOOD, S. CASTONGUAY et P. GÉLINAS. *Inventaire canadien des ressources en eau souterraine : Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec*, Commission géologique du

- Canada, Bulletin no. 587, 2013, 117 pages. [En ligne].
http://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_rncan/publications/ess_sst/291/291348/bu_587_f_gsc.pdf.
- SCANLON, B.R., R.W. HEALY et P.G. COOK. "Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge", *Hydrogeology Journal*, vol. 10, n° 1, 2002, pages 18-39. [En ligne].
http://www.beg.utexas.edu/cswr/pdfs/webbio_pdfs/HJ2002Scanlon&Cook.pdf.
- SCIENCE ADVISORY BOARD FOR CONTAMINATED SITES IN BRITISH COLUMBIA. *Report on: Fractured Bedrock Field Methods and Analytical Tools, Volume 1: Main Report*, Submitted to the Ministry of Environment of British Columbia, Prepared under contract by Golder Associates Ltd., Burnaby, British Columbia, 2010, 87 pages. [En ligne].
<http://www.sabcs.chem.uvic.ca/May%202024%20Final%20FBRock%20ReportFBFMAT-Vol1.pdf>.
- SCHROEDER, P.R., N.M. AZIZ, C.M. LLOYD et P.A. ZAPPI. *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3*, Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC., 1994, 84 pages. [En ligne].
<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/300038Q0.PDF?Dockey=300038Q0.pdf>.
- TALBOT POULIN, M.-C., G. COMEAU, Y. TREMBLAY, R. THERRIEN, M.-M. NADEAU, J.-M. LEMIEUX, J. MOLSON, R. FORTIER, P. THERRIEN, L. LAMARCHE, F. DONATI-DAOUST et S. BÉRUBÉ. *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec*. Rapport final, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2013, 172 pages, 19 annexes, 28 cartes. [En ligne].
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/CMQ/CMQ-scientif-ULAVAL-201303.pdf>.
- THORNTHWAITTE, C. W. "An approach toward a rational classification of climate", *Geographical Review*, vol. 38, n° 1, 1948, pages 55-94. [En ligne].
<http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-GeogrRev.pdf>.
- TODD, D.K. *Groundwater Hydrology*, John Wiley and Sons, New York, 1980, 535 pages.
- TREMBLAY, Y., J.M. LEMIEUX, R. FORTIER, J. MOLSON, R. THERRIEN, P. THERRIEN, G. COMEAU et M.C. TALBOT POULIN. "Semi-automated filtering of data outliers to improve spatial analysis of piezometric data", *Hydrogeology Journal*, vol. 23, n° 5, 2015, pages 851-868.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas*, Office of Ground-Water Protection, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1987, 212 pages. [En ligne].
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/00001OZC.PDF?Dockey=00001OZC.PDF>.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Delineation of Wellhead Protection Areas in Fractured Rocks*, Wisconsin Geological and Natural History Survey, Office of Ground Water and Drinking Water, Ground Water Protection Division, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1991, 144 pages. [En ligne].
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/10003HCI.PDF?Dockey=10003HCI.PDF>.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Handbook: Ground Water and Wellhead Protection*, Office of Research and Development et Office of Ground Water and Drinking Water, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, O.H. et Washington, D.C., 1994, 270 pages. [En ligne]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30004NCA.PDF?Dockey=30004NCA.PDF>.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Wellhead Protection Area (WHPA) Model*, 2017a. [En ligne]. <https://www.epa.gov/water-research/wellhead-protection-area-whpa-model> (page consultée le 24/02/2017).
-

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Exposure Assessment Models*, 2017b. [En ligne]. <https://www.epa.gov/exposure-assessment-models/groundwater> (page consultée le 24/02/2017).

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Online Guide to MODFLOW*, 2016. [En ligne]. <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/MFDOC/index.html> (page consultée le 20/04/2016).

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Water Resources Groundwater Software*, 2017. [En ligne]. <https://water.usgs.gov/software/lists/groundwater/> (page consultée le 24/02/2017).

