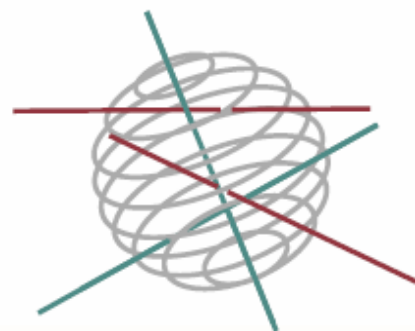


SSD

SCIENCE FOR A SUSTAINABLE DEVELOPMENT



**Vers un instrument intégré de décision pour les
mesures d'adaptation - Etude de cas : les crues
«ADAPT»**

E. GIRON, I. CONINX, B.J. DEWALS, M. EL KAHLOUN, L. DE SMET, D. SACRE,
S. DETREMBLEUR, K. BACHUS, M. PIROTON, P. MEIRE, R. DE SUTTER, W. HECQ



ENERGY

TRANSPORT AND MOBILITY

AGRO-FOOD

HEALTH AND ENVIRONMENT

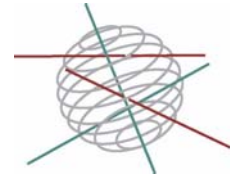
CLIMATE

BIODIVERSITY

ATMOSPHERE AND TERRESTRIAL AND MARINE ECOSYSTEMS

TRANSVERSAL ACTIONS

SCIENCE FOR A SUSTAINABLE DEVELOPMENT
(SSD)



Climat

RAPPORT FINAL PHASE 1

Résumé

**Vers un instrument intégré de décision pour les
mesures d'adaptation - Etude de cas : les crues**

« ADAPT »

SD/CP/02A

Promoteurs

W. HECQ

UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES (ULB)

K. BACHUS

KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN (K.U. LEUVEN)

M. PIROTTON

UNIVERSITÉ DE LIÈGE (ULG)

P. MEIRE

UNIVERSITEIT ANTWERPEN (UA)

R. DE SUTTER

ARCADIS BELGIUM NV

15/12/06 to 14/12/07

Auteurs

E. Giron, D. Sacré & W. Hecq, CESE-ULB

I. Coninx & K. Bachus, HIVA - K.U. Leuven

B.J. Dewals, HACH-ULG & F.R.S.-FNRS

S. Detrembleur & M. Pirotton, HACH-ULG

M. El Kahloun & P. Meire, ECOBE-UA

L. De Smet & R. De Sutter, ARCADIS BELGIUM NV





Rue de la Science 8
Wetenschapsstraat 8
B-1000 Brussels
Belgium
Tel: +32 (0)2 238 34 11 – Fax: +32 (0)2 230 59 12
<http://www.belspo.be>

Contact person:
Mrs Sophie Verheyden : +32 (0)2 238 36 12
<http://www.ulb.ac.be/ceese//ADAPT/Home.html>

Neither the Belgian Science Policy nor any person acting on behalf of the Belgian Science Policy is responsible for the use which might be made of the following information. The authors are responsible for the content.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without indicating the reference:

E. Giron, I. Coninx, B.J. Dewals, M. El Kahloun, L. De Smet, D. Sacré, S. Detrembleur, K. Bachus, M. Piroton, P. Meire, R. De Sutter, W. Hecq. ***Towards an Integrated Decision Tool for Adaptation Measures - Case Study : Floods «ADAPT» (SD/CP/02A)*** Rapport final Phase 1 Résumé. Brussels : Politique scientifique fédérale 2009 – 8 p. (Programme de recherche La Science pour un Développement Durable)

Introduction

Depuis le début de la Révolution Industrielle, l'impact des activités humaines sur l'environnement est devenu de plus en plus important, altérant l'équilibre climatique et ayant ainsi des effets sur la température et les précipitations. Les conséquences de ces changements climatiques se manifestent par des pics de température, des sécheresses, des inondations ainsi qu'une élévation du niveau de la mer. Aujourd'hui, les changements climatiques sont considérés comme l'une des plus grandes menaces sur l'environnement et le bien-être humain. Si les évolutions de notre climat persistent, les changements climatiques imposeront un lourd fardeau à la société et aux écosystèmes. Les décideurs politiques peuvent répondre aux conséquences des changements climatiques selon deux manières. Premièrement, des mesures d'atténuation peuvent être entreprises et celles-ci sont développées afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et donc, de prévenir, ou au moins limiter les changements climatiques. Deuxièmement, le développement de mesures d'adaptation peut être traité dans le but de limiter les impacts des changements climatiques sur les populations et les écosystèmes. Dans le cadre du projet ADAPT, l'accent est mis sur les mesures d'adaptation.

