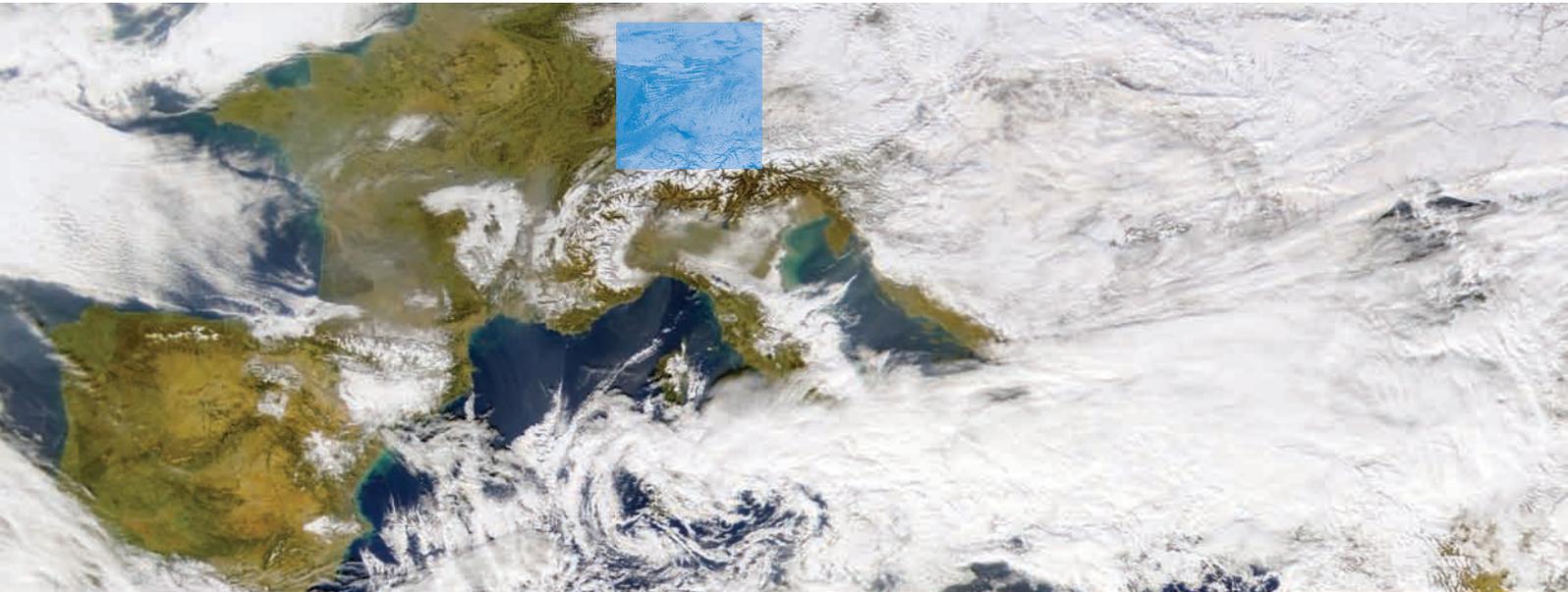
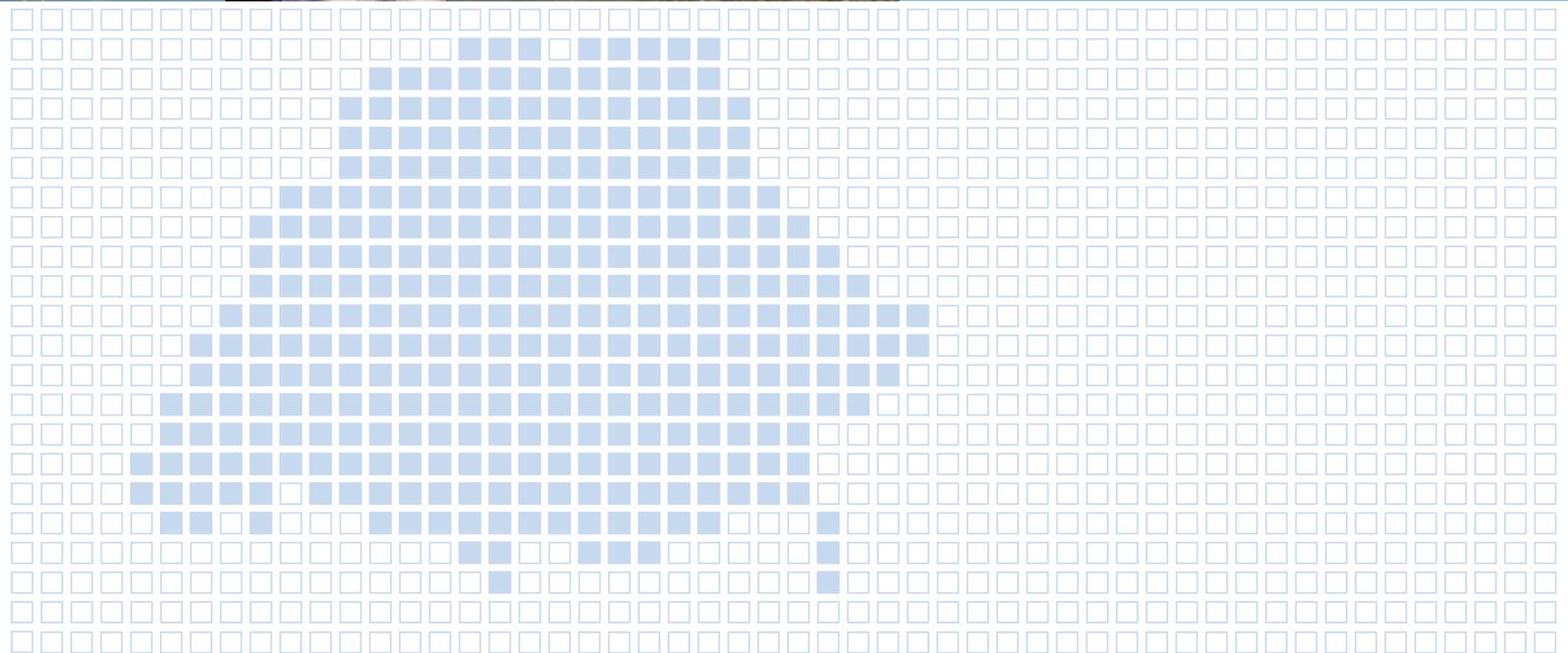


# Notre climat change

## **Conséquences – Ampleur – Stratégies**



**EFFETS SUR L'ÉCONOMIE DE L'EAU  
EN ALLEMAGNE DU SUD**





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



**Dr. Werner Schnappauf**  
Ministre de l'État de Bavière pour  
l'environnement, la santé et la  
protection du consommateur



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

Le comité d'experts « Intergovernmental Panel on Climate Change » des Nations Unies prévoit que, à la suite de l'effet de serre causé par l'action humaine, la température moyenne mondiale augmentera sensiblement au cours des prochaines décennies, une augmentation qui s'accompagnera d'une modification significative du climat mondial. Cette modification du climat aura des effets sur la gestion régionale de l'eau. Jusqu'à présent il n'a pas été possible de prédire de manière fiable les conséquences de ce changement climatique au niveau régional. Il nous manquait des données et des faits concrets pour pronostiquer et évaluer l'évolution future du bilan hydrologique et de ses composantes.

Avec le projet de coopération KLIWA, les Länder de Bade-Wurtemberg et de Bavière se sont donnés comme objectif, conjointement avec le service allemand de météorologie, de dégager les effets possibles du changement climatique sur les ressources en eau des régions hydrologiques de l'Allemagne du Sud et d'en déduire des recommandations d'action. Dans un premier temps, l'analyse et l'interprétation des données météorologiques et hydrologiques du 20<sup>e</sup> siècle ont permis d'appréhender les modifications climatiques qui sont déjà apparues. Pour la première fois en Allemagne, le développement de nouveaux scénarios climatiques régionaux a permis de dégager des tendances en ce qui concerne les conséquences climatiques régionales. La transmission de ces résultats dans les modèles de gestion de l'eau existants des Länder permet en particulier de poser des hypothèses quant à l'évolution des phénomènes de crues et des inondations au cours des 50 prochaines années.

Les Länder de Bade-Wurtemberg et de Bavière ont été les premiers à introduire au niveau national le facteur de changement climatique dans le calcul des ouvrages de protection contre les crues et les inondations. Ainsi, l'augmentation probable des débits de crue peut déjà être prise en compte lors de la planification.

