

## L'eau face au changement climatique

Analyse et gestion du changement climatique et de ses effets sur l'eau :  
projets de recherche allemands



Directeur de publication : Dr. Ing. Jean-François Dupuis  
Directeur de la rédaction : Claire Nicolas  
Traduction : Jana Ulbricht  
Photo de couverture : Claire Nicolas

**Publication gratuite de l'Ambassade de France en Allemagne.** Tout ou partie de ce numéro ne peut être diffusé sans autorisation expresse du Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France en Allemagne.

**Rédaction.** Ambassade de France en Allemagne - Service pour la Science et la Technologie

Adresse postale : Pariser Platz 5, D-10117 BERLIN

Tél: +49 30 590 039 000, Fax: +49 30 590 039 265, Internet: [www.wissenschaft-frankreich.de](http://www.wissenschaft-frankreich.de), Mél: [sciencetech@botschaft-frankreich.de](mailto:sciencetech@botschaft-frankreich.de)

# Sommaire

|   |    |
|---|----|
| <i>Préambule</i> .....  | 3  |
| <i>Changement climatique et eau - Soutien du Ministère fédéral de l'enseignement et de la recherche (BMBF) à la recherche</i> .....   | 5  |
| <i>Comment le changement climatique influence-t-il les précipitations ?</i> .....   | 8  |
| <i>Observation des cycles biogéochimiques avec prise en compte de la variabilité climatique – exemple de la canicule de 2003 en Europe</i> .....  | 11 |
| <i>Changement climatique et pénurie d'eau</i> .....   | 14 |
| <i>Changement climatique et ressources en eau dans l'Est de l'Allemagne : le projet GLOWA-Elbe</i> .....  | 17 |
| <i>Adaptation à la pénurie d'eau croissante : le projet de recherche GLOWA Jordan River</i> .....   | 20 |
| <i>Alliance internationale de recherche sur l'eau en Saxe : Coopération de recherche sur l'utilisation optimale des ressources en eau dans le contexte du changement climatique</i> ..... | 24 |
| <i>Quand l'eau se réchauffe</i> .....   | 27 |
| <i>Gérer les risques plutôt que de protéger les villes côtières contre les crues dans le contexte du changement climatique</i> .....  | 30 |



# Préambule

Le climat change : c'est désormais un constat que de plus en plus de preuves scientifiques contribuent à étayer dans le monde entier. L'un des enjeux actuels essentiels pour la recherche est maintenant de prévoir et d'anticiper la poursuite des changements afin de pouvoir réagir et s'adapter à ces évolutions futures.

Les répercussions du changement climatique sur l'eau sont nombreuses, souvent graves et touchent cet élément sous toutes ses phases : liquide, solide, gazeuse. Toutes les étapes et tous les compartiments du cycle de l'eau sont concernés. Les manifestations sont complexes et multiples et dépendent fortement des régions et des saisons. Elles ont, de plus, des impacts économiques, écologiques et sociaux souvent dramatiques.

Pour certaines zones du globe, le problème premier est la raréfaction de la ressource en eau. Il s'agit notamment du Moyen Orient, mais aussi de l'Europe, et en particulier de certaines régions d'Allemagne qui ont déjà et auront encore à souffrir, elles aussi, de pénuries d'eau. Face à une population mondiale en croissance et un besoin alimentaire accru, la rareté de plus en plus marquée de l'eau pose un défi difficile mais indispensable à relever, car elle compromet, dans de nombreuses régions, non seulement l'approvisionnement en eau potable, mais aussi le maintien d'une agriculture productive.

A l'avenir, la plupart des régions auront à faire face à une variabilité croissante du climat. Cela signifie une augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes : sécheresses et canicules à l'origine d'une pénurie d'eau, d'une part, mais aussi risque accru de précipitations intenses qu'il faudra savoir gérer par des stratégies adaptées, d'autre part.

Au-delà de son rôle fondamental dans la production agricole et de son importance vitale en tant qu'eau potable, l'eau est aussi un milieu de vie dont les évolutions plus ou moins brutales peuvent très rapidement avoir des répercussions dramatiques sur les écosystèmes et leur biodiversité.

La recherche sur le changement climatique et ses impacts est particulièrement développée en Allemagne. De nombreux instituts de recherche se consacrent à cette thématique, certains lui sont même dédiés, comme l'Institut de recherche sur les impacts du climat de Potsdam (PIK).

Les projets sur le changement climatique menés par des chercheurs allemands sont nombreux et variés. Compte tenu de leur gravité, les répercussions du changement climatique sur l'eau en sont l'un des thèmes phares. Ces projets visent tout autant à analyser et comprendre les processus du changement climatique qu'à évaluer leurs effets et à développer, autant que possible, des stratégies d'adaptation. Si de nombreux projets s'intéressent au territoire allemand, une part importante se consacre également aux mécanismes du changement climatique dans les pays en voie de développement.

La présente édition du « Science Allemagne » donne un aperçu de la diversité et de la richesse de ces approches ainsi que des projets de recherche allemands.



# Changement climatique et eau - Soutien du Ministère fédéral de l'enseignement et de la recherche (BMBF) à la recherche

**Dr. Henk van Liempt et Rainer Müssner, Département « Changement climatique » du Ministère fédéral de l'enseignement et de la recherche (BMBF)**

*Le Dr. Rainer Müssner, géographe et biologiste, travaille au sein du département « Changement global » du BMBF dans les domaines de la recherche sur la biodiversité, des cycles globaux de l'eau et des mégapoles du futur.*

*Le Dr. Henk van Liempt, biochimiste, est en charge des questions de recherche sur le changement climatique au sein du département « Changement global » du BMBF.*

Le gouvernement fédéral allemand a proposé des objectifs clairs et étendus pour la protection du climat en Europe et en Allemagne : moins d'émissions de gaz à effet de serre, une plus haute efficacité énergétique et une plus grande part d'énergies renouvelables. Nous avons besoin de nouvelles réponses pour que la croissance économique et le développement social avancent main dans la main avec la protection du climat. La mission de la recherche est de trouver de nouvelles solutions et de permettre leur mise en œuvre.

Avec la stratégie High-Tech pour la protection du climat, le BMBF a présenté, en octobre 2007, la contribution de la recherche à la réalisation de cette mission. Cette stratégie a été élaborée et mise en œuvre dans le cadre d'une coopération de partenaires économiques, scientifiques et politiques.

Indépendamment des efforts pour la protection du climat et de leurs effets, il est également nécessaire de se préparer aux changements susceptibles d'intervenir et de développer des stratégies d'adaptation appropriées. C'est pourquoi la stratégie High-Tech pour la protection du climat soutient aussi la recherche sur l'adaptation aux conséquences du changement climatique. Dans le monde entier, des événements climatiques et météorologiques extrêmes, comme des précipitations intenses, des tempêtes, des raz-de-marée, des canicules et des sécheresses, mettent en évidence le besoin d'action. Ces effets du changement climatique concernent notamment l'utilisation et la gestion des ressources en eau. La situation est particulièrement sensible dans les pays en voie de développement et les pays émergents, en raison de leur faible capacité de résistance économique et sociale.

Une meilleure compréhension des caractéristiques du climat et une modélisation efficace des impacts des événements extrêmes, des précipitations et des évolutions de la température doivent permettre d'évaluer plus tôt les conséquences sur le cycle de l'eau.

Parmi les différents domaines soutenus jouant un rôle important dans la thématique climat-eau, nous souhaitons présenter brièvement quelques projets ci-après.

## **Urbanisme avec une prise en compte renforcée de l'eau (Université RWTH Aix-la-Chapelle)**

Concernant le changement climatique attendu, des prévisions indiquent, d'une part, qu'une augmentation des épisodes de pluie intense conduit à une surcharge des systèmes d'évacuation des eaux usées et qu'il faut s'attendre à des conséquences négatives pour les eaux de surface, en cas de sécheresses prolongées. D'autre part, de longues périodes de temps sec et l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air peuvent provoquer un décalage du bilan hydrique et une réduction de la disponibilité des ressources en eau.

Parallèlement à la transformation aujourd'hui prévisible des zones d'habitation, due, entre autres, à l'évolution démographique qui se dessine en Allemagne et en Europe, des mesures doivent être adoptées afin d'affronter les conséquences sur la gestion de l'eau des tendances climatiques et du décalage des statistiques des extrêmes météorologiques.

Pour relever ces défis, un réseau de compétences interdisciplinaire a été créé, comprenant notamment les domaines suivants :

- gestion des eaux urbaines,
- urbanisme,
- sciences naturelles et sociales.

Ce réseau analyse les conséquences du changement climatique sur la gestion de l'eau en Rhénanie du Nord-Westphalie et identifie de possibles champs d'action. Un renforcement et un enrichissement continus du réseau sont explicitement souhaités. La coopération interdisciplinaire doit garantir que les effets négatifs prévus pour la gestion de l'eau urbaine puissent être atténués voire compensés grâce à des

mesures d'urbanisme prenant plus fortement l'eau en compte.

**AnKliG – Stratégies d'adaptation aux tendances climatiques et aux événements météorologiques extrêmes et mesures pour une gestion durable de l'eau souterraine** – Réseau en coopération avec la société de planification environnementale Brand-Gerdes-Sitzmann Umweltplanung GmbH, la société Hessenwasser GmbH et l'Office de l'environnement et de la géologie du Land de Hesse.

En Allemagne, environ 70 % des prélèvements d'eau pour l'approvisionnement public en eau potable proviennent d'eau souterraine ou d'eau de source. En raison de l'utilisation intensive des sols qui poursuit des intérêts concurrents, le prélèvement d'eau a lieu dans un espace fortement réduit et dans un contexte très tendu. Cependant, ces conflits d'utilisation entre la protection de la nature, la sylviculture, la protection des territoires urbains et l'agriculture sont plutôt déclenchés par des phases, liées aux intempéries, où les niveaux de nappes sont particulièrement bas ou élevés, et non par des niveaux moyens d'eaux souterraines. L'exploitation des eaux souterraines dépend très fortement du temps. Il reste à éclaircir dans quelle mesure les tendances climatiques et les situations météorologiques extrêmes influencent le cycle de l'eau souterraine et comment des stratégies d'adaptation devraient être développées pour une gestion durable des eaux souterraines.

### **Programmes GLOWA et IWRM**

Partant des accords conclus lors de différentes conférences internationales, comme par exemple le sommet mondial pour le développement durable, les mesures entreprises par le BMBF dans le domaine de l'eau sont très orientées vers l'international.

Dans ce contexte, il faut en particulier mentionner les programmes « Cycle de l'eau et changement global » (GLOWA) et « Gestion intégrée des ressources en eau » (IWRM).

L'objectif principal de la recherche sur le cycle global de l'eau dans les conditions du changement global (GLOWA) est l'élaboration de systèmes d'aide à la décision (DSS) qui permettent une gestion durable de la ressource vitale qu'est l'eau.

Dans le cadre des projets en Afrique, au Moyen-Orient en Europe Centrale et du Sud, les complexes thématiques suivants sont au cœur des réflexions :

- variabilité du climat et des précipitations,
- influence de l'interaction biosphère/utilisation du sol sur l'équilibre hydrique,
- disponibilité en eau et conflits d'utilisation.

Dans ce cadre, les rapports au sein des écosystèmes et le contexte socio-économique sont particulièrement pris en compte à l'échelle des bassins versants. Le but est d'élaborer des stratégies intégratives et scientifiquement fondées qui contribuent à garantir la disponibilité, la qualité et la répartition de la ressource en eau. Les projets GLOWA ont débuté en 2000 et s'achèveront entre 2009 et 2011. Les projets IWRM ont démarré en 2006 et sont encore dans leur phase initiale. L'une des questions décisives dans ce programme prioritaire de soutien est de savoir comment des technologies de l'eau et de l'environnement adaptées et le transfert de savoir-faire peuvent contribuer à l'établissement d'une gestion intégrée des ressources en eau dans les différentes régions modèles.

Le point commun de ces deux programmes est qu'ils sont conçus comme des projets de partenariat interdisciplinaires et intégratifs qui intègrent les partenaires, les utilisateurs et les décideurs locaux dans les activités de recherche dès le début du projet, afin de garantir la mise en œuvre des résultats.

### **Perspectives**

La gestion durable de l'utilisation du sol – une nouvelle priorité de soutien du BMBF – va traiter, à l'avenir, des aspects de la recherche sur le climat et l'eau et en approfondir certains points, en se basant notamment sur les programmes cités ci-dessus.

Pour l'utilisation du sol, en particulier, la gestion durable de l'eau, ressource-clé, joue un rôle important, car l'agriculture est le plus gros consommateur d'eau à l'échelle mondiale. Pour une utilisation durable du sol, il est nécessaire de disposer non seulement d'un savoir sur la gestion efficace et efficiente de l'eau, mais aussi de connaissances sur les possibilités d'adaptation, en prenant en compte le changement climatique dont les effets se manifestent très différemment selon les régions.

L'objectif de cette nouvelle mesure de soutien est de créer non seulement les bases de connaissances et de décision nécessaires à une gestion durable de l'utilisation du sol, mais aussi de mettre à disposition des stratégies d'action, des technologies et des solutions systémiques adaptées.

## **Liens complémentaires**

<http://www.glowa.org>  
<http://www.wasserressourcen-management.de>

<http://www.klimazwei.de>  
<http://www.bmbf.de/foerderungen/7764.php>



## Contact

Dr. Henk van Liempt  
(Changement climatique)  
Bundesministerium für Bildung und Forschung  
(BMBF), Referat 723 – Globaler Wandel

Téléphone +49 (0) 228 99 57 3280  
E-mail [Henkvan.Liempt@bmbf.bund.de](mailto:Henkvan.Liempt@bmbf.bund.de)

Dr. Rainer Müssner  
(Biodiversité, cycles de l'eau, mégalo­poles du futur)  
Bundesministerium für Bildung und Forschung  
(BMBF), Referat 723 – Globaler Wandel

Téléphone +49 (0) 228 99 57 3250  
E-mail [Rainer.Muessner@bmbf.bund.de](mailto:Rainer.Muessner@bmbf.bund.de)

# Comment le changement climatique influence-t-il les précipitations ?

**Daniela Jacob, Institut Max-Planck de météorologie, Hambourg**

*Daniela Jacob, née en 1961, a fait des études de météorologie à l'Université Technique de Darmstadt. Après sa thèse à l'Université de Hambourg, elle a passé un an au Centre national de recherche atmos-*

*phérique à Boulder, Colorado, USA. Depuis 1993, elle travaille à l'Institut Max Planck de météorologie de Hambourg, au sein duquel elle dirige le département de modélisation climatique régionale.*

Il est indiscutable que le climat de la Terre a changé au cours des dernières décennies, comme le montrent de nombreux enregistrements de services météorologiques et hydrologiques du monde entier. Il est particulièrement intéressant de savoir si, et si oui comment, les événements extrêmes ou rares ont évolué et vont éventuellement encore changer. Parmi ces événements comptent les précipitations intenses, qui peuvent provoquer des glissements de terrain et des inondations, de même que les canicules et les sécheresses. Ces 10 à 15 dernières années, les événements extrêmes semblent être devenus de plus en plus fréquents en Europe, à l'instar de l'été chaud de 2003, au cours duquel les déviations de la température diurne par rapport à la moyenne observée à long terme ont atteint presque 10°C.

Pour savoir à quels changements le climat pourrait être soumis à l'avenir, des modèles climatiques globaux ont été développés, qui calculent les transformations possibles du climat pour les 100 années à venir, sur la base de différentes hypothèses concernant l'évolution des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces modèles par ordinateur peuvent être considérés comme des représentations mathématiques du système Terre, car ils décrivent numériquement et calculent, le plus proche possible de la réalité, les processus physiques et biogéochimiques du système terrestre. Afin de pouvoir évaluer la qualité des modèles climatiques, ils sont d'abord utilisés pour le calcul de périodes passées. Pour cela, une période est choisie pour laquelle, de préférence, de nombreuses observations sont disponibles dans le monde entier.

