

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ ET DU RISQUE ASSOCIÉS À LA SÉCHERESSE DES NAPPES PHRÉATIQUES EN BELGIQUE : SIMULATION DE LA RECHARGE AU NIVEAU DES ZONES AGRICOLES AVEC LE MODÈLE B-CGMS

JACQUEMIN I. ⁽¹⁾, VERBEIREN B. ⁽²⁾, ULJEE I. ⁽³⁾, ENGELEN G. ⁽³⁾, HUYSMANS M. ⁽²⁾, TYCHON B. ⁽¹⁾

(1) Département des sciences et Gestion de l'Environnement, Campus Environnement d'Arlon – Université de Liège, 185 Avenue de Longwy, 6700 Arlon, Belgique [ingrid.jacquemin@ulg.ac.be]

(2) Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, 2 avenue de la plaine, 1050 Bruxelles, Belgique [boud.verbeiren@vub.ac.be]

(3) Unit Ruimtelijke Milieuaspecten - Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 200 Boeretang, 2400 Mol, Belgique [guy.engelen@vito.be]

Résumé – Les sécheresses des nappes phréatiques restent peu étudiées aux latitudes tempérées. Le projet GroWaDRISK a pour objectif de combler cette lacune, en étudiant les facteurs influents et les impacts de ces sécheresses sur l'environnement, l'approvisionnement en eau et l'agriculture dans la zone des bassins versants de la Dijle et du Demer. Afin d'estimer la recharge actuelle (1980-2012), les modèles B-CGMS et WetSpas sont utilisés successivement sous différentes couvertures et occupations de sols. Seul B-CGMS sera présenté ici. Le modèle sera adapté afin d'être utilisé pour les principales classes d'occupation agricole des sols : terres arables (froment d'hiver, maïs,...), vergers, horticulture et floriculture ainsi que prés et prairies. L'utilisation de ce modèle se justifie par sa précision, tant du point de vue spatial que temporel, nous permettant de proposer une estimation plus précise de la recharge en fonction des principales cultures de la zone d'étude.

Mots-clés : sécheresse de nappe phréatique, climat, agrométéorologie, modélisation.

Abstract – Drought-related vulnerability and risk assessment of groundwater recharge in Belgium: groundwater recharge simulation for agricultural land with the B-CGMS. Groundwater drought remains poorly studied under temperate climate. The GroWaDRISK project aims at covering this gap by studying the influencing factors and the drought-related impacts on the environment, water supply and agriculture in the area of the Dijle and Demer catchment. In order to evaluate the current recharge (1980-2012), both models B-CGMS and WetSpas are used under various land uses and land covers. Only B-CGMS will be presented in this paper. The model will be adapted in order to be applied on agricultural land: for arable land (winter wheat, maize,...), orchards, horticulture and floriculture areas and for meadows and grassland classes. The use of this model can be justified by the precision, from both spatial and temporal, which allow us to propose a more accurate recharge assessment in function of the main crops of the study area.

Keywords: groundwater drought, climate, agrometeorology, modelling.

Introduction

Le risque de sécheresse est souvent considéré comme insignifiant aux latitudes tempérées et par conséquent, reste peu étudié. Cependant, dans le contexte des changements climatiques et socio-économiques majeurs, mieux comprendre les facteurs influents et les impacts potentiels des sécheresses, et tout particulièrement, des sécheresses des nappes phréatiques, se révèle capital pour atteindre une gestion durable de l'eau. Le projet GroWaDRISK a pour objectif de combler cette lacune, en permettant (1) une meilleure compréhension des facteurs déterminants en milieu tempéré et (2) en développant une méthodologie et des outils d'aide à la planification et à la décision en matière de gestion des eaux souterraines.

