



Semaine ULg-FUSAGx

Une initiative du Centre d'Etudes Interdisciplinaires Wallonie-Bruxelles à Montréal

au Québec



Avec l'appui de la Région Wallonne - Bruxelles au Québec, de la Communauté Française et de la Région Wallonne de Belgique



Semaine ULg-FUSAGx au Québec

Modélisation des impacts des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines



A. Dassargues* & S. Brouyère



Dpt Géoresources, Géotechnologies et Matériaux de Construction, Université de Liège, Belgique

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




Pourquoi étudier l'impact des changements climatiques ... sur les eaux souterraines ?

- très peu d'études réalisées pour les eaux souterraines ...
- impact très dépendant des interactions avec les eaux de surface et des conditions d'infiltration/recharge ...
- utilisation nécessaire de modèles couplés/intégrés
- de plus en plus d'affirmations simplistes ...
- incertitudes des conditions du sous-sol ajoutées aux incertitudes des scénarios du futur ...
- scénarios du futur sans ou avec changements importants des pratiques agricoles ou de l'utilisation de l'eau ...



A. Dassargues & S. Brouyère 2004



Table des matières

- Modélisation couplée et intégrée
 - principes généraux
 - modèle sol
 - modèle eaux souterraines
 - modèle eaux de surface
 - intégration et couplages
- Exemple de la Hesbaye en Région Wallonne de Belgique
 - modèle eaux souterraines: construction, calibration, validation
 - résultats du modèle intégré
- Scénarios climatiques et hypothèses de travail
- Résultats en termes de réserves pour les eaux souterraines
- Conclusions et défis



A. Dassargues & S. Brouyère 2004



Modélisation couplée et intégrée

Construction d'un modèle déterministe, spatialement distribué, basé sur la physique des processus ('physically-based'), ...

... composé de trois sous-modèles inter-agissant:

- 'modèle sol'
- 'modèle eaux souterraines'
- 'modèle eaux de surface'

... reliés dynamiquement (couplés) et intégrés dans une structure globale

... a demandé:

- adaptation des différents sous-modèles pour une exécution en parallèle
- construction d'une 'meta-structure' pour contrôler les échanges d'instructions et de données



A. Dassargues & S. Brouyère 2004



Modélisation couplée et intégrée

Pourquoi une modélisation 'physiquement significative' (physically consistent) ?

... les autres approches ne nous satisfont pas !

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

→

- 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. Dassargues & S. Brouyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

... projets ayant contribué 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.

A. Dassargues & S. Brouyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

'Modèle sol' C. Sohier & S. Dautrebande
Hydraulique agricole, HA-FUSAGx, Gembloux, Belgium

Watershed discretised into grid squares

climatic data: precipitations, temperatures, solar radiation

pedologic map: majority class for each cultural entity

slope map: average slope for each cultural entity

Ponderation of the entities results by grid square and Water balance for each grid square

Water balance for each cultural entity

HA-FUSAGx

Référence: Sohier C., Meerebouts B., Deglin D. and Dautrebande S., 2000. Validation of the new catchment hydrological model EPIC-GRID for soil moisture evaluation and discharges simulation. Presented at the Workshop 'The future of distributed hydrological modeling', Leuven, Belgium, April 2000.

A. Dassargues & S. Brouyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

'Modèle eaux souterraines'

Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement, GéomaC, Faculté des Sciences Appliquées, ULg

SUFT3D (Saturated Unsaturated Flow and Transport in 3D)
Code Eléments Finis permettant:

- de modéliser la zone saturée et la zone non-saturée en 3D;
- raffinement locaux de maillages en fct des données géologiques;
- intrusions d'eaux salées;
- conditions d'injection particulières;
- traitement des données et résultats par GMS © et compatibilité SIG complète

Référence: Carabin, G., Dassargues A., 1999, Modeling groundwater with ocean and river interaction, Water Resour. Res., 35(8), 2347-2358.
Carabin G., Dassargues A. and Brouyère 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, pp. 569 - 576, Computational Mechanics Publications.

A. Dassargues & S. Brouyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

'Modèle eaux de surface'

J-F. Delière & J. Smitz
Centre Environnement (CEME), ULg

Modèle Rivière
simulant la dynamique de l'eau dans le réseau de rivières avec comme 'input':
flux venant des sols et des transferts de surface
flux échangés avec les eaux souterraines
calcul basé sur les équations de St Venant (équilibres de masse et de mv) dans un chenal supposé 1D.

