

Approche 1 : Rayon fixe arbitraire

RÉSUMÉ

Aires de protection de forme circulaire centrées sur le site de prélèvement, d'un rayon fixe arbitraire

AIRES DE PROTECTION CONCERNÉES

Immédiate (catégories 1, 2 et 3), intermédiaires (catégories 2 et 3) et éloignée (catégorie 2)

DONNÉES NÉCESSAIRES

Aucune

DESCRIPTION

Le [Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection](#) (RPEP) prescrit dans la plupart des cas des rayons fixes arbitraires autour des sites de prélèvement d'eau souterraine pour la délimitation des aires de protection, en considérant la catégorie du prélèvement (voir le tableau ci-dessous). Les catégories de prélèvement d'eau sont définies à l'article 51 du RPEP et les aires de protection immédiate, intermédiaires et éloignée sont définies respectivement aux articles 54, 57 et 65 du RPEP. Des méthodes de délimitation plus complexes nécessitant des calculs ne sont requises que pour les aires de protection intermédiaires et éloignée des prélèvements de catégorie 1 ou lorsqu'un professionnel délimite les aires des prélèvements des autres catégories autrement que par un rayon fixe arbitraire.

Le tableau suivant présente les rayons fixes arbitraires prescrits par le RPEP pour chacune des aires de protection et selon la catégorie du prélèvement.

Catégorie du prélèvement	Aire de protection			
	Immédiate	Intermédiaire		Éloignée
		Bactériologique	Virologique	
1	30 m	<i>Autre méthode requise</i>	<i>Autre méthode requise</i>	<i>Autre méthode requise</i>
2	30 m	100 m	200 m	2 km en amont hydraulique
3	3 m	30 m	100 m	<i>non requis</i>

Pour ce qui est de l'aire de protection immédiate des prélèvements de catégories 1 et 2, elle peut être déterminée plus petite par un professionnel s'il atteste, dans une étude hydrogéologique, l'une ou l'autre des situations suivantes :

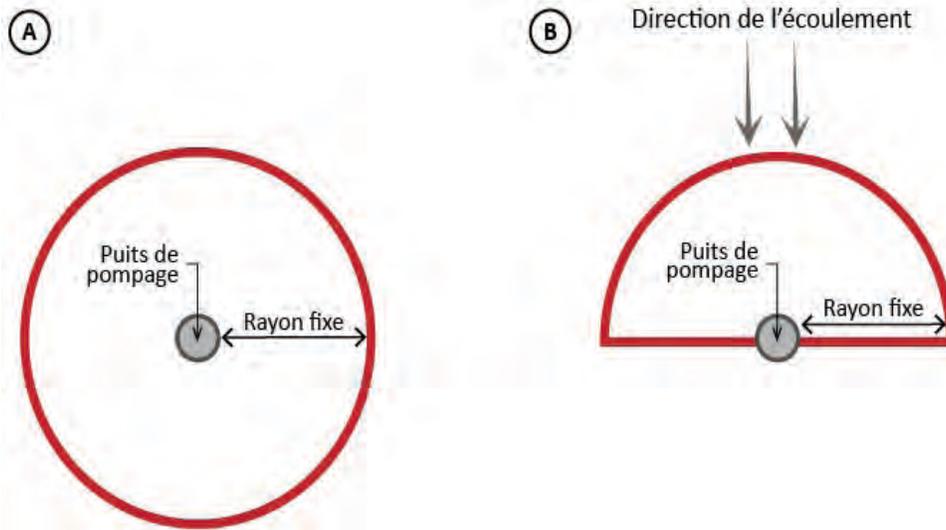
- La présence d'une formation géologique superficielle peu perméable assure une protection naturelle des eaux souterraines;
- Une configuration de terrain ou une infrastructure à proximité assure la protection de la qualité des eaux souterraines au regard d'incidents ou d'activités pouvant se produire au sein de l'aire visée;
- L'exercice des activités humaines dans un rayon de 30 m du site de prélèvement ne peut affecter de manière significative la qualité des eaux souterraines.

Pour ce qui est des aires de protection intermédiaires des prélèvements de catégories 2 et 3 et de l'aire de protection éloignée des prélèvements de catégorie 2, elles peuvent aussi être déterminées autrement par un professionnel s'il utilise les critères requis pour les prélèvements de catégorie 1, soit ceux basés sur les temps de migration pour les aires de protection intermédiaires et l'aire d'alimentation complète pour l'aire de protection éloignée.

