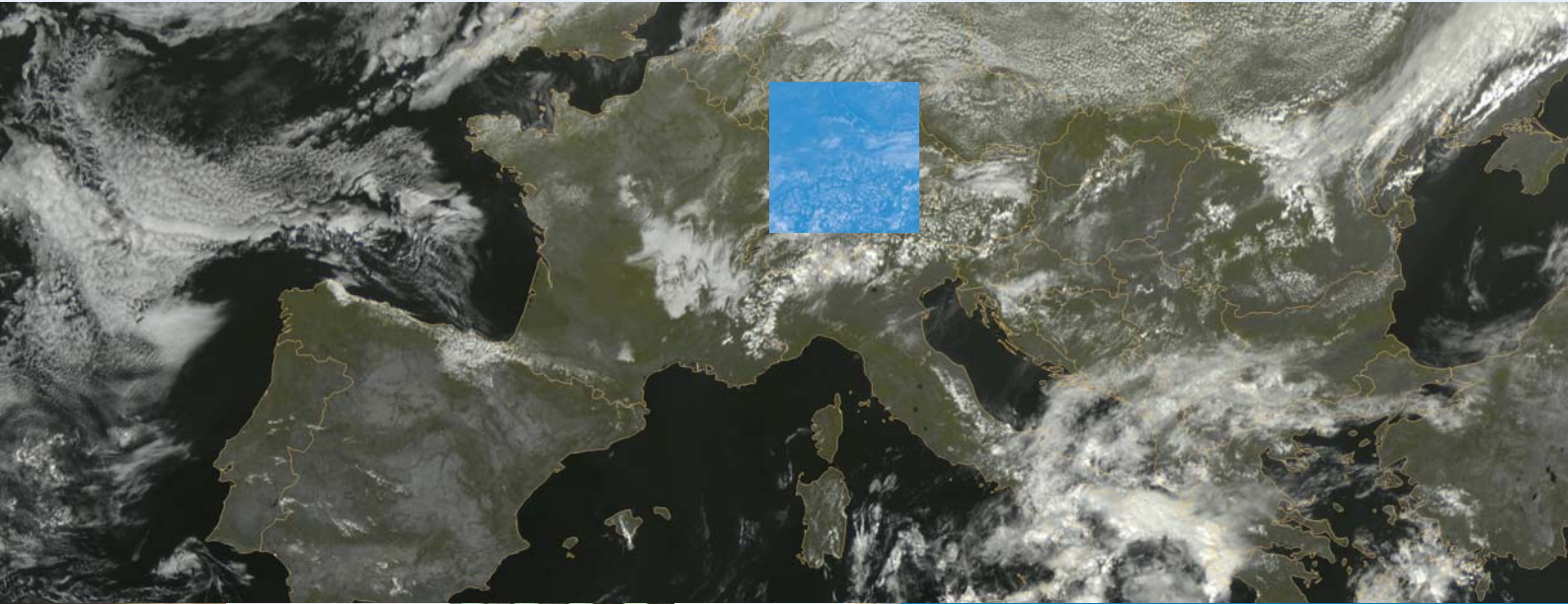
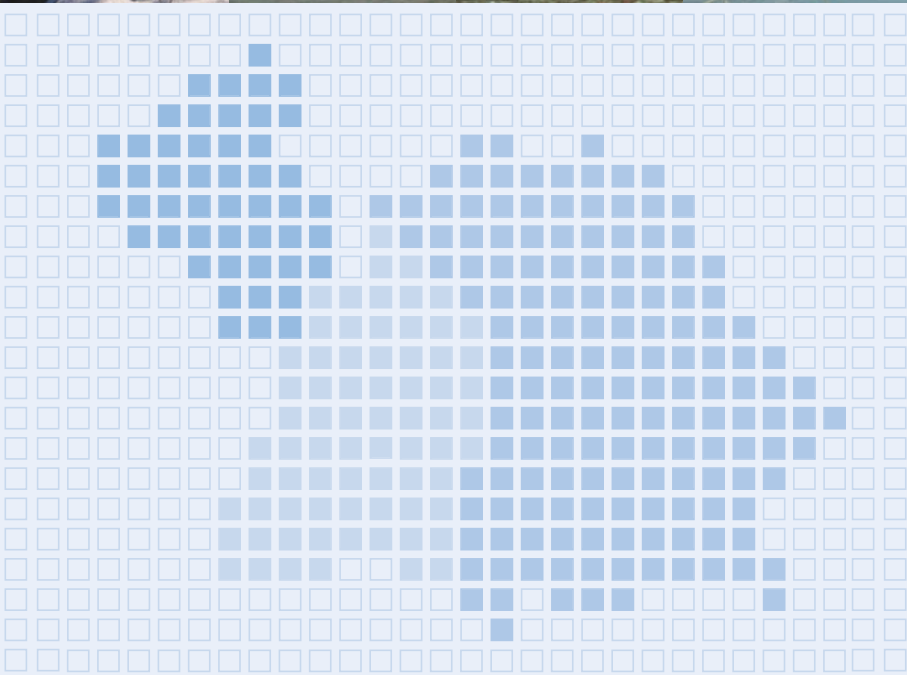


# Les changements climatiques en Allemagne du Sud

## **Ampleur – Conséquences – Stratégies**



### EFFETS SUR LA GESTION DES EAUX



## TABLE DES MATIÈRES

<b>1 LE CLIMAT EST-IL DEVENU FOU ?</b>	<b>4</b>
<b>2 LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES JUSQU'À NOS JOURS</b>	<b>6</b>
<b>3 MODÈLES CLIMATIQUES MONDIAUX ET RÉGIONAUX</b>	<b>8</b>
<b>4 OUTILS DE SIMULATION DES ÉCOULEMENTS</b>	<b>10</b>
<b>5 NOTRE CLIMAT POUR DEMAIN</b>	<b>12</b>
<b>6 RÉACTIONS DES NAPPES PHRÉATIQUES</b>	<b>14</b>
<b>7 LES BASSES EAUX GAGNENT DU TERRAIN</b>	<b>16</b>
<b>8 PROTECTION CONTRE LES CRUES ET LES INONDATIONS / PERSPECTIVE</b>	<b>18/19</b>

### EDITEUR

#### PUBLISHED BY THE

##### **Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz**

[Administration régionale de l'environnement, de la gestion des eaux et de l'inspection du travail et de la main-d'œuvre de Rhénanie-Palatinat]

Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55116 Mainz

Pour le compte du

##### **Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz**

[Ministère de l'environnement, de la forêt et de la défense du consommateur du Land de Rhénanie-Palatinat]

##### **Deutscher Wetterdienst**

[Service allemand de météorologie]

Frankfurter Straße 135

63067 Offenbach

**Date : novembre 2009**

##### **LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg**

[Institut Régional de l'Environnement, des Mesures et de la Protection de la Nature du Bade-Wurtemberg]

Griesbachstraße 1, 76185 Karlsruhe

Pour le compte du

##### **Umweltministerium Baden-Württemberg**

[Ministère de l'environnement du

Bade-Wurtemberg]

La présente brochure est imprimée sans impact sur le climat



**Concept et réalisation :**

ÖkoMedia PR, Stuttgart

##### **Bayerisches Landesamt für Umwelt**

[Ministère de l'environnement du Land de Bavière]  
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg

Pour le compte du

##### **Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit**

[Ministère de l'environnement et de la santé du Land de Bavière]

##### **Informations complémentaires**

[www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)

[www.um.baden-wuerttemberg.de](http://www.um.baden-wuerttemberg.de)

[www.stmug.bayern.de](http://www.stmug.bayern.de)

[www.mufv.rlp.de](http://www.mufv.rlp.de)

[www.lubw.baden-wuerttemberg.de](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de)

[www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

[www.dwd.de](http://www.dwd.de)

[www.luwg.rlp.de](http://www.luwg.rlp.de)



**Tanja Gönner**  
Ministre de l'environnement  
du Land de  
Bade-Wurtemberg



**Dr. Markus Söder**  
Ministre d'Etat de  
l'environnement et de  
la santé du Land de  
Bavière



**Margit Conrad**  
Ministre d'Etat de  
l'environnement, de la  
forêt et de la défense du  
consommateur du Land  
de Rhénanie-Palatinat



**Wolfgang Kusch**  
Président du Service  
allemand de météorologie

## PRÉAMBULE

L'eau est l'un des biens les plus précieux que nous offre la nature. Notre existence est tributaire des ressources en eau. La gestion des eaux a l'énorme responsabilité non seulement de préserver l'existence de l'élément de vie fondamental qu'est l'eau mais également de nous protéger contre les dangers qui peuvent découler de cette eau. Les normes allemandes sont très sévères dans le domaine de la gestion des eaux. Nous protégeons les eaux et améliorons leur qualité partout où cela est nécessaire. Nous disposons de réserves suffisantes d'eau potable de bonne qualité et investissons des millions en matière de protection contre les crues et les inondations.

Le cycle de l'eau se trouve cependant en pleine mutation. Le changement climatique a en effet des conséquences au niveau de notre gestion des eaux. Nous savons désormais qu'en raison de l'effet de serre, la température de la terre connaît à l'échelle mondiale un réchauffement qui va se poursuivre pour longtemps. Il n'est actuellement plus en notre pouvoir d'empêcher cette évolution, mais nous nous devons de tout faire pour maintenir l'ampleur de ces changements dans des limites maîtrisables par une politique de protection climatique volontaire et efficace.

Suite au changement climatique, nous devons nous adapter à une multiplication des phénomènes météorologiques extrêmes. Toutes les prévisions dans ce domaine indiquent en effet que nous devrions assister dans l'avenir non seulement à une fréquence accrue des fortes précipitations mais encore à une augmentation des épisodes caniculaires et des périodes de sécheresse. Autant de phénomènes qui signifient que la gestion des eaux doit se conformer à ces nouvelles conditions et trouver des moyens d'adaptation à ces changements.

