



**Climate**

FINAL REPORT PHASE I



**CLIMATE CHANGE IMPACT ON HYDROLOGICAL  
EXTREMES ALONG RIVERS AND URBAN DRAINAGE SYSTEMS IN  
BELGIUM  
«CCI-HYDR»**

**SD/CP/03A**

Promotors

**Patrick Willems**

Katholieke Universiteit Leuven (K.U.Leuven)  
Faculty of Engineering  
Department of Civil Engineering  
Hydraulics Section  
Kasteelpark Arenberg 40  
B-3001 Heverlee (Leuven)  
Tel: + 32 (0)16 321658  
Fax: + 32 (0)16 321989  
Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be  
www.kuleuven.be/hydr

**Emmanuel Roulin**

Royal Meteorological Institute of Belgium (RMI)  
Meteorological Research and Development Department  
Risk Analysis and Sustainable Development Section

Authors

**Victor Ntegeka, Patrick Willems** (KULeuven)  
**Pierre Baguis, Emmanuel Roulin** (RMI)

**April 2008**

## Sommaire

### Description du projet

Le CCI-HYDR projet a été soutenu par la Politique scientifique fédérale Belge (BELSPO) par l'intermédiaire du programme la Science pour un développement durable (SSD). Le principal objectif du projet est d'étudier les impacts des changements climatiques régionaux sur les risques de phénomènes hydrologiques extrêmes le long des rivières et des systèmes de drainage urbains en Belgique. La recherche a été essentiellement basée sur les résultats des simulations des modèles climatiques régionaux de haute résolution (RCM) du projet européen PRUDENCE et par la suite étendue pour inclure les modèles de circulation générale (GCM) du Quatrième Rapport (AR4) de l'IPCC. Les collaborations de différents centres de modélisation climatique et d'experts ont également augmenté la confiance dans l'utilisation des résultats du projet PRUDENCE. Le projet PRUDENCE a également contribué de façon substantielle au dernier rapport du AR4 de l'IPCC. Le projet CCI-HYDR engagé une équipe de collaboration de chercheurs en météorologie, hydrologie et hydraulique de K.U.Leuven et de l'Institut Royal Météorologique (IRM) de Belgique. Toutefois, une collaboration a été également mise en place avec le projet ADAPT, qui est chargée d'examiner les implications plus larges des résultats du projet CCI-HYDR pour la société, les gestionnaires de l'eau, et les décideurs politiques.

### Contexte de recherche

Le risque d'inondation est en Belgique ainsi que dans d'autres pays européens d'une importance considérable, en raison notamment de la densité élevée de la population et du haut niveau d'industrialisation le long des rivières. En plus, depuis quelques décennies, les réseaux d'égouts sont construits à grande échelle. Le risque de sécheresse est moins important dans le pays, en raison du climat humide et de la longueur limitée de la période de sécheresse en été. Cependant, des débits extrêmement faibles peuvent se produire le long des rivières, pouvant causer des problèmes graves de pénurie d'eau pour les réserves de l'eau potable, l'agriculture et l'environnement.

Les préoccupations autour de l'impact des changements climatiques sur le cycle hydrologique de l'eau (y compris les inondations et les sécheresses), ont déclenché des études spécifiques depuis les années 1980. L'IRM a été pionnier dans la mise en évidence des différences dans la sensibilité des bassins versants de caractéristiques contrastées à un scénario 2xCO<sub>2</sub>. Ils ont étendu leur étude à un plus grand nombre de bassins versants et utilisé la première série de scénarios de changement climatique mis à disposition par l'IPCC. Le champ d'application a été étendu à la totalité du bassin hydrographique de Meuse et d'Escaut en utilisant une nouvelle série de scénarios climatiques basée sur des expériences transitoires, par exemple sur base des résultats des GCM forcés par l'augmentation de gaz à effet de serre. Toutefois, les GCM ont été depuis améliorés et des modèles climatiques régionaux de haute résolution ont été connectés avec eux afin de réduire les variables climatiques à l'échelle régionale. Cela a suscité de nouvelles recherches liées aux impacts régionaux pertinents à l'échelle locale. Les évaluations d'impact hydrologique peuvent maintenant être effectuées avec une confiance accrue.

### Objectifs du projet

Le projet de recherche CCI-HYDR a été créé pour étudier d'une manière détaillée et objective et en se basant sur les données et les résultats de la modélisation climatique les plus récents, l'impact des changements climatiques sur le risque de phénomènes hydrologiques extrêmes le long des rivières et des systèmes de drainage urbains en Belgique. Pour accomplir les objectifs du projet, la recherche a été subdivisée en deux phases. La phase 1 du projet a porté sur le choix des simulations RCM et à l'analyse en long terme des séries historiques de précipitation et d'évapotranspiration. Dans la phase 2 du projet, les implications des scénarios sur les phénomènes hydrologiques extrêmes seront étudiées. Cela nécessitera une étude sur les inondations et les risques de faible débit le long des rivières, et les risques d'inondation pour un choix de systèmes de drainage urbains en Belgique. Les résultats du projet fourniront un appui supplémentaire, utile dans l'élaboration de politiques et en particulier de celles liées au développement durable, comme le Protocole de Kyoto.

