

Conférence donnée à l'EPFL Lausanne le 29 mai 2001
dans le cadre du séminaire thématique
« Gestion intégrée des ressources en eau »

**Couplages de modèles d'eaux souterraines
à des modèles agronomiques et d'eaux de surface
en vue de la simulation intégrée du cycle de l'eau
à l'échelle d'un sous-bassin**

A. DASSARGUES ^{1,2}

¹ Hydrogéologie, GEOMAC
University of Liège Bat. B52/3, B-4000 Liège, Belgium
<http://www.ulg.ac.be/geomac>

² Hydrogeologie, Instituut voor Aardwetenschappen,
Katholieke Universiteit Leuven,
Redingenstraat 16, B-3000 Leuven, Belgium
<http://www.kuleuven.ac.be/facdep/geo/hsg/index-nl.html>

Email: Alain.Dassarques@ulg.ac.be

 A. D.

... tendance générale: modèles hydro(géo)logiques intégrés,
régionaux (à l'échelle de sous-bassins)
des jeux de données énormes
pour fournir des résultats fiables dans l'espace
et dans le temps


Modélisation des eaux souterraines

Comment simuler les interactions (échanges) avec
les autres compartiments du cycle hydrologique:
rivières, zones agraires/agronomiques ?

- quantité d'eau
- qualité d'eau (transport de soluté)

Souvent: flux imposés (directement ou indirectement)
entrant ou sortant à travers les 'frontières'

Proposition: un couplage dynamique où les conditions
aux frontières sont le résultat d'un échange itératif
d'informations entre les différents modèles

 A. D.

... projets contribuant à ces développements:

- Projet SALMON (1995-1998) 'Sea Air Land Modelling Network' financé par IBM International Foundation (Océan, Eaux souterraines, Rivières);
- Projet SSTC (1997-2001) 'Modélisation intégrée du cycle hydrologique dans le cadre des changements climatiques' dans le programme 'Global Change and Sustainable Development';
- Projet DAUFIN (2000-2001) 'Data Assimilation within a Unifying Modeling Framework for Improved River-basin Water Resources Management', Projet européen UE, EVK1-1999-00103;
- Projet PIRENE (2001-2004) 'Programme Intégré de Recherche Environnement-Eau', Ministère de l'Environnement, Région Wallonne.

→ ... chercheurs 'eaux souterraines' ayant contribué et contribuant à ces projets: G.Carabin, S.Brouyère


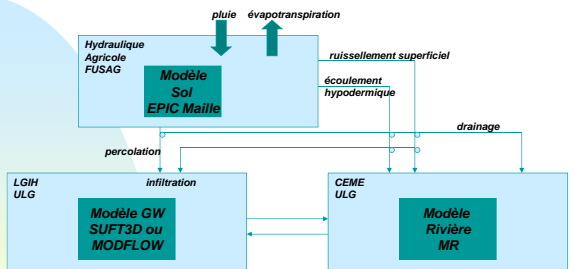

 A. D.

Schéma général simplifié ... pour quantité d'eau



... projets SSTC et début PIRENE

→ modèles implémentés dans un environnement parallèle protocole d'échanges de données MPI

 A. D.

Modélisation des eaux souterraines

... modélisation 'physiquement significative' des aquifères


→ 'physically consistent'

cohérent, systématique, en accord avec...

description cohérente, systématique et en accord avec les processus physiques concernés

→ Pourquoi ? ... les autres ne nous satisfont pas !

- boîtes noires ('black-box')
- soit disant 'physically based' mais fort peu en accord avec la réalité

 A. D.

Modélisation des eaux souterraines


→ ...modèles 'black box' : équations ne sont pas celles des processus physiques simulés

→ Avantages

- sans données hormis 'entrées' et 'sorties';
- moyens informatiques limités;
- aisés à manipuler, légers

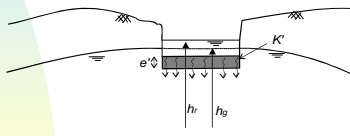
→ Inconvénients

- résultats ne peuvent être considérés fiables en dehors des plages de sollicitations de la calibration;
- plus on s'éloigne de la calibration plus les chances de résultats erronés sont grandes;
- les paramètres calibrés ne peuvent être mis en rapport avec des propriétés physiques mesurées;
- représentation globale sans moyen de discerner les influences locales.

 A. D.

Modélisation des eaux souterraines

- ➔ ...modèles physiquement significatifs spatialement distribués et détaillés
- ➔ ... les interactions eaux souterraines / eaux de surface sont physiquement décrites et simulées par l'application de la loi de Darcy:



ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. D.

Modélisation des eaux souterraines

- ➔ description précise, en fonction du temps et de l'espace, des hauteurs d'eau dans l'aquifère prise en compte de l'hétérogénéité est indispensable pour calculer les flux entrant/sortant ;
- ➔ fondamental de simuler ces flux avec le plus grand soin: réponse principale à la question posée !
Exemple: que vont devenir les débits d'étiage des rivières pour les différents scénarios climatiques ?
- ... autres questions plus spécifiques aux eaux souterraines:
Exemple: les réserves d'eaux souterraines ?
- ... notre approche permet de répondre à ce type de questions ... sans en imposer la réponse !

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. D.

Modélisation des eaux souterraines

- ➔ ... il est exclu d'approximer le comportement de la nappe par des coefficients de récession, ou par des approches simplifiée de Boussinesq, par des 'modèles à réservoirs' car ils ne garantissent aucune fiabilité en dehors de l'intervalle de calibration
- ➔ courbe de récession/ débits d'étiages dépendent de K et n_e et de la combinaison hétérogène de ces paramètres dans le milieu saturé :
 - ➔ si niveaux piézométriques changent: d'autres zones de l'aquifère sont concernées
 - ➔ courbes de récession et débits d'étiages changent

BERKALOFF E., 1967, Limite de validité des formules courantes de tarissement du débit. Chron. Hydrogéol. BRGM 10, 31-41.
DASSARGUES A., MARECHAL J.C., CARABIN G. and SELS O., 1999, On the necessity to use three-dimensional groundwater models for describing impact of drought conditions on streamflow regimes, in Hydrological Extremes : Understanding, Predicting, Mitigating (Proc. of IUGG 99 Symposium HSI, Birmingham, July 1999), IAHS Publication n°255, pp. 165-170.

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. D.

Modélisation des eaux souterraines

Remarque pour créer la polémique !

- ... ces observations sont unanimement acceptées par les hydrogéologues !!!
- ... très mal accueillies généralement par les hydrologues !!!

- ➔ « what you have shown tend to prove that our work for more than 30 years is completely wrong: it is hard to accept it ! »
- ➔ Surparamétrisation ?
préférable de caler beaucoup de paramètres physiques (même avec beaucoup d'incertitudes) que de caler des coefficients empiriques qui ne traduisent aucune propriété physique du système étudié !

ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

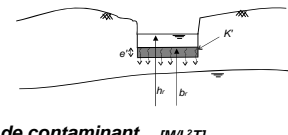
A. D.

Interaction eaux souterraines – eaux de surface

Condition de Fourier dynamique dans le code SUFT3D (idem que MODFLOW pour écoulement)

- ➔ Ecoulement: $q(x, y, t) = \frac{K'}{e'} [h_g(x, y, t) - h_r(x, y, t)]$
- ... quand $h_g < b_r$
- ➔ h_g remplacé par b_r : infiltration à partir du cours d'eau
- ➔ Transport: flux advectif de contaminant [ML²T]

$$q_c(x, y, t) = q(x, y, t) \cdot \rho(C_s) \cdot C_r$$

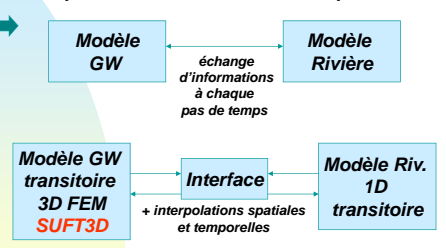
$$q_c(x, y, t) = q(x, y, t) \cdot \rho(C_g) \cdot C_g$$


ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. D.

Pourquoi des conditions de Fourier 'dynamiques' ?

- ➔ ... parce que les résultats du modèle eaux souterraines dépendent des h_r et C_r calculés par le modèle rivière



ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. D.

