

**Jeudis de l'AQUAPOLE**

**Caractérisation des nappes aquifères: une nécessité pour leur protection et leur gestion**

A. Dassargues\*

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

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



23 février 2006





**Plan de la présentation**

- Introduction/Contexte général
- Caractérisation des aquifères pour l'aspect quantité
  - Bilans
  - Paramètres d'écoulement nécessaires pour modèles quantitatifs
  - Impact des changements climatiques
- Caractérisation des aquifères pour l'aspect qualité
  - état chimique, réseaux de mesure, indicateurs
  - paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs pour calculs et modélisations du transport de solutés
  - détermination rigoureuse et physiquement 'significative' de zones de préventions et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines.
- Conclusions / perspectives

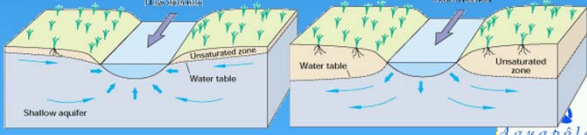





**Introduction/Contexte général**

Directive Cadre Eau

- une protection cohérente de toutes les eaux en Région wallonne et en Europe, aussi bien pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines;
- un bon état tant qualitatif et quantitatif pour les eaux souterraines.

Interactions eaux souterraines – cours d'eau: assurant les débits d'« étiages », donc la pérennité des écosystèmes aquatiques associés.

**Introduction/Contexte général**

Objectifs:

- de production, pour satisfaire les demandes en eau;
- de faisabilité d'occupation du sol et du sous-sol (aménagement du territoire);
- de préservation de la qualité des eaux et de conservation des écosystèmes subordonnés.





## Introduction/Contexte général

### Eaux souterraines en Wallonie

<http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/>

(Observatoire des Eaux Souterraines, DGRNE, Ministère de la Région Wallonne, 2002)

**Aquapôle**  
4. Développement 2009

## Caractérisation pour la quantité

Précédemment:

- disponibilité pour l'exploitation ('*availability*')  
... concept défini uniquement par rapport aux besoins de l'homme impliquant l'éventuel épuisement progressif de la ressource

Maintenant:

- 'durabilité' ou exploitation durable ('*sustainability*')  
... consommation des eaux n'entraîne pas d'épuisement voire de disparition de la ressource

➡ besoins en eau de l'environnement naturel et des activités humaines doivent être équilibrés par les nouveaux apports

➡ 'durabilité' devrait être quantifiée et cartographiée à toutes les échelles spatiales

**Aquapôle**  
4. Développement 2009

## Caractérisation pour la quantité

Bilans:

- ... sur une période de temps déterminée
- ... sur un bassin hydrologique donné

$$P + Q_{in} = Q + EvT + Q_{out} +/- \Delta Res$$

avec Q = débit mesuré dans le cours d'eau à l'exutoire;  
 $\Delta Res$  = variations de réserves d'eau stockée;  
 $Q_{in}$  = composante d'entrée d'eau souterraine;  
 $Q_{out}$  = composante de sortie d'eau souterraine.

**Aquapôle**  
4. Développement 2009

## Caractérisation pour la quantité

$$P = ETR + Q_{GEER} + Q_{EXP} + \Delta_{Réserves} + 'Pertes'$$

$$740 = 525 + 120 + 65 + 15 + 15 \text{ mm}$$

(entre 1951 et 1965, d'après Monjoie, 1965)

$$810 = 508 + 145 + 88 + 7.5 + 61.5 \text{ mm}$$

(entre 1975 et 1994, d'après Hallet, 1999)

⚠ ... tendance à englober dans la composante souterraine (infiltration et recharge) l'ensemble des erreurs affectant chacun des termes

d'après Hallet, 2001

**Aquapôle**  
4. Développement 2009

### Caractérisation des écoulements en zone non saturée

- méthodes plus précises de quantification de la recharge basées sur des approches plus physiques
- données relatives aux zones non-saturées
- simuler de façon physiquement « significative » les processus d'écoulement dans la zone partiellement saturée ou (à tout le moins) en intégrant la recharge dans les valeurs à calibrer des modèles hydrogéologiques (le + svt: zone saturée)
- enjeu particulièrement important dans les milieux fissurés (craies, calcaires...)