... est appliqué au réseau entier, y compris le fleuve principal et ses affluents. Les caractéristiques (pentes, sections, largeurs, rugosité ...) sont introduites au pre-processing

Référence: Smitz, J., Everbecq, E., Delière, J.-F., Descy, J.-P., Wollast, R. and Vanderborght, J.-P., 1997, PEGASE: une méthodologie et un outil de simulation prévisionnelle pour la gestion de la qualité des eaux de surface (PEGASE: a methodology and a forecasting simulation tool for surface water quality management), Tribune de l'Eau, 588, 73-82.

A. Dassargues & S. Brouyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

Schéma général simplifié ... pour quantité d'eau

pluie évapotranspiration

ruissellement superficiel

écoulement hypodermique

drainage

percolation

infiltration

modèles implémentés dans un environnement parallèle

protocole d'échanges de données MPI

A. Dassargues & S. Brouyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

Exemple des interactions nappe-rivière

Écoulement:

$$q(x, y, t) = \frac{K'}{e} [h_g(x, y, t) - h_r(x, y, t)]$$

... quand $h_g < b_r$, h_g remplacé par b_r

$$q(x, y, t) = \frac{K'}{e} [b_r(x, y, t) - h_r(x, y, t)]$$

Transport: flux advectif de contaminant

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

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

le pas de temps d'interaction = le plus petit commun multiple

MR
MGW

A. Dassargues & S. Brouyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

+ 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

200 m Anseremme, Dinant

A. Dassargues & S. Bruyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

Tests:

- 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

Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées des hauteurs piézométriques

Campine anversoise, Antwerpen

Piezo 5 (X=160000m; Y=221980m)

Head (m)

Time (d/m/y)

A. Dassargues & S. Bruyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

... pollution continue dans la rivière (50 g/s) pendant 6 mois (C_r diminue à cause de la dilution par les entrées d'eau en aval)

Water level (m)

Exchanged mass flux of tracer (g/d)

Time (d/m/y)

A. Dassargues & S. Bruyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

10/6/93 31/10/93

200 m

A. Dassargues & S. Bruyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

Observations concernant le taux massique de traceur pompé au puits:

- arrivée au puits après environ 40 jours;
- 1^{ère} 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, $n_a=0.02$ et grad $h = 0.6\%$)
- trajet de 1.5 j pour 1.6 km en rivière

Mass flux for the competitive tracer (g/s)

Time (d/m/y)

A. Dassargues & S. Bruyère 2004

Modélisation couplée et intégrée

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

Concentrations simulées (contours d'isoconcentrations pour 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 7,5, 10, 12,5, 15 et 17,5 kg/m³)

- 31/1/1993 (fin de la période d'injection),
- 1/5/1993,
- 1/8/1993 et
- 1/12/1993

Time day 0

200 m

A. Dassargues & S. Bruyère 2004

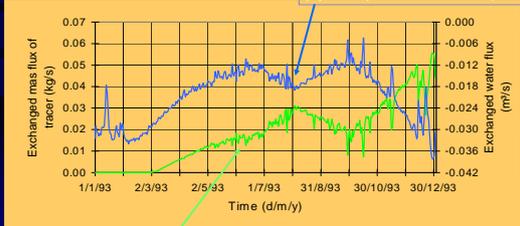
Modélisation couplée et intégrée



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

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

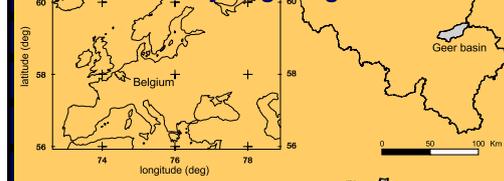
flux d'eau du MGW vers le MR
(- parce que MGW vers MR)



flux massique de traceur arrivant dans MR

A. Dassargues & S. Brauyère 2004

Hesbaye (bassin du Geer) : hydrologie et hydrogéologie



A-A' : cross-section (Fig. 5)