Si l'on souhaite se prononcer sur d'éventuelles modifications régionales ou locales du climat et sur leurs effets, alors il est nécessaire d'établir une passerelle entre les calculs globaux sur le changement climatique et les impacts sur la région. A cette fin, des modèles climatiques régionaux, comprenant de nombreuses informations détaillées sur la région et ses alentours, sont inclus dans les modèles globaux. Le climat de la région peut ainsi être étudié avec précision, comme à l'aide d'une loupe.

Au cours de la dernière décennie, des modèles climatiques régionaux avec une résolution horizontale d'environ 50 km ont été développés, testés par com-

paraison avec des observations et utilisés pour des scénarios de changement climatique. Dans ce domaine, le modèle climatique régional REMO a été développé à l'Institut Max Planck de météorologie de Hambourg. Il possède une résolution de 10 km et a été mis en œuvre pour l'Allemagne, l'Autriche et la Suisse dans le cadre d'une étude commandée par l'Office fédéral de l'environnement (UBA). Ainsi, pour la première fois, des informations sur le changement climatique sont calculées avec un niveau de détail régional très élevé, pour 3 scénarios allant jusqu'à 2100.

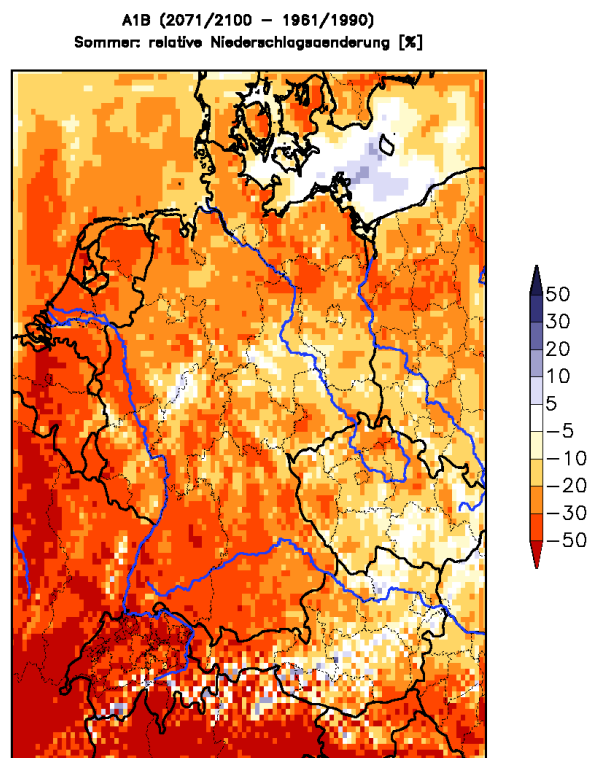


Figure 1 : variation relative des précipitations estivales (%)  
Scénario A1B (comparaison 2071/2100 – 1961/1990)

Les scénarios d'avenir élaborés dans le cadre du processus du GIEC pour la période 2001 à 2100 sont fondés sur différentes hypothèses concernant le changement démographique, social, économique et technologique. Les scénarios d'émissions A2, A1B et

B1 adoptés sont basés sur les suppositions socio-économiques suivantes :

La famille de scénarios A2 décrit un monde très hétérogène. Les hypothèses de base sont l'autarcie et la conservation des identités locales. La croissance économique s'oriente surtout vers la région. La famille de scénarios A1 décrit un monde futur caractérisé par une croissance économique rapide, une population mondiale qui atteint son maximum au milieu du 21<sup>ème</sup> siècle puis décroît et l'introduction rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Les trois groupes A1 diffèrent par leur priorité technologique respective : utilisation intensive de combustibles fossiles (A1FI), de sources énergétiques non fossiles (A1T) ou équilibre de toutes les sources d'énergie (A1B). La famille de scénarios B1 décrit un monde convergent, avec la même population globale que dans le scénario A1, mais avec des évolutions rapides des structures économiques vers une économie de services et d'information, ayant recours à une plus faible quantité de matériaux et introduisant des technologies à faibles émissions et préservant les ressources. La priorité est mise sur des solutions globales visant une durabilité économique, sociale et écologique, incluant une amélioration de l'équité, mais sans initiatives supplémentaires pour la protection du climat.

Sur la base de ces hypothèses, un groupe de travail du GIEC a élaboré des scénarios d'émissions pour les principaux gaz et aérosols agissant sur le climat et a calculé l'évolution temporelle des concentrations atmosphériques en tant qu'entrées pour les modèles climatiques, en s'appuyant sur des modèles biogéochimiques.

Une augmentation du taux de gaz à effet de serre pourrait conduire, en Allemagne, à un réchauffement moyen qui atteindrait entre 2,5°C et 3,5°C en 2100, en fonction du niveau des futures émissions de gaz à effet de serre. L'évolution des sommes annuelles de précipitations montre une variabilité décennale marquée, mais pas de tendance générale. Ce réchauffement se manifestera de manière variée selon les saisons et les régions. Le Sud et le Sud-Est de l'Allemagne devraient être confrontés au réchauffement hivernal le plus fort. D'ici 2100, les hivers pourraient y devenir plus chauds de plus de 4°C par rapport à la période 1961 – 1990.

Parallèlement, les précipitations estivales pourraient, à l'avenir, diminuer à grande échelle, par rapport à la période 1961 – 1990. D'après les simulations, les précipitations estivales diminueront particulièrement fortement dans le Sud et le Sud-Ouest ainsi que dans le Nord-Est de l'Allemagne. D'ici la fin du siècle, elles pourraient reculer de jusqu'à 30% par rapport à aujourd'hui (fig. 1). A l'opposé, les hivers pourraient devenir plus humides dans toute l'Allemagne (fig. 2). Dans les moyennes montagnes du Sud et du Sud-Ouest de l'Allemagne notamment, les précipitations pourraient augmenter de plus d'un tiers par rapport à

aujourd'hui. Concernant les zones côtières allemandes, il apparaît que le réchauffement de la côte Baltique (2,8°C) d'ici 2100 pourrait être un peu plus fort que celui de la côte de la Mer du Nord (2,5°C). Bien que la quantité de précipitations annuelle sur les deux côtes ne change pas, le fait que les pluies estivales puissent diminuer de jusqu'à 25% pourrait plaire aux touristes. En hiver, l'augmentation des précipitations pourrait cependant atteindre 30%.

Comme les températures hivernales vont augmenter parallèlement dans les Alpes – d'ici la fin du siècle, leur augmentation pourrait dépasser 4°C – les précipitations vont plus souvent tomber sous forme de pluie que de neige. Si, dans la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, environ un tiers des précipitations totales annuelles y tombait sous forme de neige, cette proportion pourrait se limiter à un sixième d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Ces changements ont pour conséquence un recul du nombre de jours de neige par an. Cela concernera surtout les régions de faible altitude, comme Garmisch-Partenkirchen et Mittenwald, pour lesquelles des diminutions de plus de moitié sont possibles. Dans les régions plus hautes, comme Zermatt et St Moritz, seule une réduction d'environ un tiers est calculée.

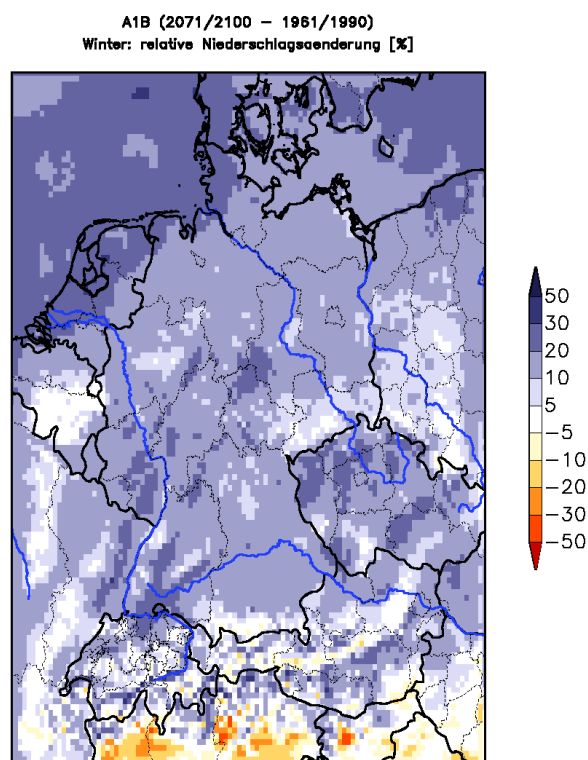


Figure 2 : variation relative des précipitations hivernales (%)  
Scénario A1B (comparaison 2071/2100 – 1961/1990)

D'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, les surfaces enneigées de la région alpine pourraient ainsi très fortement rétrécir, si le réchauffement est très important, par exemple supérieur à 4°C. Même si l'augmentation de la température se limitait à 3°C, comme simulée d'ici le milieu du 21<sup>ème</sup> siècle, de très grandes surfaces couvertes de

neige, dont l'enneigement est aujourd'hui encore considéré comme garanti, pourraient disparaître.

Les modèles globaux et régionaux du climat servent d'outils théoriques pour l'étude des relations dans le système climatique. Ils constituent la seule langue dans laquelle les processus complexes de ce système peuvent être exprimés de façon qualitative et quantitative.

Cependant, toutes les projections climatiques pour le 21<sup>ème</sup> siècle sont, encore aujourd'hui, entachées d'incertitudes, qui résultent des futures émissions, des variations naturelles du climat qui se superposent aux tendances anthropogènes, de grilles de calcul approximatives, de la manière dont les processus non pris en charge par la grille de calcul sont calculés et, enfin, des processus absents des modèles climatiques, comme par exemple les cycles biogéochimiques.

## Contact

Dr. Daniela Jacob  
Max-Planck-Institut für Meteorologie

Téléphone : +49 (0) 40 41173313  
E-mail : [daniela.jacob@zmaw.de](mailto:daniela.jacob@zmaw.de)

# Observation des cycles biogéochimiques avec prise en compte de la variabilité climatique – exemple de la canicule de 2003 en Europe

**Dr. Markus Reichstein, directeur du groupe indépendant de jeunes chercheurs « Intégration de données de modèles biogéochimiques » à l'Institut Max-Planck de biogéochimie, Iéna**

*Le Dr. Markus Reichstein, né en 1972, a étudié l'écologie du paysage, la chimie, la botanique et les mathématiques à l'Université de Münster. Il a ensuite réalisé sa thèse à Bayreuth sur « les effets de la sécheresse sur les cycles du carbone et de l'eau dans les écosystèmes méditerranéens ». Par la suite, il a participé à plusieurs projets européens sur la variabilité*

*du climat et le cycle du carbone (par exemple CARBOEUROPE), et a effectué dans ce cadre des séjours de recherche à Viterbo (Italie), Paris, Berkeley et Missoula (USA). Depuis 2006, il dirige le groupe de chercheurs nommé ci-dessus à l'Institut Max-Planck de biogéochimie.*

Avec les travaux de James Lovelock sur l'hypothèse Gaïa, voire même avant, il est devenu clair que nous devons considérer, analyser et comprendre la Terre comme un système global. Dans les débats publics actuels sur les changements climatiques globaux, l'effet de serre dû au CO<sub>2</sub> et l'augmentation de la température qui lui est liée sont placés au premier plan. Cependant, l'aspect naturel des changements globaux en lui-même est nettement plus complexe, si bien qu'une multitude de processus et de facteurs doit être prise en compte, notamment les interactions entre les cycles du carbone, de l'eau et des nutriments et entre les processus ayant cours chez les plantes et dans le sol. Dans ce contexte, l'intégration des observations dans une approche de modélisation qui s'étend de l'échelle du micromètre et de la seconde à celle de la planète et du siècle au moins, avec des résolutions spatio-temporelles très différentes, est un grand défi (figure 1). Les sources typiques de données sont, d'une part, des études de processus en laboratoire, au cours desquelles est étudié comment la photosynthèse foliaire ou la respiration microbienne réagissent aux facteurs environnementaux. D'autre part, des observations sont menées à l'échelle des écosystèmes, par exemple des mesures d'échanges gazeux ou des études des cernes des arbres. Enfin, les études s'appuient aussi sur des systèmes d'observation au niveau global, comme la télédétection. Un aspect important est ici l'association des modélisations empirique et théorique (data- and process-oriented modeling, figure 1).

## Réseau global de mesures des flux de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O dans les écosystèmes (FLUXNET)

Ces dernières années, la méthode dite d'Eddy-covariance est devenue un élément central de l'observation globale des écosystèmes. Avec cette méthode, la concentration de CO<sub>2</sub> et de vapeur d'eau est mesurée 10 à 20 fois par seconde dans la couche

d'air au-dessus de l'écosystème. Parallèlement est mesurée la vitesse verticale du vent. Ainsi, l'échange des deux gaz entre l'écosystème et l'atmosphère peut être déduit. Un grand avantage de cette technique réside dans la possibilité d'observer les systèmes avec une perturbation minimale, de manière comparable aux techniques invasives minimales en médecine.

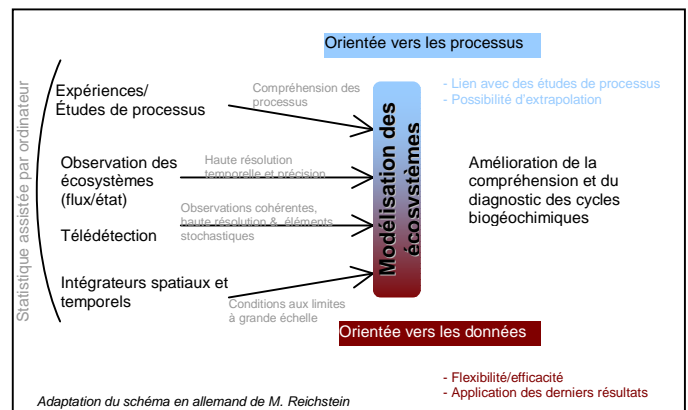


Figure 1 : Schéma sur l'intégration de différents flux de données dans le cadre d'une modélisation des systèmes écologiques. Les approches empiriques (« orientées vers les données ») et théoriques (« orientées vers les processus ») y sont complémentaires. Les nouvelles possibilités d'analyse de données assistée par ordinateur jouent un rôle important.

cine.