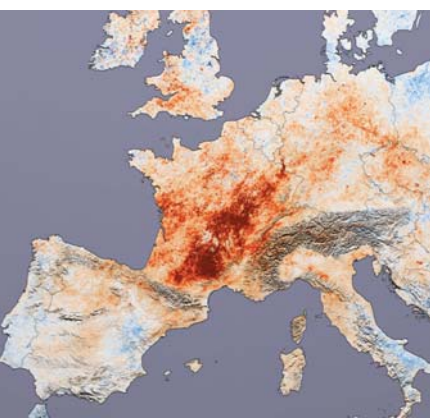
Grâce à KLIWA, il nous est aujourd'hui possible de faire des prévisions sur les répercussions du changement climatique au niveau des crues et des inondations, des basses eaux et des nappes phréatiques. Il existe bien entendu une certaine marge d'incertitude. Parvenir à une estimation exacte des points équivoques et préparer correctement le terrain aux changements à venir constituent deux défis majeurs. Mais un travail de base est également nécessaire. Quels seront les effets du changement climatique sur la qualité de l'eau de nos ruisseaux, de nos rivières et de nos fleuves ? Et quelles sont, le cas échéant, les adaptations nécessaires ?

Une protection climatique cohérente au niveau mondial, national et régional peut nous permettre de maintenir les effets du changement climatique dans des limites raisonnables. Il est essentiel de réduire au maximum les émissions de gaz à effets de serre. Il est urgent de réagir par des mesures d'adaptation aux répercussions que nous savons désormais inévitables. Ceci signifie en clair qu'il est urgent de préparer le plus efficacement possible les systèmes sensibles au climat pour les changements à venir. Il faut pour cela augmenter la capacité d'adaptation des écosystèmes, diminuer la vulnérabilité des systèmes et élargir de manière conséquente nos connaissances actuelles sur le changement climatique et ses répercussions. Le projet de coopération KLIWA apporte une pierre importante à cet édifice.



# Prolifération des événements météorologiques extrêmes: **le climat est-il devenu fou ?**

Les phénomènes météorologiques extrêmes ont fortement augmenté dans nos latitudes à partir des années 1990 : c'est ainsi que l'Europe a connu en 2003 pendant plusieurs semaines une canicule avec des températures jusqu'à 40 °C et que la région des Préalpes a été victime en août 2005 de graves inondations suite à une période de pluies ininterrompues. A l'hiver 2007/2008, en partie marqué par des températures clémentes, ont succédé les sévères gelées de l'année 2008/2009 – ce qui n'a pas empêché l'année 2008 de compter parmi les dix années les plus chaudes depuis le début des relevés climatiques. Cette accumulation est-elle l'effet du hasard ou un signe que le changement climatique est déjà pleinement en marche ?



La canicule de l'été 2003 - la vague de grosse chaleur qui a sévi dans le centre de l'Europe (et tout particulièrement dans les régions marquées en rouge)

## ... OU S'AGIT-IL SIMPLEMENT DE PIROUETTES CLIMATIQUES TOUT À FAIT NORMALES ?

Le climat de la terre a toujours été soumis à des fluctuations naturelles au cours des millions d'années de son histoire. C'est ainsi que l'Europe a connu un climat tropical à certaines périodes, tandis qu'elle s'est trouvée à d'autres écrasée sous une épaisse carapace de glace. Les carottes de sédiment et les analyses de pollen fournissent des indications sur les différentes fluctuations climatiques traversées dans le passé par notre planète. Les données météorologiques font, depuis 1860, l'objet d'enregistrements réguliers dont l'analyse permet de constater que la température moyenne mondiale a connu au cours de ces 150 dernières années une élévation d'environ 1 °C. Ce chiffre, qui peut sembler dérisoire, est en réalité inquiétant si l'on tient compte du fait que pendant la dernière période glaciaire la température de la terre n'était que de 4 à 5 °C inférieure à celle que nous connaissons aujourd'hui.

## UNE TERRE SOUMISE À L'EFFET DE SERRE

Nous devons l'agréable température moyenne globale de +15°C qui est la nôtre à l'effet de serre atmosphérique naturel. Les gaz de traçage – vapeur d'eau, dioxyde de carbone et méthane – présents dans l'atmosphère agissent comme les vitres d'une serre : ils laissent passer les rayons solaires à ondes courtes et repoussent en partie les rayonnements de chaleur à ondes longues. On les appelle pour cela des gaz à effets de serre. Sans ces effets de serre naturels, la température moyenne serait de -18 °C, un niveau hostile au développement de la vie.

Depuis le début de l'ère industrielle, la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère, qui se maintenait au cours des siècles précédents à un niveau relativement constant de 280 ppm (parts per million), a enregistré une hausse et se situe désormais à 385 ppm. Cet effet de serre provoqué par les activités humaines a une influence à niveau non seulement mondial mais également régional sur la gestion de l'eau.

## LE PROJET KLIWA

Les situations météorologiques extrêmes et les crues et inondations auxquelles nous avons assisté au cours de ces dernières années sont-elles les signes avant-coureurs du changement climatique ? Comment va se manifester chez nous le changement tant au niveau climatique qu'en ce qui concerne la gestion des eaux ? Et comment devons-nous réagir à ces problèmes ?

C'est pour étudier cette question que les Länder de Bade-Wurtemberg et de Bavière ainsi que le Service allemand de météorologie ont, en décembre 1998, mis en place le projet de coopération KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Soit, en Français „Changement climatique et conséquences pour la gestion des eaux“). Le Land de Rhénanie-Palatinat est également partenaire du projet KLIWA depuis 2007.

Cette coopération territoriale et interdisciplinaire a pour objectif de déterminer les répercussions possibles du changement climatique sur la gestion des eaux sur les bassins versants de l'Allemagne du Sud, d'en montrer les conséquences et de faire des recommandations.

Le projet KLIWA est d'ores et déjà en mesure de présenter des résultats. L'analyse des historiques de mesure météorologiques et hydrologiques en Allemagne du Sud a permis de mettre en évidence un certain nombre de tendances. Sur la base de ces données a été ensuite mis en place un travail de prévision du climat futur, par le biais de différentes projections climatiques régionales sur la période allant de 2021 à 2050. Les données climatiques prévisionnelles ont "alimenté" des modèles plus spécifiques utilisés pour la gestion des eaux dans différents bassins versants. Les études réalisées portent sur les points suivants : crues et inondations, nappes phréatiques, basses eaux, érosion des sols et qualité de l'eau. Un certain nombre de recommandations d'action concrètes ont déjà pu être formulées.

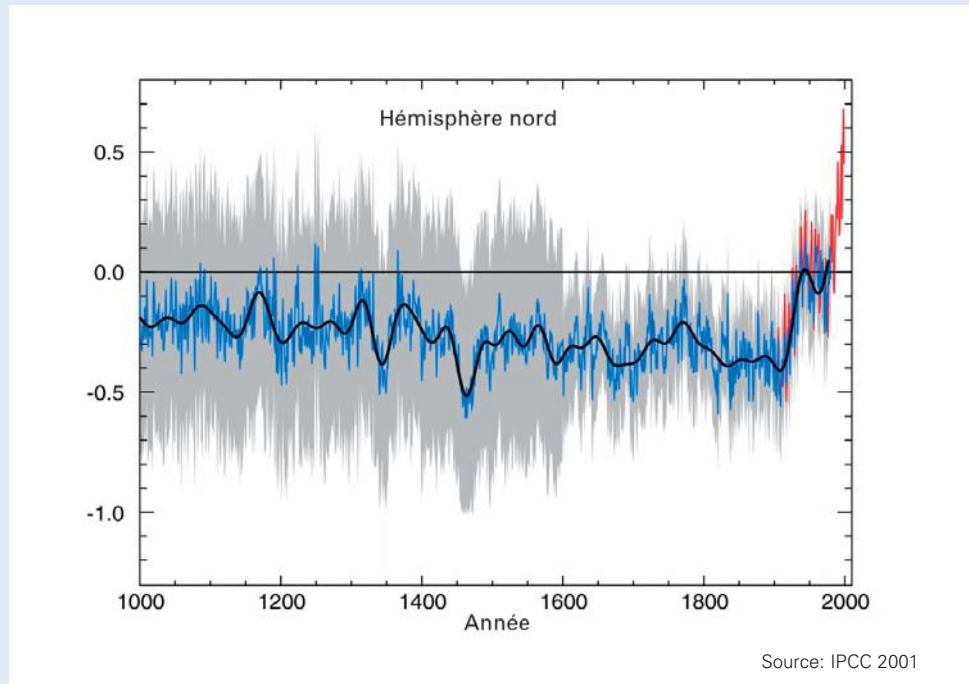
## KLIWA SUR LE WEB

Pour obtenir de plus amples informations sur le projet KLIWA, veuillez consulter la page d'accueil du site [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de). Dans la rubrique des téléchargements, vous pouvez accéder à une série complète de rapports et de publications concernant les résultats et les méthodes de travail.