La méthode du rayon fixe arbitraire consiste simplement à tracer un cercle centré sur le site de prélèvement, de rayon déterminé (voir la figure A ci-après). Cependant, pour l'aire éloignée des prélèvements de catégorie 2, seule la portion en amont hydraulique du site de prélèvement doit être tracée, soit un demi-cercle dont le site de prélèvement est situé au foyer de l'arc de cercle (voir la figure B ci-après). Pour ce faire, la connaissance de la direction d'écoulement de l'eau souterraine est requise. Celle-ci peut être déterminée à partir d'une carte piézométrique ou d'au minimum trois mesures de niveau d'eau disposées en triangle dans le voisinage en amont du site de prélèvement. Dans le cas où une incertitude importante demeure sur la direction d'écoulement, la topographie de la surface du sol peut être utilisée. Dans le cas où la topographie est plane, un cercle complet devrait être tracé autour du site de prélèvement.

FIGURE

La figure ci-dessous présente la délimitation des aires de protection par rayon fixe arbitraire pour A) les aires de protection intermédiaires des prélèvements de catégories 2 et 3 et les aires de protection immédiates de toutes les catégories et B) l'aire de protection éloignée des prélèvements de catégorie 2.



ÉQUATIONS

Aucune

CONDITIONS D'UTILISATION ET HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES

Pour délimiter les aires de protection intermédiaires et éloignée des prélèvements de catégorie 1, la réglementation exige que les données recueillies dans un minimum de trois puits aménagés au sein de l'aquifère exploité soient utilisées. La méthode du rayon fixe arbitraire ne répond pas à cette exigence et ne peut pas être employée dans ces cas.

AVANTAGES

La méthode du rayon fixe arbitraire est très facile d'application, rapide, très peu coûteuse et requiert peu ou pas d'expertise technique et de données précises quant aux propriétés hydrauliques du milieu.

L'approche peut être conservatrice du point de vue de la protection lorsque de grands rayons sont utilisés. De plus, dans le cas où une grande incertitude existe sur la direction d'écoulement, la symétrie radiale de l'aire déterminée peut être plus sécuritaire qu'une aire orientée selon la direction d'écoulement présumée.

Bien que la longueur du rayon soit arbitraire et ne soit issue d'aucun principe scientifique, sa détermination peut être basée sur des considérations hydrogéologiques générales et un jugement professionnel (USEPA, 1987).

DÉSAVANTAGES

Il s'agit d'une méthode arbitraire issue d'aucun principe scientifique.

Elle simplifie à l'extrême le système hydrogéologique et est indépendante des conditions d'écoulement.

Le niveau d'incertitude du résultat de la méthode est le plus élevé de toutes les méthodes de détermination des aires de protection, avec des aires qui ont tendance à être sur ou sous-estimées.

RÉFÉRENCES

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection areas*, Office of Ground-Water Protection, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC., 1987, 212 pages. [En ligne]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/00001OZC.PDF?Dockey=00001OZC.PDF>.

Approche 2 : Rayon fixe calculé

RÉSUMÉ

Aires de protection de forme circulaire centrées sur le site de prélèvement, d'un rayon fixe calculé à l'aide d'équations de bilan de masse entre la quantité d'eau exploitée et la quantité d'eau disponible dans l'aquifère ou rechargée par les précipitations

AIRES DE PROTECTION CONCERNÉES

Intermédiaires et éloignée

DONNÉES NÉCESSAIRES

- Débit journalier moyen d'exploitation (Q)
- Longueur de la crépine (H) – pour les aires de protection intermédiaires seulement
- Porosité efficace (n_e) – pour les aires de protection intermédiaires seulement
- Recharge (R) – pour l'aire de protection éloignée seulement

DESCRIPTION

Équation du cylindre

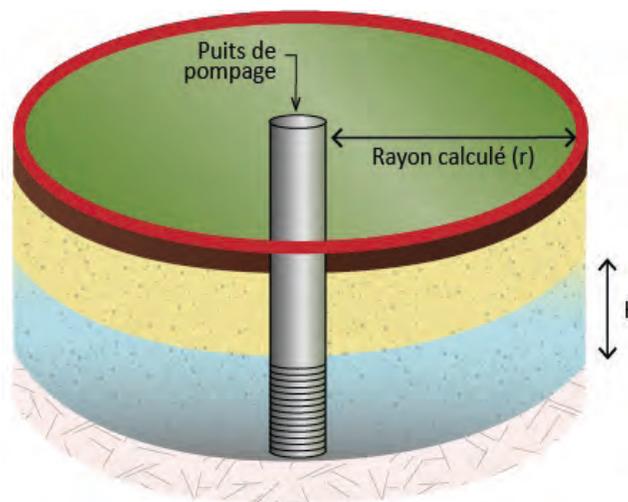
L'équation du cylindre (USEPA, 1994) permet de calculer les aires de protection intermédiaires des prélèvements en eau souterraine à l'aide du bilan de masse entre le volume d'eau extrait par l'installation de prélèvement pour un temps donné et le volume d'eau contenu à l'intérieur d'un cylindre équivalent de l'aquifère entourant le site de prélèvement (voir la figure ci-après). Les aires de protection prennent la forme d'un cercle de rayon calculé dont le site de prélèvement est situé au centre. La superficie des aires de protection peut être calculée.