Couplage du Modèle GW et du Modèle Rivière

PRE-PROCESSING


- calcul des conditions initiales
- 'mapping': association de noeuds qui vont communiquer

A) calcul des conditions initiales:

pour le Modèle GW: conditions stationnaires en considérant les mêmes sollicitations (pompages, niveaux d'eau dans la rivière, recharge, ...) qu'au moment initial t_0 de la simulation transitoire

- un premier 'run' du Modèle Rivière (non couplé) est nécessaire
- $h_r(x, y, t_0)$

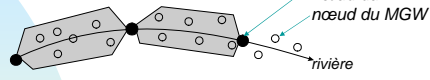
(hypothèse qu'au départ les deux modèles sont indépendants)



A. D.

Couplage du Modèle GW et du Modèle Rivière


B) 'mapping': ... la zone d'interaction entre les 2 modèles est subdivisée en segments en fonction de la position des noeuds du modèle rivière



- valeurs transmises aux noeuds du MGW: interpolation spatiale entre les deux noeuds concernés du MR (amont et aval) ... pour les niveaux d'eau et les flux
- valeurs transmises aux noeuds du MR: somme de toutes les contributions des noeuds du MGW situés en amont ... pour les flux

le MGW utilise des hauteurs piézométriques absolues alors que le MRM utilise des hauteurs d'eau par rapport au fond de la rivière

- l'interface additionne l'altitude du fond de la rivière pour obtenir les hauteurs d'eau absolues

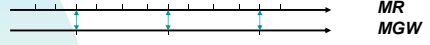


A. D.


Couplage du Modèle GW et du Modèle Rivière

PROBLEME D'ECHELLE DE TEMPS

le pas de temps d'interaction = le plus petit commun multiple des pas de temps des MGW et MR



- MR: petits pas de temps avec des flux constants durant un pas de temps
- MGW: pas de temps plus longs avec calcul non-linéaire à l'intérieur du pas de temps



A. D.

Couplage du Modèle GW et du Modèle Rivière

ECHANGES ENTRE MODELES


à chaque pas de temps d'interaction:

Écoulement		
MGW	h_g	→ Interface
MR	h_r	→ Interface

- correction altimétrique
- interpolation entre les deux noeuds du MR pour obtenir h_r à chaque noeud du MGW
- calcul des flux à chaque noeud du MGW
- envoi des flux calculés aux deux modèles (+ si entrant, - si sortant)

MGW ← flux à chaque noeud

RW ← somme de tous les flux reportée à chaque noeud aval du MR



A. D.

Couplage du Modèle GW et du Modèle Rivière

Transport de solutés (purement advectif entre MGW et MR)


à chaque pas de temps d'interaction:

MGW	C_g	→ Interface	si $q > 0 \rightarrow q_c = q\rho C_g$
MR	C_r	→ Interface	si $q < 0 \rightarrow q_c = q\rho C_r$

en aval

MGW ← $q\rho C_r$ or $-q\rho C_g$ attribué à chaque noeud du MGW

MR ← $-q\rho C_r$ or $q\rho C_g$ somme ou valeurs attribuées à chaque noeud aval du MR



A. D.

Couplage du Modèle GW et du Modèle Rivière


... cela signifie qu'un schéma d'intégration explicite est choisi pour le MGW avec un flux constant (durant le Δt)

- instabilité
- non fiabilité

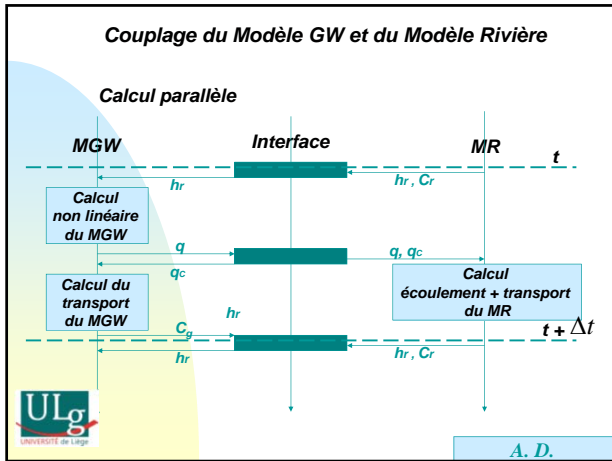
... à cause du problème non linéaire

modifications ont été nécessaires pour maintenir un schéma d'intégration implicite dans le MGW (SUFT3D)

... tout en exploitant les possibilités du calcul parallèle



A. D.



Couplage du Modèle GW et du Modèle Rivière

+ développements de techniques numériques spéciales pour prendre en compte l'effet de darses (ou toute zone d'eaux de surface quasi-stagnantes)

➔ la concentration dans la darse ne peut être choisie égale à C_r la darse provoque un effet tampon ... même pour des contaminations brèves dans la rivière ... ou pour des contaminations en provenance du MGW

15 days 30 days

Dock Pumping well

200 m

ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. D.

Exemple: Anvers (Antwerpen)

North Sea The Netherlands Belgium France

KALMTHOUT Grondwater dierde ROOSBORDEL
Scheldt ANTWERP Molenbeek
LEER Mote
SCHIELD Grondwater dierde

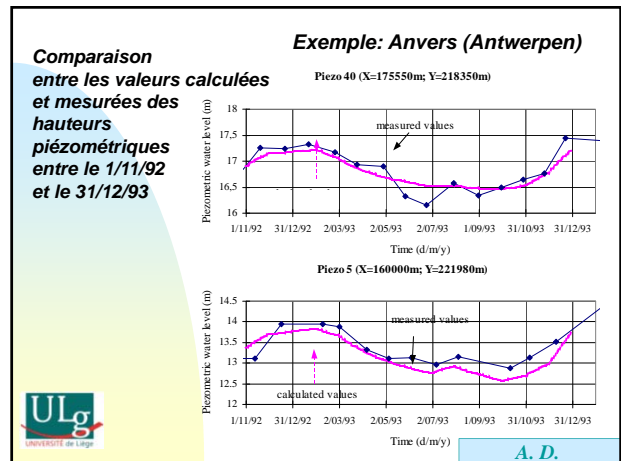
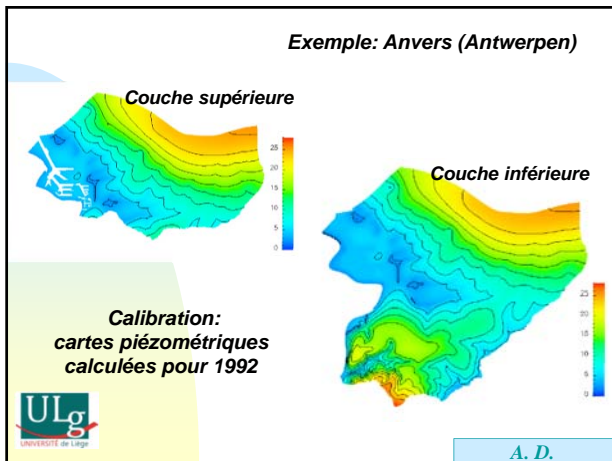
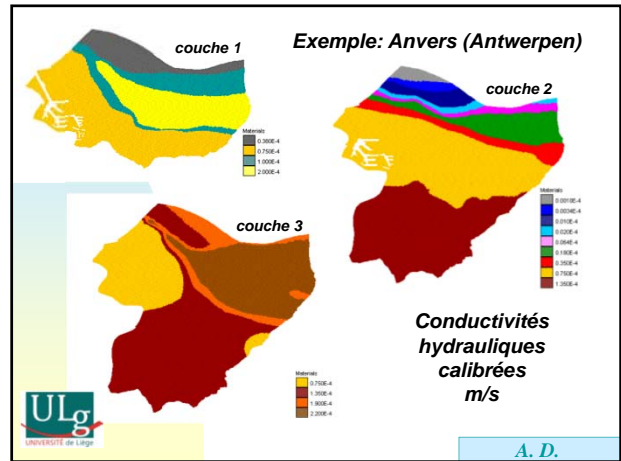
Piezometer

MGW :

- 650 km²
- 136921 éléments finis (coins et tétrahèdres)
- 95415 noeuds
- dimensions de 50 à 250 m
- épaisseurs de 1 à 100 m
- décomposition du domaine pour 'run' // sur 4 processeurs

ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE

A. D.




Exemple: Anvers (Antwerpen)

➔ **Tests: transport dans le système complet d'un traceur conservatif et d'un traceur radioactif (se dégradant) (soumis aux mêmes advection et diffusion ➔ le rapport des concentrations est indicatif du temps de parcours)**

➔ ... pour vérifier:

- fonctionnement de l'interface
- estimation des grandeurs et directions des flux massiques entre MGW et MR
- estimation des échelles de temps des échanges entre modèles

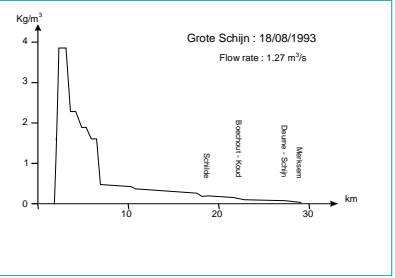
- **test 1: source de pollution continue dans la rivière: 50 g/s pendant 6 mois**
- **test 2: injection diffuse temporaire (30 jours) dans l'aquifère: 0.7 kg/s sur une zone de 500 m x 280 m**




A. D.

Exemple: Anvers (Antwerpen)

➔ **pollution continue dans la rivière (50 g/s) pendant 6 mois**



Cr diminue à cause de la dilution par les entrées d'eau en aval



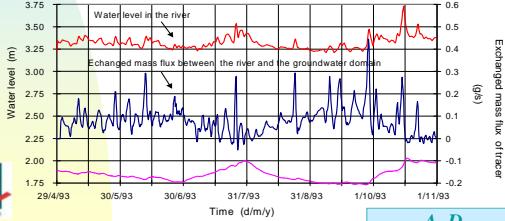

A. D.

Exemple: Anvers (Antwerpen)

➔ ... habituellement le MGW alimente MR (presque aucun flux du MR vers le MGW excepté dans des zones très locales)

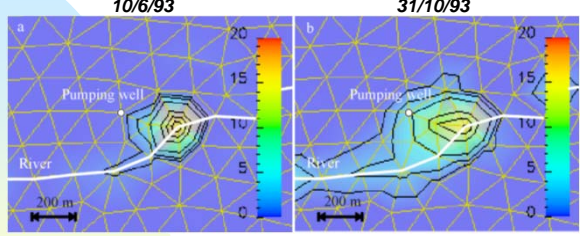

➔ ... introduction d'un pompage (0.02 m³/s) dans le MGW à une distance de 230 m de la rivière polluée

➔ **flux du MR vers le MGW**

A. D.

Exemple: Anvers (Antwerpen)

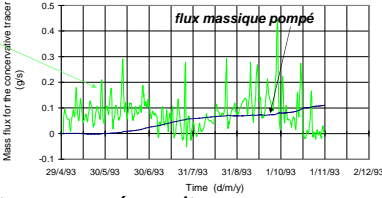



A. D.

Exemple: Anvers (Antwerpen)


flux massique du MR vers le MGW

flux massique pompé



Observations concernant le taux massique de traceur pompé au puits:

- arrivée au puits après environ 40 jours;
- 1ère stabilisation après 95 jours;
- encore environ 40 jours nécessaires avant nouvelle augmentation;
- valeur maximum de 0.12 g/s;
- trajet total de 84-93 jours pour 230 m dans le MGW: soit 2.5 - 3 m/j ($K=10^{-4}$ m/s, $n_e=0.02$ et grad $h = 0.6$ %)
- trajet de 1.5 j pour 1.6 km en rivière



A. D.

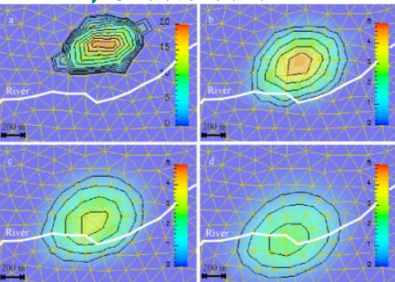

Exemple: Anvers (Antwerpen)

Injection diffuse temporaire (0.7 kg/s) de traceur non réactif au sommet de l'aquifère sur une zone de 500 m x 280 m, pendant 30 jours

➔ **Simulation d'un an**

Simulated concentration (isoconcentration lines for 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5, 10, 12.5, 15 and 17.5 kg/m³) of the tracer on

- a) 31/1/1993 (end of the release period),
- b) 1/5/1993,
- c) 1/8/1993 and
- d) 1/12/1993

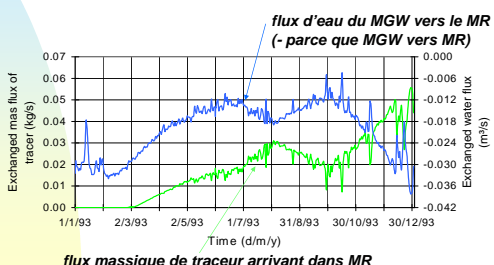



A. D.

Exemple: Anvers (Antwerpen)

... une partie de la rive (780 m) où les échanges sont les plus importants ...

- 1^{ère} arrivée du traceur dans le MR après environ 100 jours;
- après 1 an, le flux massique de traceur augmente toujours (C_G diminue, mais le flux d'eau augmente à cause de la pluviométrie et de l'infiltration efficace)



A. D.

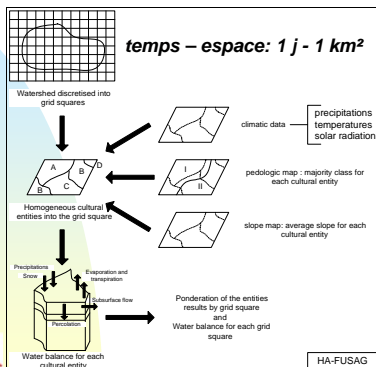
3-5 sous-bassins en Belgique (choisis en fonction de leurs caractéristiques géologiques):

- alluvions, sables, silts et craies en couches stratifiées sub-horizontales:
le bassin de la Gette
- limons, conglomérat/sable et craies:
le bassin du Geer
- colluvium et bed-rock peu perméable:
le bassin de l'Ourthe orientale à Mabompré
- calcaires fissurés et localement karstifiés:
le bassin du Hoyoux-Néblon
- sables et calcaires:
le bassin de l'Orneau



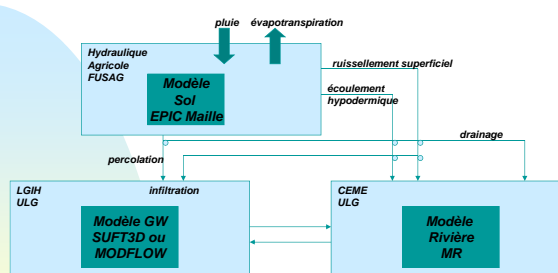
A. D.

Intégration du modèle sol 'EPIC-maille' (FUSAG)



A. D.

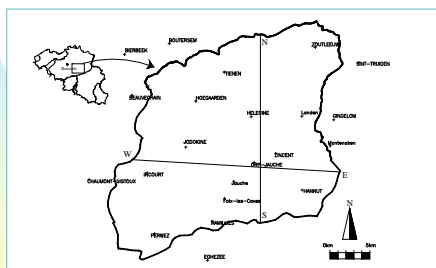
Schéma général simplifié ... pour quantité d'eau



A. D.

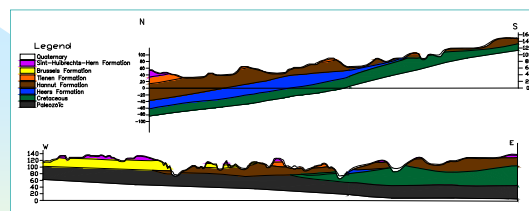
Bassin de la Gette: principales caractéristiques

