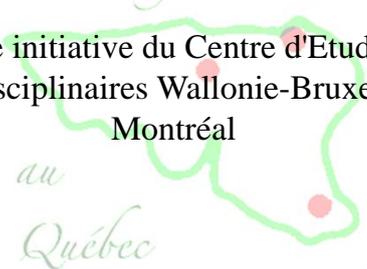


Semaine ULg-FLUSAGe

Une initiative du Centre d'Etudes Interdisciplinaires Wallonie-Bruxelles à Montréal

au Québec








Avec l'appui de la Délégation Wallonne - Bruxelles au Québec, de la Communauté Française et de la Région Wallonne de Belgique

Semaine ULg au Québec

Méthode stochastique de délimitation des zones de protection
autour des captages d'eau souterraine




Semaine ULg-FLUSAGe au Québec

A. Dassargues* & C. Rentier

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement
Dpt Géoressources, Géotechnologies et Matériaux de Construction,
Université de Liège, Belgique

(* aussi Hydrogéologie, Instituut voor Aardwetenschappen (HG-KUL), Katholieke Universiteit Leuven, Belgique)



Méthode stochastique de délimitation des zones de protection
autour des captages d'eau souterraine

Conditionnement par
des mesures de conductivité hydraulique K ,
de hauteur piézométrique h
et de résistivité électrique ρ




Plan de la présentation

- Contexte général : la protection des eaux souterraines
- Méthode stochastique de délimitation des zones de protection proposée
 - Principe
 - Application à un cas d'étude synthétique
 - Application à un cas d'étude réel (site de captage d'Anseremme)
- Conclusions / perspectives




A. Dassargues & C. Rentier, 2009

Contexte général

- Eau souterraine = source importante d'eau de distribution (consommation humaine, activités industrielles, agriculture,...)
- Zones de protection
 - ➔ protection du captage à l'encontre de pollutions ponctuelles à caractère accidentel
 - ➔ délimitation basée sur une notion de temps de transfert
= l'aire géographique à partir de laquelle toute particule d'eau atteint le captage endéans un temps de transfert spécifié t





A. Dassargues & C. Rentier, 2009

Délimitation des zones de protection

- ➔ Repose sur la qualité des modèles d'écoulement souterrain
- ➔ Dépend de notre capacité à décrire les propriétés du système aquifère (K , n_e , ...)
- ➔ Sur base de la connaissance de la géologie du sous-sol (limitée aux données acquises sur le terrain)



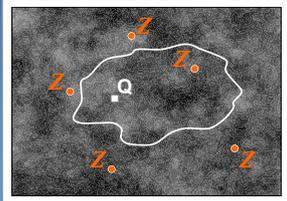

A. Dassargues & C. Rentier, 2009

Hétérogénéité

- Propriétés hydrogéologiques → hétérogènes

→ Répartition inégale de l'écoulement et du transport de soluté

→ Données ponctuelles, peu nombreuses et dispersées dans l'espace

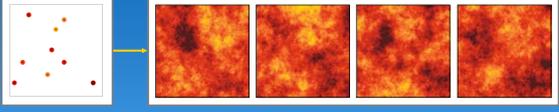


- Source d'incertitude → conductivité hydraulique K



A. Bouvier & J. Bouvier 2009

Approche stochastique spatiale



Approche déterministe ≠ Approche stochastique

→ Quantifier l'incertitude sur les prédictions



A. Bouvier & J. Bouvier 2009

Données hard et données soft

Données acquises sur le terrain

Mesures directes de K
Données hard
(généralement peu nombreuses)

Mesures indirectes de K
Données soft
(telles que informations géologiques ou hydrogéologiques, résultats de prospections géophysiques, avis d'un expert,...)