Ainsi, des observations continues peuvent être réalisées sur plusieurs années, sans que le système ne soit modifié. De cette manière sont obtenues des séries de données qui contiennent des informations sur les variations quotidiennes, annuelles et la variabilité à long terme du cycle du carbone dans les écosystèmes. En appliquant cette méthode dans un réseau reparté sur tout le globe (figure 2), d'autres questions spatiales concernant l'influence générale du climat sur les cycles biogéochimiques peuvent être éclaircies. A l'aide de données satellitaires, ces relations peuvent être étendues à de plus grandes régions, par exemple des continents, et, ainsi, le rôle des écosystèmes dans



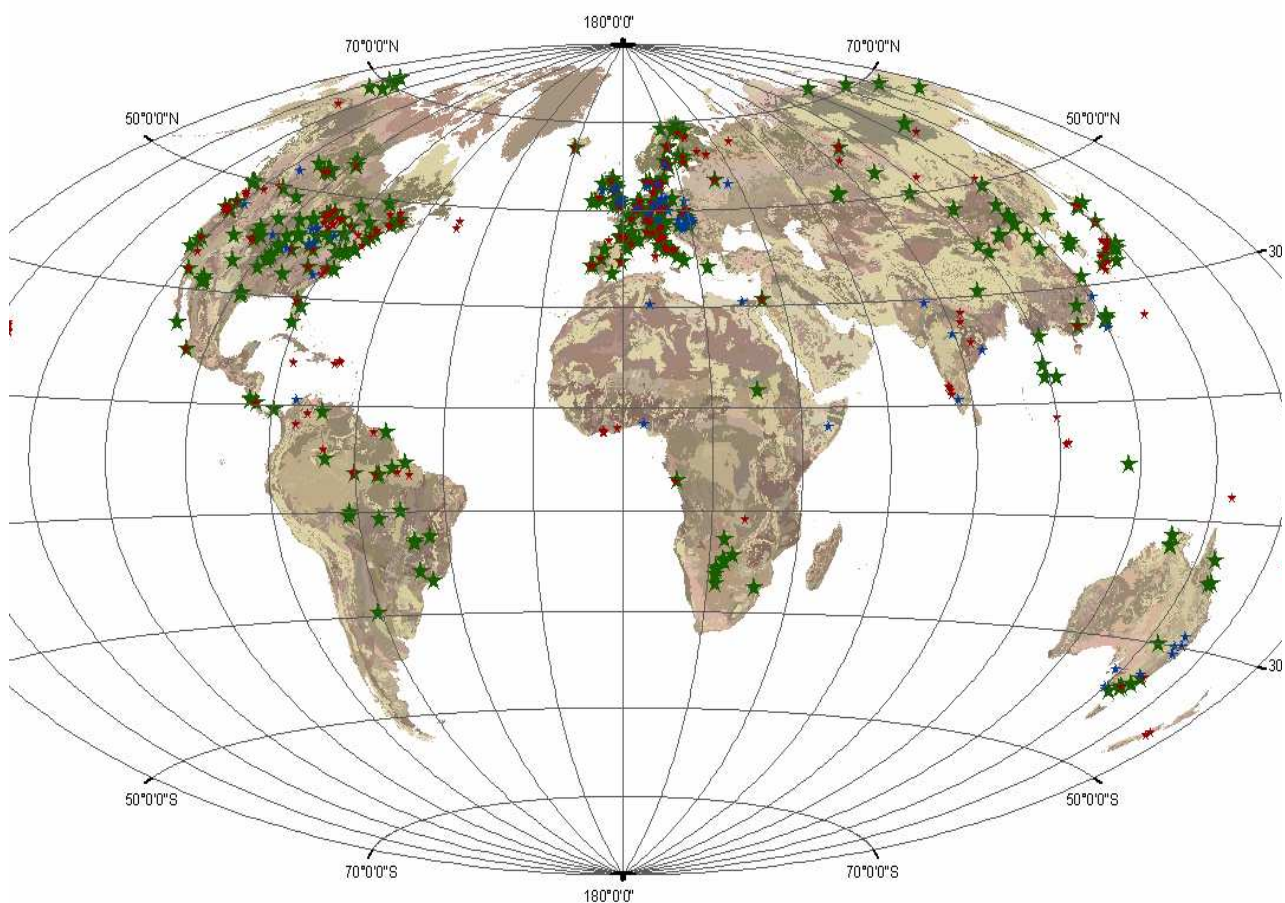


Figure 2 : Répartition des stations de mesure de FLUXNET pour l'observation des échanges de  $CO_2$  et  $H_2O$  entre les écosystèmes et l'atmosphère.

le cycle global du carbone et la sensibilité au climat des écosystèmes peuvent être analysés.

Ceci est expliqué ci-dessous à travers deux études, menées en étroite collaboration avec des partenaires français (par exemple le CEA, le CNRS, l'INRA).

#### Etude de cas 1 :

Une question importante, que nous avons pu traiter à l'aide d'une analyse intégrée de données de flux, de télédétection et de modèles, était la quantification de l'effet d'intempéries extrêmes sur les cycles biogéochimiques au sein des écosystèmes. L'été du siècle en 2003, souvent appelé aussi canicule de 2003, a constitué pour cela une expérimentation naturelle. Une étude large a analysé, dans l'esprit de la figure 1, différents flux de données. Grâce à la méthode d'Eddy-covariance, l'échange de dioxyde de carbone entre l'écosystème et l'atmosphère a été observé dans 14 écosystèmes de forêt et de prairie. L'état de la végétation a, de plus, été analysé à l'aide de données satellitaires et de statistiques de récolte. Ensuite, ces données ont été intégrées dans des modèles de simulation par ordinateur afin d'étudier l'influence du climat sur la biosphère. Le résultat principal est indiscutable et indépendant de l'approche de modélisation

(figure 3). Une longue période de sécheresse et des températures dépassant parfois  $40^{\circ}C$  ont provoqué une baisse de croissance de la végétation d'environ 30% en 2003 – à notre connaissance, un phénomène sans précédent au cours du siècle dernier. En conséquence, les écosystèmes sont devenus une source anormale de carbone de 0,5 pétagramme (Pg) de C ( $1 Pg=10^{15}g$ ), ce qui neutralise la fonction de puits de carbone normalement assurée pendant 4 à 5 ans. Ici, les analyses ont aussi montré que la sécheresse était bien plus responsable de la réaction de la biosphère que la canicule en elle-même, davantage perçue par l'opinion publique. D'un point de vue méthodologique, il est satisfaisant de constater que nous sommes, grâce au développement des systèmes d'observation et de leur analyse intégrée, de mieux en mieux en mesure de diagnostiquer et de comprendre les effets du climat sur la biosphère.

#### Etude de cas 2 :

Dans le cadre d'une analyse générale et continue au sein du projet CarboEurope-IP (<http://www.carboeurope.org>), nous avons analysé la productivité d'écosystèmes le long de gradients de températures et de précipitations continentales. Dans le cadre de cette étude, nous avons profité du fait que

le bilan net du carbone à l'échelle de l'écosystème peut être décomposé en production primaire brute (par photosynthèse de la végétation) et en respiration de l'écosystème (respiration des plantes autotrophes et des microorganismes hétérotrophes, qui n'a lieu que la nuit). Comme attendu, la température est le principal facteur limitant de la productivité de l'écosystème dans les écosystèmes du Nord. Il est toutefois surprenant que la disponibilité en eau soit le facteur limitant décisif dans deux tiers des sites obser-

de la végétation pour le cycle du carbone. Dans l'ensemble, le cycle du carbone terrestre semble donc très dépendant de la disponibilité en eau. Ainsi, la répartition modifiée des précipitations doit particulièrement être prise en compte pour les projections futures concernant la réaction des écosystèmes aux changements du climat.

## Perspectives

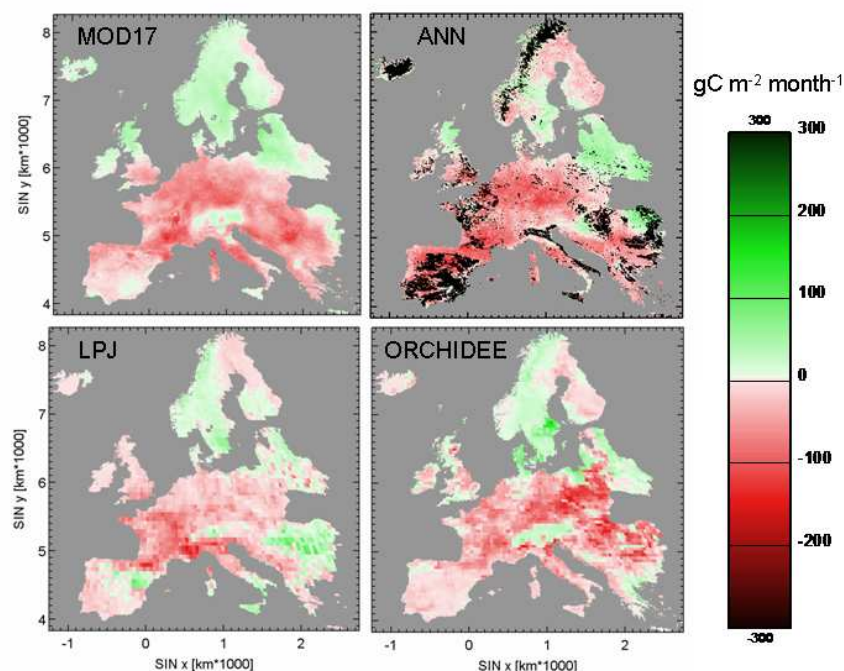


Figure 3 : Anomalie de la production primaire brute pendant les mois de juillet à septembre 2003, en comparaison avec les années précédentes. Résultats obtenus avec deux modèles orientés vers les données calés avec des données d'Eddy-flux et alimentés avec des données météorologiques et de télédétection (haut) ainsi qu'avec deux modèles basés sur les processus. La concordance des approches de modélisation concernant la réduction de la production (en rouge) en Europe de l'Ouest et Centrale est nettement visible. D'après Reichstein et al. (2007a)

vés, c'est-à-dire ceux qui sont situés au sud du parallèle 52°N (cela correspond environ à la latitude de Berlin). Aussi bien la production primaire brute que la respiration de l'écosystème y sont fortement corrélées à l'indice de disponibilité en eau (index of water availability, IWA). Le bilan net de carbone n'est directement relié à aucun des deux facteurs climatiques d'un point de vue statistique, mais il apparaît que la variation du bilan net de carbone est nettement corrélée à la production primaire brute. Ceci montre l'importance

Grâce aux nouvelles données de FLUXNET, qui ont été harmonisées au niveau mondial en collaboration avec des collègues européens, nous pouvons désormais mener des analyses comparables à l'échelle globale. De plus, il est clair que les processus du sol, en particulier, jouent un rôle important. Comme ceux-ci sont difficilement, voire pas du tout, observables par télédétection, la modélisation orientée vers les processus prendra une place de plus en plus déterminante.

## Contact

Dr. Markus Reichstein  
Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena

Téléphone: +49 (0) 3641 576273  
E-mail : [mreichstein@bgc-jena.mpg.de](mailto:mreichstein@bgc-jena.mpg.de)

# Changement climatique et pénurie d'eau

**Prof. Dr. Zbigniew W. Kundzewicz, professeur de géosciences à l'Institut de recherche sur les impacts du climat, Potsdam**

*Prof. Dr. Zbigniew W. Kundzewicz, né en 1950, Dr. habil., est professeur de géosciences. Il travaille comme collaborateur scientifique à l'Institut de recherche sur les impacts du climat de Potsdam (PIK) et comme directeur de recherche et chef de département*

*(climat et ressources en eau) au centre de recherche sur l'environnement agricole et forestier de l'Académie des sciences polonaise de Poznan (Pologne). Depuis 1995, il est expert au GIEC. Il est l'auteur de plus de 300 publications scientifiques.*

Les processus du changement global, comme la croissance démographique (mais aussi l'augmentation de la prospérité et du niveau de vie), les modifications de l'occupation du sol et le changement climatique (provoqué par l'homme) mènent à une augmentation du besoin en eau et, ainsi, à une pénurie d'eau. Au cours des 100 dernières années, le besoin global en eau a été multiplié par huit, c'est-à-dire qu'il a augmenté deux fois plus vite que la population. Comme la croissance démographique ne s'arrête pas et que le besoin en eau continue de croître, le 21<sup>ème</sup> siècle est aussi appelé « ère de la pénurie d'eau ». La variabilité climatique et les changements du climat peuvent encore renforcer la pénurie d'eau.

La quantité moyenne globale de précipitations augmente avec le réchauffement, mais les effets du changement climatique sur les ressources en eau douce peuvent varier selon les régions et les saisons. Les études basées sur des modèles montrent que le débit annuel moyen pourrait reculer de 10 à 30 % dans certaines régions sèches des latitudes moyennes et faibles, d'ici le milieu du 21<sup>ème</sup> siècle. En raison de précipitations réduites, de périodes de pluie modifiées et d'une évapotranspiration plus forte, de nombreuses régions arides vont devenir encore plus sèches. Dans ce contexte, les régions sèches des pays en voie de développement sont particulièrement vulnérables.

La pénurie d'eau peut être mesurée à l'aide du rapport moyen de l'eau prélevée sur la ressource en eau renouvelable disponible (i.e. sur les débits). Selon les travaux de modélisation de J. Alcamo et de ses collaborateurs, la surface globale concernée par un stress hydrique croissant va atteindre 60 à 75 % de la surface totale d'ici 2050, et celle où le stress hydrique recule 20 à 30 %. Cependant, les estimations quantitatives sont très incertaines et dépendent fortement des scénarios et des modèles utilisés.

D'un point de vue global, le principal consommateur d'eau douce est l'agriculture irriguée. Elle concerne seulement un sixième des terres arables mondiales, mais 40 % de tous les aliments produits, l'utilisation de l'eau n'étant néanmoins pas très efficace. La réduction de moitié de la part de l'humanité souffrant de faim,

c'est-à-dire l'atteinte de l'objectif global du millénaire concernant l'alimentation mondiale, exige qu'une beaucoup plus grande quantité d'eau soit utilisée pour l'irrigation qu'aujourd'hui. Or l'eau devient de plus en plus rare.

Il est donc indispensable de produire plus d'aliments avec moins d'eau (more crop per drop = plus de récolte à partir d'une goutte d'eau). Cependant, la production d'aliments nécessite beaucoup d'eau. Le blé et le riz consomment plus de 1000 litres d'eau par kilogramme récolté, en fonction de la zone climatique. La production de nourriture strictement végétarienne nécessite toutefois peu d'eau (environ 250 m<sup>3</sup> par habitant et par an). Dès lors que le régime contient 20% de viande, la consommation d'eau est multipliée par quatre. Les sécheresses observées causent déjà aujourd'hui des pertes de récolte à hauteur de plusieurs milliards d'euros. A l'avenir, des importations massives d'eau originaire d'autres régions et un commerce virtuel d'eau intensif via les produits agricoles (et l'eau « virtuelle » qu'ils contiennent) seront indispensables.

La raréfaction des ressources en eau peut conduire à des conflits de répartition, notamment dans des régions arides, menacées par des confrontations et abritant des eaux internationales, comme par exemple les bassins du Nil, de l'Indus, du Jourdain, du Tigre et de l'Euphrate, etc.

Il est fort probable que la poursuite du réchauffement climatique ait pour conséquence une augmentation de la variabilité du climat. Les événements extrêmes liés à l'eau (crues, sécheresses) seront encore plus marqués. Les sécheresses et les déficits prolongés de précipitations sont souvent liés à des situations météorologiques qui favorisent une évaporation intense : températures élevées (canicules), vents forts et faible couverture nuageuse. Ils conduisent à une infiltration réduite, à un déficit d'humidité du sol (et ainsi à un stress hydrique des végétaux), à une baisse des niveaux d'eau et à des effets sociaux, économiques et écologiques négatifs.

Une variabilité croissante des précipitations signifie que les sécheresses deviennent plus fréquentes. La surface globale des régions extrêmement arides a



plus que doublé au cours des 30 dernières années. Les sécheresses sont de plus en plus fréquentes, intenses, longues et coûteuses. D'un point de vue global, la part des surfaces concernée par une sécheresse extrême va être multipliée par 10 au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Une grande partie de l'Europe doit s'attendre à davantage de sécheresses pendant l'été. Une étude de B. Lehner et de ses collaborateurs montre que l'actuelle sécheresse centennale va intervenir au moins dix fois plus souvent dans les années 2070 en Europe du Sud et en Pologne.

Plus d'un milliard de personnes (environ un sixième de la population mondiale) vit aujourd'hui dans des bassins versants alimentés par de l'eau de fonte (de neige et de glaciers) de grands massifs montagneux. Le changement de la répartition dans le temps des débits dans ces régions (et notamment la réduction des débits en été et en automne) a des conséquences importantes et négatives sur la sûreté de l'approvisionnement en eau.

Un quart de la population mondiale vit dans des régions côtières, mais ne dispose même pas de 10% de la quantité globale disponible d'eau renouvelable. Une faible augmentation du niveau de la mer suffirait à faire diminuer significativement les ressources en eau douce des petites îles plates, comme dans l'Océan Indien et le Pacifique. La baisse des niveaux des nappes souterraines (en raison de la surexploitation de l'eau disponible et du prélèvement non durable d'eau) et la montée du niveau de la mer conduisent à un phénomène d'intrusion d'eau salée dans les nappes phréatiques. L'eau douce devient ainsi de plus en plus rare.

L'exemple des jeunes filles et des femmes africaines qui portent des récipients d'eau sur leurs têtes illustre bien le phénomène de la pénurie croissante d'eau liée au climat à venir. Elles doivent parcourir chaque jour des distances de plus en plus longues et attendre de plus en plus longtemps devant les puits pour prélever de l'eau, mais, souvent, ces puits s'assèchent. Le recul du niveau du lac Tchad, par exemple, a des conséquences catastrophiques de ce point de vue. En Chine, le Nord du pays reçoit peu de précipitations et la demande future en eau (y compris celle des gran-

des villes comme Pékin, Ürümqi, Harbin et Shenyang) ne pourra être satisfaite sans des transports d'eau sur de grandes distances.