Par le biais de ce projet KLIWA, la politique de protection du climat des Länder de Bade-Wurtemberg et de Bavière pose les bases importantes d'une action préventive pour la préservation de notre espèce.

| TABLE DES MATIÈRES |  | PAGE      |
|--------------------|--|-----------|
| <b>1</b>           | <b>LE CLIMAT<br/>DE LA TERRE</b>                           | <b>4</b>  |
| <b>2</b>           | <b>KLIWA – CHANGEMENT CLIMATIQUE<br/>ET CYCLE DE L'EAU</b> | <b>6</b>  |
| <b>3</b>           | <b>KLIWA – CHANGEMENTS<br/>AU 20<sup>e</sup> SIÈCLE</b>    | <b>8</b>  |
| <b>4</b>           | <b>RECHERCHE CLIMATIQUE<br/>À L'AIDE DE MODÈLES</b>        | <b>10</b> |
| <b>5</b>           | <b>MODÈLES HYDROLOGIQUES</b>                               | <b>12</b> |
| <b>6</b>           | <b>KLIWA – NOTRE CLIMAT<br/>POUR DEMAIN</b>                | <b>14</b> |
| <b>7</b>           | <b>STRATÉGIES<br/>POUR L'AVENIR</b>                        | <b>16</b> |

## INFORMATIONS ET NOTES LÉGALES

### Éditeur

LUBW Landesanstalt für Umwelt,  
Messungen und Naturschutz  
Bade-Wurtemberg  
Service 43  
Hydrologie et prévision des crues  
Griesbachstr. 1  
D-76185 Karlsruhe

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Service 81

Le changement climatique et ses conséquences,  
bilan d'eau

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
D-86179 Augsburg

Pour le Ministère de l'environnement  
de Bade-Wurtemberg et le  
Ministère de l'État de Bavière pour  
l'environnement, la santé et la protection du  
consommateur et le service allemand de  
météorologie

### Concept et réalisation

ÖkoMedia PR, Stuttgart

Date: Mai 2007

## INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

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

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

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

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

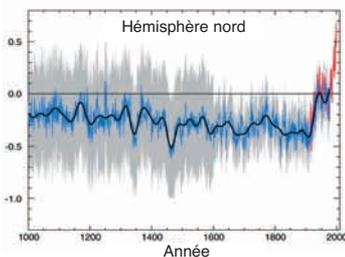
[www.bayern.de/lfu](http://www.bayern.de/lfu)

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



# Le climat est-il devenu fou...

En 2002, la crue centenaire de l'Elbe et du Danube a inondé de grandes étendues de terres. 2003 a suivi, avec l'été du siècle et des températures allant jusqu'à 40°C. 2005 a été l'année la plus chaude depuis le début de l'histoire météorologique, à l'échelle mondiale. Pendant l'hiver 2005/2006, la neige est tombée dans certaines régions à tel point que même les chasse-neige ont capitulé et que des toits de bâtiments se sont effondrés, parce qu'ils ne pouvaient pas résister à de telles masses de neige. Cette succession accélérée de conditions météorologiques extrêmes est-elle le fruit du hasard ou une indication que le changement climatique est déjà en marche?



Écart de la température moyenne annuelle (°C) par rapport à la température moyenne de la période comprise entre 1961 et 1990. Comme le graphique l'indique, un réchauffement climatique sensible s'est produit sur l'hémisphère nord dès le début du 20<sup>e</sup> siècle.

## ...OU S'AGIT-IL DE CAPRICES CLIMATIQUES TOUT À FAIT NORMAUX?

Au cours des millions d'années de son histoire, le climat de la Terre a été régulièrement soumis à des fluctuations naturelles importantes. L'Europe a été tropicale, mais elle a parfois aussi été prise par les glaces. Les carottes de sédiment, les analyses de pollen et les cernes d'arbre donnent des indications sur les fluctuations climatiques passées de la Terre. Depuis environ 1860, des données météorologiques sont enregistrées de manière régulière et systématique. Leur analyse à l'échelle mondiale montre que, depuis le début de l'enregistrement des données climatiques, la température moyenne mondiale s'est élevée d'environ 1°C. Cela ne semble pas constituer un changement important. Il est cependant inquiétant si l'on considère que pendant la dernière période glaciaire, qui a pris fin il y a environ 10 000 ans, la température sur la Terre était inférieure de seulement 4–5°C par rapport à aujourd'hui.

Les fluctuations historiques du climat sont à imputer à des causes naturelles, telles qu'un changement de l'activité solaire ou de la rotation de la Terre, et se sont déroulées sur des périodes de 10 000 à 100 000 ans. Mais, depuis le début de l'industrialisation, la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté, alors qu'elle était relativement constante au cours du dernier millénaire, à environ 280 ppm (parts par million). Aujourd'hui (2006), la teneur mesurée est de 377 ppm, avec un taux d'accroissement annuel d'environ 1,5 ppm. Cet effet de serre anthropogène (causé par l'homme) fait monter la température de la Terre. La teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère influence de manière décisive la température globale. C'est pourquoi, si l'on veut prévoir le climat de la Terre, il est important de connaître la marge d'évolution de la température globale future en formulant des hypothèses plausibles en ce qui concerne les concentrations de gaz à effet de serre.

## UNE TERRE SOUMISE À L'EFFET DE SERRE

Nous devons notre température moyenne globale agréable de +15°C à l'effet de serre atmosphérique naturel. L'atmosphère terrestre qui entoure la terre comme une couverture chauffante est composée de 78 pour cent d'azote, de 21 pour cent d'oxygène et d'un pour cent de gaz rares. S'y ajoutent des gaz comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et le méthane, qui constituent seulement 0,1 pour cent de l'atmosphère. Ces gaz rares agissent comme les vitres d'une serre: ils laissent passer le rayonnement solaire de courte longueur d'onde et retiennent en partie le rayonnement thermique de grande longueur d'onde. C'est pour cette raison qu'ils sont aussi appelés gaz à effet de serre. Sans cet effet de serre naturel, la température moyenne de -18°C, rendrait toute vie impossible.

## QUEL CLIMAT NOUS PRÉPARONS-NOUS ?

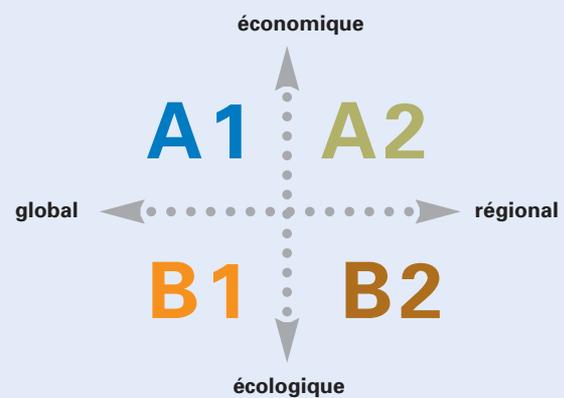
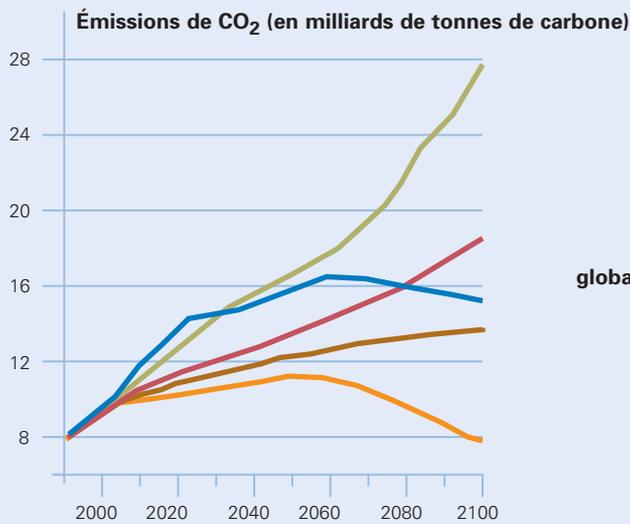
Pour pouvoir estimer de manière réaliste l'évolution du climat de la Terre, il convient de prendre en considération le «facteur humain» parallèlement aux facteurs climatiques naturels. C'est dans cette optique qu'ont été mis au point par le comité d'experts «Intergovernmental Panel on Climate Change» (IPCC) des Nations Unies des scénarios d'émission. Ces scénarios consignent notamment la manière dont la population mondiale va se développer, à quel niveau de vie elle aspire, quelles sources d'énergie elle va utiliser et quelle quantité d'énergie elle va consommer. Ces scénarios vont d'une société «statu quo» à une population mondiale sensible à l'écologie, qui se détourne du matérialisme.