Équation d'infiltration

L'équation d'infiltration (USEPA, 1994) permet de calculer l'aire de protection éloignée d'un prélèvement en eau souterraine à l'aide du bilan de masse entre le volume d'eau extrait par l'installation de prélèvement et le volume d'eau qui recharge la partie de l'aquifère délimitée par l'aire d'alimentation. L'aire de protection prend la forme d'un cercle de rayon calculé dont le site de prélèvement est situé au centre. La superficie des aires de protection peut être calculée.

FIGURE

La figure ci-dessous présente la délimitation des aires de protection par rayon fixe calculé par l'équation du cylindre.



ÉQUATIONS

Équation du cylindre

$$Volume = Qt = \pi r^2 H n_e$$

Après réarrangement des termes de la relation précédente, on obtient les équations suivantes :

$$r = \sqrt{\frac{Qt}{\pi H n_e}} \quad Sup = \frac{Qt}{H n_e}$$

Équation d'infiltration

$$Q = \pi r^2 R$$

Après réarrangement des termes de la relation précédente, on obtient les équations suivantes :

$$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi R}} \quad Sup = \frac{Q}{R}$$

où :

- Q est le débit journalier moyen d'exploitation (ex. : en m³/jour),
- t est le temps donné (ex. : 200 jours pour l'aire de protection bactériologique ou 550 pour l'aire de protection virologique),
- r est le rayon calculé (ex. : en m),
- H est la longueur de la crépine (ou de l'ouverture du puits dans le roc) (ex. : en m) et
- n_e est la porosité efficace du matériau qui constitue l'aquifère (adimensionnel).
- Sup est la superficie de l'aire de protection (ex. : en m²).

où :

- Q est le débit journalier moyen d'exploitation (ex. : en m³/jour),
- r est le rayon calculé (ex. : en m) et
- R est la recharge de l'aquifère (ex. : en mm/an).
- Sup est la superficie de l'aire de protection (ex. : en m²).

CONDITIONS D'UTILISATION ET HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES

Les méthodes du rayon fixe calculé s'appliquent aux aquifères granulaires ou aux milieux poreux équivalents en régime permanent. L'aquifère exploité doit être homogène, isotrope, de dimension infinie et d'épaisseur uniforme.

L'équation du cylindre est plus appropriée pour les aquifères confinés qui ne reçoivent aucune recharge verticale depuis la couche confinante sus-jacente.

L'équation d'infiltration présume que toutes les précipitations infiltrées sont disponibles et pompées par le puits. Aussi, elle ne peut être utilisée que lorsque la recharge est uniforme à l'échelle de l'aire de protection.

Les méthodes ne sont valides que lorsque la surface piézométrique est quasi horizontale (gradient hydraulique < 0,001), car la forme des aires de protection devient non circulaire si le gradient est plus élevé.

Dans le cas où la direction d'écoulement ne peut pas être clairement définie, les méthodes du rayon fixe calculé devraient être utilisées plutôt que les autres méthodes, car elles seront plus sécuritaires. Un facteur de sécurité, déterminé par jugement professionnel, devrait toutefois être ajouté aux rayons calculés si le gradient hydraulique est soupçonné d'être élevé, car les aires réelles auraient une forme allongée vers l'amont, excentrée du site de prélèvement.

AVANTAGES

Ces méthodes sont faciles d'application, rapides, réalisables à faible coût et nécessitent une faible quantité d'informations.

DÉSAVANTAGES

Ces méthodes simplifient à l'extrême le système hydrogéologique et sont indépendantes des conditions d'écoulement et des propriétés du milieu.

Les incertitudes liées aux résultats sont importantes, car de nombreux facteurs qui influencent l'écoulement et le transport de contaminants ne sont pas pris en compte.

Puisque les aires calculées correspondent à des cercles centrés sur le site de prélèvement, la portion amont des aires est généralement sous-estimée, tandis que la portion aval est surestimée.

RÉFÉRENCES

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, OH et Washington, DC, 1994, 270 pages. [En ligne]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30004NCA.PDF?Dockey=30004NCA.PDF>.