Dans les pays en voie de développement, les possibilités d'adaptation ne sont pas suffisamment prises en compte dans les planifications. C'est pourquoi ces pays sont considérés comme particulièrement vulnérables aux sécheresses. L'eau devient de plus en plus rare et l'offre n'est pas en mesure de satisfaire la demande croissante. Les inégalités dans la répartition de la ressource en eau vont même se renforcer. L'augmentation de la population va, à elle seule, aggraver la pénurie d'eau, même sans changement climatique. Le réchauffement de la terre va également provoquer des changements, non seulement de la disponibilité, mais aussi de la demande en eau. Dans de nombreuses régions, la disponibilité en eau va diminuer et la demande augmenter.

La dimension du changement quantitatif de la répartition des précipitations comporte toutefois de fortes incertitudes. Dans beaucoup de régions, les résultats des modèles climatiques divergent et fournissent des projections très différentes. Ainsi, la problématique du changement climatique et de la pénurie d'eau restera l'un des défis scientifiques majeurs. Plusieurs instituts de recherche allemands travaillent sur ce sujet, comme les universités de Kassel et Francfort/Main et l'Institut de recherche sur les impacts du climat de Potsdam. De plus, il existe des projets focalisés sur le changement climatique et ses effets, par exemple les projets GLOWA (GLObal WAter) (<http://www.glowa.org>) qui étudient la problématique de l'eau face au changement climatique à différentes latitudes. Les régions modèles sont les bassins versants de l'Elbe, du Danube, du Jourdain et de la Volta, ainsi que différents bassins marocains. C'est aussi grâce aux contributions scientifiques allemandes aux études sur le changement climatique et la pénurie d'eau que les problèmes qui se posent sont mieux compris et que des solutions adéquates peuvent être trouvées.

## Bibliographie

Alcamo, J., Flörke, M. & Märker, M. (2007) Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrol. Sci. J.* 52(2) 247-275 (DOI: 10.1623/hysj.52.2.247)

Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K., Oki, T., Sen, Z. & Shiklomanov, I. (2007) Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, (eds Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., Hanson, C. E. and van der Linden, P. J.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N., Döll, P., Jiménez, B., Miller, K., Oki, T., Sen, Z. & Shiklomanov, I. (2008) The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrol. Sci. J.* 53(1), 3-10.

Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, H. & Kaspar, F. (2006) Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated assessment. *Climatic Change* 75, 273-299.

NB: Kundzewicz et al. (2007, 2008) sont deux exemples de contributions internationales dans lesquelles des scientifiques originaires d'Allemagne jouent un rôle important (leader).

## Contact

Prof. Dr. Zbigniew Kundzewicz  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

Téléphone +49 (0) 331 288 2517  
E-mail [zbyszek@pik-potsdam.de](mailto:zbyszek@pik-potsdam.de)

# Changement climatique et ressources en eau dans l'Est de l'Allemagne : le projet GLOWA-Elbe

Fred F. Hattermann et Frank Wechsung, Institut de recherche sur les impacts du climat de Potsdam (PIK)

Dans le cadre du programme prioritaire "Changement climatique du cycle de l'eau" du BMBF (voir aussi [www.glowa.org](http://www.glowa.org)), des stratégies pour une gestion durable et prévoyante de l'eau doivent être développées à l'échelle régionale, en prenant en compte les changements environnementaux globaux et le contexte socio-économique. Un sous-projet du programme prioritaire, GLOWA-Elbe, s'intéresse aux

effets du changement global sur le bilan hydrologique dans le bassin versant de l'Elbe ([www.glowa-elbe.de](http://www.glowa-elbe.de)). La région est particulièrement intéressante, car elle se trouve dans la zone de transition entre les climats maritime et continental. De plus, parmi les plus grands bassins versants d'Europe, l'Elbe présente la deuxième plus faible disponibilité en eau par habitant.

## Introduction

Depuis une centaine d'années, un changement climatique global, se traduisant par des modifications des précipitations, de la température et du bilan du rayonnement, se fait sentir et influe sur le bilan hydrologique régional. Ces tendances peuvent fortement différer selon les régions d'Europe. Concernant l'évolution future du climat, la conclusion dominante de toutes les études est que la tendance générale du climat à se modifier va se poursuivre, voire se renforcer, même s'il existe encore des incertitudes quant à l'intensité de ces changements et que les particularités régionales joueront aussi un rôle.

Les conséquences pour la gestion européenne de l'eau peuvent être lourdes pour certaines régions et certains secteurs et devraient être prises en compte dans la planification de la gestion de l'eau, afin de garantir un management durable des ressources (Wechsung et al., 2005).

## Changement climatique observé en Allemagne et dans le bassin versant de l'Elbe

En Allemagne, deux tendances principales ont pu être observées au cours des 50 dernières années. Comme dans l'ensemble de l'Europe centrale, les précipitations diminuent en été alors qu'elles augmentent en hiver. D'un point de vue géographique, les précipitations augmentent presque partout dans l'Ouest de l'Allemagne et diminuent en revanche dans le centre de l'Allemagne de l'Est (figure 1). Un changement de l'intensité des précipitations a également pu être observé : elles sont plus intenses sur une plus courte période.

Le recul des précipitations aggrave ainsi en Allemagne de l'Est les conflits existant déjà autour de la disponibilité en eau. En Allemagne de l'Ouest, des problèmes de quantité d'eau peuvent également apparaître en été, à cause, par exemple, du recul

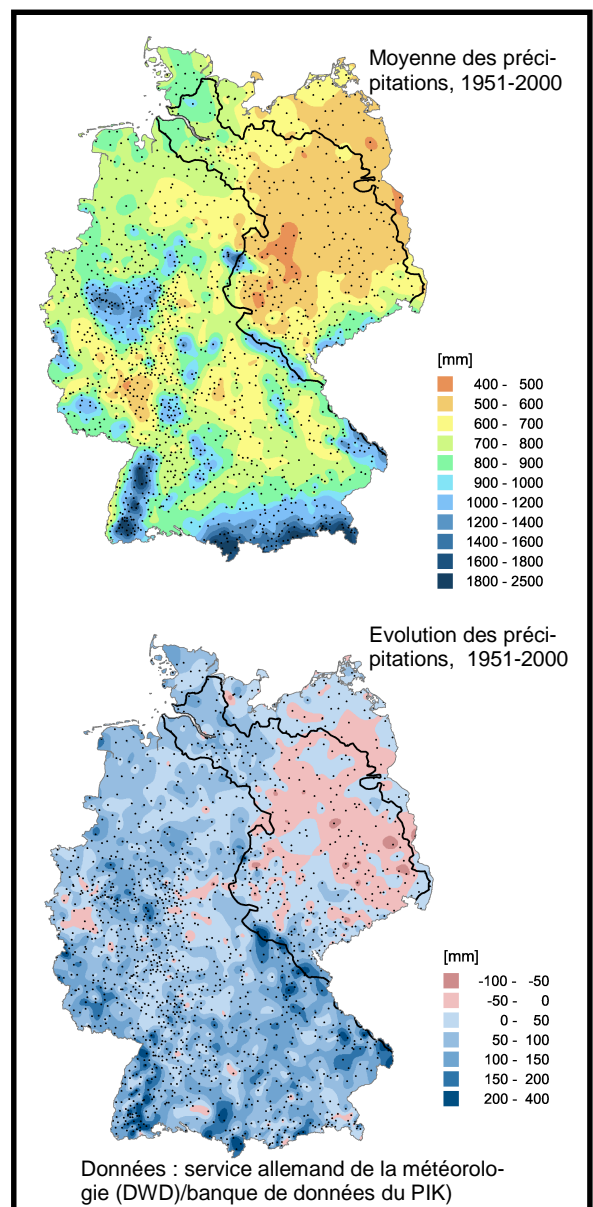


Figure 1 : Moyenne et évolution des précipitations en Allemagne, 1951-2000

des débits d'étiage normalement alimentés par les eaux des glaciers et de la tendance à une réduction des précipitations et à une augmentation de l'évaporation en été (Hattermann et al. 2007).

### Scénarios pour un changement climatique futur

La figure 2 montre un possible changement climatique futur d'ici 2055 en Allemagne, simulé grâce au modèle climatique régional statistique STAR (Orlowsky 2007). Dans les conditions du scénario, l'augmentation des températures peut atteindre 2,5°C en moyenne annuelle, ce phénomène étant particulièrement fort dans le Sud et l'Est de l'Allemagne. Ainsi, le gradient maritime / continental se renforce. Dans ce scénario, les augmentations relatives sont plus fortes en hiver qu'en été. Quant aux précipitations, les simulations montrent que les tendances déjà observées se poursuivent. Elles continuent à diminuer à l'Est et à augmenter à l'Ouest de l'Allemagne. De même, la tendance au recul des précipitations en été et à leur augmentation en hiver se maintient dans les conditions du scénario. Il faut, par conséquent, s'attendre à une poursuite des modifications du régime des débits en Allemagne.

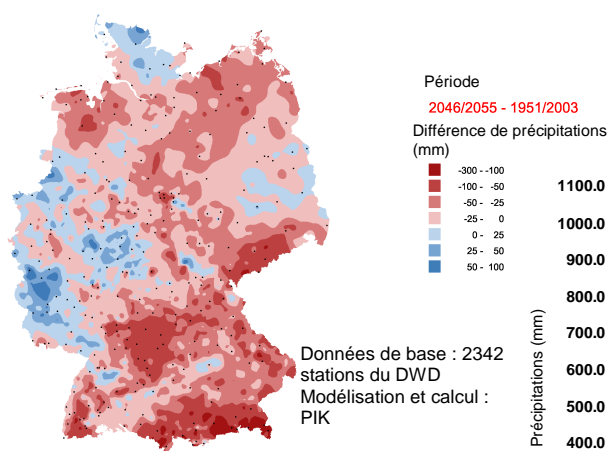


Figure 2 : Scénario d'évolution du climat d'ici 2055, simulé à l'aide du modèle régional STAR

### Conséquences pour une planification durable des ressources en eau

Le bilan hydrologique est très sensible aux changements du climat. La plupart des études se sont intéressées aux modifications des précipitations qui ont des répercussions directes sur le bilan hydrologique à l'échelle régionale. Le fait que les modifications de l'évaporation aient une aussi forte influence sur le bilan hydrologique à

l'échelle régionale dans beaucoup de régions d'Europe, en particulier dans les zones semi-arides et continentales, est souvent négligé. Ces modifications peuvent être générées par des évolutions du bilan énergétique régional, notamment de la température et du rayonnement. Si les tendances proposées par les scénarios pour les précipitations, calculées par des modèles climatiques globaux ou régionaux, sont encore relativement incertaines pour des applications régionales, en revanche, les prédictions de la température dans les conditions des scénarios sont solides. Il en résulte les conséquences suivantes pour la gestion des eaux :

- Dans les conditions des scénarios, l'accroissement des températures stimule l'évaporation. Ceci est moins dû à l'apport direct d'énergie qu'à l'augmentation de l'activité de la végétation.
- Même dans les régions où les précipitations ne diminuent pas, voire même augmentent légèrement, la disponibilité en eau peut cependant reculer.
- Les tendances saisonnières jouent un rôle important. En été, notamment, le renforcement de la transpiration peut provoquer une pénurie d'eau.

Le projet GLOWA-Elbe a, en particulier, cherché à quantifier les conséquences de l'incertitude des scénarios climatiques sur le bilan hydrologique. Ainsi, ce n'est pas seulement une réalisation de l'évolution future du climat qui a été analysée, mais, en tout, 100 réalisations (Orlowsky 1997).

La figure 3a montre la répartition des précipitations

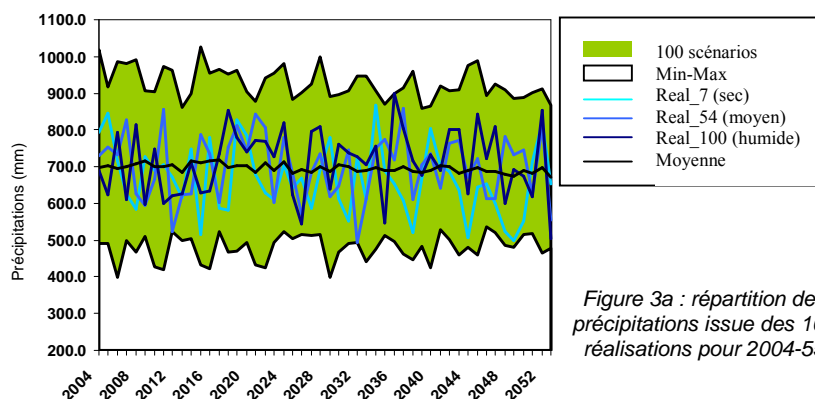


Figure 3a : répartition des précipitations issue des 100 réalisations pour 2004-55

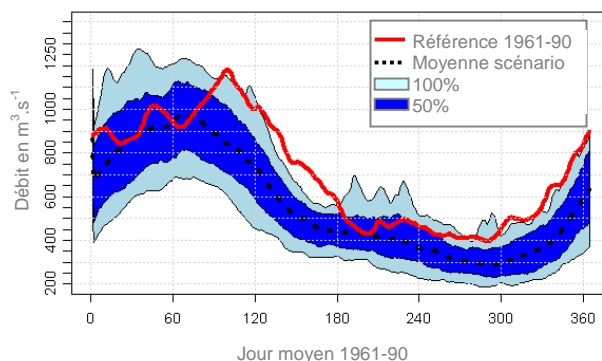


Figure 3b : débits quotidiens de l'Elbe sur la base des données de la fig. 3a

issue des 100 réalisations pour les années 2004-55, et la figure 3b montre les débits quotidiens de l'Elbe en prenant comme base ces réalisations climatiques et les compare aux débits moyens de la période de référence 1961-90 (Hattermann et al. 2007). Il apparaît clairement que les modifications des précipitations sont relativement modérées (pas de tendance forte) et qu'il y a aussi des réalisations climatiques plus humides que la période de référence en moyenne annuelle. Toutefois, le débit est tellement sensible au recul des précipitations et à l'augmentation de l'évaporation en été, qu'à certains moments du printemps et de la fin de l'été, tous les débits simulés sont inférieurs à la moyenne des débits observés pour la période de référence. Le décalage des pics de débits du printemps à la fin de l'hiver est également net.

## Conclusion

Le bilan hydrologique est très sensible aux changements des précipitations et du bilan énergétique

(température, rayonnement). Deux tendances climatiques principales en résultent pour l'Europe centrale. Dans l'ensemble, ces tendances déjà observées devraient se poursuivre dans la période utilisée pour les scénarios, jusqu'à 2050, et au-delà. En été, les précipitations diminuent, en hiver, elles augmentent dans la plupart des régions. Parallèlement, le cumul annuel des précipitations s'accroît en Allemagne de l'Ouest, mais diminue à l'Est, notamment sur le versant des moyennes montagnes abrité du vent.

La conséquence pour le bilan hydrologique régional est la suivante : la problématique estivale de la disponibilité en eau va se renforcer dans la plus grande partie de l'Allemagne, en particulier à l'Est. En même temps, le changement du climat et du régime des débits peut générer des crues extrêmes jusqu'ici inconnues. Afin de garantir une gestion de l'eau durable et pour éviter les conflits, les résultats relativement solides de ce projet devraient être pris en compte dans la planification.

## Bibliographie

Hattermann, F.F.; Conradt, T.; Bronstert, A. (2007): Berechnung großskaliger Verdunstung unter den Bedingungen des globalen Wandels. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 21(07), 231-247.

Orlowsky, B. (2007): Setzkasten Vergangenheit - ein kombinatorischer Ansatz für regionale Klimasimulationen. Dissertation Universität Hamburg, <http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volltexte/2007/3316/>.

Wechsung, F. (2005): Herausforderungen des globalen Wandels für die Elbe-Region. In: Wechsung, F.; Becker, A.; Gräfe, P. (Editoren) (2005): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Weißensee Verlag Ökologie, Potsdam, Germany.

