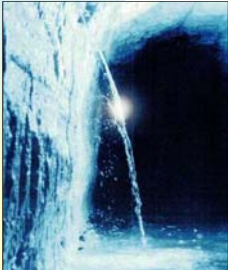


ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

L'eau dans tous ses états...

Enjeux et difficultés de la gestion des eaux souterraines



A. Dassargues
Prof. ULg & KULeuven 20/01/2005

Aquapôle

Hydrogéologie

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Enjeux et difficultés de la gestion des eaux souterraines

- Introduction / Importance des enjeux
- Eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Problématique de la quantification en milieux hétérogènes peu connus
- Physique de base: loi de Darcy
- Types de nappes aquifères
- Variation de stockage = Coefficient d'emmagasinement
- Phénomènes induits/couplés
- Exemples de subsidence induite, contaminations, salinisations, intrusion d'eaux salées, ...
- Développements récents: mesures et modélisations pour une aide à la gestion

Hydrogéologie

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Introduction / Importance des Eaux souterraines

Hydrogéologie = branche de l'hydrologie qui traite de l'eau souterraine en tenant compte des conditions géologiques

Différentes spécialités y sont mêlées:

- géologie
- hydrologie de surface, hydraulique
- physique et chimie
- biologie
- ...
- analyse numérique et techniques de modélisations
- géostatistiques et analyses de risques
- ...

grande évolution dans les méthodologies et techniques appliquées ... pour pouvoir fournir des réponses quantifiées concernant les aspects:


- quantité
- qualité

Hydrogéologie

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Eaux souterraines dans le monde

Eau dans le monde



Eaux douces disponibles

| Repartition des eaux continentales | Km ³ |
|------------------------------------|-----------------|
| 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 |

(L'Or Bleu, UNESCO, 1999)

Hydrogéologie

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

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 m³/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 alluviale de la Meuse 2.6 %
11. Socle ardennais 2.5 %
12. Sables du Landenien 1.8 %
13. ...
14. ...
15. ...

Hydrogéologie

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

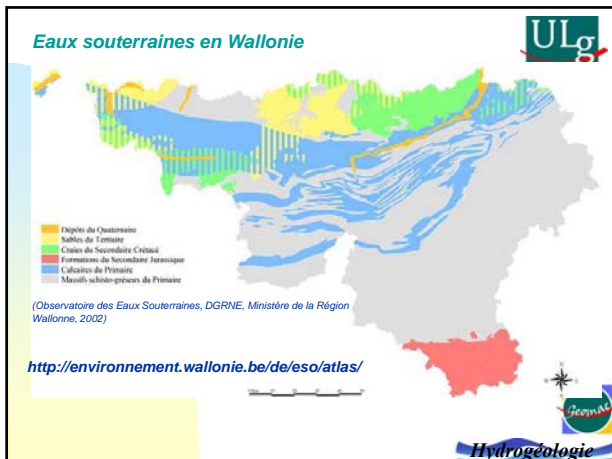
Eaux souterraines en Belgique

Comparaison avec Eaux de surface:

Référence: Crétacé crayeux de Hesbaye ~ 100.000 m³/j

- 1) fleuves, canaux et rivières:
 - Canal Albert ~ 120.000 m³/j (Antwerpse Water Werken)
 - Canal de la Nèthe (Lier-Duffel-Rumst) ~ 350.000 m³/j (Antwerpse Water Werken)
 - Meuse (Taillefer - Namur) ~ 260.000 m³/j (CIBE)
- 2) barrages:
 - Eupen ~ 80.000 m³/j
 - Gileppe ~ 45.000 - 75.000 m³/j
 - Nisramont ~ 1500 m³/j
 - Couvin ~ 8000 m³/j
- 3) réservoirs:
 - Kluizen ~ 40.000 m³/j
 - Blankaart (Yser) ~ 40.000 m³/j (chiffres du Service Géologique, 1990)

Hydrogéologie



Avantages :