→ Réduire l'incertitude sur les prédictions

Observations piézométriques h

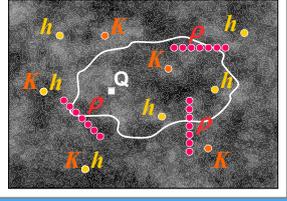
Résistivités électriques ρ



A. Bouvier & J. Bouvier 2009

Objectif

Proposer une méthode stochastique de délimitation des zones de protection, applicable à des cas réels



- ✓ quantifier l'incertitude associée aux prédictions
- ✓ réduire cette incertitude au maximum en intégrant plusieurs types de données et informations disponibles (*hard & soft*)



A. Bouvier & J. Bouvier 2009

Objectif

Dans différents cas de figure en fonction des données disponibles : K, ρ et h

→ *en particulier* lorsque le nombre disponible de mesures de K est extrêmement faible voire nul, de sorte que les propriétés statistiques spatiales sont difficilement estimables (cas de la plupart des sites de captage)



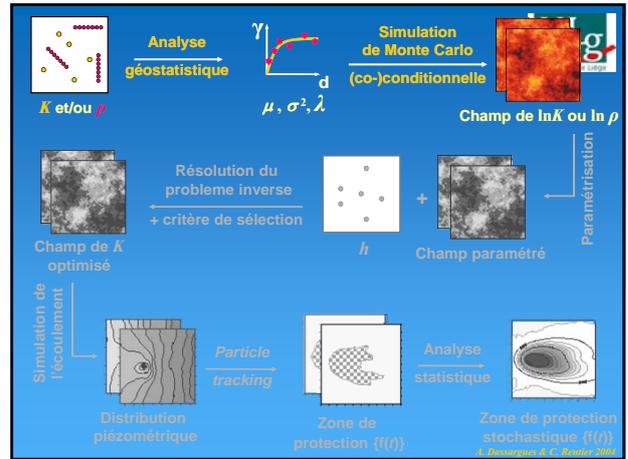
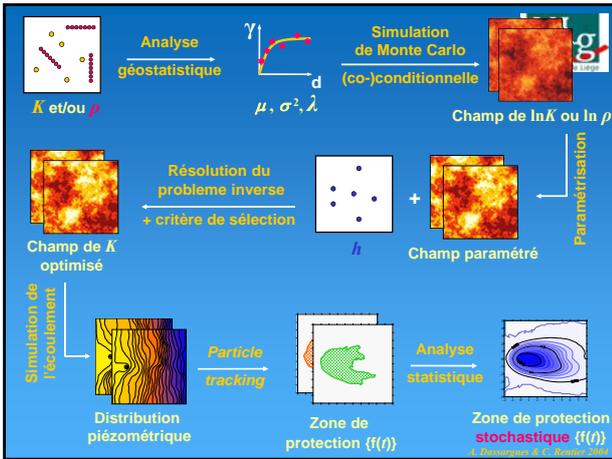
A. Bouvier & J. Bouvier 2009

Objectif

- Contexte général : la protection des eaux souterraines
- Méthode stochastique de délimitation des zones de protection proposée
 - Principe
 - Application à un cas d'étude synthétique
 - Application à un cas d'étude réel (site de captage d'Anseremme)
- Conclusions / perspectives



A. Bouvier & J. Bouvier 2009



Approche stochastique spatiale

Z est une réalisation de la fonction spatiale aléatoire

$E\{Z(x)\} = \mu$
 $\gamma(d) = E\{[Z(x+d) - Z(x)]^2\} = f(\sigma^2, \lambda, d)$

A. Deshayes et C. Bouvier, 2004

Approche stochastique spatiale

Z est une réalisation de la fonction spatiale aléatoire

$E\{Z(x)\} = \mu$
 $\gamma(d) = E\{[Z(x+d) - Z(x)]^2\} = f(\sigma^2, \lambda, d)$

A. Deshayes et C. Bouvier, 2004

Analyse géostatistique

valeur μ
 expression $\gamma(d) = f(\sigma^2, \lambda)$

A. Deshayes et C. Bouvier, 2004

Simulations conditionnelles

$$z_j^{SC}(x) = z^*(x) + z_j^{SNC}(x) - z_j^{SNC*}(x)$$

A. Deshayes et C. Bouvier, 2004

Simulations conditionnelles

$$z_j^{SC}(\underline{x}) = z^*(\underline{x}) + z_j^{SNC}(\underline{x}) - z_j^{SNC*}(\underline{x})$$

