

# Eaux souterraines

**A. Dassargues**  
Prof. ULg & KULeuven




Université de Liège  
ArGenCo  
G E 3  
Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

## Enjeux et défis de l'utilisation des eaux souterraines

- Introduction / Importance des enjeux
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus
- Physique de base: hydrostatique et loi de Darcy
- Exemples de nappes aquifères
- Qualité des eaux souterraines
- Contaminations des eaux souterraines
- Vulnérabilité et protection des eaux souterraines
- Modélisation: processus induits et couplés

2

Université de Liège  
ArGenCo  
G E 3  
Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

## Eaux souterraines dans le monde

Eau dans le monde

Eaux salées 97%  
glaciers 77.2%  
eaux douces 3%  
nappes souterraines 22.2%  
eaux disponibles 0.6%  
lacs 0.6%  
rivières 0.4%  
eaux atmosphériques 6.6%  
eaux dans le sol 22%

(L'Or Bleu, UNESCO, 1999)

Répartition des eaux continentales		Km <sup>3</sup>
Glaciers		27 500 000
Eaux souterraines		8 200 000
Humidité des sols		70 000
Lacs d'eau douce		100 000
Rivières		1 700
Mers intérieures		105 000
Atmosphère		13 000
Biosphère		1 100

(Observatoire des Eaux Souterraines, RW, 2002)

Université de Liège  
ArGenCo  
G E 3  
Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

## Eaux souterraines en Belgique

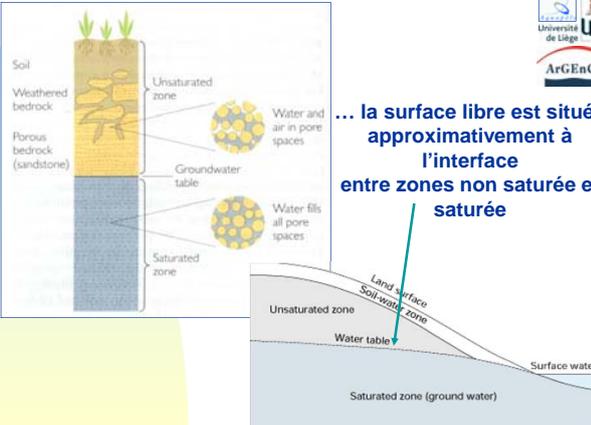
Eaux souterraines = ... plus de 70 % de l'approvisionnement en Belgique ( 81 % Wallonie et Bruxelles; environ 60 % Flandre)

Productivité de quelques grands ensembles aquifères en Belgique (en % de la production totale en eau souterraine):

1. Calcaires du Carbonifère (et assimilés) du synclinorium de Namur	18.6 %
2. Sables du Miocène	15.9 %
3. Calcaires du Carbonifère (et assimilés) du synclinorium de Dinant	11.4 %
4. Crétacé crayeux du bassin de Mons	9.7 %
5. Sables du Bruxellien	7.9 %
6. Crétacé crayeux de Hesbaye (~ 100.000 m <sup>3</sup> /j)	5.0 %
7. Alluvions de la Meuse (Wallonie)	4.0 %
8. Craies du Maastrichtien (autres)	3.0 %
9. Crétacé crayeux du Brabant	2.6 %
10. Terrasses alluviales de la Meuse	2.6 %
11. Socle ardennais	2.5 %
12. Sables du Landenien	1.8 %
13.	...
14.	...
15.	...

4

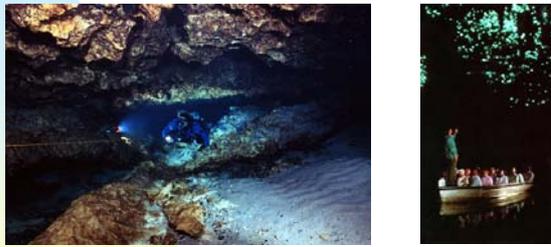
Université de Liège  
ArGenCo  
G E 3  
Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement



... la surface libre est située approximativement à l'interface entre zones non saturée et saturée

Université de Liège  
ArGenCo  
G E 3  
Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

## Le grand mythe (dans les médias et le grand public): les 'piscines' et 'rivières' souterraines



→ ... cela ne peut exister que dans le karst !

Université de Liège  
ArGenCo  
G E 3  
Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

### Avantages des eaux souterraines :

- une meilleure protection contre les contaminations
- une température quasi-constante
- une courte distance entre lieu de production et lieu de consommation
- une réponse à la demande très constante dans le temps et des maxima et minima différés par rapport à la pluviométrie
- auto-épuration et retards de propagation des contaminations dans le sous-sol par des processus bio-géo-physico-chimiques

7

### Désavantages :

- coûts de pompages et de captages
- incertitudes liées à l'hétérogénéité mal connue du sous-sol et récupération partielle
- substances dissoutes en plus grand nombre et en plus grandes quantités
- protection coûteuse et hasardeuse des eaux les plus vulnérables
- assainissement des eaux souterraines et des sites contaminés: très onéreux et long

### Enjeux importants ('Key issues') :

- descente et montée des niveaux dans les nappes
- gestion des accès et de l'utilisation
- salinisations
- autres contaminations

