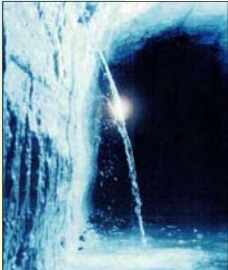




Eaux souterraines... Enjeux et défis actuels




A. Dassargues
Prof. ULg & KULeuven

Woluwé Saint-Lambert 30/04/2013

Eaux souterraines Enjeux et défis actuels

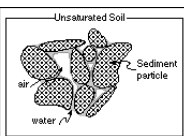
- Introduction
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Les écoulements souterrains et les propriétés du sous-sol
- Qualité naturelle et contaminations des eaux souterraines
- Défis relatifs à la protection et à la gestion des ressources en eaux souterraines
- ...



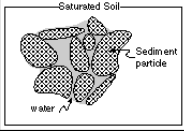
Le sous-sol: une éponge

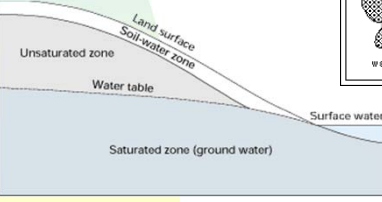

- sous-sol partiellement saturé (non saturé)

Unsat. Soil



Saturated Soil



Halte au grand 'mythe' (dans les médias et le grand public): les 'piscines' et 'rivières' souterraines



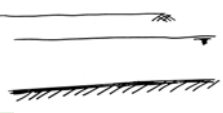

➔ ...cela ne peut exister que dans le karst !



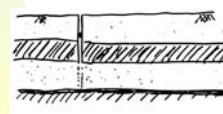
Aquifères – Nappes aquifères - Nappes d'eau souterraine

Nappe ou Aquifère = couche géologique dont l'eau contenue est exploitable ...

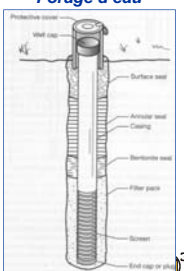
Nappe libre




Nappe captive



Forage d'eau

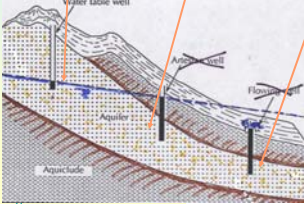




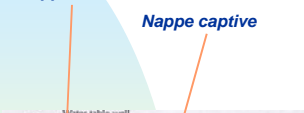
Types de nappes aquifères

Nappe ou Aquifère = couche géologique dont l'eau contenue est exploitable ...


Nappe libre




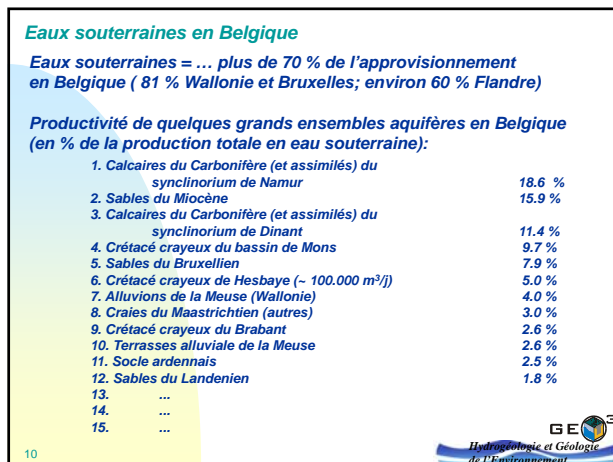
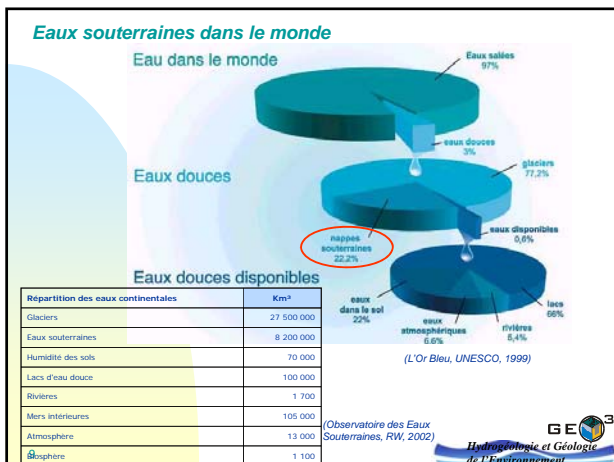
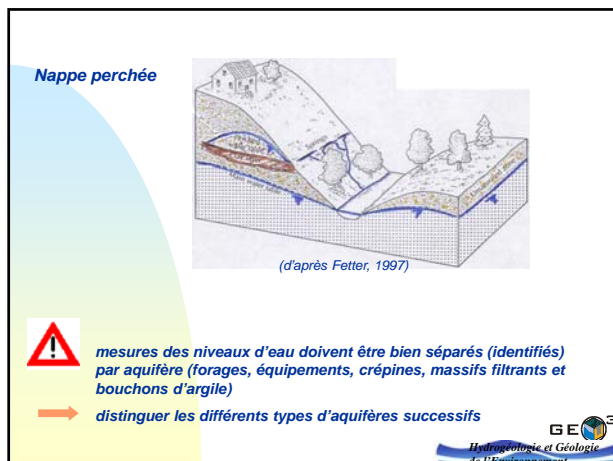
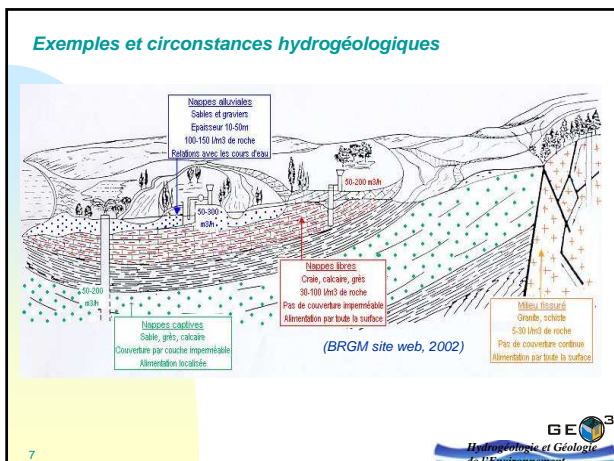
Nappe captive



