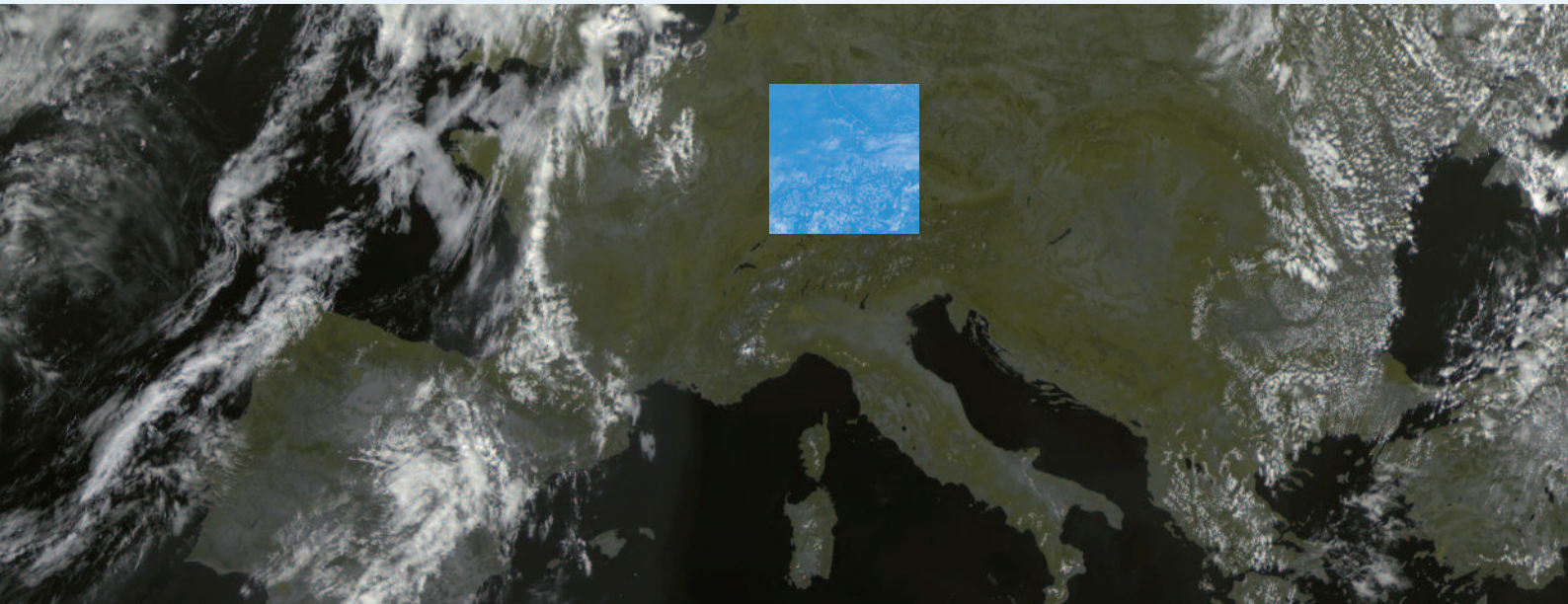


Le changement climatique en Allemagne du Sud **Ampleur – Conséquences – Stratégies**



EFFETS SUR LA GESTION DES EAUX



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR
UMWELT, LANDWIRTSCHAFT,
ERNÄHRUNG, WEINBAU
UND FORSTEN

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



1	LE CLIMAT DE LA TERRE	4
2	MODIFICATIONS CLIMATIQUES RÉGIONALES	6
3	INSTRUMENTS DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE	8
4	LE CLIMAT DE DEMAIN	10
5	MODÈLES D'ÉQUILIBRE HYDROLOGIQUES	12
6	EAUX SOUTERRAINES	14
7	BASSES EAUX	16
8	HAUTES EAUX	18
9	PLUIES INTENSES	20
10	ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES/PERSPECTIVES	22/23

MENTIONS LEGALES

ÉDITEUR

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

Bayerisches Landesamt für Umwelt

(Office de l'environnement du Land de Bavière)
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160 ,
86179 Augsburg

Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz

(Office de l'environnement, de la gestion de l'eau et de l'inspection du travail et de la main-d'œuvre de Rhénanie-Palatinat)
Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55116 Mainz

Deutscher Wetterdienst

(Service allemand de météorologie)
Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach

Pour le compte du

Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

(ministère de l'Environnement, du Climat et des Ressources énergétiques du Land de Bade-Wurtemberg)

Pour le compte du

Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit

(ministère de l'Environnement et de la Santé du Land de Bavière)

Pour le compte du

Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz

(ministère de l'Environnement, de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Viticulture et de la Forêt du Land de Rhénanie-Palatinat)

Informations complémentaires

www.kliwa.de
www.um.baden-wuerttemberg.de
www.stmug.bayern.de
www.mulewf.rlp.de
www.lubw.baden-wuerttemberg.de
www.lfu.bayern.de
www.dwd.de
www.luwg.rlp.de

Concept et réalisation:

ÖkoMedia GmbH, Stuttgart

Page de couverture – image satellite:

Deutscher Wetterdienst/EUMETSAT

Date: Novembre 2012

La présente brochure est imprimée sans impact sur le climat

ClimatePartner
klimateutral

Druck | ID: 53203-1211-1010



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR
UMWELT, LANDWIRTSCHAFT,
ERNÄHRUNG, WEINBAU
UND FORSTEN



Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

PRÉAMBULE

L'eau est l'un des biens les plus précieux que nous offre la nature. Notre existence est tributaire des ressources en eau. Les gestionnaires de cette ressource ont 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 en découler. 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 pour la protection contre les crues et la gestion des basses eaux.

Le cycle de l'eau est désormais en pleine mutation. Le changement climatique a d'ores et déjà des répercussions sur notre gestion des eaux. Nous savons 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. Nous ne sommes plus en mesure d'empêcher cette évolution, mais nous devons faire tout ce qui est en notre pouvoir pour contenir l'ampleur de ces changements dans des limites maîtrisables grâce à une politique de protection climatique volontaire et efficace.

En raison des changements climatiques, nous devons nous préparer à une multiplication des phénomènes météorologiques extrêmes au niveau régional. 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 doivent être identifiés par les gestionnaires des eaux afin de mettre en place des stratégies d'adaptation qui permettent de faire face à ces changements.

Grâce à KLIWA, il nous est aujourd'hui possible de faire des prévisions sur les répercussions du changement climatique sur les régimes de hautes et de basses eaux ainsi que sur les eaux souterraines en Allemagne du Sud. Ces prévisions présentent une certaine marge d'erreur. L'estimation convenable des incertitudes et la préparation appropriée du terrain aux changements à venir constituent deux défis majeurs. Mais un travail de base est également nécessaire sur la manière d'appréhender les imprécisions et de les faire comprendre au plus grand nombre. Quels seront les effets du changement climatique sur la qualité de l'eau de nos rivières et de nos fleuves ? Quelles sont, en application du principe de précaution, les adaptations nécessaires à court et à plus long terme ?

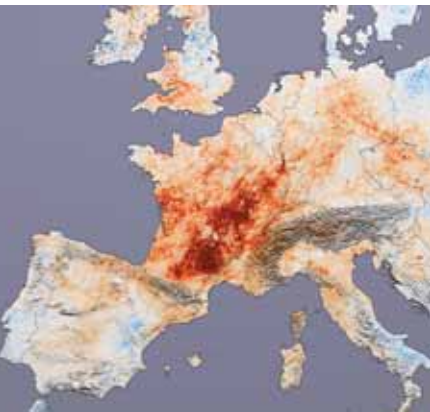
Une protection climatique cohérente au niveau mondial, national et régional peut nous permettre de maintenir les effets du changement climatique dans des limites raisonnables.

Il est essentiel de réduire au maximum les émissions de gaz à effets de serre. Il est urgent de réagir par des mesures adaptées même si nous savons que les répercussions sont 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 leur vulnérabilité 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.



Recrudescence des événements météorologiques extrêmes: **Le climat de la terre**

Les phénomènes météorologiques extrêmes sont en forte augmentation depuis le début des années 1990 chez nous: en 2003, l'Europe a connu pendant plusieurs semaines une canicule atteignant 40 °C et en août 2005, la région des Préalpes subissait une situation diluvienne suite à une période de pluies ininterrompues. À l'hiver 2007/2008, en partie marqué par des températures printanières, ont succédé des années avec des hivers très enneigés et un gel sévère, comme en décembre 2010. En 2011, il n'y a pas eu la moindre précipitation au mois de novembre. Cet enchaînement d'événements météorologiques inhabituels est-il l'effet du hasard?



L'été exceptionnel 2003: canicule en Europe (particulièrement marquée dans les zones en rouge)

... OU LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EST-IL DÉJÀ EN MARCHÉ?

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 à certaines périodes un climat tropical et a été recouverte d'une épaisse carapace de glace à d'autres. Les carottes de sédiments et les analyses de pollen fournissent des indications sur les variations climatiques que notre planète a traversées dans le passé. Les données météorologiques font l'objet d'enregistrements réguliers depuis 1860. Leur analyse montre que la température moyenne mondiale a connu une élévation d'environ 1 °C au cours des 150 dernières années. Ce chiffre, qui peut sembler dérisoire, est en réalité inquiétant si l'on tient compte du fait que la différence de température moyenne entre le climat du sud de l'Allemagne et le climat méditerranéen est de 2 à 3 °C.

UNE TERRE À EFFET DE SERRE

Nous devons l'agréable température moyenne mondiale de +15°C à l'effet de serre naturel: les gaz à l'état de trace présents dans l'atmosphère – vapeur d'eau, dioxyde de carbone et méthane – 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 cette raison gaz à effets de serre. Sans cet effet naturel de serre, une température moyenne de -18 °C constituerait des conditions de vie hostiles. Depuis le début de l'ère industrielle, la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère, qui s'était maintenue au cours des siècles précédents au niveau relativement constant de 280 ppm (parties par million), est en hausse et se situe désormais à 390 ppm. Cet effet de serre engendré par l'homme a une influence sur le cycle de l'eau

aussi bien à l'échelle mondiale que régionale.

LE PROJET KLIWA

Les situations météorologiques extrêmes et les crues des deux dernières décennies sont-elles les signes avant-coureurs du changement climatique? Comment le climat et les équilibres hydrologiques vont-ils se modifier chez nous – et comment nous y préparer?

C'est pour étudier ces questions que les Länder du Bade-Wurtemberg, de Bavière et de Rhénanie-Palatinat, ainsi que le Service allemand de météorologie coopèrent dans le cadre du programme d'étude « Changement climatique et conséquences pour la gestion de l'eau » (KLIWA, Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft). Des études sont menées depuis 1999. Cette coopération interdisciplinaire entre Länder a pour objectif de déterminer les possibles répercussions du changement climatique sur le régime des eaux dans les bassins fluviaux du sud de l'Allemagne, d'en montrer les conséquences et de définir des recommandations d'action en la matière.

Dans un premier temps, des historiques de mesures météorologiques et hydrologiques enregistrées sur de longues périodes ont été analysées afin de mettre en évidence des tendances de fond. Ces données constituent le point de départ de l'évaluation du climat futur au moyen d'une sélection de projections climatiques régionales pour l'avenir proche (2021-2050). Ces données climatiques sont la base de simulations utilisant des modèles à maillage fin de l'équilibre hydrologique des différents bassins fluviaux. Les études portent jusqu'à présent sur les domaines d'action hydrologiques suivants : hautes eaux, basses eaux, eaux souterraines, érosion des sols et qualité des eaux. Ces études doivent aboutir à des recommandations stratégiques concrètes pour chaque domaine d'action.