La sécheresse est souvent abordée d'un point de vue météorologique, et définie comme un risque naturel caractérisé par un déficit de précipitations pour une zone étendue et durant une période significative. En lien avec cette définition de la sécheresse météorologique, la sécheresse de nappe se produit lorsqu'un déficit temporaire en eau affecte les masses d'eau souterraine. Ce phénomène est complexe et plus difficile à identifier (Van Lanen et Peters, 2002), notamment parce que son temps de réponse est plus long que celui des sécheresses météorologiques. Mais les sécheresses de nappe ne sont pas seulement des phénomènes naturels, puisqu'elles subissent également les effets de l'activité humaine. En conséquence, les trois facteurs influents principaux qui ont été identifiés sont : (1) le climat, pouvant influencer sur la recharge de la nappe ; (2) l'occupation et la couverture du sol qui peuvent jouer sur la recharge mais également sur les besoins de pompage de l'eau pour l'irrigation ; (3)

l'utilisation des eaux souterraines pour les activités humaines. La combinaison de ces trois facteurs peut considérablement affecter la gestion durable des eaux souterraines, et impacter l'agriculture, l'approvisionnement en eau et l'environnement (Vogt et Somma, 2000). Il convient de réaliser un bilan des différentes composantes du système de la nappe pour la période actuelle (de 1980 à 2012) et, ensuite, d'envisager plusieurs scénarios climatiques et socio-économiques (horizon 2045) pour évaluer les changements au niveau de la nappe et les impacts potentiels.

Établir un bilan passe donc par l'évaluation l'une des entrées du système : la recharge de la nappe. Pour ce faire, deux modèles seront utilisés afin de produire une estimation spatialisée de la recharge : le modèle B-CGMS, pour « Belgian-Crop Growth Monitoring System » (Diepen, 1992 ; Genovese, 1998 ; Boogaard *et al.*, 2002) et le modèle WetSpass, pour « Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under quasi-Steady State (Batelaan & De Smedt, 2001, 2007). Ce dernier propose une estimation de la recharge mensuelle sur base de la relation $R = P - S - E$, où R est la recharge, P les précipitations, S le ruissellement de surface et E l'évapotranspiration. Cette dernière est calculée sur base de l'évapotranspiration potentielle corrigée pour une série de paramètres statiques (sol, occupation/couverture de sol, pente,...). C'est pourquoi, afin de proposer une évaluation plus précise pour les zones agricoles, nous utilisons B-CGMS qui, de par ses caractéristiques de modèle de croissance, tient compte de la période végétative de chaque culture. L'objectif de cet article est donc de présenter la méthode appliquée et, ensuite, de valider et analyser les résultats de recharge obtenus à l'aide du B-CGMS, pour la période 1980-2012.

1. Méthodologie

1.1. Le modèle «Belgian-Crop Growth Monitoring System» (B-CGMS)

B-CGMS est une version adaptée pour la Belgique du système européen de croissance des cultures, CGMS, notamment utilisé pour la prévision des rendements. Ce système fournit des données de croissance pour les principales cultures présentes en Belgique à un pas de temps journalier. La résolution spatiale des unités élémentaires de simulation correspond à la superposition de trois couches d'information, permettant ainsi d'obtenir des unités homogènes d'un point de vue (1) pédologique, (2) météorologique (grille de 10 x 10 km) et (3) administratif (figure 1). Ces unités peuvent ensuite être agrégées selon le niveau souhaité : des communes jusqu'aux provinces ou

régions agricoles du pays. Mais au-delà de l'estimation des rendements, le modèle propose d'autres paramètres comme les composantes du bilan en eau, qui incluent la recharge.

Cependant, afin de répondre au mieux aux besoins du projet, notre méthodologie a dû être adaptée pour contourner deux problèmes liés aux caractéristiques du B-CGMS. En effet, le modèle ne permet pas de réaliser des simulations continues sur plusieurs années et même, de plusieurs couvertures se succédant au cours