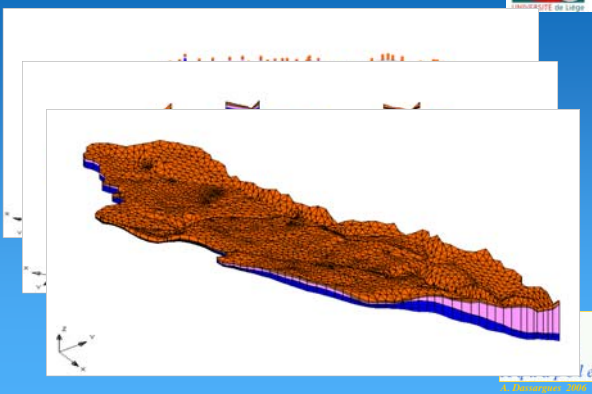


### Données nécessaires pour modélisation des écoulements souterrains

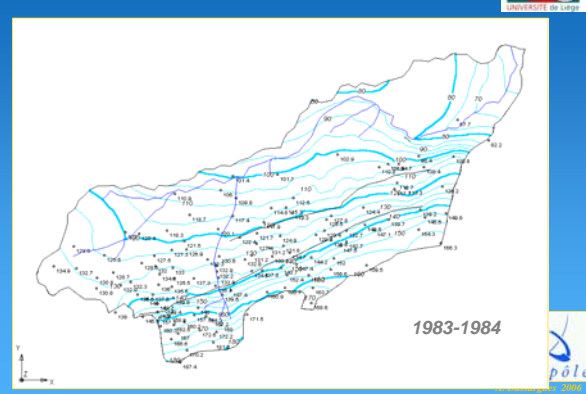
- géométrie, géologie des différentes formations géologiques pour discrétisation spatiale adéquate du modèle;
- paramètres de l'écoulement en milieu souterrain saturé: conductivités hydrauliques et coefficients d'emmagasinement (à ajuster durant calibration ou résolution modèle inverse) ;
- valeurs de toutes les « sollicitations » appliquées au système et de leurs variations temporelles: les débits ou flux pompés ou drainés, et les flux entrants (recharge, réinjections, etc.) éventuellement à ajuster par calibration;
- valeurs « historiques » des hauteurs piézométriques et leurs variations dans le temps en un maximum de points : données indispensables pour calibrer et valider le modèle.



### Géométrie/géologie



### Piézométrie mesurée



## Propriétés/paramètres: Perméabilité et coefficient d'emmagasinement



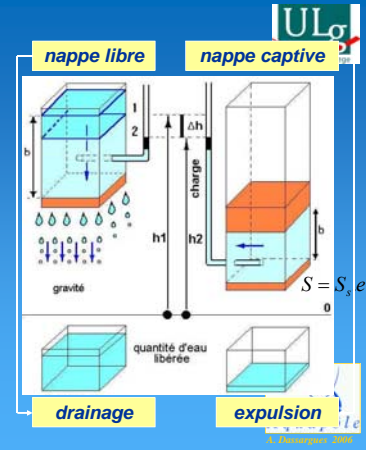
- 2 propriétés fondamentales pour écoulement:
  - perméabilité = aptitude à conduire l'eau
  - coefficient d'emmagasinement: décrivant la variation de quantité d'eau stockée dans le milieu souterrain
- comment quantifier ces propriétés ?
- à quelle échelle ?
  - pas trop petite: plus de signification
  - pas trop grande: on lisse tout
- l' EVR (REV) est le volume considéré de milieu souterrain pour lequel les propriétés vont être quantifiées (par des valeurs moyennes, équivalentes)
- assez grand ... mais aussi assez petit pour éviter des lissages nuisibles à la représentation du processus
- l' EVR dépend du problème étudié et des objectifs de l'étude

- Perméabilités: obtenues par essais de pompages, essais d'injection, essais de traçage, diagraphies, ou autres mesures indirectes;
- Coefficients d'emmagasinement:

$$S = n_e + S_s \cdot h$$

$$S \cong n_e$$

par essais de pompage, ou essais géotechniques de consolidation



## Caractérisation de la qualité des eaux souterraines



Plusieurs aspects importants peuvent être abordés:

- la caractérisation des eaux souterraines par rapport à un « bon » état chimique;
- la caractérisation des valeurs locales des paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs du milieu souterrain pour permettre des calculs et modélisations du transport de solutés;
- la détermination de façon rigoureuse et physiquement 'significative' de zones de préventions et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines.



