

Impacts du changement climatique sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau du bassin de la Meuse (synthèse bibliographique)

Alexandra Bauwens, Catherine Sohier, Aurore Degré

Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité Systèmes Sol – Eau. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique).
E-mail : alexandra.bauwens@ulg.ac.be.

Reçu le 22 mai 2012, accepté le 8 novembre 2012.

Cette synthèse bibliographique est consacrée aux conséquences du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de la Meuse et sur les différents secteurs socio-économiques liés à l'eau. Elle passe en revue les différentes approches de modélisation hydrologique, met en exergue les hypothèses actuelles de modélisation et les restrictions inhérentes à celles-ci. Dans le contexte du changement climatique, la réflexion relative à l'évolution de l'occupation des sols et à la gestion adaptée des terres, notamment agricoles, rend utile un recours plus large à l'utilisation de modèles hydrologiques à base physique afin de représenter les scénarios de changement climatique et les pistes d'adaptation possibles à l'échelle du bassin versant. Ils représentent davantage de phénomènes au sein du *continuum* eau-sol-plante et permettent ainsi d'affiner les réponses hydrologiques globales d'un bassin versant, particulièrement en période de sécheresse. De plus, ils ouvrent la voie à une analyse de scénarios tels qu'une adaptation dans l'utilisation et la gestion des sols.

Mots-clés. Meuse, changement climatique, hydrologie, modèle de simulation, crue, sécheresse, activité économique.

Impacts of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Meuse catchment. A review.

This review examines the consequences of climate change on the hydrology of the Meuse catchment and on various water-related socio-economic sectors. It sums up the different modeling approaches in hydrological modeling, placing emphasis on current modeling assumptions and the restrictions inherent within them. It is useful to consider land use evolution and adapted management within the context of climate change, particularly with reference to agriculture. More specifically, a broader usage of physically-based hydrological models would be useful in order to represent climate change scenarios and possible adaptation tracks at the catchment scale. These physically-based hydrological models are able to represent a wide range of phenomena occurring in the water-soil-plant *continuum*. They thus allow a refinement of global hydrological solutions at the catchment scale, especially during low flow periods. Moreover, such models pave the way for the analysis of scenarios aimed at creating adaptation in the use and management of soils.

Keywords. Meuse, climate change, hydrology, high water, drought, economic activities.

1. INTRODUCTION

Le bassin versant de la Meuse a une superficie de 36000 km² dans une région densément peuplée d'Europe et fortement industrialisée. Le fleuve a une importance économique et environnementale majeure. Il s'agit d'une voie de navigation intérieure importante. Son apport hydrique est utilisé par une large gamme de secteurs tels que l'agriculture, la production d'électricité, l'industrie et la production d'eau potable. La Meuse est un fleuve alimenté essentiellement par les précipitations et son régime présente un contraste saisonnier été/hiver marqué. Il semble largement admis

que le changement climatique pourrait accentuer ce dernier (Van Pelt et al., 2009).

Les importantes inondations de décembre 1993 et janvier 1995, la sécheresse d'août 2003 ont rappelé aux citoyens et aux gestionnaires la vulnérabilité du bassin, de ses infrastructures et de sa population, face aux événements extrêmes et à un système hydrologique en pleine mutation. Les signes d'une probabilité croissante d'inondations ont été documentés dans de nombreuses zones des bassins du Rhin et de la Meuse. Celle-ci a connu des débordements importants ces dix dernières années. Cinq des sept inondations les plus importantes enregistrées depuis 1911 à Borgharen, aux

Pays-Bas, se sont produites depuis 1993 (Ashagrie et al., 2006). Les changements d'utilisation des sols survenus depuis 1950 ne permettent pas d'expliquer complètement l'occurrence d'évènements d'une telle ampleur (Tu et al., 2005). Même si la gestion du bassin a fortement évolué au cours du 20^e siècle, il est raisonnable de supposer que le temps de concentration du bassin a diminué suite à l'urbanisation et au drainage. L'augmentation des pics de crue de la Meuse et de ses affluents semble être affectée par la variabilité climatique, et plus particulièrement par l'intensité accrue des précipitations (Tu et al., 2005 ; Fenicia et al., 2009).

En vue de gérer de façon raisonnée les ressources en eau du bassin de la Meuse, il convient d'avoir une idée aussi claire que possible de la manière dont répondra le bassin versant aux modifications du climat. La plupart des études appréhendant cette problématique recourent à la modélisation hydrologique. Ces modélisations sont forcées par les données climatologiques issues des modèles climatiques. Malgré les larges incertitudes relatives au changement climatique, de nombreuses études se sont focalisées sur les impacts de celui-ci sur l'hydrologie de nombreux bassins versants en Europe. Une série d'articles a discuté des impacts du changement climatique sur le bassin de la Meuse et de ses conséquences sur différents secteurs socio-économiques.

Cet article se veut une revue et une analyse de la littérature existante relative aux études des impacts hydrologiques du changement climatique, en concentrant les regards sur le bassin de la Meuse.

2. ZONE D'ÉTUDE : LE BASSIN VERSANT DE LA MEUSE

Le bassin versant de la Meuse est très important en Europe du Nord-Est avec son fleuve de 950 km de longueur et son bassin de 36 000 km² (**Figure 1**). Neuf millions de personnes vivent sur cette partie du territoire et six millions d'entre elles sont dépendantes du fleuve pour leur approvisionnement en eau potable (Driessen et al., 2010). La Meuse prend sa source en France, à Pouilly-en-Bassigny dans la Champagne-Ardenne et traverse ensuite la Belgique et les Pays-Bas pour aller se jeter dans le bras de mer Haringvliet. Son bassin versant s'étend sur cinq pays : la France, le Luxembourg, la Belgique, l'Allemagne et les Pays-Bas. La Meuse peut être subdivisée en trois grandes zones géologiques : la Meuse Lorraine, la Meuse ardennaise et la partie basse de la Meuse en aval de Liège (de Wit et al., 2007). Les dimensions réduites de sa plaine alluviale dans le massif des Ardennes offrent peu d'espace pour la rétention naturelle des eaux

lors d'inondations et l'eau circule alors relativement rapidement vers l'aval (Van Pelt et al., 2009).