A. Dassargues & S. Brauyère 2004

Hesbaye (bassin du Geer) : hydrologie et hydrogéologie



$$P = ETR + Q_{GEER} + Q_{OUT} + \Delta R_{réserves} + \Delta P_{pertes}$$

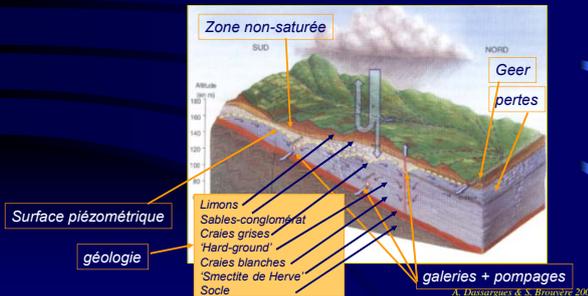
$$810 = 508 + 145 + 88 + 7.5 + 61.5 \text{ mm}$$

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

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

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

Bassin du Geer 450 km²

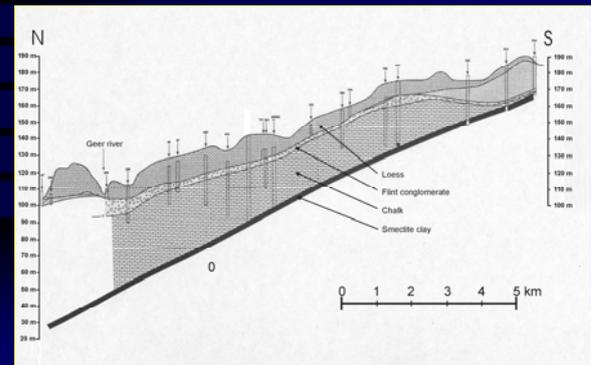


A. Dassargues & S. Brauyère 2004

Hesbaye : hydrogéologie et modélisation



Bassin du Geer : principales caractéristiques



A. Dassargues & S. Brauyère 2004

Hesbaye : hydrogéologie et modélisation



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 finis, 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.
- 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;