Nappe artésienne








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

13  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement


Eaux souterraines
Enjeux et défis actuels

- Introduction
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Les écoulements souterrains et les propriétés du sous-sol
- Qualité naturelle et contaminations des eaux souterraines
- Défis relatifs à la protection et à la gestion des ressources en eaux souterraines
- ...

14  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement


Eaux souterraines dans le cycle de l'eau

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

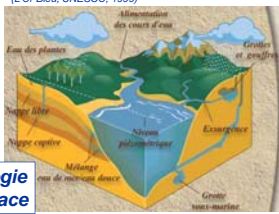


- précipitations
- stockages
- ruissellement
- évaporation

(L'Or Bleu, UNESCO, 1999)

15  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

Cycle hydrologique + bilans




(L'Or Bleu, UNESCO, 1999)

- Evaporation
- Précipitation
- Ruissellement
- Evapotranspiration
- Infiltration dans les sols
- Ecoulements des eaux dans le sous-sol
 - zone non saturée
 - zone saturée

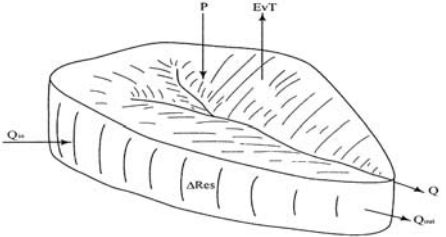
→ + transport de contaminants

→ bilans sur un bassin


16  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

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

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




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

17  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

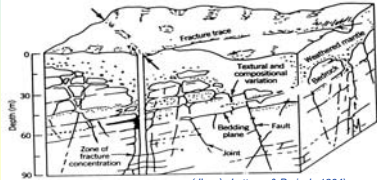
Eaux souterraines
Enjeux et défis actuels

- Introduction
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Les écoulements souterrains et les propriétés du sous-sol
- Qualité naturelle et contaminations des eaux souterraines
- Défis relatifs à la protection et à la gestion des ressources en eaux souterraines
- ...

18  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

Problématique de la quantification en milieux hétérogènes 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 Laitman & Parizek, 1964)

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

Aptitude à stocker de l'eau: porosité et compressibilité du milieu

→ lorsqu'un volume de milieu souterrain 'gagne' ou 'perd' un volume d'eau:

- soit changement de l'état non-saturé à saturé (ou vice-versa) : porosité effective / porosité de drainage
- soit le milieu reste saturé mais changement de pression entre les grains → compressibilité



Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

Aptitude à conduire l'eau: loi d'écoulement de Darcy

→ ... l'eau souterraine s'écoule des hauteurs piézométriques plus élevées vers les plus basses

perméabilité

$$q = K \cdot \frac{\Delta h}{L}$$


Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

Application de la loi de Darcy

→ ... l'eau souterraine s'écoule des hauteurs piézométriques plus élevées vers les plus basses



Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

Eaux souterraines

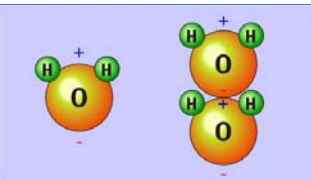
Enjeux et défis actuels

- Introduction
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Les écoulements souterrains et les propriétés du sous-sol
- Qualité naturelle et contaminations des eaux souterraines
- Défis relatifs à la protection et à la gestion des ressources en eaux souterraines
- ...