## Sommaire de la méthodologie

L'étude a nécessité une évaluation globale des données du climat pertinentes pour l'analyse de l'impact hydrologique. Ainsi, il était nécessaire d'étudier les tendances dans les séries historiques observées et les estimations pour le futur des modèles climatiques régionaux les plus récents. L'étude des projections futures des modèles comprenait l'évaluation des résultats des RCM pertinents à l'impact hydrologique au moyen de tests statistiques. Les tendances ont été étudiées par l'application d'une technique d'analyse de tendance qui combine la fréquence et la grandeur des extrêmes.

L'analyse des tendances historiques a été réalisée pour l'évapotranspiration potentielle de référence (ET<sub>o</sub>) et la série de précipitations. Une série unique de précipitation sur 10 minutes pour la période 1898-2005 a été mise à disposition par IRM, y compris une série journalière pour la période 1901-2005. Une technique pour calculer les changements dans le temps de la grandeur des extrêmes et tester leur signification statistique a été développée pour l'analyse des tendances. La technique a été utilisée pour identifier les anomalies dans les périodes d'observation. Les tendances historiques fourniraient également une base pour la vérification de la cohérence des estimations des modèles climatiques.

L'évaluation des RCM a été réalisée au moyen de tests statistiques et de représentation graphique des résultats. Les RCM ont été évalués par rapport aux observations pour la cohérence dans la moyenne, la saisonnalité, variabilité spatiale, variabilité inter-annuelle, et les tendances. Le projet CCI-HYDR est principalement basé sur les résultats régionaux du projet européen PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk>). Le projet PRUDENCE fournit des données à haute résolution (12-50km) à la fois pour le climat de référence (1961-1990) et le climat futur à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100). En particulier, le projet PRUDENCE fournit les résultats de plusieurs expériences d'une série de 11 RCM initialisés par deux GCMs. Les expériences ont été mises en oeuvre pour les scénarios SRES A2 et B2. Comme les expériences des RCMs de PRUDENCE sont basées seulement sur les scénarios A2 et B2, des facteurs d'ajustement sont nécessaires pour rendre les scénarios plus exhaustives (et réduire l'incertitude des émissions) en incluant de changements de scénarios supplémentaires (notamment A1B et B1). Ces facteurs sont dérivés des données des modèles AR4 de l'IPCC.

L'étude a évalué des données ayant une pertinence directe aux impacts hydrologiques comme la pluie et l'évapotranspiration. La précipitation a été prise directement par les observations tandis que l'évapotranspiration a été estimée à partir d'autres mesures (vitesse du vent, humidité, couverture nuageuse, pression atmosphérique, température et rayonnement). Les performances des modèles ont été testées tant au niveau ponctuel (station) que régional. La combinaison des mesures de performance ponctuelle et régionale a conduit à une sélection de modèles climatiques pour le climat belge. Les modèles sélectionnés ont été utilisés pour étudier les caractéristiques saisonnières des changements climatiques à la fois en un point et l'échelle régionale. La station de référence pour les comparaisons ponctuelles est la station d'Uccle tandis que l'analyse régionale concerne l'ensemble de la Belgique.

L'évaluation statistique des modèles de PRUDENCE a révélé que l'utilisation directe des résultats biaisés des modèles conduirait à une analyse d'impact également biaisée. Même dans ce cas là, le grand nombre des modèles compliquerait l'interprétation des résultats pour l'analyste des impacts. Par conséquent, trois scénarios ont été proposés qui permettrait de simplifier l'interprétation et en même temps en tenir compte de l'incertitude de modélisation. Les trois scénarios ont été obtenus par une méthode de réduction statistique qui implique le transfert des changements estimés à partir des modèles climatiques à une série observée. Les changements concernent principalement le nombre et l'intensité des jours humides, ainsi que l'intensité de variation de l'ET<sub>o</sub>. Sur base de l'ensemble des modèles, de scénarios hauts, moyens et faibles ont été calculés pour représenter l'éventail du changement climatique attendu. Les modélisateurs d'impact pourraient bénéficier de ces scénarios. Sur base des scénarios sondés du point de vue statistique, la phase 1 du projet CCI-HYDR fournit des scénarios qui sont construits spécifiquement pour le climat belge.