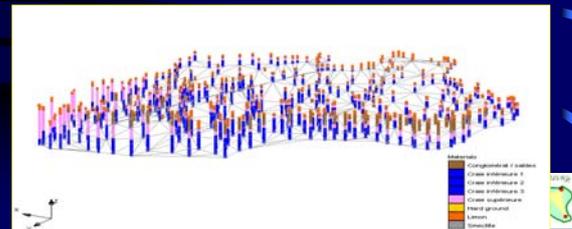
A. Dassargues & S. Brauyère 2004

Hesbaye : hydrogéologie et modélisation

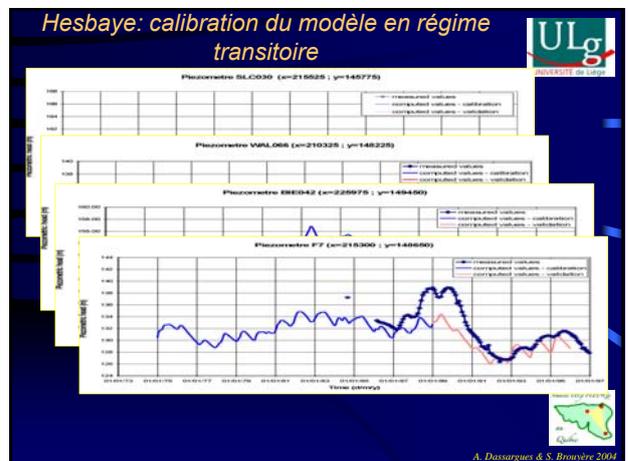
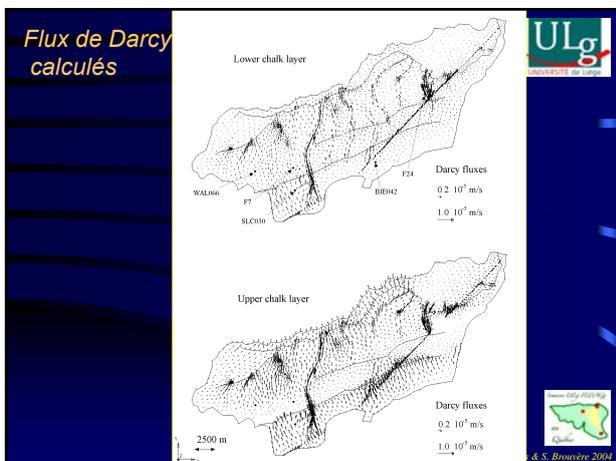
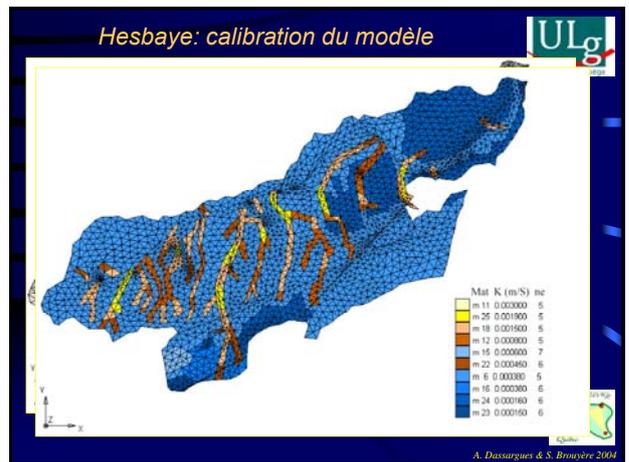
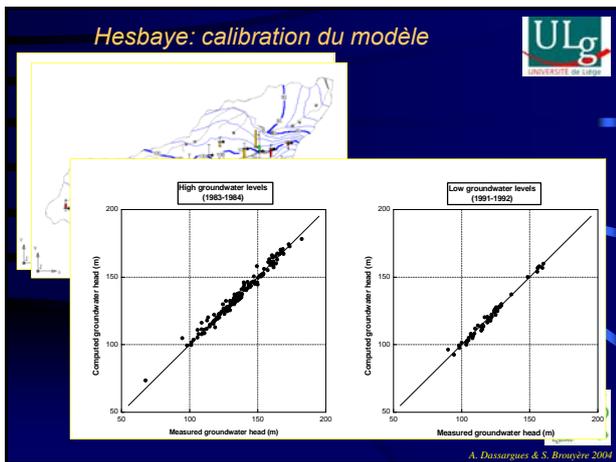
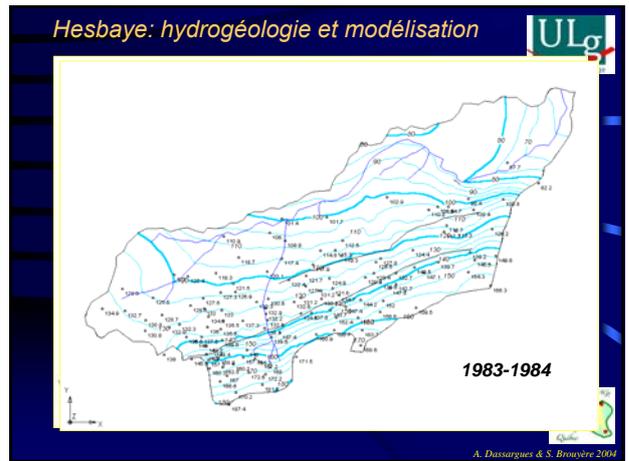
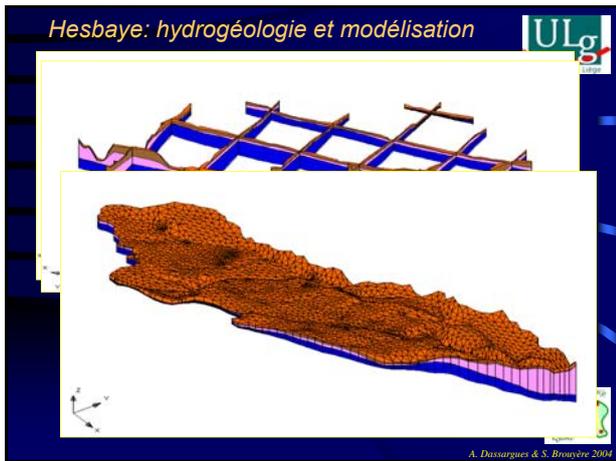