Exutoire de Budingen



A. D.

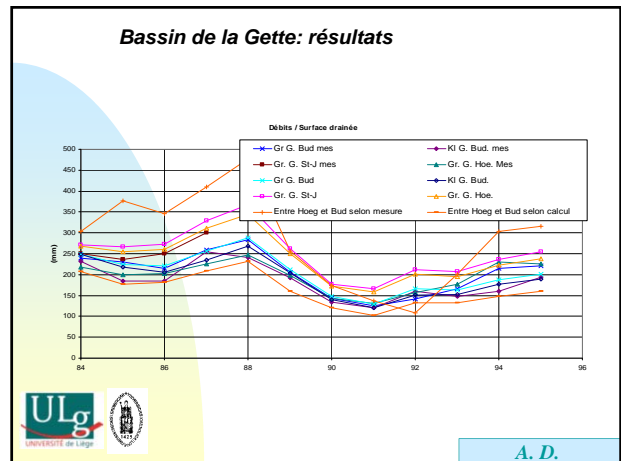
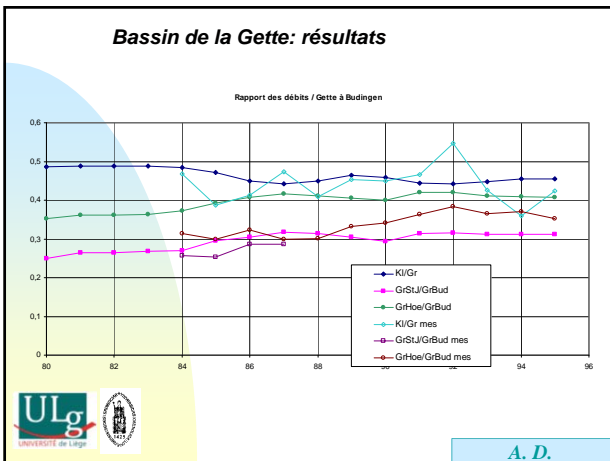
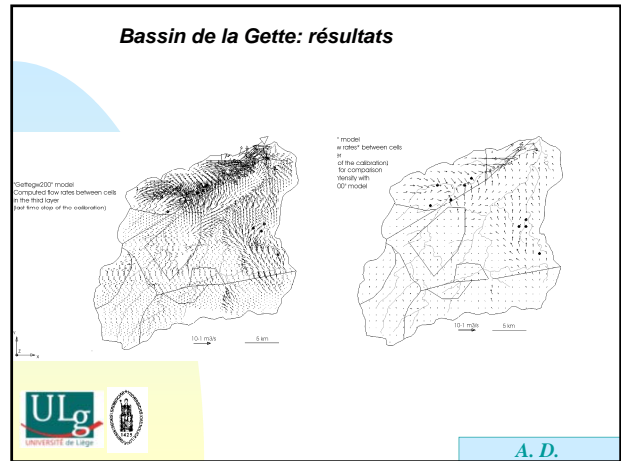
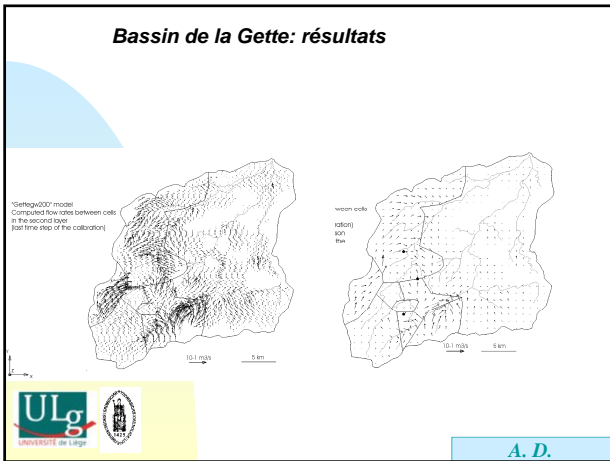
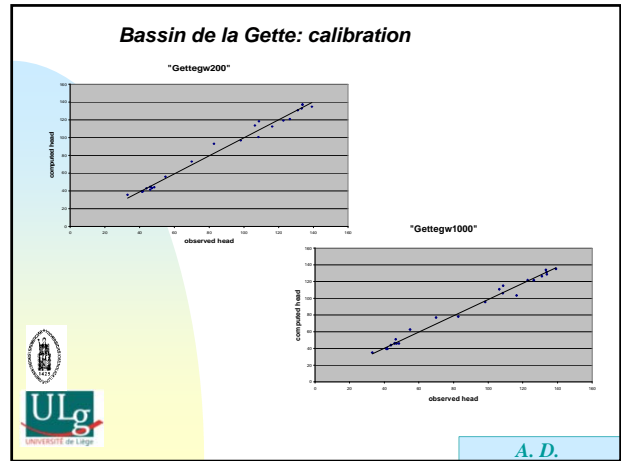
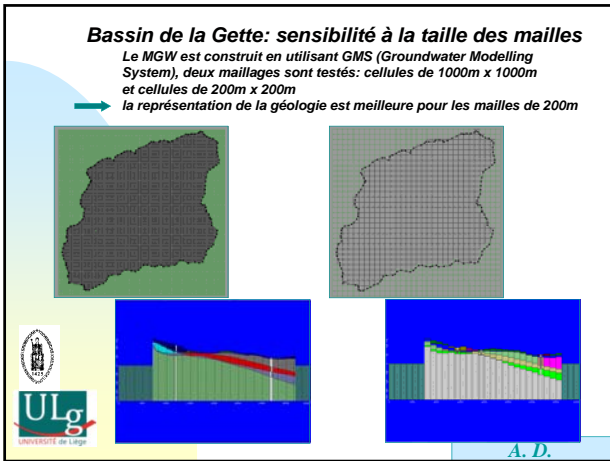
Bassin de la Gette: principales caractéristiques

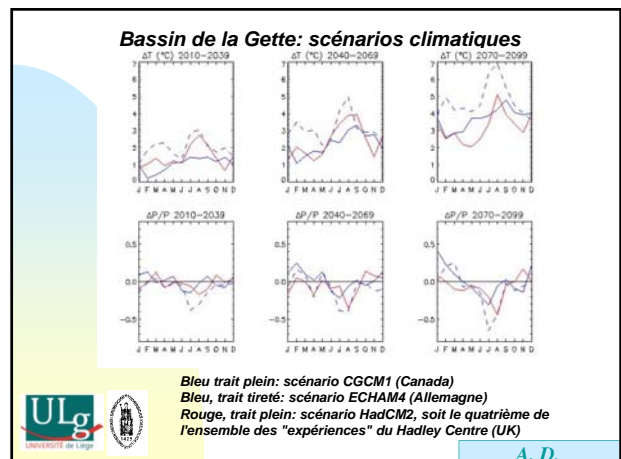
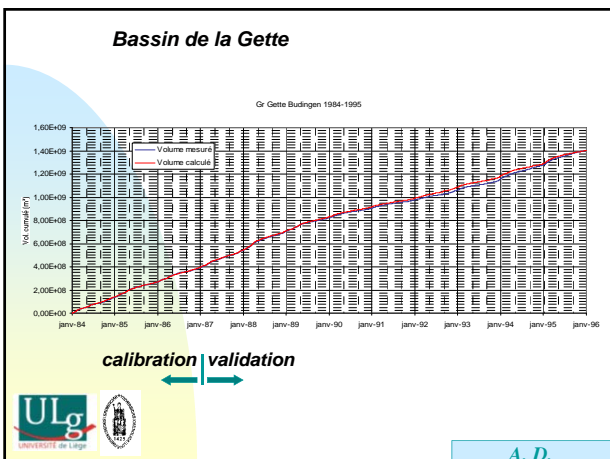
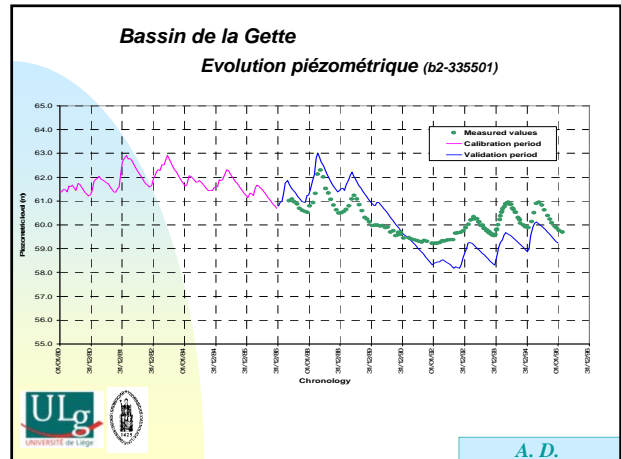
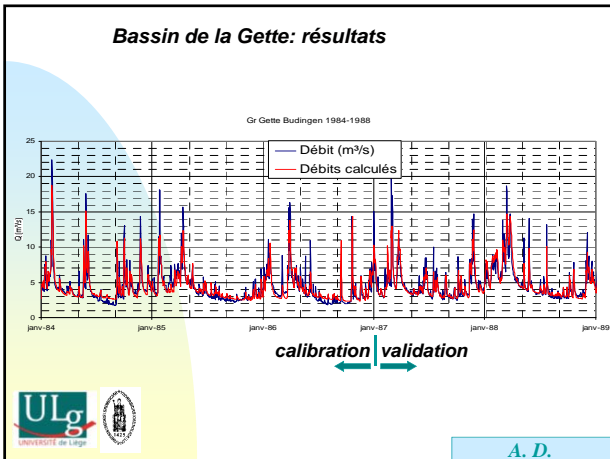
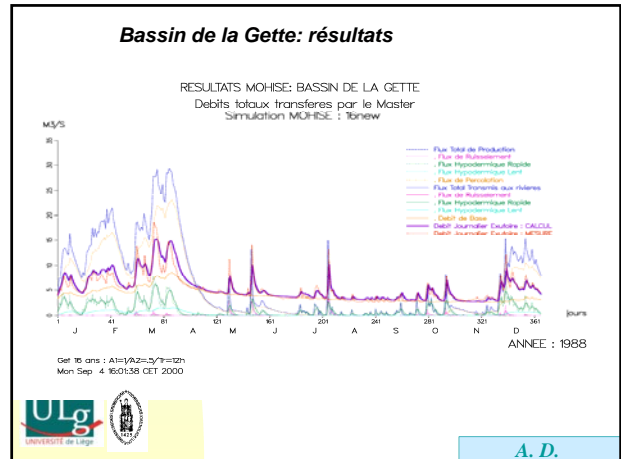
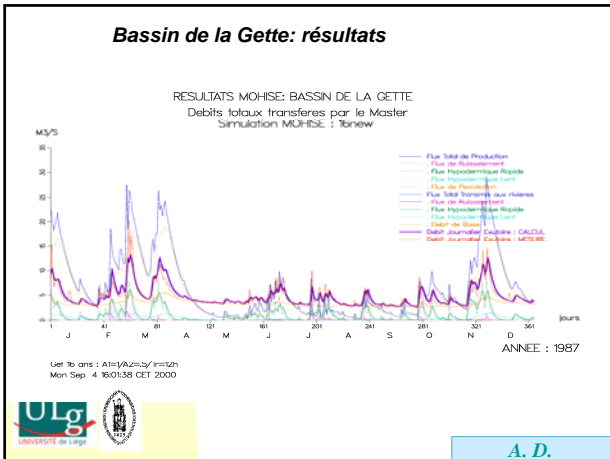


