
Conclusions générales

Dans ce travail, une méthode stochastique de délimitation des zones de protection autour des captages d'eau souterraine, notée MSA, a été proposée pour les aquifères poreux hétérogènes. Afin de valoriser au mieux les résultats obtenus, l'accent a été mis sur **la quantification et la réduction de l'incertitude** associée aux prédictions du modèle. L'approche stochastique spatiale qui a été adoptée considère la propriété étudiée (ici, la conductivité hydraulique) comme une fonction spatiale aléatoire et permet, par l'utilisation de méthodes géostatistiques, de caractériser sa variabilité spatiale. Par une analyse de Monte Carlo, cette approche prend explicitement en compte, dans la réponse du système, l'incertitude sur les données d'entrée du modèle. La distribution spatiale de l'ensemble des zones de protection, obtenue en traitant les résultats de manière statistique et qui définit la probabilité qu'une particule d'eau placée en un point atteigne le puits en un temps spécifié, quantifie alors l'incertitude sur la localisation de ces zones. Une meilleure caractérisation du milieu poreux (et par conséquent, une réduction de l'incertitude sur la délimitation des zones de protection) a été obtenue en contraignant les champs de conductivité hydraulique non seulement par des mesures directes de la conductivité hydraulique (données *hard*), mais également par des informations indirectes sur cette propriété (données *soft*) qui sont en pratique généralement peu utilisées en raison de la difficulté de les intégrer dans les modèles hydrogéologiques.

L'apport principal de ce travail est l'intégration de différents types de données auxiliaires dans la MSA :

- en conditionnant les champs de conductivité hydraulique, issus du processus de génération des simulations stochastiques, 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 des modèles d'écoulement sur les données de **hauteur piézométrique** ;
- en éliminant du processus les champs de conductivité hydraulique inacceptables d'un point de vue géologique sur base de "**l'expérience du géologue**".

Deux des aspects majeurs de la MSA ont été mis au point dans le cadre de cette recherche : *La paramétrisation des champs de conductivité hydraulique*. Pour pouvoir calibrer les modèles d'écoulement, le nombre de paramètres ajustables du modèle doit être réduit. La technique de paramétrisation utilisée dans ce travail est la zonation, qui subdivise les champs de conductivité hydraulique en zones de valeur uniforme. Cette subdivision a été réalisée en découpant l'intervalle de variation de la propriété en une série de classes sur base de "seuils" prédéfinis. La définition de chaque classe, et par conséquent la répartition géométrique dans l'espace des zones correspondantes, est contrôlée par le choix de ces seuils. La technique de seuillage adoptée (TS_{min}) définit les seuils qui minimisent la variabilité des données regroupées par classe.

La sélection des champs de conductivité hydraulique. Les données de conductivité hydraulique de même ordre de grandeur sont, par la paramétrisation, regroupées dans une même classe de valeur uniforme. La conductivité hydraulique aux points de mesure n'est donc plus égale à la valeur réellement mesurée mais à une valeur optimisée par résolution du problème inverse. Puisque les valeurs mesurées de conductivité hydraulique découlent de l'interprétation (le plus souvent analytique) d'essais de pompage et de l'estimation de l'épaisseur saturée de l'aquifère, une variation autour de ces valeurs mesurées est, dans certaines limites, tout à fait acceptable. Cependant, après la calibration du modèle d'écoulement, l'ordre relatif des valeurs de conductivité hydraulique des classes définies par seuillage n'est plus respecté pour certaines réalisations. Afin d'éliminer les réalisations considérées comme irréalistes d'un point de vue géologique, un critère de sélection (Cr2) a été adopté, pour lequel des permutations entre classes voisines sont tolérées.

Dans le but d'évaluer de manière qualitative et quantitative les résultats obtenus par l'application de la MSA, un cas d'étude synthétique a été créé. Celui-ci représente une situation de référence aussi proche que possible de la réalité de terrain, dont les propriétés hydrogéologiques, et en particulier la distribution spatiale de la conductivité hydraulique, sont connues en tout point du domaine modélisé. A partir de ce modèle, des isochrones de