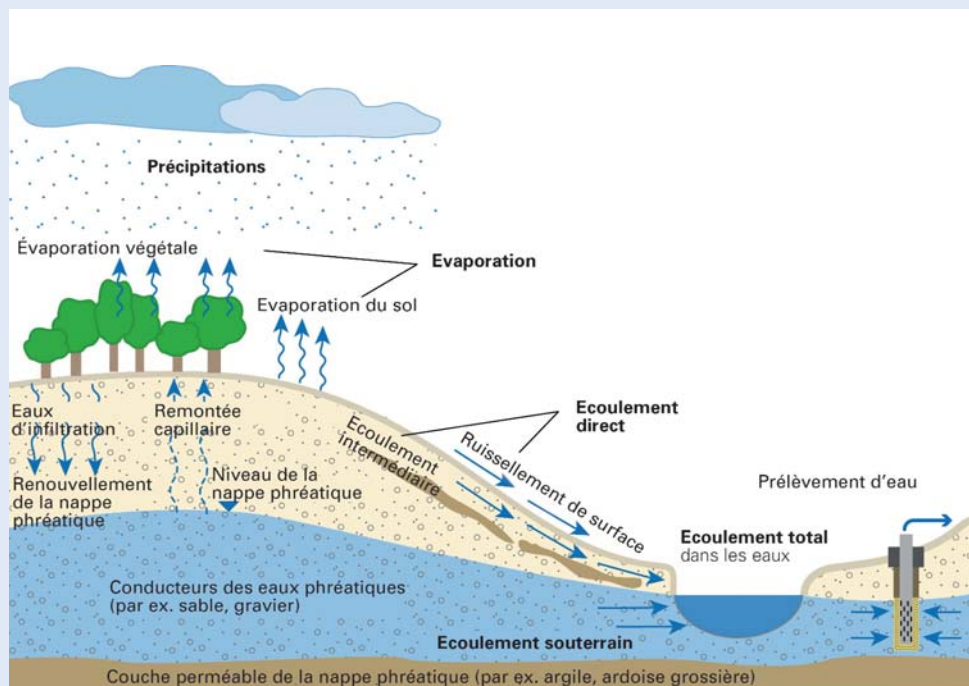
### EVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS L'HÉMISPHERE NORD

Le graphique montre la différence de la température annuelle moyenne par rapport à la température moyenne sur la période 1961–1990. Une nette tendance au réchauffement climatique s'est amorcée au début du 20ème siècle dans l'hémisphère nord. Cette tendance a connu une très nette accélération au cours de ces dernières décennies.



### LE CYCLE DE L'EAU

La surface de la terre est recouverte aux deux tiers d'eau. Une partie de cette eau circule selon un cycle puissant à la surface du globe terrestre sous forme de vapeur, de liquide ou de glace. L'eau qui s'évapore de la surface de la terre se condense en altitude pour former des nuages puis retombe sous forme de précipitations – pluie ou neige – sur la terre. Ces précipitations s'écoulent en cours d'eau ou s'infiltrent dans le sol, contribuant ainsi au renouvellement des nappes phréatiques. Mais la majeure partie de l'eau s'évapore à nouveau. Le changement climatique modifie ce cycle de l'eau.





# Au cœur des préoccupations de KLIWA: les changements climatiques jusqu'à nos jours

**Le changement climatique n'est pas une vue de l'esprit mais une réalité en marche de longue date – même chez-nous. Pour appréhender l'évolution du climat jusqu'à nos jours, il est dans un premier temps nécessaire de procéder à une analyse des données historiques. L'étude de nombreuses séries de mesures sur de longues périodes permet de déterminer l'ampleur naturelle des fluctuations des valeurs météorologiques ainsi que les tendances. Plus de 350 stations météorologiques et une centaine de stations de jaugeage en Allemagne du Sud ont fait l'objet d'études dans le cadre de KLIWA.**



*Le recul du glacier dû au réchauffement est nettement visible au sommet de la montagne.*

## LA TEMPÉRATURE MONTE

La température annuelle moyenne en Allemagne du Sud a connu une hausse de 0,8 à 1,3°C sur la période de 1931 à 2005, la plus forte hausse du siècle dernier ayant été enregistrée à partir des années 90.

On a constaté une augmentation de la température plus importante au cours des mois d'hiver (de novembre à avril) que lors des mois d'été.

## LE NOËL BLANC – UN SOUVENIR D'ENFANCE

Qui dit hiver doux dit hiver à neige peu abondante. Les mesures réalisées sur de nombreuses années montrent également à ce niveau une tendance très nette, en particulier dans les régions en basse altitude, situées moins de 300 m au-dessus du niveau de la mer et dans les régions occidentales, où la durée de la couverture neigeuse a diminué de 30 à 40 pour cent à partir des années 1951/52 dans les régions de moyenne altitude. Ce n'est que sur les hauteurs que l'on a enregistré un enneigement important et parfois même supérieur à ceux du passé. Or, l'enneigement constitue une donnée importante en matière de gestion des eaux, notamment en ce qui concerne l'acheminement de l'eau vers le réseau fluvial et le renouvellement de la nappe phréatique.

## ÉTÉS SECS, HIVERS PLUVIEUX

La pluviosité annuelle est restée à peu près constante dans la plupart des régions au cours de la période examinée. C'est au niveau de la répartition des précipitations que l'on constate des changements : les mois d'hiver sont plus humides, tandis que les mois d'été sont plus secs.

C'est ainsi par exemple que la pluviosité a augmenté – en particulier en hiver – de près de 35 pour cent dans certaines régions. Ce phénomène est tout particulièrement sensible en Forêt noire et dans le Nord-Ouest du Bade-

Wurtemberg, en Franconie et dans certaines parties de la Forêt bavaroise pour le Land de Bavière ainsi que dans le massif de l'Eifel et du Westerwald pour le Land de Rhénanie-Palatinat.

## LE FLUX DÉPRESSIONNAIRE D'OUEST: LE TEMPS QUI APPORTE LA PLUIE

Les précipitations accrues de l'hiver sont dues à la recrudescence de certaines situations météorologiques de grande ampleur en Europe. Une analyse des séries chronologiques réalisées de 1881 à 2004 a permis de constater que les courants circulaires zonaux étaient particulièrement fréquents pendant les mois de décembre à février. La situation météorologique de grande ampleur la plus importante sur le plan de l'hydrologie est le „flux d'Ouest dépressionnaire”, généré par l'anticyclone des Açores et par la dépression d'Islande. Ce courant prend naissance dans l'Atlantique pour atteindre l'Europe occidentale et y apporter des précipitations souvent abondantes – généralement sous forme de pluie sur les régions à basse altitude en raison de l'air plus doux venu de la mer. Les situations météorologiques zonales de grande échelle sont également responsables des violentes tempêtes hivernales. La tempête „Lothar”, qui a causé des dégâts à travers toute l'Europe en décembre 1999 et, plus récemment, les tempêtes „Kyrill” et « Emma », survenues respectivement en janvier 2007 et au début mars 2008, en sont de tristes exemples.

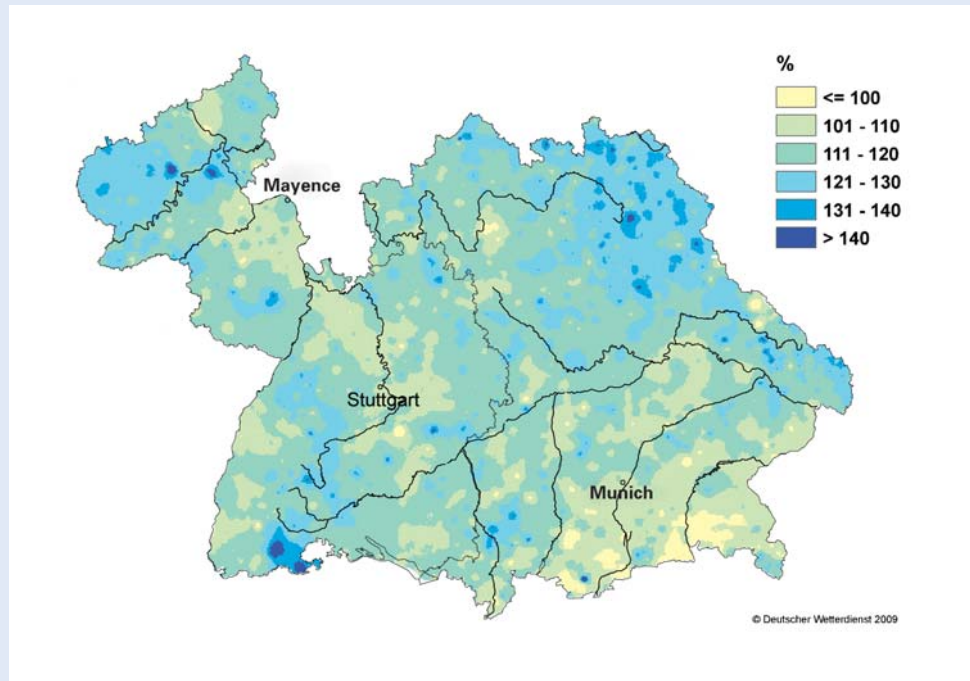
## OÙ S'ÉCOULE TOUTE CETTE PLUIE ?

Les séries chronologiques pluriannuelles réalisées sur un certain nombre de stations hydro-métriques montrent que le nombre des crues et des inondations a augmenté au cours de ces 30 dernières années dans les Lander de Bade-Wurtemberg, de Bavière et de Rhénanie-Palatinat, et plus particulièrement en hiver.