Le projet DAPT est constitué de deux phases. La première est un rapport de synthèse sur les changements climatiques en Belgique (*Working Package 1*), alors que la deuxième partie est dédiée au développement d'une méthode pratique pour guider les prises de décision à propos des mesures d'adaptation face à l'augmentation du risque d'inondation dû aux changements climatiques (*Working Package 2*).

En effet, le projet se concentre sur le problème particulier des inondations dues au débordement des rivières qui devrait augmenter en raison d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations. Pour développer la méthode, deux études de cas ont été choisies dans les deux principaux bassins hydrographiques belges (l'Escaut et la Meuse). Une partie du projet est consacrée à un inventaire et à une évaluation des dommages causés par des inondations. Une seconde partie, quant à elle, se concentre sur l'analyse des mesures d'adaptation. Sur base de ces informations, la tâche finale du projet consiste à mener une analyse coût-bénéfice et/ou une analyse multi-critères dans le but de déterminer les mesures les plus adaptées en termes d'intégration coût-efficacité. L'évaluation des principaux effets des changements climatiques induisant des inondations dans les bassins hydrographiques, est basée sur des modélisations hydrauliques, qui utilisent comme données d'entrée soit des modélisations hydrologiques, soit directement des données de débits. Les résultats des modèles hydrauliques sont alors utilisés comme intrant dans les modèles intégrés d'évaluation du risque des inondations sur les systèmes économiques, sociaux et écologiques.

Le sujet des changements climatiques est vaste et complexe, de même que le développement d'une méthode globale afin d'assister les décideurs politiques dans leur choix de mesures d'adaptation. Dès lors le projet s'oriente vers une approche multidisciplinaire, en étudiant les aspects économiques, sociaux et écologiques ainsi que leurs interactions. L'équipe du projet ADAPT est composée de cinq partenaires aux expertises scientifiques complémentaires, appartenant aux trois piliers du développement durable, afin de faire face aux défis qu'imposent une analyse intégrée de problèmes complexes. En outre, le projet ADAPT travaille en étroite collaboration avec le projet CCI-HYDR. Les résultats du projet CCI-HYDR, qui étudie les impacts des changements climatiques sur les phénomènes hydrologiques extrêmes le long des rivières et des systèmes de drainage urbain en Belgique, servent de donnée d'entrée pour le projet ADAPT.

Effets des changements climatiques en Belgique : étude générale

L'élaboration et l'application d'une méthode pour la sélection de stratégies d'adaptation (mesures de protection contre les inondations) dans le contexte des changements climatiques doit d'abord s'appuyer sur une bonne connaissance des effets de ces changements sur les inondations. L'étude générale sur les effets des changements climatiques en Belgique est le point clé de départ pour le Working Package 2.