## Evaluation du bon état chimique



Tout système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines utilisé doit permettre de :

- vérifier le respect des normes européennes existantes (nitrates et pesticides) ;
- vérifier le respect des normes de potabilité sans traitement excessif de la ressource ;
- vérifier les objectifs de qualité des écosystèmes de surface dépendants ;
- mesurer les déviations par rapport à l'état naturel ou au bruit de fond ambiant.



## Evaluation du bon état chimique



Réseau de surveillance basé sur une caractérisation de la masse d'eau souterraine: analyse des conditions géologiques et hydrogéologiques

- position amont ou aval par rapport à l'écoulement;
  - caractère intégrateur/représentatif du point;
  - variabilité des mesures du passé;
  - éviter les contaminations ponctuelles (peu représentatives de l'état patrimonial);
  - accessibilité, équipement, profondeurs des zones crépinées.
- ... **donc besoins en caractérisation !**

➔ application d'un système SEQ-ESO adapté



## Evaluation du bon état chimique



1 point/25km<sup>2</sup> dans 'zones spéciales' et 1 point/100 km<sup>2</sup> ailleurs

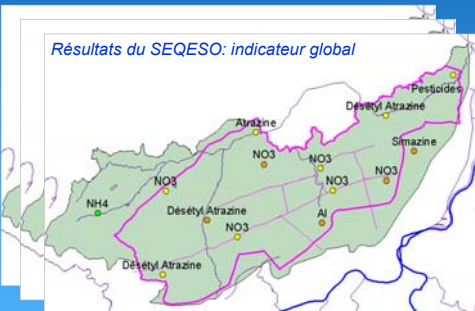


## Evaluation du bon état chimique

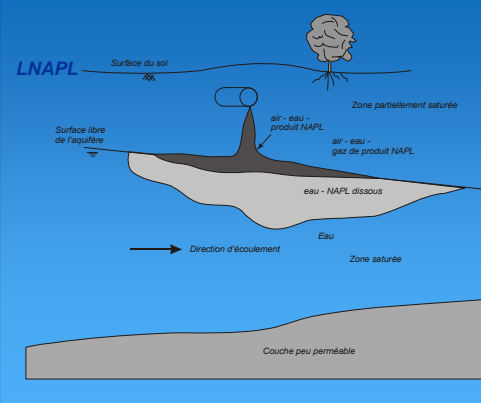


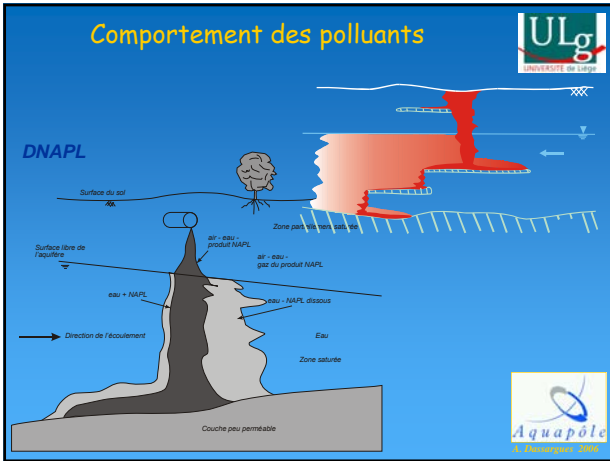
Résultats du SEQESO pour usage 'Eau potabilisable'  
Résultats du SEQESO pour état 'patrimonial'