Simulation conditionnelle = Krigeage + Simulation non-cond (SNC) - Estimation par krigeage de la SNC

Bandes Tournantes (Mathéron, 1973 - Matheron & Whittle, 1982)

Estimateur optimal unique + Rééchantillonnage

Erreur de krigeage (nulle aux points de mesure)

J. Bouvier, J.-F. Roy, 2005

Simulations co-conditionnelles

$$z_j^{SC}(\underline{x}) = z^*(\underline{x}) + z_j^{SNC}(\underline{x}) - z_j^{SNC*}(\underline{x})$$

Simulation co-conditionnelle = Cokrigeage + Simulation non-cond SNC - Estimation par cokrigeage de la SNC

Variante auxiliaire récoltée en grand nombre

meilleure caractérisation de la variabilité spatiale des champs

J. Bouvier, J.-F. Roy, 2005

(Co-)conditionnement des simulations

- K → simulations conditionnelles de $\ln K$
- K et ρ → simulations co-conditionnelles de $\ln K$
- ρ → simulations conditionnelles de $\ln \rho$

J. Bouvier, J.-F. Roy, 2005

Analyse géostatistique γ μ, σ^2, λ Simulation de Monte Carlo (co-)conditionnelle

K et/ou ρ Champ de $\ln K$

Champ de K optimisé + critère de sélection h + Champ paramétré Paramétrisation

Simulation de l'écoulement Distribution piézométrique Particle tracking Zone de protection $\{i/j\}$ Analyse statistique Zone de protection stochastique $\{i/j\}$

J. Bouvier, J.-F. Roy, 2005

Conditionnement des simulations par h

Equation générale d'écoulement en régime permanent

$$\text{div}[\underline{K} \text{ grad } h] - q = 0$$

Paramètres du modèle Variables d'état du système

Code aux différences finies (Modflow)

- Problème direct (simulation) : K connues, h inconnues
- Problème inverse (calibration) : K inconnues, h connues

Code d'inversion (PEST)

J. Bouvier, J.-F. Roy, 2005

Conditionnement des simulations par h

Résolution du problème inverse

- Complexité des systèmes réels
- Manque de données

Problème inverse « mal posé » (Hadamard, 1952)

- Inexistence → aucune solution n'existe
- Non-unicité → plus d'une solution existe
- Instabilité → faibles variations des données d'entrées modifient fortement les résultats

Paramétrisation = réduire le nombre de paramètres à identifier par l'approche inverse

J. Bouvier, J.-F. Roy, 2005

Conditionnement des simulations par h

Paramétrisation des champs de $\ln K$

Intervalle de variation de $\ln K$

$-\infty$ \rightarrow $+\infty$

Zonation

S1 S2 S3 S4
C1 C2 C3 C4 C5

avec
 $K_{C1} < K_{C2} < K_{C3} < K_{C4} < K_{C5}$

regrouper l'ensemble des données de K de même ordre de grandeur dans une même classe de valeur uniforme K_{Cj}

Conditionnement des simulations par h

Paramétrisation des champs de $\ln K$

- Technique de seuillage \rightarrow fixer les seuils S_i
- Principe : déterminer les seuils qui minimisent la variabilité des données regroupées par classe

\rightarrow minimiser la fonction f

$$f = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_{cl}} (\ln K_{ij} - \overline{\ln K_i})^2$$

$$\overline{\ln K_i} = \frac{1}{N_{cl}} \sum_{j=1}^{N_{cl}} \ln K_{ij} \quad , j = 1, N_{cl}$$

Valeur K_{Cj} = valeur initiale (moyenne des données / classe) optimisée lors de la calibration du modèle d'écoulement

Critère de sélection (critère d'ordre)