KLIWA SUR LE WEB

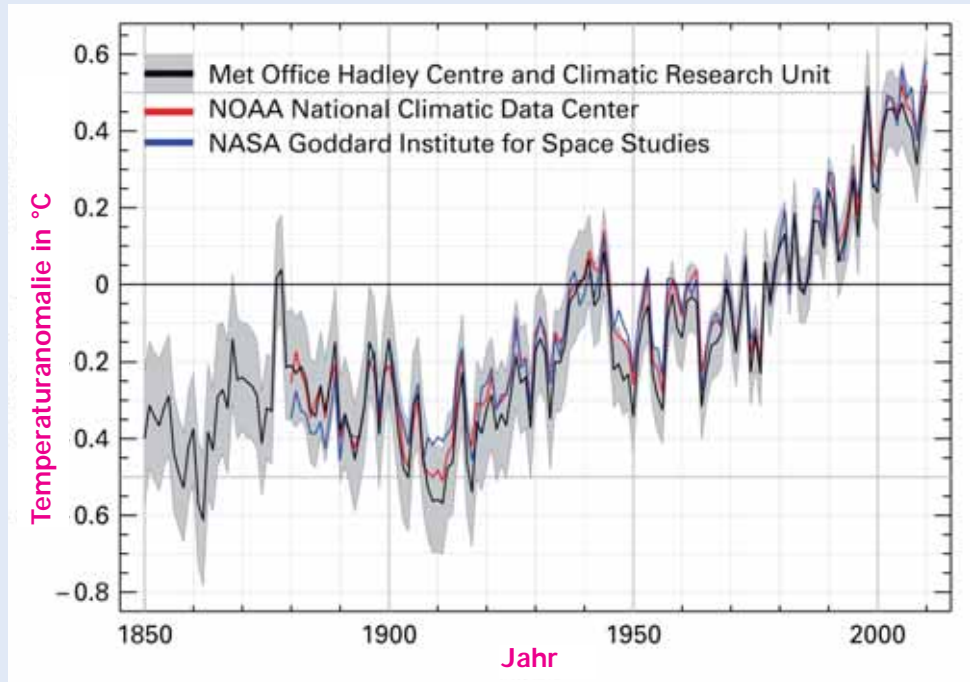
Pour obtenir de plus amples informations sur le projet KLIWA, consultez la page d'accueil du site www.kliwa.de. Dans la section des téléchargements, vous pouvez accéder à une série complète de rapports et de publications concernant les résultats et les méthodes de travail.



ÉVOLUTION MONDIALE DE LA TEMPÉRATURE DE 1850 À 2010

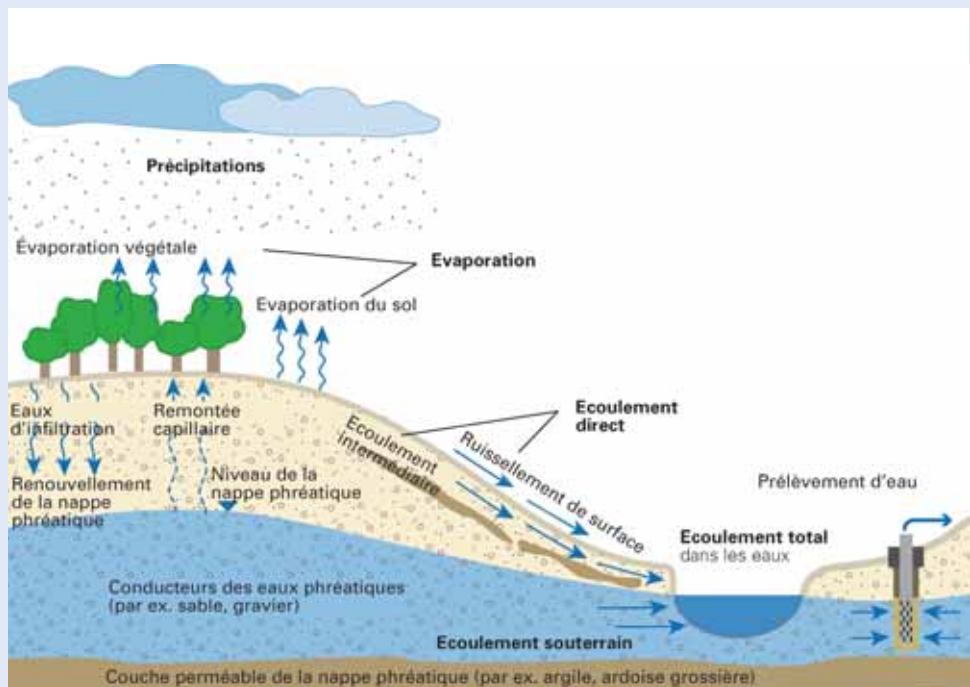
Le graphique montre la différence entre les températures moyennes annuelles et la température moyenne de la période de référence 1961-1990. Au début du XX^{ème} siècle s'est amorcée une nette tendance au réchauffement climatique, qui a connu une accélération sensible au cours des dernières décennies.

Source: Met Office Hadley Centre, Royaume-Uni, et Climatic Research Unit, université d'East Anglia, Royaume-Uni.



LE CYCLE DE L'EAU

La surface de la Terre est aux deux tiers recouverte d'eau. Une partie de cette eau circule selon un cycle puissant tout autour du globe terrestre sous forme de vapeur, de liquide ou de glace. L'eau qui s'évapore de la surface de la Terre s'élève en tant que vapeur d'eau, se condense pour former des nuages et retombe à la surface sous forme de pluie ou de neige. Ces précipitations s'écoulent par les 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.





Coup de projecteur sur les études de KLIWA

La modification régionale du climat

Le changement climatique n'est pas une vue de l'esprit. Le changement climatique provoqué par l'homme est en marche depuis longtemps – chez nous aussi. Pour évaluer l'évolution du climat jusqu'à nos jours, il faut dans un premier temps étudier les données du passé. L'étude de plusieurs séries de mesures réalisées sur de longues périodes permet de déterminer l'ampleur naturelle des fluctuations des données météorologiques ainsi que leurs tendances. Prêt de 400 stations météorologiques de mesure de la température et des précipitations dans le sud de l'Allemagne ont été analysées pour KLIWA, afin de disposer d'une base de données homogène pour l'évolution climatique future.



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

IL FAIT PLUS CHAUD

La température annuelle moyenne dans le sud de l'Allemagne a augmenté entre 1931 et 2010 de 0,9 à 1,2°C. La hausse est plus accentuée depuis les années 1990.

L'augmentation de la température est en moyenne plus importante pendant le semestre hivernal (novembre à avril) que pendant le semestre estival (mai à octobre).

NOËL BLANC – UN SOUVENIR D'ENFANCE

Qui dit hiver doux dit en général neige peu abondante. Une tendance nette ressort là aussi des longs historiques de mesures. Dans les régions de basse altitude notamment, situées jusqu'à 300 m au-dessus du niveau de la mer, et dans les régions occidentales, la durée d'enneigement a diminué de 30 à 40 % depuis 1951/52. Une baisse de 10 à 20 % a été observée dans les régions de moyenne altitude. En haute altitude l'enneigement reste important, voire supérieur à la normale. Le nombre de jours de neige est en forte diminution depuis le début du XXI^{ème} siècle. Or l'enneigement constitue une donnée importante en hydrologie, notamment pour l'alimentation du réseau fluvial et le renouvellement de la nappe phréatique.

ÉTÉS SECS, HIVERS PLUVIEUX

Les quantités de précipitations annuelles sont assez stables dans la plupart des régions du sud de l'Allemagne au cours de la période examinée. Mais la répartition saisonnière des précipitations a changé. Le semestre hivernal est plus humide. Dans certaines régions les volumes de précipitations ont augmenté de près de 30 %. Ce phénomène touche plus particulièrement la Forêt-Noire et le nord-ouest du Bade-Wurtemberg, en Bavière la Franconie et certaines parties de la Forêt bavaroise, et en Rhénanie-Palatinat les massifs de l'Eifel et du Westerwald. Aucune tendance franche à long terme n'a

pu être constatée sur le semestre estival. Il semblerait toutefois qu'il soit dans l'ensemble plus sec, en particulier entre juin et août.

FLUX D'OUEST PERTURBÉ: LE VENT QUI APORTE LA PLUIE

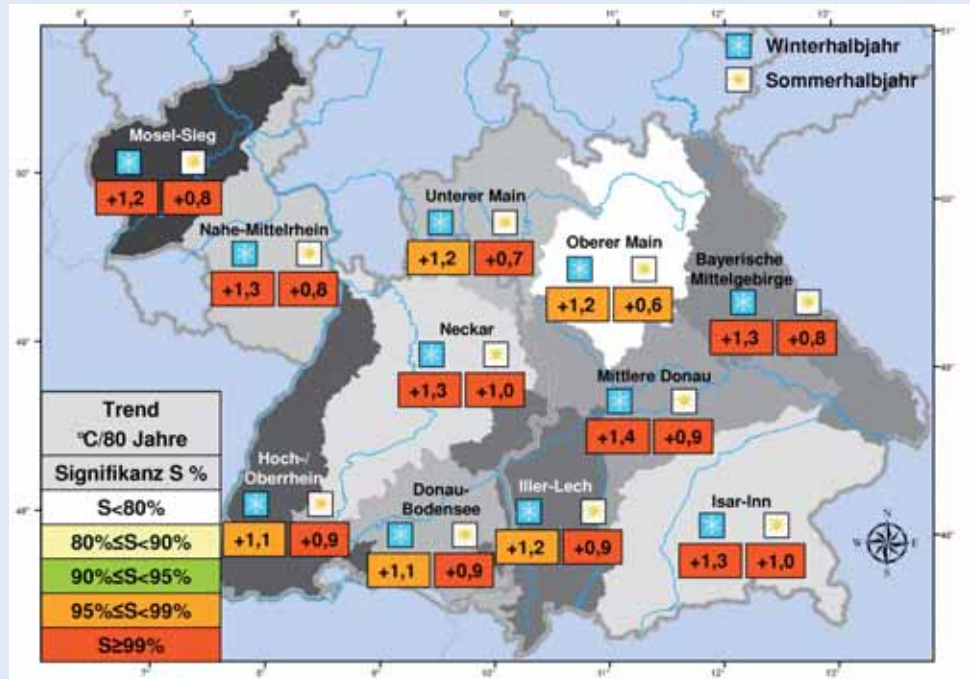
L'intensification des précipitations en hiver s'explique par la recrudescence de certaines situations météorologiques globales à l'échelle européenne. Des analyses de séries chronologiques relevées depuis 1881 ont permis de constater que les perturbations atmosphériques étaient de plus en plus fréquentes pendant les mois de décembre à février. Une situation météorologique de grande ampleur qui joue un rôle essentiel sur le plan de l'hydrologie est le « flux d'ouest perturbé », généré par l'anticyclone des Açores et par la dépression sur l'Atlantique Nord. Ce flux circule de l'Atlantique vers l'Europe occidentale et apporte de l'air marin plus doux. Il s'accompagne souvent de précipitations abondantes, généralement sous forme de pluie sur les régions à basse altitude. Ces situations météorologiques globales peuvent donner naissance à de violentes tempêtes hivernales. La tempête « Lothar », qui a causé des ravages à travers toute l'Europe en décembre 1999, ou encore les tempêtes « Kyrill » en janvier 2007 et « Xynthia » fin février 2010, en sont de tristes exemples.

MONITORING DANS KLIWA

Une tâche importante de KLIWA consiste à collecter des données climatiques et hydrologiques dans le but de documenter des variabilités et des évolutions. ces données constituent la base de toutes les études comparatives ultérieures. À cet effet, un rapport d'évaluation (dernière mise à jour en 2011) est publié tous les 5 ans sur le site www.kliwa.de.