8

### Enjeux et défis de l'utilisation des eaux souterraines

- Introduction / Importance des enjeux
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus
- Physique de base: hydrostatique et loi de Darcy
- Exemples de nappes aquifères
- Qualité des eaux souterraines
- Contaminations des eaux souterraines
- Vulnérabilité et protection des eaux souterraines
- Modélisation: processus induits et couplés

9

### Eaux souterraines dans le cycle de l'eau

cycle décrivant la série de processus et d'états affectant l'eau:

- précipitations
- stockages
- ruissellement
- évaporation

(L'Or Bleu, UNESCO, 1999)

10

### Cycle hydrologique + bilans

- Evaporation } météorologie
- Précipitation } météorologie
- Ruissellement } Hydrologie de surface
- Evapotranspiration } Hydrologie de surface
- Infiltration dans les sols } Hydrologie de surface
- Ecoulements des eaux dans le sous-sol } hydrogéologie hydrologie des eaux souterraines
  - zone non saturée
  - zone saturée
- + transport de contaminants

bilans sur un bassin

11

### Bilan hydrologique

**Inflow = Outflow +/- Storage variations**  
**Entrée = Sortie +/- variation de stockages**

en un point (sur une petite surface) ...  $P = E + R + I$

dans un bassin ...  $P = E + Q + \Delta Res$

12

→ une étude de bilan doit être réalisée sur une ensemble fermé

→ ou alors tenir compte de flux entrants et sortants par les frontières latérales

$$P + Q_{in} = Q + EVT + Q_{out} + \Delta Res$$

13

→ tenir compte de flux entrants et sortants par les frontières latérales

14

### Enjeux et défis de l'utilisation des eaux souterraines

- Introduction / Importance des enjeux
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus
- Physique de base: hydrostatique et loi de Darcy
- Exemples de nappes aquifères
- Qualité des eaux souterraines
- Contaminations des eaux souterraines
- Vulnérabilité et protection des eaux souterraines
- Modélisation: processus induits et couplés

15

### Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus

- 2 propriétés fondamentales pour écoulement:
  - porosité ↔ aptitude à stocker de l'eau
  - perméabilité ↔ aptitude à conduire l'eau
- comment quantifier ces propriétés ?
- à quelle échelle ?
  - pas trop petite: plus de signification
  - pas trop grande: on lisse tout

(d'après Lattman & Parizek, 1964)

16

### Importance de l'interprétation géologique

...pour établir la géométrie et les propriétés de l'aquifère considéré

(modifié d'après Walker & Kant, 1984)

17

### Simulations stochastiques conditionnelles

... calculs sur n réalisations équiprobables vérifiant toutes les données directes et indirectes

18

### Enjeux et défis de l'utilisation des eaux souterraines

- Introduction / Importance des enjeux
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus
- Physique de base: hydrostatique et loi de Darcy
- Exemples de nappes aquifères
- Qualité des eaux souterraines
- Contaminations des eaux souterraines
- Vulnérabilité et protection des eaux souterraines
- Modélisation: processus induits et couplés

19

### Hydrostatique

... l'énergie potentielle en un point du sous-sol saturé est exprimée habituellement en mètres de colonne de fluide:

→ charge hydraulique, hauteur piézométrique

$$h = \frac{\Phi_{tot}}{g} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$

Profondeur jusqu'à la nappe

Charge de pression  $h_p = \frac{p}{\rho \cdot g}$

Élévation du point  $h_z = z$

Hauteur piézométrique  $h = z + \frac{p}{\rho \cdot g}$

Point considéré

Plan de référence

20

### Porosité

→ ... le volume des pores divisé par le volume total (grains solides et pores)

→ porosité totale  $n = \frac{V_v}{V_t}$

→ ... la porosité totale est constituée de deux composantes: la porosité efficace et la capacité de rétention

→  $n_e + S_r = n$

21

### Physique de base: loi de Darcy

→ ... loi expérimentale

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

aire de la section, A

sable

(d'après Homberger et al., 1998)

22

### Conductivité hydraulique et loi de Darcy

→ ... loi expérimentale

→ quantité d'eau par unité de temps à travers un milieu poreux:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

→ **K** le coefficient de perméabilité, la conductivité hydraulique, perméabilité à l'eau (par abus de langage: perméabilité) du milieu poreux (m/s)

→ ... le débit spécifique:  $q = \frac{Q}{A}$

en  $m^3/(m^2 \cdot s)$  donc en m/s

23

### Conductivité hydraulique et loi de Darcy

ce débit spécifique est improprement appelé 'vitesse de Darcy'

→ ... il ne s'agit que d'un débit divisé par une surface A

→ ... mais A n'est pas la section réelle d'écoulement

→ la section réelle d'écoulement est:  $A \cdot n_e$

→ ... pour obtenir une valeur moyenne de la vitesse d'écoulement:

$$v_e = \frac{q}{n_e} = \frac{K \cdot \Delta h}{n_e \cdot L} \quad \text{m/s}$$

'vitesse d'advection' (vitesse effective)

24

### Application de la loi de Darcy à grande échelle

25

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

### Conductivité hydraulique et perméabilité intrinsèque

**K** dépend :

- des propriétés du fluide concerné par les écoulements:
  - la viscosité
  - le poids spécifique
- des propriétés du milieu poreux où l'écoulement a lieu:
  - granulométrie, forme des grains, répartition et forme des pores, porosité intergranulaire