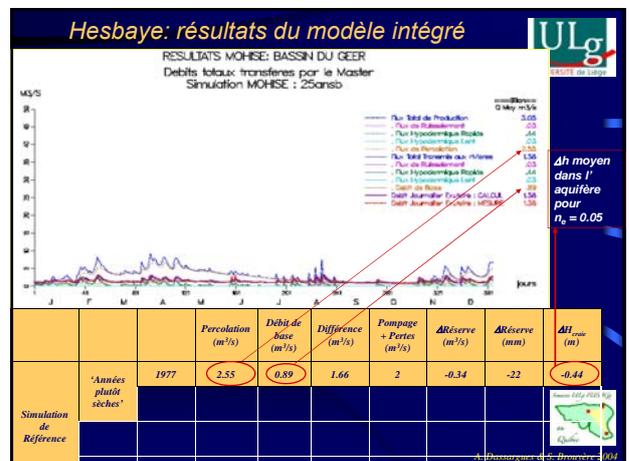
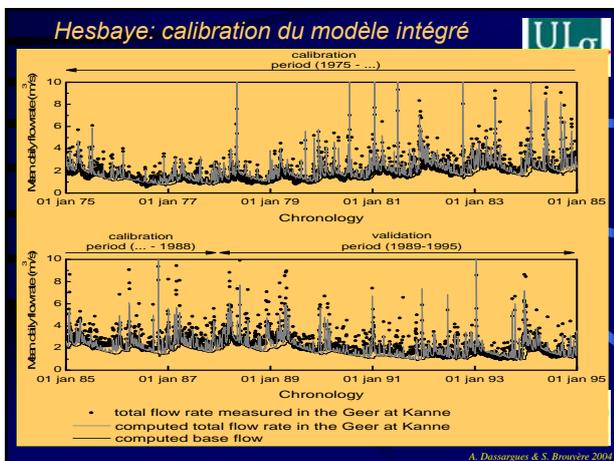
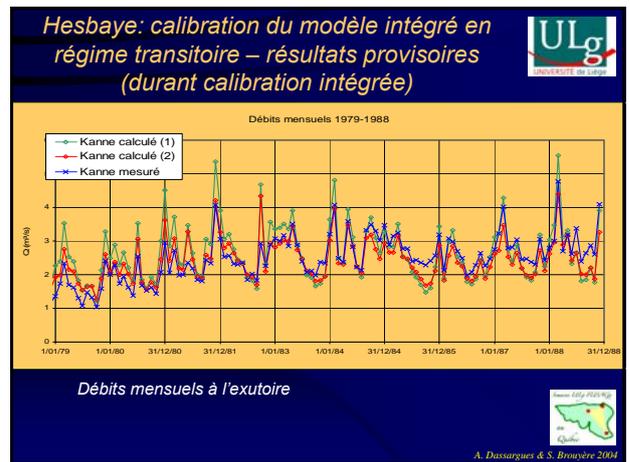
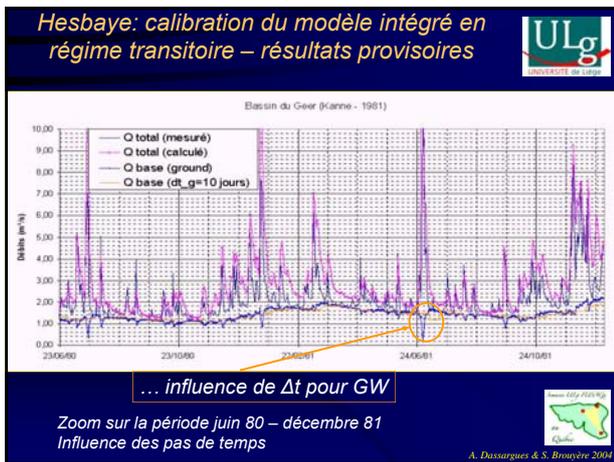
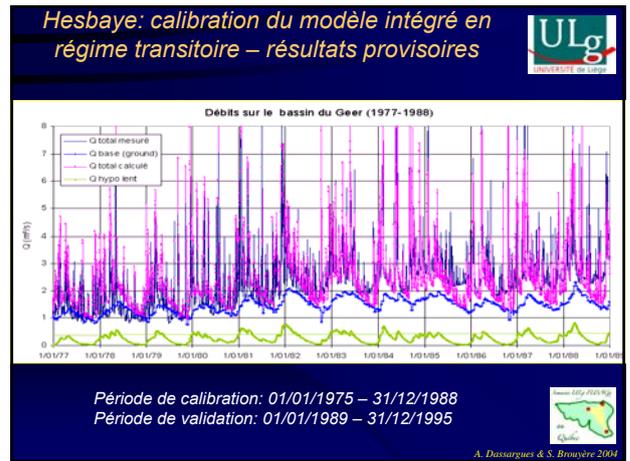
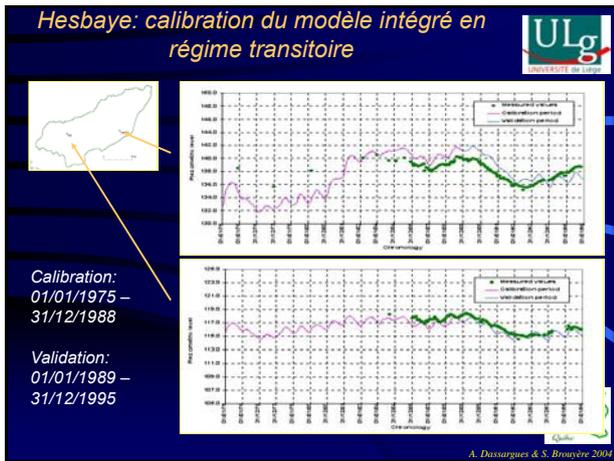
- discrétisation suivant les critères suivants:
 - une taille moyenne des éléments de l'ordre de 700 m
 - des raffinements sont nécessaires dans les zones où des sollicitations importantes sont imposées (failles, galeries et pompages)