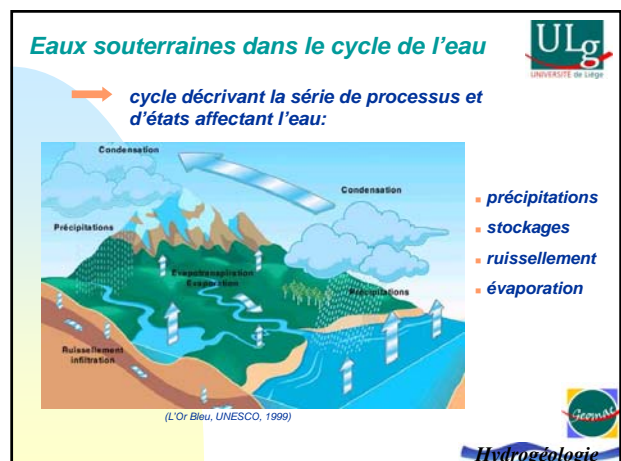
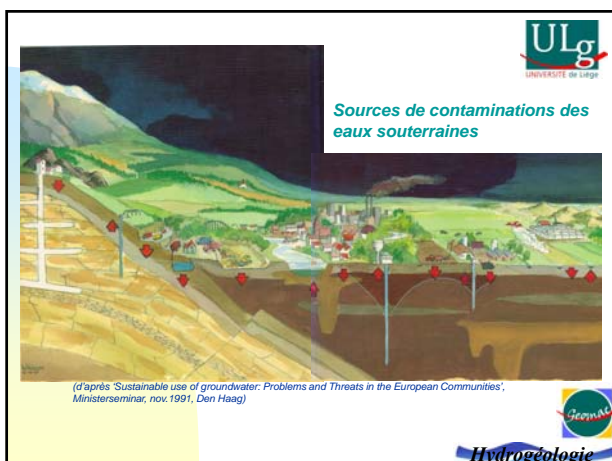
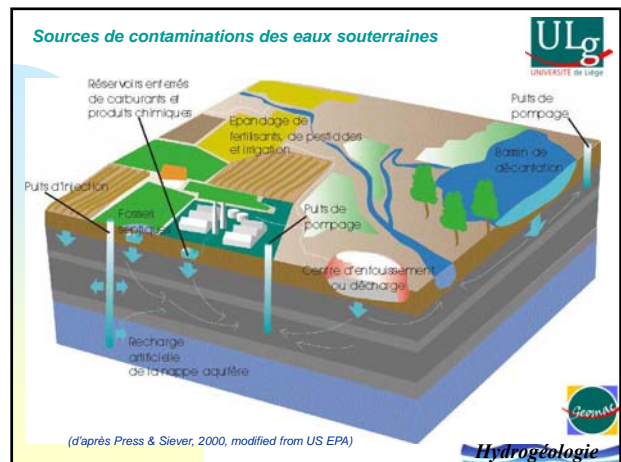
- une meilleure protection contre les contaminations
- une température quasi-constante
- une courte distance entre lieu de production et lieu de consommation
- une réponse à la demande très constante dans le temps et des maxima et minima différés par rapport à la pluviométrie
- auto-épuration et retards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

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



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

Hydrologie de surface

hydrogéologie hydrologie des eaux souterraines

+ transport de contaminants

bilans sur un bassin

Hydrogéologie

Bilan hydrologique

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

Ruissellement/Runoff

Précipitations/Rainfall

Evapo-transpiration

Infiltration

Aquifère

Variation des réserves

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

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

Hydrogéologie

Bilan hydrologique ... en plus détaillé

$P = E + R + Q_{gw} + \Delta Res$

Q mesuré à l'exutoire du bassin

... mais applicable sur quel bassin ?