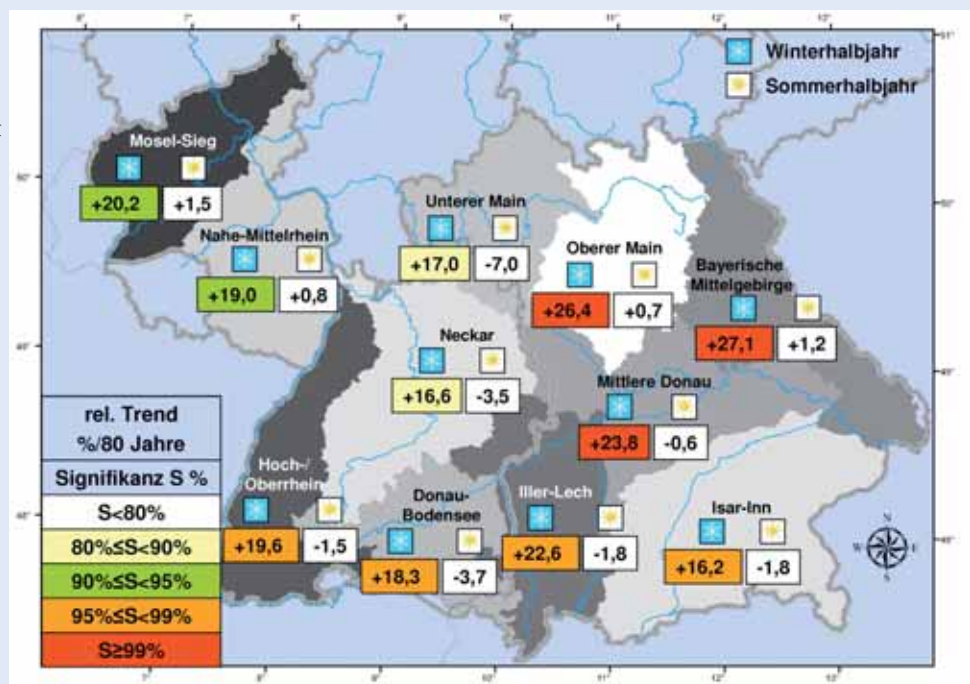
AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 1931 ET 2010

Le graphique montre l'évolution des valeurs moyennes de la température de l'air par bassin et par semestre hydrologique. Entre 1931 et 2010, les hausses sont plus prononcées en hiver et se situent entre +1,1 et +1,4 °C, qu'en été où elles varient de +0,6 % à +1,0 °C.



ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS PAR BASSIN ENTRE 1931 ET 2010

Le graphique montre le changement des précipitations par bassin au cours des semestres hydrologiques. On remarque des différences sensibles par saison: au cours du semestre estival, les tendances ne sont pas homogènes, au cours du semestre hivernal des augmentations significatives de +17 à +27 % sont observées entre 1931 et 2010.





Modèles climatiques mondiaux et régionaux

Instrument de la recherche climatique

Il ne fait aucun doute que le changement climatique mondial est inéluctable. Un signe visible du réchauffement planétaire est le recul de nombreux glaciers dans les Alpes. Même des mesures de protection climatique rapides et efficaces ne pourraient pas enrayer le changement climatique, car l'oxyde de carbone actuellement libéré dans l'atmosphère contribuera au réchauffement pendant plusieurs décennies encore. Même si les émissions de gaz à effets de serre étaient réduites à zéro, une utopie au regard des énormes besoins en énergie du monde actuel, le changement climatique suivrait malgré tout son cours sous une forme atténuée. Il importe par conséquent de développer des stratégies d'adaptation.

MÉTÉO ET CLIMAT

La **MÉTÉO** décrit l'état de l'atmosphère à un moment donné,... mais pas seulement, puisque la nature de la surface terrestre influe aussi sur la météo.

Le **CLIMAT** en revanche est le comportement météorologique moyen sur une large étendue territoriale et sur une période prolongée, en général de 30 ans ou plus.

Deux 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 Gulf Stream, un courant marin chaud.
- Les surfaces enneigées et glacées contribuent à refroidir le climat, car elles réfléchissent la lumière du soleil.

MODELES CLIMATIQUES MONDIAUX

Les prévisions météorologiques sont souvent difficiles. Qui d'entre nous n'a pas un jour organisé une excursion sur la foi d'une prévision météo annonçant du soleil, pour se retrouver bel et bien douché par une averse? Les moyens dont nous disposons actuellement ne permettent pas de faire des prévisions météorologiques fiables au-delà de 5 à 7 jours. L'évaluation à long terme de l'évolution du climat de la Terre est une tâche infiniment plus complexe, car elle exige la prise en compte dans les modèles de calcul d'un grand nombre de paramètres et de grandeurs qui s'influencent mutuellement. Ces interactions ne sont que partiellement connues. Les modèles climatiques mondiaux s'appuient sur un modèle atmosphérique que vient compléter un modèle océan, neige, glace et végétation. Ceci nécessite une puissance de calcul extrêmement importante dont seuls peuvent venir à bout des supercalculateurs. Les influences anthropogènes (le « facteur humain ») sont prises en compte par les différentes hypothèses relatives aux émissions de gaz à effets de serre (scénarios du GIEC).

Pour réaliser un modèle climatique mondial, la Terre est découpée en mailles. La puissance de calcul des ordinateurs actuels permet pour le moment un maillage d'environ 150 km de côté. Compte tenu des incertitudes relatives à l'évolution de la population mondiale, de la croissance économique, de la consommation énergétique, etc..., mais aussi des imprécisions inhérentes aux modèles, les résultats obtenus pour la température ou les précipitations se situent à l'intérieur d'une certaine plage (graphique en haut à droite). C'est ce qui explique notamment la prévision du GIEC (Groupe d'Experts

Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) selon laquelle la température mondiale pourrait augmenter dans une plage de 1,1 à 6,4 °C d'ici 2100.

MODELES CLIMATIQUES REGIONAUX

Le maillage d'un modèle climatique mondial est trop grossier pour une étude climatique régionale. Les particularités régionales telles que chaînes de montagnes ou vallées fluviales passeraient entre les mailles. Pour la déduction d'hypothèses climatiques régionales avec la finesse de résolution requise, il existe différentes méthodes, ayant chacune leurs forces et leurs faiblesses, pour prévoir l'évolution possible du climat à travers des projections climatiques régionales.

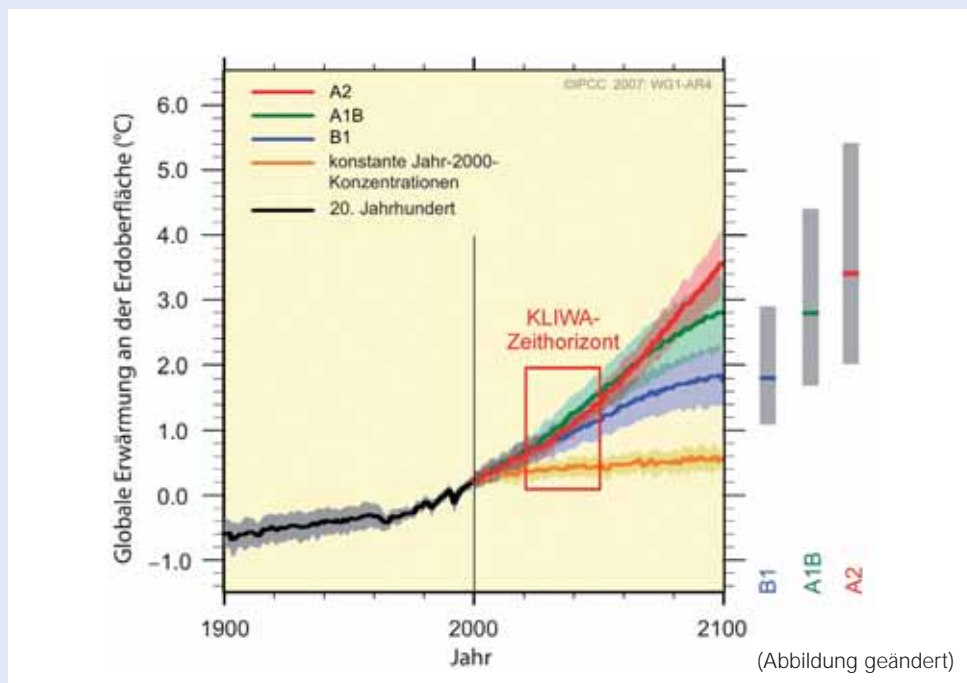
L'EVENTAIL DES PROJECTIONS CLIMATIQUES REGIONALES

Plusieurs modèles sont mis en œuvre et combinés entre eux pour former un système de modèles (voir l'illustration en bas à droite). L'interprétation de différentes projections climatiques réalistes (effet d'ensemble) fait apparaître un éventail possible pour le climat du futur, ce qui permet de mieux évaluer sa variabilité et les incertitudes en jeu. Les projections statistiques régionales utilisées dans un premier temps dans KLIWA (WETTREG) ont récemment été complétées par des projections dynamiques (COSMO-CLM). De nouvelles projections climatiques sur la base de modèles perfectionnés seront disponibles sous peu. L'ampleur du changement climatique est déduite d'une comparaison entre les données climatiques mesurées de la période (1971-2000) avec celles calculées pour le futur. On considère dans KLIWA le futur proche (période 2021-2050) pour la modélisation hydrologique. Seuls les paramètres climatiques sont étudiés pour l'avenir lointain (période 2071-2100).

RECHAUFFEMENT GLOBAL A LA SURFACE DE LA TERRE

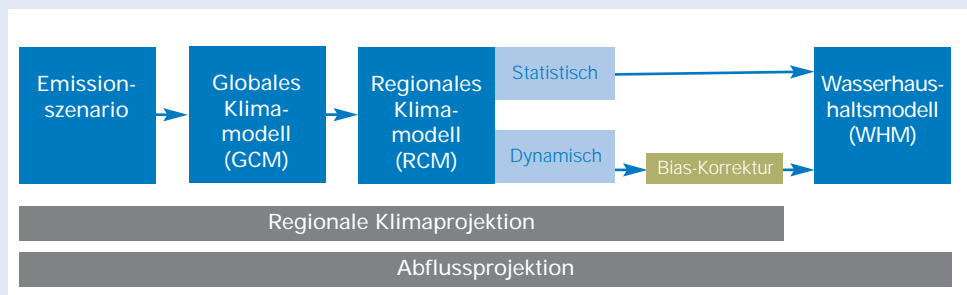
Les résultats des modélisations élaborées en 2007 sur la base des scénarios d'émissions du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) montrent les évolutions possibles d'un réchauffement global de notre planète.

À l'heure actuelle, les simulations régionales dans KLIWA font intervenir le scénario d'émissions A1B (ligne verte) pour la prévision d'un climat réaliste de demain. Le scénario A1B suppose qu'à l'avenir, le développement technologique dans le domaine de l'énergie mettra l'accent sur une exploitation équilibrée des combustibles fossiles et non fossiles.



MODELISATION EN CASCADE POUR LES ETUDES RELATIVES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE REGIONAL

L'enchaînement nécessaire entre les modèles pour établir des projections climatiques régionales et simuler les écoulements futurs est représenté sous forme d'une cascade de modèles.





Simuler l'avenir de notre climat

Le climat de demain

Différents types de modèles climatiques permettent de simuler l'avenir. L'ensemble des projections climatiques calculées fournissent un éventail de valeurs possibles pour les températures et les précipitations. Les résultats des simulations régionales 2021-2050 se singularisent sur des points de détail, mais une même tendance générale se détache: les hivers seront de manière générale 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.