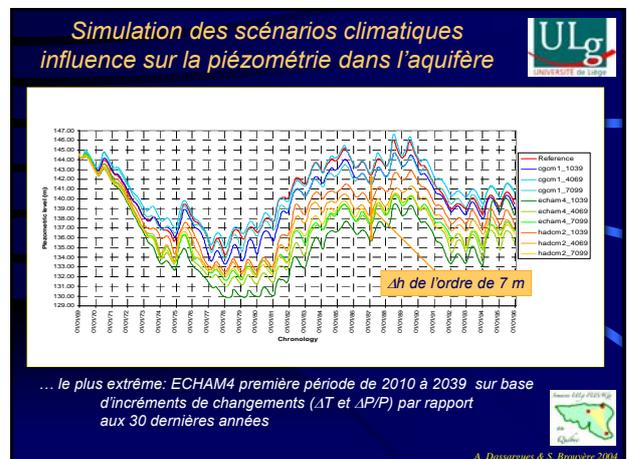
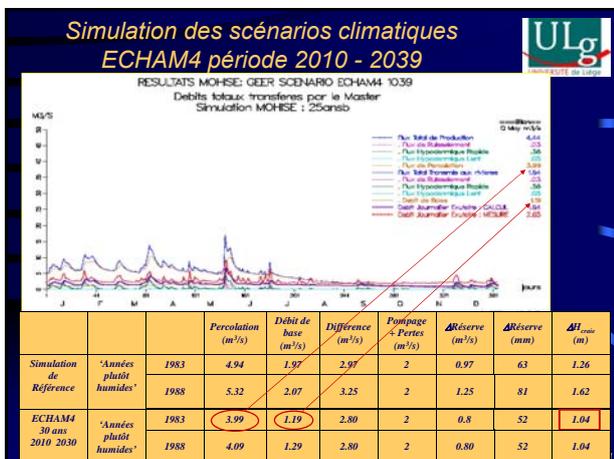
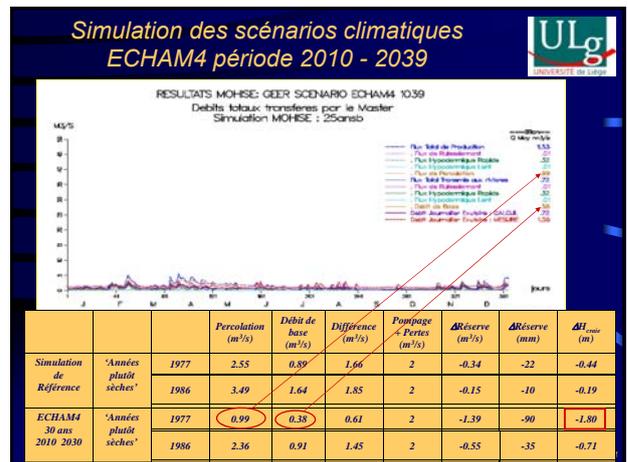
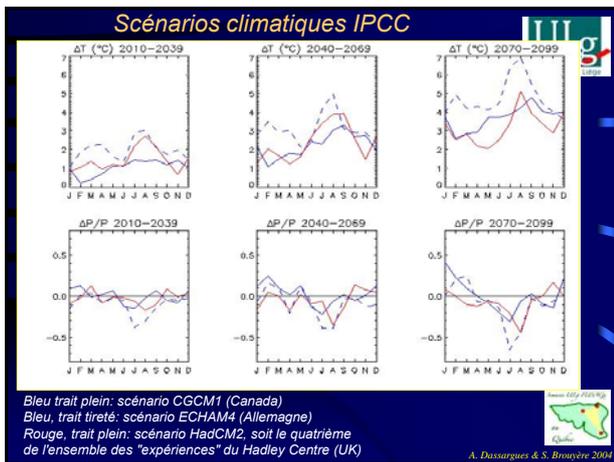
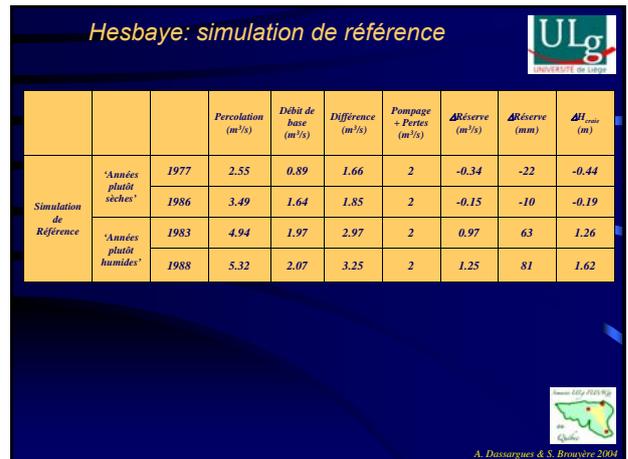
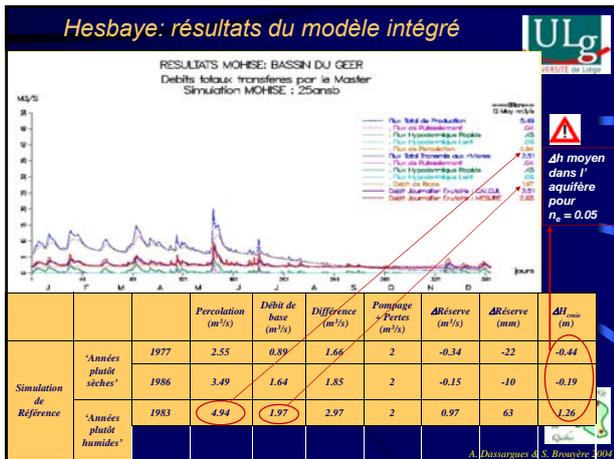
- le maillage compte 31423 éléments finis (18680 noeuds)