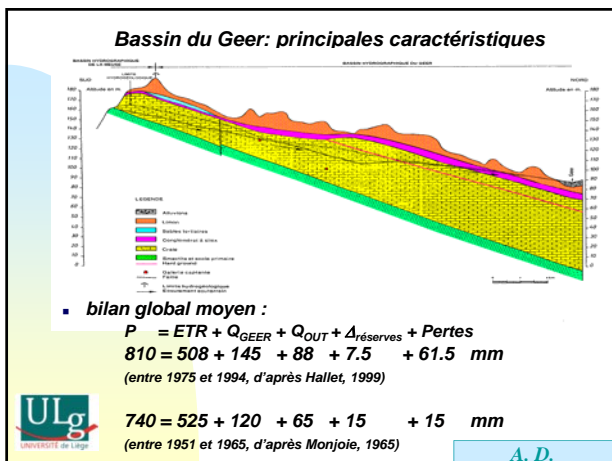
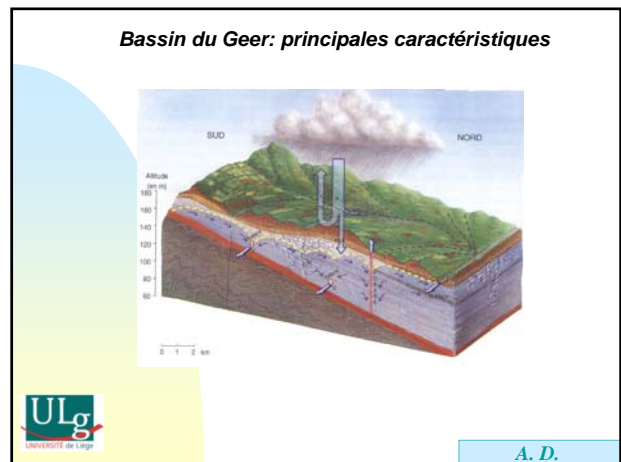
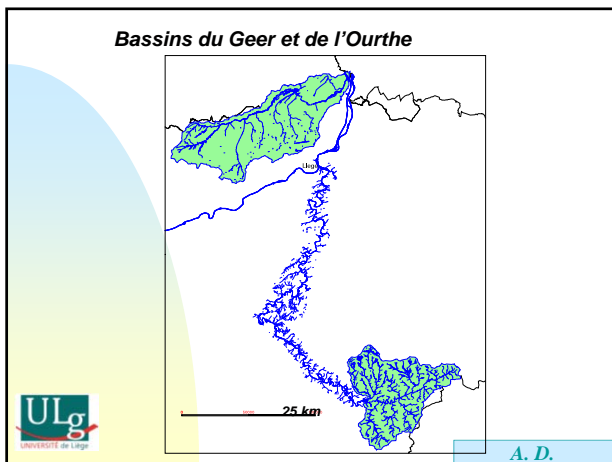
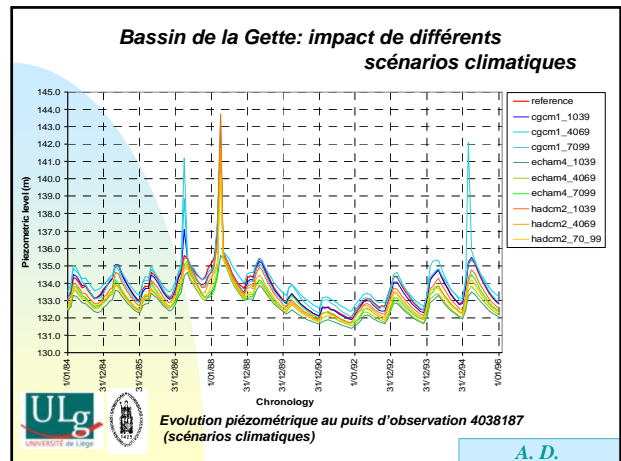
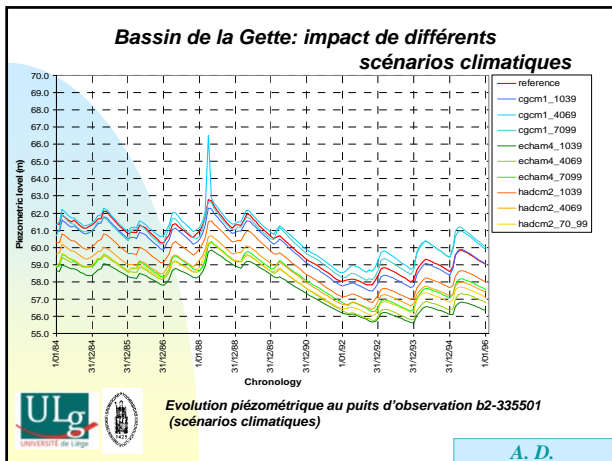
- Une série épaisse de sédiments sableux et silteux recouvrant de la craie, couvrant à son tour un bed-rock paléozoïque
- Au dessus des craies du Crétacé, les Formations de Heers (marnes et sables), de Tienen et de Landen (sables silteux en alternances avec de fines couches d'argiles et de tuffeau), de Bruxelles (sables fins à grossiers) et de Saint-Huibrechts-Hern (sables fins avec argiles) se sont déposées. Au sommet des collines on retrouve, dans la partie nord de la région, des dépôts de la Formation de Borgeon (sables argileux)
- Toutes les formations sont en biseaux rendant la discrétisation spatiale difficile.