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu}$$

- perméabilité intrinsèque/ perméabilité (m<sup>2</sup>)
- masse spécifique du fluide (kg/m<sup>3</sup>)
- accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>)
- viscosité dynamique (kg/(m.s), N.s/m<sup>2</sup> ou Pa.s)

26

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

### Application de la loi de Darcy

dans un milieu isotrope, cet écoulement est normal aux isohypses (courbes d'égales valeurs de hauteur piézométrique)

carte des hauteurs piézométriques

les directions d'écoulement

27

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

### ... fournit une première compréhension du système hydrogéologique et des interactions rivière-nappe

28

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

### ... coin des mathéux ...

écoulement transitoire en milieu saturé

... principe de conservation de la masse: entrée = sortie + variation d'emménagement

$$-\text{div}(\rho \underline{q}) - \rho q = \frac{\partial(\rho)}{\partial t} = \rho \cdot S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\text{div}(\underline{K} \text{grad} h) - q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - q_i = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\text{div} \left( \frac{k}{\mu} (\text{grad} p + \rho \cdot g \text{grad} z) \right) - q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \left( \frac{S_s}{\rho \cdot g} \right) \cdot \frac{\partial p}{\partial t}$$

en conditions strictement saturées

29

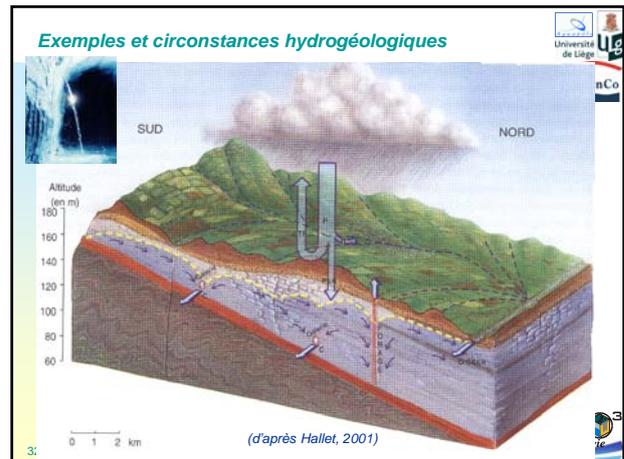
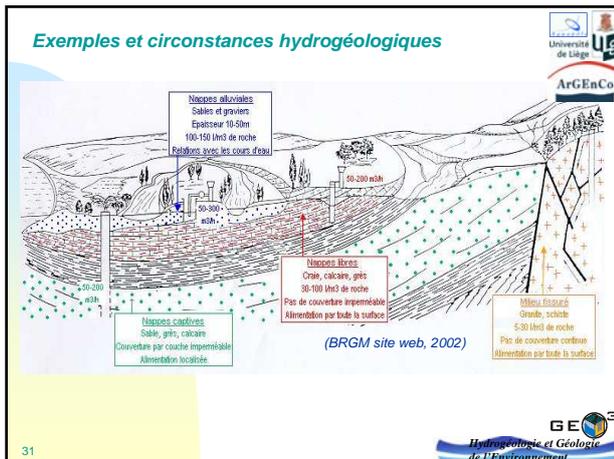
Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

### Enjeux et défis de l'utilisation des eaux souterraines

- Introduction / Importance des enjeux
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus
- Physique de base: hydrostatique et loi de Darcy
- Exemples de nappes aquifères
- Qualité des eaux souterraines
- Contaminations des eaux souterraines
- Vulnérabilité et protection des eaux souterraines
- Modélisation: processus induits et couplés

30

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement



- ### Enjeux et défis de l'utilisation des eaux souterraines
- Introduction / Importance des enjeux
  - Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
  - Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus
  - Physique de base: hydrostatique et loi de Darcy
  - Exemples de nappes aquifères
  - Qualité des eaux souterraines
  - Contaminations des eaux souterraines
  - Vulnérabilité et protection des eaux souterraines
  - Modélisation: processus induits et couplés

### Eléments majeurs et mineurs ...

Majeur (> 5mg/L)		Mineur (.01 – 5 mg/L)	
Ca <sup>2+</sup>	Calcium	B <sup>2+ / 3+</sup>	Bore
Mg <sup>2+</sup>	Magnesium	Fe <sup>2+ / 3+</sup>	Fer
Na <sup>+</sup>	Sodium	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrate
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Bicarbonate	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammonium
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulphate	K <sup>+</sup>	Potassium
Cl <sup>-</sup>	Chlore	Sr <sup>2+</sup>	Strontium
Si	Silicium	Mn <sup>2+</sup>	Manganèse

**Eléments traces (<.01 mg/L)**

Tout le reste!