### GAZ A EFFET DE SERRE ANTHROPOGÈNES ET PRINCIPALES SOURCES D'ÉMISSION

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) | → Combustion de carburants fossiles    |
| Méthane (CH <sub>4</sub> )            | → Culture du riz, élevage, compostage  |
| Dioxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)    | → Processus de combustion, circulation |
| Hydrocarbures fluorés (HCFC)          | → Aérosols, réfrigérateurs             |

### SCÉNARIOS D'ÉMISSION IPCC



- A1** Monde à la croissance économique rapide avec l'introduction rapide de nouvelles technologies performantes
- A2** Monde hétérogène mettant l'accent sur les valeurs traditionnelles (famille et traditions locales)
- B1** Monde se détournant du matérialisme avec l'introduction de technologies propres
- B2** Monde mettant l'accent sur des solutions locales pour une durabilité économique et écologique
- IS92a** IS92a Scénario «statu quo» (1992)



# KLIWA regards sur le climat de l'Allemagne du Sud

Sur la base des résultats de la modélisation climatique avec différents modèles et les scénarios IPCC, les instituts de recherche de premier plan prévoient un réchauffement global de 1,4°C à 5,8°C au cours des cent prochaines années. Cette élévation de la température aura des effets sur le cycle de l'eau, qui peuvent se traduire par une évaporation plus forte, une formation accrue de nuages, des précipitations plus importantes et un changement du régime hydrographique.

Le projet de coopération KLIWA est subdivisé en plusieurs domaines interdépendants.

## DOMAINES DU PROJET KLIWA

### Domaine A:

Détermination des changements historiques du climat et du bilan d'eau

### Domaine B:

Etude des effets possibles du changement climatique sur les bilans d'eau

### Domaine C:

Compréhension des changements futurs du climat et du bilan d'eau

### Domaine D:

Adaptation des usages économiques de l'eau

Afin de pouvoir prendre des mesures régionales de protection contre les crues et les inondations, il convient de savoir quels bassins présentent un risque de crue particulièrement élevé. De même, des prévisions climatiques régionales sont également nécessaires. Jusqu'ici cependant, on n'a établi que des modèles climatiques mondiaux, ou concernant des régions étendues, comme l'Europe du Nord.

## LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EST-T-IL DÉJÀ EN MARCHÉ ?

Au vu de l'augmentation de la fréquence des inondations ces dernières années, il convient de déterminer s'il s'agit de signes avant-coureurs du changement climatique ou non. Tout serait parfaitement normal? Ou devons-nous escompter pour l'avenir une augmentation de la fréquence des inondations et des situations météorologiques extrêmes? Si oui, peut-on prédire comment le climat et les ressources en eau vont évoluer et quelles réponses adaptées y apporter?

## LE PROJET KLIWA

Pour répondre à cette question de manière concrète, les Länder de Bade-Wurtemberg et de Bavière ainsi que le service allemand de météorologie collaborent à long terme et de manière interdisciplinaire dans le cadre du projet de coopération KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, en français « Changement climatique et conséquences pour les ressources en eau »). L'objectif de KLIWA est de faire ressortir les effets possibles du changement climatique sur l'économie de l'eau des bassins de l'Allemagne du Sud, d'en prévoir les conséquences et de proposer des recommandations d'action.

## INFLUENCES SUR LE BILAN D'EAU MODE D'EMPLOI

Le projet KLIWA a déjà une série de succès à son actif. Dans un premier temps, les résultats des mesures météorologiques et hydrologiques qu'ont recueillies les stations météorologiques bavaroises et bade-wurtembourgeoises sur de longues années ont été analysés et des tendances ont été établies. Ces stations ont servi de base à la simu-

lation par des modèles climatiques régionaux pour la période 2021–2050. Ces données climatiques futures ont à leur tour permis d'affiner des modèles hydrologiques dans différents bassins, et des recommandations d'action concrètes ont déjà pu être émises. Pour le moment, les recherches se concentrent sur la problématique des crues et des inondations. Par la suite, il faudra examiner également les autres effets sur le bilan d'eau, notamment les débits d'étiage ou le renouvellement des eaux souterraines.

## MILLE TONNERRES, NOTRE CLIMAT

Le terme climat fait référence au niveau pluri-annuel de grandeurs météorologiques, en particulier la température et les précipitations, tandis que les conditions météorologiques désignent l'état de ces grandeurs météorologiques tel qu'il prévaut actuellement. Les prévisions météorologiques visent à prédire le temps des prochains jours aussi précisément que possible. En revanche la modification à long terme du climat est représentée par des scénarios climatiques, décrivant autant que possible les états futurs du climat en fonction des évolutions sociales, économiques et techniques qui les influencent. Les scénarios climatiques se rapportent toujours à de longues échéances - au moins 30 ans.

## KLIWA SUR LA TOILE

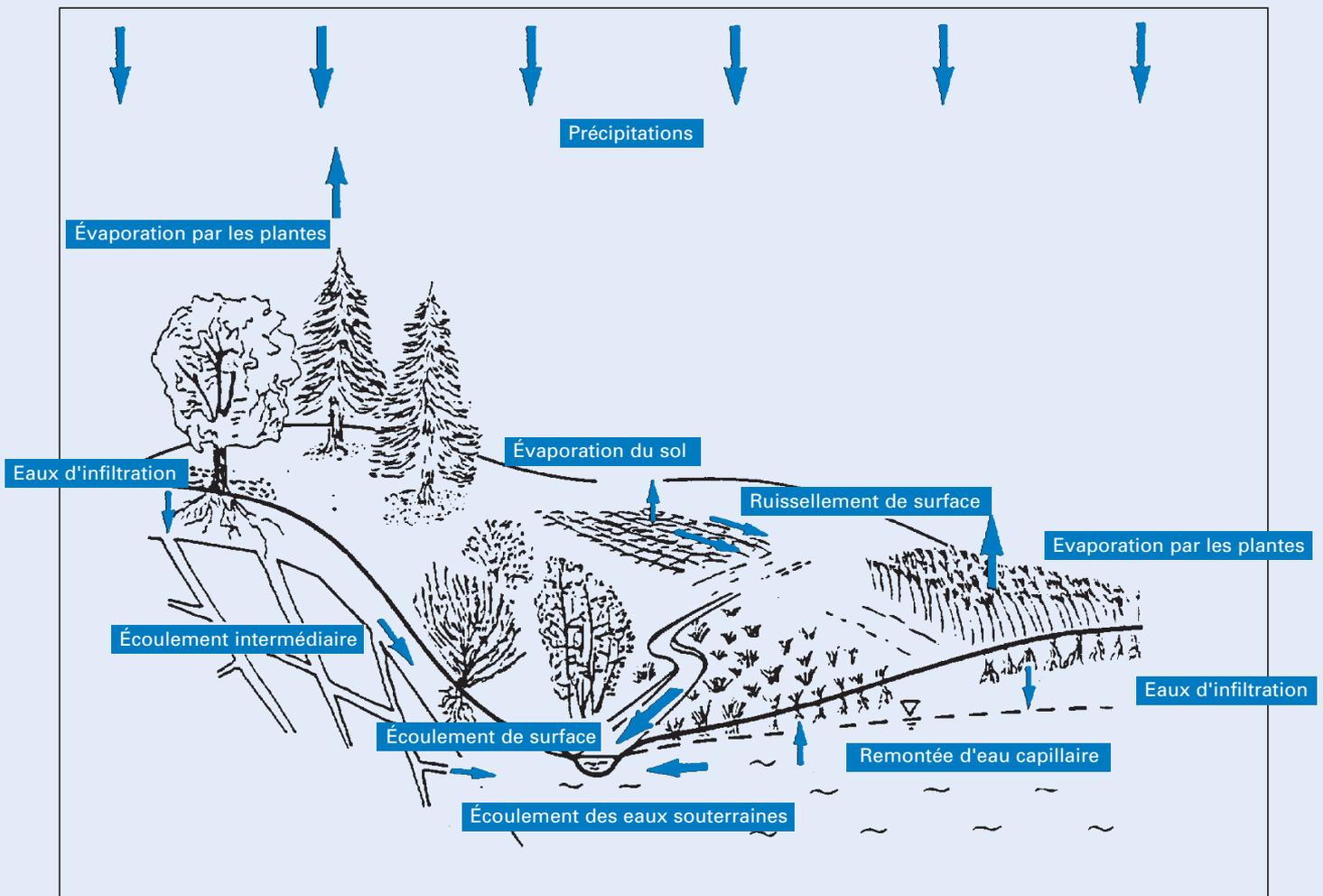
Vous trouverez de plus amples informations sur le projet KLIWA sur la page d'accueil [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de). Dans la section des téléchargements, vous pouvez accéder à une série complète de rapports et de publications sur les résultats et les méthodes de travail.