La Meuse est caractérisée par un régime pluvio-évaporal et une forte saisonnalité des débits, élevés en hiver et faibles en été (de Wit et al., 2007). Durant les épisodes d'inondations, de larges dommages peuvent survenir, alors que durant les épisodes de faibles débits ou d'étiages, des conséquences sur l'approvisionnement en eau et sa qualité peuvent apparaître. Les bas débits ont des incidences sur différents secteurs tels que la navigation intérieure, l'agriculture, la production d'eau potable et l'économie (Driessen et al., 2010).

3. LES APPROCHES DE MODÉLISATION DU CLIMAT DANS LES ÉTUDES SUR LES IMPACTS HYDROLOGIQUES

Ces 20 dernières années, beaucoup d'études ont été menées concernant les impacts du changement climatique sur les ressources en eau. Celles-ci se basent sur différents choix. Chacun des choix effectués est une source d'incertitude. Les sources d'incertitude sont identifiées ci-dessous et classées par ordre d'importance (Ducharne et al., 2009 ; Dobler et al., 2012).

Les scénarios d'émission en gaz à effet de serre (GES) ont été élaborés pour décrire les relations entre les forces motrices des émissions et l'évolution de la concentration en GES. Quatre scénarios SRES, A1, A2, B1, B2, ont été développés par le CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*). Chacun représente une évolution différente sur le plan démographique, social, technologique, économique et environnemental. La famille de scénario A1 comprend trois groupes de scénarios caractérisés par des évolutions différentes des technologies énergétiques : A1FI (intensité de combustibles fossiles), A1B (équilibre) et A1T (prédominance des combustibles non fossiles) (GIEC, 2000). Une nouvelle phase du projet, le CMIP5, a débuté après l'élaboration du quatrième rapport du GIEC. L'évolution du climat se base sur quatre scénarios RCP (*Representative Concentration Pathways*). Ces scénarios entraînent des forçages radiatifs et des accroissements de température dans une gamme plus large que les scénarios SRES jusqu'ici utilisés (Dufresne, 2012). Ceux-ci visent à fournir des projections du changement climatique à deux échelles temporelles, proche (jusqu'à 2035) et lointaine (après 2100) et permettre la compréhension de certains des facteurs responsables des différences dans les projections des modèles. Ceci inclut la quantification de certaines réactions clés telles que la formation des nuages ou le cycle du carbone (CMIP, sd). Les travaux du CMIP5 devront être terminés pour l'élaboration du cinquième rapport du GIEC.

Annexe 3

DHI Meuse - Hydrographie générale



Figure 1. Le bassin versant de la Meuse — *The Meuse catchment*.

Source : Commission Internationale de la Meuse.

Le modèle de circulation générale (MCG ou GCM en anglais) simule les effets climatiques dus à l'augmentation des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre (GES). Les GCMs ont une résolution spatiale trop faible pour permettre l'étude des impacts du climat à l'échelle du bassin versant. Différentes méthodes de descente d'échelle existent, elles peuvent être statistiques ou dynamiques. Ces dernières utilisent les résultats des GCMs comme conditions limites pour alimenter des modèles à plus forte résolution spatiale appelés modèles climatiques régionaux (RCM).

Les données de sorties des RCMs et/ou GCMs sont affectées de biais. Afin de contrecarrer ce problème, les biais peuvent être corrigés en regard des données observées. Il ressort de l'étude de Dobler et al. (2012) que le choix d'une méthode de correction du biais affecte principalement les événements extrêmes. Il convient donc d'être attentif au choix de la méthode de correction du biais en fonction des objectifs de l'étude.

Les modèles hydrologiques peuvent alors servir, sur base des données climatologiques obtenues, à estimer les impacts du changement climatique.

4. TENDANCES CLIMATIQUES OBSERVÉES ET PROJECTIONS FUTURES

L'augmentation des températures observées ces dernières années risque de continuer au cours du 21^e siècle, avec une influence sur le régime des

précipitations. Ces changements affectent à leur tour la disponibilité en eau et son ruissellement et, finalement, le régime des rivières. Alors que les tendances semblent claires pour le Nord et le Sud de l'Europe, la situation centrale du bassin de la Meuse rend moins claire l'évolution de son climat régional.

4.1. Évolution de la température de l'air

Au cours du 20^e siècle, la température moyenne du globe s'est élevée de 0,6 °C. En Europe, cette hausse était de 0,95 °C (De Groof et al., 2006). L'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique conduirait à une augmentation de la température moyenne annuelle. Suivant les modèles climatiques utilisés et les scénarios SRES considérés, celle-ci sera plus ou moins importante et généralement plus prononcée pour les mois d'été (de Wit et al., 2007). Cette hausse de la température moyenne augmente la probabilité de jours de grande chaleur et la variabilité de ces événements serait accrue dans le futur (GIEC, 2007).

Selon le quatrième rapport du GIEC, une augmentation de 0,1 à 0,4 °C par décennie d'ici 2100 serait à prévoir (GIEC, 2007). De Wit et al. (2007) trouvent des valeurs comparables en considérant un doublement de la concentration en CO₂ atmosphérique. Différentes études et projections ont été menées à des échelles nationales, les tendances projetées pour la Meuse sont synthétisées au **tableau 1**.

Les températures augmenteraient plus fortement au printemps et en été (Marbaix et al., 2004 ; Ntegeka et al., 2008 ; Goderniaux et al., 2009).