Résidu sec = TDS (Total Dissolved Solid)  
(après évaporation complète: résidu solide)

### Qualité des eaux souterraines: éléments d'hydrogéochimie de base

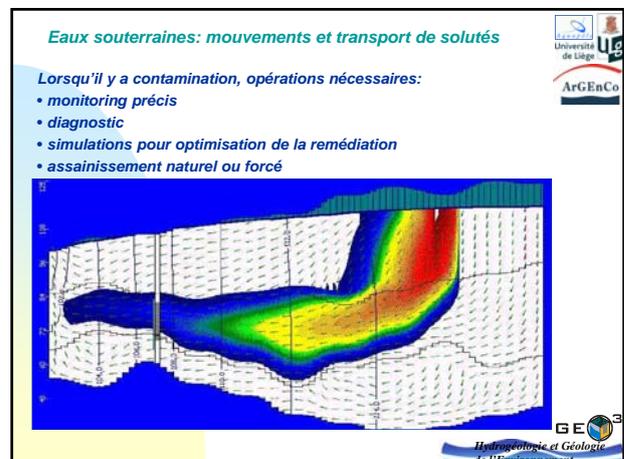
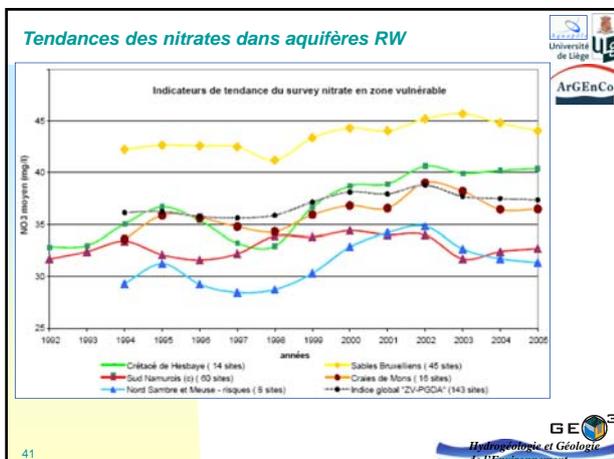
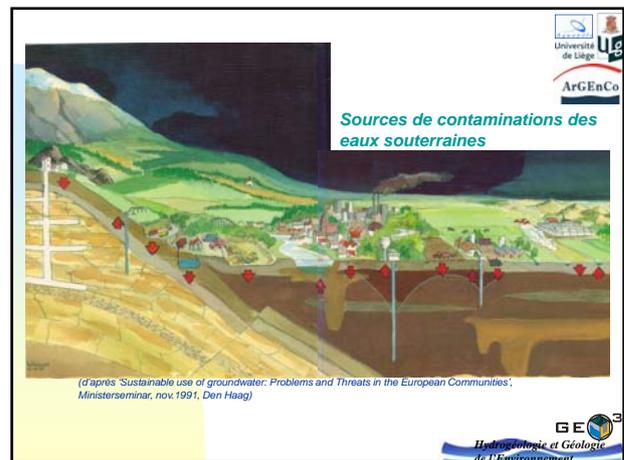
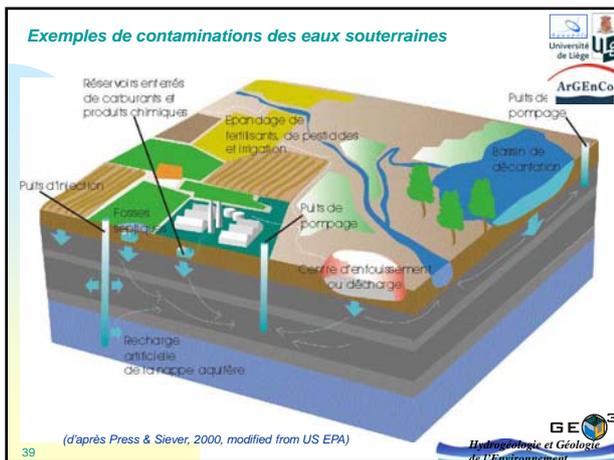
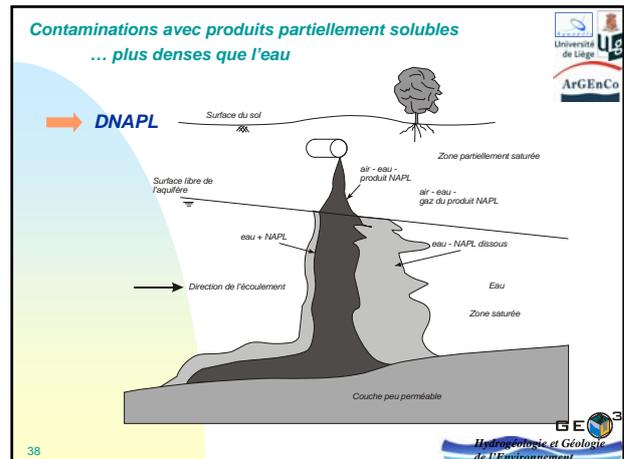
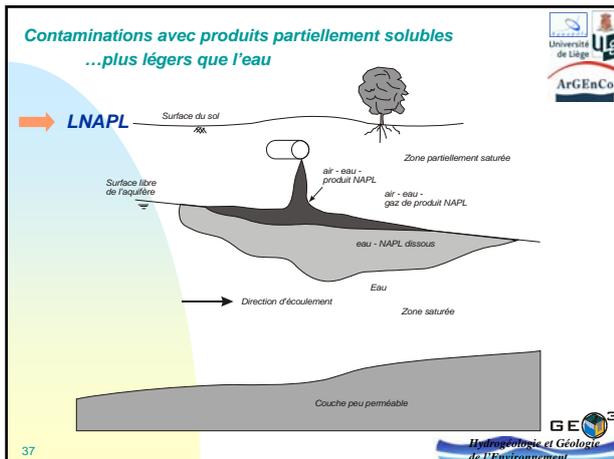
Il est difficile de prélever un échantillon dont la composition est et reste réellement représentative de ce qui existe dans le sous-sol:

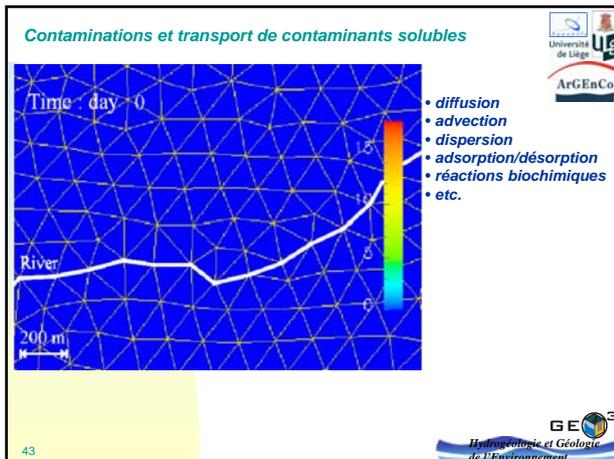
- \* pression change
- \* O<sub>2</sub> de l'atmosphère
- \* Eh et pH changent

➔ in situ monitoring

**⚠ aux moyennes ('depth-averaged' conditions) pour échantillonnage (pompage): stabilisation nécessaire de la conductivité**

- ### Enjeux et défis de l'utilisation des eaux souterraines
- Introduction / Importance des enjeux
  - Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
  - Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus
  - Physique de base: hydrostatique et loi de Darcy
  - Exemples de nappes aquifères
  - Qualité des eaux souterraines
  - Contaminations des eaux souterraines
  - Vulnérabilité et protection des eaux souterraines
  - Modélisation: processus induits et couplés





### ... coin des matheux... équations de transport de solutés au sein des eaux souterraines

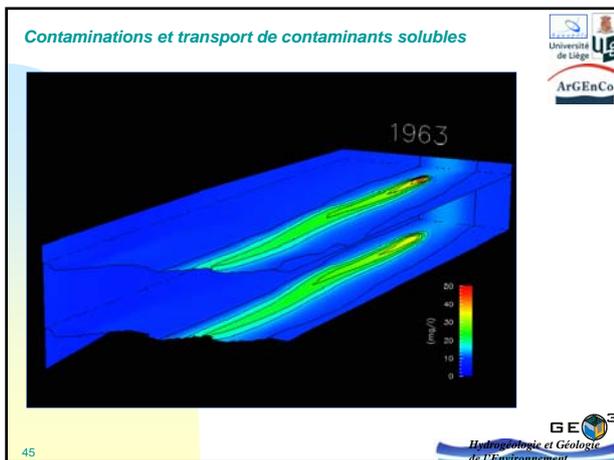
Advection, dispersion, diffusion + adsorption/désorption + dégradation

- dans les aquifères :
 
$$R \cdot \rho \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = \rho \cdot \text{div} \left( D_b \cdot \text{grad} C - v_e \cdot C \right) - \lambda \cdot \rho \cdot C \cdot R + \rho^* \cdot C^* \cdot \frac{q^i}{n_e}$$
 avec  $R = \left[ 1 + \left( \frac{\rho_b}{n_e} \right) \cdot K_d \right]$
- dans les couches peu perméables:
 
$$R \cdot \rho \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = \rho \cdot \text{div} \left( D_m \cdot \text{grad} C + \frac{n_e}{n} \cdot \underline{D} \cdot \text{grad} C - \frac{n_e}{n} \cdot v_e \cdot C \right) - \lambda \cdot \rho \cdot C \cdot R + \rho^* \cdot C^* \cdot \frac{q^i}{n}$$
 avec  $R = \left[ 1 + \left( \frac{\rho_b}{n} \right) \cdot K_d \right]$

ArGENCo

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

44



### Contaminations et transport de contaminants solubles Réactions d'atténuation naturelle (catalyseurs = bactéries)

- Respiration aérobie
- Dénitrification
- Réduction du manganèse (IV)
- Réduction du fer ferrique (III)
- Réduction des sulfates
- Méthanogenèse (fermentation et respiration utilisant l'hydrogène et l'acétate, produisant du méthane, de l'eau et du CO<sub>2</sub>)