Approche 3 : Équations analytiques

RÉSUMÉ

Aires de protection déterminées à l'aide d'équations analytiques : équation du temps de transport pour les aires de protection intermédiaires et équation d'écoulement uniforme pour l'aire de protection éloignée

AIRES DE PROTECTION CONCERNÉES

Intermédiaires et éloignée

DONNÉES NÉCESSAIRES

- Débit journalier moyen d'exploitation (Q)
- Direction d'écoulement
- Gradient hydraulique horizontal de l'aquifère (i)
- Conductivité hydraulique (K)
- Épaisseur saturée (b)
- Porosité efficace (n_e)

DESCRIPTION

Équation d'écoulement uniforme

L'équation d'écoulement uniforme (Todd, 1980; Grubb, 1993) permet de calculer l'aire d'alimentation (l'aire de protection éloignée) d'un prélèvement dans un champ d'écoulement uniforme pour un temps de transport infini.

L'aire d'alimentation est de forme quasi parabolique, ayant le site de prélèvement comme foyer, s'étendant sur une distance A en aval du puits, d'une largeur B à la hauteur du puits et d'une largeur maximale L atteinte à une même distance L en amont (voir la figure ci-après). Au-delà, l'aire d'alimentation se prolonge à une largeur constante L jusqu'à la ligne de partage des eaux souterraines.

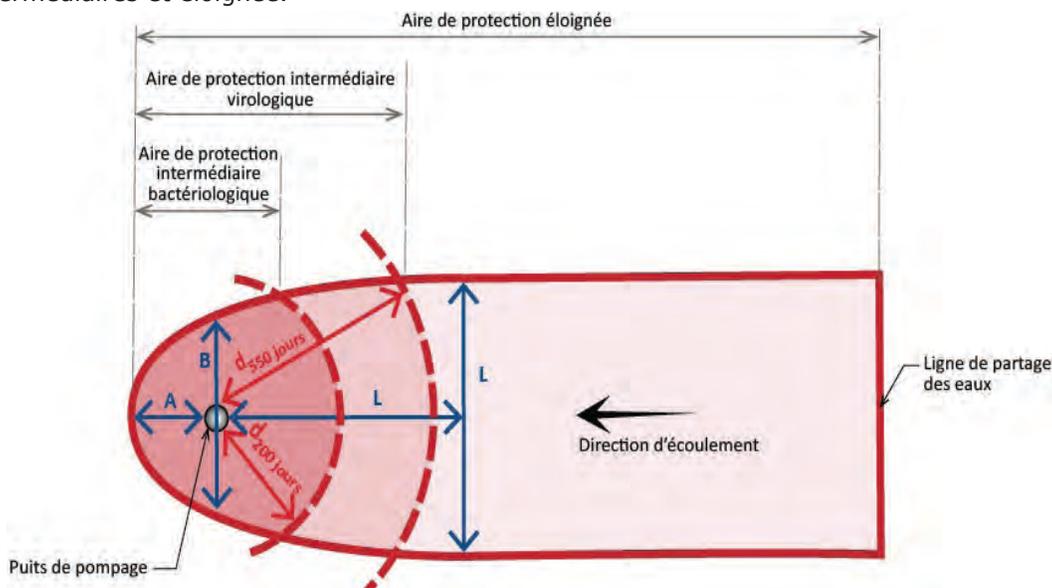
Équation du temps de transport

Les équations du temps de transport (Bear et Jacobs, 1965; Grubb, 1993) permettent de déterminer les aires de protection intermédiaires à partir du temps qu'une particule d'eau qui circule dans l'aquifère prend pour atteindre l'installation de prélèvement. La distance à un temps donné doit être calculée en résolvant l'équation par essais et erreurs.

Pour un temps donné, la distance est déterminée en amont sur un axe parallèle à la direction d'écoulement dans l'aquifère. Cette distance correspond à l'arc de cercle dont le foyer est le site de prélèvement et dont les limites latérales sont l'aire d'alimentation (voir la figure ci-après).

FIGURE

La figure ci-dessous présente la délimitation des aires de protection par méthodes analytiques pour les aires de protection intermédiaires et éloignée.