Tableau 1. Évolution des températures projetées pour le 21^e siècle sur le bassin de la Meuse — *Temperature evolution projected for the end of the 21st century on the Meuse catchment.*

Pays (référence)	Horizon temporel	Projections	GCM/RCM et scénarios SRES utilisés
Pays-Bas (van den Hurk et al., 2006)	2021-2050	Hiver : + 0,9 °C à 2,3 °C Été : + 0,9 °C à + 2,8 °C	Scénarios 2006 du KNMI : G, W, G+, W+ établis sur base de 10 RCMs et 3 GCMs
	2071-2100	Hiver : + 1,8 °C à + 4,6 °C Été : + 1,7 °C à + 5,6 °C	
France (Pagé et al., 2008)	2045-2065	Hiver : + 2,5 °C à 3,0 °C Été : + 2,0 °C à + 2,5 °C	23 GCM/RCM simulations (SCRATCH08). Scénarios A1B/A2/B1
Allemagne (DWD, 2008)	2021-2050	Hiver : + 1,25 °C à + 1,75 °C Été : + 0,75 °C à + 1,75 °C	Basés sur les simulations REMO, CLM, WETTREG et STAR. Scénario A1B
	2071-2100	Hiver : + 3,5 °C à + 4 °C Été : + 2,25 °C à + 3,5 °C	
Belgique (d'Ieteren et al., 2003 ; Marbaix et al., 2004 ; Goderniaux et al., 2009 ; Willems et al., 2009)	2071-2100	Hiver : + 1,57 °C à + 4,9 °C Été : + 2,12 °C à + 8,12 °C	ECHAM4, HadCM3, GFDL-R30, CGCM1, CSIRO-Mk2b sous les scénarios A1 et B1, CCI-HYDR : 21 simulations basées sur 5 GCMS et 9 RCM (A2/B2) ARPEGE (A2) ; 6 simulations basées sur 4 GCMS et 4 RCMs (A2)

4.2. Évolution des précipitations

Les enregistrements des données en Europe montrent une évolution des quantités de précipitations très différentes selon les régions. Entre 1900 et 2000, celles-ci ont augmenté de 10 à 40 % dans le Nord de l'Europe et diminué de 20 % dans le Sud (De Groof et al., 2006 ; EEA, 2008). La répartition des précipitations au cours du temps a changé. Tu et al. (2005) montrent que le nombre de jours humides et très humides a significativement augmenté depuis 1980 sur le bassin versant de la Meuse, de même que la quantité de précipitations associée. La fréquence des tempêtes a également augmenté, mais aucune tendance n'est observable pour le 20^e siècle (Marbaix et al., 2004).

En termes de projection, les études s'accordent pour dire que les précipitations seront plus importantes en hiver et la plupart des régions d'Europe subiront des précipitations plus intenses. Néanmoins, l'évolution des précipitations estivales est très incertaine (de Wit et al., 2007). La fréquence et/ou l'intensité des tempêtes pourraient également augmenter au cours du 21^e siècle (Marbaix et al., 2004).

On devrait donc s'attendre à avoir à la fin du 21^e siècle des hivers plus chauds et humides et des étés plus chauds et plus secs avec un cycle annuel des températures et des précipitations plus prononcé sur le bassin de la Meuse (Goderniaux et al., 2009) (**Tableau 2**).

4.3. Autres paramètres climatiques

Les autres variables climatiques ont reçu peu d'intérêt de la part des hydrologues, de même que dans les études sur les impacts du changement climatique (Haddeland et al., 2012). Or, le rayonnement, l'humidité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres qui influencent l'évapotranspiration. Les effets isolés d'une modification de ces paramètres sous les scénarios de changement climatique n'ont été que très peu étudiés, à l'exception de l'article de Haddeland et al. (2012). Ils démontrent que le rayonnement, l'humidité et la vitesse du vent ont des effets importants sur les flux d'eau simulés, mais que les corrections des biais pour ces variables affectent moins fortement les projections hydrologiques que les corrections de biais relatifs aux températures et aux précipitations. Le degré de certitude des changements climatiques sur la variable vent en Europe est faible. Alors que certaines études considèrent une augmentation de la vitesse moyenne et de pointe du vent pour l'Europe du Nord et/ou Centrale, d'autres études ont des résultats opposés. Ces changements pourraient également varier au cours des saisons (GIEC, 2007).

5. MODÈLES D'IMPACTS HYDROLOGIQUES

Différentes méthodes permettent d'estimer les conséquences du changement climatique : les études de

Tableau 2. Évolution des précipitations projetées pour la fin du 21^e siècle sur le bassin versant de la Meuse — *Rainfall evolution projected for the end of the 21st century on the Meuse catchment.*

Pays (référence)	Horizon temporel	Projections	GCM/RCM et scénarios SRES utilisés
Pays-Bas (van den Hurk et al., 2006)	2021-2050	Hiver : + 4 % à + 14 % Été : - 19 % à + 6 %	Scénarios 2006 du KNMI : G, W, G+, W+ établis sur base de 10 RCMs et 3 GCMs
	2071-2100	Hiver : + 7 % à + 28 % Été : - 38 % à + 12 %	
France (Pagé et al., 2008)	2045-2065	Hiver : 0 mm à + 100 mm Été : - 200 mm à - 100 mm	23 GCM/RCM simulations (SCRATCH08) Scénarios A1B/A2/B1
Allemagne (DWD, 2008)	2021-2050	Hiver : - 5 % à + 20 % Été : - 20 % à 0 %	Basés sur les simulations REMO, CLM, WETTREG et STAR Scénario A1B
	2071-2100	Hiver : + 15 % à + 50 % Été : - 15 % à - 10 %	
Belgique (d'Ieteren et al., 2003 ; Marbaix et al., 2004 ; Goderniaux et al., 2009 ; Willems et al., 2009)	2071-2100	Hiver : - 6 % à + 66 % Été : - 54 % à + 12 %	ECHAM4, HadCM3, GFDL-R30, CGCM1, CSIRO-Mk2b sous les scénarios A1 et B1, CCI-HYDR : 21 simulations basées sur 5 GCMS et 9 RCM (A2/B2) ARPEGE (A2) 6 simulations basées sur 4 GCMS et 4 RCMs (A2)

sensibilité et les modèles pluie-débit en sont deux. Ces derniers permettent de quantifier les répercussions de l'évolution climatique sur le cycle de l'eau ou le débit des rivières. Ils peuvent en ce sens être qualifiés de modèles d'impact.