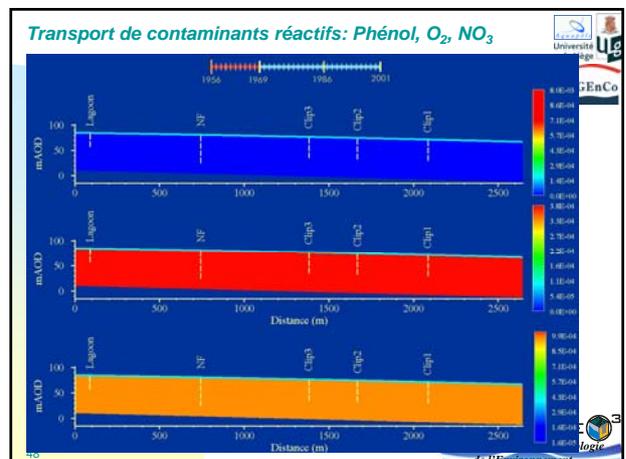
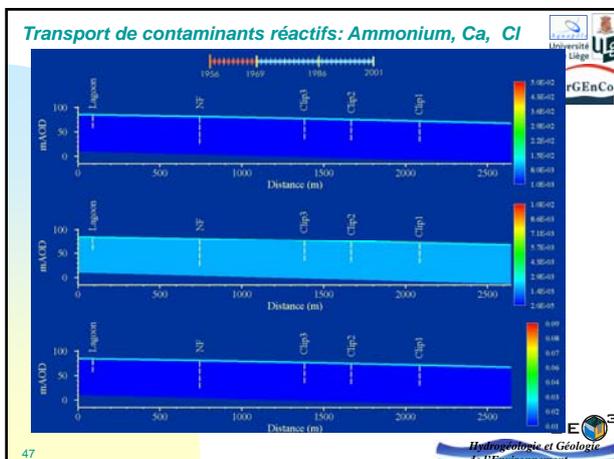
after Wiedemeier, 1997

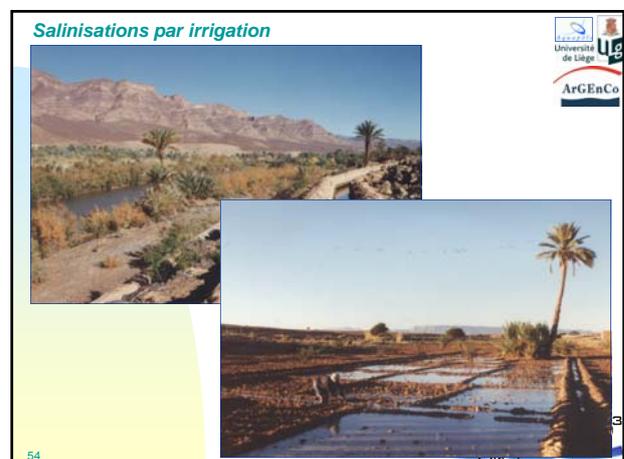
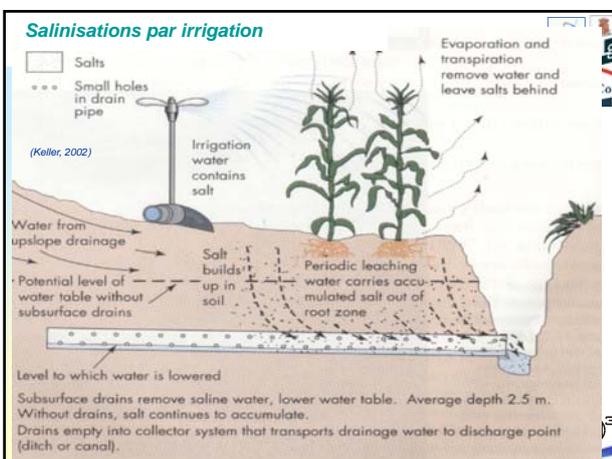
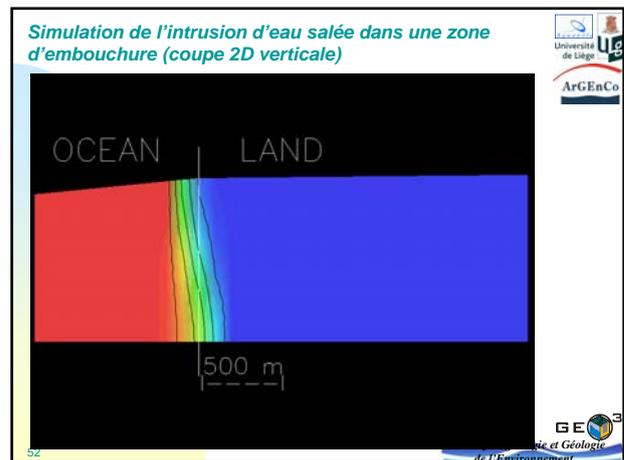
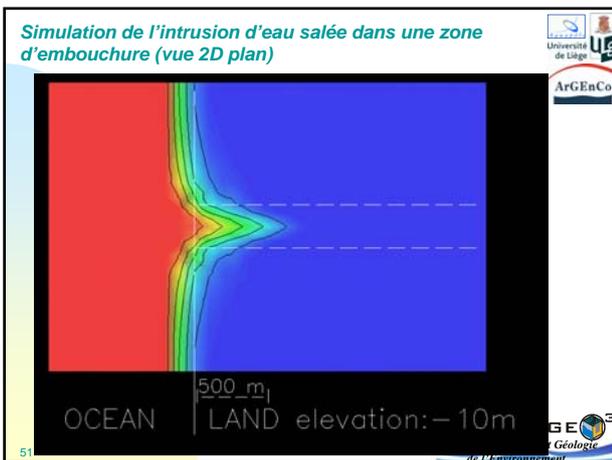
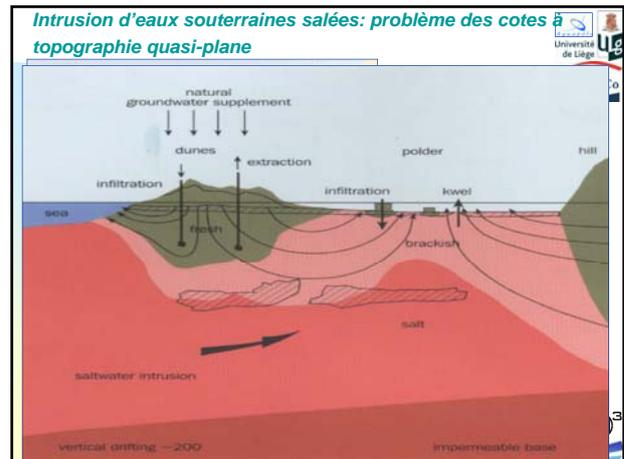
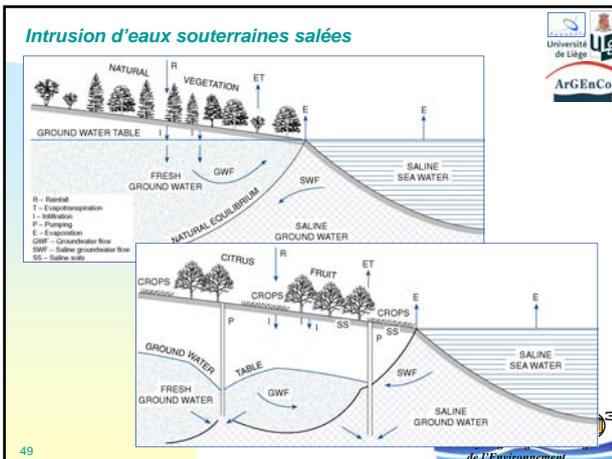
Donneur d'électron (carburant) + Accepteur d'électron (O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, Fe (III), SO<sub>4</sub>) → Accepteurs de produits métaboliques (Fe(II), CH<sub>4</sub>) + Energie