- Après optimisation, pour certaines réalisations, les valeurs de K ne respectent plus l'ordre relatif des classes $K_{Cj} < K_{C(j+1)}$
- Champs « irréalistes d'un point de vue géologique »
- Critère d'ordre
- Elimine les réalisations qui ne respectent pas cette relation mais tolère des permutations entre classes voisines

Analyse géostatistique K et/ou ρ

Simulation de Monte Carlo (co-)conditionnelle

Champ de $\ln K$

Résolution du problème inverse + critère de sélection

Champ de K optimisé

Paramétrisation

Champ paramétré

Simulation de l'écoulement

Distribution piézométrique

Particle tracking

Zone de protection $\{f(t)\}$

Analyse statistique

Zone de protection stochastique $\{f(t)\}$

Analyse statistique

Distribution spatiale de l'ensemble des zones de protection

$$[CAP(x, t)] = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I(x, t)_k$$

= probabilité qu'une particule d'eau placée en un point atteigne le puits endéans un temps de transfert spécifié

Les isocontours $\Gamma(t)$ connectent les points qui ont la même probabilité $p(CAP(x, t)) = \Gamma$ au sein de la distribution

$\Gamma(0)$ $\Gamma(0,05)$ $\Gamma(0,5)$ $\Gamma(0,95)$ $\Gamma(1)$

- Contexte général : la protection des eaux souterraines
- Méthode stochastique de délimitation des zones de protection proposée
 - Principe
 - Application à un cas d'étude synthétique
 - Application à un cas d'étude réel (site de captage d'Anseremme)
- Conclusions / perspectives

Construction du cas d'étude synthétique

Modèle d'écoulement souterrain représentant « la situation réelle »

à partir des données de divers sites de la plaine alluviale de la Meuse

Pas à l'échelle

ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. Bouvier et al., 2010

Construction du cas d'étude synthétique

Génération d'un champ de K de référence (connu en tout point)

- Zones de protection de référence $f(t)$ (simulation de l'écoulement et *particle tracking*)
- Jeux de K , de h et de ρ

ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. Bouvier et al., 2010

Construction du cas d'étude synthétique

- Création du jeu de données de conductivité hydraulique (K)
 - Valeurs du champ K de référence au droit des points de « données »
- Création du jeu de données de hauteurs piézométriques (h)
 - Valeurs de la distribution piézométrique h de référence au droit des points de « données »

ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. Bouvier et al., 2010

Construction du cas d'étude synthétique

- Création du jeu de données de résistivité électrique (ρ)
 - Données recueillies sur divers sites de la plaine alluviale de la Meuse
 - Corrélation entre $\ln K$ et $\ln \rho$
- Génération du jeu de ρ à partir du champ K de référence
 - $\ln \rho_i = b_0 + b_1 \ln K_i + \sigma \cdot N_i(t, l)$

ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. Bouvier et al., 2010

Application au cas d'étude synthétique

	0 K	15 K	25 K
0 ρ	$[CAP(x, t)]$	$[CAP(x, t) K_{15}, h_{15}]$ $[CAP(x, t) K_{15}, h_{25}]$	$[CAP(x, t) K_{25}, h_{15}]$ $[CAP(x, t) K_{25}, h_{25}]$
150 ρ	$[CAP(x, t) h_{15}, \rho_{150}]$ $[CAP(x, t) h_{25}, \rho_{150}]$	$[CAP(x, t) K_{15}, h_{15}, \rho_{150}]$	$[CAP(x, t) K_{25}, h_{25}, \rho_{150}]$
300 ρ	$[CAP(x, t) h_{15}, \rho_{300}]$ $[CAP(x, t) h_{25}, \rho_{300}]$	$[CAP(x, t) K_{15}, h_{15}, \rho_{300}]$	$[CAP(x, t) K_{25}, h_{25}, \rho_{300}]$