Résultats du SEQESO: indicateur global

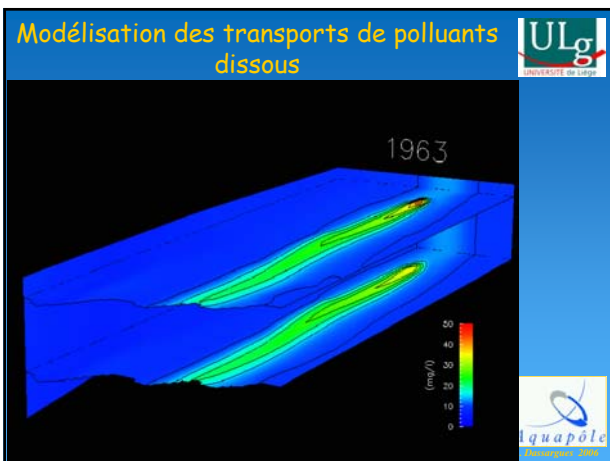


## Comportement des polluants





- ### Données nécessaires pour modélisation des transports de polluants dissous
- (additionnelles par rapport au modèle d'écoulement)
- valeurs des paramètres de transport en milieu souterrain saturé : porosité effective, dispersivités (à ajuster durant la calibration ou résolution du modèle inverse) et éventuellement coefficient de partitionnement, constante de dégradation, coefficient d'effet d'eau immobile ;
  - valeurs de toutes les 'solllicitations' appliquées au système relatives aux contaminations et à leurs variations temporelles: les flux injectés et leur concentration en polluant ;
  - valeurs 'historiques' des concentrations et leur variations dans le temps en un maximum de points : données indispensables pour calibrer et valider le modèle.



## Zones de prévention: critère de base et utilité ?



- basées sur un critère de temps de transfert d'un polluant au sein de la zone saturée;
- vision à relativement « court terme », s'intéressant uniquement à la protection des points de prélèvement (captages);
- par rapport à pollutions ponctuelles accidentelles;
- pas de protection de la ressource dans son ensemble;
- pas du tout adaptées au cas des pollutions diffuses pour lesquelles la notion de temps de transfert n'est pas clairement définie;
- on néglige l'impact possible de la zone partiellement saturée (loin d'être négligeable !).



## Zones de prévention: méthodologie



Méthodologie remarquablement rigoureuse par rapport à ce qui est pratiqué dans les pays voisins:

- géologie, géomorphologie, hydrologie de base ;
- prospection géophysique pour détecter/cartographier l'hétérogénéité ;
- forage de piézomètres et puits d'observation ;
- pompages d'essai et suivi piézométrique dans tous les autres puits ;
- essais de traçage multi-traceur en conditions de pompage ;
- premières interprétations analytiques de l'essai ;
- construction d'un modèle écoulement-transport le modèle considérant l'hétérogénéité investigée ;
- calibration du modèle d'écoulement (par rapport aux niveaux piézométriques mesurés) ;
- calibration du modèle de transport de soluté (sur les courbes de restitution mesurées) ;
- simulations et calculs des temps de transfert (dispersion comprise) pour différentes injections autour du point de captage.



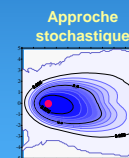
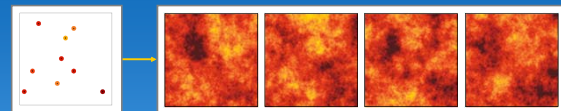
## Zones de prévention: challenges



- propriétés des traceurs dans les différents milieux géologiques (adsorption, effets d'eau immobile, ...);
- contrôle de l'injection et de la fonction d'entrée dans l'aquifère;
- aspects 2D et 3D de l'essai de traçage et de la modélisation;
- conditions aux frontières des modèles d'écoulement et de transport;
- multiple calibrations possibles par 'trial and error' ou par calibration automatique;
- comment les données indirectes pourraient être prises en compte ?
- 'upscaling' et extrapolations spatiales des valeurs des paramètres;
- incertitude des résultats;
- aspects légaux concernant:
  - la "1ère arrivée" du traceur (contaminant)
  - la zone non-saturée