5.1. Influence des modèles hydrologiques dans les études d'impact du changement climatique

Les modèles hydrologiques sont nombreux et diffèrent en fonction des objectifs de recherche. Les modèles peuvent être classés en fonction de leur représentation spatiale (global, semi-distribué, distribué), temporelle (événementiel ou continu) et de la manière dont les processus sont décrits (empiriques, à base physique, ou conceptuels) (Beckers et al., 2011). Les modèles hydrologiques rencontrés dans les études sur les impacts du changement climatique sur l'hydrologie font essentiellement référence à des modèles conceptuels et, dans une moindre mesure, à des modèles à base physique. Ces deux grandes classes de modèles se distinguent en de nombreux points, rappelés dans la revue bibliographique de Beckers et al. (2011). Des différences significatives peuvent découler de l'emploi de l'un ou l'autre modèle hydrologique sous les mêmes scénarios climatiques. Ainsi, une approche multi-modèle a été retenue sur les bassins de la Seine et de la Somme. L'objectif de cette approche était précisément d'appréhender les incertitudes liées à la modélisation hydrologique dans l'étude du changement climatique et ses impacts (projet Rexhyss). Des sept modèles testés (CLSM, EROS, GARDENIA, MARTHE, MODCOU, SIM, GR4J), un (CLSM) a été évincé en raison de son comportement jugé incorrect dans sa réponse au changement climatique et au stress hydrique. En dehors de celui-là, les auteurs estiment que tous montrent un comportement qualifié de réaliste (Ducharne et al., 2009).

Sur le bassin du Rhin, seuls des modèles conceptuels ont été testés : un modèle semi-distribué, HBV134, et sept modèles à réservoirs (GR4J, GR5J, HBV, IHACRES, MOHYSE, MORDOR, TOPMODEL). Le modèle distribué présente les meilleures performances (Görgen et al., 2010).

Les simulations hydrologiques sous changement climatique sont entachées d'incertitudes. Celles-ci sont liées aux différentes étapes de l'élaboration du scénario hydrologique. Une autre source d'incertitude vient de l'hypothèse selon laquelle le biais calculé pour les variables climatologiques actuelles est sensiblement le même pour les variables climatologiques futures (Teutschbein et al., 2010). Une autre source d'incertitude vient également de la calibration des modèles travaillant en conditions instationnaires.

5.2. Description de deux modèles hydrologiques rencontrés classiquement sur les études d'impact du changement climatique sur la Meuse

Dans le bassin versant de la Meuse, de nombreuses études ont été réalisées au moyen du modèle conceptuel HBV. Plus récemment, le modèle hydrologique à base physique EPIC-Grid (Sohier et al., 2009) a été utilisé (Bauwens et al., 2011). Ces derniers auteurs ont pu démontrer l'intérêt de l'approche à base physique pour la représentation du prélèvement par les plantes et ses effets sur le bilan hydrologique. Le modèle hydrologique EPIC-Grid a été développé à partir du modèle EPIC (Sharpley et al., 1990) adapté à la région wallonne en vue d'être complètement distribué (Sohier et al., 2009). D'autres modèles à base physique existent, SIM, Hydrogéosphère, Parflow, Mike-SHE, etc. Ceux-ci ne sont pas décrits ici car ils n'ont pas été retrouvés dans des études sur la Meuse. Une analyse détaillée des forces et faiblesses de ces modèles sort du cadre de cet article, mais des éléments de réponses peuvent être trouvés dans Le Moine (2008) et Todini (2011).

Le modèle HBV est un modèle hydrologique conceptuel développé au début des années 1970 et qui a été utilisé sur de nombreux bassins versants dans le monde. HBV décrit les processus principaux du ruissellement à l'aide de structures simples et robustes. Il comporte une routine neige, sol et ruissellement. HBV est un modèle semi-distribué et le bassin versant peut être subdivisé en sous-bassins. Il simule la relation pluie-débit pour chaque sous-bassin au pas de temps journalier (de Wit et al., 2007). Si le modèle a été spécialement conçu pour étudier les écoulements sur de longues périodes, la prévision des écoulements et à des fins de recherches (Driessen et al., 2010), il éprouve des difficultés à simuler les basses eaux pour la Meuse (de Wit et al., 2007). Il faut souligner que les modèles conceptuels peuvent présenter de meilleurs résultats que les modèles à base physique. En effet, ces premiers optimisent l'ensemble de leurs paramètres, alors que les seconds n'en calent qu'une partie, ceux qui ne sont pas basés sur des mesures physiques de terrain (Booij, 2005), même si leur précision est fonction du nombre de relevés effectués sur le terrain. Naturellement, la fixation arbitraire de paramètres peut poser question lorsqu'ils sont ensuite interprétés physiquement (Beckers et al., 2011). De plus, alors que les modèles empiriques ou conceptuels sont utilisés en mode forcé, les modèles à base physique peuvent être utilisés en mode couplé, c'est notamment le cas pour les modèles SAFRAN-ISBA-MODCOU (Habets et al., 2008).

Les modèles conceptuels nécessitent de longues séries d'observations afin d'être calés (Booij, 2005 ; Bauwens et al., 2011), mais la plupart du temps ne demandent comme données d'entrées que des

observations de températures de l'air et de précipitation, alors que les modèles distribués à base physique nécessitent une quantité importante de données afin de décrire le bassin versant. Néanmoins, le grand avantage de ces derniers dans l'étude du changement climatique est la possibilité d'y intégrer des scénarios d'adaptation au changement climatique et des changements dans l'utilisation des sols (van der Knijff et al., 2008), la possibilité d'étudier les phénomènes intervenant dans le *continuum* eau-sol-plante et les impacts du changement climatique sur celui-ci, en plus des informations classiquement fournies par les modèles conceptuels (Bauwens et al., 2011). Ceci sous la condition *sine qua non* que ces modèles soient capables de simuler correctement les phénomènes intervenant sur le bassin et qu'ils soient à même de répondre aux objectifs de l'étude.