$t = 1, 5, 10, 20$ jours

ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. Bouvier et al., 2010

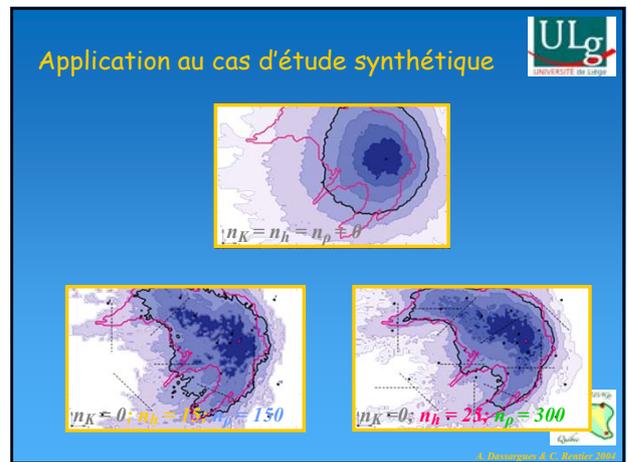
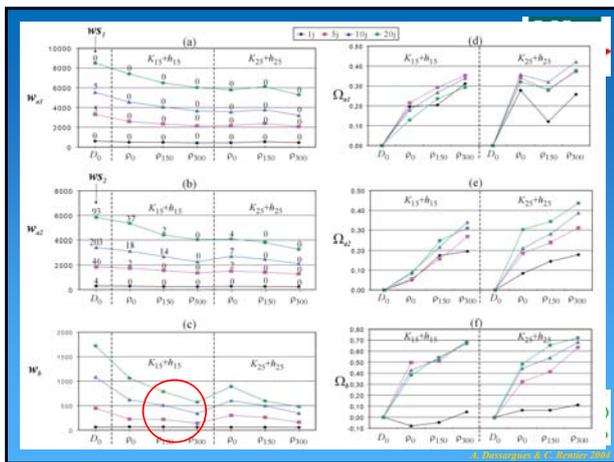
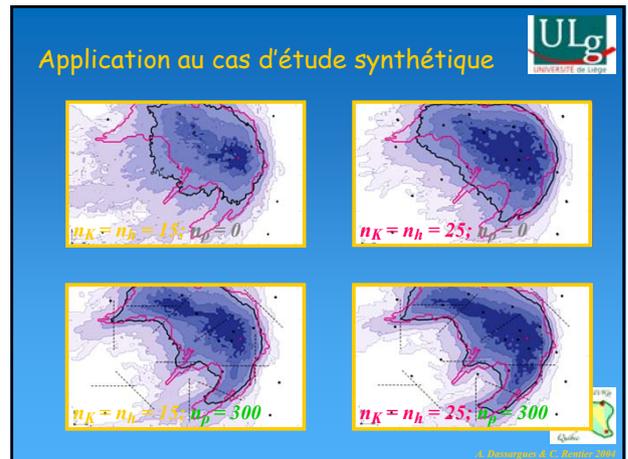
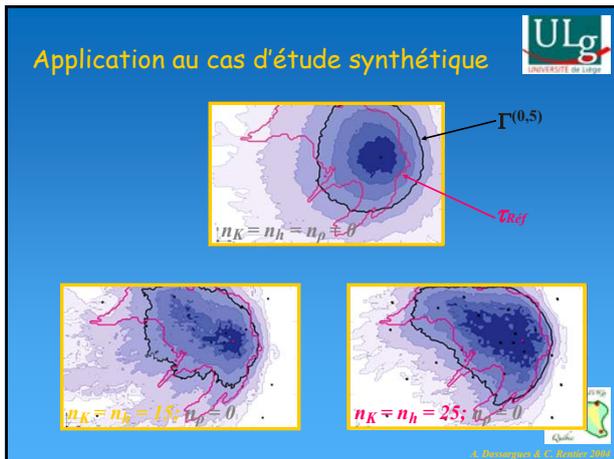
Quantification des résultats