## Zones de prévention: approche stochastique



≠



Quantifier l'incertitude sur les prédictions



**Risque = Aléa \* Vulnérabilité**  
la vulnérabilité = notion relative

Risque

Vulnérabilité spécifique

**Vulnérabilité intrinsèque:** caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du milieu contrôlant la réponse impulsionnelle du système par rapport à une injection instantanée d'un contaminant conservatif

+ comportement (bio)chimique du contaminant dans le milieu

+ probabilité de l'aléa + fonction d'entrée + masse de contaminant + concentrations critiques

**Vulnérabilité: précédemment beaucoup d'empirisme !**

- méthodes encore les plus utilisées !
- méthodes d'indexation et de pondération des facteurs
- DRASTIC, EPIK, SINTACS, GOD, ISIS, etc.
- empirisme important, rendant toute validation impossible
- résultats (indices et classes de vulnérabilité) impossibles à interpréter physiquement.

➔ résultats obtenus avec ces méthodes sont peu fiables et sans réelle utilité pratique !

Problèmes:

- manque de clarté de la définition du concept de vulnérabilité utilisé;
- l'absence de critères pour se référer en vue d'évaluer la vulnérabilité;
- manque de données de caractérisation

**DRASTIC Method (Aller et al., 1987)**

	DRASTIC	Pesticide DRASTIC
» Depth to water	5	5
» Net Recharge	4	4
» Aquifer media	Rating 3	Weighting 3
» Soil media	1, 2, 3, ..., 10	5
» Topography	1	3
» Impact of the vadose zone	5	4
» Hydraulic Conductivity	4	2

$$D_i = \sum_{j=1}^n (R_j \cdot W_j)$$

**EPIK Method (Doerfliger and Zwahlen 1997)**

OVERLAY PROCEDURE

WEIGHTED OVERLAY PROCEDURE

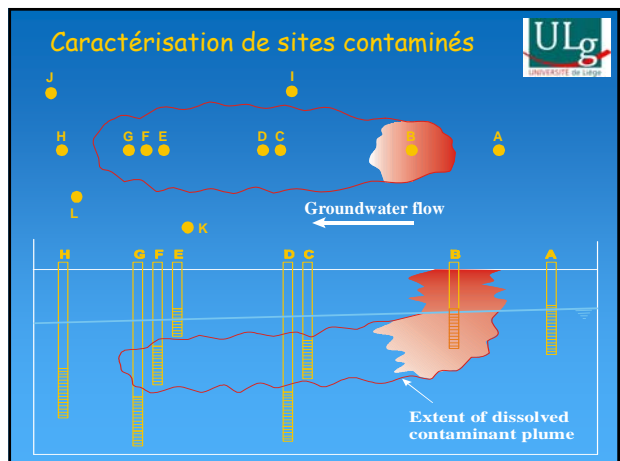
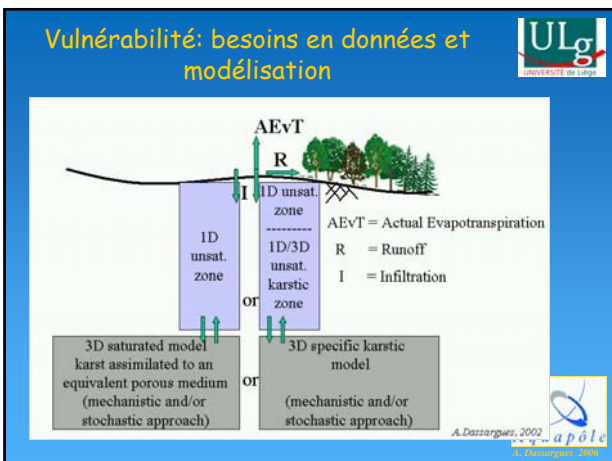
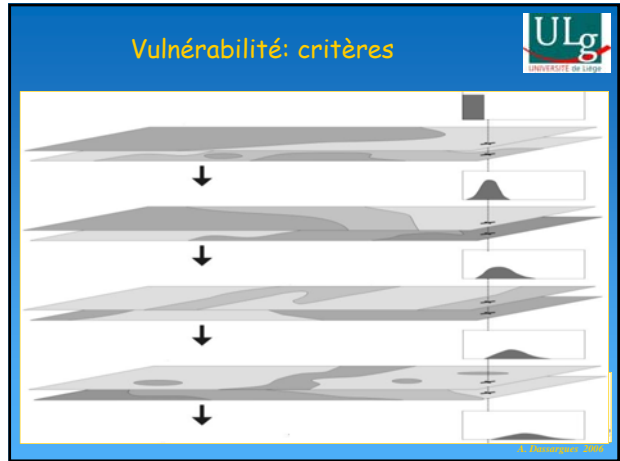
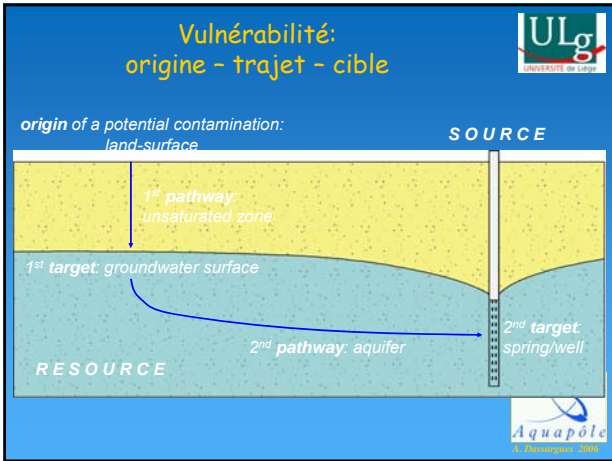
$$V_i = (a \cdot R_i) + (b \cdot P_i) + (c \cdot L_i) + (d \cdot K_i)$$