référence $\tau_{Réf}$ pour différents temps de transferts ont été délimitées et trois jeux de données conditionnantes ont été créés artificiellement : un jeu de conductivités hydrauliques K , un jeu de hauteurs piézométriques h et un jeu de résistivités électriques ρ . La MSA a été appliquée à ce cas d'étude synthétique pour différents niveaux de connaissance, c'est-à-dire en combinant les trois types de données conditionnantes de diverses manières. Dans chacun des cas, l'effet du temps de transfert a été observé et une quantification des résultats a été réalisée en terme d'extension spatiale de l'incertitude sur la localisation de la zone de protection, de la déviation de l'isocontour $\Gamma^{(0,5)}$ par rapport à l'isochrone de référence $\tau_{Réf}$ et de l'inscription de $\tau_{Réf}$ à l'intérieur les isocontours $\Gamma^{(0)}$ et $\Gamma^{(0,05)}$. Un des objectifs de ce travail étant de développer une méthodologie applicable à des aquifères réels en fonction des données disponibles, deux situations différentes ont été distinguées selon que les champs de conductivité hydraulique aient été conditionnés ou non par les données de la variable principale K . De manière générale, l'augmentation du nombre de données de K , de h ou de ρ apporte une amélioration sur l'extension de la distribution spatiale et son allure par rapport à l'isochrone de référence. Dans tous les cas, la distribution spatiale est suffisamment bien estimée pour que l'isocontour $\Gamma^{(0)}$ enveloppe parfaitement $\tau_{Réf}$. Par contre, si l'on considère l'isocontour $\Gamma^{(0,05)}$, il est nécessaire d'intégrer les nombreuses données de ρ pour que celui-ci englobe totalement l'isochrone $\tau_{Réf}$. Dans la situation où les données de K sont trop peu nombreuses, les résultats obtenus sont très encourageants puisqu'à partir des seules données de ρ et de h , il est possible de déterminer des distributions spatiales décrivant l'isochrone de référence, dont l'amélioration est grande par rapport à un cas non-conditionnel, non seulement en terme d'extension de l'incertitude, mais surtout en terme de correspondance entre $\Gamma^{(0,5)}$ et $\tau_{Réf}$.

La tomographie électrique est une méthode de prospection géophysique de surface, non-invasive, rapide à mettre en œuvre et peu coûteuse, qui permet de récolter un grand nombre de données de résistivité électrique de manière continue dans l'espace le long d'un profil (contrairement à l'acquisition ponctuelle de données limitées de K). L'ensemble des résultats montre à quel point l'introduction des résistivités électriques dans la MSA est un atout. L'intégration de cette information indirecte sur la propriété étudiée permet de mieux caractériser la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique, et donc, non seulement de réduire l'incertitude sur la localisation des zones de protection, mais également de se rapprocher du tracé des zones de protection réelles. La prise en compte de ces nombreuses données conduit à des améliorations semblables, si pas meilleures, à celles obtenues par l'ajout de données de K ou de h supplémentaires. Le processus de forage de puits et piézomètres supplémentaires (long et onéreux) pourrait donc être en partie remplacé par la réalisation de profils de tomographie électrique.

La MSA se base sur le fait que des données de hauteur piézométrique sont toujours disponibles, ce qui est généralement le cas sur les sites de captages. Le rôle joué par ces données de h lors de la calibration du modèle d'écoulement n'est pas aussi spectaculaire que celui des données de ρ . Une amélioration existe mais est généralement plus faible. La méthode stochastique utilisée par VAN LEEUWEN [2000] (cf. chapitre 3) pour laquelle aucune calibration du modèle d'écoulement n'est réalisée (ni paramétrisation, ni application d'un critère de sélection), a été appliquée au cas d'étude synthétique en conditionnant les réalisations uniquement par des données de K . Étonnamment, les résultats (non présentés dans ce manuscrit) obtenus à partir d'un conditionnement unique sur K sont, dans certains cas, meilleurs que ceux obtenus par la MSA à partir d'un conditionnement par K et h (essentiellement en terme de w_b) et ce, malgré la calibration du modèle d'écoulement. Ces résultats apparemment surprenants peuvent s'expliquer relativement simplement. Le champ de conductivité hydraulique de référence utilisé dans le cas d'étude synthétique provient de la génération d'une simulation purement stochastique. Par construction, les valeurs de la propriété sont continues, qui suivent une loi de distribution gaussienne. Les résultats obtenus par la méthode de VAN LEEUWEN se basent sur des simulations stochastiques du même type, tandis que ceux obtenus par la MSA proviennent de champs paramétrés moins proches de la "réalité" particulière du cas synthétique. Il est dès lors logique que les résultats soient moins bons. Cependant, pour les champs de conductivité hydraulique réels rencontrés sur le terrain, ce n'est pas nécessairement le cas. En effet, les processus géologiques de formation des couches sédimentaires ne conduisent pas forcément à des réalisations purement stochastiques. Au contraire, des "hydrofaciès" (zones de propriétés hydrogéologiques semblables) peuvent bien souvent être reconnus. La MSA appliquée à des cas d'étude réels pourraient fournir une bien meilleure estimation de la zone de protection "réelle" que ce que l'on observe pour le cas d'étude synthétique. Cette remarque nous laisse penser que le conditionnement par les observations piézométriques peut s'avérer en pratique beaucoup plus essentiel que montré sur le cas synthétique construit de manière stochastique. L'étape de conditionnement par les données de h – constituée du seuillage des données, de la paramétrisation des champs et de la calibration du modèle d'écoulement – est donc conservée dans la MSA. Ceci se justifie d'autant plus qu'elle est indispensable pour passer des champs de $\ln\rho$ à des champs de K lorsque les données de conductivité hydraulique sont trop peu nombreuses pour pouvoir inférer leurs propriétés statistiques spatiales de l'analyse géostatistique, situation souvent rencontrée sur les sites de captage.