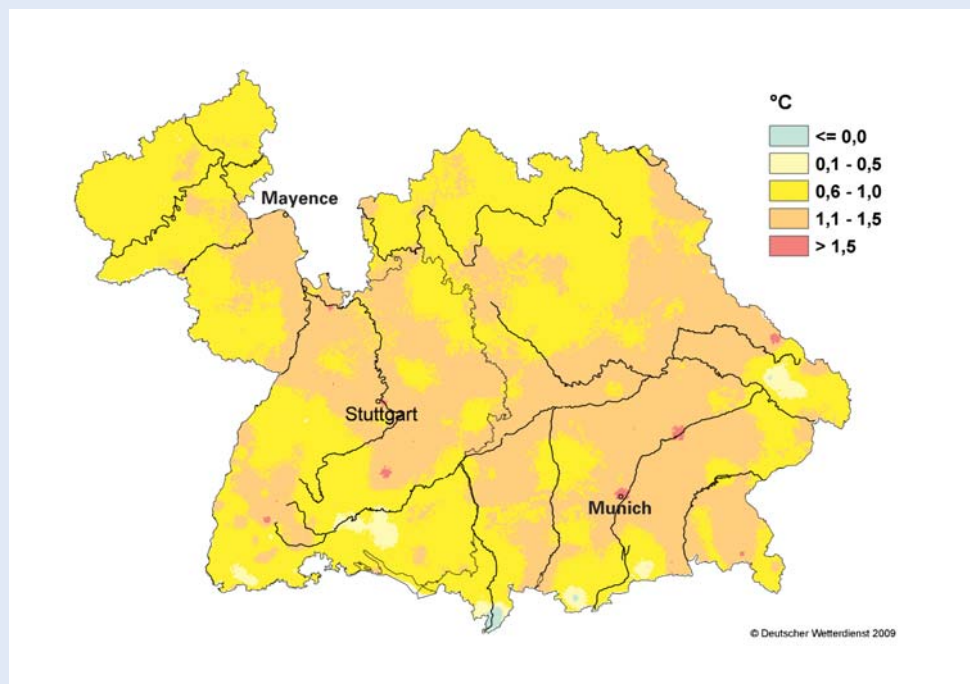
### AUGMENTATION DES PRÉCIPITATIONS HIVERNALES

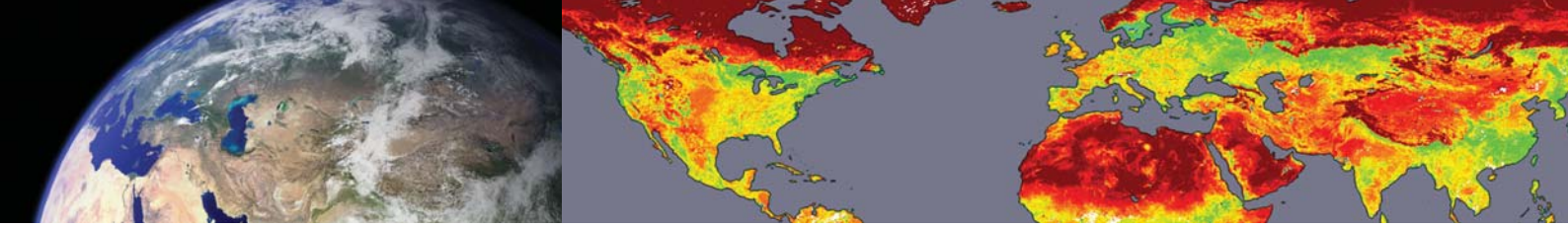
Le graphique montre le niveau moyen des précipitations pendant les mois d'hiver (de décembre à février) de 1978/1979 à 2007/2008 par rapport aux moyennes observées sur la période de 1931 à 1960.



### AUGMENTATION DE LA TEMPÉRATURE EN HIVER

Le graphique montre l'évolution des températures moyennes pendant les mois d'hiver (de décembre à février) de 1978/1979 à 2007/2008 par rapport aux moyennes observées sur la période de 1931 à 1960.





# Instruments de recherche climatique: modèles mondiaux et régionaux

**C'est désormais un fait avéré : le changement climatique est en route. Même des mesures de protection climatique rapides et efficaces seraient désormais impuissantes à empêcher la mutation climatique qui se prépare car les émissions d'oxydes de carbone actuelles feront effet pendant plusieurs décennies encore, contribuant ainsi au réchauffement. En supposant que nous réduisions dès aujourd'hui à zéro nos émissions - hypothèse utopique étant donné les énormes besoins énergétiques mondiaux actuels – le processus de changement climatique poursuivrait malgré tout son cours, inexorablement.**

## LE TEMPS – UNE CONSÉ- QUENCE DU CLIMAT

... mais pas seulement ; les caractéristiques de la surface terrestre exercent également une influence sur le climat

### Quelques exemples:

- L'Europe, qui bénéficie d'un climat relativement chaud par rapport à son degré de latitude, doit la douceur de son climat à la présence du Gulfstream, un courant marin chaud.
- Les surfaces enneigées et glacées contribuent à refroidir le climat car elles reflètent la lumière solaire.
- Les pluies qui tombent sur les régions forestières s'évaporent en grande partie tandis que les pluies qui touchent les surfaces imperméables, comme par exemples celles des villes, s'écoulent essentiellement par les réseaux d'assainissement.

## MODÈLES CLIMATIQUES MONDIAUX

La prévision météorologique est un art difficile. Lequel d'entre nous n'a pas un jour organisé une excursion sur la foi d'une prévision météo annonçant un soleil radieux, pour se retrouver en fin de compte sous une pluie battante ? Les moyens dont nous disposons actuellement ne nous permettent pas de faire des prévisions météorologiques fiables au-delà de 5 à 7 jours au maximum. Les prévisions à long terme du climat de la terre constituent une tâche mille fois plus complexe, car elles exigent la prise en compte d'un grand nombre de paramètres et de données qui influent les uns sur les autres. L'étude aboutit à un volume d'informations pratiquement ingérable, qui exige une puissance de calcul absolument gigantesque dont seuls les ordinateurs les plus performants disposent.

Les modèles climatiques mondiaux s'appuient sur un modèle atmosphérique que viennent compléter des modèles océan, neige, glace et végétation. Les influences anthropogènes (le « facteur humain ») sont prises en compte par les différents scénarii « Intergovernmental Panel on Climate Change » (IPCC). Pour réaliser un modèle climatique global, la terre est découpée en différentes trames. La puissance de calcul des ordinateurs actuels permet de traiter pour le moment une largeur de trame d'environ 150 km. Si l'on tient compte à la fois de la variabilité des évolutions prévisibles de la population humaine, de la croissance économique, de la consommation d'énergie, etc., et des incertitudes concernant les modèles, les différents résultats obtenus – par exemple pour la température ou les précipitations – se situent à l'intérieur d'une certaine plage. Les calculs nous permettent de prévoir que la température globale devrait enregistrer une hausse de 1,1 à 6,4 °C d'ici 2100.

## LE SOUCI DU DÉTAIL - LES MODÈLES CLIMATIQUES RÉGIONAUX

La trame d'un modèle climatique mondial est trop imprécise pour réaliser une prévision climatique régionale. Les différentes particularités topographiques telles que par exemple les chaînes de montagne ou les vallées fluviales « passeraient littéralement à travers les grilles » du modèle. Nous ne disposons cependant pas encore à l'heure actuelle d'une méthode optimale permettant d'effectuer, à partir de modèles climatiques mondiaux, des projections climatiques régionales présentant la résolution en échelle micro météorologique indispensable.

## DÉDUCTIONS ISSUES DE PROJEC- TIONS CLIMATIQUES RÉGIONALES

Il existe différents types de modèles, avec toutefois un certain nombre de points faibles. Des travaux de recherche intensifs sont encore nécessaires dans ce domaine :

- une méthode statistique (par ex. STAR, WETTREG)
- Des modèles climatiques dynamiques (par ex. REMO, CLM)

En ce qui concerne le domaine KLIWA, différentes projections climatiques régionales sont disponibles sur la base des modèles globaux ECHAM 4 et ECHAM 5. KLIWA a opté pour les projections suivantes :

- WETTREG-2003/B2
- WETTREG-2006/A1B

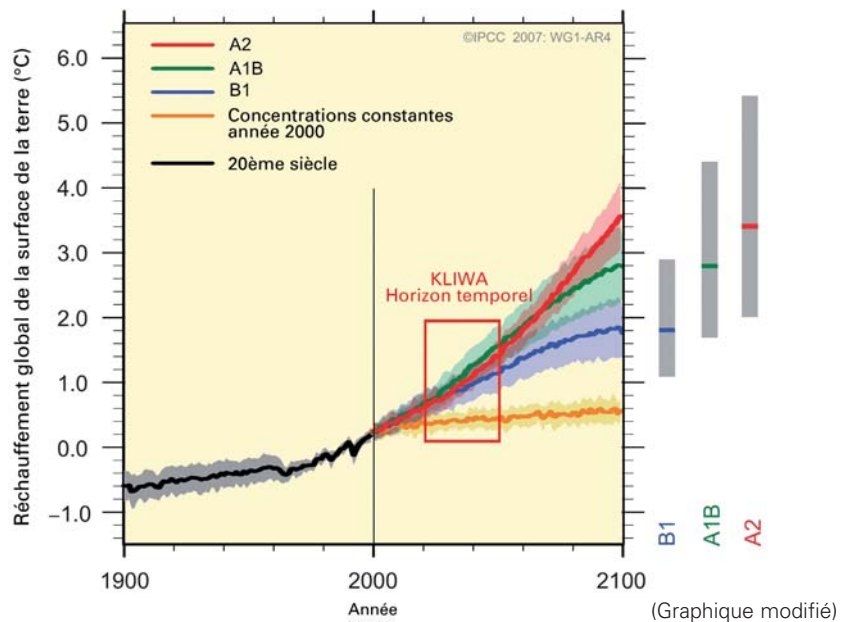
Une comparaison des différentes données climatiques entre les périodes 1971-2000 et 2021-2050 permet d'appréhender l'ampleur des changements climatiques.



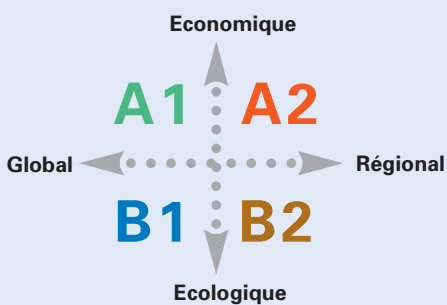
## RÉCHAUFFEMENT GLOBAL DE LA SURFACE DE LA TERRE

Les résultats des modélisations élaborées sur la base des scénarii d'émissions par l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - en Français : Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) – confirment la forte probabilité d'un réchauffement global de notre planète.

Pour les simulations au niveau régional, c'est le scénario d'émissions A1B (ligne verte), moins modéré, qui a été retenu comme climat possible pour demain. Le scénario A1B fait partie de la famille de scénarii A1; pour ce qui concerne le développement technologique dans le domaine de l'énergie, la spécificité du scénario porte sur une exploitation raisonnable des combustibles fossiles et non fossiles.



(Graphique modifié)



- A1** Un monde de croissance économique rapide et l'introduction rapide de nouvelles technologies performantes.
- A2** Un monde hétérogène attaché aux valeurs traditionnelles.
- B1** Monde se détournant du matérialisme avec introduction de technologies propres..
- B2** Un monde qui privilégie les solutions locales pour un développement économique et écologique durable.