Mesures de performances

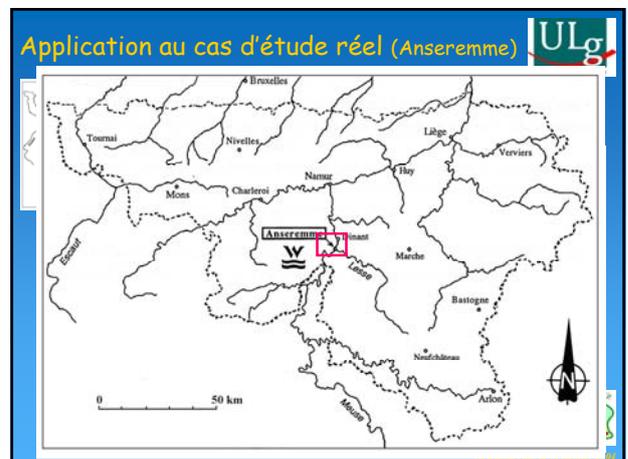
- w_{a1} et w_{a2} = mesures de l'incertitude basée sur l'extension spatiale de la ZI au temps t
- w_b = mesure l'écart entre la position de $\Gamma^{(0,5)}$ et la position de $\tau_{Réf}$
- w_{s1} et w_{s2} = vérifient que $\tau_{Réf}$ est bien englobée dans la zone formée par $\Gamma^{(0)}$ ou $\Gamma^{(0,05)}$

ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE

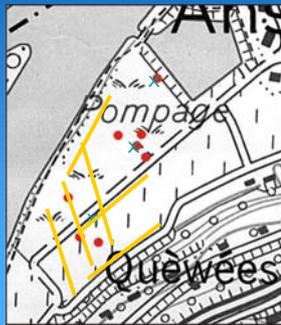
A. Bouvier et al., 2010



- ### Application au cas d'étude réel (Anseremme)
-
- Contexte général : la protection des eaux souterraines
 - Méthode stochastique de délimitation des zones de protection proposée
 - Principe
 - Application à un cas d'étude synthétique
 - Application à un cas d'étude réel (site de captage d'Anseremme)
 - Conclusions / perspectives
-
- ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE
- A. Desbordes & C. Bouvier 2005

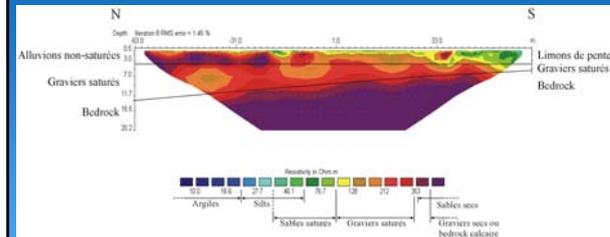


Application au cas d'étude réel (Anseremme)



A. Dassargues & C. Reiter, 2004

Application au cas d'étude réel (Anseremme)



Calcul de la valeur équivalente de ρ obtenue sur l'épaisseur de la couche graveleuse

$$\frac{h}{\rho} = \frac{\sum h_i}{\sum \rho_i}$$



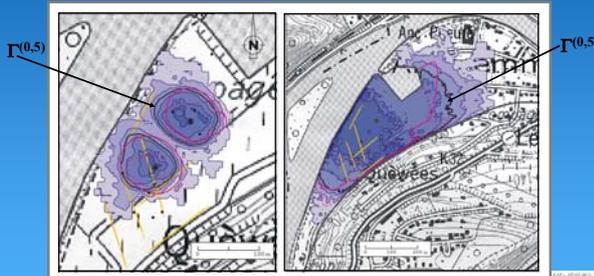
A. Dassargues & C. Reiter, 2004

Application au cas d'étude réel (Anseremme)



$t = 24$ heures

$t = 50$ jours



— Modèle Déterministe 3D
 Modèle Déterministe 2D



A. Dassargues & C. Reiter, 2004

- Contexte général : la protection des eaux souterraines
- Méthode stochastique de délimitation des zones de protection proposée
 - Principe
 - Application à un cas d'étude synthétique
 - Application à un cas d'étude réel (site de captage d'Anseremme)
- Conclusions / perspectives