## Contact

Fred F. Hattermann  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Téléphone +49 (0) 331 288 2649  
E-mail [hattermann@pik-potsdam.de](mailto:hattermann@pik-potsdam.de)



# Adaptation à la pénurie d'eau croissante : le projet de recherche GLOWA Jordan River

**Holger Hoff, chercheur à l'Institut de recherche sur les impacts du climat de Potsdam et à l'Institut de l'environnement, Stockholm**

Holger Hoff est chargé de recherche à l'Institut de l'environnement de Stockholm (SEI) et à l'Institut de recherche sur les impacts du climat de Potsdam (PIK). Il coordonne l'initiative Green-Blue Water au SEI et le Climate Change and Ecosystems Research Line du projet européen CIRCE au PIK. Au sein du projet GLOWA Jordan, il est responsable de l'analyse de scénarios. Auparavant, il a travaillé comme chercheur dans le cadre du Dialogue on Water and Cli-

mate et a dirigé le Global Water System Project ainsi que l'un des projets principaux sur le cycle hydrologique au sein du programme international Géosphère-Biosphère. Après ses études de géoécologie (Bayreuth) et de sciences de l'environnement (Colorado, USA), il a d'abord travaillé comme collaborateur scientifique au Conseil scientifique sur les changements environnementaux globaux du gouvernement fédéral.

Dans des régions de plus en plus nombreuses, la pénurie d'eau devient un facteur limitant pour le développement économique, l'alimentation et, à l'avenir, également pour la production de bioénergie (WWDR 2006, CA 2007). La pénurie d'eau régionale résulte de différentes combinaisons entre besoin croissant, disponibilité en baisse et pollution de l'eau. La région MENA (Middle East – North Africa) fait partie des régions les plus touchées. Les ressources naturelles en eau sont déjà plus ou moins entièrement utilisées ou, comme le disait Tony Allan (2001) : « The Middle East as a region ran out of water in the 1970s » (Allan 2001). La Palestine, la Jordanie et l'Israël font partie des pays qui présentent la plus faible disponibilité en eau par habitant, bien au-delà de la limite à partir de laquelle on parle de pénurie d'eau absolue. Parallèlement, l'eau y est étroitement liée aux situations politiques, non seulement à leurs crises, mais également à leurs solutions.

Les tendances actuelles aggravent encore rapidement cette crise de l'eau dans cette région. Etant donné le maintien d'une croissance démographique soutenue et l'augmentation du besoin en eau par personne, la disponibilité en eau diminue simultanément dans de nombreux secteurs de la région MENA, à cause du changement climatique, une tendance qui devrait encore se renforcer à l'avenir. Une comparaison de plusieurs modèles cli-

matiques globaux (Giorgi et al, 2008) montre nettement ce phénomène pour le Sud et l'Est de la Méditerranée (fig. 1).

Le scénario A1B utilisé ici correspond à une augmentation « moyenne » des émissions de gaz à effet de serre. Des extrapolations des tendances d'émissions

Precipitation change (% , 2071-2100 minus 1961-1990),  
MGME ensemble average, A1B scenario

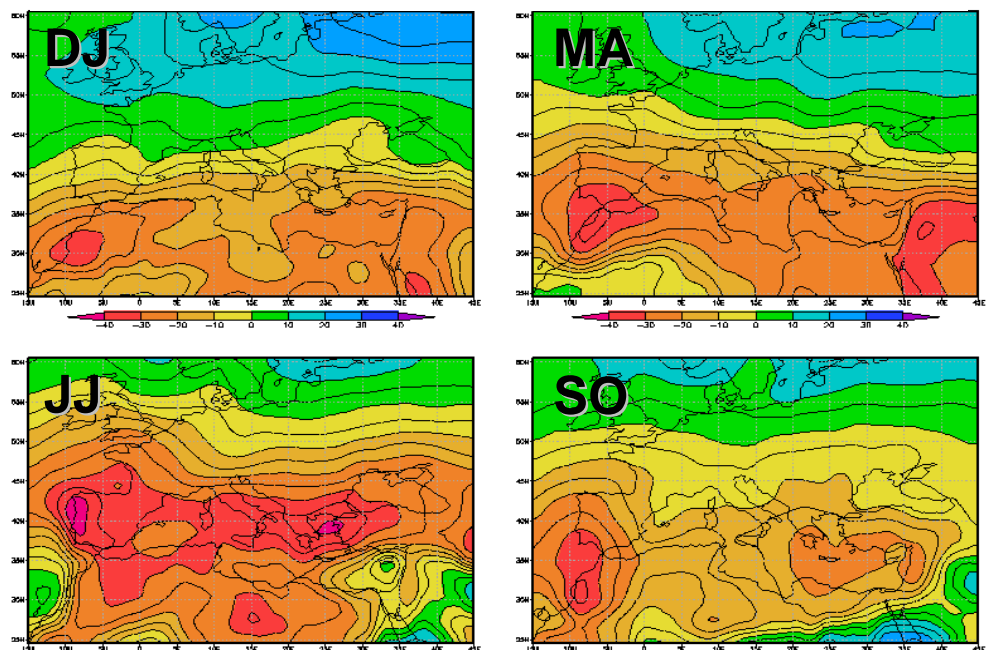


Figure 1 : Simulation d'ensemble des précipitations futures – moyennes de 17 modèles climatiques globaux

actuelles laissent apparaître ce scénario comme trop optimiste (CDIAC), de sorte qu'un assèchement encore plus marqué de cette région pourrait avoir lieu.

De plus, cette zone est caractérisée par une très forte variabilité climatique, avec des sécheresses répétées, qui rend la gestion de l'eau dans cette zone encore plus problématique.

Les unes de journaux à propos de la sécheresse actuelle dans cette région l'illustrent clairement :

- „drought threatens Iraq's crops and water supply” – AP 10 July 2008,
- “lack of water puts the country's economic growth in jeopardy” – Jordan Times 17 July 2008,
- “water crisis endangers entire state” – Jerusalem Post 29 July 2008.

Les projections climatiques considèrent, notamment pour les zones arides, que la variabilité va continuer à augmenter et conduire à des sécheresses plus fréquentes et plus intenses.

La région autour du Jourdain, de l'Euphrate, du Tigre et du Nil est considérée comme « le berceau de l'agriculture ». L'adaptation à la pénurie d'eau et aux sécheresses y a été toujours nécessaire, au début sous forme d'irrigation (Evenari et al 1972) et d'agriculture utilisant les eaux de ruissellement (Runoff Agriculture), par exemple en aménageant des terrasses (Bruins et al 1986). Ces derniers temps, la région est devenue pionnière en matière d'irrigation au goutte à goutte, de réutilisation des eaux usées, de désalinisation de l'eau et d'importations d'eau virtuelle (Chapagain et al 2004).

Le projet GLOWA Jordan River (GLOWA JR) est une étude de cas pour la région MENA, qui s'intéresse aux effets du changement climatique dans le domaine de l'eau et aux mesures d'adaptation possibles. Dans ce cadre, des scénarios climatiques régionaux sont développés à partir de modèles climatiques globaux et à l'aide de méthodes de désagrégation spatiale, en anglais « downscaling » (Kunstmann et al 2007). Ensuite, leurs conséquences sont simulées avec des modèles hydrologiques, agronomiques, agro-économiques et des modèles de végétation (Menzel et al 2007, Haim et al 2008, Köchy et al 2008). Un modèle de ressources en eau (WEAP, <http://www.weap21.org>) intègre les informations des

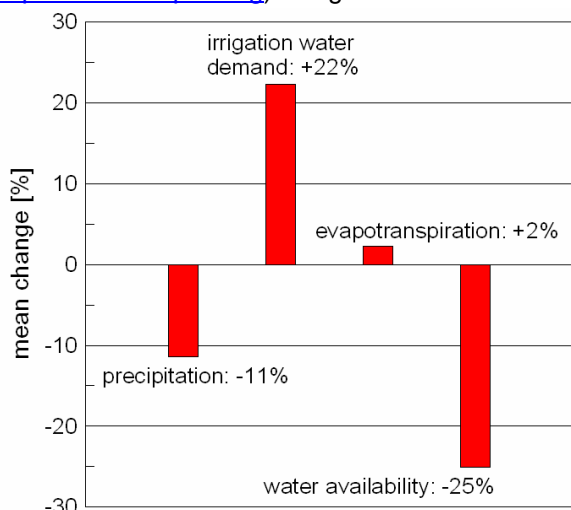


Figure 2 : Simulation de possibles évolutions de la disponibilité en eau et du besoin d'irrigation dans la région du Jourdain pour le scénario SRES B2, Menzel 2007

différents sous-projets et permet une estimation des coûts et des bénéfices des mesures d'adaptation pour différents scénarios.

L'objectif du projet GLOWA JR est de comparer les différentes voies de développement dans la région du Jourdain dans les conditions du changement global et régional et de dégager des pistes pour que les riverains puissent utiliser l'eau, de plus en plus rare, de manière coopérative et plus productive.

Jusqu'à présent, les tentatives d'augmentation de la disponibilité en eau ont été notamment réalisées à l'aide de grands projets techniques, comme le National Water Carrier en Israël et le canal du Roi Abdullah en Jordanie. Cette « mission hydraulique » (Reisner 1984) se poursuit encore aujourd'hui avec une série d'installations de désalinisation sur la côte de la Méditerranée. Israël veut ainsi devenir largement indépendant de la disponibilité naturelle en eau, du changement climatique et des autres Etats de la région. Parallèlement, la Banque Mondiale réfléchit à un autre projet d'infrastructure de dimensions encore jamais atteintes, le canal Red Sea - Dead Sea, qui doit fournir de grandes quantités d'eau désalée et empêcher ainsi la poursuite de la baisse du niveau de la Mer Morte. La réflexion sur les causes réelles de la crise hydrique dans la basse vallée du Jourdain, à savoir les prélèvements excessifs à l'amont, est ainsi évitée ou tout du moins repoussée à plus tard.

Il n'est pas sûr qu'une adaptation durable et à long terme au changement climatique soit possible de cette façon. De tels grands projets sont très coûteux, consommateurs d'énergie et non adaptés pour réagir de manière flexible à des changements soudains. Des approches intégrées, combinant plusieurs mesures, apparaissent plus appropriées pour gérer les incertitudes du changement climatique et la vulnérabilité croissante, en combinaison avec d'autres risques, comme des changements politiques, une pénurie énergétique, etc. (Moench et al 2007). Parmi ces approches comptent, par exemple, la réduction de la consommation d'eau agricole et d'autres économies d'eau, en association avec des mesures comme la récupération des eaux (Berliner 2005), l'irrigation supplémentaire (Oweis 2007), la réalimentation des nappes phréatiques et la réutilisation décentralisée des eaux usées (Wolf et al 2007), ainsi que des réallocations d'eau permettant d'augmenter la productivité de l'eau. Dans différents sous-projets, GLOWA JR, tout comme le projet partenaire SMART (<http://www.iwrm-smart.org>) étudie le potentiel de telles mesures et d'autres pistes d'amélioration.

Une priorité du projet GLOWA JR est l'influence de l'utilisation du sol sur la disponibilité et la productivité de l'eau et, par là même, le rôle des écosystèmes en tant qu' « infrastructure hydrologique naturelle ». En

référence au concept de Green-Blue Water<sup>1</sup> de Falkenmark et Rockström (2004), les coûts et les bénéfices de différentes allocations d'eau bleue (eau de surface et eau souterraine) et verte (eau du sol) sont comparés. Selon le mode d'utilisation du sol, l'eau verte produit différents services écosystémiques, qui peuvent être quantifiés à l'aide de la productivité biophysique et économique de l'eau dans chacun des cas. La prise en compte de l'eau verte dans le bilan hydrique régional met en évidence que la disponibilité en eau est beaucoup plus élevée et plus utilisée par l'homme que les indicateurs classiques ne le montrent. Comme l'allocation de l'eau verte dépend de l'utilisation du sol, ceci offre la possibilité de faire de la gestion du sol un élément de la gestion intégrée des ressources en eau (Hoff 2008).

Cela permet aussi une intégration de stratégies d'adaptation au climat et de mitigation. La productivité de l'eau dans le cadre de mesures de boisement est étudiée sur l'exemple de la forêt de Yatir en Israël. Les précipitations annuelles y étant inférieures à 300 mm, du carbone atmosphérique est fixé par la végétation. Des simulations montrent que ce phénomène sera encore possible à l'avenir sous un climat plus sec, car la teneur croissante en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère conduit à une plus grande efficacité de l'utilisation de l'eau (Grünzweig et al 2003) – des bilans carbone complets prenant en compte tous les processus du sol sont toutefois encore à établir.

De premières approches pour une évaluation économique de différents services écosystémiques, comme le pâturage et le tourisme (Fleischer et al 2006), sont actuellement étendues à d'autres utilisations du sol et de l'eau (verte et bleue) dans le cadre du projet GLOWA JR, afin de pouvoir comparer en détail différentes options de gestion.

Comme toute la région MENA est confrontée à des problèmes d'eau similaires à ceux de la région du Jourdain, la transposabilité des résultats du projet GLOWA JR doit être étudiée dans une prochaine étape. En général, la gestion intégrée de l'eau et du sol peut largement contribuer à l'adaptation au climat et à la mitigation. Pour cela il faut par exemple clarifier dans quelle mesure un arrêt de la dégradation du sol est possible dans les zones marginales de la région et dans des conditions climatiques plus sèches. Dans l'idéal avec, en parallèle, une fixation de carbone dans la végétation ou dans le sol et, également, autant que possible, la production d'aliments et de bioénergie.

Afin de mettre à disposition des informations utilisables, les résultats du projet GLOWA JR doivent être combinés à ceux d'autres projets et institutions de la

---

<sup>1</sup> L'"eau verte" est l'eau de pluie se trouvant dans le sol, qui retourne dans l'atmosphère via évaporation (non-productive) ou transpiration (productive). L'eau bleue est en revanche l'eau des plans d'eau de surface et des nappes souterraines classiquement appréhendée.

région et rendus accessibles en concertation avec les décideurs.

Le projet GLOWA Jordan River (<http://www.glowa-jordan-river.de>) est coordonné par l'Université de Tübingen.