PLUTOT CHAUD ET MOINS DE GLACE

Les simulations climatiques régionales réalisées pour le sud de l'Allemagne dans le cadre de KLIWA montrent que la température pourrait augmenter en moyenne de 0,8 à 1,7 °C jusqu'en 2050. Les moyennes annuelles de ces hausses ne sont pas homogènes. Le réchauffement global aura pour conséquence une augmentation des pluies et un enneigement plus faible en hiver. Les graphiques en page de droite présentent à titre d'exemple les résultats des dernières projections climatiques utilisées avec un modèle climatique régional dynamique. Ces résultats de simulation se situent dans la plage des études KLIWA réalisées jusqu'à présent.

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

FLUX D'OUEST PERTURBE

Les situations météorologiques de flux d'ouest, en particulier le « flux d'ouest perturbé », sont responsables de fortes précipitations et exerceront à l'avenir une emprise de plus en plus importante sur la météo hivernale. Il en découle une probabilité de crues et d'inondations plus élevée.

DES PRECIPITATIONS PLUS ABONDANTES EN HIVER

Plus la température de l'air est élevée, plus l'évaporation est importante. Ceci influence de manière considérable sur le cycle de l'eau.

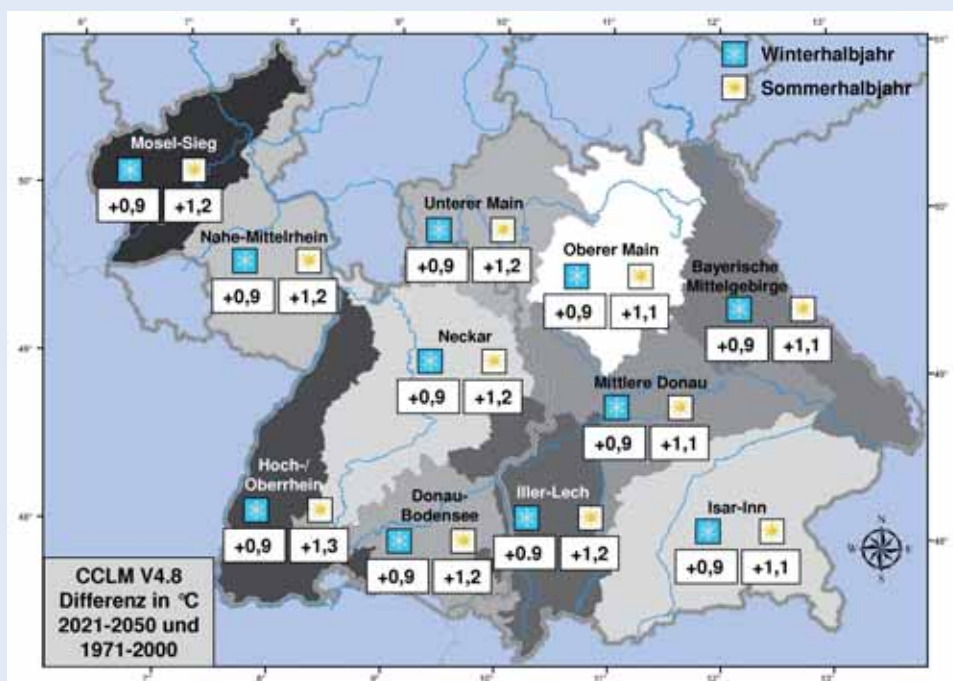
Les simulations climatiques montrent que la tendance actuelle aux hivers plus humides et aux étés plus secs se maintiendra: alors que les étés connaîtront des pluies en recul jusqu'à 10 %, l'hiver enregistrera une pluviosité bien plus importante, qui pourrait augmenter jusqu'à 30 % dans certaines régions. Les plus fortes précipitations sont prévues dans les zones de barrage météorologique aux flux d'Ouest. En outre, on assistera en hiver à une nette recrudescence des jours de fortes précipitations (plus de 25 mm), qui pourront même doubler dans certaines régions. En revanche, les journées sans précipitations seront plus fréquentes: les périodes de sécheresse estivale seront plus longues. Pour l'avenir lointain (jusqu'en 2100), les projections climatiques font majoritairement apparaître un recul des précipitations annuelles moyennes.

CONCLUSION: LA TENDANCE SE MAINTIENT.

- Il fera dans l'ensemble plus chaud, en été comme en hiver.
- Les étés seront un peu plus secs, tandis que les hivers seront nettement plus humides.
- Les situations de flux d'Ouest, susceptibles d'apporter des précipitations plus abondantes en hiver, se multiplieront. Les périodes de sécheresse estivale seront plus longues.

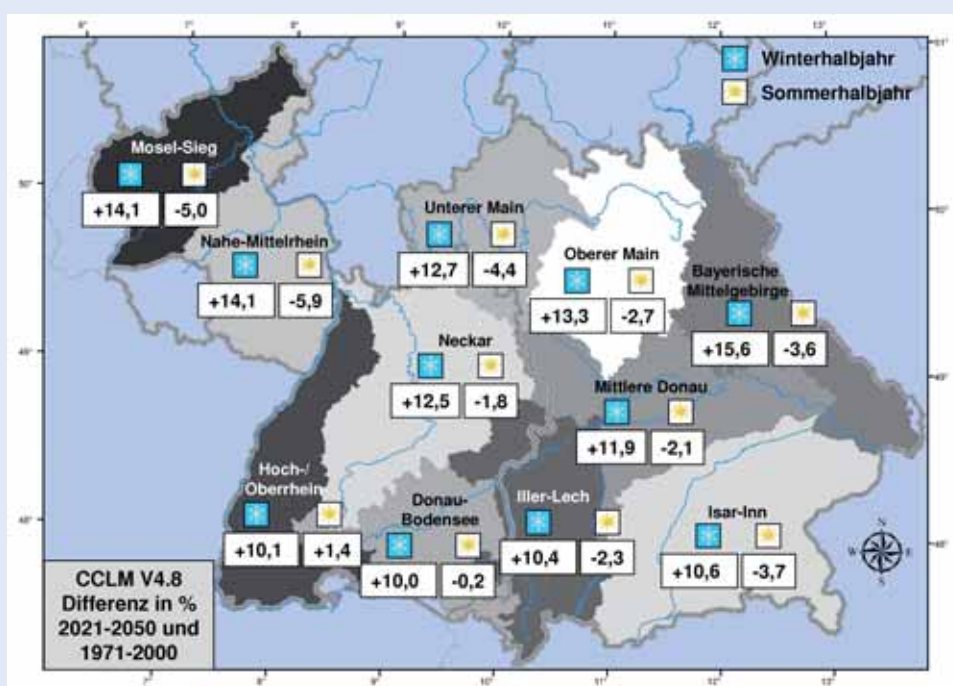
HAUSSE DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR JUSQU'EN 2050

Le graphique montre l'évolution de la température moyenne de l'air par bassin hydrographique entre les deux périodes 2021-2050 et 1971-2000. Les données chiffrées illustrent les résultats de la projection climatique régionale CCLM Version 4.8 pour les semestres hydrologiques. La température continue à progresser, mais les variations sont légèrement plus faibles en hiver (+ 0,9 °C) qu'en été (+ 1,2°C).



MODIFICATION DES PRÉCIPITATIONS PAR BASSIN HYDROGRAPHIQUE JUSQU'EN 2050

Le graphique montre la modification des précipitations par bassins entre les deux périodes 2021-2050 et 1971-2000. Les données chiffrées illustrent les résultats de la projection climatique régionale CCLM Version 4.8 par semestres hydrologiques. Les modifications varient selon les saisons. On constate des hausses importantes en hiver jusqu'à +15 %, et de légers reculs en été jusqu'à - 6 %.





Instruments de simulation des écoulements

Modèles d'équilibre hydrologique

Les projections climatiques mondiales et régionales ne permettent pas à elles seules de tirer des conclusions sur les conséquences du changement climatique sur la gestion de l'eau. Il est donc nécessaire d'utiliser les résultats de modèles climatiques régionaux pour « nourrir » des modèles hydrologiques à haute résolution. Cette méthode est le seul moyen d'appréhender les variations des modes d'écoulement, en particulier l'aggravation des phénomènes de crues ou les évolutions des débits d'étiage, induites par le changement climatique dans le sud de l'Allemagne.



Durch die zunehmenden milderen Winter steigt vor allem im Winterhalbjahr die Hochwassergefahr im Süden Deutschlands.

UN QUADRILLAGE TRES SERRE – LE MODELE HYDROLOGIQUE TOOLBOX

Les modèles hydrologiques constituent à l'heure actuelle la meilleure méthode de quantification des conséquences du changement climatique sur l'écoulement des eaux. La connaissance de l'ampleur des changements prévisibles est indispensable pour concevoir et évaluer des stratégies d'adaptation. Les modèles hydrologiques sont un moyen de calculer la répartition dans le temps et dans l'espace des composantes hydrologiques essentielles que sont les précipitations, l'évaporation, les infiltrations, les réserves d'eau et les écoulements. Ils permettent de représenter et d'évaluer les répercussions des changements sur l'ensemble du système « ressources en eau ».

Les modèles hydrologiques décrivent sur la base d'un maillage fin les processus suivants (voir le graphique en page de droite): évaporation, accumulation, condensation ou fonte des neiges, accumulation des eaux souterraines, acheminement vers les cours d'eau et rétention dans les lacs.

Les incertitudes des différents modèles dans la chaîne Modèle mondial > Modèle régional > Modèle hydrologique débouchent au final sur un éventail de modifications possibles.

Possibilités d'application des modèles d'équilibre hydrologiques:

- Estimation des répercussions de changements environnementaux, notamment du changement climatique, ou de changements d'affectation des sols, sur l'équilibre hydrologique (écoulement, infiltration et évaporation).
- Instrument de prévision continu des écoulements des basses eaux, des eaux

moyennes et des hautes eaux en service opérationnel comme élément de gestion des risques et notamment pour améliorer la gestion des basses eaux ainsi que la gestion des crues et inondations (prévision, alertes précoces).

- Études régionales des ressources en eau sur la base des bassins hydrographiques en conformité avec la directive-cadre européenne sur l'eau.
- Mise à disposition de grandeurs hydrologiques pour les modèles de qualité des eaux et les modèles des eaux souterraines (p. ex. pour la gestion des températures et des teneurs en oxygène, les flux et les transport de substances dans les eaux souterraines, etc.).