VERNOUX, J.F., A. WUILLEUMIER et N. DÖRFLIGER. *Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses, Guide méthodologique*, Rapport BRGM/RP-55874-FR, 2007, 75 pages, 14 illustrations. [En ligne]. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55874-FR.pdf>.

ANNEXE I : LISTES DES TABLEAUX ET DES FIGURES TYPES

Les tableaux et figures types figurant dans les listes ci-dessous devraient être inclus dans les rapports d'étude. Certains de ces éléments font déjà partie de l'étude de caractérisation hydrogéologique d'une demande d'autorisation pour un nouveau prélèvement. Il n'apparaît alors pas utile de présenter à nouveau ces éléments. Certaines figures pourraient ne pas être pertinentes dans tous les cas, mais les raisons de leur absence devraient être indiquées dans le rapport d'étude. Aussi, certaines cartes pourraient combiner plusieurs thèmes cartographiques (ex. : plan de localisation des puits répertoriés combiné au plan de localisation des activités encadrées par réglementation visant la protection du prélèvement, et des activités potentiellement polluantes sommairement inventoriées).

Liste des tableaux types

1. Tableau des données existantes recueillies et acquises lors des travaux
2. Tableau des valeurs des paramètres d'entrée utilisés et calibrés dans le calcul des aires de protection
3. Tableau de résultats de l'indice DRASTIC et valeurs des paramètres d'entrée utilisées dans le calcul
4. Tableau des niveaux de vulnérabilité des aires de protection, comme recommandé à l'Annexe IV du [Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec](#) (MELCC, 2018)

Liste des figures types

1. Plan de localisation du secteur d'étude à l'échelle régionale
2. Plan de localisation du site de prélèvement à l'échelle du territoire à l'étude
3. Plan de localisation du site de prélèvement à l'aide de l'imagerie aérienne sur la zone à proximité de l'installation
4. Un schéma (vue en coupe) de l'installation de prélèvement
5. Rapport de forage de l'installation de prélèvement
6. Photographies de l'installation de prélèvement et de son environnement immédiat
7. Plan de localisation des puits répertoriés sur le territoire à l'étude
8. Plan de localisation des activités encadrées par réglementation visant la protection du prélèvement, et des activités potentiellement polluantes sommairement inventoriées à l'échelle du territoire à l'étude
9. Carte topographique à l'échelle du territoire à l'étude
10. Carte des dépôts meubles en surface à l'échelle du territoire à l'étude
11. Carte de la géologie du socle rocheux à l'échelle du territoire à l'étude
12. Coupe(s) verticale(s) du modèle conceptuel

-
13. Représentation en plan du modèle conceptuel
 14. Plan de localisation des travaux de terrain à l'échelle du territoire à l'étude
 15. Photographies des travaux de terrain
 16. Rapports de forage des puits d'observation installés
 17. Graphiques incluant les données nécessaires à l'interprétation des essais hydrauliques
 18. Rapports d'analyse de la qualité de l'eau
 19. Illustrations schématiques des levés géophysiques et structuraux
 20. Carte d'épaisseur des dépôts meubles à l'échelle du territoire à l'étude
 21. Carte de la surface piézométrique à l'échelle du territoire à l'étude, incluant la direction d'écoulement et les points de mesure
 22. Carte de la recharge des aquifères à l'échelle du territoire à l'étude
 23. Résultats de la modélisation numérique :
 - a) Frontières et conditions limites du modèle et maillage utilisé
 - b) Carte des charges hydrauliques simulées
 - c) Carte des vecteurs de vitesses de l'eau souterraine simulées
 - d) Graphique de la calibration et des erreurs
 24. Plan de localisation des aires de protection immédiate et intermédiaires
 25. Plan de localisation de l'aire de protection éloignée
 26. Cartes des cotes des paramètres DRASTIC distribuées spatialement
 27. Carte des indices DRASTIC à l'échelle du plan de localisation des aires de protection immédiate et intermédiaires
 28. Carte des indices DRASTIC à l'échelle du plan de localisation des aires de protection éloignée
 29. Carte des niveaux de vulnérabilité de l'eau souterraine prescrits par le RPEP

ANNEXE II : LISTE DE VÉRIFICATION DES TRAVAUX RÉALISÉS

La liste de vérification des travaux réalisés ci-dessous devrait être considérée comme un document de référence par les professionnels qui réalisent les études pour s'assurer qu'ils ont respecté la démarche recommandée dans le guide. Elle pourrait aussi être utilisée lors de l'évaluation des demandes d'autorisation qui sont faites au Ministère pour de nouveaux prélèvements en eau. Cet outil est toutefois complémentaire à la lecture des rapports. Une réflexion basée uniquement sur cette liste ne constituerait pas une analyse complète.