Durant le 20^{ième} siècle, la température de surface de la terre a augmenté en moyenne de 0.74°C. Ce réchauffement ne s'est jamais effectué de manière stable, ni à l'échelle des saisons, ni selon l'endroit considéré. Le GIEC reconnaît que si la température moyenne augmente, la probabilité d'avoir des jours de fortes chaleurs augmente également. Il est également indiqué que l'écart-type de la température est susceptible de changer. Bien que la taille de la Belgique soit limitée pour permettre d'établir des projections irréfutables à propos du climat local, la tendance au réchauffement de la Belgique est bien établie. En Belgique, les deux dernières décennies ont été marquées par de très hautes moyennes annuelles des températures. Les projections pour la Belgique, qui illustrent la tendance générale, prédisent une augmentation de la température hivernale située entre 1.7°C et 4.9°C et une augmentation en été située entre 2.4°C et 6.6°C à la fin du 21^{ième} siècle (Marbaix et Van Ypersele, 2004). De plus, d'autres éléments de preuves démontrant que le changement climatique est déjà en cours en Belgique peuvent être cités tels que : une migration précoce de certains oiseaux a été observée et plusieurs espèces de libellules du sud ont été identifiées dans nos régions, ce qui résulte bien d'un changement du climat (MIRA, 2005). Au cours des dernières années, la Belgique a battu des records de température et les vagues de chaleur ont menacé de nombreuses vies, particulièrement la canicule de l'été 2003 a eu de nombreux impacts sociaux, économiques et environnementaux. En ce qui concerne les précipitations annuelles, les records historiques enregistrés en Europe montrent des évolutions régionales très différentes (une augmentation dans le nord et une diminution dans le sud). En Belgique, les projections de l'évolution des précipitations hivernales au cours du 21^{ième} siècle montrent une augmentation modérée des précipitations (de 5 à 20%), alors que les précipitations estivales devraient diminuer, bien que les résultats quantitatifs divergent (du statu quo jusqu'à une diminution de 50%). Une augmentation du nombre de jours très pluvieux a déjà été observée au nord et au centre de l'Europe. En Belgique, la fréquence des événements pluvieux importants devrait également augmenter.

En conséquence, l'hydrologie des bassins versants sera fortement modifiée à cause des changements de température, précipitation et évapotranspiration résultant des changements climatiques. Dès lors, dans une grande partie de l'Europe, le risque d'inondation devrait augmenter, de même que le risque d'inondation dans les zones côtières. En particulier, les changements climatiques vont mener à une augmentation des inondations hivernales dans une majorité de l'Europe (EEA, 2005a).

En Belgique, les changements dans le débit moyen des rivières sont soit positifs soit négatifs, selon les divers scénarios de changement climatique. Le résultat dépend de l'équilibre entre l'augmentation des précipitations et une évapotranspiration plus élevée, ce qui est fortement dépendant des bassins versants.

En ce qui concerne les événements extrêmes, la fréquence des inondations enregistrées en Belgique a déjà augmenté durant les dernières décennies. Des inondations majeures ont eu lieu en 1995, 1998, 2002, 2003 et 2005. L'aménagement du territoire est évidemment en partie responsable de

ces inondations, bien que les variations des précipitations hivernales ainsi que l'augmentation de la fréquence des fortes pluies ont amplifié davantage le risque d'inondation. Bien qu'il reste difficile d'évaluer le potentiel des changements dans la fréquence des inondations, de nombreuses analyses fournissent déjà un aperçu des évolutions les plus probables (FLOODsite, 2006). Par exemple, une étude spécifique sur la Meuse en amont de Borgharen en Belgique et en France, prévoit une légère diminution de la moyenne de décharge mais une nette augmentation des rejets et de la variabilité (5-10%).

Développement d'une méthodologie pour la prise de décision concernant les mesures d'adaptation face aux inondations liées au changement climatique

Comme le changement climatique influence les précipitations et l'évapotranspiration, toutes les deux agissant sur les inondations des rivières, les stratégies de gestion des risques d'inondation nécessitent de prendre en compte ces deux effets des changements climatiques sur les phénomènes hydrologiques extrêmes. Actuellement, ceci n'est pas encore une pratique courante en Belgique et à l'étranger (Grinwis M. and Duyck M., 2001 ; Boukhris et al., 2006). Le projet ADAPT vise à répondre à ce défi en développant une méthodologie pratique basée sur le « coût-efficacité », pour aider la prise de décision concernant les stratégies de protection contre les inondations dans le contexte des changements climatiques, en se basant sur une évaluation intégrée des effets économiques mais aussi sociaux et écologiques. Pour le développement ainsi que pour illustrer la méthodologie, l'étude s'appuie sur deux études de cas basés dans les deux principaux bassins hydrographiques belges : (1) l'Ourthe (bassin hydrographique de la Meuse) située dans la commune d'Esneux et (2) la Dendre (bassin hydrographique de l'Escaut) située dans les communes de Ninove et Geraardsbergen. Ces deux zones d'étude ont été sélectionnées sur base de leur historique d'inondations, mais aussi pour leurs caractéristiques hydrauliques, économiques, sociales et écologiques, ainsi que pour leurs complémentarités. L'évaluation des scénarios pour réduire les effets des inondations dépend fortement de la modélisation du danger d'inondation et des caractéristiques de celle-ci. Ceci est réalisé grâce à des modèles hydrauliques utilisant l'écoulement dans la rivière en entrée et ceux-ci fournissent, en sortie, une carte des inondations. L'approche de la modélisation hydraulique est différente pour les deux études de cas : pour l'Ourthe, le débit est imposé en tant que condition hydraulique à la frontière amont du domaine, alors que pour la Dendre, une modélisation hydrologique est effectuée séparément et fournit des données d'entrée de débit pour le modèle hydraulique.