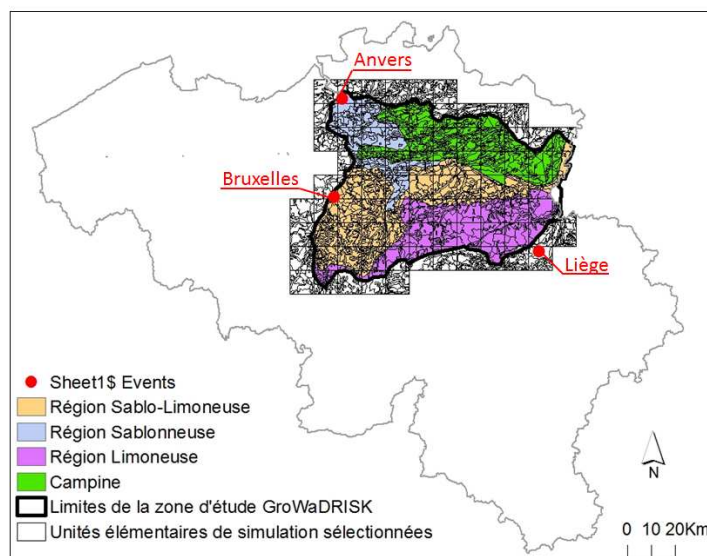


Figure 1. Localisation de la zone d'étude en Belgique

d'une même année. Une fois que la culture simulée est arrivée à maturité, le système s'interrompt et lors de la simulation suivante, la teneur en eau du sol est réinitialisée sur la base d'une valeur par défaut, et non pas en fonction de la situation au terme de la simulation précédente. Désormais, la teneur en eau du sol peut être initialisée en fonction de la valeur du jour précédent (*i.e.* la simulation précédente).

1.2. Matériel et zone d'étude

B-CGMS a été adapté pour les principales occupations/couvertures du sol de la zone d'étude, située au Nord de la Belgique, dans une zone comprise entre les villes d'Anvers, Liège et Bruxelles (figure 1). Cette région correspond aux bassins versants de la Dyle et du Demer, coïncidant approximativement avec les limites de la nappe souterraine du Brulandtkrijt. Sur la base de la carte d'occupation du sol (figure 2), B-CGMS est utilisé pour fournir une estimation de la recharge pour : (1) les terres arables, (2) les prés et prairies, (3) les vergers et enfin (4) les zones de floriculture et d'horticulture.

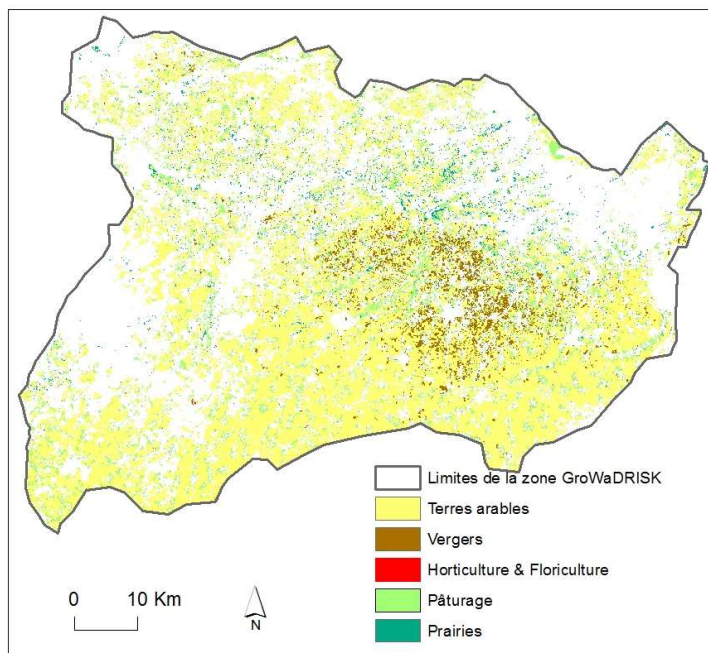


Figure 2. Carte d'occupation du sol partielle de la zone GroWaDRISK en 2010.

Les terres arables tiennent une place importante dans la zone d'étude (+ de 200 000 ha en 2010, année de référence), et tout particulièrement au sud, dans la zone limoneuse qui compte plus de 40 % de la zone arable à elle seule. Les principales cultures de la zone sont le froment et l'orge d'hiver, le maïs et la betterave ainsi que dans une moindre mesure, les pommes de terre et le colza. Elles sont déjà implémentées dans B-CGMS. Par contre, des adaptations ont dû être réalisées afin de pouvoir répondre à la demande pour les quatre autres classes. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés de la base de données du modèle WOFOST (Diepen *et al.*, 1989), version non