ArGENCo

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

46





### Enjeux et défis de l'utilisation des eaux souterraines

- Introduction / Importance des enjeux
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus
- Physique de base: hydrostatique et loi de Darcy
- Exemples de nappes aquifères
- Qualité des eaux souterraines
- Contaminations des eaux souterraines
- Vulnérabilité et protection des eaux souterraines
- Modélisation: processus induits et couplés

55

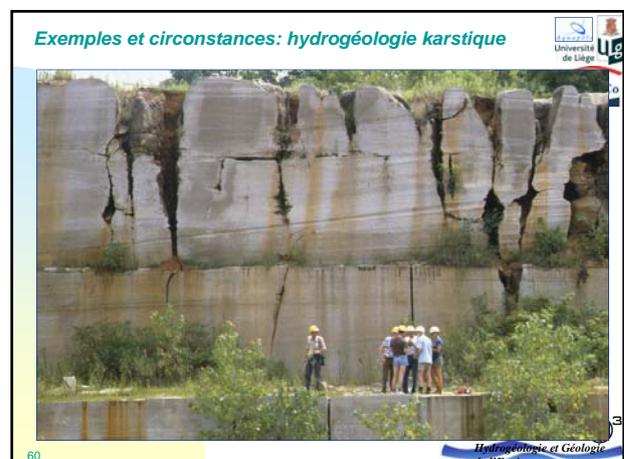
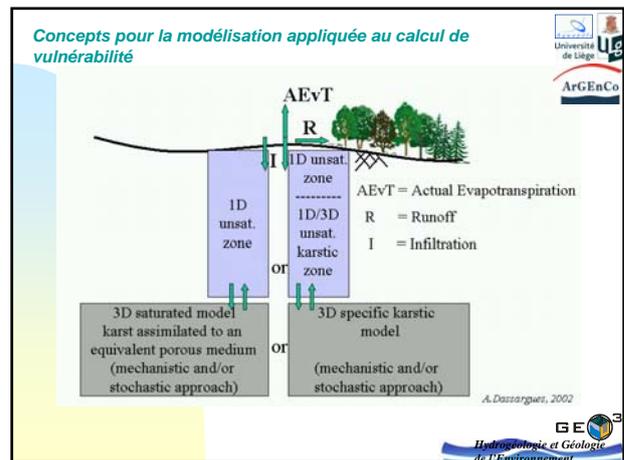
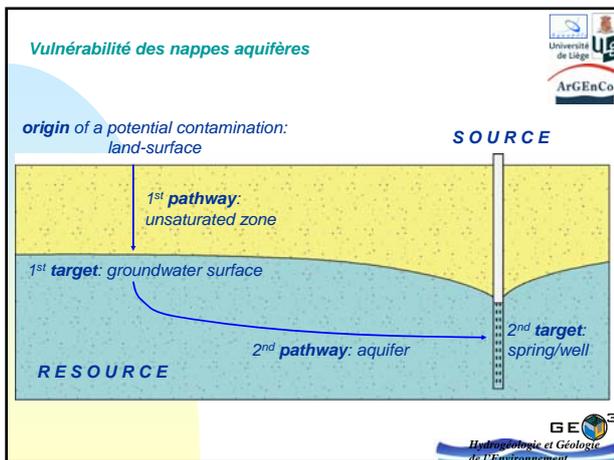
### Estimation du risque de contamination de l'eau souterraine