La liste des travaux réalisés est structurée selon les huit étapes de la marche à suivre. Elle concerne autant la réalisation des travaux que la présentation des données utilisées et des résultats.

Description des travaux	Travaux réalisés dans le respect des recommandations du guide		
	Oui	Non	Numéro de page du rapport
Étape 1 : Recherche des informations existantes			
Implication du responsable du prélèvement dans le processus de recherche d'information			
Description complète du site de prélèvement rapportée dans le rapport d'étude			
Études du PACES consultées			
Autres sources d'information consultées selon la Liste des données disponibles utiles en hydrogéologie			
Visite sur le terrain et rencontre avec les intervenants locaux dès le début du mandat			
Géoréférencement des données et intégration des données dans un SIG			
Carte du territoire à l'échelle de la zone d'étude			
Plan de localisation du site de prélèvement			
Coupe verticale de l'installation de prélèvement d'eau			
Étape 2 : Enjeux de protection du prélèvement			
Évaluation de l'importance du prélèvement pour la communauté			
Quantité d'eau prélevée			
Nombre de personnes approvisionnées			
Autres utilisateurs de l'eau (institutionnel, commercial, industriel ou agricole)			
Présence d'une source d'approvisionnement alternative ou d'urgence			
Présence d'autres puits dans le secteur d'étude			
Évaluation de la présence d'activités encadrées par réglementation dans le secteur et visant la protection du prélèvement			

Description des travaux	Travaux réalisés dans le respect des recommandations du guide		
	Oui	Non	Numéro de page du rapport
Évaluation de l'ampleur des problématiques de contamination potentielle			
Inventaire sommaire des activités potentiellement polluantes			
Inventaire des problèmes affectant ou ayant affecté la quantité d'eau exploitée et sa qualité			
Consultation des rapports d'analyse de qualité de l'eau brute du puits d'exploitation et des autres puits dans le même aquifère			
Entrevues auprès des responsables du prélèvement, des opérateurs de l'installation et des résidents de longue date			
Plan de localisation incluant la localisation de l'ensemble des puits répertoriés, les activités encadrées par réglementation et visant la protection du prélèvement, et les activités potentiellement polluantes sommairement inventoriées			
Étape 3 : Système hydrogéologique et modèle conceptuel			
Élaboration du modèle conceptuel intégrant les éléments énumérés dans le guide			
Définition de la nature du milieu géologique			
Évaluation de la complexité de l'installation de prélèvement (type d'installation, sous influence d'autres puits ou de l'eau de surface, ouverture sur l'aquifère saturé)			
Évaluation de la géométrie de l'aquifère (uniformité de l'épaisseur, limites infinies ou non)			
Évaluation de la direction d'écoulement (incertitude, uniformité (changement de direction))			
Évaluation des conditions de confinement (niveau, continuité)			
Validité de l'hypothèse du milieu poreux équivalent			
Évaluation de l'homogénéité de l'aquifère (variation de l'épaisseur, aquifère multicouche, changement latéral de la conductivité hydraulique)			
Évaluation du degré d'anisotropie des propriétés hydrauliques de l'aquifère			
Coupe(s) verticale(s) du modèle conceptuel définitif et représentation en plan			
Autres thèmes cartographiques (topographie de surface, géologie du socle rocheux, dépôts meubles de surface)			
Étape 4 : Choix des méthodes de détermination des aires de protection			
Identification du niveau des enjeux de protection (faible ou élevé)			
Identification du niveau de complexité du système hydrogéologique (simple ou complexe)			