spécialisée de (B-)CGMS afin d'ajouter deux nouvelles couvertures du sol : une herbacée, pour les zones de pré et prairies, et les fèves et féveroles pour les zones d'horticulture et de floriculture, seule culture dans la liste dont la période végétative se rapprochait le plus des caractéristiques requises pour ces zones. Enfin, pour la dernière classe des vergers, nous avons réalisé un bilan simplifié en eau, en prenant appui sur la base de données de B-CGMS afin de proposer des résultats cohérents. Ce bilan se base sur la relation $R = RU + P - ET_R$, où R est la recharge, RU la réserve utile en eau, P les précipitations, ET_R l'évapotranspiration des zones de verger et RU_c la réserve en eau utile à la capacité au champ. $R = 0$ quand $RU \leq RU_c$. L'évapotranspiration est calculée comme $ET_C = (K_{CB,L} * K_S) * ET_0$ où ET_0 est l'évapotranspiration potentielle fournie par B-CGMS et $K_{CB,L}$ le coefficient cultural en fonction du stade de développement L ; K_S représente l'effet du manque d'eau sur la transpiration (Allen *et al.*, 1998). Pour chacune des cellules de la grille météorologique, B-CGMS calcule l'évapotranspiration potentielle (ET_0) sur base de l'équation de Penman.

2. Résultats

2.1. Validation

L'une des méthodes les plus utilisées, mais aussi la plus simple, pour estimer la recharge de la nappe phréatique repose sur la relation $R = P - ET_0$, où R est la recharge, P les précipitations et ET_0 l'évapotranspiration potentielle. Nous pouvons comparer les résultats obtenus avec cette méthode et avec B-CGMS, comme dans l'exemple présenté dans le tableau 1. Au cours de la première année de notre série (1980), nous pouvons observer que l'évapotranspiration et la recharge sont similaires les deux premiers mois pour le maïs et le froment d'hiver. Les résultats divergent ensuite, progressivement, à cause du développement du froment d'hiver, alors que le sol est toujours à nu pour le maïs. En mai, les résultats divergent considérablement : ceci s'explique par le

fait que le maïs atteint son stade d'émergence et voit son complexe racinaire se développer, allant ainsi puiser de l'humidité plus en profondeur et évitant ainsi au sol de se dessécher. Le froment d'hiver a atteint sa profondeur racinaire maximum, et ne peut plus bénéficier de ce mécanisme pour contrebalancer l'absence de précipitations. Cette différence de teneur en eau du sol se marque encore plus en juillet, lorsque les dernières précipitations de juin (plus de 60 mm en 7 jours) ont suffi à la zone de maïs pour atteindre sa capacité au champ, alors que le déficit n'a pas pu être complètement comblé pour la zone de blé. Le mois d'août est caractérisé par une recharge nulle pour les deux cultures, puis à nouveau les comportements se distinguent. En effet, le froment d'hiver est arrivé à maturité au cours du mois d'août et a été récolté, alors que le maïs ne le sera qu'en octobre. Ces résultats ponctuels illustrent donc l'impact sur la recharge, de la durée de la période végétative et son occurrence dans l'année. Mais l'utilisation de B-CGMS a un autre avantage : deux unités élémentaires de simulation, ayant des caractéristiques pédologiques différentes, présenteront des valeurs de recharge légèrement différentes.

Nous proposons également de valider nos résultats en les comparant à d'autres études menées sur la zone, notamment avec le modèle WetSpass. Par exemple, dans une étude menée sur le bassin versant de la Petite Nèthe (année de référence 2000), la recharge des zones agricoles a été estimée à plus de 400 mm (Dams *et al.*, 2008). Nos résultats seront aussi comparés avec d'autres études réalisées dans la même zone ou en Belgique, avec WetSpass (Batelaan *et al.*, 2007 ; Batelaan & De Smedt, 2007 ; Woldeamlak *et al.*, 2007).

2.2. Analyse

La présente analyse est centrée sur la classe dominante des terres arables. Afin de mieux cerner le rôle du climat et de la couverture du sol, deux jeux de résultats sont présentés : le premier ne prenant en compte que le climat et le second, combinant le climat et les changements de couverture du sol. Ne disposant que d'une seule carte d'occupation du sol

Tableau 1. Exemple de bilan de recharge cumulée mensuelle (en mm), avec les précipitations (P), l'évapotranspiration potentielle (ET_0), l'évapotranspiration calculée (ET) et la recharge (R) pour le froment d'hiver et le maïs pour une unité de simulation donnée.