## LE CYCLE DE L'EAU

La surface de la Terre est couverte aux deux tiers d'eau. Cette eau n'est bien sûr pas immobile, elle participe à un cycle puissant en tant que vapeur, liquide ou glace tout autour du monde. L'eau qui s'évapore de la surface de la Terre monte sous forme de vapeur d'eau, se condense sous forme de nuages et retombe en précipitations - pluie ou neige sur la Terre.

Les précipitations s'écoulent en cours d'eau ou s'infiltrent dans le sol et contribuent ainsi au renouvellement des nappes phréatiques. La plus grande partie de l'eau s'évapore cependant. Le changement climatique modifie les différentes composantes du cycle naturel de l'eau.



Représentation schématique des composantes du bilan d'eau  
(d'après Wohlrab et al. 1992, modifiée)



# À la loupe:

## Le climat au 20<sup>e</sup> siècle

Le changement climatique n'est pas pour demain. Il a commencé depuis longtemps. Pour évaluer l'évolution du climat jusqu'à aujourd'hui, il faut d'abord examiner les données du passé. L'analyse des historiques de mesure permet de déterminer les fluctuations naturelles des données météorologiques et, éventuellement, de dégager une tendance. Le projet KLIWA a eu recours aux valeurs de mesure issues de plus de 350 stations météorologiques d'Allemagne du Sud.



### IL FAIT PLUS CHAUD

La température moyenne de l'air en Allemagne du Sud a augmenté d'environ 0,5–1,2°C sur la période de 1931–2000. L'augmentation la plus forte a été enregistrée après les années 1990. L'augmentation de la température mensuelle moyenne a été la plus prononcée pour le mois de décembre avec 1,8–2,7°C, principalement à l'ouest et aux altitudes les plus basses jusqu'à 500m au-dessus du niveau de la mer.

### NOËL BLANC – UN SOUVENIR D'ENFANCE

Des hivers plus doux sont synonymes de neige moins abondante. Cette tendance apparaît clairement dans les historiques de mesures. Dans les régions les plus basses, jusqu'à 300 m au-dessus du niveau de la mer, et dans les parties occidentales en particulier, les périodes d'enneigement ont diminué de 30–40 pour cent à partir des années 1951/52, avec une réduction de 10–20 pour cent dans les régions de moyenne altitude (300–800m au-dessus du niveau de la mer). Aux altitudes les plus élevées au contraire, il tombe parfois même davantage de neige. Comme la neige n'est rien d'autre que de l'eau temporairement figée, la couverture neigeuse est une grandeur essentielle dans le cycle de l'eau, notamment en ce qui concerne l'écoulement de l'eau dans le réseau hydrographique.

Les précipitations ont augmenté dans plusieurs régions jusqu'à 35 pour cent, principalement en hiver. Sont concernés au premier titre dans le Bade-Wurtemberg la Forêt-Noire et le nord-est, en Bavière la Franconie et des parties de la Forêt Bavaroise.

### PERTURBATIONS ATLANTIQUE: LA SITUATION QUI APORTE LA PLUIE

Les précipitations accrues en hiver sont dues à l'augmentation de certaines situations météorologiques de grande ampleur sur l'Europe. Une analyse des séries chronologiques de 1881 à 1989 a montré que les courants circulaires zonaux se multipliaient en particulier au cours des mois de décembre et de janvier. La situation météorologique de grande ampleur la plus importante d'un point de vue hydrologique est le « centre dépressionnaire d'ouest », généré par l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. Cette perturbation qui atteint l'Europe occidentale à partir de l'Atlantique apporte des précipitations souvent abondantes - la plupart du temps sous forme de pluie dans les régions de basse altitude en raison de l'air plus doux qui vient de la mer. Les situations météorologiques zonales de grande ampleur sont cependant aussi responsables des fortes tempêtes hivernales. La tempête « Lothar » qui a fait des ravages en décembre 1999 à travers toute l'Europe occidentale en est un triste exemple.

### ÉTÉS SECS, HIVERS PLUVIEUX

La pluviosité annuelle est restée à peu près constante dans la plupart des régions au cours de la période examinée. Mais la répartition des précipitations a changé: les mois d'hiver sont plus humides, ceux d'été sont plus secs.

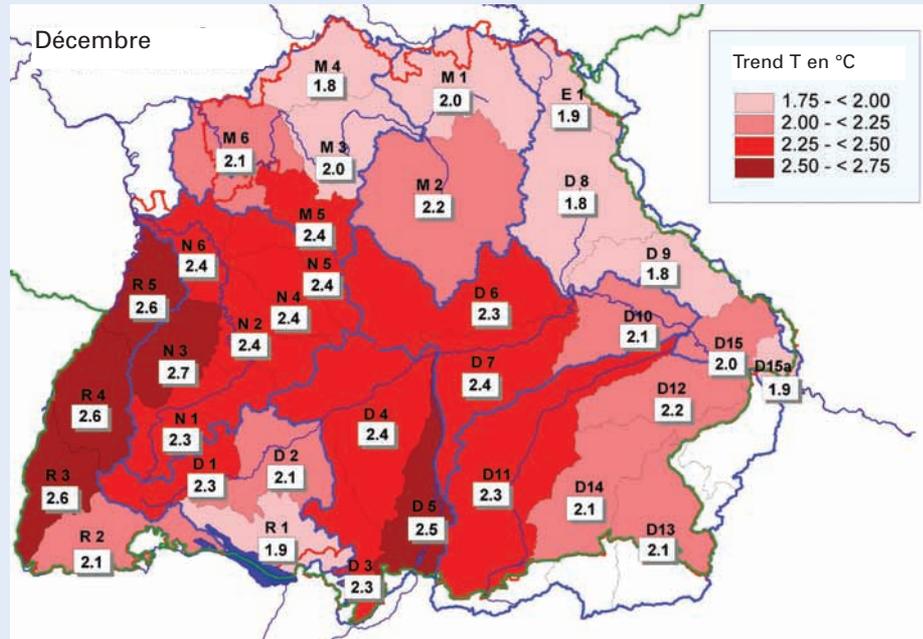
### L'EAU VA TOUJOURS À LA RIVIÈRE

Les séries chronologiques pluriannuelles observées sur certaines stations hydrométriques montrent qu'au cours des 30 dernières années les inondations ont augmenté au Bade-Wurtemberg et en Bavière, surtout au cours du semestre hivernal.