Description des travaux	Travaux réalisés dans le respect des recommandations du guide		
	Oui	Non	Numéro de page du rapport
Identification du niveau du gradient hydraulique (faible ou significatif)			
Identification du choix final de la méthode de détermination			
Justification de l'utilisation d'une autre méthode que celles décrites dans le guide			
Étape 5 : Acquisition et traitement des données			
Visite du site de prélèvement d'eau et du territoire à l'étude			
Inspection de l'installation et de son environnement immédiat			
Rencontre avec l'opérateur du système d'approvisionnement			
Prises de photos de l'installation et de son environnement immédiat, des activités potentiellement polluantes inventoriées et des différentes caractéristiques du milieu			
Détermination du débit journalier moyen d'exploitation, en tenant compte des besoins en eau sur une période de 30 ans			
Utilisation de données recueillies dans trois puits d'observation dont l'aménagement et la stratigraphie sont bien connus			
Détermination de la direction d'écoulement ou de la surface piézométrique			
Mise en perspective des analyses géochimiques disponibles en fonction du contexte hydrogéologique			
Évaluation de la recharge			
Tableau des données existantes recueillies et acquises lors des travaux (incluant source, variabilité, incertitude)			
Plan de localisation des travaux réalisés			
Rapports de forage réalisés dans le cadre de l'étude, graphiques d'interprétation des essais hydrauliques, rapports d'analyse de la qualité de l'eau et illustrations schématiques des levés géophysiques et structuraux			
Cartographie des données interprétées (épaisseur des dépôts meubles, niveaux de confinement et leur continuité, profondeur des niveaux d'eau, surface piézométrique, recharge distribuée et zones préférentielles de recharge et de résurgence)			
Étape 6 : Détermination des aires de protection			
Respect des conditions d'utilisation et des hypothèses simplificatrices de la méthode choisie			
Tableau des valeurs des paramètres d'entrée utilisés dans le calcul des aires de protection			
Calculs faisant partie intégrante du rapport d'étude			

Description des travaux	Travaux réalisés dans le respect des recommandations du guide		
	Oui	Non	Numéro de page du rapport
Feuilles de calcul des aires remises au responsable du prélèvement			
Description sommaire de la méthode utilisée, accompagnée de ses conditions d'utilisation et de ses hypothèses simplificatrices			
Résultats de la modélisation numérique			
Modèle numérique élaboré remis au responsable du prélèvement dans un format accessible, avec les métadonnées documentées			
Plan de localisation des aires de protection immédiate et intermédiaires			
Plan de localisation de l'aire de protection éloignée			
Agrandissements présentés pour des zones d'intérêt (ex. : concentration d'activités réglementées potentiellement polluantes)			
Usage d'un SIG			
Fichiers cartographiques en format commun (ex. : « shapefile ») remis au responsable du prélèvement, avec les métadonnées documentées			
Étape 7 : Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine par la méthode DRASTIC			
Niveau de vulnérabilité déterminé pour chacune des quatre aires de protection (immédiate, intermédiaire bactériologique, intermédiaire virologique et éloignée), exclusives l'une de l'autre			
Exploitation de toutes les données pertinentes recueillies pour la détermination des aires de protection			
Évaluation en cohérence avec le modèle hydrogéologique conceptuel			
Évaluation réalisée à une résolution témoignant de la complexité du milieu hydrogéologique et du niveau de détails des données disponibles			
Description sommaire de la méthode DRASTIC, accompagnée de ses conditions d'utilisation et de ses hypothèses simplificatrices			
Tableau de résultat de l'indice DRASTIC et valeurs des paramètres d'entrée utilisées dans le calcul			
Usage d'un SIG			
Cartes intermédiaires des cotes de chacun des sept paramètres DRASTIC			
Carte des indices DRASTIC distribués à l'échelle de la zone d'étude			
Feuilles de calcul et fichiers cartographiques en format commun (ex. : « shapefile ») remis au responsable du prélèvement, avec les métadonnées documentées			
Étape 8 : Discussion sur la qualité et la pérennité des résultats			
Considérations sur la qualité des données d'entrée			