Unité de simulation : n° cellule : 87 n° unité de sol : 839				Froment d'hiver		Maïs	
Mois 1980	P	ET_0	R	ET	R	ET	R
1	49	10	38	7	32	7	33
2	63	18	45	10	63	9	63
3	76	29	47	16	45	14	47
4	43	53	0	35	31	22	36
5	49	96	0	85	0	24	18
6	87	87	0	86	0	48	30
7	173	76	97	67	79	67	139
8	52	88	0	36	0	78	0
9	24	61	0	25	1	53	0
10	81	33	48	22	57	29	0
11	36	23	13	14	22	14	3
12	74	16	59	11	63	11	63
Total	807	592	346	414	393	376	432

(2010), nous travaillerons avec une superficie totale fixée, mais au sein de laquelle les proportions des différentes cultures évolueront au cours du temps. Concernant ces évolutions, nous pouvons notamment remarquer que, en 30 ans, la superficie totale des céréales d'hiver de la zone d'étude a diminué de près de 20 %, au profit du maïs. La recharge de chaque cellule d'un hectare (figure 2) a donc été pondérée en fonction des statistiques agricoles de la commune à laquelle elle appartient.

Les résultats obtenus (tableau 2) indiquent que la recharge moyenne dans la zone d'étude tend à diminuer au cours des 30 dernières années, mais semble peu impactée par les changements de couverture du sol. Afin de vérifier ces observations est appliqué le test non-paramétrique de Mann-Kendall. Pour la zone d'étude, les résultats présentent une tendance négative avec un seuil de signification de 88-89 %, alors que pour la région limoneuse (qui comprend plus de 40 % des terres arables), la tendance est identique mais atteint un seuil de 90 %. Ce même test a été appliqué aux données mensuelles, permettant de mettre en évidence qu'avec une couverture de sol fixe, les mois de mars et juin présentent une diminution significative de la recharge (seuil de 95 %), alors que les résultats obtenus avec une couverture variable permettent seulement de dégager une diminution significative pour le mois de mars. Il semble donc que les simulations avec couverture variable du sol présentent une diminution légèrement moins importante que la seule diminution liée au climat. Si nous nous penchons une nouvelle fois sur les résultats de la zone limoneuse, les mêmes constatations peuvent être établies, à la différence que trois mois sont marqués par une diminution significative (mars, juin et juillet).

En termes de valeur absolue, nous pouvons mettre en évidence trois années pour leur recharge faible : 1989, 1990 et 2009. Ces années sont marquées par un nombre élevé de jours de stress hydrique pour le blé, de 10 à 30 jours pour 2011. Pour définir la survenue et la durée d'un stress hydrique, chacun des jours d'une période jugée sensible dans le cycle de croissance de la culture (pouvant impacter les rendements), en l'occurrence pour le froment d'hiver de mai à juin, lorsque l'humidité relative du sol descend sous le seuil des 55 %, est comptabilisé (De Longueville *et al.*, 2004). Ainsi, nous constatons que 2005, 2007 et 2010 sont également marquées par plus de 9 jours (moyenne pour la zone d'étude) de stress hydrique. Les besoins en eau qui pourraient résulter de ces stress hydriques plus fréquents et plus longs viendraient se combiner à une recharge potentiellement déficiente de la nappe phréatique. Le même exercice a été réalisé pour le maïs (période sensible de juin à mi-juillet), mais sans résultat significatif : en effet, les zones les plus vulnérables sont principalement situées dans le nord de la zone d'étude, où les terres arables sont peu répandues.

Tableau 2. Evaluation de la recharge cumulée annuelle (en mm) pour (1) la zone d'étude et (2) la région limoneuse, pour une couverture du sol (a) fixe (référence : 1980) et (b) variable.

	1		2	
	a	b	a	b
1980	375	375	345	345
1981	533	532	540	539
1982	361	361	384	383
1983	304	304	315	315
1984	484	483	475	474
1985	240	241	205	206
1986	330	332	310	310
1987	394	395	383	384
1988	490	491	481	481
1989	229	231	236	238
1990	184	183	169	170
1991	259	253	251	247
1992	448	451	456	457
1993	350	351	323	325
1994	325	331	290	295
1995	350	350	339	339
1996	238	246	225	232
1997	259	259	269	268
1998	543	542	494	494
1999	415	414	428	426
2000	446	447	448	449
2001	490	494	462	463
2002	471	470	471	467
2003	206	208	186	189
2004	355	358	344	345
2005	225	233	207	213
2006	362	373	352	368
2007	314	312	275	263
2008	331	330	348	347
2009	192	198	156	164
2010	278	293	219	236
2011	170	181	117	126
2012	317	316	289	291