Hydrogéologie

Bassin hydrologique ≠ bassin hydrogéologique = bassin hydrographique

Limite hydrographique ou hydrologique de surface

Bassin 1

Bassin 2

Limite hydrogéologique

niveau d'eau dans la nappe

Hydrogéologie

une étude de bilan doit être réalisée sur une ensemble fermé

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

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

Hydrogéologie

tenir compte de flux entrants et sortants par les frontières latérales

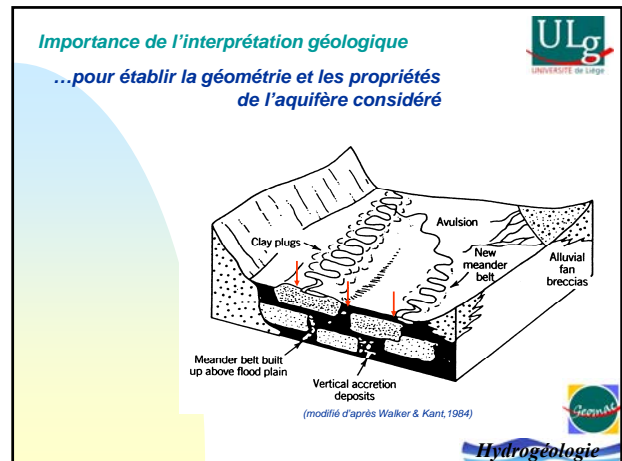
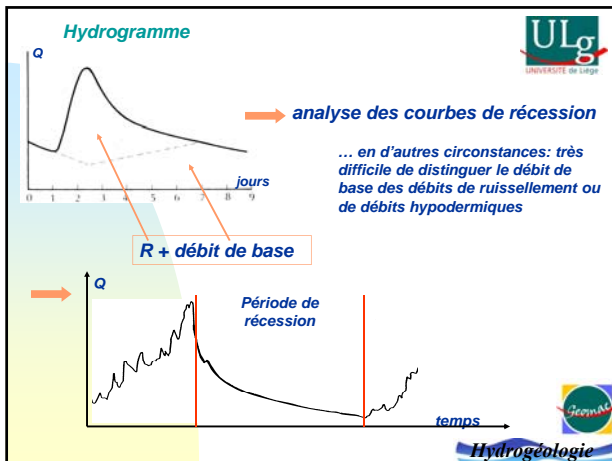
SUD

NORD

Altitude (en m)

0 1 2 km

Hydrogéologie



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 Lattman & Parizek, 1964)

Hydrogéologie

Hypothèses et concept d'EVR

l' EVR (REV) est le volume considéré de milieu souterrain pour lequel les propriétés vont être quantifiées (par des valeurs moyennes, équivalentes)

- assez grand pour être au delà de l'échelle microscopique
- assez petit pour éviter des lissages nuisibles à la représentation du processus

... ce concept sous-entend implicitement que le milieu est continu (et poreux)

- l' EVR dépend du problème étudié et des objectifs de l'étude
- l' EVR est utilisé pour les écoulements souterrains mais aussi pour le transport de contaminants ... ou tout autre 'quantification' dans un milieu souterrain

Hydrogéologie

Hydrostatique

... l'énergie potentielle 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 $h_s = z$

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

Point considéré

Plan de référence

Hydrogéologie

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

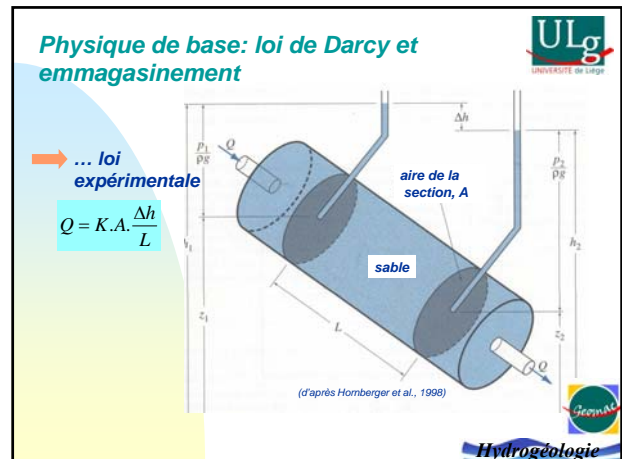
$$n_e + S_r = n$$

Hydrogéologie

Porosité

| | n (%) | n _e (%) |
|-----------------------------------|-----------|--------------------|
| • Granites et gneiss | 0.02 - 2 | 0.1 - 2* |
| • Quartzites | 0.5 - 2 | 0 - 2* |
| • ardoises et 'shales' | 0.1 - 7.5 | 0.1 - 1* |
| • schistes | 0.1 - 7.5 | 0.1 - 2* |
| • calcaires et dolomies primaires | 0.5 - 15 | 0.1 - 14* |
| • dolomies secondaires | 10 - 30 | 5 - 15* |
| • craies | 0.5 - 45 | 0.5 - 15* |
| • grès, psammites | 3 - 38 | 3 - 25 |
| • tufs volcaniques | 30 - 40 | 5 - 15 |
| • graviers | 15 - 25 | 5 - 25 |
| • sables | 15 - 35 | 5 - 30 |
| • silts | 30 - 45 | 5 - 35 |
| • argile et limon | 40 - 70 | 0.1-10 |