Les simulations des écoulements pour l'étude de cas de l'Ourthe sont réalisées par l'utilisation d'un modèle numérique à deux dimensions : WOLF 2D, basé sur les équations dynamique des « Shallow-Water » (SWE). Le modèle WOLF 2D est développé à l'Université de Liège. Pour les plaines d'inondation situées le long de l'Ourthe, les données topographiques ont été acquises à l'aide d'une technique LIDAR (Light Detection And Ranging) qui a permis de déboucher sur un modèle numérique de terrain d'une résolution horizontale de 1 m et une précision verticale inférieure à 15 cm (MNT fourni par le Ministère de l'Équipement et des Transports – MET-SETHY). Les simulations hydrauliques sont toutes réalisées sur un maillage régulier de 2m sur 2m. Les résultats du modèle sont des distributions 2D de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement dans les zones inondées, qui sont les principales données d'entrée nécessaires pour l'évaluation des dommages.

Bien que le modèle hydrodynamique soit parfaitement adapté pour mener des simulations d'écoulements instationnaires, incluant même des effets hautement transitoires, ce sont des écoulements stationnaires qui sont exploités dans le cas présent. La validité de cette hypothèse a été démontrée sur base de la durée relativement longue des inondations de l'Ourthe, combinée à une possibilité limitée de stockage dans les plaines inondables de la vallée assez étroite de la rivière. De surcroît, le temps de calcul a été fortement réduit grâce à l'utilisation d'une technique de « raffinement automatique de maillage ».

L'étude est menée pour deux périodes de retour, respectivement 25 et 100 ans, pour lesquelles les meilleures stratégies de protection contre les inondations seront complémentaires. Au stade actuel d'avancement du projet, de simples hypothèses ont été envisagées en ce qui concerne les perturbations attendues affectant les débits de pointe de l'Ourthe à la suite des changements climatiques. Ces hypothèses seront in fine confirmées et affinées sur base des résultats produits par le projet parallèle : CCI-HYDR.

Pour chaque période de retour ainsi que pour chaque modélisation de scénario de l'Ourthe, les trois cartes suivantes ont été établies : la carte de hauteur d'eau, la carte représentant la vitesse d'écoulement ainsi que l'accroissement de la profondeur de submersion par rapport au scénario de base. L'ensemble de ces résultats est donc actuellement totalement disponible pour les partenaires, en vue de l'évaluation des impacts secondaires des inondations. Comme le confirment les résultats des simulations, la complexité de la topographie dans les plaines inondables justifie incontestablement l'exploitation d'un modèle hydrodynamique à deux dimensions en tant qu'approche la plus crédible pour représenter la dynamique des écoulements d'inondation.

La modélisation des risques d'inondation évalue les impacts de ces inondations sur la société. Afin de dépasser l'accent habituellement mis sur les dommages directs tangibles d'une inondation pour les systèmes économiques, trois modules complémentaires d'évaluation des risques liés aux inondations ont été développés. Ces modules se concentrent respectivement sur les effets des inondations sur les systèmes économiques, sociaux et écologiques. Les impacts des inondations sont si possible exprimés en termes monétaires mais seulement si cela n'entraîne pas un accroissement de l'incertitude globale. Dans le cas où la monétarisation des effets n'est pas pertinente, les indicateurs quantitatifs complets et/ou des indices sont développés.