ÉQUATIONS

Équations d'écoulement uniforme

L'équation générale représentant la limite de l'aire d'alimentation est la suivante :

Pour un aquifère à nappe captive :

$$\frac{-y}{x} = \tan \left[\frac{2\pi K b i}{Q} y \right]$$

Pour un aquifère à nappe libre :

$$\frac{-y}{x} = \tan \left[\frac{\pi K (h_1^2 - h_2^2)}{Q \Delta l} y \right]$$

De cette équation, on peut dériver les relations suivantes :

Pour un aquifère à nappe captive :

$$A = \frac{Q}{2\pi K b i} \quad L = \frac{Q}{K b i} \quad B = \frac{L}{2}$$

Pour un aquifère à nappe libre :

$$A = \frac{Q \Delta l}{\pi K (h_1^2 - h_2^2)} \quad L = \frac{2Q \Delta l}{K (h_1^2 - h_2^2)} \quad B = \frac{L}{2}$$

Équations du temps de transport

Pour un aquifère à nappe captive :

$$t = \frac{n_e d}{K i} - \frac{Q n_e}{2\pi K^2 i^2 b} \ln \left[1 + \frac{2\pi K b i d}{Q} \right]$$

Pour un aquifère à nappe libre :

$$t = \frac{n d \Delta l}{K (h_1 - h_2)} - \frac{Q n_e \Delta l^2}{\pi (h_1 + h_2) [K (h_1 - h_2)]^2} \ln \left[1 + \frac{\pi K d (h_1^2 - h_2^2)}{Q \Delta l} \right]$$

où :

- x et y sont des coordonnées spatiales,
- K est la conductivité hydraulique de l'aquifère (ex. : en m/jour),
- Q est le débit journalier moyen d'exploitation (ex. : en m³/jour),
- b est l'épaisseur saturée de l'aquifère (ex. : en m),
- i est le gradient hydraulique de l'aquifère (adimensionnel),
- h₁ et h₂ sont les charges hydrauliques amont et aval (ex. : en m),
- Δl est la distance entre ces deux points,
- A est la distance par rapport au site de prélèvement à la limite aval de l'aire d'alimentation (ex.: en m),
- L est la largeur maximale de l'aire d'alimentation en amont (ex.: en m),
- B est la largeur de l'aire d'alimentation à la hauteur du site de prélèvement (ex.: en m),
- t est le temps donné (ex. : 200 jours pour l'aire de protection bactériologique ou 550 pour l'aire de protection virologique),
- d est la distance de la particule d'eau par rapport à l'installation de prélèvement (ex.: en m), n est la porosité efficace du matériau qui constitue l'aquifère (adimensionnel),
- n_e est la porosité efficace du matériau qui constitue l'aquifère (adimensionnel).

CONDITIONS D'UTILISATION ET HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES

Les équations analytiques sont largement employées au Québec et dans toutes les circonstances, parfois à tort. Les conditions d'utilisation et les hypothèses de base liées aux modèles sont nombreuses et doivent être respectées. Les équations analytiques ne s'appliquent qu'aux aquifères granulaires en régime permanent. Pour les aquifères de roc fracturé, l'hypothèse du milieu poreux équivalent devrait être préalablement validée.

D'autres conditions importantes s'appliquent : l'approche suppose que l'aquifère exploité est homogène, isotrope, à dimension infinie et d'épaisseur uniforme, le puits est ouvert sur toute l'épaisseur saturée de l'aquifère et la base de l'aquifère est parfaitement imperméable. Enfin, la recharge verticale, les gradients verticaux et la dispersion hydrodynamique sont négligés.

Puisque la forme fixe parabolique est donnée aux aires de protection et que celle-ci doit être orientée parallèlement au sens d'écoulement, la direction d'écoulement doit être uniforme à l'intérieur des aires (pas de changement de direction).

AVANTAGES

Les méthodes analytiques sont faciles d'utilisation, rapides et peu coûteuses, tout en nécessitant une faible quantité d'informations.

Contrairement aux méthodes du rayon fixe calculé, un gradient hydraulique important peut être considéré.

DÉSAVANTAGES

Bien qu'elles tiennent compte de certaines conditions d'écoulement et propriétés du milieu (ex. : direction d'écoulement, gradient hydraulique, conductivité hydraulique, porosité efficace), les méthodes analytiques simplifient beaucoup le système hydrogéologique. De plus, elles sont indépendantes de la recharge.

Il a été démontré qu'elles sont très sensibles aux variations des propriétés hydrogéologiques, telles que la porosité et la conductivité hydraulique (Paradis, 2000), rendant critiques les incertitudes sur les paramètres d'entrée. Une analyse de sensibilité de ces paramètres est donc essentielle. Rappelons que l'incertitude sur la porosité peut être très élevée pour les aquifères de roc fracturé.

RÉFÉRENCES

BEAR, J., et M. JACOBS. *"On the movement of water bodies injected into aquifers"*, Journal of Hydrology, vol. 3, 1965, pages 37-57.

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>.

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/Tq00007.pdf>.

TODD, David Keith. *Groundwater Hydrology*, John Wiley and Sons, New York, 1980, 535 pages.