* dépendante de la fissuration



Conductivité hydraulique et loi de Darcy

... loi expérimentale

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

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

→ **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 m³/(m².s) donc en m/s

Conductivité hydraulique et loi de Darcy

Ce débit spécifique est improprement appelé 'vitesse de Darcy' ... il ne s'agit que d'un débit **Q** divisé par une surface

cette surface n'est pas la section réelle d'écoulement

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

→ ... pour obtenir une valeur moyenne (sur l' EVR) de la vitesse d'écoulement:

→ $v_e = \frac{q}{n_e} = \frac{K \Delta h}{n_e L}$ m/s 'vitesse d'advection' (vitesse effective)

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 (m²)
 masse spécifique du fluide (kg/m³)
 accélération de la pesanteur (m/s²)
 viscosité dynamique (kg/(m.s), N.s/m² ou Pa.s)



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

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie

Conductivité hydraulique

d'un milieu poreux ...
... à des milieux fissurés

| | K (m/s) | Eau |
|----------------------|---------------|-------------------|
| granites et gneiss | avec fissures | 1.10-7 - 1.10-4 |
| | sans | 1.10-14 - 1.10-10 |
| basaltes | avec fissures | 1.10-7 - 1.10-3 |
| | sans | 1.10-12 - 1.10-9 |
| quartzites | avec fissures | 1.10-7 - 1.10-4 |
| | sans | 1.10-12 - 1.10-9 |
| 'shales' | | 1.10-13 - 1.10-9 |
| schistes | | 1.10-9 - 1.10-5 |
| calcaires karstifiés | avec fissures | 1.10-5 - 1.10-1 |
| | sans | 1.10-9 - 1.10-3 |
| grès | avec fissures | 1.10-5 - 1.10-3 |
| | sans | 1.10-9 - 1.10-5 |
| tufs volcaniques | | 1.10-7 - 1.10-3 |
| graviers | | 1.10-4 - 1.10-1 |
| sables | | 1.10-6 - 1.10-2 |
| silts, limons | | 1.10-9 - 1.10-4 |
| argiles et limons | | 1.10-13 - 1.10-7 |

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie

Types de nappes aquifères

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

Nappe libre = aquifère ou volume d'eau souterraine dont la surface est libre c'est-à-dire à la pression atmosphérique

Nappe captive = aquifère ou volume d'eau souterraine généralement à une pression supérieure à la pression atmosphérique car isolée de la surface du sol par une formation géologique imperméable

en pratique le niveau d'eau est supérieur au toit géologique de la couche aquifère

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie

Définitions

Nappe artésienne = nappe captive dont le niveau d'eau est supérieur à la surface topographique si forage: jaillissement de l'eau

... une même nappe peut être libre, captive et artésienne selon les endroits

(d'après Fetter, 1997)

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie

Nappe perchée = volume d'eau souterraine perché par rapport aux autres aquifères ou par rapport aux cours d'eau, à cause d'une couche sous-jacente relativement peu perméable

(d'après Fetter, 1997)

mesures des niveaux d'eau doivent être bien séparées (identifiées) par aquifère (forages, équipements, crépines, massifs filtrants et bouchons d'argile)