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

Qualité de l'eau

L'eau est un excellent solvant...



- eau souterraine: jamais pure
- composition dépend :
 - * composition initiale
 - * pression partielle de la phase gazeuse
 - * types de minéraux et roches traversés ou en contact
 - * pH et Eh (potentiel d'oxydo-réduction) de la solution

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement


Éléments majeurs et mineurs ...

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

Éléments traces (<.01 mg/L)

Tout le reste!

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

25  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

Qualité de l'eau


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
- * O₂ de l'atmosphère
- * Eh et pH changent

➔ **in situ monitoring**


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




26  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

Chimie des eaux naturelles

Élément (mg/l)	Eau de pluie (a)	Rivière (b)	Eau sout. dans des roches silicatées (c)	Eau sout. dans des roches carbonatées (d)	Eau de mer (e)	Lac salé (f)
Na ⁺	0.6	6.3	4.0	13.0	10763	27131
K ⁺	0.4	2.3	1.0	3.0	399	463
Ca ²⁺	0.9	15.0	8.0	55.0	412	4.10
Mg ²⁺	0.2	4.1	2.0	28.0	1294	0.97
HCO ₃ ⁻	2.0	58.4	40.0	255.0	142	n.d.(g)
SO ₄ ²⁻	3.0	11.2	1.0	48.0	2712	153
Cl ⁻	0.4	7.8	1.0	14.0	19353	5718
NO ₃ ⁻	0.3	1.0	n.d.	n.d.	< 1	< 0.1
H ₂ SiO ₄	0.16	20.9	30.4	n.d.	< 9	377
C.E. (h) (µS/cm)	9.8	143	76.4	570	3.5 % (i)	119228
pH	5.5	n.d.	6.8	7.5	8.1 – 8.4	10.0

27  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement


(a) valeurs moyennes de centaines d'analyses chimiques ...
 (b) moyenne mondiale des analyses chimiques de rivières ...
 (c) valeurs moyennes de 191 échantillons prélevés dans 90 sites différents ...
 (d) moyenne de 4 analyses moyennes ...
 (e) valeurs moyennes d'analyse d'eau de mer ...
 (f) valeurs moyennes de 15 échantillons en surface du Lac Bogoria (Kenya) ...
 (g) n.d. = non déterminé
 (h) C.E. = Conductivité Electrique ... exprime la qualité globale d'un échantillon d'eau
 (i) salinité relative

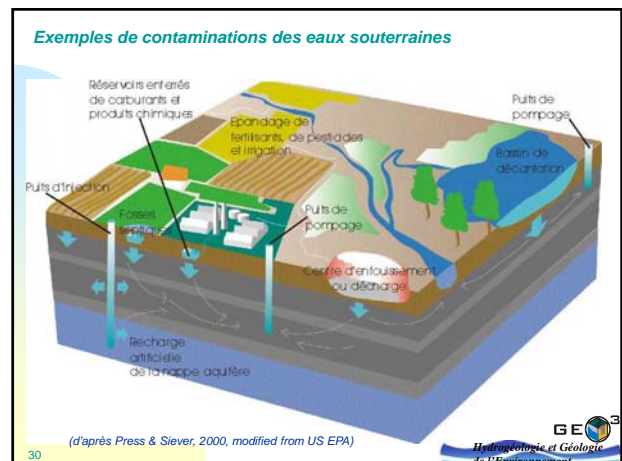
28  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