6. PROSPECTIVE HYDROLOGIQUE DE LA MEUSE

Les changements escomptés dans la distribution fréquentielle des températures de l'air et des précipitations risquent fort d'accroître la saisonnalité du régime hydrologique de la Meuse (de Wit et al., 2007). de Wit et al., 2007 et Teutschbein et al., 2010 font remarquer que les débits simulés par un même modèle hydrologique sont fortement variables d'un scénario SRES à l'autre, et pour un même scénario SRES, en fonction des GCM/RCMs utilisés. Il convient donc d'être attentif aux méthodologies mises en place. Les méthodologies simples sont souvent utilisées à des fins de développements ou de tests, par exemple l'impact du choix d'une méthode de correction du biais, l'impact de la résolution du RCM (van Pelt et al., 2009 ; Driessen et al., 2010 ; Teutschbein et al., 2010).

6.1. Les crues

Booij (2005) a évalué l'influence de 3 GCMs et 2 RCMs sur les inondations de la Meuse, par le biais du modèle HBV en divisant le bassin en 1, 15 et 118 sous-bassins versants. Il observe une faible diminution du débit moyen et une augmentation de la variabilité du débit moyen et des débits extrêmes à Borgharen. La gamme des débits extrêmes est accrue dans le futur, suite aux différences entre les scénarios de changement climatique et le processus de génération des précipitations utilisé.

Sous le scénario SRES A2 et sous trois combinaisons de GCM/RCM, les quantiles inondations de la Meuse présentent une légère diminution des inondations à la fin du 21^e siècle pour les périodes de retour intermédiaires et une augmentation comprise entre 35 et 55 % pour les périodes de retour plus élevées à Borgharen (Leander et al., 2008).

Sous le scénario SRES A1B et une combinaison GCM/RCM, van Pelt et al. (2009) observent une augmentation du débit à Borgharen pour la période de simulation 2070-2100 par rapport à la fin du 20^e siècle. Une augmentation des écoulements entre 9 et 20 % est estimée suivant les méthodes de calcul du biais utilisées. Il ressort de la littérature que la rivière Meuse pourrait avoir des pics de ruissellement substantiellement plus importants à la fin du 21^e siècle (van Pelt et al., 2009).

Le sous-bassin de l'Ourthe a également été étudié par Giron et al. (2008) et Driessen et al. (2010). L'impact de trois scénarios SRES A1, A1B et B1 et une combinaison GCM/RCM ont été étudiés sur les débits de crue de l'Ourthe à Tabreux pour le milieu et la fin du 21^e siècle. Les débits mensuels moyens pour le début du siècle sont comparables à ceux de la période de référence. Pour la fin du siècle, les différences s'accroissent. Le débit annuel moyen augmente pour le scénario A2 et diminue pour les scénarios A1B et B1 (Driessen et al., 2010). Il est également à noter que les modifications des débits suite au changement climatique influent sur la vitesse d'écoulement de l'eau, ainsi que sur le niveau d'eau (Giron et al., 2008).

Les impacts du changement climatique générés par l'outil CCI-HYDR sur les sous-bassins de la Vesdre et de la Lesse ont été étudiés par Bauwens et al. (2011). Les tendances observées pour les débits de crues générés à l'aide d'EPIC-Grid sont similaires à celles obtenues avec le modèle HBV (de Wit et al., 2007). Mais EPIC-Grid fournit également des indications sur la croissance de la végétation au travers de l'étude de l'évapotranspiration réelle. Il apparaît ainsi que la végétation redémarre plus tôt au printemps et subit des stress hydriques importants en été. Le modèle EPIC-Grid, représentant le *continuum* eau-sol-plante, offre donc de nouvelles perspectives en termes d'études des effets du changement climatique sur la croissance des plantes, les prélèvements d'eau et leur impact sur les débits des cours d'eau. L'étude des pistes d'adaptation en vue d'une meilleure gestion des pratiques agricoles est dès lors possible (Bauwens et al., 2011).

6.2. Les étiages

Il n'y a pas d'observation d'une augmentation de la fréquence des étiages au cours du 20^e siècle sur le bassin de la Meuse. Néanmoins, l'étude menée par de Wit et al. (2007) constate que les étiages les plus sévères sur le bassin de la Meuse surviennent les années où un été sec est précédé d'un hiver sec. Les scénarios de changement climatique étudiés, issus de la combinaison de deux GCMs et de sept RCMs sous un scénario SRES A2, révèlent une augmentation du nombre d'hivers humides suivis d'un été sec, mais il n'y a pas d'indication d'un éventuel accroissement du nombre d'hivers secs suivis par un été sec. Certains

modèles, tels qu'HBV, sont dédiés aux crues et ne présentent pas de performances suffisantes quand il s'agit de l'étude des étiages en l'état actuel de leur développement (de Wit et al., 2007). Blenkinsop et al. (2007), en analysant les projections de 12 modèles de climat, issus de huit GCMs et quatre RCMs sous scénario d'émission A2, réalisées dans le cadre de PRUDENCE, ont trouvé un accord de tous les modèles pour projeter une augmentation de la durée des sécheresses sur la région Meuse, à l'exception du modèle ARP_C. van Pelt et al. (2009) étudient l'évolution du nombre de jours où le débit de la Meuse à Borgharen est inférieur à $60\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ sous le scénario SRES A1B et une combinaison GCM/RCM. Ils observent que le nombre de jours double à la fin du 21^e siècle par rapport à la situation un siècle plus tôt. Dans le même sens, ils constatent que le débit moyen estival diminue entre 13 et 17 % pour la fin du siècle.