# Modèles hydrologiques : outils de simulations des écoulements

Pour comprendre les changements survenus au niveau des composantes hydrologiques du cycle de l'eau - en particulier l'augmentation des écoulements en période de crue – ou la modification de l'écoulement des basses eaux due au changement climatique en Allemagne du Sud, il convient d'« alimenter » des modèles hydrologiques à haute résolution avec les résultats obtenus à partir de modèles climatiques régionaux.



Les risques d'inondation augmentent dans le Sud de l'Allemagne, et tout particulièrement pendant la saison hivernale, en raison des hivers de plus en plus chauds.

## UN QUADRILLAGE DES BASSINS VERSANTS

Les modèles hydrologiques simulent les répartitions spatiales et temporelles des principales composantes hydrologiques que sont les précipitations, l'évaporation, la percolation à travers les sols, les réserves d'eau et les écoulements. Ce calcul permet de représenter et d'évaluer les répercussions du changement climatique sur l'ensemble du système „gestion des eaux“. Les modèles hydrologiques décrivent notamment les processus hydrologiques suivants dans un maillage carré de 1 x 1 km, : évaporation, accumulation, condensation ou fonte des neiges, emmagasinement dans les eaux souterraines, acheminement vers les cours d'eau et retenues dans les lacs.

Possibilités d'application des modèles hydrologiques :

- Estimation des répercussions des changements environnementaux – tels que par ex. les changements possibles en matière de climat ou d'occupation des sols – sur la gestion des eaux (écoulement, infiltration et évaporation),
- Prévision opérationnelle en temps réel des débits en basses, moyennes et hautes eaux. Ce service constitue un outil de gestion du risque pour améliorer notamment la prévention en matière d'inondation (prévision des crues, alertes précoces)
- Établissement de bilans hydrauliques régionaux sur la base des bassins hydrographiques conformément à la directive cadre européenne sur l'eau.

- Mise à disposition de grandeurs d'entrée hydrologiques pour les modèles de qualité des eaux et les modèles des eaux souterraines (par ex. pour la température et les teneurs en oxygène, la recharge des nappes phréatiques, etc.)

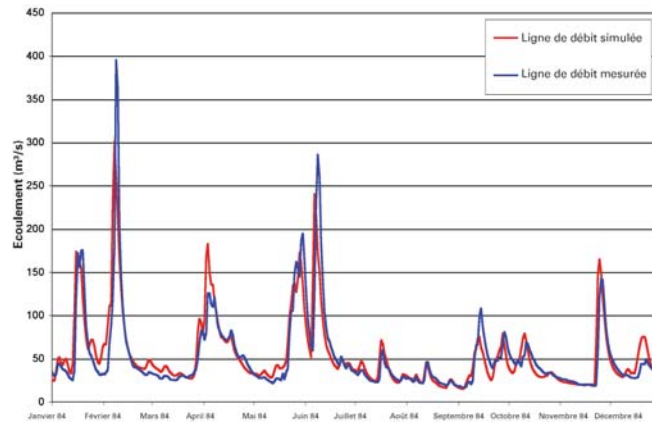
## LE MODÈLE HYDROLOGIQUE TOOLBOX

Les effets du changement climatique sur la gestion des eaux dans les bassins versants dans KLIWA ont été simulés à l'aide de modèles hydrologiques dans un maillage carré de 1 x 1 km. L'objectif principal de KLIWA était d'examiner la problématique de l'aggravation des crues et des inondations suite à un changement climatique. Les études sur les basses eaux sont aujourd'hui au cœur des préoccupations de KLIWA. C'est dans ce cadre que sont calculés pour les bassins hydrographiques dans KLIWA les écoulements journaliers actuels et futurs. Des modèles spéciaux de gestion des ressources en eaux du sol seront utilisés à titre complémentaire pour déterminer le renouvellement de la nappe phréatique.



### COURBE D'ÉVOLUTION DU RÉGIME HYDROGRAPHIQUE

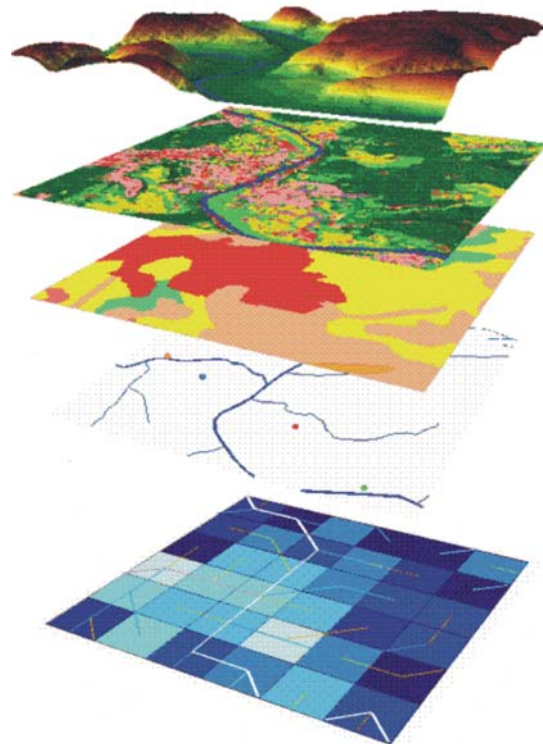
Exemple de comparaison entre une ligne de débit mesurée et une ligne de débit simulée avec un modèle hydrologique pour l'année 1984.



### BASES DE DONNÉES DES MODÈLES HYDROLOGIQUES

La base sur laquelle s'appuie l'élaboration de modèles hydrologiques (sigle allemand WHM - Wasserhaushaltsmodelle) est constituée par de nombreux ensembles de données numériques (entre autres : modèle numérique de terrain, classification par satellite de l'occupation des sols, caractéristiques des sols, réseau hydrographique). Jusqu'à 16 occupations du sol différentes ainsi que les caractéristiques d'évaporation et d'écoulement sont établis pour chaque élément du quadrillage WHM.

- Modèle numérique de terrain 30 x 30 m
- occupation du sol 10 x 30 m
- caractéristiques du sol
- Réseau hydrographique
- maillage





# Simulations à l'horizon 2021–2050: Quel climat pour demain

Différents modèles climatiques sont mis en œuvre pour la prévision du futur. Les projections climatiques utilisées aboutissent à une certaine plage de valeurs pour les températures et les précipitations. Les résultats de la simulation régionale 2021-2050 présentent certes quelques divergences, mais la tendance générale va cependant dans une même direction : les hivers seront plus chauds et plus humides, tandis que les étés seront plus secs.



*Suite aux changements climatiques, les pommiers fleuriront dans certaines régions avec jusqu'à deux semaines d'avance.*

## PLUTÔT CHAUD ET MOINS DE GELÉES

Les simulations climatiques prévoient des hausses moyennes de température de 0,8 à 1,7°C d'ici 2050. En été, la température diurne moyenne augmentera de près 1,4°C, tandis que la hausse des températures hivernales sera de l'ordre de 2°C. C'est pendant les mois de décembre à février que la température augmentera probablement le plus. Ce qui aura pour conséquence des pluies plus fréquentes et un enneigement moins important et pourrait entraîner la hausse du nombre de crues hivernales de petite et moyenne importance.

Le nombre des jours d'été (jours dont la température est supérieure à 25°C) connaîtra par rapport à aujourd'hui une augmentation nette. Le nombre des journées de grosse chaleur (plus de 30°C) doublera pratiquement partout. Nous aurons par contre moins de jours de gelées (soit des températures minimales inférieures à 0°C) et moins de jours de glace (gelées persistantes). Ces derniers diminueront au moins de moitié. Les saints de glace prendront de l'avance, les dernières gelées surviendront plus tôt et les pommiers, par exemple, fleuriront dans certaines régions avec près de deux semaines d'avance.

## PERSISTANCE D'UNE MÉTÉO À DOMINANTE DE FLUX DÉPRESSIONNAIRES

Les perturbations atlantiques - et en particulier les «flux d'ouest dépressionnaires»- responsables des fortes précipitations, continueront dans l'avenir à conditionner le temps, et de manière plus affirmée durant les mois d'hiver. La probabilité de crues et d'inondations sera d'autant plus forte à l'avenir.

## AUGMENTATION DES PRÉCIPITATIONS EN HIVER

Plus la température de l'air est élevée et plus l'évaporation de l'eau est forte, ce qui a une forte influence sur les précipitations.

Au cours de la période de simulation, la tendance actuelle – hivers humides et étés secs – se maintiendra. Alors que les étés connaîtront des pluies en baisse de près de 10 pour cent par rapport à celles d'aujourd'hui, l'hiver enregistre une pluviosité bien plus importante qu'actuellement et qui pourrait même augmenter d'environ 35 pour cent dans certaines régions. Les régions les plus à l'Ouest de la zone d'emprise de KLIWA seront les plus touchées.

On assistera en hiver à une nette recrudescence des fortes précipitations (plus de 25 mm), dont le nombre pourra doubler dans certaines régions. A l'inverse, les périodes de sécheresse estivales seront plus longues.