## Bibliographie

- Allan J.A. (2001): *The Middle East Water Question*, Tauris Publishers, New York
- Berliner P. (2005): *Runoff Agroforestry*, in: *Advances in Water Science Methodologies*, Aswathanarayana U. (ed), Balkema Publishers, The Netherlands
- Bruins H.J., Evenari M., Nessler U. (1986): *Rainwater harvesting agriculture for food production in arid zones: the challenge of the African famine*, *Applied Geography*, 6, 13-32
- Chapagain A.K, Hoekstra A.Y. (2004): *Water footprints of nations*, Value of Water, Research Report Series No. 16, IHE, Delft, the Netherlands
- CA (2007): *Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, Water for Food, Water for Life, Earthscan, London, UK
- Evenari M., Shanan L., Tadmor N. (1972): *The Negev: The Challenge of a Desert*, Blackwell
- Falkenmark M., Rockström J. 2004: *Balancing Water for Humans and Nature*, Earthscan, London, UK
- Fleischer A., Sternberg M. (2006): *The economic impact of global climate change on Mediterranean rangeland ecosystems*, *Ecological Economics*, 59, 287-295
- Giorgi F., Lionello P. (2008): *Climate change projections for the Mediterranean region*, *Global and Planetary Change*, in press
- Grünzweig J.M., Lin T., Rotenberg E., Schwartz A., Yakir D. (2003): *Carbon sequestration in arid-land forest*, *Global Change Biology* 9, 791-799
- Haim, D., Shechter, M., Berliner, P. (2008) *Assessing the impact of climate change on representative field crops in Israeli agriculture: A case study of wheat and cotton*, *Climatic Change*, 86, 425–440, (DOI 10.1007/s10584-007-9304-x)
- Hoff H. (2008): *Challenges in upland watershed management: the green-blue water approach*, in: Dinar A., Garrido A. (editors): *Managing water resources in a time of global change: mountains, valleys and flood plains*, Routledge, Oxford UK
- Köchy M., Mathaj M., Jeltsch F., Malkinson D. (2008): *Resilience of stocking capacity to changing climate in arid to Mediterranean landscapes*, *Reg Environ Change*, 8:73–87
- Kunstmann H., Suppan P., Heckl A., Rimmer A. (2007) 'Regional climate change in the Middle East and impact on hydrology in the Upper Jordan catchment', IAHS publication 313, *Quantification and reduction of predictive uncertainty for sustainable water resources management*, 141-149
- Menzel L., Teichert E., Weiss M. (2007) 'Climate change impact on the water resources of the semi-arid Jordan region', in: Heinonen, M. (Ed.): *Proc. 3rd, International Conference on Climate and Water*, 3-6 September 2007, Helsinki, Finland, 320 - 325
- Moench M., Stapleton S. (2007): *Water, Climate, Risk and Adaptation*, Working Paper of the Co-operative Programme on Water and Climate, Delft, The Netherlands
- Oweis T., Ali A., Rashid M., El-Naggar S., Abdul Aal A. (2007): *Water harvesting options in the drylands at different spatial scales*, *Land Use and Water Resources Research*, 7, 1-13
- Reisner M. (1984): *Cadillac Desert*, Penguin Books
- Wolf L., Hötzl H., Ali W., Werz H. (2007): *Exploring the potential of Managed Aquifer Recharge to mitigate water scarcity in the Lower Jordan River within an IWRM approach*, abstract for ISMAR Symposium, Nara, Japan
- WWDR (2006): *World Water Development Report 2, Water a Shared Responsibility*, UNESCO, Paris, France

## Contact

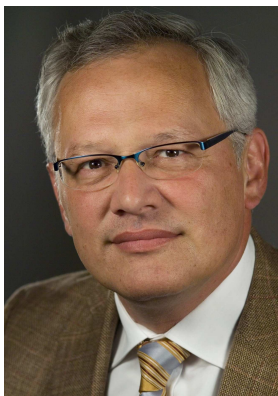
Holger Hoff  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

Téléphone +49 (0) 331 288 2541  
E-mail [hhoff@pik-potsdam.de](mailto:hhoff@pik-potsdam.de)

# Alliance internationale de recherche sur l'eau en Saxe : Coopération de recherche sur l'utilisation optimale des res- sources en eau dans le contexte du changement climatique

**Prof. Dr Georg Teutsch, Directeur du Centre Helmholtz de recherche environnementale - UFZ**

Le Professeur Georg Teutsch a étudié la géologie et l'hydrogéologie aux universités de Tübingen et Birmingham. Il a acquis son diplôme en hydrogéologie (M.Sc.). Pendant plusieurs années, il a travaillé comme scientifique pour les deux universités ainsi qu'à Riyad, en Arabie Saoudite. De 1984 à 1986, il a mené sa thèse à Tübingen et été promu docteur en 1988 à l'Université de Stuttgart. Il a ensuite travaillé comme professeur de géohydrologie à Stuttgart et Tübingen, avant de devenir Directeur du Centre de géosciences appliquées de l'Université de Tübingen. Depuis 2004, le Prof. Teutsch est directeur scientifique du Centre Helmholtz de recherche environnementale



(UFZ) à Leipzig et vice-président de la communauté Helmholtz. De plus, le Prof. Teutsch est membre de différents comités, dont le Conseil pour le développement durable du Gouvernement fédéral, la commission du sénat de la DFG (Agence de moyens pour la recherche allemande) pour la recherche sur l'eau (KOWA), le comité national de la recherche sur le changement global, les conseils d'administration de l'école des mines (TU) de Freiberg et de l'Université de Kassel, de l'Office fédéral de géologie et des matières premières et du PEER (Partnership for European Environmental Research).

En 2002, le sommet des Nations Unies de Johannesburg a adopté les objectifs du millénaire, parmi lesquels celui de réduire de moitié d'ici 2015 le nombre de personnes n'ayant pas accès à de l'eau potable propre et à des installations sanitaires.

Depuis, l'eau devient un facteur de plus en plus limitant pour le développement économique et social. Près d'un milliard de personnes dans le monde vivent sans accès à de l'eau potable saine et plus de 3 milliards sans équipement sanitaire. Cela a des conséquences dramatiques en termes de santé et sur le plan économique. Atteindre cet objectif de l'ONU, c'est-à-dire diviser ces chiffres par deux, est un réel défi, compte tenu de la poursuite de la forte croissance démographique, de la progression de l'urbanisation et des impacts du changement climatique. Les obstacles à surmonter sont de nature variée : si le problème principal dans les « vieilles » nations industrialisées des régions tempérées, ainsi que dans les pays émergents en expansion des régions sub-humides, est la mauvaise qualité chimique et écologique des eaux, en revanche, le plus gros obstacle dans les régions semi-arides à arides du globe est

la pénurie des ressources en eau. Certes, les problèmes ne sont pas nouveaux, mais la compréhension du système reste encore incomplète et il manque des méthodes pour les résoudre.

Compte tenu de la situation, environ 40 scientifiques du Centre Helmholtz de recherche environnementale et de l'Université Technique de Dresde se sont associés à l'entreprise d'assainissement urbain de Dresde (membre du German Water Partnership – GWP) et à d'autres partenaires de la recherche, de l'économie

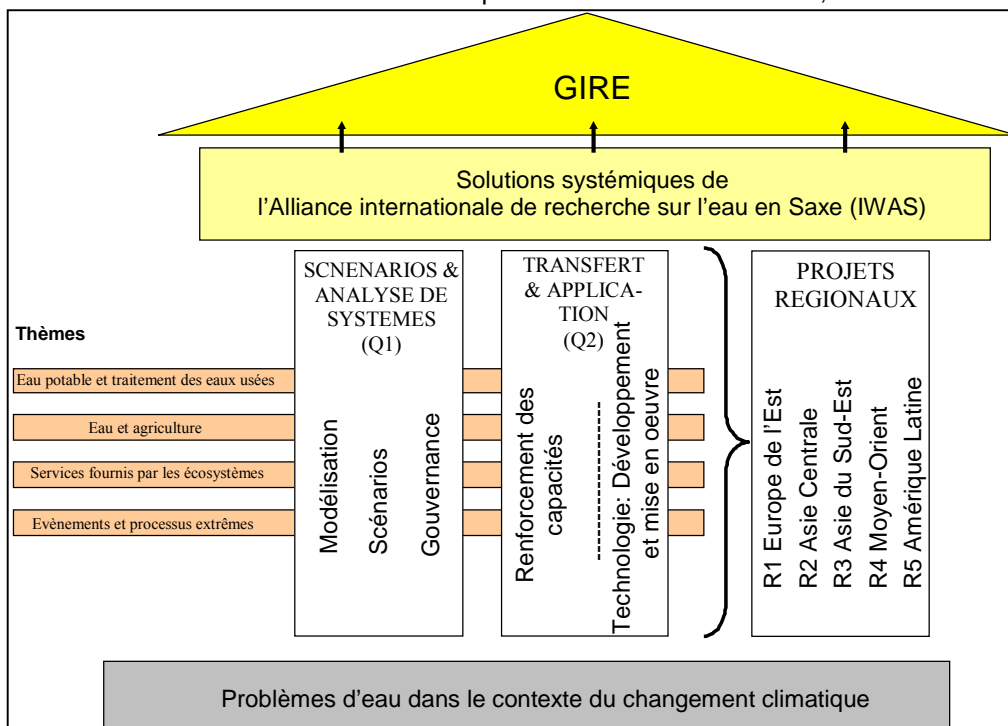


Figure 1 : Approche du projet IWAS

et de la politique, en Allemagne et au niveau international. Ensemble, ils travaillent au sein de l' « Alliance internationale de recherche sur l'eau en Saxe » (IWAS) pour combattre les problèmes d'eau les plus urgents dans cinq régions du monde. Grâce à un soutien de l'Etat fédéral à hauteur de 7,5 millions d'euros, dans le cadre du programme « recherche de pointe et innovations dans les nouveaux Länder », des solutions systémiques adéquates sont développées pour chacun des problèmes. Les questions traitées sont, par exemple :

- la sécurité de l'approvisionnement en eau et du traitement des eaux usées,
- les événements et les processus extrêmes, comme les sécheresses plus fréquentes et l'extension des zones arides,
- les services fournis par les écosystèmes, comme la fonction de filtration de nos sols, ainsi que
- les problèmes relatifs à l'eau générés par l'agriculture irriguée.

Chaque région étudiée a son propre profil : l'Europe de l'Est est en net retard en ce qui concerne l'infrastructure de distribution d'eau et de traitement des eaux usées et se voit confrontée, comme l'Allemagne de l'Est après la chute du mur, à des processus de changement massifs. L'emploi excessif de produits chimiques dans l'agriculture

et l'excès d'engrais conduisent à une forte contamination du fleuve frontalier Bug, à la frontière entre la Pologne et l'Ukraine. Celui-ci est soumis, notamment parce qu'il se jette dans la Mer Baltique, à des normes de qualité européennes. A partir des expériences acquises en Allemagne de l'Est au cours de 20 dernières années, des approches peuvent être développées pour soutenir, par un transfert de savoir-faire, la transition des anciennes républiques soviétiques vers une économie de marché.

L'actuel climat aride continental de l'Asie centrale va se renforcer à cause des effets du changement climatique, et l'industrialisation encore à venir de cette région va la placer devant des problèmes d'efficacité d'utilisation, de répartition et de protection des ressources en eau encore plus graves que ceux ren-

contrés aujourd'hui. La Mongolie – représentative du point de vue scientifique pour toute la région – joue, pour ainsi dire, un rôle de « laboratoire » pour l'approfondissement des connaissances systémiques, qui sert de base à l'élaboration de concepts de gestion intégrée de l'eau.

Au Vietnam et au Brésil, les deux régions-pilotes dans les zones subhumides d'Asie du Sud-Est et d'Amérique Latine, des approches durables d'approvisionnement en eau, qui s'appuient davantage sur les réserves d'eau souterraines en raison de la pollution croissante des eaux de surface, sont nécessaires pour les métropoles en forte expansion que sont Hanoi et Brasilia. Dans ce domaine, l'Allemagne apporte des expériences solides, étant donné que son approvisionnement en eau potable repose à 80% sur l'eau souterraine.

L'utilisation d'eau souterraine joue également un rôle important dans les pays modèles arides du Moyen-Orient, d'Oman et de l'Arabie Saoudite. Une détermination précise de la partie renouvelable de la disponibilité

en eau souterraine est nécessaire pour garantir son utilisation durable. En effet, l'eau souterraine, en grande partie fossile et donc non renouvelable, représente dans ces pays la seule source d'eau potable significative.

L'utilisation

efficace de la ressource limitée en eau, notamment dans l'agriculture, qui représente 90% de la consommation, est un pré-requis pour le développement à long terme de cette région, par ailleurs très compétitive sur le plan économique.

Grâce à l'étude des régions à problèmes hydriques et à l'élaboration de solutions adaptées à chaque lieu dans les 5 régions modèles, ainsi qu'à l'implication d'entreprises locales, le projet de recherche IWAS associe la recherche fondamentale au développement économique. En tenant compte des différentes structures socio-politiques et en se basant sur une connaissance solide des systèmes, des modèles et scénarios sont développés, de même que les technologies nécessaires au fonctionnement durable des

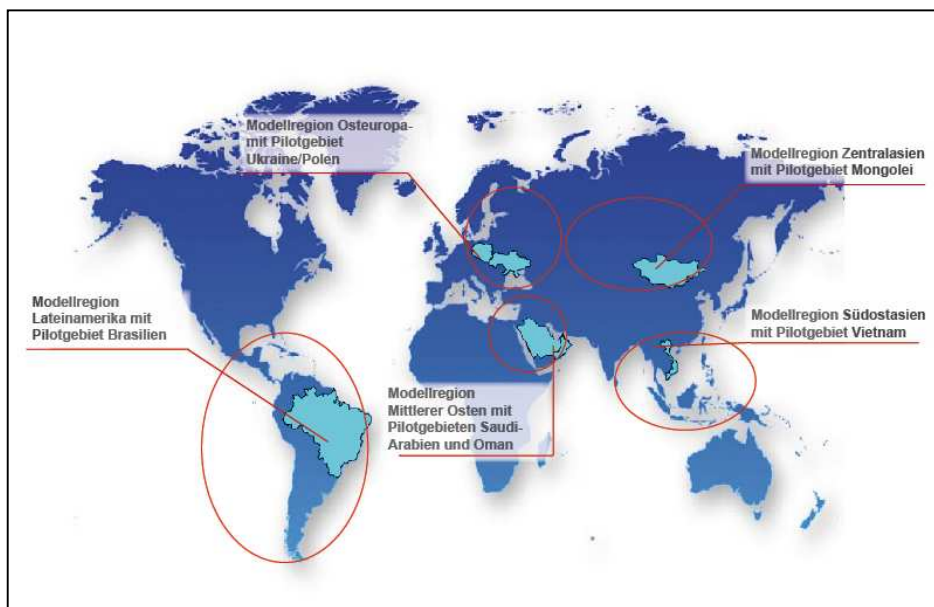


Figure 2 : régions-modèles d'IWAS

concepts de gestion. La durabilité des projets régionaux est assurée grâce à la coopération avec des acteurs locaux et par un renforcement correspondant des capacités. Des modèles complets pour l'analyse de différents scénarios sont développés dans une approche interrégionale. Les démarches de gestion et les technologies intègrent chacune la possibilité d'une transposition à des régions semblables. Ainsi, le projet IWAS fournit des approches de solutions ciblées pour une gestion intégrée de la ressource en eau (GIRE) et contribue à l'atteinte des objectifs du millénaire de l'ONU.

Dans le cadre du projet, initialement prévu pour 2,5 ans, les participants travaillent dans un champ de recherche large, mais qui ne peut pas être exhaustif sur cette durée. Ces travaux doivent constituer la base d'une initiative à long terme. Comme la recherche allemande sur l'eau est actuellement encore très

fragmentée, l'UFZ et ses partenaires de recherche se sont aperçus que la consolidation de la recherche sur l'eau en Allemagne passe par une concentration des compétences. C'est pourquoi, l'UFZ prévoit, au-delà de la « première phase » du projet IWAS, une mise en réseau intensive d'autres partenaires d'excellence de la recherche et de la gestion de l'eau. Ainsi, la coopération des meilleurs cerveaux du secteur de l'eau sera possible et des synergies émergeront, qui serviront désormais de base pour des contributions allemandes à la résolution de problèmes hydriques cruciaux, à l'échelle nationale et internationale.

En siégeant à Leipzig, l'initiative renforce non seulement la recherche allemande sur l'eau au niveau international, mais aussi le Land de Saxe comme site économique au sein des nouveaux Länder.

## Contact

Prof. Dr. Georg Teutsch  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Halle-Leipzig

Téléphone +49 (0) 341 235 1800  
E-mail [gf@ufz.de](mailto:gf@ufz.de)



## Quand l'eau se réchauffe...

**Prof. Dr. Ulrich Sommer, Professeur d'océanographie biologique à l'Institut Leibniz de sciences marines de l'Université de Kiel**

*Ulrich Sommer a effectué sa thèse en 1977 en tant que biologiste à l'Université de Vienne, où il a travaillé jusqu'en 1979 comme post-doctorant. En 1979, il a commencé à travailler comme assistant scientifique à l'Institut de limnologie de l'Université de Constance, où il est devenu professeur de limnologie en 1985. Entre 1985 et 1991, il a travaillé à l'Institut Max Planck de limnologie et a été nommé, en 1991, professeur à l'Institut de chimie et de biologie marines nouvellement créé à l'Université d'Oldenbourg. Cette nomination s'est accompagnée d'un passage de*

*la limnologie à l'océanographie biologique. En 1994, Ulrich Sommer est devenu professeur d'océanographie biologique à l'Institut Leibniz de sciences marines à l'Université de Kiel (IFM-GEOMAR). Depuis 2004, il coordonne le programme prioritaire de la DFG, AQUASHIFT. Comme limnologue aussi bien que comme chercheur en sciences marines, il s'est intéressé en première ligne aux schémas de succession saisonniers et aux relations de concurrence et d'alimentation au sein du plancton.*

Les conséquences du changement climatique peuvent d'ores et déjà être étudiées dans les mers, les lacs et les rivières. Les moindres modifications au sein des chaînes alimentaires ont des effets importants sur les écosystèmes.