Driessen et al. (2010), en étudiant l'Ourthe, constatent que le débit moyen estival augmente au cours de la première moitié du 21^e siècle et diminue pour la fin du 21^e siècle. Cette diminution est la plus impressionnante sous le scénario A1B pour la même combinaison de GCM/RCM. Le nombre moyen d'évènements de sécheresse diminue pour la fin du 21^e siècle, mais leur durée augmente par contre significativement, surtout pour les scénarios A1B et B1. Ils considèrent qu'il y a sécheresse quand le débit est inférieur au percentile 75 de la période de référence.

Bauwens et al. (2011) ont également étudié l'évolution des débits d'étiages sur la Lesse et la Vesdre au cours du 21^e siècle. Le débit minimum moyen sur sept jours (MAM7) diminue entre 19 et 24 % pour une période de retour de 2 ans et entre 20 et 35 % pour une période de retour de 50 ans. Ceci s'explique par la diminution des précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle en été (Bauwens et al., 2011).

De nombreux indices existent permettant de caractériser l'étiage. Des relations existent entre ceux-ci, mais nécessitent de passer au travers de modèles de régression (Smakhtin, 2001). En l'absence de tels modèles, la comparaison entre les résultats des différentes études est rendue malaisée.

6.3. Qualité de l'eau

Si les effets du changement climatique sur la quantité des eaux commencent à être relativement bien étudiés, les effets sur la qualité de l'eau sont nettement moins connus (Delpla et al., 2009). Les inondations et les étiages vont modifier la qualité de l'eau directement par dilution ou concentration des substances dissoutes. La température de l'air doit également être considérée, elle influence la quasi-totalité des équilibres physico-chimiques et des réactions biologiques (Delpla et al.,

2009). Mais la qualité des eaux est également affectée par des facteurs non climatiques (Kundzewicz et al., 2009). van Vliet et al. (2008) ont évalué l'impact des sécheresses sur la qualité des eaux de la Meuse. Dans cette optique, ils se sont basés sur les données provenant de deux sécheresses sévères : 1976 et 2003. La qualité des eaux durant ces événements a été comparée à la qualité des eaux sous un régime hydrologique commun et des relations empiriques ont été établies afin d'estimer les effets du changement climatique sur la qualité des eaux en fonction des débits et de la température de l'eau. Une dégradation générale de la qualité des eaux de la Meuse est observée durant les sécheresses où respectivement la température de l'eau, l'eutrophisation, les éléments majeurs et certains métaux lourds interviennent dans ce phénomène. Cette diminution de la qualité des eaux est principalement due aux conditions favorables ainsi obtenues pour le développement d'algues et à une diminution de la capacité de dilution dans les zones de relâchement d'effluents suite à la diminution des débits estivaux (van Vliet et al., 2008 ; Kundzewicz et al., 2009). L'utilisation de modèles de qualité requiert de connaître les paramètres morphologiques, hydrauliques et écologiques de la rivière, les sources de polluants (fixes ou diffusés) et les polluants nous intéressant. Ils permettent de simuler la qualité de l'eau sur base des quantités d'eau à l'aval d'un point donné. Différents modèles existent, de simulation ou d'optimisation ; les premiers prédisent les changements de qualité de l'eau suite à une source de pollution, alors que les seconds simulent une allocation optimale des ressources (Sharma et al., 2012).

7. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR DIFFÉRENTS SECTEURS LIÉS À L'EAU

Le changement climatique est un défi important pour les gestionnaires de l'eau, les utilisateurs et les décideurs politiques, dans la mesure où on ne peut plus nier son existence et ses répercussions futures. La gestion de l'eau est à la croisée de nombreux secteurs et bien que les projections climatiques soient entachées d'incertitudes, il convient de tenir compte du changement climatique dès aujourd'hui dans la gestion des ressources en eau, comme le prévoit la Directive Cadre sur l'Eau et la priorisation de l'usage de celle-ci en vue d'aboutir à une gestion concertée. En l'absence de projections fiables, il convient donc de préconiser des mesures « sans regrets » (Middelkoop et al., 2001a), comme l'amélioration du rendement hydraulique et de la gestion de la demande en eau (Bates et al., 2008).

La fréquence et l'amplitude des pics de crues pourraient augmenter. Cela conduirait à une diminution du niveau de protection actuel de la population. La

restauration de ce niveau pourrait nécessiter des mesures telles que la modification de certains ouvrages (rehaussement de digues), l'amélioration des systèmes d'alertes ou la conscientisation des riverains au risque d'inondations (Middelkoop et al., 2001a). De nombreux secteurs seront affectés de diverses manières.

7.1. Écologie

Selon Middelkoop et al. (2001b), plus de zones seront favorables aux biotopes humides. Cependant, l'intrusion d'eau saline dans les habitats côtiers devra être prise en compte. De plus, les sécheresses estivales conduisent à une diminution du niveau d'eau dans les biotopes humides, ce qui change drastiquement les conditions abiotiques de ceux-ci.

7.2. Secteur touristique

Certaines activités peuvent voir leur chiffre d'affaire diminuer durant les épisodes de sécheresse suite à des mesures de restrictions prises du fait du manque d'eau. C'est le cas du kayaking, notamment. De plus, la diminution du débit au cours des basses-eaux augmente le risque de concentration en polluants et en pathogènes (Giron et al., 2008).

7.3. La navigation intérieure

La Meuse joue un rôle important avec ses réseaux de canaux et de rivières entre les ports d'Anvers et de Rotterdam et l'intérieur des terres. Les changements affectant la distribution des températures et des précipitations ont des conséquences sur le niveau des eaux et, par conséquent, sur le secteur de la navigation intérieure. En particulier, les faibles niveaux d'eau peuvent conduire à une interruption du transport fluvial. Ils forcent également les navires et péniches à travailler à une capacité inférieure à leur capacité maximale afin de diminuer le tirant d'eau de ceux-ci (Koetse et al., 2009). Lors de hautes eaux, le transport fluvial peut aussi être impacté. La navigation peut même être interdite lorsque le niveau des eaux devient critique. Différentes raisons peuvent en être la cause (PIANC, 2009). Dans le cas où le secteur de la navigation intérieure ne serait pas capable de s'adapter, la fiabilité du transport fluvial et les coûts de transports risquent d'augmenter fortement (Middelkoop et al., 2001b).