distinguer les différents types d'aquifères successifs

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie

Variation de stockage = Coefficient d'emmagasinement

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

nappe libre / nappe captive

drainage / expulsion

gravité

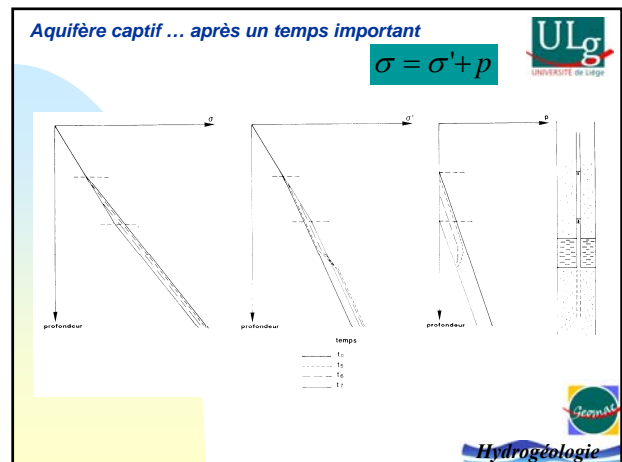
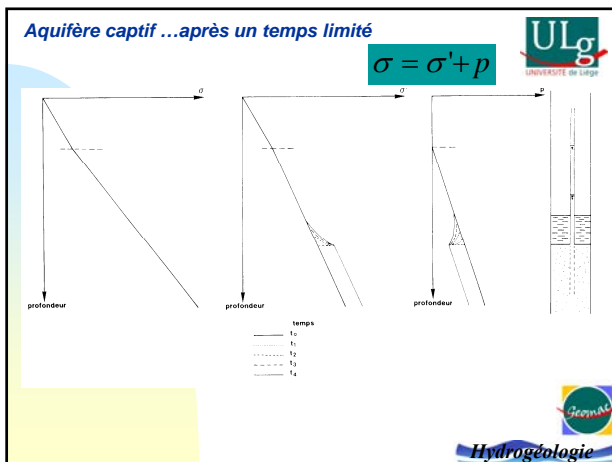
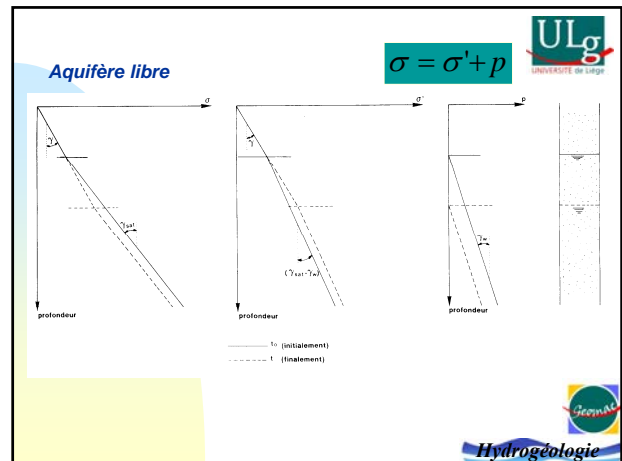
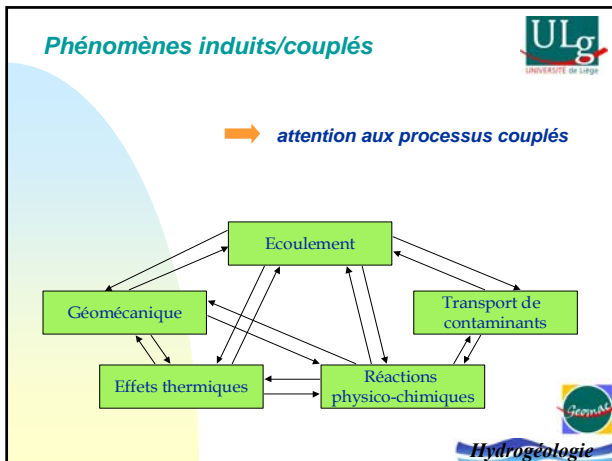
charge

quantité d'eau libérée

$S = S_s \cdot e$

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie



- ### Subsidences induites par pompages
- processus observés dans de nombreuses régions du monde: 'sinking cities'
- processus très lents (retardés) à cause du temps de propagation des baisses de pression dans les terrains argileux
 - structure des terrains évolue, porosité et perméabilité changent
 - calculs complexes de rhéologie des terrains + évolution en fct du temps
- ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE
- Hydrogéologie



Subsidences induites par pompages

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie

Subsidences induites par pompages et par travaux miniers

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie

Surexploitation

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie

Contaminations du sous-sol

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

(Keller, 2002)

Chemical waste stored in barrels on the surface
Buried chemical waste
Water table
Unlined "lagoon" with chemical waste
Soil
Rock
Leachate

Hydrogéologie

Intrusion d'eaux souterraines salées

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Legend:
R - Rainfall
T - Evapotranspiration
L - Irrigation
P - Pumping
E - Evaporation
GWF - Groundwater flow
SWF - Saline groundwater flow
SS - Saline soils