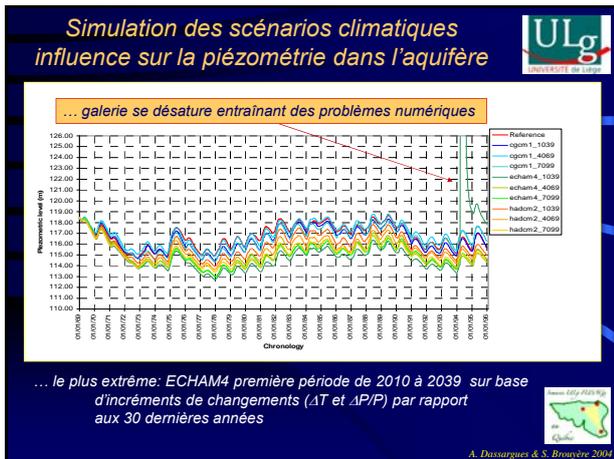


A. Dassargues & S. Brauyère 2004









Simulation des scénarios climatiques estimation bilantaire annuelle

			Percolation (m ³ /s)	Débit de base (m ³ /s)	Différence (m ³ /s)	Pompage + Pertes (m ³ /s)	ΔRéserve (m ³ /s)	ΔRéserve (mm)	ΔH _{max} (m)
Simulation de Référence	'Années plutôt sèches'	1977	2.55	0.89	1.66	2	-0.34	-22	-0.44
		1986	3.49	1.64	1.85	2	-0.15	-10	-0.19
	'Années plutôt humides'	1983	4.94	1.97	2.97	2	0.97	63	1.26
		1988	5.32	2.07	3.25	2	1.25	81	1.62
ECHAM4 30 years	'Années plutôt sèches'	1977	0.99	0.38	0.61	2	-1.39	-90	-1.80
		1986	2.36	0.91	1.45	2	-0.55	-35	-0.71
	'Années plutôt humides'	1983	3.99	1.19	2.80	2	0.8	52	1.04
		1988	4.09	1.29	2.80	2	0.80	52	1.04