Description des travaux	Travaux réalisés dans le respect des recommandations du guide		
	Oui	Non	Numéro de page du rapport
Évaluation de la variabilité et de l'incertitude des données d'entrée			
Justification du choix des sources d'information			
Étude de sensibilité des paramètres d'entrée			
Identification des paramètres ayant une grande influence sur la délimitation des aires			
Utilisation de valeurs sécuritaires pour les paramètres d'entrée les plus sensibles			
Mise en perspective des résultats obtenus			
Bilan de masse entre les quantités d'eau prélevées et rechargées dans l'aire d'alimentation			
Comparaison des résultats obtenus avec différentes méthodes de détermination des aires			
Comparaison des résultats obtenus avec les aires déterminées dans d'anciennes études			
Comparaison des résultats avec d'autres cas concrets tirés de la littérature ou basés sur l'expérience du professionnel			
Analyse des conséquences potentielles de l'incertitude			
Comparaison des pires scénarios de l'étude de sensibilité			
Recommandations au responsable du prélèvement			
Discussion sur la pérennité des résultats face aux changements climatiques			
Discussion sur la pérennité des résultats face aux changements démographiques et d'occupation du territoire			

ANNEXE III : CRITÈRES DE VALIDITÉ DES HYPOTHÈSES DE MILIEU POREUX ÉQUIVALENT HOMOGÈNE ET D'ISOTROPIE

Le tableau ci-dessous dresse la liste des principaux critères de validité des hypothèses de milieu poreux équivalent homogène et d'isotropie (modifiés de l'USEPA (1991), Rasmussen *et al.* (2006), Vernoux *et al.* (2007), Savard *et al.* (2008) et Science Advisory Board for Contaminated Sites in British Columbia (2010)).

Caractéristique	Critères de validité de l'hypothèse	Hypothèse	
		Milieu poreux équivalent homogène	Isotropie
Fracturation	Fractures nombreuses, interconnectées, ouverture qui varie peu.	X	
	Pas de fractures préférentielles, d'un pendage et d'une orientation spécifiques, qui déterminent le sens d'écoulement au profit du gradient hydraulique.		X
	Les dimensions des aires de protection devraient être au moins 100 fois celles de l'espacement entre les fractures.	X	
Réponse aux essais de pompage	Le rabattement dans les puits d'observation devrait être proportionnel au débit de pompage.	X	
	Les courbes du rabattement en fonction du temps ne devraient pas montrer de discontinuité.	X	
	Les courbes de rabattement dans les puits d'observation situés dans deux ou plusieurs directions devraient avoir une forme générale similaire.		X
	Le cône de dépression autour du puits de pompage devrait être circulaire ou elliptique.	X	
Piézométrie	L'amplitude des variations saisonnières de niveau d'eau dans l'aquifère en conditions naturelles devrait être de moins de 10 m et l'effet des événements pluvieux ne devrait pas se manifester immédiatement.	X	
	La surface piézométrique du territoire d'étude devrait être lisse et continue, sans changement abrupt des niveaux d'eau.	X	
Conductivité hydraulique	La variabilité de la conductivité hydraulique entre les puits d'observation ne devrait pas être trop grande.	X	
	Pas de contraste marqué de conductivité hydraulique entre les mesures en laboratoire et in situ; une variation de conductivité hydraulique en fonction de l'échelle d'observation peut démontrer l'influence des fractures ou d'autres hétérogénéités.	X	
Vitesse d'écoulement	La vitesse d'écoulement, qui peut être déduite par le transport de contaminants ou les essais de traceur, ne devrait pas être trop rapide.	X	
Composition chimique de l'eau souterraine	La composition chimique de l'eau souterraine devrait être relativement semblable d'un secteur de l'aquifère de roc fracturé à l'autre, tant en fonction du temps que de l'éloignement du puits de captage.	X	

ANNEXE IV : DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT

Les tableaux suivants, tirés du [Guide de gestion des eaux pluviales](#) (Gouvernement du Québec, 2014), informent sur les gammes de valeurs de coefficients de ruissellement selon les types de surfaces, d'occupation du sol, de végétation et de sols.