Presque personne ne doute encore que le climat sur Terre va se réchauffer. Seule l'ampleur du réchauffement reste encore inconnue. En même temps, la possibilité et l'efficacité d'une maîtrise des émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre sont vivement discutées. Pour l'Europe centrale, les climatologues prévoient un réchauffement pouvant atteindre 5 °C en un siècle. Cependant, l'augmentation des températures pourrait être beaucoup plus forte pendant les mois d'hiver. Bien sûr, ce réchauffement terrestre concernera également les eaux.



Figure 1 : Installation expérimentale de l'Université Ludwig-Maximilian de Munich sur le lac Brunnsee. Les chercheurs sont sur les traces du réchauffement de l'« écosystème eau » à l'aide de méthodes expérimentales.

Le changement climatique se fait déjà de plus en plus sentir dans l'eau. Ainsi, les températures moyennes en Mer du Nord, près de Helgoland, ont augmenté de 1,1°C au cours des 40 dernières an-

nées. Même si cette évolution n'est qu'un début, les conséquences du réchauffement ne peuvent plus être ignorées. Qu'il s'agisse de l'eau ou de la terre ferme, la plupart des réactions biologiques vont de pair avec un début précoce des phases de croissance et d'activité des êtres vivants ou sont liées à une propagation plus large des organismes thermophiles vers les pôles.

Devons-nous nous faire du souci face à de telles transformations ? Après tout, les plans d'eau locaux sont des habitats particulièrement tempérés qu'un réchauffement en hiver rendrait encore plus tempérés. Quels troubles pourraient se manifester si des événements, comme la floraison printanière du phytoplancton, c'est-à-dire des algues microscopiques qui flottent dans l'eau, intervenaient quelques semaines plus tôt que d'habitude ? Une période de croissance prolongée peut-elle vraiment être préjudiciable ? Ces questions sont au centre du programme de recherche prioritaire AQUASHIFT de l'agence de moyens pour la recherche allemande (DFG) – « The impact of climate variability on aquatic ecosystems: Match and mismatch resulting from shifts in seasonality and distribution ».

Le point de départ de toutes les études est l'hypothèse « Match-Mismatch » de l'ichtyologiste anglais David H. Cushing, qui cherche à expliquer les différences entre la taille des populations de poissons des différentes générations. D'après Cushing, la phase critique dans le développement d'une génération de poissons commence quand les larves ont mangé leur sac vitellin et commencent à s'alimenter dans le milieu. Pour beaucoup d'espèces de poissons marins, les larves Nauplius des copépodes (petits crustacés planctoniques à pattes en forme de rames) constituent la principale nourriture. Si les nauplius se développent trop tard, une grande partie des larves de poissons meurt de faim. Le même problème se manifeste si les nauplius grandissent trop vite et deviennent trop grands pour que les larves puissent les manger. Ainsi, une génération de pois-

sons ne peut bien se développer que si une quantité suffisante de nauplius est disponible au bon moment. Cet exemple de Cushing ne montre cependant qu'une possibilité parmi d'autres. Sous un climat aux saisons marquées, la plupart des organismes suivent des schémas saisonniers dans leur activité, leur croissance et leur reproduction. Le besoin particulier en nourriture lors des phases sensibles de développement est notamment limité, la plupart du temps, à des périodes relativement courtes et est ainsi adapté aux variations saisonnières de leurs sources d'alimentation.

Les cycles saisonniers et le rapport entre prédateur et proie peuvent se décaler si les conditions climatiques changent. Ainsi, la concordance (« match ») entre l'offre et la demande, existant jusqu'à présent, serait perdue (« mismatch »). Un tel décalage peut intervenir à chaque maillon de la chaîne alimentaire et avoir des conséquences importantes, notamment pour les organismes situés tout en haut de la chaîne, comme les poissons. Ce décalage serait ainsi le talon d'Achille des écosystèmes. L'identification de tels points sensibles dans les écosystèmes aquatiques est l'objectif prioritaire d'AQUASHIFT. Les études prennent aussi bien en compte les mers, que les lacs et les cours d'eau. Les sous-projets de ce programme de recherche prioritaire sont menés sur 17 sites répartis dans toute l'Allemagne.



Photo : Lengfellner

Figure 2 : Larve Nauplius d'un copépode.

Un exemple d'un tel talon d'Achille a déjà pu être trouvé dans les installations expérimentales de l'Institut Leibniz de sciences marines de Kiel. Un événement caractéristique au cours du cycle annuel dans la Baltique est la floraison printanière du phytoplancton, qui constitue la base de l'alimentation du zooplancton et, par là même, des poissons. Le moment de la floraison printanière n'est que faiblement influencé par une augmentation de la température de l'eau. Un réchauffement d'un degré Celsius entraîne une accélération d'environ un jour. D'autre part, l'éclosion des larves Nauplius hors des œufs de copépodes après l'hibernation s'accélère d'environ 9 jours par degré. De plus, la composition en espèces du phytoplancton change : les diatomées de grande

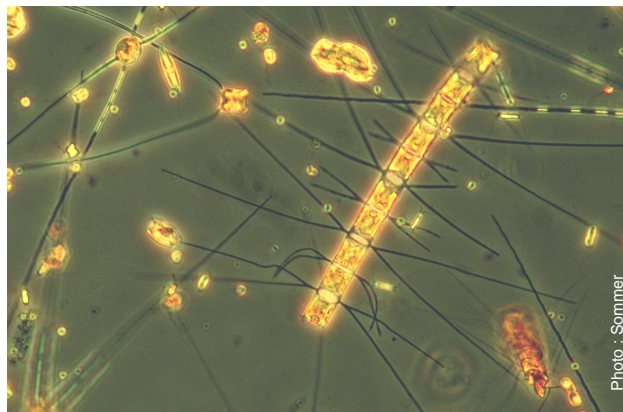


Photo : Sommer

Figure : Les diatomées, de grande taille, dominent le phytoplancton qui fleurit au printemps. C'est ce dernier qui sert de nourriture de base aux crustacés.

taille disparaissent au profit de petits flagellés. Cependant, ces derniers sont difficilement consommables pour les copépodes.

Suite à un réchauffement de 4 et de 6 °C, les larves de Nauplius ont éclos avant la floraison printanière du phytoplancton, car celui-ci a dû encore attendre un accroissement de la luminosité, nécessaire pour déclencher sa croissance. Bilan : si, lors d'un réchauffement accru, les périodes d'offre alimentaire maximale et de besoin alimentaire maximal des larves Nauplius divergent de plus en plus et si la composition de la nourriture devient de pire en pire, le transfert de matière et d'énergie dans la chaîne alimentaire peut être fondamentalement perturbé. Or, si les Nauplius meurent de faim, alors les larves de poissons n'ont rien à manger non plus.



Photo : Saage

Figure 4 : Les petits crustacés de seulement 1 mm avec leurs antennes prononcées sont mangés par les petits poissons.

Un cas intéressant de décalage dans les réseaux alimentaires lié au changement climatique a été mis en évidence dans le barrage-réservoir de Saidenbach en Saxe. Les années caractérisées par un réchauffement rapide de l'eau en mai, les perches adultes ont le choix, en mai et en juin, entre les nymphes de grands chironomides souvent fortement pigmentées et des alevins de leur propre espèce, de



taille semblable aux nymphes. Les jeunes perches de seulement 17 mm environ sont toutefois transparentes et donc moins visibles que les nymphes de chironomides. Les perches adultes préfèrent ainsi les nymphes de chironomides et les jeunes perches sont par conséquent moins menacées. Les années présentant un hiver chaud suivi d'un printemps relativement froid, les nymphes de chironomides et les alevins de perche n'apparaissent pas en même temps. Sans proie alternative, les perches adultes mangent leurs propres descendants, ce qui conduit à une génération réduite de perches.



Photo : Kathol

*Figure 5 : Récipients d'essai dans la station rhénane de l'Institut de zoologie de l'Université de Cologne. Les chercheurs du projet « AQUASHIFT » cherchent à expliquer comment les chaînes alimentaires dans le Rhin se transforment sous l'influence d'un réchauffement croissant.*

Reste à savoir si des adaptations dues à l'évolution au sein des espèces déjà existantes ou l'introduction de nouvelles espèces de zooplancton avec des cycles mieux adaptés peuvent combler cette lacune. Une telle arrivée de nouvelles espèces pourrait être considérée comme « constructive », car des espèces moins adaptées sont remplacées par d'autres, mieux adaptées. Ceci peut participer au maintien des fonctions de l'écosystème.

Malheureusement, les expériences des dernières années montrent que toutes les apparitions de nouvelles espèces dans un écosystème ne sont pas « constructives ». Il existe aussi un nombre croissant d'invasions destructives, ayant parfois des conséquences dramatiques, comme le montre le cas de *Mnemiopsis leidyi* (Cténophore). Cette espèce a été introduite dans la Mer Noire et, plus tard, dans la Mer

Caspienne, il y a un peu plus de 20 ans, vraisemblablement par des navires marchands. Non seulement elle fait concurrence aux bancs de poissons pour la nourriture en mangeant le zooplancton, mais elle est également prédatrice des œufs et des larves de poissons. La forte présence de *Mnemiopsis leidyi* en Mer Noire s'est accompagnée d'une réduction des rendements de pêche d'environ 90%. Cependant, il reste encore à éclaircir si c'est *Mnemiopsis leidyi* qui a nuit à ce point aux populations de poissons ou si, au contraire, ce n'est pas la surpêche qui a ouvert la porte à la prolifération en masse de *Mnemiopsis leidyi*. Depuis octobre 2006, cette espèce est aussi présente dans la Mer Baltique. Il faut encore attendre pour voir s'il s'agit d'un phénomène passager ou si des problèmes similaires à ceux de la Mer Noire vont apparaître. Alors qu'une arrivée « constructive » de nouvelles espèces peut être considérée comme une adaptation à l'écosystème, une adaptation au niveau de l'espèce doit s'effectuer – sur le plan de la micro-évolution – au travers de transformations progressives dans le pool de gènes des espèces. Jusqu'à présent, l'idée selon laquelle la micro-évolution était trop lente pour avoir un effet sur les échelles de temps écologiques dominait, au moins chez les organismes pluricellulaires. Entre-temps, cette théorie est controversée et de plus en plus de signes indiquent que les échelles de temps écologique et évolutionnaire se chevauchent. C'est pourquoi des projets concernant l'écologie de l'évolution ont été intégrés au programme prioritaire AQUASHIFT. L'un des organismes modèles dans ces projets est la zostère (*Zostera marina*), organisme-clé dans les systèmes de hauts fonds.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus jusqu'ici montrent surtout qu'une augmentation de la température des eaux a de fortes conséquences, même si la limite mortelle pour les espèces-clés importantes n'est pas franchie. Même au sein des domaines de tolérance de nombreuses espèces, de subtiles décalages dans les interactions entre organismes peuvent conduire à des changements lourds de conséquences pour l'ensemble de l'écosystème. En ces temps de changement climatique, les effets qui en découlent pour les mers, les lacs et les rivières doivent encore être étudiés et expliqués.

La DFG soutient les études menées au sein du programme prioritaire 1161 « AQUASHIFT ».

*Cet article a initialement été publié dans la revue Forschung (1/2008) de l'Agence de moyens pour la recherche allemande (DFG) et repris avec l'aimable autorisation de la DFG.*

## Contact

Prof. Dr. Ulrich Sommer  
IFM-GEOMAR, Kiel

Téléphone +49 (0) 4310 600 4400  
E-mail [usommer@ifm-geomar.de](mailto:usommer@ifm-geomar.de)

# Gérer les risques plutôt que de protéger les villes côtières contre les crues dans le contexte du changement climatique

**Prof. Dr.-Ing. E. Pasche, Professeur et directeur de l'Institut de génie hydraulique de l'Université Technique de Hambourg-Harbourg (TUHH)**

*Erik Pasche, né en 1955, a fait des études de génie civil et obtenu son doctorat en 1981 à l'Université RWTH d'Aix-la-Chapelle, dans le domaine du génie hydraulique écologique. Après un an comme post-doctorant à l'Université de California, Davis, USA, il a été nommé, en 1986, chef du département d'hydro-informatique et, en 1993, fondé de procurement dans l'entreprise de conseil en ingénierie Bjørnsen Beratende Ingenieure GmbH, à Coblenz. En 1998, il a été nommé professeur titulaire de génie hydraulique à la*

*TU Hambourg-Harbourg (TUHH). Depuis, il est enseignant-chercheur dans ce domaine et a établi le nouvel Institut de génie hydraulique à la TUHH, dans lequel 15 collaborateurs scientifiques mènent entre-temps des recherches dans le secteur de la protection des côtes et de l'ingénierie fluviale. La protection contre les crues, la modélisation mathématique des courants et le génie hydraulique écologique comptent parmi les domaines-clés de son travail.*

## Introduction

Il est maintenant certain que les changements climatiques pronostiqués par le rapport 2007 du GIEC vont conduire à un accroissement des événements météorologiques extrêmes. En conséquence, les niveaux d'eau vont augmenter durablement. Grossman et al<sup>1</sup> prévoient, en cas de raz-de-marée, une montée du niveau de la mer pouvant atteindre 85 cm dans l'estuaire de l'Elbe et la baie d'Helgoland, en 2085. Ainsi, à l'avenir, le risque de défaillance des installations de protection des côtes va s'accroître, de sorte que les exigences vis-à-vis de la protection côtière doivent être revues. Cependant, l'élévation des digues est-elle la réponse appropriée au changement climatique ? En raison de l'évolution incertaine du climat, ne faut-il pas plutôt un changement de paradigmes, suite auquel l'arrière-pays des digues ne serait plus considéré comme « sans risque » et ce risque restant géré grâce à des mesures d'adaptation flexibles et évolutives ?

Dans le cadre de l'initiative RIMAX, soutenue par le Ministère fédéral de l'enseignement et de la recherche (BMBF), la TUHH, en collaboration avec l'Université Hafen City (HCU) de Hambourg et l'entreprise Bjørnsen Beratende Ingenieure GmbH (BCE), a développé une stratégie de protection adaptée pour l'arrière-pays, grâce à laquelle la propagation de l'onde marée doit être évitée en cas de submersion des digues.

Cet article explique cette approche innovante de gestion des risques et cherche à prouver que le changement climatique ne conduit pas seulement à une mise en danger accrue, mais qu'il offre aussi des chances d'amélioration de la qualité de vie en prenant l'eau davantage en compte dans l'aménagement du paysage urbain et le développement des villes.

<sup>1</sup> Grossmann, I., Woth, K., von Storch, H. (2006): Localization of global climate change: Storm surge scenarios for Hamburg in 2030 and 2085, Die Küste, 71, 169-182

La nouvelle stratégie de protection en gestion des risques

L'élément central de la nouvelle stratégie de protection est la construction d'un système de chambres de remplissage formé par des digues internes ordonnées en couches derrière la première ligne de digue. Ainsi, en cas de défaillance de la première ligne de digue, la propagation de l'onde dans l'arrière-pays est empêchée par un système redondant de chambres en cascade (fig. 1).

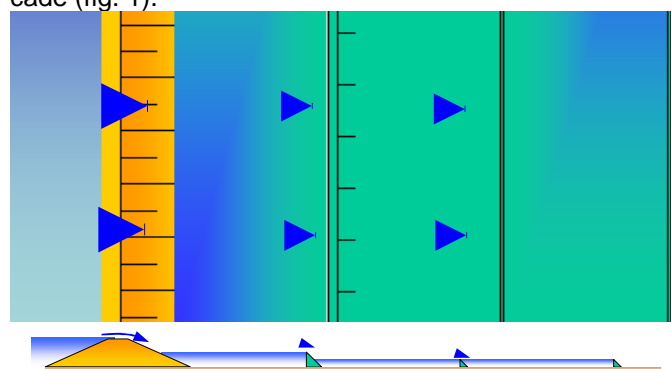


Figure 1 : Principe du système de chambres de remplissage en cascade

L'efficacité des chambres de remplissage dépend de la solidité des digues. Suivant le principe qui consiste à renforcer les digues plutôt que de les surélever, la première ligne de digue est construite pour résister à l'érosion en cas de submersion.