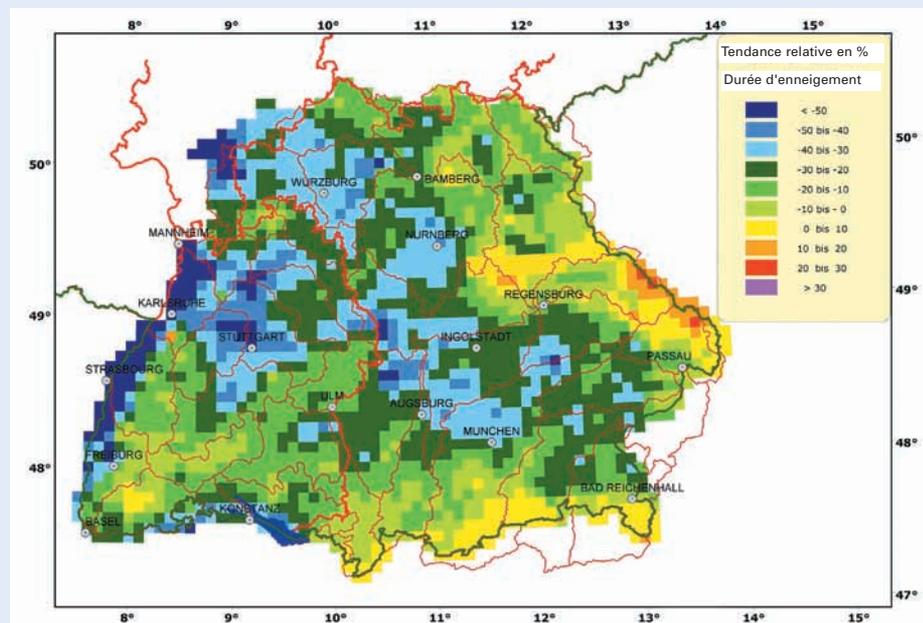
TEMPÉRATURE DE L'AIR

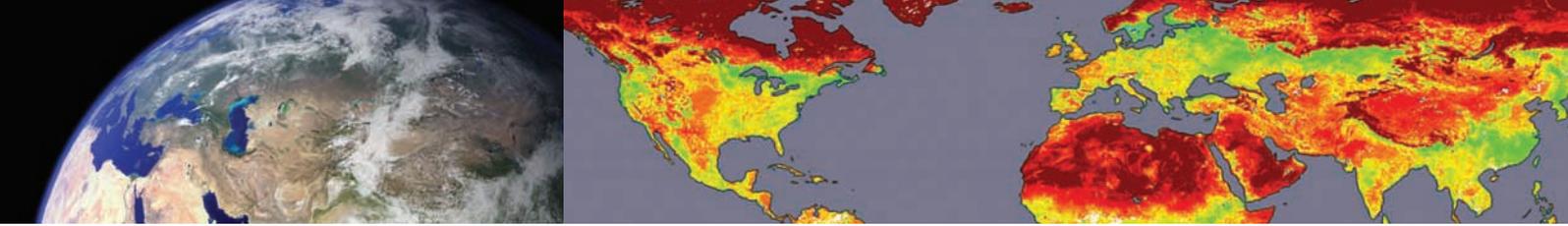
Augmentation moyenne de la température au mois de décembre dans la moyenne de 1931–2000.



DURÉE D'ENNEIGEMENT

Baisse de la durée d'enneigement moyenne au cours de la période 1951/52–1995/96.





# Instruments de la recherche climatique

**Aujourd'hui, la quasi totalité des instituts de recherche renommés prévoient un changement climatique global. Même des mesures de protection rapides et efficaces ne pourraient pas empêcher le changement climatique qui se dessine, car les effets du dioxyde de carbone relâché aujourd'hui dans l'atmosphère vont perdurer pendant encore 30–40 ans et contribueront au réchauffement. En outre, avec les besoins énergétiques mondiaux actuels, il est impossible de réduire les émissions à zéro, puisque chaque processus de combustion produit du CO<sub>2</sub> supplémentaire.**

## LA MÉTÉO – UNE CONSÉQUENCE DU CLIMAT

... mais pas seulement, car le climat est aussi influencé par des phénomènes à la surface de la Terre. Quelques exemples:

- L'Europe, relativement chaude pour son degré de latitude, doit son climat doux au Gulfstream, un courant marin chaud.
- Les surfaces de neige et de glace contribuent à un climat plus frais, parce qu'elles reflètent la lumière solaire.
- La pluie qui tombe sur les régions forestières s'évapore en grande partie, tandis que les pluies qui atteignent des surfaces imperméables, comme dans les villes, vont principalement à l'égout et rejoignent les cours d'eau.

## À QUOI RESSEMBLE LA COURBE DE TEMPÉRATURE? LES MODÈLES CLIMATIQUES MONDIAUX

Les prévisions météorologiques constituent souvent une entreprise difficile. Qui n'a pas déjà prévu une excursion au soleil pour se retrouver sous la pluie? Avec les moyens actuels, il est possible d'obtenir des prévisions météorologiques fiables à 5–7 jours au mieux. La prévision à long terme du climat de la Terre est une tâche autrement plus complexe, étant donné qu'un grand nombre de paramètres et de grandeurs qui s'influencent mutuellement doivent être pris en considération. Il en résulte une quantité de données gigantesques et un volume de calculs qui ne peut être traité que par des superordinateurs.

À l'instar des prévisions météorologiques, les modèles climatiques mondiaux reposent sur un modèle atmosphérique, complété par un modèle spécifique de l'océan, de la neige et de la glace ainsi que de la végétation, car ces facteurs influencent considérablement le climat. Les influences anthropogènes (le «facteur humain») sont prises en considération dans les différents scénarios IPCC.

Pour la modélisation du climat mondial, la Terre est subdivisée selon un maillage précis. La puissance de calcul des ordinateurs actuels autorise un maillage d'environ 250 x 250 km<sup>2</sup>. En raison de la variabilité des facteurs, le modèle climatique mondial ne peut pas générer de valeurs précises, mais seulement des plages dans lesquelles, par exemple, la température ou les précipitations évoluent. C'est ainsi qu'il est possible d'indiquer qu'à l'horizon 2100 la température globale augmentera de 1,4–5,8°C.

## LE SOUCI DU DÉTAIL – LES MODÈLES CLIMATIQUES RÉGIONAUX

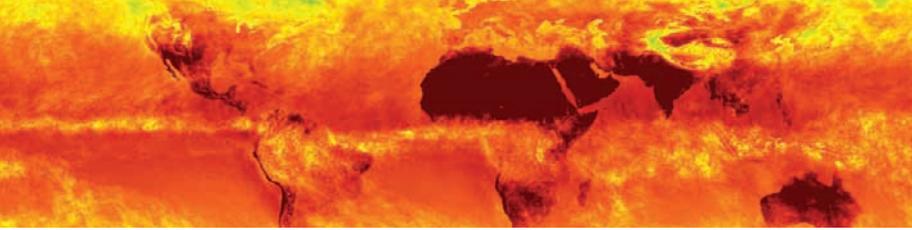
Le maillage d'un modèle climatique mondial est bien trop imprécis pour des prévisions climatiques régionales. Les particularités topographiques régionales telles que les chaînes de montagne de moindre importance ou les vallées fluviales sont totalement nivelées.

Comme il n'y a actuellement encore aucun procédé optimal pour la création de scénarios climatiques régionaux à partir du modèle climatique mondial, trois méthodes différentes ont été choisies pour simuler le climat régional dans le cadre du projet KLIWA. Il a ainsi été possible d'établir un certain éventail de développements imaginables et de possibilités de comparaison.

### Trois procédés pour la modélisation du climat régional

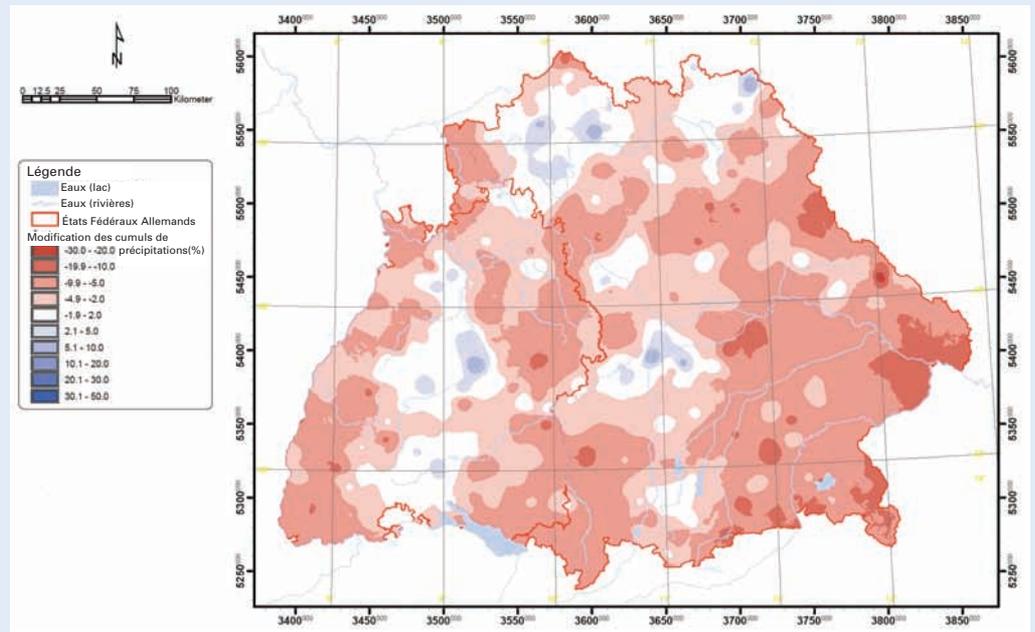
- une méthode statistique
- un procédé dynamique statistique
- un modèle climatique dynamique régional

Ces trois procédés reposent sur le modèle climatique mondial ECHAM 4. Le «facteur humain» a été intégré dans le scénario d'émission B2 – une population mondiale en augmentation constante, des solutions locales durables aux problèmes économiques, sociaux et environnementaux. Ces éléments ont permis d'obtenir une simulation pour la période 2021–2050. Pour les autres estimations, on a eu recours aux résultats obtenus avec le procédé dynamique statistique. Les changements projetés pour les précipitations sont représentés ci-contre pour les semestres estivaux et hivernaux.