## Résultats de la Phase 1

### Evaluation historique

L'analyse a été effectuée pour les quatre saisons climatiques: hiver (Décembre, Janvier, Février), printemps (Mars, Avril, Mai), été (Juin, Juillet, août) et automne (Septembre, Octobre, Novembre). À

long terme (plus de 100 ans) les séries de précipitation et d'évapotranspiration ont été évaluées pour détecter des traces de changement climatique se manifestant comme des tendances et oscillations significatives. Le facteur de perturbation, qui est une mesure de changement des quantiles, a été choisi comme un indice en raison de son utilisation dans les statistiques ordonnées qui permettent l'étude des changements des extrêmes.

Pour les quantiles de précipitation extrême, des oscillations ont été observées avec des quantiles de précipitation extrême le plus élevés dans les années 1910-1920, les années 1960 et, récemment, au cours des 15 dernières années. Des quantiles de précipitation extrême moins élevés ont été observés dans les années 1930-1940, et dans les années 1970. Au cours des dernières 108 années, les oscillations multidecadales des précipitations extrêmes se sont apparues d'une manière cyclique avec des périodes de 30 à 40 ans environs. Une période avec seulement 3 cycles est trop courte pour tirer des conclusions sur cette propriété statistiquement bien fondées, mais les résultats indiquent clairement la présence d'une persistance temporelle à long terme des précipitations extrêmes, avec un groupe de précipitations extrêmes au cours des 15 dernières années. Ces conclusions ont été uniformes pour toutes les échelles de temps variant de 10 minutes à un mois, tant pour l'hiver que pour l'été. Pour la période estivale, les quantiles les plus élevés de précipitation extrême ont été observés dans les années 1960, légèrement supérieurs des quantiles plus récents des 15 ans passés. Ces résultats suggèrent que l'augmentation récente du nombre de fortes averses provoquant des inondations du réseau d'égouts, est causée par des conditions hydrométéorologiques qui sont moins ou aussi extrêmes que ce qui était observé dans les années 1960. Bien sûr, l'utilisation des sols a fortement changé entre-temps (par exemple les zones urbaines se sont élargies et les réseaux d'égouts sont construits à grande échelle) et par conséquent les effets hydrologiques de nos jours sont fortement différents de ceux des années 1960. Il n'y avait guère de manière significative des périodes sèche et humide au cours des saisons de transition (automne et printemps).

Les tendances de l'évapotranspiration ont montré des caractéristiques saisonnières similaires en particulier pendant l'hiver. Comme les précipitations, l'évapotranspiration a montré au cours de la saison d'hiver les changements les plus importants. Ceci est en particulier vrai au cours des décennies les plus récentes (années 1990). L'hiver a montré des perturbations très élevées, notamment dans les années 1970, tandis que les perturbations les plus élevées apparaissent dans la dernière décennie. La saison d'été n'a pas montré des tendances significatives, comme la plupart des perturbations fluctuent autour de la moyenne à long terme. L'automne a connu des perturbations légèrement plus élevées que l'été et le printemps, en particulier depuis les années 1960. Les perturbations de printemps étaient similaires à celles de l'été, bien qu'en général légèrement plus élevées. En règle générale, depuis les années 1980 des tendances d'augmentation de l'évapotranspiration ont été observées pour toutes les saisons ; en particulier, lors de la dernière décennie, l'hiver montre les changements le plus prononcés. Ces changements sont cohérents avec les tendances de température actuelles qui montrent des hivers plus chauds de ce qu'on a précédemment observé. Des diverses études ont également indiqué que les hivers deviendraient dans l'avenir plus doux, ce qui impliquerait que le taux d'évapotranspiration va augmenter. Cette augmentation expliquerait en partie l'augmentation des précipitations durant l'hiver en termes de quantités de vapeur d'eau plus importantes dans l'atmosphère. Contrairement à la pluie, il n'y avait pas d'indications claires de comportement cyclique en ETo.

### **Performance des modèles**

La sélection des modèles climatiques est un amalgame de plusieurs critères. En étudiant le comportement des séries de contrôle et de scénario du projet PRUDENCE au moyen de différents tests statistiques, les performances de certains modèles ont été trouvés assez médiocres. Il est à noter qu'il n'y a pas de modèle avec des bonnes performances dans tous les critères, mais certains modèles sont généralement mieux que d'autres. Les tests des valeurs exceptionnelles, l'analyse de fréquence, les tests de tendance, les mesures de biais et la variabilité spatiale sont les principaux critères retenus pour l'évaluation des modèles climatiques. Toutefois, la température a été simulée mieux que les précipitations, ce qui est attendu car les modèles sont mieux adaptés à modéliser la température que la pluie. Sur la base de l'analyse de la température et des précipitations, les modèles de l'ICTP (RegCM) et du GKSS (CLM, version non-améliorée) ont été omis de la liste en raison de persistance de discordances importantes par rapport aux observations.