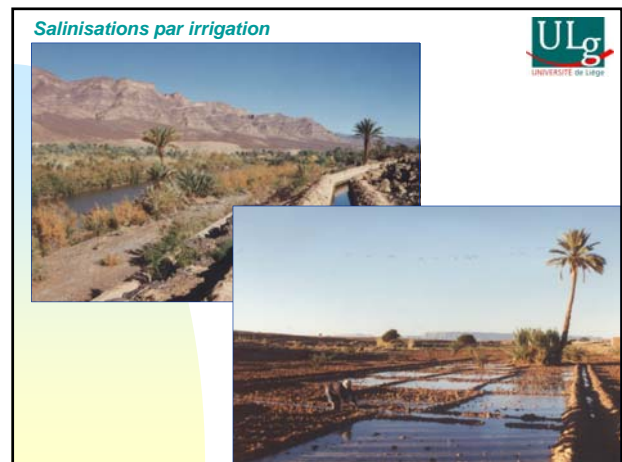
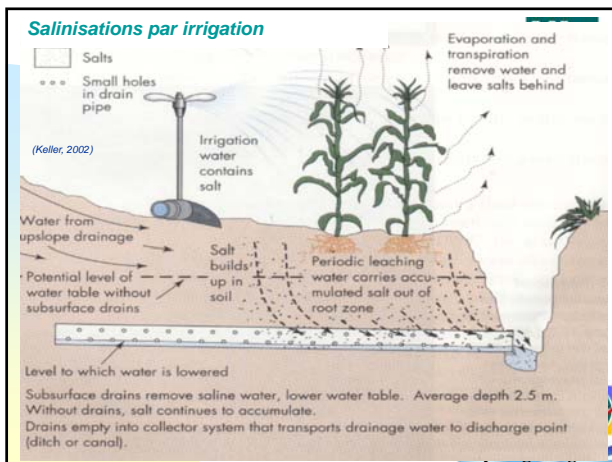
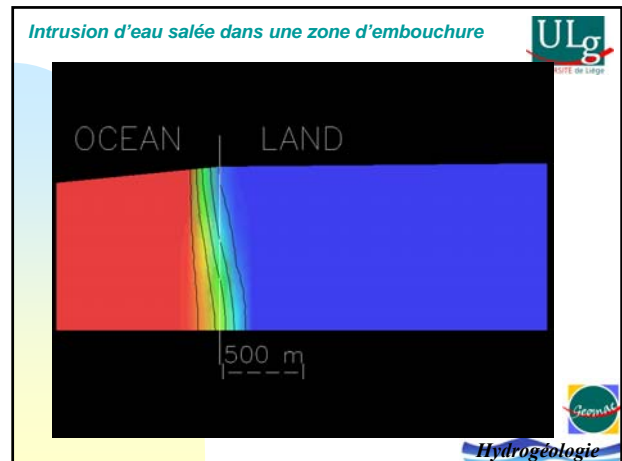
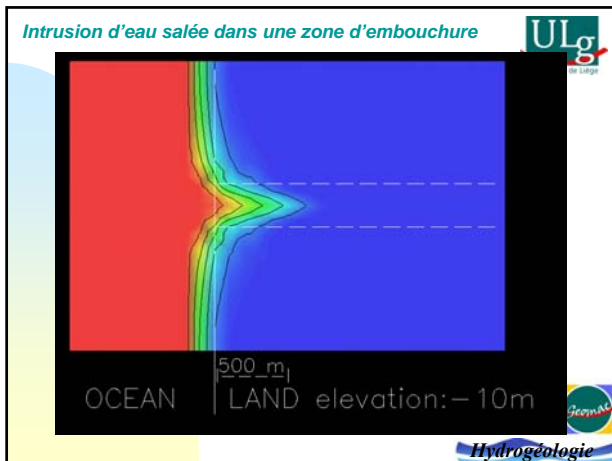
Hydrogéologie

Intrusion d'eaux souterraines salées

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

natural groundwater supplement
dunes
extraction
polder
hill
infiltration
rock
brackish
salt
saltwater intrusion
vertical drifting -200
impermeable base

Hydrogéologie



Caractérisation des aquifères - Etude de potentialités

- Recherche et exploitation des eaux souterraines (y compris les eaux minérales);
- Calcul des bilans hydrogéologiques;
- Détermination des propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives des terrains, par essais de pompage et par traçages.
- Etude de la qualité physico-chimique des eaux souterraines.

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Hydrogéologie

Modélisation numérique des eaux souterraines en milieu variablement saturé, d'un point de vue quantitatif et qualitatif

Développements numériques (code éléments finis SUFT3D), synthèse et interprétation des données récoltées, conceptualisation et construction d'un modèle à l'aide d'outils informatiques adaptés à la situation, calibration-validation, tests de scénarios.