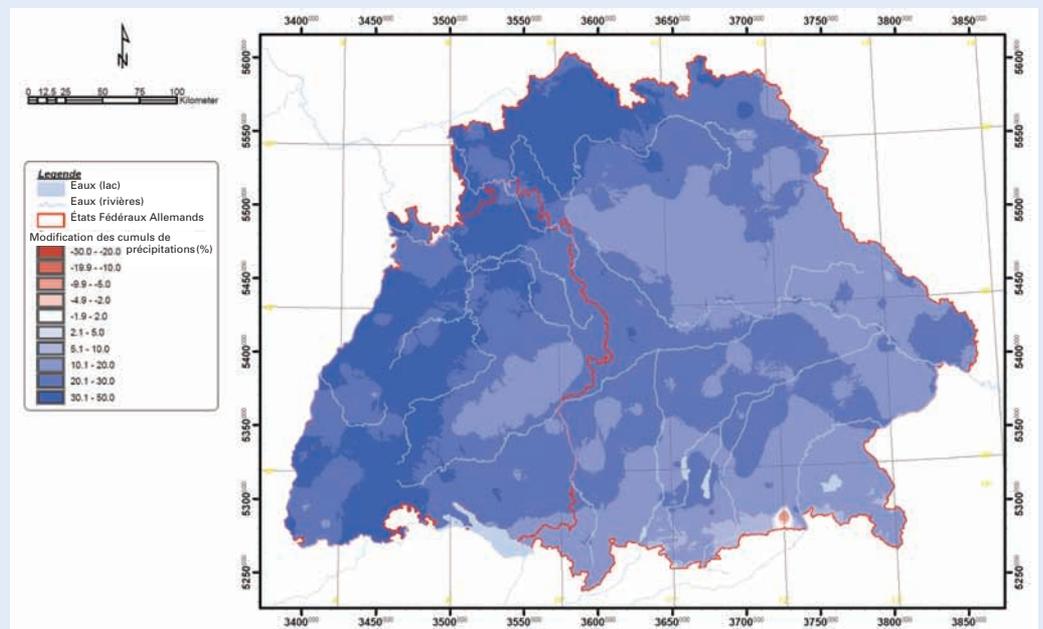
**MODIFICATION EN POURCENTAGE DE LA VALEUR TOTALE MOYENNE DES PRÉCIPITATIONS (MAI-OCT.) SCÉNARIO COMPARATIF Avenir – SITUATION PRÉSENTE**

*Sur le semestre hydrologique estival, seules des différences mineures sont constatées dans la répartition géographique des changements de précipitations; la plupart du temps, il s'agit de petites diminutions des précipitations.*



**MODIFICATION EN POURCENTAGE DE LA VALEUR TOTALE MOYENNE DES PRÉCIPITATIONS (NOV.-AVR.) SCÉNARIO COMPARATIF Avenir – SITUATION PRÉSENTE**

*Au cours des mois d'hiver, la somme des précipitations annuelles augmentera nettement. Sont concernés surtout la Forêt-Noire, l'Odenwald, le Spessart et le Rhön. Il y aura plus de précipitations aussi le long du Danube.*





# Des modèles hydrologiques comme instrument de prévision des écoulements

Les simulations climatiques mondiale et régionale ne permettent pas de préciser les effets du changement climatique sur la gestion de l'eau. C'est pourquoi il est nécessaire de développer des modèles hydrologiques affinés sur la base des résultats des modèles climatiques régionaux afin de déterminer les modifications des composantes hydrologiques du cycle de l'eau, en particulier l'augmentation des débits de crue suite au réchauffement climatique en Allemagne du Sud.

## APPRENDRE DU PASSÉ – PRÉVOIR L'AVENIR

Sur la base des résultats des mesures météorologiques et hydrologiques de 1951 à 2000, des scénarios climatiques pour le présent et l'avenir ont été mis au point selon les trois procédés. La qualité de ces simulations a été établie à l'aide des résultats des mesures de 1971 à 2000, c'est-à-dire que la simulation de l'état présent a été comparée aux données météorologiques effectives. Il a ainsi été possible de compenser en partie les erreurs systématiques du modèle climatique mondial. Les scénarios obtenus pour l'avenir s'étendent sur la période 2021–2050.

Afin de pouvoir fournir des données régionales exactes, les Länder de Bade-Wurtemberg et de Bavière ont été subdivisés en 33 zones de recherche – principalement selon des points de vue liés à la topographie et à la gestion de l'eau. Ces zones ont ensuite été regroupées en neuf régions.

## MODÈLES HYDROLOGIQUES

Pour estimer l'effet du changement climatique sur le cycle de l'eau, des modèles hydrologiques de haute résolution ont été établis avec un maillage de 1x1 km<sup>2</sup> pour de grandes parties du domaine KLIWA. Au Bade-Wurtemberg, ces modèles existent à grande échelle. En Bavière, des modèles hydrologiques sont en cours d'adaptation pour les bassins au nord du Danube, en particulier la région du Main. Il s'agissait avant tout d'examiner l'intensification des crues et inondations.

Pour cela, il a été fait appel aux résultats des scénarios climatiques régionaux. L'utilisation d'un modèle d'économie de l'eau a permis d'intégrer tous les éléments de l'économie de l'eau dans les calculs.

### Éléments de l'économie de l'eau

- Précipitations
- Régime des eaux
- Évaporation
- Recharge des nappes phréatiques
- Équivalent en eau de la couverture neigeuse





## MAILLAGE CARRÉ D'UN KILOMÈTRE DE CÔTÉ

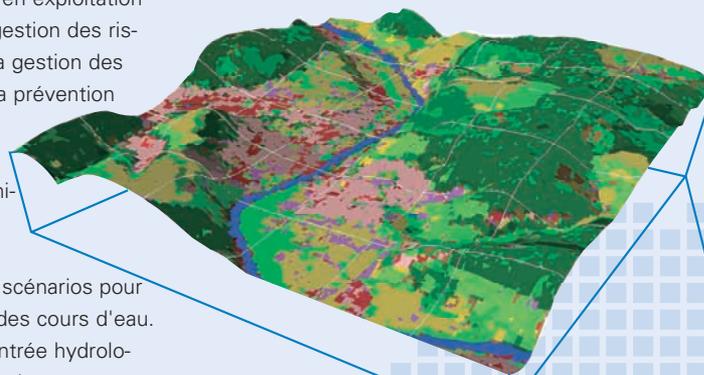
Les modèles hydrologiques sont des outils de calcul mathématique visant à décrire et à quantifier la répartition spatiale et temporelle des composantes essentielles du cycle de l'eau, telles que les précipitations, l'évaporation, l'infiltration, la rétention et l'écoulement. Avec leur aide, il est possible de représenter et d'évaluer les effets des changements des différents éléments sur le système global «gestion de l'eau». Les modèles hydrologiques décrivent notamment les processus partiels hydro-

logiques suivants avec une discrétisation spatiale de 1x1 km<sup>2</sup> sur les zones de recherche: couvert végétal, évaporation, accumulation, compactage et fonte de la neige, rétention d'eau dans le sol, accumulation et transport d'eau en surface, écoulement dans le réseau superficiel et retenue dans les lacs. S'y ajoutent des procédés visant à corriger et à convertir les grandeurs météorologiques mesurées.