Approche 4 : Cartographie hydrogéologique

RÉSUMÉ

Utilisation de lignes de partage des eaux souterraines et/ou d'autres paramètres physiques ou hydrogéologiques contrôlant l'écoulement souterrain pour délimiter les aires de protection

AIRE DE PROTECTION CONCERNÉE

Éloignée

DONNÉES NÉCESSAIRES

- De nombreux points de mesure de niveau
- Géométrie de l'aquifère et limites du système d'écoulement

DESCRIPTION

La cartographie hydrogéologique permet de déterminer l'aire d'alimentation en définissant les limites d'écoulement hydraulique d'un aquifère. Le traçage inverse d'une particule d'eau peut être effectué, depuis l'installation de prélèvement jusqu'à la ligne de partage des eaux souterraines. Lorsque les propriétés hydrauliques sont isotropes, les lignes d'écoulement recoupent les isopièzes (courbes de même niveau piézométrique) perpendiculairement (voir la figure ci-après). Les particules aux extrémités latérales de l'aire d'alimentation indiquent les limites de celle-ci.

Minimalement, trois points de mesure disposés en triangle sont requis pour déterminer une direction d'écoulement, mais plus les mesures de niveau sont nombreuses, plus l'estimation de la surface piézométrique est précise. Celle-ci sert à identifier les crêtes et les dépressions piézométriques qui correspondent aux limites hydrauliques de l'aquifère exploité. Ainsi, les cours d'eau, qui correspondent généralement à des zones de résurgence d'eau souterraine au Québec, constituent souvent ce type de limite. Les crêtes topographiques correspondent aussi la plupart du temps à des limites de partage des eaux de surface et souterraines. Les limites de l'aquifère peuvent aussi être de nature géologique et définies par des variations de la lithologie ou par contraste de perméabilité. Par exemple, un aquifère granulaire peut être limité par des affleurements rocheux ayant une conductivité hydraulique beaucoup plus faible (plusieurs ordres de grandeur). Toutefois, il faut aussi tenir compte du gradient hydraulique avant de considérer un changement de lithologie comme étant une barrière hydraulique.

La carte des dépôts de surface peut être utilisée pour délimiter l'aquifère granulaire exploité. Par contre, il faut tenir compte du fait que les dépôts meubles cartographiés sont ceux présents en surface seulement, sans considération quant à leur épaisseur. La limite du dépôt granulaire exploité sur la carte n'indique pas nécessairement qu'il devient absent. Il est probable qu'il s'enfonce sur une distance indéterminée sous un autre dépôt cartographié. De plus, il est possible que d'autres types de dépôts granulaires existent en profondeur. Le professionnel doit s'assurer de bien comprendre le contexte hydrogéologique en présence et interpréter avec soin l'empilement des dépôts meubles et leurs épaisseurs.

L'analyse de la cartographie de la géologie, de la topographie et du réseau hydrographique est donc essentielle pour déterminer les aires de protection en utilisant la méthode de la cartographie hydrogéologique.