A. Dassargues & C. Reiter, 2004

Conclusions



Développer une méthode stochastique de délimitation des zones de protection pour les aquifères poreux

- ➔ quantification de l'incertitude associée aux prédictions du modèle
- ➔ réduction de cette incertitude par une meilleure caractérisation du milieu poreux obtenue par introduction de données soft



A. Dassargues & C. Reiter, 2004

Conclusions



- Cas d'étude synthétique
 - ➔ tester la méthode et quantifier les résultats
 - ➔ apport important des données de ρ (récoltés en grand nombre)
- Cas d'étude réel
 - ➔ applicabilité de la méthode à des cas réels
 - ➔ avantages de l'approche stochastique (identification et quantification explicite de l'incertitude sur la prédiction)



A. Dassargues & C. Reiter, 2004

Perspectives



- Analyser l'effet du nombre de paramètres ajustables sur les résultats
- Mettre au point une stratégie optimale d'acquisition de données (*hard & soft*)
- Analyser l'influence du degré de corrélation ($\ln K - \ln \rho$)
- Introduire d'autres types de données *soft* (ex : temps de transfert de polluants mesurés par essais de traçage)
- Prendre en compte l'hétérogénéité d'autres propriétés hydrogéologiques (ex : porosité efficace)



A. Dassargues & C. Rentier 2004

Références



- RENTIER C., BROUYERE S. and DASSARGUES A., 2001, Integrating geophysical and tracer test data for accurate solute transport modelling in heterogeneous porous media, *Groundwater Quality: Natural and Enhanced Restoration of Groundwater Pollution (Proc. of GQ2001, Sheffield, IAHS Publ. n° 275, pp. 3-10.*
- RENTIER C. & DASSARGUES A., 2002, Deterministic and stochastic modelling for protection zone delineation, in *Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: A Few Steps Closer to Reality (Proc. of ModelCARE2002), IAHS Publ. n°277, pp. 489-497.*
- RENTIER C., ROUBENS, M. and DASSARGUES, A., 2003, Combining stochastic simulations and inverse modelling for delineation of groundwater well capture zones, accepted in *EPMESEC IX Proceedings, The 9th Int. Conf. On Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science, Macao, August 2003.*

... en préparation

RENTIER C. & DASSARGUES, A. Combining (co)-conditional stochastic simulations and inverse modeling for delineation of groundwater well capture zones, *WRR*



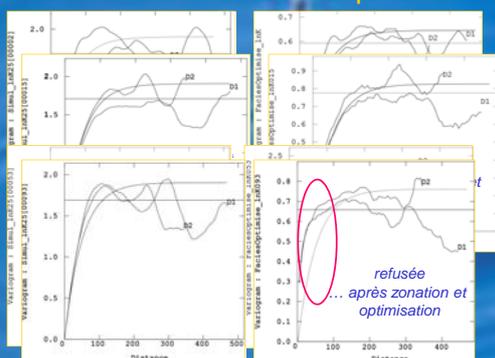
A. Dassargues & C. Rentier 2004

MERCI




A. Dassargues & C. Rentier 2004

Effet de la zonation et de la sélection sur la structure spatiale ?



refusée
... après zonation et optimisation



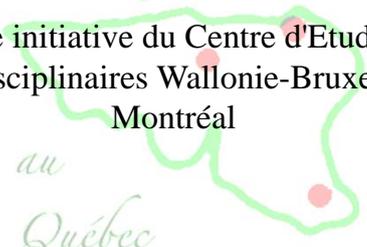
A. Dassargues & C. Rentier 2004




Semaine ULg-FUSAGE

Une initiative du Centre d'Etudes Interdisciplinaires Wallonie-Bruxelles à Montréal

au Québec











Avec l'appui de la Délégation Wallonie - Bruxelles au Québec, de la Communauté Française et de la Région Wallonne de Belgique