A. D.







- ### Bassin du Geer: principales caractéristiques
- les fluctuations piézométriques peuvent atteindre 15 m à certains endroits, le code SUFT3D a été choisi pour son aptitude à considérer une zone non saturée très variable
 - le modèle compte sept couches d'éléments fins, de la base au sommet (en général):
 - trois couches de craies;
 - une couche de craie indurée 'hardground';
 - une couche de craie fracturée;
 - une couche de conglomérat/sable résiduel;
 - une couche de limons.
- ULg UNIVERSITÉ DE LIÈGE
- A. D.

Bassin du Geer: principales caractéristiques et construction du modèle

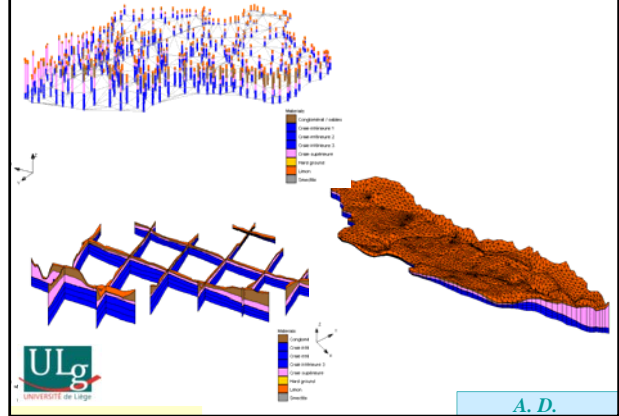
- le hardground n'est pas présent partout dans le domaine;
- le conglomérat disparaît au Nord, remplacé par des sables;
- l'épaisseur de la couche non saturée peut atteindre 40 m et, lorsque les niveaux piézométriques fluctuent uniquement dans la craie, dans ce cas, les sept couches d'éléments finis sont prises dans la craie;
- discrétisation suivant les critères suivants:
 - une taille moyenne des éléments de l'ordre de 700 m
 - des raffinements sont nécessaires dans les zones où des sollicitations importantes sont imposées (failles, galeries et pompages)

■ le maillage compte 31423 éléments finis (18680 noeuds)



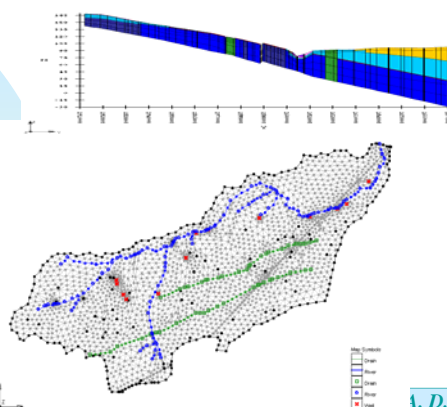
A. D.

Bassin du Geer: construction du modèle



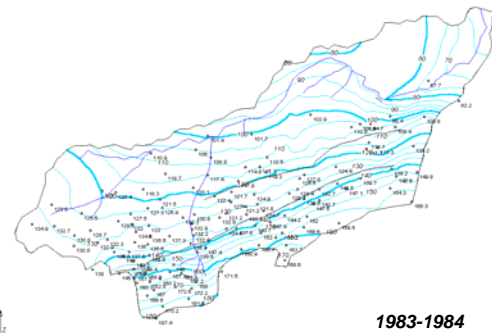
A. D.

Bassin du Geer: construction du modèle



A. D.

Bassins du Geer: calibrations

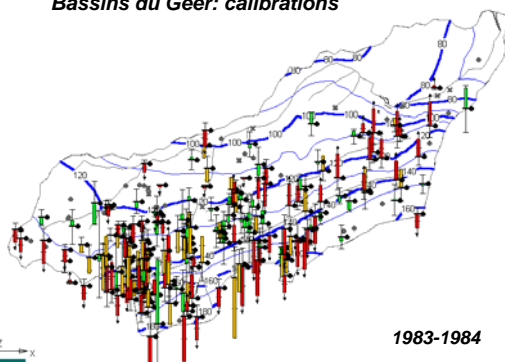


1983-1984



A. D.

Bassins du Geer: calibrations

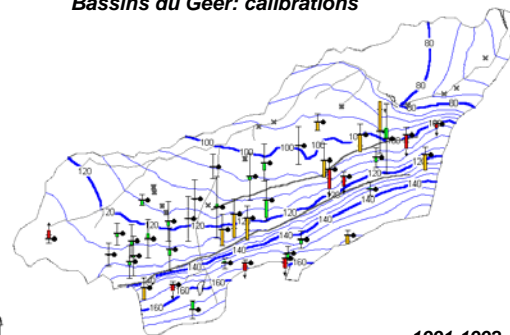


1983-1984



A. D.

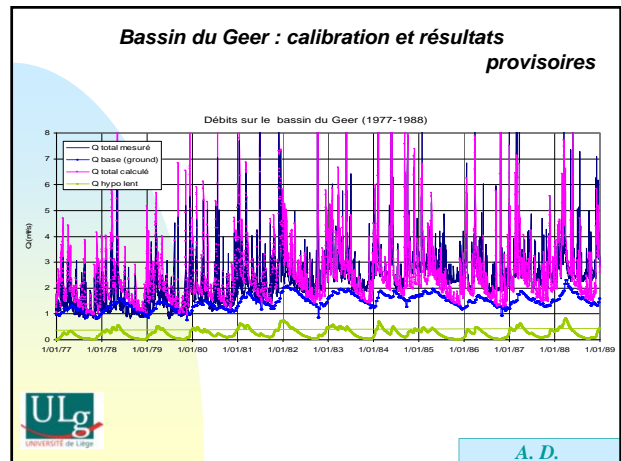
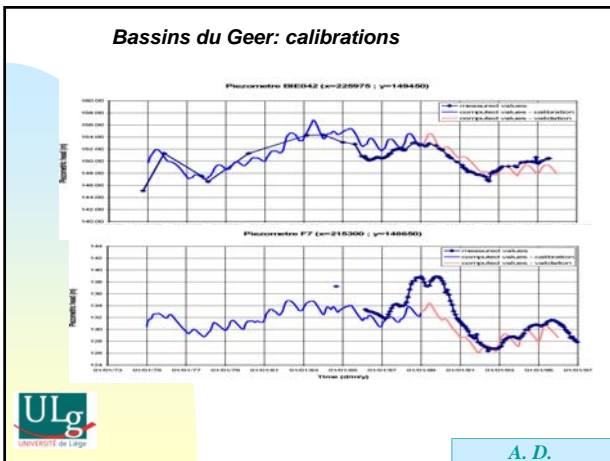
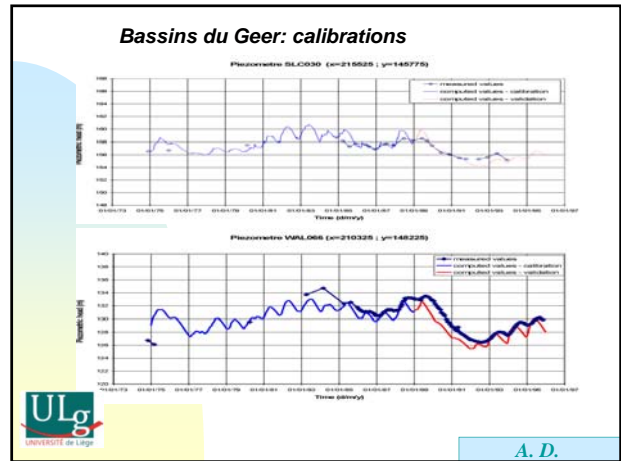
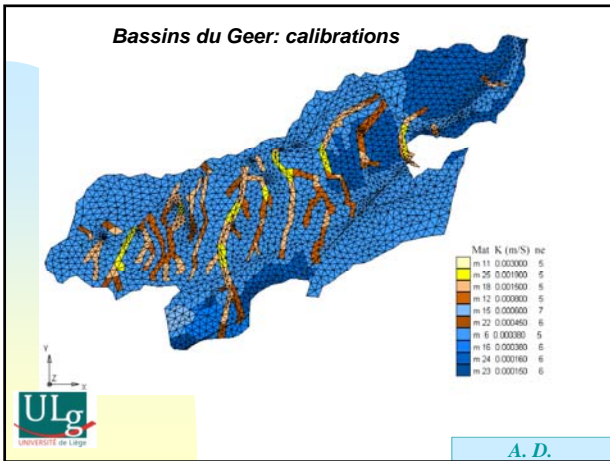
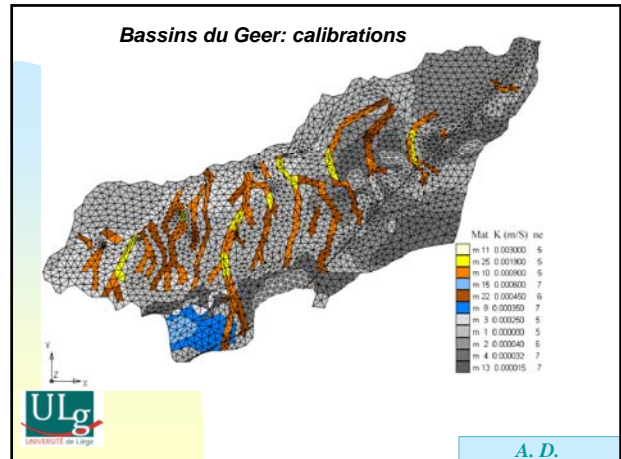
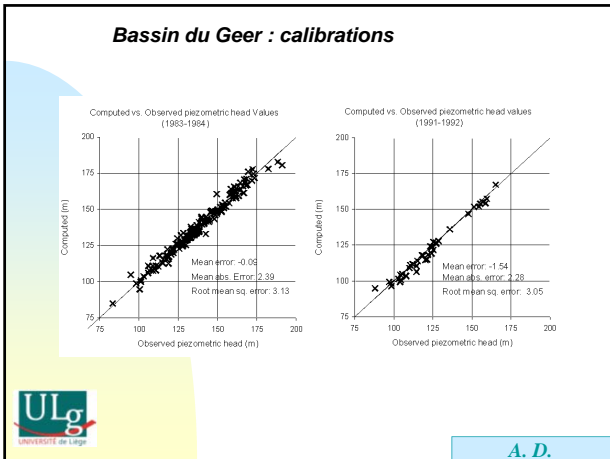
Bassins du Geer: calibrations