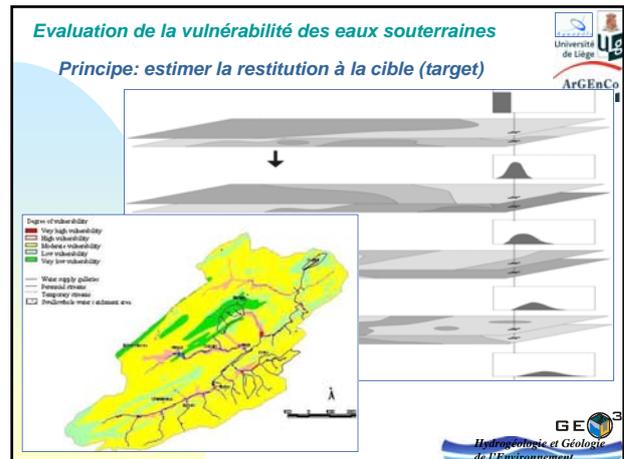
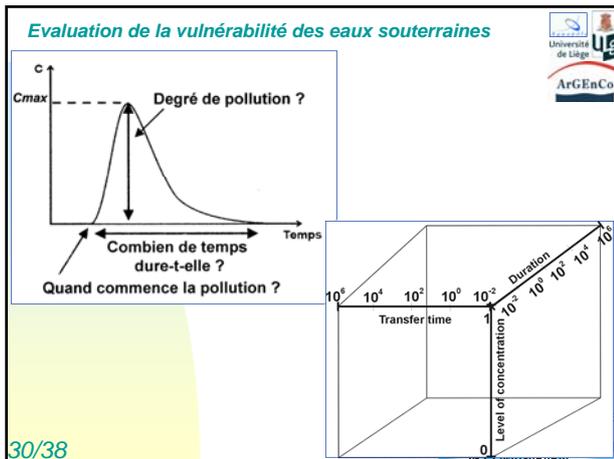
Aléa et Risque (Hazard and Risk)  
**Risque = Aléa (naturel et induit) convolué avec Vulnérabilité (des territoires/infrastructures qu'il affecte)**

Bonne analyse de risque:

- étudier et quantifier les phénomènes naturels (ou induits), leurs intensités, occurrences, zones affectées, ... cartes d'aléas, ...
- étudier et quantifier la vulnérabilité du territoire, du sous-sol, des infrastructures par rapport à ces processus cartes de vulnérabilité, ...

enjeux sont importants à estimer  
 carte de risque  
 ...peut être subjective (relative aux enjeux jugés les plus importants conventionnellement)





- ### Zones de prévention / protection autour des captages en Région Wallonne
- Zone I ou 'zone de captage'  
installations + 10 m dans toutes les directions: la compagnie d'eau doit en être propriétaire
  - Zones II ou 'zones de prévention'
    - \* zone IIa: la distance dans toutes les directions correspondant à un temps de transfert de polluant de 24 h dans la zone saturée + tous les points d'infiltration préférentielle (pertes, dolines, ...)
    - \* zone IIb: la distance dans toutes les directions correspondant à un temps de transfert de polluant de 50 jours ... minimum: 100 m dans les aquifères sableux, 500 m dans les aquifères graveleux, 1000 m dans les aquifères fissurés et karstiques
  - Zone III ou 'zone d'observation'  
l'ensemble du bassin drainé par le captage
- 64



### Zones de prévention / protection autour des captages en Région Wallonne

Z1: 10 m  
Z1a: temps de transfert < 24 h  
Z1b: temps de transfert < 50 j

67

### Zones de prévention / protection autour des captages

**Méthodologie la plus rigoureuse à ce jour:**  
Rmq: l'échelle de l'étude doit correspondre à l'échelle du problème étudié

- Géologie, géomorphologie, données hydrologiques de base
- Prospection géophysique
- Forage de piézomètres et puits d'observation
- Pompages d'essai dans chaque puits et/ou piézomètre
- Multi-essais de traçages en conditions de pompages
- Premières interprétations analytiques
- Développement d'un modèle 2D ou 3D d'écoulement et de transport considérant explicitement l'hétérogénéité des terrains
- Calibration pour l'écoulement (sur piézométrie mesurée)
- Calibration pour le transport (sur les courbes de restitution mesurées)
- Simulations du transport de polluant pour des injections simulées
- Tracé des 'isochrones' autour du point de captage

68

### Essais de traçage pour étude de zone de protection

69

### Essais de traçage pour étude de zone de protection

70

### Enjeux et défis de l'utilisation des eaux souterraines

- Introduction / Importance des enjeux
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Défis de la quantification en milieux souterrains hétérogènes et peu connus
- Physique de base: hydrostatique et loi de Darcy
- Exemples de nappes aquifères
- Qualité des eaux souterraines
- Contaminations des eaux souterraines
- Vulnérabilité et protection des eaux souterraines
- Modélisation: processus induits et couplés

71

### Modélisation: processus induits et couplés

attention aux processus couplés

72



Université  
de Liège  
ArGEEnCo

**Merci !**  
[http://www.argenco.ulg.ac.be/geo3\\_rech\\_hydro.php](http://www.argenco.ulg.ac.be/geo3_rech_hydro.php)

G E 3  
Hydrogéologie et Géologie  
de l'Environnement

73