Hydrogéologie

Modèle d'écoulement régional : zone d'Anvers

Hydrogéologie

Cartographie hydrogéologique

Synthèse des informations hydrogéologiques disponibles à l'échelle régionale. Cartographie des aquifères, aquitards et aquicludes, des puits, piézomètres, sources, galeries et drains captants, des pertes et résurgences, des zones de prévention. Carte piézométrique et sens probable de l'écoulement souterrain. Livret explicatif.

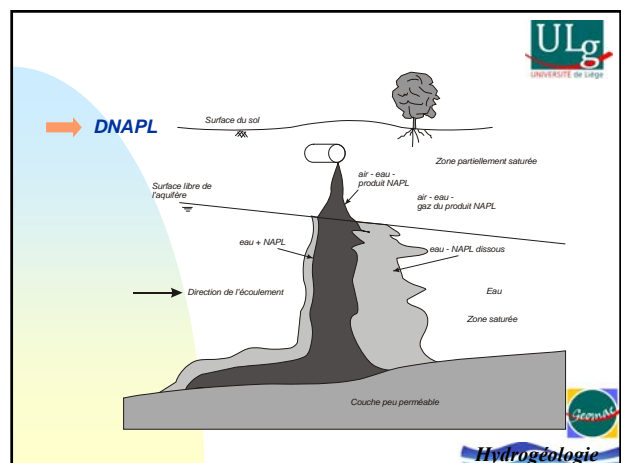
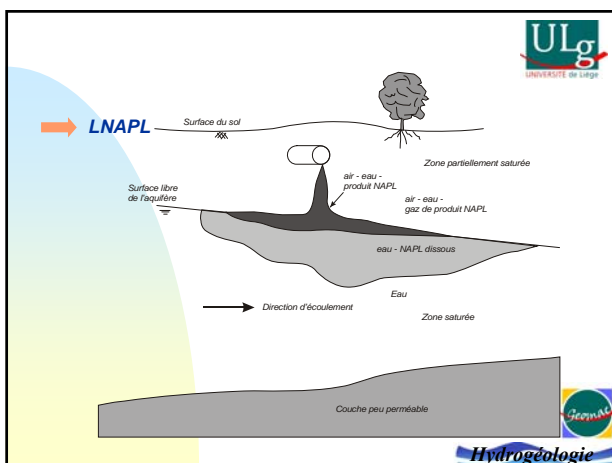
Hydrogéologie