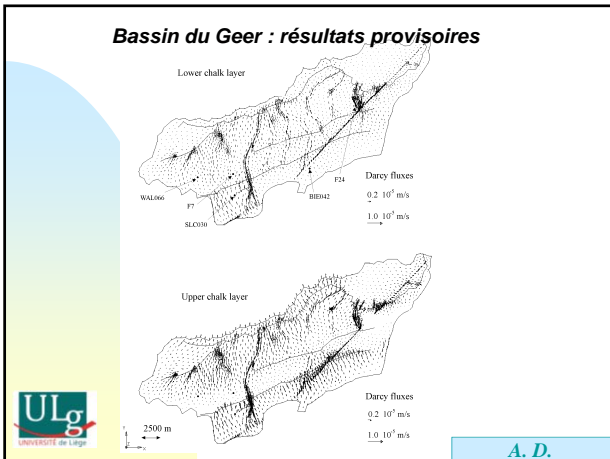
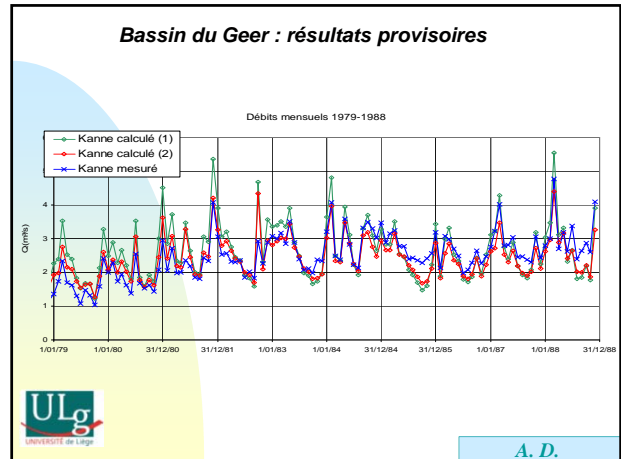
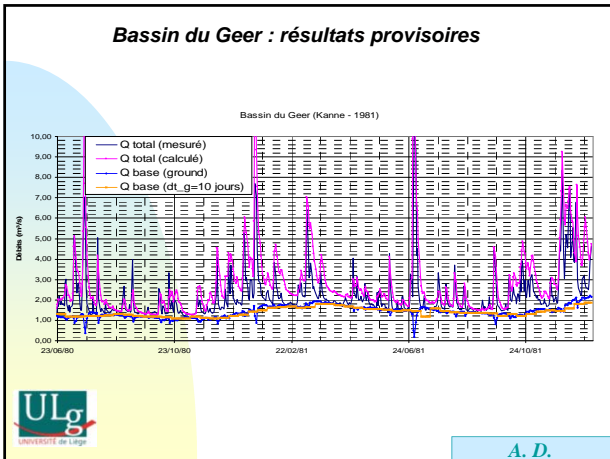


1991-1992



A. D.

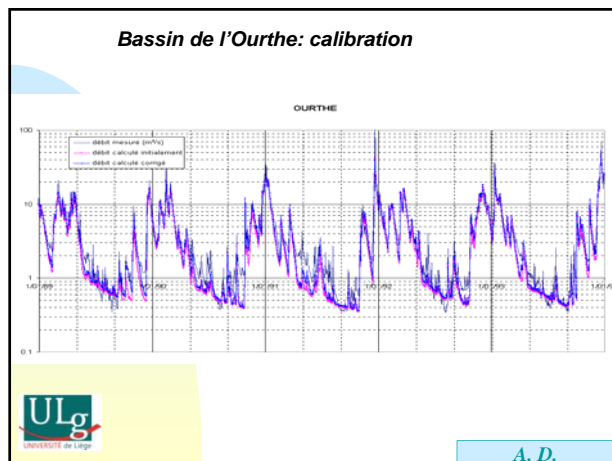
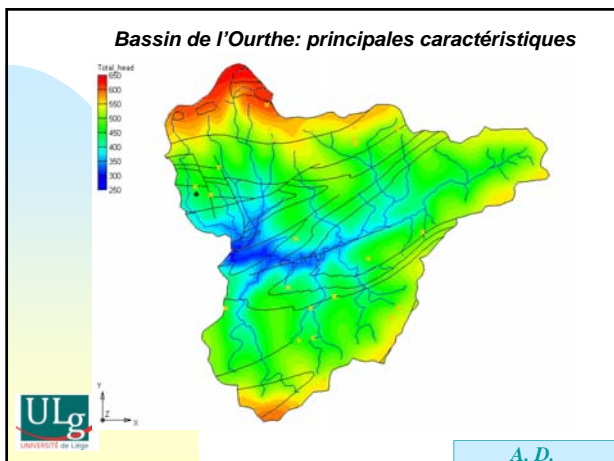
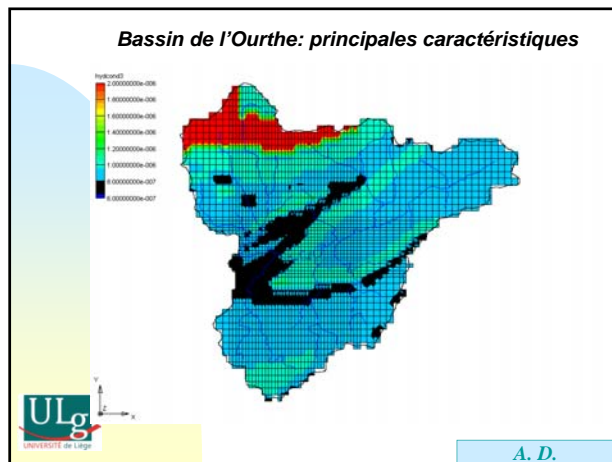
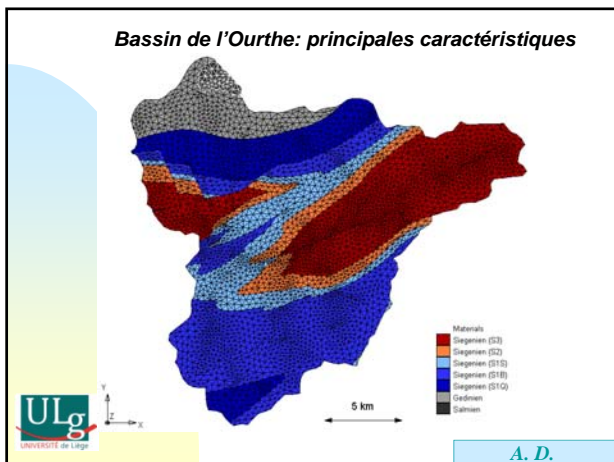
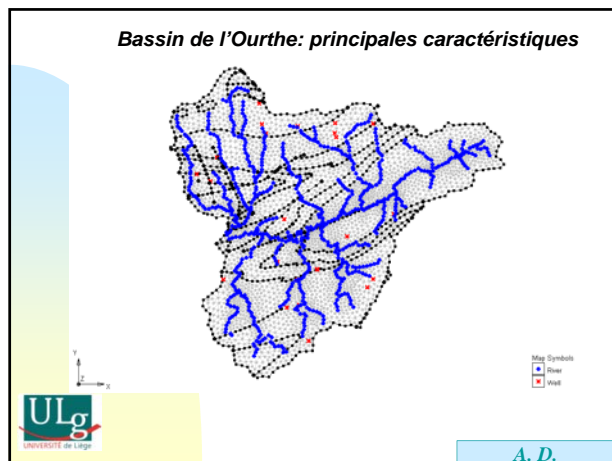


