
Introduction

L'eau souterraine est une source importante d'eau de distribution en Belgique et dans le monde entier, utilisée principalement pour la consommation humaine, dans les activités industrielles et en agriculture. En vue de protéger ces ressources, des zones de protection, au sein desquelles certaines activités économiques sont réglementées, voire interdites, sont établies autour de tous les captages d'eau. En Belgique et dans bien d'autres pays, la délimitation de ces zones de protection se base essentiellement sur une notion de temps de transfert de soluté jusqu'au captage dans la partie saturée de la nappe. La législation définit une zone de protection comme l'aire géographique à partir de laquelle toute particule d'eau atteint le captage endéans un temps t spécifié. En Région Wallonne, deux zones sont distinguées : une zone de prévention rapprochée pour laquelle $t = 24$ heures et une zone de prévention éloignée pour laquelle $t = 50$ jours. En garantissant un "délai d'intervention" suffisamment long, ces zones visent à fournir une protection du captage principalement à l'encontre de pollutions ponctuelles à caractère accidentel. La délimitation précise de ces zones, tant au niveau de leur forme que de leur extension, est de grande importance non seulement d'un point de vue environnemental mais également d'un point de vue économique. Elle repose sur la qualité des modèles d'écoulement souterrain et dépend donc principalement de notre capacité à décrire les propriétés du système aquifère, essentiellement sur base de la connaissance de la géologie du sous-sol qui est toujours limitée aux données acquises sur le terrain.

Les propriétés hydrogéologiques varient dans l'espace de manière irrégulière et montrent généralement de larges degrés d'hétérogénéité, entraînant une répartition inégale de l'écoulement souterrain et du transport de soluté. En raison du manque de données, ces propriétés sont donc souvent difficiles à estimer. On est dès lors confronté au problème de la modélisation de la variabilité spatiale relativement complexe du milieu souterrain à partir de données ponctuelles, limitées et dispersées dans l'espace. Parmi les nombreuses propriétés de l'aquifère, la conductivité hydraulique est celle qui contrôle majoritairement l'écoulement souterrain (elle influence la vitesse d'écoulement et donc le temps de transfert du soluté) et qui possède le degré de variabilité le plus élevé. Par conséquent, la source principale d'incertitude dans la délimitation des zones de protection est la distribution spatiale de la conductivité hydraulique. Par la théorie des fonctions spatiales aléatoires, les méthodes géostatistiques permettent de générer des champs de conductivité hydraulique, tous statistiquement équiprobables, qui reproduisent la variabilité de la propriété étudiée à partir des données disponibles.

En chaque point du milieu où aucune donnée n'a été prélevée, l'incertitude sur la valeur de la conductivité hydraulique introduit une incertitude sur la prédiction du modèle. Contrairement aux approches déterministes qui mènent à la définition d'une zone de protection unique dont l'incertitude n'est pas quantifiable, les approches stochastiques permettent de prendre en compte, par une analyse de Monte Carlo, l'incertitude sur les valeurs de la conductivité hydraulique afin d'identifier et de quantifier explicitement l'incertitude existant sur la localisation de la zone de protection.

Quelle que soit l'approche utilisée, les champs de conductivité hydraulique obtenus dépendent des données : plus elles sont nombreuses, meilleure est l'approximation de la réalité. De manière générale, les données acquises sur le terrain peuvent être scindées en deux classes : les mesures directes de conductivité hydraulique (données *hard*) et les informations indirectes sur cette propriété (données *soft*) telles que des informations géologiques ou hydrogéologiques, des résultats de prospections géophysiques ou simplement l'avis d'un expert. Une meilleure caractérisation du milieu poreux pourrait être obtenue en intégrant ces données *soft* dans les modèles hydrogéologiques en supplément aux données *hard* avec comme conséquence de diminuer l'incertitude sur les prédictions. Malheureusement, en pratique, ces informations indirectes sont peu utilisées en raison de la difficulté de les intégrer dans les modèles hydrogéologiques.

Ce travail de recherche propose une méthode stochastique de délimitation des zones de protection, applicable à des aquifères réels, qui vise à réduire l'incertitude sur la prédiction du modèle avec comme objectif de mieux décrire les zones de protection. Afin d'améliorer la

caractérisation du champ réel de conductivité hydraulique, cette méthode permet de tenir compte de différents types de données disponibles :

- en conditionnant les champs équiprobables issus du processus de génération, non seulement par des données de conductivité hydraulique, mais également par des données de résistivité électrique ;
- en ajustant par résolution du problème inverse les résultats du modèle d'écoulement sur les observations piézométriques ;
- en utilisant des critères de sélection basés sur "l'expérience du géologue".

Afin d'évaluer la qualité des résultats fournis par cette méthode, elle a été appliquée dans un premier temps, à un cas d'étude synthétique représentant une situation "réelle" connue en tout point du modèle, et dont les conditions sont les plus proches possible de celles rencontrées sur des sites de captage en plaine alluviale. On l'a ensuite appliquée au cas d'étude réel du site de captage de Dinant-Anseremme, localisé dans la plaine alluviale de la Meuse, qui avait déjà fait l'objet d'études déterministes de délimitation des zones de protection.

Le présent travail est organisé comme suit :

Les deux premiers chapitres redéfinissent respectivement les notions de géostatistique et de problème inverse en hydrogéologie dans le contexte utilisé.

Le troisième chapitre présente une synthèse bibliographique des différentes méthodes de délimitation des zones de protection existantes et les directions de recherche suivies dans le domaine. La méthode stochastique développée dans ce travail est ensuite exposée.

Le quatrième chapitre est consacré à la construction d'un cas d'étude synthétique purement fictif mais aussi réaliste que possible à partir des nombreuses données recueillies sur divers sites de captage de la plaine alluviale de la Meuse et en particulier sur le site de captage de Vivegnis, en aval de Liège. Il débouche sur l'établissement des jeux de données conditionnantes utilisés lors de l'application de la méthodologie stochastique.

Dans le chapitre cinq, la méthode proposée est appliquée au cas d'étude synthétique et ce pour différents niveaux de connaissance, c'est-à-dire en combinant divers types de données conditionnantes dans le but d'évaluer l'effet de chacun d'entre eux individuellement.

Enfin, le sixième chapitre applique la méthode au cas d'étude réel de Dinant-Anseremme et compare les résultats stochastiques avec ceux obtenus par une approche déterministe.

Les conclusions et perspectives, axées sur l'intérêt pratique et les limites de la méthode proposée, clôturent cette thèse.