Les résultats de l'application de la MSA au cas d'étude réel du site de captage de Dinant-Anseremme, ayant déjà fait l'objet d'études déterministes de délimitation des zones de protection, montrent que contrairement aux méthodes conventionnelles déterministes qui mènent à la définition d'une zone de protection unique dont l'incertitude n'est pas quantifiable,

les approches stochastiques permettent d'obtenir une représentation plus "honnête" de la zone de protection en identifiant et quantifiant explicitement l'incertitude qui existe sur sa localisation. Ces approches stochastiques portent donc un regard beaucoup plus critique à l'égard des résultats. La MSA développée dans le cadre de ce travail s'est donc avérée tout à fait applicable à des cas d'étude réels. Contrairement aux autres méthodes stochastiques, la MSA permet l'introduction de mesures indirectes de la propriété étudiée, plus particulièrement des données de ρ et de h , pour mieux caractériser la distribution du champ de conductivité hydraulique. Cette méthode stochastique s'applique notamment dans la situation, similaire à celle du site de captage de Dinant-Anseremme, où le nombre de données de K est extrêmement faible et donc où seuls des jeux de ρ et de h sont disponibles.

De manière générale, dans la MSA, l'amélioration des résultats par l'apport de données conditionnantes provient d'une meilleure estimation des champs de conductivité hydraulique. En effet, ces données additionnelles permettent :

- de diminuer la variance de krigeage lors de la génération des simulations stochastiques conditionnelles (conditionnement par K ou par ρ), ou co-conditionnelles (conditionnement par K et ρ) ;
- d'optimiser les valeurs des zones de conductivité hydraulique par la calibration du modèle d'écoulement (conditionnement par h) ;
- d'éliminer les champs de conductivité hydraulique inacceptables d'un point de vue géologique (application du critère de sélection Cr2 basé sur "l'expérience du géologue").

Remarques sur la MSA et perspectives

La MSA nécessite de paramétrer les champs de conductivité hydraulique pour permettre la calibration du modèle d'écoulement. Dans l'optique de réduire la perte d'information sur les valeurs de K aux points de mesure, il serait intéressant d'analyser l'effet du nombre de paramètres ajustables sur les résultats afin de l'optimiser en fonction du nombre et de la position des observations piézométriques constituant le jeu de h considéré.

On a pu voir dans ce travail que l'incertitude sur la prédiction est fortement affectée par le schéma d'échantillonnage. Par conséquent, une recherche plus approfondie sur le sujet serait nécessaire afin de mettre au point une stratégie optimale d'acquisition des données (*hard* et *soft*) éventuellement par la création d'outils quantitatifs permettant d'évaluer l'impact de la position et du nombre de mesures sur la distribution spatiale obtenue.

Il faut néanmoins attirer l'attention sur le fait que la récolte des données de résistivité électrique ne convient pas à tous les sites de captage. En effet, dans le cadre de ce travail, deux profils de tomographie électrique ont été réalisés sur le site de captage de Vivegnis (en aval de Liège). Malheureusement, sur ce site, de nombreux câbles électriques passent en sous-sol et influencent les mesures de résistivité électrique. Les résultats obtenus n'étant donc pas représentatifs de la nature des terrains, il n'a pas été possible de les utiliser. Chaque cas d'étude doit donc être considéré individuellement et traité sur base des données disponibles.

L'introduction dans les modèles hydrogéologiques d'autres types de données auxiliaires disponibles sur le terrain (telles que les temps de transfert de polluants obtenus par essais de traçage) ou la prise en compte de l'hétérogénéité d'autres paramètres intervenant dans ces modèles (tel que la porosité efficace, moins variable dans l'espace que la conductivité hydraulique mais jouant un rôle non négligeable) sont autant de possibilités de recherches ultérieures. Certains chercheurs commencent à se tourner vers des approches stochastiques bayésiennes qui, en plus de l'incertitude provenant de la connaissance incomplète des valeurs de conductivité hydraulique, prennent en compte l'incertitude existant sur les paramètres statistiques de cette propriété (moyenne, variance et échelle intégrale) en les considérant eux aussi comme des fonctions aléatoires. On pourrait envisager d'utiliser les apports de la MSA avec ce type d'approche.

Comme mentionné précédemment, la méthode de Monte Carlo demande de grands efforts de calcul. Des méthodes de "simulation ponctuelle" existent mais sont très rapidement limitées. Pour faire face aux difficultés et aux limitations inhérentes à ces méthodes, une technique de calcul a été mise au point par BOLLE [2000]. Cette méthode des perturbations indépendantes, qui permet de réduire fortement le nombre de simulations nécessaires, pourrait être testée dans le cadre de la problématique étudiée (et éventuellement intégrée dans l'approche proposée) pour tenter de quantifier l'incertitude sur la localisation des zones de protection.

Enfin, quelle que soit l'approche utilisée, les périmètres de protection fournissent une aide à la décision (concernant les activités permises ou non dans ces zones). Par l'utilisation de méthodes stochastiques, différents degrés de protection pourraient être implémentés, qui dépendent du choix de l'isocontour (de la distribution spatiale) délimitant la zone de prévention en fonction de la nature des activités réalisées à l'intérieur ou à proximité des périmètres obtenus.