A. Dassargues & S. Brouyère 2004

- ### Conclusions
- pour prédictions fiables ... simulations 'physiquement significatives' et 'spatialement distribuées' ... pour notamment tenir compte des hétérogénéités des aquifères;
 - l'impact des changements climatiques sur les réserves en eaux souterraines est loin d'être simple à prédire;
 - ici calculs sous hypothèses fortes:
 - sollicitations de l'aquifère inchangées;
 - occupation du sol inchangée;
 - scénarios climatiques ramenés à des incréments moyens par rapport à la situation actuelle : peu réaliste;
 - incertitude des scénarios n'est pas prise en compte;
 - tendances vers des déficits: mauvais signe car cela ne pourra que se confirmer si irrigation croissante, si plus d'extrêmes climatiques, etc.
 - quid de l'évolution de la qualité ?
- A. Dassargues & S. Brouyère 2004

- ### Merci
- ### Crédits
- S. Brouyère & G. Carabin, Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement, Dpt GéomaC, ULg
 - C. Sohler & S. Dautrebande, Hydraulique agricole, HA-FUSAGx, Gembloux
 - J-F. Delière & J. Smits Centre Environnement (CEME-ULg)
- A. Dassargues & S. Brouyère 2004

Quelques références

- Amell, N., 2002. Hydrology and Global Environmental Change, Prentice Hall, 346 p.
- Baeton, A. M., 2002. Large freshwater lakes: present state, trends, and future. *Environ. Cons.*, 29(1), 21-38.
- Brouyère, S., Carabin, G. and Dassargues, A., 2003. Climate change impacts on groundwater reserves: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrogeology Journal*, DOI 10.1007/s10040-003-0293-1.
- Carabin, G., Dassargues A., 1999. Modeling groundwater with ocean and river interaction. *Water Resour. Res.*, 35(8), 2347-2358.
- Dassargues A., Maréchal J.C., Carabin G. and Sals 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, 165-170.
- De Wit, M.J.M., Warmerdam, P.M.M., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R., Roulin, E., Cheymol, A., van Deursen, W.P.A., van Walsum, P.E.V., Ververs, M., Kwadijk, J.C.J., Buiteveld, H., 2001. Effect of climate change on the hydrology of the river Meuse. Wageningen University, Environmental Sciences, Water Resources, Report 108, 134 p.
- Gellens, D., Roulin, E., 1998. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *J. Hydrol.*, 210, 242-258.
- Gogu, R., Carabin, G., Hallet, V., Peters, V., Dassargues, A., 2001. GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling. *Hydrogeology Journal*, 9, 555-569.
- IPCC Third Report, 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of the working group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), McCarthy J.J., Canziani, O.F., Leary, N. A., Dokken, D.J., White, K.S. (Eds.), Cambridge Univ. Press, UK, 1009p.
- Loaiciga, H.A., Velds, J.B., Vogel, R., Garvey, J., Schwarz, H., 1996. Global warming and the hydrological cycle. *J. Hydrol.*, 174, 83-127.
- Loaiciga, H.A., Maidment, D.R., Valdes, J.B., 2000. Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas. *USA. J. Hydrol.*, 227, 173-194.
- Meinzel, L., Bürger, G., 2002. Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *J. Hydrol.*, 267, 53-64.
- Westmacott, J. R., Burn, D. H., 1997. Climate change effects on the hydrological regime within the Churchill-Nelson River Basin. *J. Hydrol.*, 202, 263-279.
- Yusoff, I., Hiscock, K.M., Conway, D., 2002. Simulation of the impacts of climate change on groundwater resources in eastern England. In: Hiscock, K.M., Rivett, M.O., Davison, R.M. (eds) Sustainable Groundwater Development, Geological Survey, London, Special publication, 193, 325-344.

A. Dassargues & S. Brouyère 2004