Les digues, jusqu'à présent majoritairement couvertes de gazon sur la face continentale, ne remplissent pas ces exigences. C'est pourquoi la TUHH s'est vu confier par la société Elastogran GmbH de Lemförde (Basse-Saxe) le développement d'un nouveau matériau. Les pierres y sont agglutinées avec du polyuréthane pour former un talus de rive fixé à caractère élastomère. Après durcissement, les pierres forment un matériau composite particulièrement solide et résistant aux courants (fig. 2).





Figure 2 : talus de rive fixé élastomère

Les digues intérieures de moins de 2 mètres de haut peuvent être facilement intégrées dans le paysage. Souvent, il existe encore des résidus d'anciennes digues dites « dormantes ». Les talus et les murs bordant les rues et les chemins peuvent également être utilisés pour former les chambres. Aux points de croisement avec les rues et les places, des installations de protection temporaires sont nécessaires. Il peut notamment s'agir de murs mobiles qui ne requièrent pas d'ancrage dans le sol et peuvent ainsi être rapidement érigés presque partout (fig. 3).

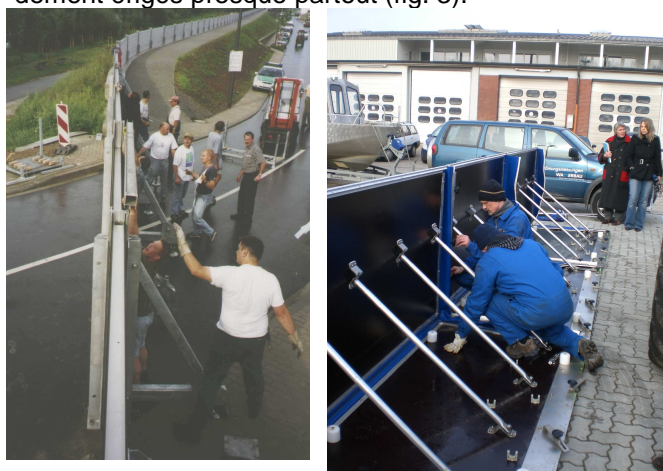


Figure 3 : Murs mobiles utilisés comme éléments de construction des digues intérieures

Le système des chambres de remplissage et les mesures d'adaptation architecturales marquent fortement la structure des villes et nécessitent donc une réglementation de la planification de la construction. L'objectif doit être la compensation des différents dangers de débordement dans les chambres de remplissage en réduisant la vulnérabilité, de sorte que le risque (qui résulte du produit du danger de débordement et de la vulnérabilité) se répartit de manière égale sur l'ensemble de l'arrière-pays des digues (fig. 4). De plus, en comparaison avec la situation sans stratégie de protection, ce risque devrait être nettement réduit, si bien que les habitants de l'arrière-pays gagnent une capacité de résistance (en anglais : resilience capaci-

ty), qui garantit leur survie et un rétablissement rapide à la suite de la crue.

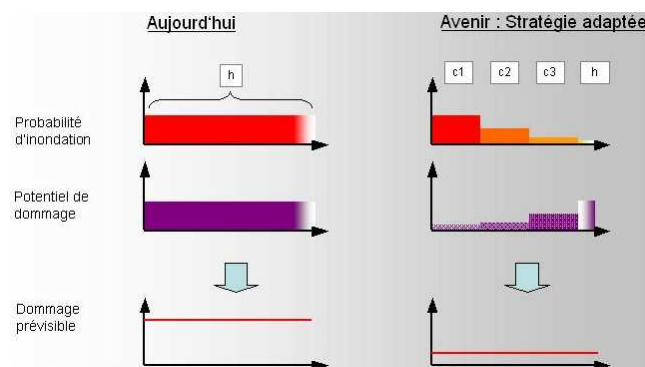


Figure 4 : Répartition du risque dans l'arrière-pays

Il en découle une adaptation de l'aménagement et de l'infrastructure à une possible inondation. Les choix de mesures d'adaptation dépendent de la localisation de l'aménagement au sein du système de chambres. Plus la construction est proche de la première ligne de digues, plus la protection contre l'inondation doit être élevée. Dans les chambres situées directement derrière la première ligne de digues, seules des maisons flottantes ou sur pilotis peuvent être construites à moyen terme. Plus la construction est ancienne, moins l'adaptation peut être forte (fig. 5).



Figure 5 : Principe de la stratégie d'adaptation architecturale dans l'arrière-pays

## Exemple de Wilhelmsbourg/Hambourg

A hauteur de la ville de Hambourg, l'Elbe a formé, suite à des influences morpho-dynamiques, une zone de bifurcation du courant, qui continue d'exister dans ses fondements malgré de nombreuses interventions. La zone comprend les deux bras principaux – Süderelbe et Norderelbe – le Reiherstieg et l'île de Wilhelmsbourg, qui est entourée de ces trois cours d'eau (fig. 6). L'île fait partie de la ville de Hambourg qui va, dans les années à venir, mettre à disposition des logements pour 30.000 à 40.000 habitants, dans le cadre de la stratégie de développement urbain « Saut au-dessus de l'Elbe » (<http://www.sprung-ueber-die-elbe.de>). Bien que l'Elbe y soit éloignée de plus de 100 km de la Mer du Nord, l'amplitude de la marée atteint à cet endroit tout de même 3,5 m. Chaque année, Hambourg est menacée par des inondations. Celle de 1962 a été la plus grave catastrophe de ce type pour Hambourg depuis la deuxième guerre mondiale. Plus de 300 personnes sont mortes noyées, la plupart sur l'île de Wilhelmsbourg. Actuellement, ce

quartier est protégé par une digue circulaire jusqu'à un niveau de l'Elbe de 7,30 m au-dessus du niveau de la Mer du Nord. Ce sont environ 85 cm de plus que le niveau atteint en 1976 lors de la plus haute crue jamais observée. La hauteur de la digue elle-même varie entre 7,70 m et 8,35 m au-dessus du niveau de la mer. Il semble ainsi qu'il y ait actuellement suffisamment de marge pour éviter un débordement des digues. Cependant, si la montée du niveau de la mer prévue par Grossmann<sup>1</sup> intervient, cette marge sera déjà consommée à partir de 2030. A l'horizon 2085, Nehlsen/Wilke<sup>2</sup> pronostiquent un volume de débordement de 15 millions de m<sup>3</sup>, en se basant à la fois sur les tempêtes de référence actuelles et sur la montée du niveau de la mer, estimée à 85 cm. Sans mesures de protection dans l'arrière-pays, presque toute l'île serait recouverte d'eau (fig. 6), une situation observée pour la dernière fois en 1962.

Pour contrecarrer ces effets du changement climatique, la possibilité de l'application du système de chambres de remplissage a été systématiquement étudiée. Comme la digue peut être submergée à presque chaque endroit, le système de chambres doit s'étendre de manière circulaire tout autour de l'île ou bien une rigole de collecte doit être créée derrière les digues. Les canaux et les voies d'eau déjà existants peuvent être avantageusement utilisés pour la propagation de l'eau dans les chambres.

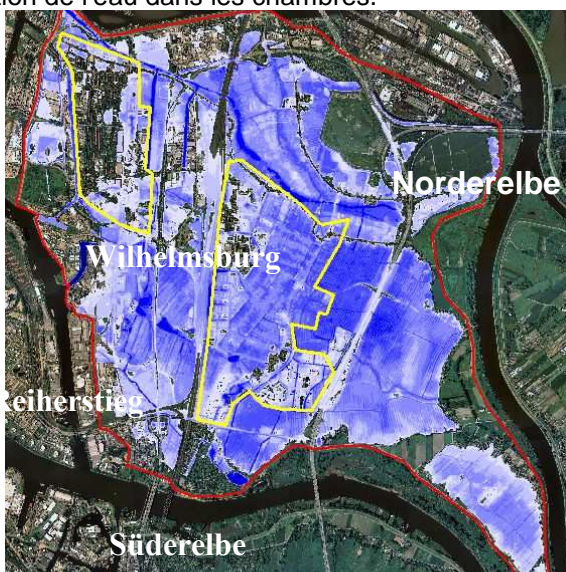


Figure 6 : Situation d'inondation à l'horizon 2085

En tenant compte de conditions locales d'altitude et d'utilisation, Nehlsen/Wilke<sup>2</sup> ont développé un système de cascade à plusieurs couches (fig. 7). Chaque couleur représente un niveau de priorité de submersion. Les différentes chambres peuvent être créées à l'aide de simples digues de terre, de murs ou de systèmes

de murs d'urgence mobiles. Les hauteurs des ouvrages se limitent à 2 m maximum. De cette manière, un espace de retenue de plus de 15 millions de m<sup>3</sup> peut être créé, de sorte que la totalité de l'eau qui déborde selon le scénario de Nehlsen/Wilke<sup>2</sup> à l'horizon 2085 peut être recueillie. A contrario de la situation sans chambres de remplissage, les quartiers intérieurs de la ville (surfaces entourées de jaune), où les dégâts seraient particulièrement élevés, sont ainsi préservés de l'inondation. Par conséquent, les dommages peuvent être divisés par trois.

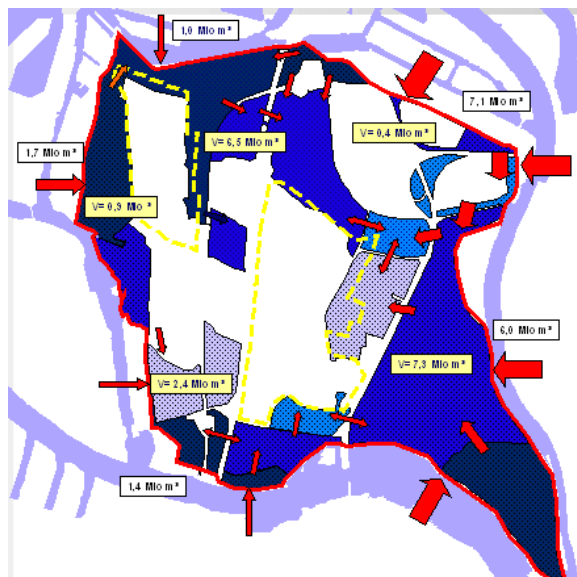


Figure 7 : Un système possible de chambres de remplissage pour Wilhelmsburg selon les hypothèses de Nehlsen/Wilke<sup>2</sup>

D'autres réductions de dommages peuvent être atteintes grâce à l'adaptation de l'aménagement dans les chambres de remplissage. En cas de hauteurs d'eau inférieures à 1 m, l'aménagement disponible peut être protégé contre la pression de l'eau grâce à des parois mobiles, la fermeture temporaire d'ouvertures des murs et de conduites d'évacuation équipées de vannes mobiles et par étanchéification des murs et des traversées de conduites. En cas de hauteurs d'eau supérieures à 1 m, il faudra accepter une éventuelle submersion, pour des raisons économiques. La réduction des dommages est alors permise par l'utilisation de matériaux résistants à l'eau, le déplacement des installations techniques vers des zones plus élevées et la mobilité des équipements. Dans les zones nouvellement construites et à l'intérieur des premières chambres de débordement, le risque de dommage peut être efficacement réduit par des formes de constructions flottantes ou sur pilotis. Dans ce cadre, les surfaces d'eau et les canaux existants peuvent être avantageusement intégrés dans la conception, voire étendus, afin de renforcer le caractère maritime de Wilhelmsburg.

Ce concept urbain maritime est présenté à titre d'exemple pour le canal d'Aßmann sur la figure 8. Celui-ci doit être restructuré dans le cadre de l'exposition internationale d'architecture (IBA).

<sup>2</sup> Nehlsen, E.; Wilke, M. (2007): Entwicklung eines neuartigen Hochwasserschutzkonzeptes für Hamburg-Wilhelmsburg. Studienarbeit am Institut für Wasserbau der TUHH, non publié



## Acceptance and conclusions

Entre-temps, le concept de chambres de remplissage en cascade a été présenté aux autorités compétentes de la ville de Hambourg. En collaboration avec l'Université HCU, un cycle de réunions d'information et de cours interactifs a eu lieu avec les habitants de Wilhelmsbourg. Après avoir été réservées et sceptiques à l'égard du projet, l'administration et la population y sont maintenant très ouvertes. La société IBA GmbH envisage même de mettre en œuvre prochainement ce concept, dans le cadre d'un nouveau projet d'aménagement qui doit être réalisé d'ici 2013 pour l'exposition internationale d'architecture (IBA).

Outre une réduction des coûts d'environ 30 % par rapport à une élévation supplémentaire des digues, la simplicité technique, la redondance des installations de protection et la bonne intégration urbaine sont particulièrement convaincantes.

De plus, le mélange architectural de « maisons flottantes » (« floating homes »), de maisons amphibies et de constructions sur pilotis conforte le sentiment d'un mode de vie moderne de la société, qui exige plus de qualité à travers une vie urbaine sur et au bord de l'eau.

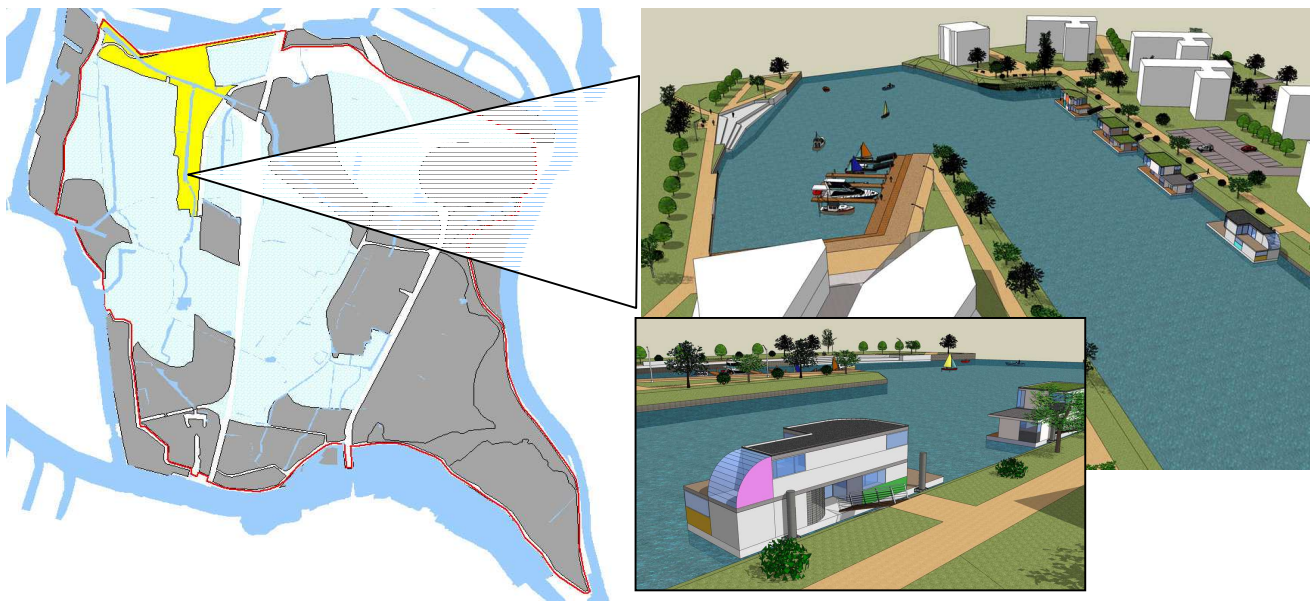


Figure 8 : Chambre de remplissage du canal d'Aßmann avec une adaptation architecturale au paysage urbain maritime

## Contact

Prof. Dr.-Ing. E. Pasche, Dipl.-Ing. G. Ujeyl  
Institut für Wasserbau, TUHH, Hamburg

Téléphone +49 (0) 40 42878 3463  
E-mail [pasche@tuhh.de](mailto:pasche@tuhh.de)