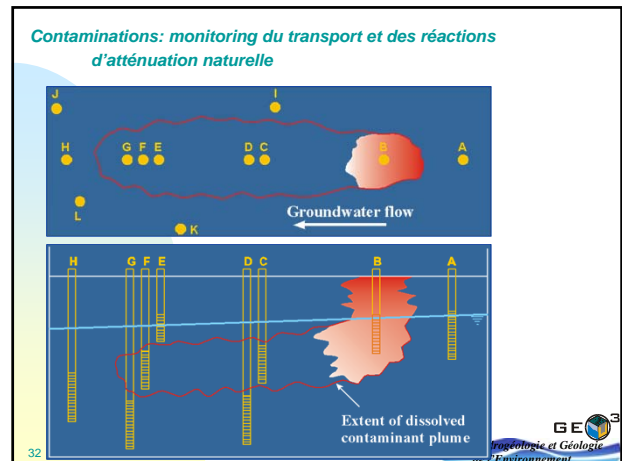
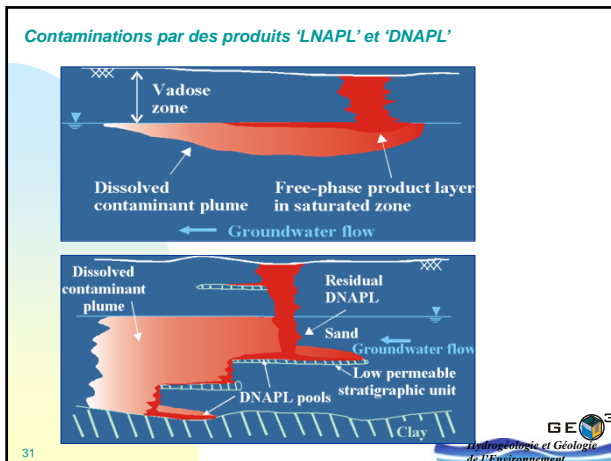
Qualité des eaux destinées à la consommation humaine

Élément (mg/l)	Directives CE CMA (V.G.) (a)	Directive OMS V.G.	Drinking Water Standards (USA) CMA
Na ⁺	150 (20)	200	200
K ⁺	12 (10)	-	-
Ca ²⁺	- (100)	Ca + Mg = 500	200
Mg ²⁺	50 (30)	-	125
HCO ₃ ⁻	-	-	500
SO ₄ ²⁻	250 (25)	400	250
Cl ⁻	- (25)	250	250
NO ₃ ⁻	50 (25)	44	20
H ₂ SiO ₄	-	-	-
TDS (b)	1500	1000	500
pH	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	-

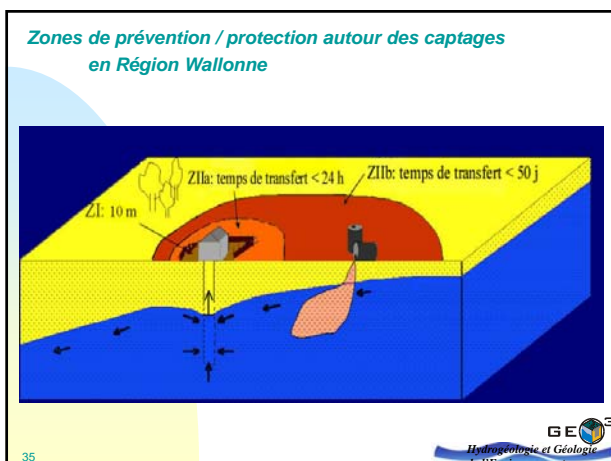
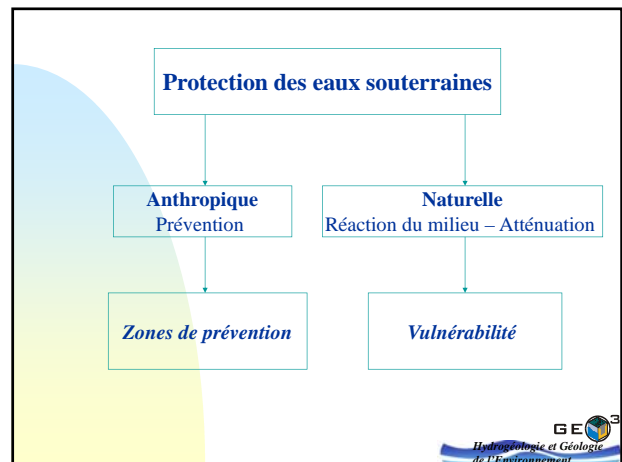
(a) CMA = Concentration Maximum Admissible ; V.G. = Valeur Guide
 (b) TDS = Total Dissolved Species = somme des espèces dissoutes

29  Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement





- ### Eaux souterraines
- #### Enjeux et défis actuels
- Introduction
 - Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
 - Les écoulements souterrains et les propriétés du sous-sol
 - Qualité naturelle et contaminations des eaux souterraines
 - Défis relatifs à la protection et à la gestion des ressources en eaux souterraines
 - ...
- 33



- ### Zones de prévention / protection autour des captages
- #### Méthodologie la plus rigoureuse à ce jour:
- 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
- 36



A l'échelle de l'aquifère: les cartes de vulnérabilité

Aléa et Risque (Hazard and Risk)
Risque = Aléa (naturel et induit) x 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)

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