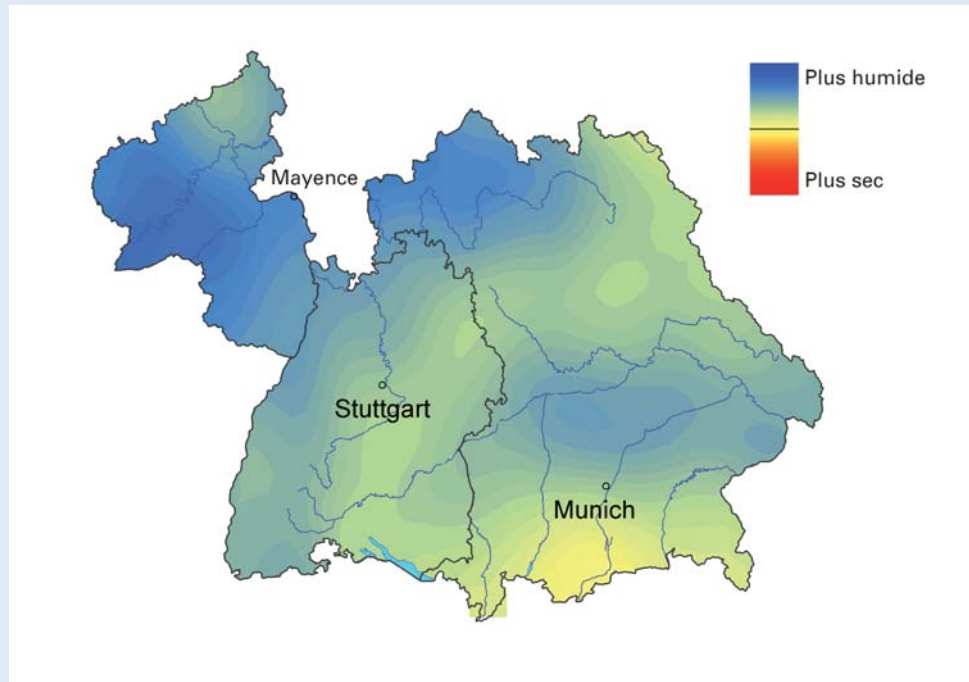
## CONCLUSION:

- La tendance se maintiendra
- Il fera plus chaud, surtout en hiver.
  - Les étés seront un peu plus chauds tandis que les hivers seront nettement plus humides.
  - Les situations météorologiques de flux d'ouest susceptibles de provoquer des précipitations plus abondantes, seront plus fréquentes et nous devons nous attendre à un risque plus élevé de crues et d'inondations en hiver.



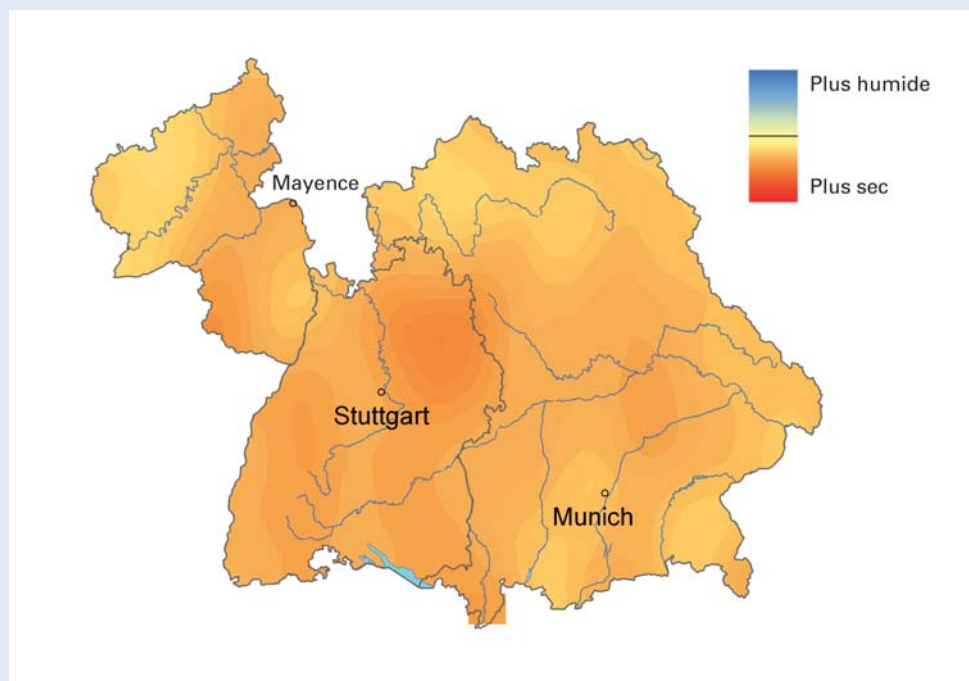
### AUGMENTATION DES PRÉCIPITATIONS EN HIVER

L'illustration montre le changement prévisible du régime des précipitations pendant la période hivernale à l'avenir (projection 2021-2050, WETTREG-2006/A1B) en comparaison avec la situation 1971-2000.



### DIMINUTION DES PRÉCIPITATIONS EN ÉTÉ

L'illustration montre le changement prévisible du régime des précipitations pendant la période estivale à l'avenir (projection 2021-2050, WETTREG-2006/A1B) en comparaison avec la situation 1971-2000.





# Notre principale réserve d'eau potable: Comment réagissent les nappes phréatiques ?

En Allemagne du Sud, environ 80 pour cent de l'eau potable sont issus des nappes phréatiques souterraines. Les effets du changement climatique sur le régime hydrologique des eaux souterraines présentent de ce fait une importance particulière pour la gestion des eaux. Malgré les modifications des conditions climatiques, il est indispensable que l'approvisionnement en eau potable soit assuré dans l'avenir.



*Nos sources continuent de couler abondamment et les nappes phréatiques sont encore bien remplies.*

## CHANGEMENTS INSIGNIFIANTS JUSQU'À PRÉSENT

Les niveaux des nappes phréatiques et les débits des sources sont suivis depuis plusieurs décennies, parfois depuis plus d'un siècle. Les données collectées sur certaines stations anciennes permettent de donner des indications sur l'évolution à long terme des niveaux des nappes phréatiques et des débits des sources. Une analyse systématique de plusieurs séries de mesures issues des principaux aquifères du Bade-Wurtemberg, de Bavière et de Rhénanie-Palatinat a montré que l'on pouvait déjà constater dans de nombreux cas des modifications du régime hydrologique annuel. C'est ainsi par exemple que la valeur maximale annuelle apparaît désormais plus tôt en cours d'année que ce n'était le cas au début des observations. Une évolution qui est une conséquence des changements intervenus dans la courbe des températures et des précipitations. Toutefois, les observations ne permettent pas à ce jour de tirer des conclusions formelles sur l'existence d'un « signal climatique » dans le domaine des eaux souterraines.

## PRÉVISIONS CONCERNANT L'ÉVOLUTION DE LA RECHARGE DES NAPPES PHRÉATIQUES

Les valeurs moyennes annuelles de la recharge des nappes phréatiques atteignent 200 mm environ dans les Länder de Bade-Wurtemberg et de Bavière, tandis qu'elles ressortent de 100 mm en Rhénanie-Palatinat. A titre de comparaison: le volume des précipitations s'élève dans le Bade-Wurtemberg à environ 960 mm, à env. 920 mm en Bavière et à 760 mm en Rhénanie-Palatinat. Le renouvellement annuel moyen des nappes phréatiques devrait a priori peu évoluer pour la période 2021-2050. D'après les calculs prévisionnels et selon le scénario climatique WETTREG-2006/A1B une légère augmentation de la recharge de 4 mm serait à prévoir pour le Land de Rhénanie-Palatinat, tandis que le Bade-Wurtemberg et la Bavière devraient plutôt connaître une diminution de l'ordre de 9 à 13 mm. Le Sud devrait connaître la baisse la plus signifi-

cative et c'est dans le Nord-ouest de la région KLIWA que l'on assistera au contraire à la plus forte augmentation. Le changement de la répartition des précipitations – moins de pluies en été, davantage de précipitations en hiver – aura des répercussions sur la formation des eaux d'infiltration : par rapport à la période actuelle, il y aura moins d'infiltration en été tandis que leur volume sera plus important en hiver.

## QUE FAIRE ?

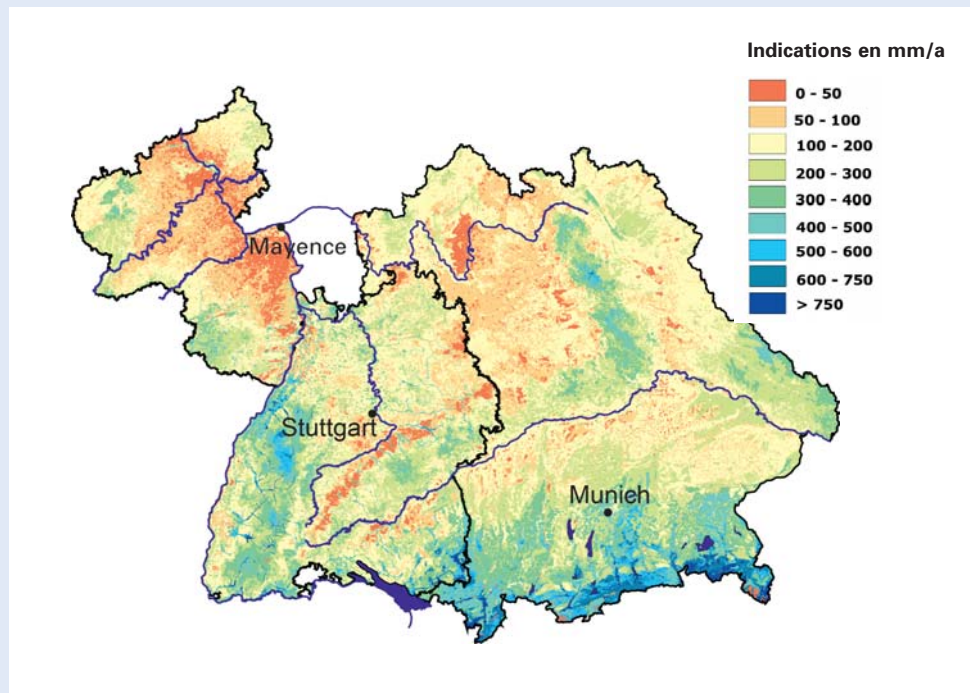
L'observation systématique des niveaux de nappe et des écoulements constituent la base d'une gestion de l'eau durable. C'est la raison pour laquelle des réseaux d'observation des eaux souterraines ont été mis en place depuis de nombreuses années dans les trois Länder concernés. La continuité des activités de ce réseau sur le long terme est absolument indispensable, notamment en ce qui concerne les effets possibles du changement climatique.

Les périodes de sécheresse estivale prolongées peuvent d'ores et déjà entraîner localement des pénuries plus ou moins longues. Un ensemble de mesures doit impérativement être mis en oeuvre pour faire face aux possibles problèmes d'approvisionnement. Il est notamment indispensable de continuer à développer activement – tant au niveau régional qu'extrarégional - des solutions solidaires et d'élaborer des méthodes d'irrigation plus efficaces.