DES BASSINS FLUVIAUX AU CARRÉ

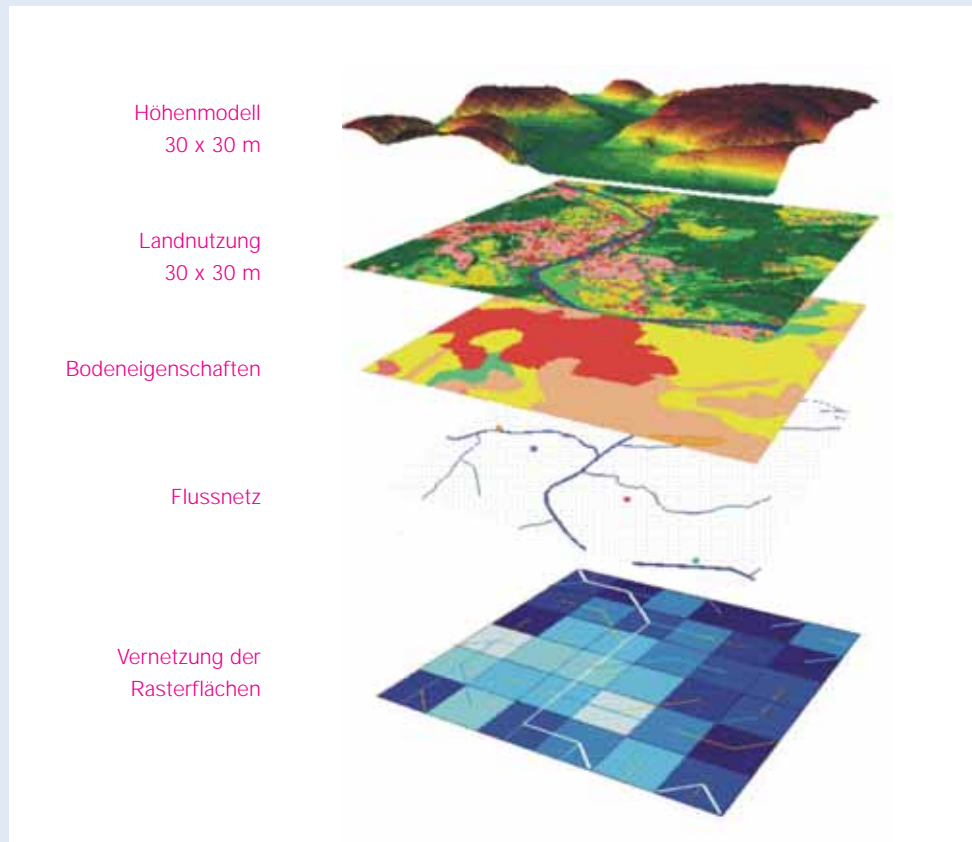
Afin de pouvoir estimer les effets du changement climatique sur le régime des eaux, des modèles hydrologiques ont été développés pour les bassins fluviaux de KLIWA selon un maillage carré de 1 x 1 km. KLIWA avait avant tout pour objectif d'examiner à l'aide de ces modélisations la question de l'aggravation prévisible des crues et des inondations sous l'effet du changement climatique.

L'accent est mis à l'heure actuelle sur les études relatives aux basses eaux. La simulation des débits journaliers actuels et futurs est entreprise dans le cadre de cette problématique pour les bassins hydrographiques KLIWA (voir le graphique du bas en page de droite) et de l'avenir. Des modèles de recharge spécifiques sont utilisés en complément pour déterminer le renouvellement de la nappe phréatique.



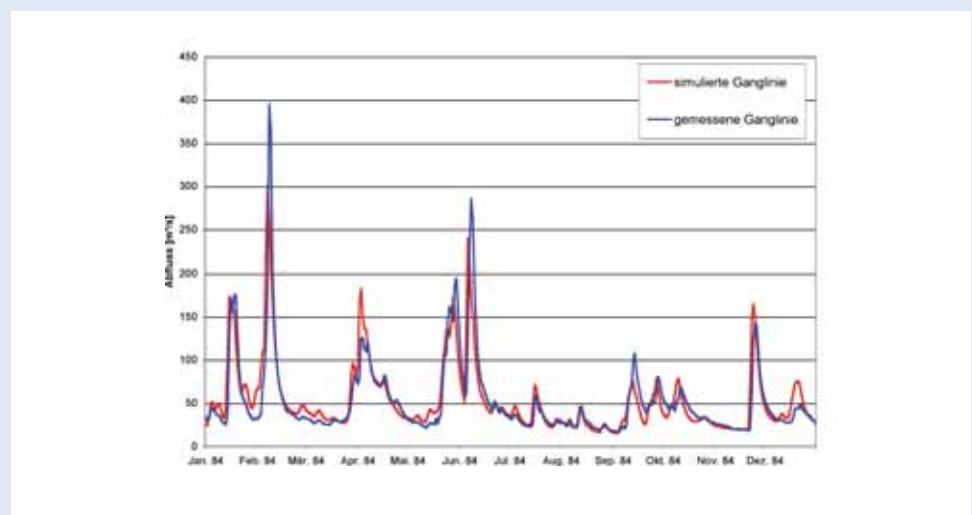
BASES DE DONNEES DES MODELES D'EQUILIBRE HYDROLOGIQUES

De nombreux ensembles de données numériques (entre autres : modèle numérique de terrain, classification satellite de usage des sols, caractéristiques des sols, réseau des cours d'eau superficiel) constituent la base des modèles hydrologiques. Pour chaque maille d'un modèle hydrologique, on peut saisir jusqu'à 16 usages de sol différents et leurs caractéristiques en matière d'évaporation et d'écoulement.



RESULTAT D'UNE MODELISATION DU BILAN HYDROLOGIQUE

Exemple de comparaison entre un hydrogramme mesuré et un hydrogramme simulé grâce à un modèle hydrologique sur une station de jaugeage pour l'année 1984.





Notre principale réserve d'eau potable

Les nappes phréatiques

En Allemagne du Sud, environ 80 % de l'eau potable proviennent des réserves souterraines des nappes phréatiques. Les effets du changement climatique sur le régime des nappes phréatiques revêtent de ce fait une grande importance pour la gestion de l'eau. Il va sans dire que l'approvisionnement en eau potable doit être assuré à l'avenir, même sous des conditions climatiques modifiées.



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

LES MESURES DE TERRAIN RÉVÈLENT DE PREMIÈRES MODIFICATIONS

Le niveau des nappes phréatiques et les débits des sources sont suivis depuis plusieurs décennies, dans certains cas depuis plus d'un siècle. Les historiques de données obtenus fournissent des indications précieuses sur l'évolution à long terme du niveau des nappes phréatiques et des débits des sources. Une analyse systématique de séries de mesures triées sur le volet dans les principaux aquifères des Länder du Bade-Wurtemberg, de Bavière et de Rhénanie-Palatinat a montré que l'on peut d'ores et déjà constater des changements au niveau des amplitudes saisonnières. C'est ainsi que la valeur maximale apparaît désormais bien plus tôt en cours d'année que ce n'était le cas au début des observations. Une modification qui est une conséquence directe des changements intervenus dans le régime des températures et des précipitations. En outre, on observe fréquemment une augmentation de l'amplitude entre le minimum et le maximum des variations saisonnières.

LES TENDANCES DE LA RECHARGE DES NAPPES PHREATIQUES

Les changements intervenus dans le régime des précipitations – moins abondantes en été et plus abondante durant la période hivernale – auront des répercussions sensibles sur les eaux souterraines: par rapport à aujourd'hui, les eaux d'infiltration seront encore plus faibles en été et plus abondantes en hiver. Pendant la période de végétation, l'eau disponible dans le sol (graphique en haut à droite) diminuera donc à l'avenir. L'évolution de l'indice de sécheresse à la hausse de près de 14 jours par an pour la période 2021-2050 corrobore cette évolution dans les trois Länder étudiés. La recharge des nappes phréatiques (graphique en bas à droite) s'élève actuellement

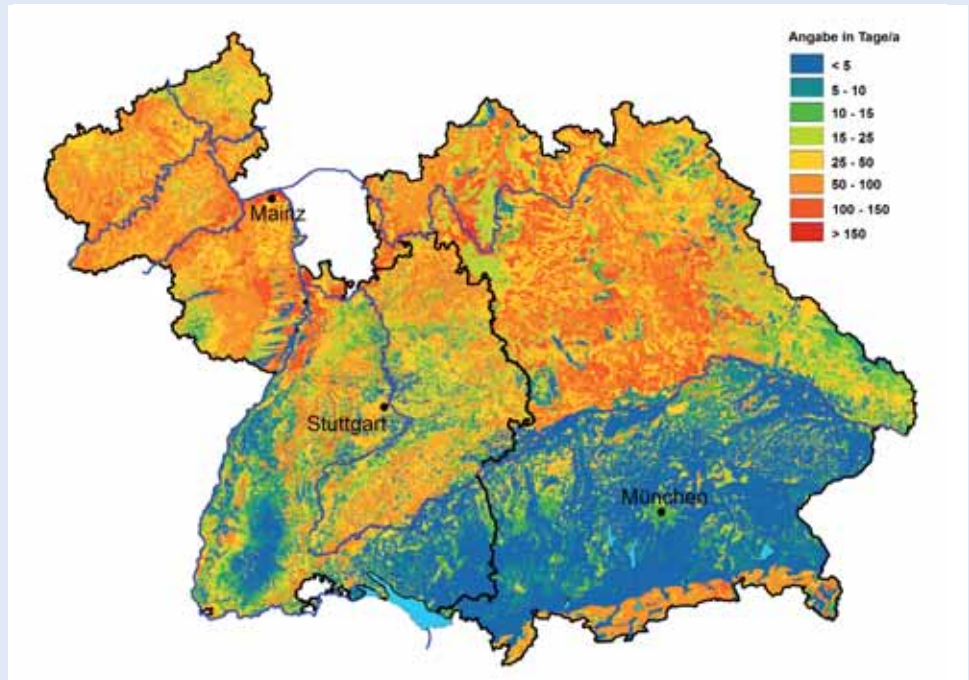
dans le Bade-Wurtemberg et la Bavière à un peu plus de 200 mm pour la moyenne annuelle, et à plus de 100 mm en Rhénanie-Palatinat. A titre de comparaison: le niveau moyen des précipitations s'élève à environ 960 mm dans le Bade-Wurtemberg, à env. 930 mm en Bavière et à env. 780 mm en Rhénanie-Palatinat. Contrairement à l'indice de sécheresse, les modifications des valeurs annuelles moyennes de la recharge des nappes phréatiques pour la période 2021-2050 devraient rester faibles. Les calculs des teneurs en eau des sols réalisés selon le scénario climatique WETTREG 2006 (ECHAM/A1B) font apparaître en Rhénanie-Palatinat de légères augmentations (jusqu'à 15 mm/an) du renouvellement de la nappe phréatique, mais plutôt des reculs, pouvant atteindre 30 mm/an, dans le Bade-Wurtemberg et en Bavière.

ACTIONS RECOMMANDEES

Le suivi régulier des niveaux et de la qualité des nappes phréatiques constitue la base d'une gestion durable de l'eau. Compte tenu des répercussions possibles du changement climatique, il est indispensable de poursuivre systématiquement l'exploitation des réseaux de mesure. Les périodes de sécheresse estivale prolongées peuvent dès aujourd'hui entraîner des pénuries d'eau localisées limitées dans le temps. Pour éviter des situations de pénurie d'alimentation en eau, il est notamment nécessaire d'étendre les interconnexions régionales et transrégionales. Des méthodes d'irrigation plus efficaces doivent être développées dans le domaine agricole. Parallèlement aux phases de sécheresse prolongée en été, des périodes de précipitations abondantes continues pourraient se produire en hiver, avec une augmentation locale du niveau des nappes phréatiques. Cette éventualité doit être prise en compte dans l'attribution des terrains à bâtir dans les zones potentiellement menacées par des inondations.