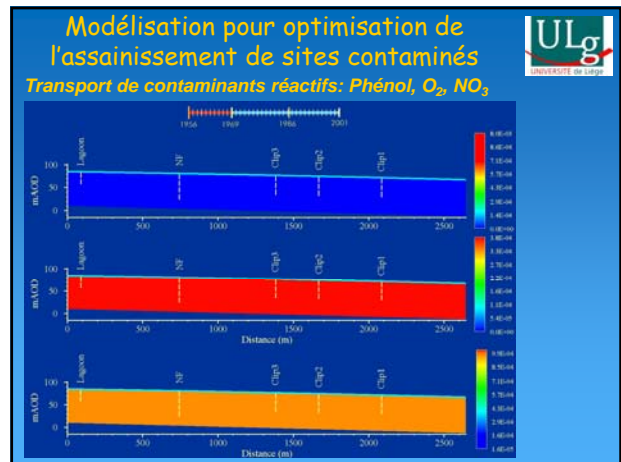
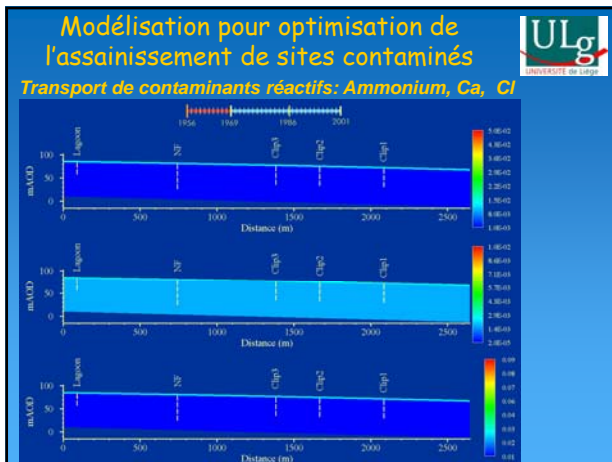
Vulnerability Index map (V<sub>i</sub>)

Control, analysis & interpretation

FINAL VULNERABILITY MAP







### Conclusions

Immanquablement les besoins en données relatifs à l'état quantitatif et qualitatif des nappes aquifères sont énormes

- acquérir, affiner et synthétiser les connaissances géologiques et hydrogéologiques des aquifères
- multiples applications utiles à tous

<http://www.hggeomac.ulg.ac.be/>

ULg  
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

### MERCI

<http://www.hggeomac.ulg.ac.be/>