La question centrale lors de l'évaluation des risques des inondations est : « Quelles valeurs dérivant du bon fonctionnement des systèmes économiques, sociaux et environnementaux seront perdues lors d'une inondation ? ». Tous les effets pertinents d'une inondation sur les systèmes économiques, sociaux et environnementaux ont été identifiés, décrits, sélectionnés et finalement attribués à l'un des trois modules d'évaluation des risques. Les méthodes d'évaluation des risques pour les trois aspects couverts par l'étude, sont construites sur le même concept de risque d'inondation, qui est fonction de la probabilité qu'une inondation se produise et les effets liés à cet événement. Concrètement, le risque est constitué de quatre éléments majeurs : la probabilité qu'une inondation ait lieu, l'exposition de l'élément soumis au risque face à une inondation ayant certaines caractéristiques, la valeur de cet élément soumis au risque et, enfin, la vulnérabilité de cet élément. La probabilité qu'une inondation se produise est directement liée à la période de retour. L'exposition des éléments soumis au risque est, dans une large mesure, déterminée par la modélisation hydraulique. L'évaluation de la valeur des éléments soumis au risque est généralement moins claire.

En effet, les éléments soumis au risque ne sont pas toujours de nature directe et tangible. En conséquence, le coût que la société est prête à supporter pour que ces éléments ne soient pas affectés n'est pas aisé à déterminer. La vulnérabilité de l'élément soumis au risque est fonction de sa sensibilité, de sa capacité d'adaptation et de sa résilience par rapport aux caractéristiques de l'inondation.

L'objectif de la méthodologie d'évaluation des risques des inondations est, d'une part, d'obtenir une estimation des risques futurs d'inondation et, d'autre part, de donner un aperçu de la répartition des risques d'inondation ainsi que leurs causes. Cette information représente le point de départ crucial pour permettre de déterminer les mesures d'adaptation.

L'évaluation des dommages économiques liés aux inondations recourt à deux méthodes : (i) la méthode des prix du marché, basée sur le prix des pertes en termes de prix du marché, et (ii), la méthode des prix hédonistes, basée sur l'analyse des marchés existants. Cette dernière approche tente d'identifier quelle différence de prix entre les biens, peut être imputable à une différence d'environnement particulier (à l'intérieur ou à l'extérieur d'une zone inondable).

La quantification des dommages et de leurs conséquences sont menés à l'aide de l'utilisation de fonctions de dommage. La vulnérabilité de l'élément soumis au risque (dépendant de sa sensibilité, de sa capacité d'adaptation et de sa résilience) est introduite dans l'analyse de risque par l'intermédiaire de ces fonctions de dommage. Le but du développement de fonctions de dommage est de représenter des dommages directs causés par une inondation sur les habitats individuels en fonction de certaines caractéristiques (notamment la présence de cave ou non) ainsi qu'en fonction des spécificités des inondations (hauteur de l'eau, vitesse d'écoulement de l'eau, durée de l'inondation).

Pour la commune d'Esneux (étude de cas de l'Ourthe), l'analyse des coûts des dommages ainsi que le nombre de biens affectés indiquent que les conséquences étaient très différentes d'une inondation à l'autre. Les analyses montrent également certaines tendances comme l'importance des dommages liés aux habitations.

Les inondations ont également des effets sociaux par rapport à la manière dont les gens vivent, travaillent, pensent et s'organisent (Burdge, 1998). La vulnérabilité des personnes, et de leur cadre social, par rapport aux inondations, est en général beaucoup plus complexe que la vulnérabilité des effets tangibles à évaluer. En effet, la vulnérabilité des personnes ne peut être évaluée par une simple fonction mathématique: hauteur d'eau-dommages. Dans le projet ADAPT, la vulnérabilité est donc approximée à l'aide d'un indice composé d'un certain nombre de caractéristiques personnelles bien déterminées. Sur base d'une revue de la littérature et d'avis d'experts, l'importance de divers effets sociaux, étant une mesure de la valeur potentiellement à risque de divers effets sociaux, a été déterminée et exprimée à l'aide d'échelles semi-quantitatives. Un nombre limité d'effets sociaux, comme par exemple les effets sur la santé des personnes, peuvent être cependant monétarisés grâce à l'utilisation de facteurs monétaires repris par d'autres études d'évaluation.