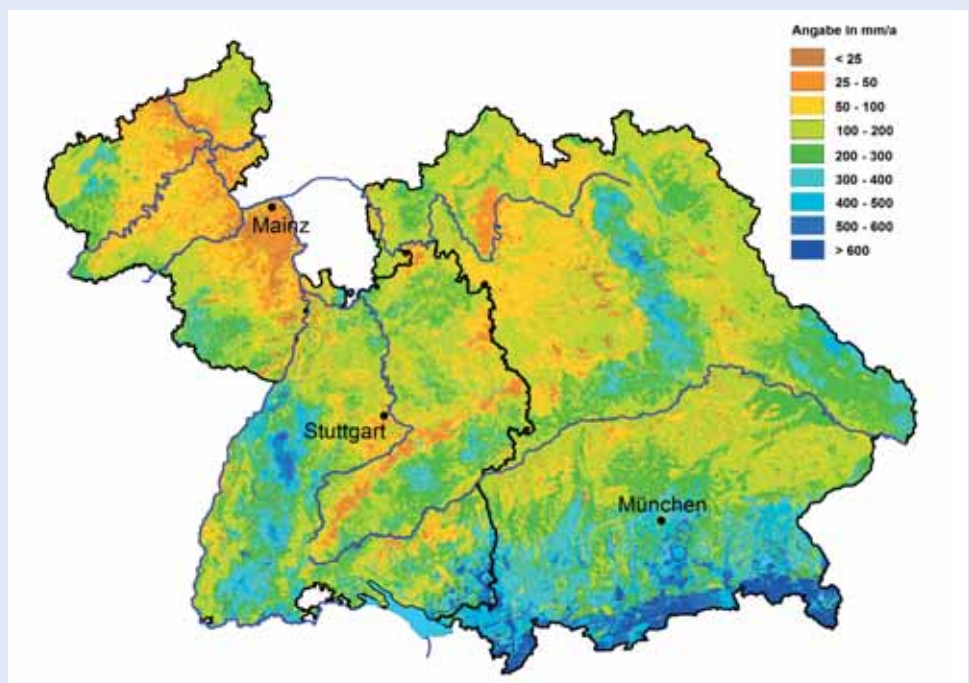
INDICE DE SÉCHERESSE ANNUEL MOYEN SITUATION ACTUELLE (1971-2000)

L'indice de sécheresse de la période 1971-2000 a été calculé dans le cadre de KLIWA pour les trois Länder au moyen d'un modèle de bilan hydrologique des sols. L'indice de sécheresse décrit la période pendant laquelle l'humidité du sol passe en dessous de 30 % de la capacité aux champs. Il ne se produit pas d'infiltration pendant cette période et la végétation subit un stress lié au manque d'eau.



RECHARGE ANNUELLE MOYENNE DES NAPPES PHRÉATIQUES PAR PRÉCIPITATIONS SITUATION ACTUELLE (1971-2000)

Le renouvellement de la nappe phréatique joue un rôle important pour la gestion de l'eau et constitue un indicateur significatif de la « capacité naturelle de régénération » des ressources en eaux souterraines. La recharge de la nappe phréatique de la période 1971-2000 a été calculée dans le cadre de KLIWA pour les trois Länder au moyen d'un modèle hydrologique de bilan des sols.





Des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus longues : **Basses eaux**

Les étés plus secs et plus chauds à venir auront pour effet un abaissement du niveau des eaux. Ces phases de basses eaux ne sont pas seulement un problème pour la navigation fluviale, elles causent aussi des difficultés à l'agriculture, au secteur énergétique et à l'alimentation en eau potable. Les conséquences économiques peuvent être sérieuses: ainsi la longue période de sécheresse de 2003 a provoqué des dommages économiques en Allemagne plus importants que les récentes catastrophes dues aux crues du Rhin, de l'Oder ou de l'Elbe. Sans compter qu'en plus des aspects concernant la gestion de l'eau, la faune et la flore sont très affectées par un niveau des eaux faible.



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

NIVEAUX D'EAU EN BAISSÉ MALGRÉ DES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

Le changement climatique accompagné de températures accrues entraîne une intensification du cycle de l'eau. Les phénomènes météorologiques extrêmes seront donc plus fréquents. La gestion de l'eau devra s'adapter à ces changements: les périodes de sécheresse comme l'été caniculaire de 2003, où les cours d'eau s'étaient retrouvés à sec, où la navigation fluviale avait dû à certains endroits être interrompue et où le niveau des nappes phréatiques avait fortement baissé, alterneront avec des périodes de fortes pluies suivies d'inondations.

MOINS DE PLUIE ET PLUS D'ÉVAPORATION = MOINS DE DÉBIT EN ÉTÉ

Les différents modèles climatiques prévoient une augmentation des précipitations en hiver et une baisse en été: le régime des précipitations sur l'année change. Dans le même temps, l'augmentation de la température de l'air entraînera une évaporation accrue. La probabilité d'une période de végétation très sèche en Allemagne du Sud a d'ores et déjà nettement augmenté depuis 1985.

Les projections des écoulements dont on dispose font apparaître pour les mois de juin à novembre de considérables reculs des écoulements moyens mensuels en période de basses eaux dans les bassins fluviaux étudiés du sud de l'Allemagne. La baisse moyenne est supérieure à 10 % dans de nombreux bassins versants. Une seule prévision à la hausse a été faite dans le bassin de la Nahe (Rhénanie-Palatinat). Globalement, une tendance homogène à la baisse se dessine nettement (graphique en haut à droite). Les baisses les plus importantes sont pré-

vues au cours des mois d'automne de septembre à novembre. La diminution est particulièrement marquée dans le sud-ouest et dans le sud-est du Bade-Wurtemberg au niveau des affluents du Rhin, où l'on enregistre 21 % de baisse des débits en régime de basses eaux pour le mois de septembre. Pour du Rhin en période de basses eaux, les valeurs annuelles ont tendance à être plus élevées dans le scénario d'avenir. Il semblerait qu'il ne faille donc pas s'attendre à une aggravation de la situation des niveaux du Rhin pour les écoulements moyens en période de basses eaux dans un futur proche jusqu'en 2050. Des études complémentaires porteront sur les étiages extrêmes. Les périodes de basses eaux dureront plus longtemps dans la plupart des régions; plus de 50 % au sud d'une ligne Karlsruhe – Coburg et de 25 à 50 % au nord de cette ligne, y compris le bassin versant de la Nahe. Pour les experts, il faut en rechercher la cause dans la fréquence accrue des « situations de temps sec » à échelle régionale.

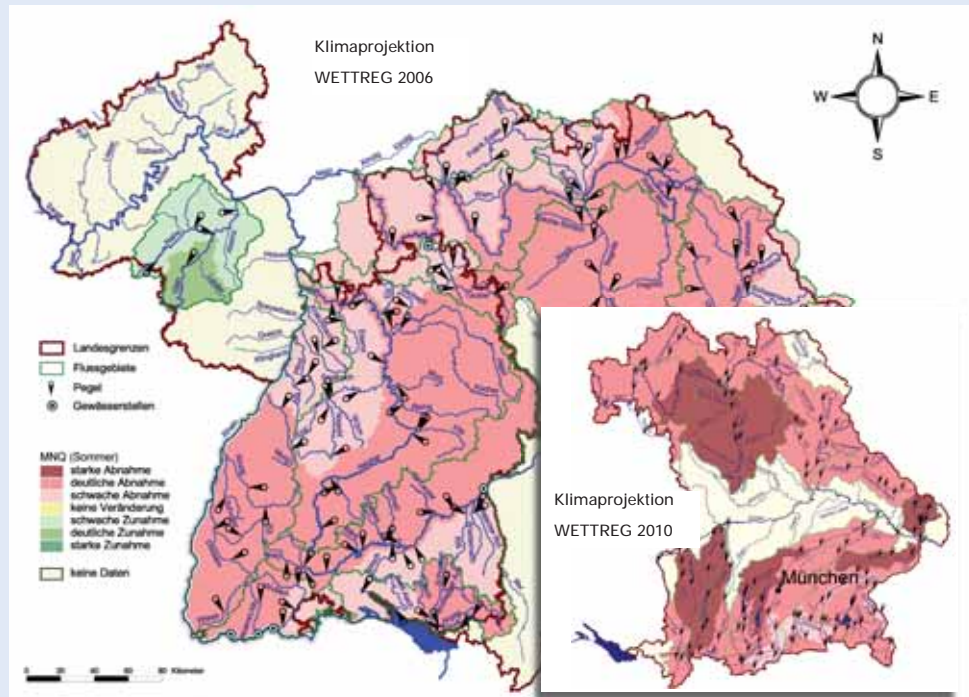
WORST CASE NON COMPRIS

Les simulations des écoulements montrent que les situations de basses eaux dépendent fortement de la courbe future de la température moyenne de l'air et des précipitations. Les projections climatiques régionales peuvent cependant varier considérablement (entre 1,0 °C et 1,8 °C) en fonction du scénario d'émission et du modèle climatique considérés. Les débits et les fréquences des situations de basses eaux pourraient donc évoluer de manière encore plus défavorable. L'une des missions de KLIWA consiste à évaluer l'évolution future du régime de basses eaux afin de pouvoir proposer des recommandations d'adaptation appropriées.



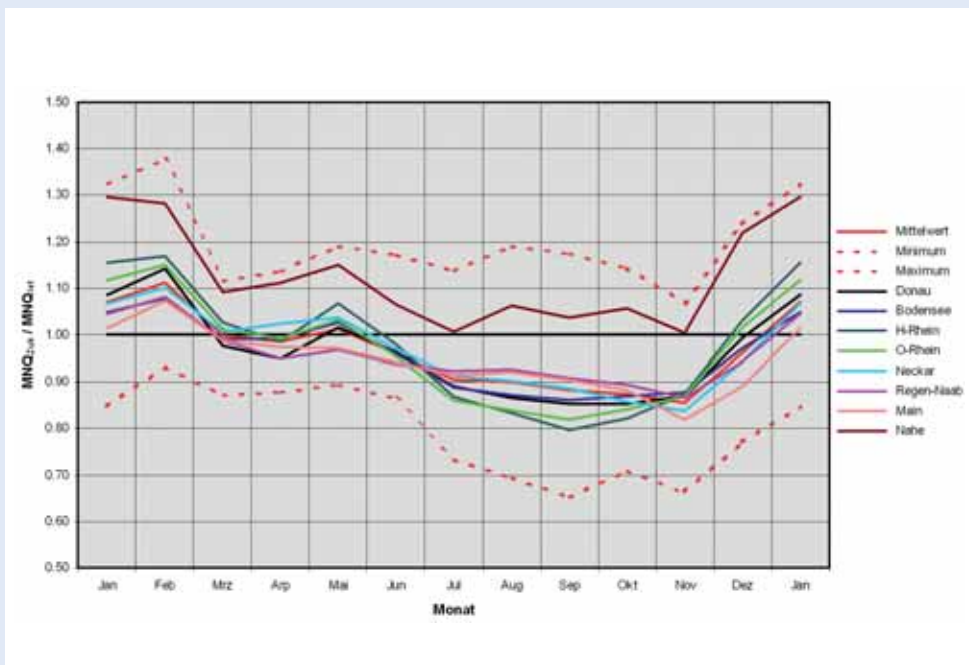
MODIFICATION DES DÉBITS EN RÉGIME DE BASSES EAUX ESTIVALES DEMAIN

Les deux cartes montrent la répartition géographique des changements prévisibles des débits moyens en régime de basses eaux pendant le semestre estival (juin à novembre), déduits à partir des écoulements mensuels en régime de basses eaux dans les bassins hydrographiques étudiés. Les différentes couleurs mettent en évidence la variation en pourcentage prévue sur la période 2021-2050 par rapport à la période 1971-2000. Les résultats de deux projections climatiques différentes sont présentés ici: les résultats de la carte de « gauche » reposent sur le modèle WETTREG 2006, ceux de la carte de « droite » sur le modèle WETTREG 2010 pour la Bavière.



ÉVOLUTION ANNUELLE DES DÉBITS D'ÉTIAGE

Le graphique montre les variations de la courbe des débits moyens mensuels en régime de basses eaux répartis sur une année dans différents bassins hydrographiques, ainsi que la valeur moyenne de tous les niveaux d'eau pris en compte et les valeurs minimales et maximales des modifications. Il indique la variation en pourcentage des moyennes mensuelles sur la période 2021-2050 par rapport à la période 1971-2000. Les résultats représentent ici sur la projection climatique WETTREG 2006.





La stratégie du „flexible and no regret“

Crues

Même s'il est vrai que l'enchaînement de modèles – modèle mondial – modèle régional – modèle hydrologique – comporte des incertitudes, les résultats obtenus semblent indiquer qu'il faudra s'attendre à l'avenir à davantage d'événements de crues et d'inondations. En application du principe de précaution a donc été développée une stratégie d'adaptation aux crues et aux inondations. S'adapter ne signifie pas se mettre à bâtir un peu partout de nouveaux murs de berges de plusieurs mètres de haut. Au contraire, il importe de parer aux conséquences prévisibles du changement climatique par des mesures qui puissent être modulées à long terme de manière adaptée et à un coût relativement raisonnable. La prévention des crues et des inondations joue à ce titre un rôle particulier.