7.4. La production d'énergie

Selon Middelkoop et al. (2001a), la production d'énergie à partir de centrales hydroélectriques pourrait augmenter au cours de l'hiver, suite à l'augmentation des débits hivernaux. Le principal mécanisme à travers lequel le changement climatique peut affecter

la production hydroélectrique est *via* un changement du débit des rivières, l'évaporation et la sécurité des barrages (Mideksa et al., 2010).

7.5. L'agriculture

L'agriculture risque d'être un secteur particulièrement affecté. Il est communément accepté que le réchauffement climatique aura des effets positifs et/ou négatifs, en fonction de la capacité d'adaptation du système agricole, de la culture, de la gamme de changement climatique, etc. En été, le déficit en eau de l'environnement va augmenter suite à l'augmentation de l'évapotranspiration (Middelkoop et al., 2001b). Suite à l'augmentation des températures, le développement des cultures pourrait commencer plus tôt dans la saison et elles auraient besoin d'eau pour leur croissance plus tôt. L'évapotranspiration réelle atteint son niveau maximum plus tôt dans la saison avant de diminuer en été suite aux stress thermiques et hydriques (Bauwens et al., 2011). Alors que le maïs est négativement affecté par le changement climatique, le blé et l'orge sont favorisés sur le bassin de la Vesdre (Bauwens et al., 2012).

8. CONCLUSION

À travers cette synthèse bibliographique, il ressort que malgré l'incertitude pesant sur les scénarios relatifs à l'évolution du climat futur et aux choix opérés en matière de modélisation du climat et de la transformation pluie-débit, une intensification du contraste saisonnier caractérisant le régime d'écoulement de la Meuse est probable. Si l'étude de l'évolution des débits moyens et des hautes eaux se révèle bien documentée sur le bassin de la Meuse et bien représentée, les phénomènes de basses eaux et l'évolution de la qualité de l'eau face au changement climatique sont nettement moins étudiés. Des questions restent néanmoins ouvertes par rapport à la calibration de modèles en conditions instationnaires. L'étude des phénomènes de basses eaux et des étiages est pourtant cruciale pour le bassin versant de la Meuse au vu des impacts considérables que celles-ci peuvent avoir sur la navigation, l'agriculture et la disponibilité de l'eau au cours de la saison estivale. Il ressort de la littérature que les modèles à base physique présentent une meilleure capacité à reproduire les étiages et sont utilisés minoritairement dans le cadre des études sur le changement climatique, malgré leur aptitude à prendre en compte l'impact du changement climatique sur l'évapotranspiration réelle. Leur capacité à représenter des scénarios d'adaptation au changement climatique, telle qu'une adaptation dans l'utilisation et la gestion des sols mérite un investissement supplémentaire tant dans leur développement que dans

leur validation, tenant compte du contexte climatique et agro-environnemental en évolution. Néanmoins, les données de terrains et la validation des représentations des processus fait encore défaut, comme par exemple les flux préférentiels qui peuvent fortement modifier le comportement hydrologique d'un sol, suite notamment aux périodes de grandes sécheresses. La modélisation hydrologique se révèle être un outil précieux dans l'étude de l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie et un outil d'aide à la décision pour la mise en place d'une gestion concertée et interdomaine à l'échelle du bassin versant.

Liste des abréviations

CMIP : *Coupled Model Intercomparison Project*
 GCM ou MGC : *General Circulation Model* ou Modèle de Circulation Général
 GES : Gaz à Effet de Serre
 GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
 KNMI : *Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut*
 MAM7 : *Mean Average Minimum on 7 days* ou Débit Minimum Moyen sur sept jours
 RCM : *Regional Climate Model* ou Modèle Climatique Régional
 RCP : *Representative Concentration Pathways*
 SRES : *Special Report on Emission Scenarios*

Remerciements

Cette réflexion a reçu le support financier du programme Interreg IVB et du Service Public de Wallonie à travers le projet AMICE (*Adaptation of the Meuse to the Impacts of Climate Evolutions*).

Bibliographie

- Ashagrie A.G. et al., 2006. Detecting the influence of land use changes on discharges and floods in the Meuse River Basin – the predictive power of a ninety-year rainfall-runoff relation? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **10**, 691-701.
- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S. & Palutikof J.P., 2008. *Le changement climatique et l'eau, document technique*. Genève, Suisse : GIEC.
- Bauwens A., Sohier C. & Degré A., 2011 Hydrological response to climate change in the Lesse and the Vesdre catchments: contribution of a physically based model (Wallonia, Belgium). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **15**, 1745-1756.
- Bauwens A., Sohier C., Deraedt D. & Degré A., 2012. How could Mosan agriculture be impacted by climate change and future droughts? *Geophys. Res. Abstr.*, **14**.
- Beckers E. & Degré A., 2011. Revue bibliographique : la prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **15**(1), 143-151.
- Blenkinsop S. & Fowler H.J., 2007. Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *Int. J. Climatol.*, **27**, 1595-1610.
- Booij M.J., 2005. Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *J. Hydrol.*, **303**, 176-198.
- CMIP, sd. *CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 – Overview*, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>, (24/07/2012).
- d'Ieteren E., Hecq W., De Sutter R. & Leroy D., 2003. *Effets du changement climatique en Belgique : impacts potentiels sur les bassins hydrographiques et la côte maritime. Phase 1 : état de la question*. Bruxelles : CEESE-ULB et ECOLAS.
- De Groof A. et al., 2006. *Intermediary report WP1-3: adapt - towards an integrated decision tool for adaptation measures. Case study: floods. Work package I: general study and evaluation of potential impacts of climate change in Belgium*. Brussels : CEESE-ULB.
- De Wit M.J.M. et al., 2007. Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. *Clim. Change*, **82**, 351-372.
- Delpla I. et al., 2009. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environ. Int.*, **35**, 1225-1233.
- Dobler C., Hagemann S., Wilby R.L. & Stötter J., 2012. Quantifying different sources of uncertainty in hydrological projections at the catchment scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **9**, 8173-8211.
- Driessen T.L.A. et al., 2010. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **14**, 651-665.
- Ducharne A. et al., 2009. *Rapport de fin de contrat : impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme. Programme GICC*. Paris : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.
- Dufresne J.-L., 2012. Contribution de l'IPSL au projet CMIP5. *LMDZ info*, **8**, janvier 2012, <http://lmdz.lmd.jussieu.fr/communication/lmdzinfo/lmdzinfo8/pdf/view>, (24/07/2012).
- DWD, 2008. *ZWEK – Compilation of datasets for climate impact assessment*, <http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/other-regional-model-data/zwek/>, (24/07/2012).
- EEA, 2008. *European precipitation (CLIM 002)- Assessment published sep. 2008*, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/european-precipitation/european-precipitation-assessment-published-sep-2008>, (24/07/2012).
- Fenicia F., Savenije H.H.G. & Avdeeva Y., 2009. Anomaly in the rainfall-runoff behaviour of the Meuse catchment.