Conclusion

L'étude des sécheresses de nappes phréatiques, même aux latitudes tempérées, revêt un intérêt tout particulier, notamment pour envisager une gestion durable des nappes d'eau souterraines. Le projet a pour objectif de mieux cerner les facteurs influents et les potentiels impacts que pourraient avoir ce type de sécheresse sur la nappe du Brulandtkrijt. L'une des premières étapes de ce travail est d'évaluer la recharge dans la zone d'étude, et tout particulièrement dans les zones agricoles avec B-CGMS. L'utilisation de ce modèle pour l'évaluation de la recharge permet de proposer une analyse plus fine, tant du point de vue spatial (et l'utilisation de données pédologiques précises) que temporel, grâce à une bonne prise en compte de la période végétative de chaque culture. Une diminution significative de la recharge moyenne pour l'ensemble de la zone d'étude est observée. Mais les changements de couverture en zone arable semblent n'avoir qu'un effet limité et tendent à avoir un impact plutôt positif sur la recharge. Outre la diminution de la recharge, le niveau de la nappe phréatique pourrait également être influencé par des besoins croissants en eau pour l'irrigation, si la fréquence et le nombre de jours de stress hydrique tendaient à augmenter, comme nous l'observons notamment pour le froment d'hiver au cours de la dernière décennie.

Remerciements : la recherche présentée (projet GroWaDRISK SD/RI/05a, 2012-2016) est financée par le Bureau de la Politique Scientifique Belge (BELSPO) dans le cadre du programme de recherche 'Science for Sustainable Development'.

Références bibliographiques

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998 : Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, 174 p.
- Batelaan O., De Smedt F., 2001 : WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modelling. *Impact of Human Activity on Groundwater Dynamics* (Eds. Gehrels H., Peters J., Hoehn E., Jensen K., Leibundgut C., Griffioen J., Webb B., Zaadnoordijk W.-J.), 11-17.
- Batelaan O., De Smedt F., 2007 : GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. *Journal of Hydrology*, **337**(3-4), 337-355.
- Batelaan O., Meyus Y., De Smedt F., 2007 : De grondwatervoeding van Vlaanderen. *Water*, **28**, 64-71.
- Boogaard H., Eerens H., Supit I., Diepen C.V., Piccard I., Kempeneers P., 2002 : Description of the MARS crop yield forecasting system (MCYFS), Technical report, Joint Research Centre, 179 p.
- Dams J., Woldeamlak S.T., Batelaan O., 2008 : Predicting land-use change and its impact on the groundwater system of the Kleine Nete catchment, Belgium. *Hydrology and Earth System Sciences*, **12**, 1369-1385.
- De Longueville F., Horion S., Tychon B., Ozer P., 2004 : Analyse de la campagne agricole en 2003 en termes de stress hydrique. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, **44**, 97-103.
- Diepen C.A., Wolf J., Keulen H., 1989 : WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, **5**, 16-24.
- Diepen C.A., 1992 : An agrometeorological model to monitor the crop state on a regional scale in the European Community: concept, implementation and first operational outputs. *Conference on application of remote sensing to agricultural statistics* (Eds. Toselli F., Meyer-Roux J.), 269-277.
- Genovese G., 1998 : The methodology, the results and the evaluation of the MARS crop yield forecasting system. *Agrometeorological applications for regional crop monitoring and production assessment*, (Eds. by Rijks D., Terres J., Vossen P.), 67-119.
- Van Lanen H.A.J., Peters E., 2002 : Temporal variability as an indicator for natural groundwater droughts in two climatically contrasting basins. *FRIEND 2002 – Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice* (Eds. H.A.J. van Lanen & S. Demuth), 101-108.
- Vogt J., Somma F., 2000 : *Drought and Drought Mitigation in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research (vol. 14)*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Woldeamlak S.T., Batelaan O., De Smedt F., 2007 : Effects of climate change on the groundwater system in the Grote-Nete catchment, Belgium. *Hydrogeology Journal*, **15**, 891-901.