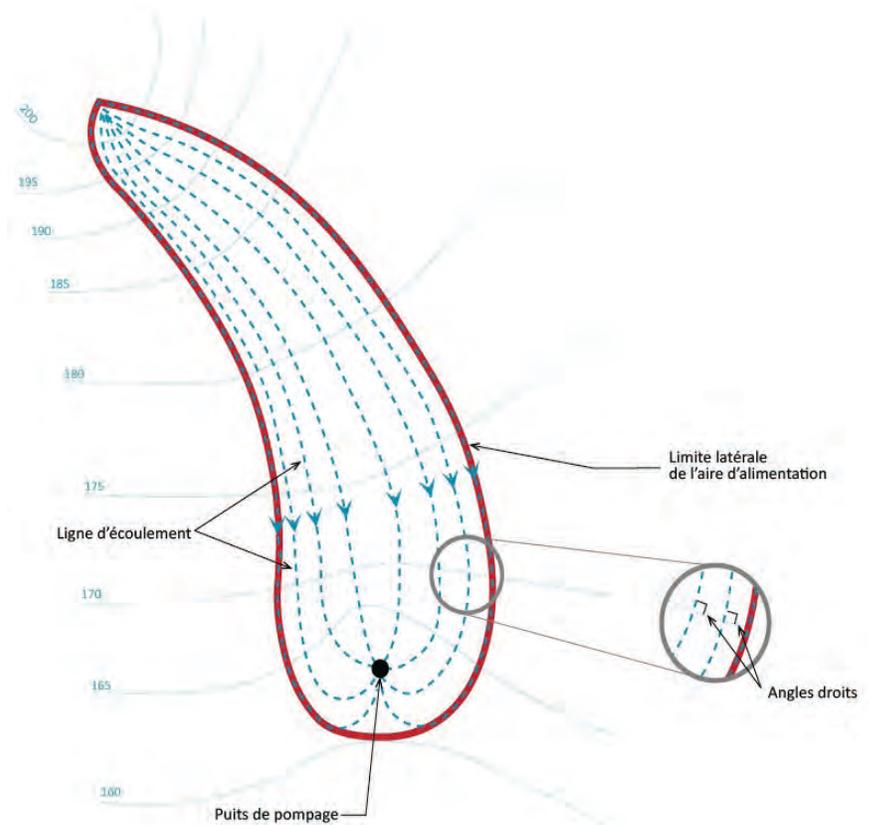
Afin d'obtenir une carte piézométrique, il faut procéder à l'interpolation des niveaux d'eau disponibles pour estimer la surface entre les points de mesure. Plusieurs méthodes d'interpolation, qui varient selon leur complexité et le nombre de données nécessaires, peuvent être employées, telles que la triangulation, les voisins naturels ou le krigeage. Celles-ci sont généralement disponibles dans les systèmes d'information géographiques et sont détaillées dans plusieurs ouvrages de référence (ex. : Isaaks et Srivastava (1989)). Lorsque les données sont peu nombreuses, une méthode interprétative « à la main » faisant appel au jugement professionnel peut être plus pertinente qu'une méthode automatisée. D'autres informations du milieu, telles que la topographie et la présence de cours d'eau, pourront ainsi être intégrées dans la réalisation de la carte piézométrique.

FIGURE

La figure ci-dessous présente la délimitation de l'aire d'alimentation par traçage inverse d'une particule d'eau depuis l'installation de prélèvement jusqu'à la limite amont de l'aire d'alimentation, en recoupant les isopièzes perpendiculairement (en supposant que les propriétés hydrauliques de l'aquifère sont isotropes).

ÉQUATIONS

Aucune



CONDITIONS D'UTILISATION ET HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES

La cartographie hydrogéologique est plus utile pour déterminer les aires de protection de prélèvement exploitant des aquifères granulaires peu profonds à nappe libre. Elle peut par contre aussi être employée pour les aquifères de roc fracturé en combinaison avec l'analyse de la cartographie de la géologie. Aussi, elle est plus efficace pour des secteurs qui présentent un relief, c'est-à-dire où la piézométrie est dépendante de la topographie de surface.

La vitesse d'écoulement de même que la composante verticale de l'écoulement ne sont pas prises en compte par la méthode.

AVANTAGES

La cartographie hydrogéologique s'avère très précise lorsqu'un grand nombre de points de mesure de piézométrie sont disponibles.

Il s'agit parfois de la seule méthode valide pour des aquifères de roc fracturé lorsque les conditions hydrogéologiques sont hétérogènes et anisotropes.

DÉSAVANTAGES

La cartographie hydrogéologique nécessite un nombre important de mesures de niveaux d'eau pour être considérée comme fiable, d'autant plus pour des contextes hydrogéologiques complexes. Elle peut donc être assez dispendieuse.

Il s'agit d'une méthode non quantitative.

L'emplacement des points d'observation a une incidence majeure sur la justesse de l'estimation.

Elle demande une bonne expertise en hydrogéologie, spécifiquement pour l'utilisation des méthodes d'interpolation et l'interprétation de leurs résultats.

Elle ne permet pas de calculer les aires de protection intermédiaires, car la composante du temps n'est pas prise en compte.

RÉFÉRENCES

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

Approche 5 : Modèles numériques

RÉSUMÉ

Résolution de systèmes d'équations numériques d'écoulement et de transport afin de déterminer les aires de protection

AIRES DE PROTECTION CONCERNÉES

Intermédiaires et éloignée

DONNÉES NÉCESSAIRES

Variables selon le modèle.

- 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'emménagement (S et/ou S_s)
- Porosité efficace (n_e)
- Recharge (R)
- Géométrie et structure de l'aquifère et limites du système d'écoulement

DESCRIPTION

Les modèles numériques permettent d'obtenir une solution approximative des équations mathématiques représentant la physique du problème (dans ce contexte, l'écoulement de l'eau souterraine), à partir de paramètres hydrogéologiques. Ils peuvent servir à déterminer à la fois les aires de protection intermédiaires et éloignée. La modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine simule les charges hydrauliques ainsi que les vitesses d'écoulement, typiquement en régime permanent. Les aires de protection sont déterminées à partir des champs de vitesses, en utilisant la méthode de traçage de particules (la méthode courante), ou avec un modèle de transport advectif-dispersif (basé sur la probabilité de captage).