### Possibilités d'application des modèles hydrologiques

- Estimation des effets des changements environnementaux, comme par exemple les changements climatiques possibles ou les modifications relatives à l'occupation des sols, sur la gestion des eaux (écoulement, infiltration et évaporation).
- Prévision permanente des écoulements pour les hautes, moyennes et basses eaux en exploitation opérationnelle en tant qu'outil de gestion des risques, notamment pour améliorer la gestion des basses eaux (étiage) et améliorer la prévention des inondations.
- Analyses régionales du bilan d'eau sur la base des bassins hydrographiques au sens de la directive cadre européenne sur l'eau.
- Établissement de pronostics et de scénarios pour la planification de l'aménagement des cours d'eau.
- Mise à disposition de données d'entrée hydrologiques pour les modèles de qualité des eaux et les modèles des eaux souterraines (par exemple pour l'économie de la chaleur et de l'oxygène, la recharge de la nappe, etc.)

|   |                         |   |                         |
|---|-------------------------|---|-------------------------|
|   | Champ                   |   | Surface imperméable     |
|  | Friche                  |  | Zone arboride           |
|  | Prairie extensive       |  | Forêt de feuillus       |
|  | Prairie intensive       |  | Forêt d'essences mixtes |
|  | Arboriculture intensive |  | Forêt de conifères      |
|  | Viticulture             |  | Surface perméable       |
|  | Urbanisation dispersée  |  | Zone humide             |
|  | Urbanisation dense      |  | Plan d'eau              |

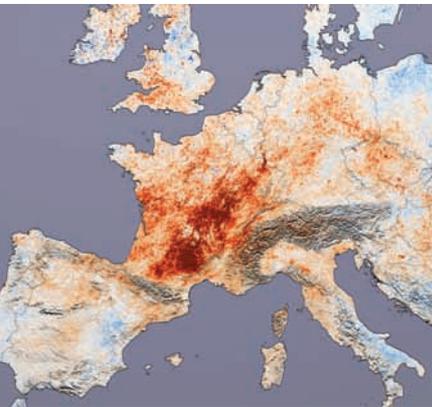


Dans le Bade-Wurtemberg, il existe des modèles d'économie de l'eau pour l'ensemble de la région. Ils sont étalonnés sur la base par des valeurs du jour et peuvent ainsi être mis en œuvre dans le cadre de calculs de pronostics et de scénarios. En Bavière, à l'heure actuelle, des modèles ont été établis pour la région du Main et les affluents du nord du Danube.



# Quel climat pour demain – les scénarios à l'horizon 2021–2050

Les résultats des trois méthodes de modélisation climatique régionale se distinguent sur certains points, mais la tendance est commune. Les valeurs déterminées ont été comparées, et validées puis elles ont été synthétisées en scénarios climatiques régionaux.



Été exceptionnel 2003 :  
canicule (régions rouges) en Europe

## PLUS DE CHALEUR, MOINS DE GEL

Les simulations climatiques indiquent que la température augmentera en moyenne de 1,7°C d'ici à 2050. En été, la température journalière moyenne augmente de 1,4°C à 15°C. En hiver, l'augmentation de la température est de 2°C pour atteindre 4,5°C. L'augmentation de la température est la plus forte entre décembre et février. Il est intéressant de souligner à cet égard que cela entraîne une augmentation des précipitations sous forme de pluie et une diminution des chutes de neige. Il est donc possible que l'on voie se multiplier les crues de petites et moyennes importance en hiver.

Le nombre de jours d'été (températures supérieures à 25°C) augmentera distinctement en comparaison d'aujourd'hui pour toutes les stations climatiques. Le nombre de jours chauds (plus de 30°C) doublera presque partout. En revanche, il y aura moins de jours de gel (température en dessous de 0°C) et de jours de glace (gel continu). Ces derniers jours diminueront de moitié dans la plupart des cas. Les saints de glace seront avancés: le dernier gel tardif viendra plus tôt, et dans certaines régions les tomates pourront être plantées jusqu'à deux semaines plus tôt.

## PLUS DE PRÉCIPITATIONS AU COURS DES MOIS D'HIVER

Plus la température de l'air est élevée, plus l'évaporation de l'eau est forte. À son tour, ce phénomène influence de manière déterminante le comportement des précipitations.

Au cours de la période de simulation, la tendance vers des hivers plus humides et des étés plus secs se poursuivra.

Alors qu'il pleuvra moins en été, jusqu'à 10 pour cent par rapport à aujourd'hui, il y aura en hiver considérablement plus de précipitations – dans certaines régions jusqu'à 35 pour cent. Ce sont les régions situées à l'ouest qui seront les plus touchées. La première place absolue en matière de précipitations reviendra à la Forêt-Noire.

En outre, en hiver, le nombre de jours de fortes précipitations (plus de 25mm) augmentera fortement, jusqu'à doubler pour certaines stations de mesure. En revanche, il y aura plus de jours sans précipitations: les périodes de sécheresse en été vont s'allonger.

## PERSISTANCE D'UNE MÉTÉO DOMINÉE PAR LES PERTURBATIONS ATLANTIQUE

Les types de temps d'ouest apportant des précipitations abondantes, vont également déterminer dans l'avenir notre temps pendant les mois d'hiver. Ainsi augmente la probabilité des crues et inondations.

## RÉSULTAT: LA TENDANCE SE POURSUIT

- Il fait plus chaud, surtout en hiver.
- Les étés sont légèrement plus secs, les hivers par contre nettement plus humides.
- Les perturbations Atlantique, qui peuvent apporter des précipitations supérieures, augmenteront. On peut en déduire que le risque de crue et d'inondation croît en hiver. Ce sont surtout les inondations moyennes qui vont augmenter, puisque, avec des hivers plus doux, la couverture neigeuse pourra se former et se résorber plusieurs fois.

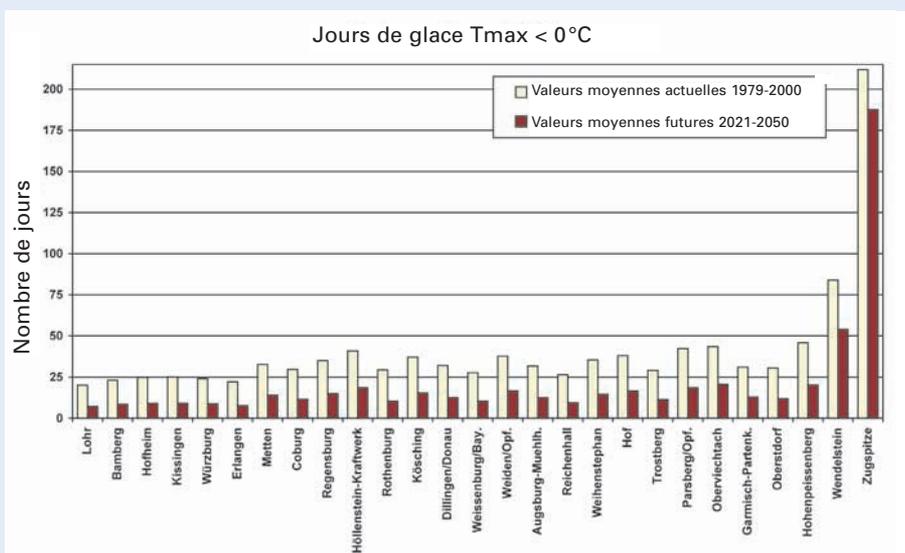
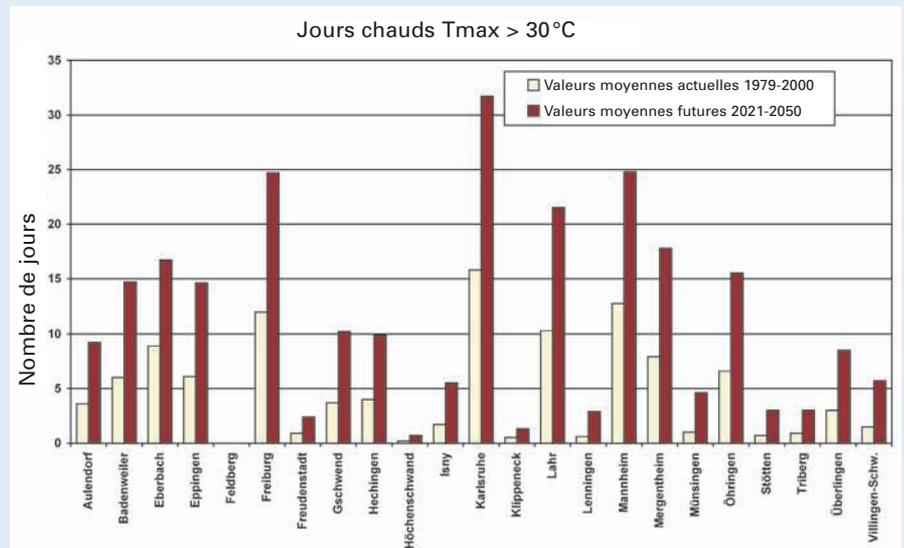


### UN PARFUM DE TOSCANE EN BADE-WURTEMBERG? L'EXEMPLE DE KARLSRUHE

La température moyenne, qui était de 15,1°C pour la période 1971–2000, augmentera à 17,4°C dans le scénario prévisionnel. Il y aura 32 jours chauds au lieu de 16 aujourd'hui. Cela signifie qu'une augmentation de la température de l'air de 2,3°C double la probabilité de l'apparition de températures au-dessus de 30°C. Par ailleurs, il n'y aura plus que quatre jours de gel continu contre onze à présent.