Les effets écologiques des inondations sont liés aux services fournis par les écosystèmes ainsi que les bénéfiques que les personnes peuvent retirer des écosystèmes. Tout comme pour les aspects sociaux, l'évaluation du risque lié aux inondations est empirique.

Une table spécifique des connaissances a été dressée pour chaque fonction des écosystèmes soumis au risque. Concernant la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sociale, cette table de connaissances sert de fonction de dommage complexe multicritères. Le problème majeur pour intégrer les aspects écologiques au sein d'une analyse coût-bénéfice est que l'impact d'une inondation sur l'écologie est difficilement quantifiable. De plus, les services en lien avec les écosystèmes n'ont pas de valeur correspondant à un prix du marché. Néanmoins, la valeur des prestations de service des écosystèmes est marquée par une échelle quantitative.

Sur base de la prévision des risques d'inondation ainsi qu'à travers une investigation sur les causes des problèmes à la base des inondations dans les deux cas d'étude, des scénarios d'adaptation seront identifiés. Sachant que les coûts et les bénéfices de ces scénarios ont également un impact sur le bien-être. Dans de nombreux cas, l'implication des décideurs est cruciale pour l'identification mais aussi l'évaluation des coûts et des bénéfices des scénarios d'adaptation qui seront mis en place. La procédure consiste à établir une liste qui permet de faciliter l'identification des effets. L'évaluation des coûts et bénéfices relatifs seront effectués en suivant les directives utilisées pour une analyse coût-efficacité.

Pour l'étude de cas de l'Ourthe, les effets hydrauliques de plusieurs mesures locales d'adaptation face aux inondations ont déjà été calculés à l'aide de simulations hydrodynamiques (WOLF 2D). Ils montrent les changements (réduction) des caractéristiques des crues suite à la mise en place des mesures de lutte contre les inondations. Ces simulations ont été réalisées par le HACH-ULg et aboutissent à démontrer la faisabilité technique de la conception et de l'implémentation de mesures d'adaptation efficaces sur l'Ourthe, et ce malgré la capacité de stockage limitée des plaines d'inondation. Les mesures d'adaptation ainsi considérées incluent tant du pompage que des modifications de la topographie afin de réduire localement la résistance à l'écoulement, ou encore la transformation de plaines d'inondation passives en plaines actives. Cette dernière mesure consiste à modifier la topographie d'une plaine passive (faible vitesse d'écoulement) pour permettre le développement de vitesses d'écoulement supérieures dans le lit majeur de la rivière. En conséquence, la largeur effective (et donc la section) de la rivière est agrandie et, dès lors, le niveau d'eau en amont diminue. Le meilleur outil de modélisation pour simuler de manière fiable les effets d'une telle mesure reste un modèle complet à deux dimensions, reproduisant fidèlement la distribution de vitesse et menant ainsi à une meilleure compréhension des chemins d'écoulement, ce qui influence directement le design des mesures d'adaptation.

Finalement, l'ensemble des effets étudiés seront combinés au sein d'une analyse coût-bénéfice pour permettre l'évaluation des scénarios d'adaptation. Ce cadre de décision privilégie l'utilisation d'effets monétaires mais offre également un cadre basé sur une analyse multi-critère (MCA) afin de présenter et de traiter les informations non-monétaires, afin d'équilibrer l'ensemble des informations disponibles. Seuls les scénarios d'adaptation qui devraient contribuer à améliorer le bien-être des personnes seront mis en œuvre en priorité. Les bénéfices de ces scénarios d'adaptation devraient donc dépasser les coûts. Dans le but de permettre l'optimisation des scénarios d'adaptation, la distribution spatiale des risques d'inondation, qui sera visualisée à l'aide de systèmes d'information géographique, constitue une aide primordiale pour évaluer les mesures d'adaptation dans le cadre d'une analyse coût-bénéfice.