- Climate, land-use, or land-use management ? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **13**, 1727-1737.
- GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), 2000. *Rapport spécial du groupe de travail III du GIEC. Scénarios d'émissions. Résumé à l'intention des décideurs*. Genève, Suisse : GIEC.
- GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II, III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève, Suisse : GIEC.
- Giron E. et al., 2008. *Final report (phase I): adapt – towards an integrated decision tool for adaptation measures. Case study: floods*. Brussels: Belgian Science Policy.
- Goderniaux et al., 2009. Large scale surface-subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *J. Hydrol.*, **373**, 122-138.
- Görger K. et al., 2010. *Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin. Results of the RheinBlick2050 Project*. CHR report, I-23. Lelystad, The Netherlands: Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR).
- Habets F. et al., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *J. Geophys. Res.*, **113**, D06113.
- Haddeland I. et al., 2012. Effects of climate model radiation humidity and wind estimates on hydrological simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **16**, 305-318.
- Koetse M.J. & Rietveld P., 2009. The impact of climate change and weather on transport: an overview of empirical findings. *Transport. Res. Part D*, **14**(3), 205-221.
- Kundzewicz Z.W. & Krysanova V., 2009. Climate change and stream quality in the multi-factor context. An editorial comment. *Clim. Change*, **103**, 353-362.
- Le Moine N., 2008. *Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ?* Thèse de doctorat : Université Pierre et Marie Curie, Paris (France).
- Leander R., Buishand T.A., van den Hurk B.J.J.M. & de Wit M.J.M., 2008. Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *J. Hydrol.*, **351**, 331-343.
- Marbaix P. & van Ypersele J.-P., 2004. *Rapport : impacts des changements climatiques en Belgique*. Bruxelles : Greenpeace.
- Middelkoop H. et al., 2001a. Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. *Clim. Change*, **49**, 105-128.
- Middelkoop H. & Kwadijk J.C.J., 2001b. Towards integrated assessment of the implications of global change for water management – The Rhine experience. *Phys. Chem. Earth Part B*, **26**, 553-560.
- Mideksa T.K. & Kallbekken S., 2010. The impact of climate change on the electricity market: a review. *Energy Policy*, **38**(7), 3579-3585.
- Ntegeka V., Willems P., Baguis P. & Roulin E., 2008. *Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems. Summary report phase I: literature review and development of climate change scenarios*. Brussels: Belgian Science Policy & Royal Meteorological Institute of Belgium; Leuven, Belgium: K.U.Leuven, Hydraulics section.
- Pagé C., Terray L. & Boé J., 2008. *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^e siècle : les scénarii SCRATCH08*. Toulouse, France : CERFACS.
- PIANC, 2009. *Sustainable waterways within the context of navigation and flood management. Report No 107*. Brussels: PIANC.
- Sharma D. & Kansal A., 2012. Assessment of river quality models: a review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, DOI: 10.1007/s11157-012-9285-8.
- Sharpley A.N. & Williams J.R., 1990. EPIC—Erosion/Productivity Impact Calculator: 2. User manual. *USDA Techn. Bull.*, **1768**.
- Smakhtin V.U., 2001. Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol.*, **240**, 147-186.
- Sohier C., Degré A. & Dautrebande S., 2009. From root zone modelling to regional forecasting of nitrate concentration in recharge flows. The case of the Walloon Region (Belgium). *J. Hydrol.*, **369**, 350-359.
- Teutschbein C. & Seibert J., 2010. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies. *Geogr. Compass*, **4**(7), 834-860.
- Todini E., 2011. History and perspectives of hydrological modelling. *Hydrol. Res.*, **42**(2-3), 73-85.
- Tu M., de Laat P.J.M., Hall M.J. & de Wit M.J.M., 2005. Precipitation variability in the Meuse basin in relation to atmospheric circulation. *Water Sci. Technol.*, **51**(5), 5-14.
- van den Hurk B.J.J.M. et al., 2006. *KNMI Climate change scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI scientific report WR2006-01*. De Bilt, The Netherlands: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI).
- van der Knijf J. & de Roo A., 2008. *LISFLOOD—Distributed water balance and flood simulation model. Revised user manual*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- van Pelt S.C. et al., 2009. Discharge simulations performed with a hydrological model using bias corrected regional climate model input. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **13**, 2387-2397.
- Van Vliet M.T.H. & Zwolsman J.J.G., 2008. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse River. *J. Hydrol.*, **353**(1-2), 1-17.
- Willems P. et al., 2009. *Presentation CCI-HYDR interim results at 5th follow-up committee meeting, 6 October 2009, Leuven, Belgium*, <http://www.kuleuven.be/hydr/cci/reports/CCI-HYDR%20FCM%20Oct%202009.pdf>, (08/02/13).