Outre les phases de sécheresse prolongées en été, nous pourrions également connaître à l'avenir, et en particulier en hiver, des précipitations plus importantes pendant des périodes plus longues. Cette augmentation de la pluviosité pourrait entraîner localement des risques accrus d'inondation. Ce risque doit tout particulièrement être pris en compte dans la planification des projets de construction situés dans des régions potentiellement inondables.

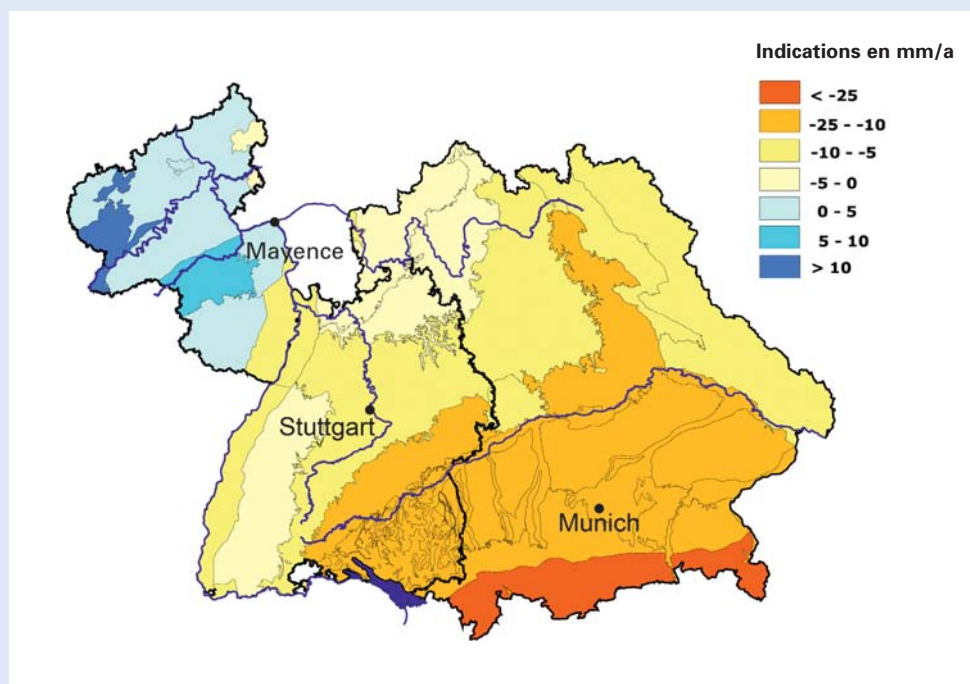
**MOYENNE ANNUELLE DE LA RECHARGE DES NAPPES PHRÉATIQUES PAR LES PRÉCIPITATIONS (1971-2000).**

Il a été procédé dans le cadre de KLIWA à un calcul global – par un processus unitaire - du renouvellement des nappes phréatiques pendant la période de 1971 à 2000 pour les trois Länder.



**MODIFICATIONS, À L'HORIZON 2021-2050, DU RENOUELEMENT DES NAPPES PHRÉATIQUES PAR LES PRÉCIPITATIONS EN COMPARAISON AVEC L'ÉPOQUE ACTUELLE (1971-2000).**

En s'appuyant sur ces calculs, les effets du changement climatique sur le régime des eaux du sol et sur le renouvellement des nappes phréatiques pour la période 2021-2050 ont été étudiés dans l'optique de la variante climatique régionale WETTREG-2006/A1B.





# Des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus longues: **Les basses eaux gagnent du terrain**

Les étés plus secs et plus chauds à venir auront pour conséquence une baisse du niveau des eaux. Ce recul n'affectera pas seulement la navigation intérieure. Les périodes de sécheresse auront également des répercussions sur l'agriculture et sur la production d'énergie. Les périodes d'étiage ont en effet des conséquences économiques extrêmement graves : c'est ainsi par exemple que les dommages socio-économiques de la longue canicule de 2003 ont été en Allemagne plus importants que ceux occasionnés par les crues catastrophiques du Rhin, de l'Oder ou de l'Elbe de ces dernières années. La sécheresse affecte des surfaces plus importantes et, par voie de conséquence, non seulement le régime des eaux mais également la flore et la faune, et ses effets sont plus persistants que ceux d'une inondation.



*De longues périodes de sécheresse mettront les sols à rude épreuve et entraîneront de mauvaises récoltes.*

## **BAISSE DU NIVEAU DES EAUX EN DÉPIT DE PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES**

La hausse des températures entraîne une augmentation des précipitations pendant les mois d'hiver et une diminution des précipitations en été. La gestion des eaux devra donc s'adapter à ce changement du régime des précipitations. Les phénomènes météorologiques extrêmes seront plus fréquents : les périodes de sécheresse extrêmes telles que celle de l'été caniculaire de 2003, où certains cours d'eau s'étaient retrouvés à sec, où la navigation avait dû être interrompue sur certains tronçons et où le niveau des nappes phréatiques avait fortement baissé alterneront avec des périodes d'inondation provoquées par des pluies fortes et persistantes. Les derniers exemples en date sont les crues du Rhin supérieur, en août 2007, ou encore les crues et inondations catastrophiques survenues dans le Jura souabe, en juin 2008, où la crue brutale de la Starzel, une petite rivière, avait en quelques minutes causé des dégâts considérables dans plusieurs localités.

## **MOINS DE PLUIE ET PLUS D'ÉVAPO- RATION = BAISSSE DU NIVEAU DES EAUX EN ÉTÉ**

Les différents modèles climatiques prévoient la poursuite de la diminution des précipitations estivales. L'augmentation de la température de l'air entraînera dans le même temps une évaporation plus importante. La probabilité d'apparition d'une période de sécheresse de la végétation est aujourd'hui six fois plus élevée qu'en 1985.

Pour les bassins versants étudiés au Bade-Wurtemberg et en Bavière, les scénarii montrent une diminution sensible à forte des écoulements des débits de basses eaux moyens

mensuels sur la période de juin à novembre. Cette diminution est particulièrement marquée dans le Sud-ouest et dans le Sud-est du Bade-Wurtemberg, où l'on enregistre 21 pour cent de baisse des écoulements des basses eaux en septembre. Seul le bassin de la Nahe (Rhénanie-Palatinat) enregistre des augmentations faibles à sensibles (voir graphique en haut à droite). L'évolution des modifications au cours de l'année figure en bas de la page de droite.

Les périodes d'étiage seront plus longues dans la plupart des régions: elles se prolongeront de plus de 50 pour cent au sud d'une ligne Karlsruhe – Coburg et de 25 à 50 pour cent au nord de cette ligne; cette zone inclura le bassin de la Nahe.

## **WORST CASE NON INCLUS**

L'étude prévisionnelle des écoulements montre que le volume des précipitations est fortement influencé par la température moyenne de l'air. Les calculs effectués tablent sur une augmentation de la température annuelle moyenne d'env. 1,0 °C jusqu'en 2050. Les projections pouvant cependant varier considérablement (entre 1,0 °C et 1,8 °C) en fonction du modèle climatique, il se pourrait que les écoulements et les périodes d'étiage évoluent vers des chiffres encore bien plus défavorables.

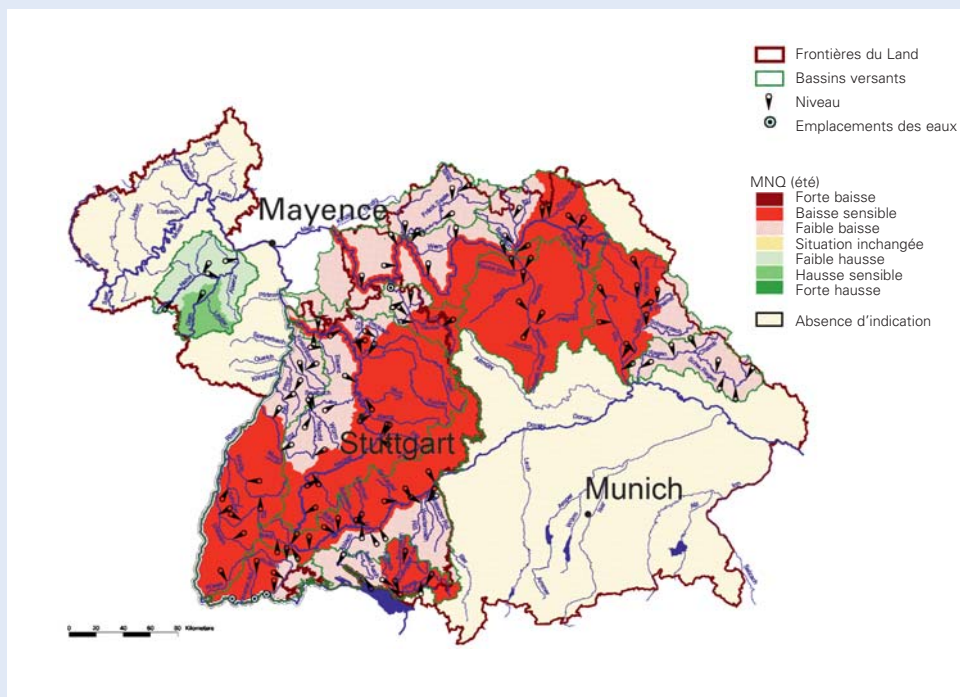
L'une des tâches de KLIWA consistera donc à améliorer la précision des modèles climatiques régionaux, à les tester et à mettre au point des stratégies d'adaptation adaptées. Le Rhin et les cours d'eau alpestres de Bavière feront tout particulièrement l'objet de nouvelles études.