LE FACTEUR DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

C'est généralement la valeur Qi100 qui est retenue dans la planification des constructions des dispositifs anti-crue. Qi100 représente le débit de crue qui est, du point de vue statistique, dépassé tous les 100 ans. Les ouvrages conçus sur la base de cette valeur doivent donc impérativement être capables de résister à ces « crues centennales ». Les simulations des régimes hydrologiques des bassins versants du Bade-Wurtemberg et de Bavière montrent que les écoulements en régime de crue augmenteront à quasi toutes les stations de jaugeage, notamment en hiver. Par mesure de précaution, il a donc été convenu dans les deux Länder de tenir compte dans le dimensionnement des nouveaux ouvrages anti-crue des effets du changement climatique par l'introduction d'un facteur de changement climatique. Pour le Neckar par exemple, on suppose que le débit de crue centennale (Qi100) augmentera de 15 % d'ici 2050. En conséquence la valeur Qi100 sera dorénavant multipliée par le facteur de changement climatique de 1,15, ce qui signifie que les ouvrages d'art seront dimensionnés à l'avenir pour un écoulement supérieur de 15 % à la valeur de référence actuelle, ou seront conçus de manière à pouvoir être renforcés ultérieurement si nécessaire.

DIFFÉRENTS EFFETS CLIMATIQUES ET MESURES D'ADAPTATION

Dans le Bade-Wurtemberg, tous les bassins versants ont été examinés à la loupe. Les différences régionales des effets du changement climatique se manifestent également dans les débits de crue à venir (photo page de droite en haut). Ainsi, un facteur de changement climatique de 1,25 a pu être établi pour la région du Haut Danube. Les petites

et moyennes crues et inondations connaîtront également une recrudescence.

L'écoulement Qi5 pour un événement de crue de fréquence quinquennale enregistre dans la région du Haut Danube une hausse d'environ 67 %. L'actuelle valeur Qi5 du Haut Danube doit donc à l'avenir être multipliée par le facteur de changement climatique de 1,67. Dans la région des affluents du Haut-Rhin, le facteur de changement climatique est par exemple de 1,45 pour Qi5. C'est dans la région du lac de Constance-Haute Souabe que ce facteur est le plus faible (1,24).

Sur la base des résultats d'étude obtenus antérieurement avec WETTREG 2003, un facteur de changement climatique a également été introduit en Bavière, à savoir un facteur global de 15 % ajouté à la valeur statistique de Qi100.

De la sorte, les effets du changement climatique à venir sont pris en compte dès aujourd'hui dans la planification des nouveaux ouvrages de protection contre les crues. Le facteur de changement climatique est régulièrement affiné par de nouvelles études. Ceci peut déboucher sur des adaptations régionales.

En Rhénanie-Palatinat, la démarche est la suivante: le dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues s'appuie toujours sur les conditions locales pour chaque cas particulier et varie en fonction du risque pour la population, des dommages potentiels occasionnés par l'inondation et des considérations d'efficacité. Une fois les études relatives au « Cas particulier du Rhin supérieur » achevées, des études d'écoulement seront effectuées sur tout le territoire de la Rhénanie-Palatinat et du Rhin moyen. Ces études devront montrer si des mesures d'adaptation plus étendues sont nécessaires en Rhénanie-Palatinat.

PROTECTION CONTRE LES CRUES – QU'EST-CE QUE CELA SIGNIFIE CONCRÈTEMENT?

Exemple d'une digue anti-crue:

La digue est construite comme prévu, mais une bande de terre est laissée libre sur le côté extérieur de manière à pouvoir la surélever et l'élargir en cas de besoin.

Exemple d'un pont:

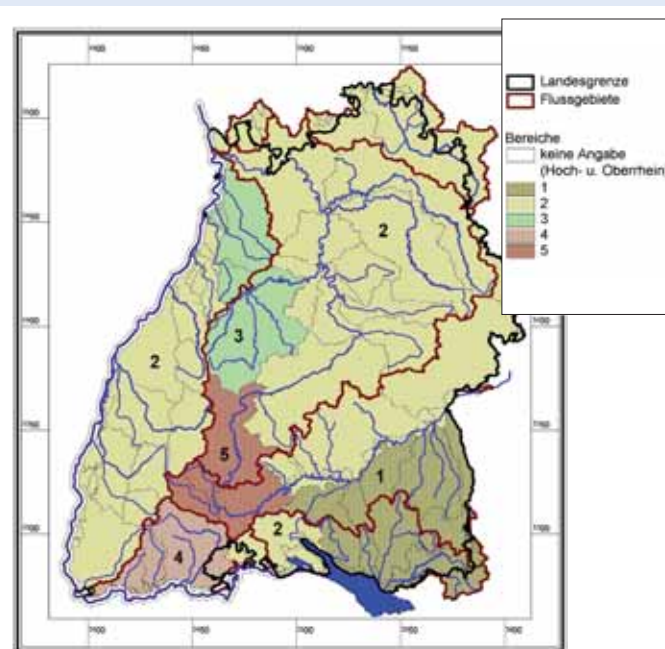
Le facteur lié au changement climatique est pris en compte dès la planification de la construction d'un pont, car une adaptation ultérieure n'est souvent pas possible sur le plan technique.

Exemple d'un mur de berge:

Pour un nouveau mur de berge, la possibilité de surélévation ultérieure est prévue dès la phase de calculs de résistance.



FACTEURS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE AU BADE-WURTEMBERG



Klimaänderungsfaktoren $f_{(T,K)}$

T (Jahre)	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

Bemerkung: Für Jährlichkeiten T > 1000 a ist der Faktor gleich 1,0

FACTEUR DE MAJORATION AU TITRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Une majoration des débits de crue actuels permet de tenir compte, dans le dimensionnement des ouvrages anti-crues, de l'incidence possible du changement climatique. Le franc-bord sert à empêcher le débordement de l'eau par-dessus les ouvrages anti-crue, p. ex. à la suite d'un relèvement du niveau des eaux en raison du vent.



CAS PARTICULIER DU RHIN SUPERIEUR

Compte tenu de la problématique particulière du Rhin dont une partie de l'écoulement se forme en Suisse, de l'aménagement du Rhin supérieur, etc., le lit majeur du Rhin a été ignoré lors des premières études d'écoulement effectuées dans le cadre de KLIWA. On dispose entre-temps de projections climatiques plausibles pour l'ensemble du bassin versant du Rhin, donc pour la Suisse également, auxquelles s'ajoutent des modèles hydrologiques appropriés, qui tiennent notamment compte de l'effet tampon du lac de Constance et des grands lacs en bordure des Alpes, et de l'ensemble du bassin versant du Rhin jusqu'à l'échelle de jauge de Worms (bassin versant d'env. 69 000 km²). Le régime des eaux du Rhin jusqu'à la station hydrométrique de Worms est influencé en particulier par la formation des écoulements dans les Alpes suisses, donc par la variation saisonnière de

l'enneigement et de la fonte des neiges. Les quantités d'eau maximales surviennent par conséquent au cours de l'été hydrologique de mai à octobre.

De premières analyses des variations relatives entre le scénario d'avenir 2021-2050 et la situation réelle 1971-2000 pour les stations hydrométriques du Rhin montrent qu'il ne faut pas craindre des modifications importantes pour les écoulements moyens en régime de crue. Au cours du semestre estival, qui voit les écoulements les plus importants, on peut même tabler sur de légers reculs des débits moyens en régime de crue, à l'exception des mois de mai et d'octobre. Dans le semestre hivernal de novembre à avril, les simulations font apparaître des hausses de moins de 10 %. Au vu de nos projections actuelles, il ne faudra pas s'attendre dans le futur proche et jusqu'en 2050 à des accroissements des débits de crue moyens au niveau des stations hydrométriques du Rhin. Les prochaines études porteront sur les éventuelles modifications des pics de crue.



Les pluies sont plus fortes

Pluies intenses

La hausse des températures de l'air et de l'évaporation intensifie le cycle atmosphérique de l'eau. Il faut donc s'attendre à une recrudescence des fortes précipitations. Ces phénomènes de faible étendue et de courte durée excèdent de plus en plus régulièrement les capacités des réseaux d'assainissement dans les zones habitées. Sur les surfaces agricoles non protégées, ils entraînent une érosion accrue des sols. À défaut de mesures de terrain, ces modifications sont actuellement estimées sur la base de modèles.



Durch Starkregen überlastete Kanalisation (Quelle: itwh)

EVACUATION DES EAUX DES ZONES HABITÉES

L'eau de pluie qui ne s'infiltré pas dans le sol ou qui rejoint des eaux de surface à proximité d'une localité est évacuée dans les zones construites par les réseaux d'assainissement. Les problèmes d'évacuation des eaux dans les lotissements surviennent lors de phénomènes de précipitations à la fois très courts et très violents, comme des pluies torrentielles qui peuvent aussi entraîner des inondations. Il est avéré que ces événements seront plus fréquents et plus intenses au niveau régional. Mais nous manquons de séries de mesures sur le long terme sur des zones suffisamment étendues et représentatives.

Avec la méthode des « simulations à long terme » utilisée classiquement dans le cadre des planifications, il est possible de donner dès aujourd'hui des indications concrètes sur le comportement d'un réseau de canalisations dans les conditions climatiques futures. Il faut disposer pour cela de séries pluviométriques synthétiques. Le programme informatique NiedSim permet de générer ce type de séries pluviométriques. Les partenaires de KLIWA utilisent ce programme.

La phase de développement la plus récente 'NiedSim-Klima' a pris en compte les résultats de la recherche climatique actuellement disponibles. Il est ainsi possible de générer des séries pluviométriques représentatives pour n'importe quelle année jusqu'en 2050. Dès que la recherche climatologique fournira de nouveaux résultats, ceux-ci seront également pris en compte dans 'NiedSim-Klima'. Certaines communes effectuent déjà des simulations pour les années 2010, 2030 et 2050 sur le comportement de leurs réseaux d'assainissement. Parallèlement, les études sur les nappes phréatiques doivent permettre de faire des déductions d'ordre général

sur les effets probables du changement climatique sur la gestion de l'eau dans les zones habitées.

QUAND LE SOL SE DÉROBE SOUS NOS PIEDS

Certaines précipitations de grande intensité comme dans le cas d'orages ne risquent pas seulement d'inonder rues et caves, mais peuvent aussi provoquer une érosion massive, en particulier sur les sols non protégés car dépourvus de végétation. Non seulement des sols fertiles disparaissent, mais les dégâts se propagent au-delà des surfaces d'érosion à proprement parler avec par exemple des coulées de boue sur les chemins et dans les quartiers lotis. Un projet partiel KLIWA étudie pour cette raison les modifications futures du risque d'érosion dû à de fortes pluies.