### L'HIVER BAVAROIS

Il gèlera également moins en montagne, sur la Zugspitze, par exemple, il y aura moins de 180 jours de glace. Jusqu'à présent il y en avait presque 210 par an.





# La stratégie de protection «Flexible And No Regret»

Bien que la chaîne «modèle global - modèles régionaux - modèles hydrologiques» manque encore de fiabilité, les résultats indiquent qu'il faudra compter dans l'avenir avec une multiplication des crues et des inondations. C'est la raison pour laquelle une stratégie d'adaptation aux inondations a été développée à titre préventif. Cette adaptation ne prévoit pas de surélever les murs de rive de plusieurs mètres pour les nouveaux édifices. Il s'agit au contraire d'amortir les conséquences du changement climatique programmé par des mesures qui peuvent être adaptées à long terme de manière appropriée et à relativement peu de frais.



## INTÉGRER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE: LE FACTEUR DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Lors de la planification des installations de protection contre les inondations, on prend le plus souvent comme base la valeur  $HQ_{100}$ . Cette valeur  $HQ_{100}$  correspond à une crue qui, du point de vue statistique, se produit une fois tous les 100 ans. Les édifices dimensionnés sur cette valeur doivent pouvoir résister à une «crue centennale». La simulation par les modèles hydrologiques des bassins du Bade-Wurtemberg et de Bavière montre que les débits de crue augmenteront particulièrement en hiver à presque toutes stations de jaugeage. C'est pourquoi il a été décidé dans les deux Länder, toujours dans une optique de prévention, de prendre en considération les effets du changement climatique par le biais d'un facteur de changement climatique lors du calcul des nouvelles installations de protection contre les inondations.

Pour le Neckar, on a ainsi déterminé que le débit d'une crue centennale ( $HQ_{100}$ ) va augmenter de 15 pour cent d'ici à 2050. C'est pourquoi il convient de multiplier désormais la valeur  $HQ_{100}$  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 leur adaptation ultérieure dans ce sens.

---

**Nouvelle valeur  $HQ_{100}$  pour le Neckar:**  
 $HQ_{100}(\text{nouveau}) = 1,15 \times HQ_{100}(\text{ancien})$

---

## CONSÉQUENCES ET FACTEURS CLIMATIQUES DIVERS

Dans le Bade-Wurtemberg, tous les bassins ont d'ores et déjà été examinés en détail. Les différences régionales du changement climatique s'expriment aussi dans les débits de crue à escompter.

Ainsi, un facteur de changement climatique de 1,25 a été déterminé pour la zone du Danube supérieur. Les crues plus petites à moyennes augmenteront également. L'écoulement  $HQ_5$  pour une crue qui se produit aujourd'hui à peu près tous les cinq ans augmente de 67 pour cent sur le Danube supérieur. Pour l'avenir, il convient donc de multiplier la valeur  $HQ_5$  du Danube supérieur avec le facteur de changement climatique 1,67. Dans le Hochrhein, le facteur de changement climatique pour la valeur  $HQ_5$  est par exemple de 1,45, il est de 1,24, son minimum, dans le bassin hydrographique du lac de Constance-Haute-Souabe.

En Bavière, sur la base des résultats des recherches effectuées, un facteur de changement climatique global de 15 pour cent a été introduit pour la valeur statistique  $HQ_{100}$ . Ainsi, d'une manière générale, les effets attendus du changement climatique sont déjà pris en considération pour la planification des nouveaux ouvrages de protection contre les crues et inondations. Le développement du facteur de changement climatique se poursuit via des recherches complémentaires, qui permettront également d'introduire une composante régionale.

## QUE CELA SIGNIFIE-T-IL EN PRATIQUE?

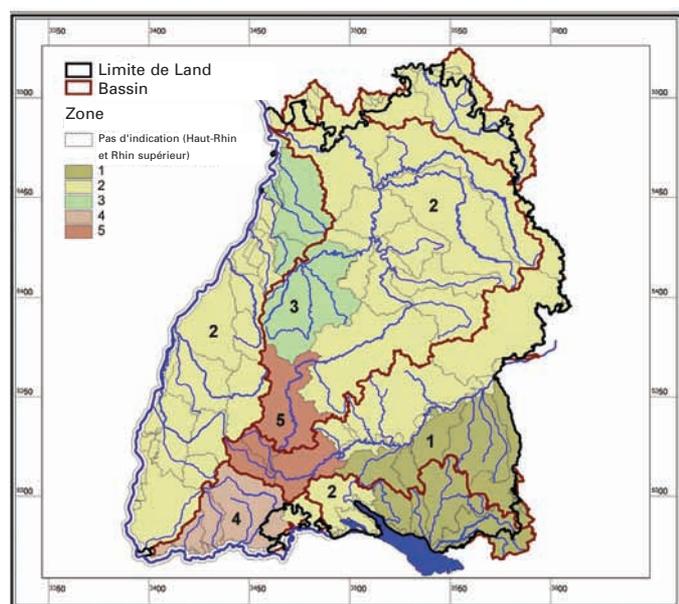
**Exemple pour les digues:** La digue est construite comme prévu mais, à l'extérieur, une bande de terrain est réservée afin de pouvoir relever la digue sans problème en cas de besoin.

**Exemple pour les ponts:** Le facteur de changement climatique régional est intégré lors de la phase de planification du pont, car il est quasi inenvisageable d'y apporter une adaptation ultérieure.

**Exemple pour les murs de rive:** Lors de la construction d'un nouveau mur de rive, le calcul des structures est conçu de manière à permettre le cas échéant une surélévation ultérieure sans difficulté.



## FACTEURS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BADE-WURTEMBERG



Facteurs de changement climatique  $f(T, K)$

| T (années) | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------|------|------|------|------|------|
| 2          | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 1,50 | 1,75 |
| 5          | 1,24 | 1,45 | 1,65 | 1,45 | 1,67 |
| 10         | 1,23 | 1,40 | 1,55 | 1,43 | 1,60 |
| 20         | 1,21 | 1,33 | 1,42 | 1,40 | 1,50 |
| 50         | 1,18 | 1,23 | 1,25 | 1,31 | 1,35 |
| 100        | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,25 | 1,25 |
| 200        | 1,12 | 1,08 | 1,07 | 1,18 | 1,15 |
| 500        | 1,06 | 1,03 | 1,00 | 1,08 | 1,05 |
| 1000       | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Remarque : Pour les fréquences  $T > 1000$  a, le facteur est égal à 1,0

## PERSPECTIVES

Jusqu'à présent, le projet KLIWA s'est surtout penché sur la problématique des crues et des inondations. Mais le changement climatique a d'autres effets sur le cycle de l'eau. Les étés que l'on prévoit plus secs et plus chauds peuvent être synonymes de basses eaux, et engendrer des problèmes pour les agriculteurs et la navigation fluviale. La modification de la distribution des précipitations influe également sur la formation des eaux souterraines et le refroidissement des centrales électriques. Il en va de même du développement des précipitations soudaines (orages), qui peuvent apporter en peu de temps de grandes quantités d'eau et causer des inondations localement. Ces questions sont essentielles pour les réseaux d'évacuation des eaux.

Avec le projet KLIWA, mené conjointement avec le DWD, les Länder de Bade-Wurtemberg et de Bavière disposent d'un instrument important qui leur permet d'identifier des mesures d'adaptation et d'atténuer ainsi les effets du changement climatique à l'échelle régionale. Mais, par-delà l'adaptation des mesures de protection contre les crues et les inondations, il est nécessaire de renforcer d'une manière générale les mesures de protection du climat afin de faire baisser les émissions de gaz à effet de serre. Bien que, en raison de l'inertie du système climatique, les températures continueront d'augmenter dans un premier temps, même en cas d'arrêt immédiat des émissions, il est essentiel que chaque personne s'investisse pur que nos descendants ne soient pas confrontés à un mal plus grand encore.