Gamme usuelle de valeurs pour le coefficient de ruissellement en milieu urbain en fonction du type de surface (adapté d'ASCE/WEF, 1992).

Type de surface	Coefficient de ruissellement ⁽¹⁾
Pavage	De 0,70 à 0,95
Toits	De 0,70 à 0,95
Pelouses, sols sablonneux	
Faible pente (< 2 %)	De 0,05 à 0,10
Pente moyenne (de 2 à 7 %)	De 0,10 à 0,15
Pente forte (> 7 %)	De 0,15 à 0,20
Pelouses, sols argileux	
Faible pente (< 2 %)	De 0,13 à 0,17
Pente moyenne (de 2 à 7 %)	De 0,18 à 0,22
Pente forte (> 7 %)	De 0,25 à 0,35

⁽¹⁾ Valeurs typiques pour des périodes de retour de 2-10 ans. Des valeurs plus élevées sont appropriées pour des événements plus rares.

Gamme usuelle de valeurs pour le coefficient de ruissellement en milieu urbain en fonction du type d'occupation du sol (adapté d'ASCE/WEF, 1992).

Type d'occupation du sol	Coefficient de ruissellement ⁽¹⁾
Commercial	
Centre-ville	De 0,70 à 0,95
Banlieue	De 0,50 à 0,70
Résidentiel	
Maisons de banlieue	De 0,25 à 0,40
Maisons détachées	De 0,30 à 0,50
Unités jumelées	De 0,40 à 0,60
Maisons de ville	De 0,60 à 0,75
Immeubles d'habitation	De 0,50 à 0,70
Industriel	
Léger	De 0,50 à 0,80
Lourd	De 0,60 à 0,90
Parcs, cimetières	De 0,10 à 0,25
Terrains de jeux	De 0,20 à 0,35
Champs	De 0,10 à 0,30

⁽¹⁾ Valeurs typiques pour des périodes de retour de 2-10 ans. Des valeurs plus élevées sont appropriées pour des événements plus rares.

Coefficients de ruissellement typiques pour des secteurs ruraux en fonction du type de sol (adapté d'ARTC, 1982).

Description des sols	Utilisation du sol		
	Champs	Culture	Boisé
Sols argileux, bon drainage de surface	0,55	0,45	0,40
Loams à texture moyennement fine, bien drainés	0,40	0,35	0,30
Loams sablonneux	0,30	0,25	0,20
Sols sablonneux bien drainés et gravier	0,25	0,15	0,05

Coefficients de ruissellement en zone rurale en fonction du type de végétation (adapté de MTQ, 1995).

Végétation	Pente	Classification hydrologique					
		A	AB	B	BC	C	CD
Culture							
Plat	< 3 %	0,22	0,30	0,36	0,41	0,47	0,51
Vallonné	De 3 à 8 %	0,25	0,34	0,43	0,51	0,59	0,67
Montagneux	> 8 %	0,32	0,43	0,51	0,61	0,67	0,73
Pâturage							
Plat	< 3 %	0,08	0,12	0,17	0,25	0,34	0,43
Vallonné	De 3 à 8 %	0,10	0,17	0,25	0,33	0,43	0,51
Montagneux	> 8 %	0,20	0,29	0,39	0,47	0,56	0,64
Boisé							
Plat	< 3 %	0,04	0,09	0,15	0,21	0,29	0,37
Vallonné	De 3 à 8 %	0,07	0,12	0,19	0,26	0,34	0,43
Montagneux	> 8 %	0,11	0,18	0,26	0,34	0,43	0,51

OUTILS DISPONIBLES

Les « [outils disponibles](#) » sont des documents d'intérêt en lien avec le présent guide technique qui sont publiés séparément. Des hyperliens renvoient à ces documents lorsqu'on en fait référence dans ce guide. Ils pourront aussi être cités par d'autres guides ou ouvrages du Ministère, car certains de ces outils utiles pour déterminer les aires de protection sont également d'intérêt pour d'autres types de travaux en hydrogéologie.



**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**

Québec 