## **Estimations de changement climatique**

A partir de la sélection des scénarios de PRUDENCE, les changements climatiques régionaux ont été estimés. Les modèles PRUDENCE qui ont été sélectionnés présentent des changements tant négatifs que positifs (-40% à +10%) des précipitations au cours de l'été, et des changements positifs au cours de l'hiver (+50% à +5%). Il n'y a pas de différences régionales importantes en Belgique en ce qui concerne les signaux de changements climatiques, à l'exception de la région côtière. La région côtière belge montre en moyenne un signal 15% plus élevé que les valeurs de changements pour les autres régions. Toutefois, l'inclusion de davantage de scénarios (A1B et B1) crée une différence significative pour l'été (augmentation relative jusqu'à 16%) tandis que pour l'hiver, l'augmentation relative est de 10%. Ceci démontre l'importance de prendre en compte l'ensemble des scénarios d'émission ce qui permet de corriger les marges d'incertitude.

## **Downscaling du changement climatique**

Comment les utilisateurs peuvent utiliser les résultats d'un grand nombre de modèles constitue un défi. La présente étude a emprunté des concepts issus de la modélisation d'ensemble en utilisant les perturbations probabilistes dérivées des modèles de PRUDENCE qui ont été sélectionnés. L'ensemble des 28 résultats des modèles régionaux sélectionnés implique qu'il y a 28 scénarios possibles (A2 et B2) ce qui nécessite que l'analyse soit réalisée en considérant que tous ces résultats sont également plausibles. À partir de ces 28 scénarios, trois scénarios probabilistes ont été dérivés afin de permettre aux utilisateurs finaux de prendre en compte la diversité des changements. Les scénarios ont été pour cela qualifiés d'élevé, moyen et faible. L'utilisation de techniques probabilistes assure que les résultats escomptés représentent la diversité de toutes les projections. Pour les précipitations, une attention particulière a été accordée au changement de la fréquence des jours de pluie et au changement de l'intensité des précipitations pour ces jours de pluies. Les deux perturbations sont jugées de première importance pour l'analyse des impacts hydrologiques. Pour l'évapotranspiration potentielle, seule le changement dans l'intensité a été appliqué. Il est intéressant de noter que les facteurs d'échelle obtenus d'après les scénarios du GIEC AR4 A1B et B1 présentent une incertitude liée aux scénarios d'émissions qui est moindre. Un algorithme basé sur Excel a été développé afin d'altérer les séries des précipitations observées et d'ETO. Sur la base de ces scénarios, les analyses d'impacts des changements climatiques sur les phénomènes hydrologiques extrêmes peuvent être réalisées pour les échelles de temps allant de 10 minutes à 24h.

## **Synthèse des résultats de la Phase 1**

Au cours de la première phase du projet CCI-HYDR, le cadre permettant d'étudier des incidences des changements climatiques sur les phénomènes hydrologiques extrêmes a été développé tant d'un point de vue théorique que sur le plan pratique. Du point de vue théorique, une étude bibliographique s'est révélée déterminante dans la compréhension du passé et des changements possibles du climat en Belgique. Sur le plan pratique, il s'est avéré indispensable de développer une méthodologie afin d'appliquer les changements prévus par les modèles régionaux aux modèles hydrologiques. Cela a nécessité d'utiliser une gamme de techniques statistiques en vue notamment de capturer le spectre des projections futures.

Il a été établi que les séries historiques présentent des variations par rapport à la moyenne à long terme. Il a lieu d'être attentif aux tendances significatives récentes dans les séries observées de précipitations et d'évapotranspiration. En particulier, pour l'hiver, des changements prononcés au cours de la dernière décennie ont été mis en évidence: augmentation significative des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle. Les projections pour le futur (2071-2100) semblent montrer une continuation de ces mêmes tendances, les hivers généralement deviendraient plus pluvieux et des étés plus secs. L'évapotranspiration potentielle augmenterait quelle que soit la saison.

## **Les étapes suivantes**

Les recherches à venir porteront principalement sur la modélisation des impacts sur les risques d'inondation et les risques d'étiages par l'utilisation de modèles hydrologiques et de modèles couplés hydrologiques-hydrodynamiques. Des risques d'inondation seront évalués pour des systèmes de drainage urbain en tenant compte des répercussions sur la fréquence des débordements des systèmes d'égouts de même que sur l'amplitude et la fréquence de débordement d'égout et des

rivières qui collectent ces effluents pour des systèmes test. Les risques l'inondation et d'étiages des rivières seront aussi analysés.

Les implications de l'évolution des risques d'inondations et de sécheresses continueront à faire l'objet de travaux une collaboration avec le projet ADAPT. Les implications pour la société, pour les gestionnaires de l'eau et les décideurs politiques seront évaluées.

Plus d'informations sur le CCI-HYDR projet peuvent être trouvés sur le site: <http://www.kuleuven.be/hydr/CCI-HYDR.htm>.