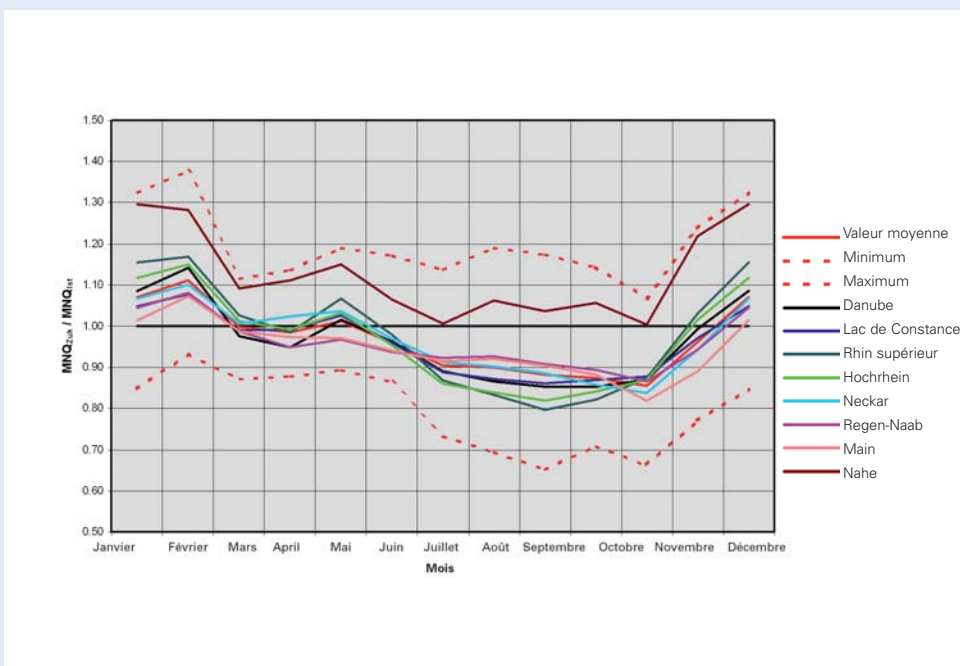
### ÉVOLUTION PRÉVISIONNELLE DES DÉBITS D'ÉTIAGE

La répartition géographique des changements prévisibles des moyennes mensuelles des débits d'étiage MNO pendant la période de juillet à novembre, est déduite des écoulements mensuels en basses eaux dans les bassins hydrographiques examinés.



### VARIATIONS INTERANNUELLES DES DÉBITS D'ÉTIAGES

Le graphique montre les variations des moyennes interannuelles des débits d'étiage sous forme de quotient entre les débits d'étiage futurs et les valeurs actuelles pour les bassins hydrographiques étudiés. Les valeurs inférieures à 1.0 signifient une tendance à la baisse, alors que les valeurs supérieures à 1.0 signifient la hausse prévisible des débits d'étiage.





# La stratégie du „flexible and no regret“ : la protection contre les crues et inondations

**Bien que la chaîne des modèles - modèle global - modèle régional – modèle hydrologique – comporte des incertitudes, les résultats obtenus semblent indiquer que nous devons, dans l’avenir, nous attendre à une augmentation du nombre de crues et d’inondations. Une stratégie d’adaptation aux crues et aux inondations a donc été développée par précaution. S’adapter ne signifie pas bâtir un peu partout de nouveaux murs de rive de plusieurs mètres de haut. Il importe surtout d’anticiper les conséquences possibles du changement climatique par des mesures adaptables à long terme partout où cela s’avèrera nécessaire et à des coûts relativement raisonnables. La prévention contre les crues et les inondations joue en cela un rôle particulièrement important.**



## LE FACTEUR DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

C’est généralement la valeur HQ100 qui est retenue dans la planification des constructions des dispositifs anti-crues. HQ100 représente le débit d’une crue ayant une période de retour de 100 ans. Les constructions conçues sur cette base sont donc capables de résister à ces « crues centennales ». Les simulations des modèles hydrologiques pour les bassins hydrographiques du Bade-Wurtemberg et de Bavière montrent que les débits de hautes eaux augmenteront sur l’ensemble du territoire, notamment en hiver. Par mesure de précaution, il a été convenu dans les deux Länder de tenir compte des effets liés aux variations climatiques par l’introduction d’un facteur de changement climatique dans le dimensionnement des nouveaux aménagements de protection contre les inondations..

Pour le Neckar, on a ainsi déterminé que le débit d’une crue centennale (HQ100) va augmenter de 15 pour cent d’ici à 2050. C’est pourquoi il convient de multiplier désormais la valeur HQ100 par le facteur climatique 1,15. En d’autres termes, les installations doivent être dimensionnées pour un écoulement supérieur de 15 pour cent, ou planifiées de façon à permettre une modification ultérieure si nécessaire.

## DIFFÉRENTES CONSÉQUENCES CLIMATIQUES – DIFFÉRENTS FACTEURS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

On procède désormais dans le Bade-Wurtemberg à l’examen minutieux de l’ensemble des bassins hydrographiques. Les différences régionales liées au changement climatique se manifestent dans les débits de crue à venir. Un facteur de changement climatique de 1,25 a ainsi pu être établi dans la région du Haut Danube. Les petites et moyennes crues et inondations connaîtront elles aussi une recrudescence. L’écoulement HQ5 pour une inonda-

tion, qui correspond actuellement à une période de retour de cinq ans, enregistrera dans la région du haut Danube une hausse d’environ 67 pour cent. La valeur HQ5 du Haut Danube doit donc à l’avenir être multipliée par le facteur changement climatique 1,67. Dans la région du Hochrhein, le facteur de changement climatique est par exemple de 1,45 pour HQ5. C’est dans la région Lac de Constance-Haute Souabe que ce facteur enregistre son niveau le plus bas (1,24).

Sur la base des résultats de recherche précédents, un facteur de changement climatique a également été introduit en Bavière ; ce facteur a été fixé globalement à 15 pour cent pour la valeur statistique de HQ100. Cela permet en règle générale de prendre dès à présent en compte, lors de l’aménagement par l’Etat de nouvelles mesures de protection anti-crues, les effets prévisibles du changement climatique. De nouvelles études permettent de développer le facteur changement climatique plus avant. Les nouveaux développements devraient permettre l’introduction d’une composante régionale.

En ce qui concerne les simulations que nous venons d’évoquer, les scénarii qui ont permis dans le Bade-Wurtemberg et en Bavière d’introduire les facteurs changement climatique, ne sont désormais plus valables pour le Land de Rhénanie-Palatinat. De nouvelles projections climatiques devraient aboutir à une actualisation des connaissances sur la nécessité d’introduire les facteurs de changement climatique en Rhénanie-Palatinat. Dans ce Land, les mesures en matière de protection contre les crues et les inondations s’appliquent au cas par cas en fonction du risque pour la population, des dommages potentiels provoqués par une inondation et d’après des considérations de rentabilité.

## LA PROTECTION CONTRE LES CRUES ET LES INONDATIONS – QU’EST-CE QUE CELA SIGNIFIE DANS LA PRATIQUE ?

### L’exemple des digues de protection contre les inondations:

La digue est construite conformément au dimensionnement, mais une bande réservée côté extérieur permettra de surélever et d’élargir la digue en cas de besoin.

### L’exemple des ponts:

Le facteur de changement climatique est pris en compte dès la planification d’un pont, car une adaptation ultérieure de l’ouvrage est rarement possible sur le plan technique.

### L’exemple des murs de rive:

Lors de la construction d’un nouveau mur de rive, les coefficients de sécurité mis en œuvre permettent une surélévation ultérieure de l’ouvrage si cela s’avère nécessaire.

### LES FACTEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Lors du dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations, les effets possibles du changement climatique sont pris en compte et une marge de sécurité supplémentaire est prévue pour faire face à une crue centennale.

Le franc-bord est destiné à empêcher que les dispositifs de protection contre les crues et inondations ne soient submergés à la suite à – par exemple – de lames d'eau ou de bourrasques de vent.



## Perspectives

**L'avenir nous réserve des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Des changements dans la répartition des précipitations devraient entraîner des modifications du cycle de l'eau au niveau régional et, par voie de conséquence, dans le régime des eaux de nos bassins hydrographiques.**

KLIWA s'est tout d'abord penché sur la problématique des crues et inondations et a élaboré des mesures d'adaptation concrètes. Aujourd'hui, la question des effets du changement climatique sur les débits d'étiage et sur la recharge des nappes phréatiques a gagné en importance aux yeux de la recherche. Un changement dans le domaine de la gestion des eaux a des conséquences immédiates sur l'exploitation des eaux – qu'il s'agisse du prélèvement direct de l'eau pour l'approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation des terres agricoles, de son utilisation comme eau de refroidissement pour les centrales nucléaires dans le secteur énergétique ou encore de son exploitation en tant que voie navigable. Un autre problème est étroitement lié à celui-ci : la question des effets sur les réserves en eau et sur l'état écologique de nos eaux ; deux éléments qui constitueront des orientations essentielles à l'avenir.

Un autre pôle de la recherche porte sur l'augmentation probable des précipitations de courte durée (les orages) susceptibles d'entraîner des crues et des inondations locales. Une question qui place les réseaux de drainage communaux devant des problèmes supplémentaires. L'évaluation des effets des changements climatiques reposant sur des bases de données qui sont établies à partir de modèles climatiques, il importe de continuer à affiner ces modèles climatiques et de réduire au maximum les facteurs d'incertitude. Autant de points sur lesquels KLIWA entend également apporter sa contribution.

Il existe cependant une chose plus importante que les mesures régionales destinées à amortir les effets du changement climatique. Ce sont les mesures concrètes pour la protection active du climat. La diminution des émissions de gaz à effets de serre occupe dans ce domaine un rôle central. Nous savons en effet qu'en raison de l'inertie du climat, la hausse de la température se poursuivrait même dans le cas (fictif) où il se serait possible de stopper sur le champ toutes les émissions de gaz à effet de serre. Il est impératif que chacun d'entre nous agisse dès aujourd'hui pour éviter que nos descendants ne soient confrontés un jour à des problèmes bien plus graves encore.

La mutation climatique constitue le plus grand défi auquel l'Humanité doit faire face aujourd'hui – chacun d'entre nous est concerné. ■