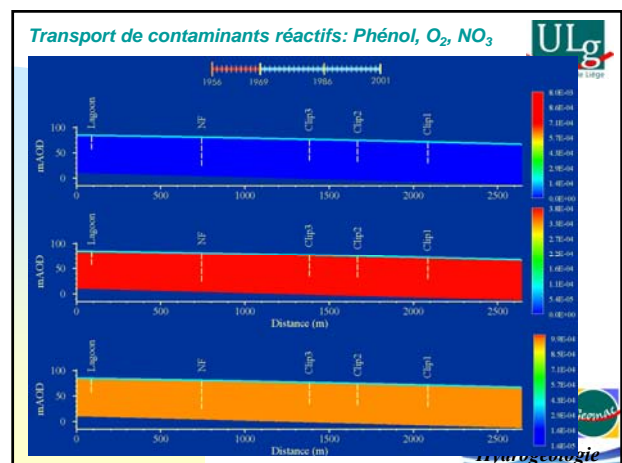
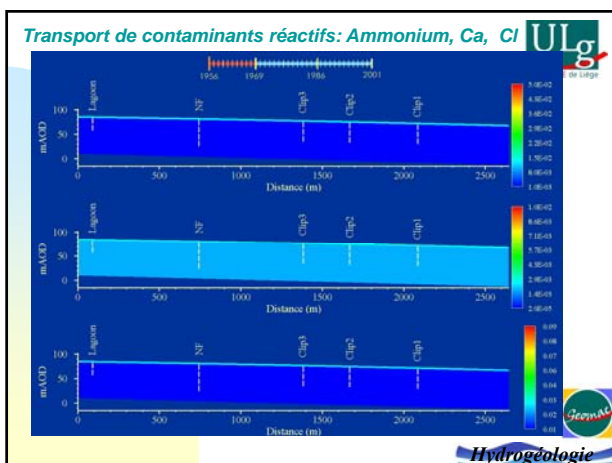
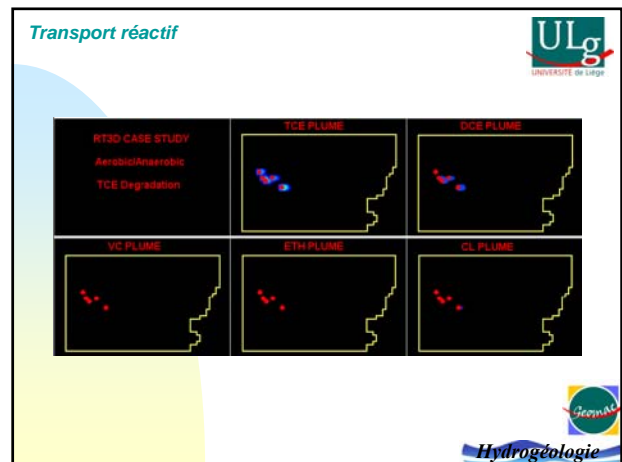
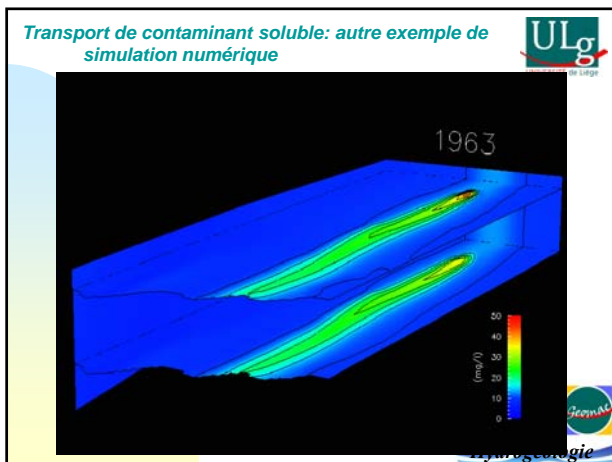
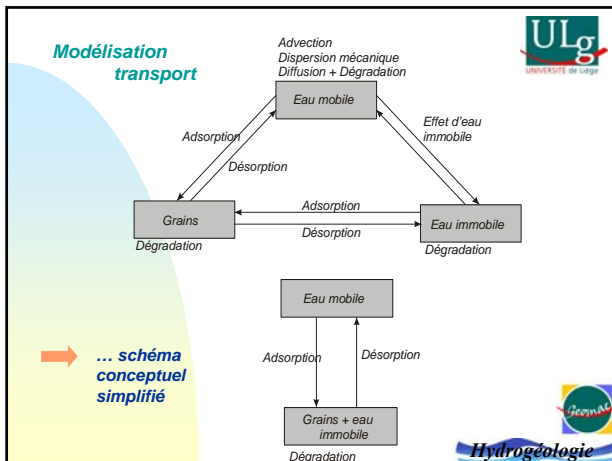
Etude des processus de transport et des réactions bio-physico-chimiques des contaminants en milieux souterrains variablement saturé, poreux et fissuré.

Caractérisation et optimisation de l'assainissement des sites contaminés

Mesures in situ, monitoring, modélisation de la contamination et simulations de différents scénarios d'assainissement.

Hydrogéologie







Etude et modélisation intégrée du cycle de l'eau

Interactions et couplages de modèles hydrogéologiques avec des modèles hydrologiques et d'eaux de surface (en partenariat avec d'autres équipes universitaires): ruissellement, infiltration, écoulement en sous-sol et écoulements en rivières.

Modélisation à différentes échelles de temps et d'espace en relation avec les changements climatiques. Simulations pour divers scénarios.






Hydrogéologie

Protection des ressources en eau

- Evaluation des zones de prévention autour de captages d'eau souterraine, estimation des temps de transfert par la réalisation d'essais de traçage et définition des zones de prévention par modélisation mathématique des écoulements et du transport des solutés en milieu souterrain;
- Vulnérabilité des eaux souterraines: évaluation et cartographie, par une méthodologie qui repose sur les principes physiques gouvernant la mobilité de l'eau et des polluants dans le sol et le sous-sol.

Les résultats sont clairs, validables et peuvent être directement exploités en pratique, dans le cadre de la planification et la gestion du territoire intégrant une politique de protection à long terme de la qualité des eaux souterraines.

Hydrogéologie