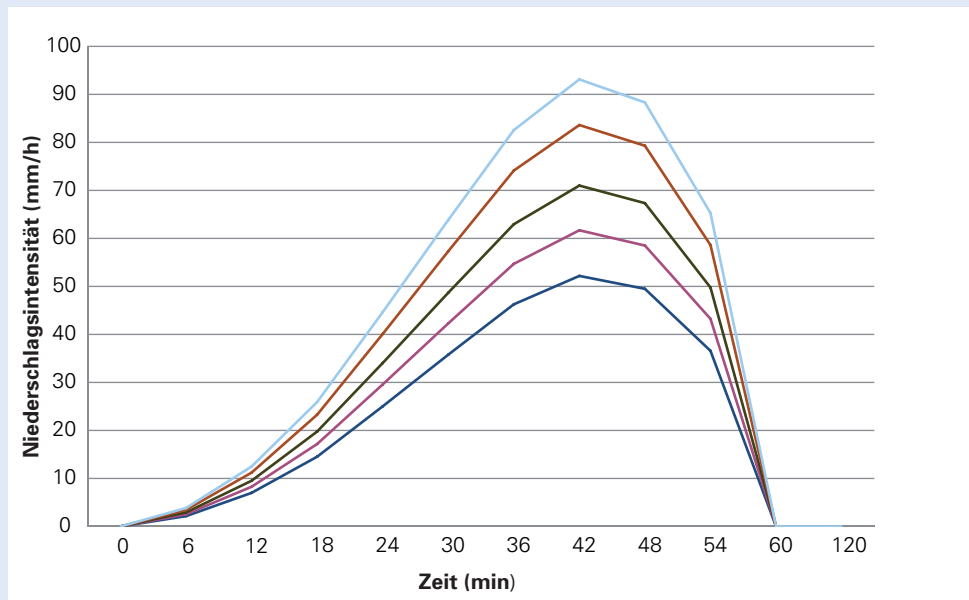
MODÉLISATION DU CLIMAT ET DE L'ÉROSION

Pour être en mesure d'évaluer le futur risque d'érosion, un modèle climatique régional est rattaché au modèle d'érosion des sols. Les données pluviométriques à haute résolution spatiale et temporelle nécessaires à cet effet sont préparées avec le modèle climatique régional COSMO-CLM. Par le principe du « nesting » (emboîtement), les données de la modélisation globale fine sont utilisées comme conditions aux limites pour la résolution plus fine du modèle climatique régional. Ainsi les fortes précipitations sont simulées progressivement au cas par cas avec une résolution cible de 1 x 1 km et de 15 minutes. Ces données pluviométriques servent de paramètres d'entrée au modèle physique d'érosion LISEM (Limburg Soil Erosion Model), qui permet de calculer l'ampleur de l'érosion des sols et des écoulements d'eau dans les régions menacées.



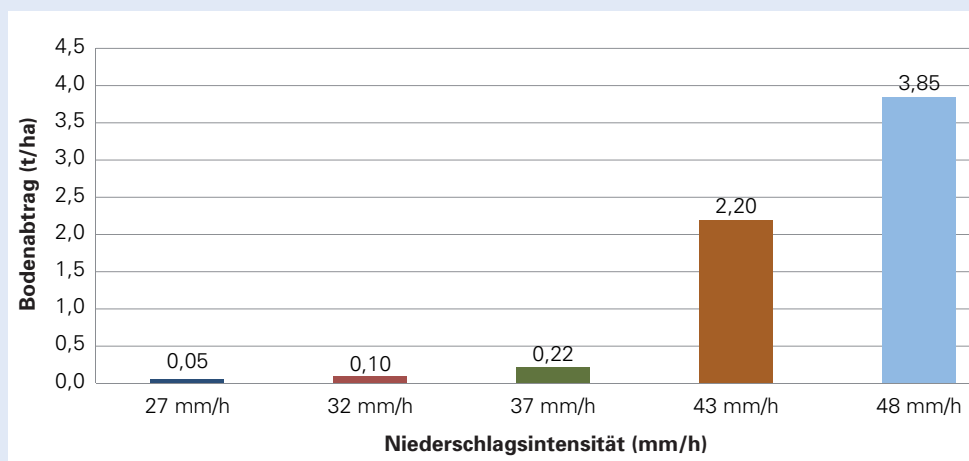
**HYDROGRAMME
PLUVIOMÉTRIQUE À PAS
DE TEMPS HORAIRE POUR
DIFFÉRENTES FRÉQUENCES
DE RETOUR (5 À 100 ANS)**

Outre les paramètres d'entrée relatifs au relief, au sol et à la végétation, le modèle d'érosion LISEM doit disposer de données sur la durée et l'intensité des précipitations. Des hydrogrammes de précipitations ont été générés sur la base de l'atlas KOSTRA (DWD, 2005), et servent de paramètres d'entrée pour LISEM. On a ainsi examiné à partir de quelle intensité pluviométrique l'érosion du sol augmente sensiblement.



**ÉROSION DU SOL
MODÉLISÉE AVEC LISEM
SUR LA BASE DES
DONNÉES KOSTRA DANS
LE CAS D'UNE REGION DE
LOESS**

Le graphique fait nettement apparaître qu'à partir d'une intensité pluviométrique supérieure à 37 mm/h, l'ampleur de l'érosion du sol fait un bond en avant. Bien que l'intensité des précipitations n'augmente que de 16 % pour atteindre 43 mm/h, l'érosion du sol est multipliée par dix. Le projet partiel KLIWA étudie de manière plus détaillée dans quelle mesure les fortes précipitations critiques augmenteront à l'avenir.





Répercussions sur la qualité de l'eau

Écosystèmes aquatiques

Si le climat change, cela aura des conséquences sur les eaux, leur faune et leur flore. Des températures en hausse, des écoulements et des niveaux d'eau en recul grèvent le bilan d'oxygène et modifient la composition des écosystèmes aquatiques. Le bon état de nos eaux pourrait donc être influencé défavorablement. Mais qu'est-ce qui a déjà changé et à quoi faut-il s'attendre pour l'avenir ? Les corrélations complexes entre les propriétés des eaux et les écosystèmes ainsi qu'une base de données peu fournie rendent les réponses difficiles.



LA VALLISNERIE SPIRALEE

La vallisnerie spiralée (*Vallisneria spiralis*) qui s'est implantée dans le sud de l'Allemagne est une plante d'origine tropicale et subtropicale très utilisée dans les aquariums. Elle est considérée comme un bénéficiaire possible du changement climatique. Elle est déjà bien implantée dans la Moselle et supplante par endroits le rubanier d'eau autochtone.

Étude KLIWA
www.fliessgewaesserbiologie.de

L'EAU SE RÉCHAUFFE

Si l'air se réchauffe, les rivières, les lacs et les fleuves se réchauffent également. La modification des précipitations entraîne celle des écoulements. Mais l'écologie aquatique n'est pas la seule à devoir s'y adapter. Les divers usages de l'eau seront également concernés. Ainsi, l'eau destinée à refroidir les centrales électriques deviendra trop chaude et perdra en efficacité.

DE MULTIPLES INFLUENCES SUR L'ÉCOLOGIE AQUATIQUE

Le changement climatique modifie des facteurs déterminants dans les rivières, les fleuves et les lacs, comme la température de l'eau, les quotients d'écoulement, l'apport de sédiments fins ou encore la concentration en nutriments. Ceci entraîne toute une série de processus qui peuvent en fin de compte avoir une influence sur la flore et la faune aquatiques : certaines espèces se raréfieront ou disparaîtront, d'autres apparaîtront. Les écosystèmes aquatiques et le mode de fonctionnement de l'équilibre aquatique naturel changent. Tandis que l'influence du changement climatique sur l'équilibre hydrologique dans le sud de l'Allemagne fait déjà l'objet de modélisations à grande échelle, les modifications de la biologie aquatique ne sont connues jusqu'à présent que dans des zones partielles. Ainsi, une tendance à la remontée de certaines espèces le long des cours d'eau a déjà pu être constatée localement sur certains écosystèmes.

Une étude bibliographique demandée par KLIWA sur les cours d'eau dans le sud de l'Allemagne montre dans le cadre d'enchaînements de causalité les rapports entre changement climatique et qualité des cours d'eau à l'échelle régionale pour les trois Länder Bavière, Bade-Wurtemberg et Rhénanie-Palatinat. L'étude atteste par une

analyse bibliographique et de sensibilité approfondie qu'il faudra compter à l'avenir sur des changements de la qualité des cours d'eau dans de nombreux domaines, mais fait également ressortir l'étendue des lacunes scientifiques.

LE SUIVI POUR PRÉPARER L'AVENIR

Il est aujourd'hui encore impossible de dire quelle influence le changement climatique aura véritablement sur la qualité de l'eau. Pour disposer à l'avenir de données pertinentes dans ce domaine, le mode de surveillance actuel des cours d'eau est mise au banc d'essai, tandis que sont élaborés des procédés d'analyse et des méthodes d'évaluation efficaces.

Quels sont les indicateurs décisifs ? Quels sont les systèmes aquatiques à étudier et à quel rythme ? Les réponses à ces questions constituent le fondement nécessaire à la création d'une base de données qui aura pour but d'éliminer de nombreuses incertitudes et de permettre des mesures d'adaptation adéquates.

ESPECES INVASIVES – LES GRANDES GAGNANTES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Les espèces invasives sont des espèces exogènes dont la venue a été provoquée directement ou indirectement par l'homme. Depuis les deux dernières décennies surtout, de nombreuses nouvelles espèces font leur apparition en Allemagne. Ceci s'explique surtout par les liaisons créées entre les systèmes fluviaux par les canaux de navigation. De nombreuses espèces invasives supportent bien les variations de température, l'eutrophisation et la salinisation et profitent donc indirectement du changement climatique. Une étude KLIWA fournit une description détaillée de 30 espèces concernées.

CONNEXIONS ET INTERACTIONS

Dans les rivières plus fraîches, le changement climatique modifie la température de l'eau et le régime saisonnier des écoulements. Un enneigement modifié, l'augmentation des pluies intenses ou les longues périodes de sécheresse en été altèrent l'aspect même du lit de la rivière et ses micro-habitats. Les écosystèmes de la rivière risquent ainsi d'être fortement perturbés.



Perspectives

Il faut s'attendre à l'avenir à des étés de plus en plus chauds et secs et à des hivers plus doux et humides. Ces changements de la répartition des précipitations modifieront le cycle régional de l'eau et donc le régime hydrologique de nos bassins hydrographiques.

KLIWA s'est tout d'abord penché sur la problématique des crues et des inondations et a élaboré à ce sujet des mesures d'adaptation concrètes. L'étude des répercussions sur les écoulements du Rhin et du Danube est encore en cours. Au stade actuel, les études effectuées mettent désormais aussi l'accent sur la question des répercussions du changement climatique sur les écoulements en régime de basses eaux et sur les nappes phréatiques. Un régime hydrologique modifié a des conséquences immédiates sur l'exploitation des ressources en eau – qu'il s'agisse du prélèvement direct pour l'approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation des terres agricoles, de l'utilisation comme eau de refroidissement pour les centrales électriques dans le secteur énergétique ou encore de son utilisation comme voie navigable. Il aura également des répercussions sur la qualité de l'eau et de l'état écologique de nos cours d'eaux. C'est ici que réside actuellement l'une des grands orientations de KLIWA.

Un autre point fort de la recherche porte sur l'augmentation attendue des précipitations intenses et de courte durée (orages). Ces fortes précipitations sont susceptibles d'entraîner des inondations locales ou de provoquer des dégâts considérables pour l'agriculture du fait de l'érosion des sols, et représentent un défi de plus pour les mesures de protection des sols. Une question qui place les réseaux d'assainissement communaux devant des difficultés supplémentaires. Comme l'estimation des conséquences du changement climatique repose 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 permettant d'assurer une protection active du climat, au premier rang desquelles se place la réduction des émissions de gaz à effets de serre. Étant donné qu'en raison de l'inertie du système climatique, la hausse de la température se poursuivrait même dans le cas (fictif) d'un arrêt immédiat des émissions, chacun doit dès maintenant contribuer à enrayer cette évolution annoncée pour éviter que nos descendants ne soient un jour confrontés à des problèmes encore plus graves.

Le changement climatique constitue aujourd'hui le plus grand défi auquel doit faire face l'humanité – et chacun d'entre nous est concerné. ■