De nombreux modèles numériques sont disponibles et diffèrent par le type de solution utilisé pour l'approximation. Les deux modèles les plus couramment utilisés au Québec et proposés dans ce guide sont MODFLOW-MODPATH et FEFLOW. D'autres modèles sont tout aussi pertinents et pourraient être employés.

Certains modèles ont été spécifiquement élaborés pour les milieux fracturés et leurs méthodes d'analyse ne sont pas toujours applicables à des milieux poreux équivalents, par exemple si le modèle ne tient pas compte des matrices poreuses et perméables. Ces modèles nécessitent la caractérisation du réseau de fracture et parfois aussi des propriétés de la matrice poreuse. Toutefois, l'hypothèse de milieu poreux équivalent peut dans la plupart des cas être posée. Les modèles numériques conçus pour les milieux poreux peuvent donc être généralement utilisés, mais avec prudence (voir les critères de validité des hypothèses à l'Étape 3 de la marche à suivre décrite dans le [Guide de détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et de l'indice DRASTIC](#)).

MODFLOW-MODPATH

MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1988; USGS, 2016) est un modèle numérique basé sur la méthode des différences finies qui permet de simuler l'écoulement dans divers types d'aquifères en 2D ou en 3D, en régime permanent et en régime transitoire. Le module de déplacement particulaire MODPATH (Dickinson et al., 2011) effectue le traçage de particules à partir d'un champ d'écoulement, ce qui permet de montrer les lignes de courant, de calculer les temps de transport advectif et de circonscrire l'aire d'alimentation d'un prélèvement.

FEFLOW

FEFLOW (Diersch, 2014; MIKE Powered by DHI, 2016) est un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis qui permet la résolution de l'écoulement et celle du transfert de masse et de chaleur, en 2D et en 3D, en régime permanent et en régime transitoire. La méthode des éléments finis permet de mieux reproduire la géométrie du domaine, permet un maillage plus optimal, et permet plus de flexibilité pour le champ des conductivités hydrauliques. Les vitesses d'écoulement simulées avec cette approche peuvent aussi être utilisées pour le traçage de particules et donc pour définir les aires de protection basées sur le système d'écoulement.

ÉQUATIONS

Variables selon le modèle, se référer aux manuels des modèles numériques (USGS, 2016; MIKE Powered by DHI, 2016).

CONDITIONS D'UTILISATION ET HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES

Les modèles numériques permettent de modéliser des systèmes aux conditions hydrogéologiques complexes : en 2D ou en 3D, aquifères multicouches, libres ou captifs, aquifères hétérogènes et anisotropes, de géométrie variable, en régime permanent ou transitoire, incluant la recharge (Rasmussen et al., 2006). Chaque modèle possède ses propres conditions d'utilisation et hypothèses simplificatrices.

AVANTAGES

Les modèles numériques permettent d'intégrer toute l'information disponible, en tenant compte de façon plus réaliste du système hydrogéologique étudié, soit de la géométrie de l'aquifère, des paramètres de recharge, de l'hétérogénéité et l'anisotropie des propriétés hydrogéologiques. Ils peuvent représenter la plupart des contextes hydrogéologiques, sont très flexibles pour l'intégration des propriétés hydrogéologiques et offrent le meilleur degré de précision de toutes les méthodes décrites dans ce guide. Il s'agit d'outils quantitatifs et prédictifs, qui peuvent prendre en compte des variations des conditions environnementales dans l'espace et dans le temps. Ils peuvent ainsi servir à prédire la dynamique des aires de protection résultant de changements de cause naturelle ou humaine.

DÉSAVANTAGES

Tout comme pour les autres méthodes de détermination des aires décrites dans ce guide, peu importe la complexité du modèle utilisé, la qualité de l'estimation dépendra de la qualité des données en intrant.

L'utilisation de ces méthodes requiert un niveau d'expertise en modélisation et une bonne connaissance du terrain et des paramètres hydrogéologiques. Les temps de développement des modèles et de calculs peuvent être importants.

RÉFÉRENCES

- DICKINSON, J.E., R.T. HANSON, S.W. MEHL et M.C. HILL. *MODPATH-LGR: dDocumentation 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> (page consultée le 20/04/2016).
- 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.
- 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.
- MIKE POWERED BY DHI. *FEFLOW 7.0 User Guide*, 2016. [En ligne]. <https://www.mikepoweredbydhi.com/download/product-documentation> (page consultée le 23/06/2016).
- 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).

**Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques**

Québec 