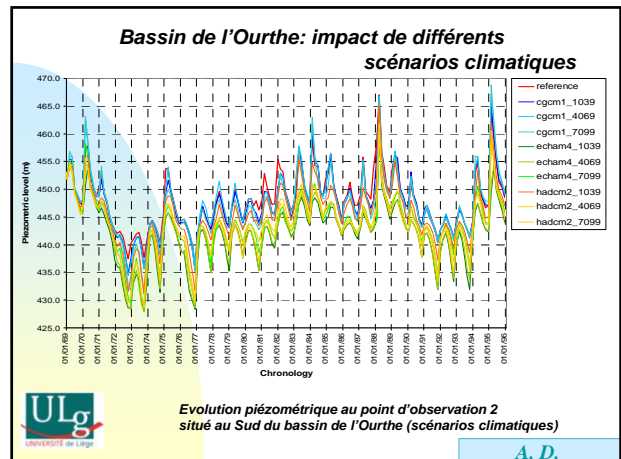
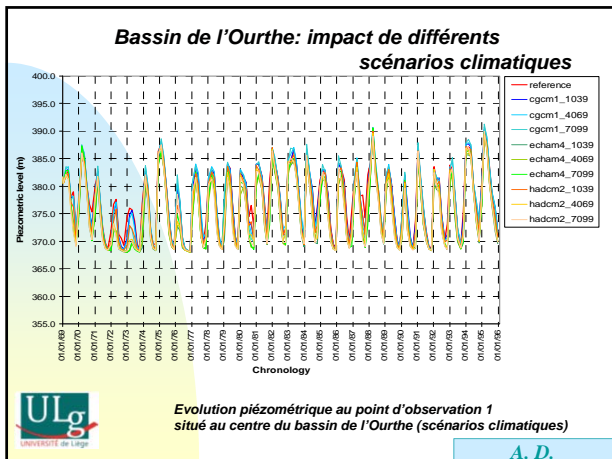


- ### Bassin de l'Ourthe: principales caractéristiques
- bassin où le rôle des eaux souterraines est limité;
 - en termes de débit de base, le bassin de l'Ourthe sera probablement très sensible aux changements climatiques;
 - la géologie est constituée de siltites et grès du Dévonien inférieur recouverts d'un colluvium (bed-rock altéré);
 - les roches sont fissurées mais les conductivités hydrauliques restent faibles.
- aquifère: quelques mètres supérieurs (colluvium) composés de schistes et grès altérés;
- peu ou pas d'exploitation des nappes aquifères: seuls quelques puits et drains construits dans la couche altérée, collectant de faibles quantités pour distribution très locale. La quantité d'eau souterraine totale exploitée est de l'ordre de 1 % de l'eau disponible
- ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE
- A. D.

- ### Bassin de l'Ourthe: principales caractéristiques
- conséquence: très peu de données sont disponibles
 - initialement le code MODFLOW a été essayé avec un maillage 3D de trois couches de cellules de différences finies... représentant le bed-rock fissuré, la partie altérée supérieure et le sol limoneux
 - beaucoup de difficultés: un maillage régulier de cellules 500m*500m avait été affiné dans les vallées, très sinueuses et à flancs escarpés: par conséquent il était très difficile de représenter de façon précise la géométrie du bassin
 - autre difficulté: MODFLOW résout l'équation d'écoulement seulement dans la partie saturée. La manière de remouiller les cellules 'rewetting option' amène des problèmes de convergence en régime transitoire
- ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE
- A. D.

- ### Bassin de l'Ourthe: principales caractéristiques
- le code SUFT3D code a été utilisé
 - un maillage 3D d'éléments finis basé sur les mêmes limites géologiques que précédemment: quatre couches sont représentées, du bas vers le haut, le bed-rock fissuré (2 couches), la couche altérée et le sol
 - 30292 éléments finis de 200 à 500 m (19495 noeuds)
 - le manque de données piézométriques ne permet pas une calibration rigoureuse
 - les débits totaux en rivière permettent juste une calibration globale
 - calibration en régime transitoire
- ULg
UNIVERSITÉ DE LIÈGE
- A. D.





- ... pour plus de détails:
- **L'interfaçage entre MO - MR - MGW :**
 - DASSARGUES, A., BROUYERE, S., CARABIN, G., and SCHMITZ, Fr., 1996, *Conceptual and computational challenges when coupling a groundwater model with ocean and river models*, in *Computational Methods in Water Resources XI*, Vol. 1: *Computational Methods in Subsurface Flow and Transport Problems*, pp. 77-84.
 - GHOT C.B., BAULER P., BECKERS J.-M., DELHEZ E.J., CARABIN G.J., DASSARGUES A.G., DELIEGE J.-F. and EVERBEQ E., 1998, *Sea air land modelling operational network*, in *Hydroinformatics'98*, Babovic V. & Larsen I.Ch. Eds., Balkema, pp. 371-377.
 - **Modélisation des interactions MR - MGW:**
 - CARABIN G., DASSARGUES A. and BROUYERE S., 1998, *3D flow and transport groundwater modelling including river interactions*, in *Computational Methods in Water Resources XII*, Vol. 1: *Computational Methods in Contamination and Remediation of Water Resources*, Burganos V.N., Karatzas G.P., Papatokas A.C., Brebbia C.A., Gray W.G. and Pinder G.F. Eds. pp. 569 -576, Computational Mechanics Publications.
 - DASSARGUES A., MARECHAL J.C., CARABIN G. and SELS O., 1999, *On the necessity to use three-dimensional groundwater models for describing impact of drought conditions on streamflow regimes*, in *Hydrological Extremes : Understanding, Predicting, Mitigating (Proc. of IUGG 99 Symposium HS1, Birmingham, July 1999)*, IAHS Publication n°255, pp. 165-170.
- A. D.

- ... pour plus de détails (suite):
- **Modélisation des interactions MO -MGW + influence de la drainance/alimentation par une rivière :**
 - CARABIN G. & DASSARGUES A., 1999, *Modeling groundwater with ocean and river interaction*, *Water Resources Research*, 35(8), pp. 2347-2358.
 - CARABIN G. & DASSARGUES A., 1999, *Development of a coupled flow and transport 3D model for simulating seawater intrusions in coastal aquifers*, *Proc. of the Int. Conf. on Sea-Water Intrusion Modelling 1998, SWIM 15*, W.De Breuck & L. Walschot Eds, Natuurwet. Tijdschr., Vol. 79 (1999) pp. 35-42.
 - **Modèle intégré Sol + Eau Souterraine + Rivière :**
 - G. CARABIN, S. BROUYERE, A. DASSARGUES, A. MONJOIE, C. SOHIER, S. DAUTREBANDE, J.-F. DELIEGE, J. SMITZ, 2001, *The new integrated hydrological model MOHISE: construction, implementation and results*, accepted for the *Int. Workshop on Catchment-scale Hydrological Modeling and Data Assimilation, September 3-5 2001, Wageningen, The Netherlands*.
- A. D.

