

A woman wearing a vibrant, patterned headscarf is seen from behind, filling a red bucket from a large, circular stone well. The well is surrounded by a low stone wall with several arched openings. In the background, there are multi-story stone buildings with many windows, some with arched openings, under a clear blue sky. The water in the well is a deep green color.

# L'eau

## au cœur de la science

Water at the Heart of Science

Préambule Érik Orsenna

**IRD**  
Éditions





# L'eau au cœur de la science

Water at the Heart of Science

**Préambule** A message from  
**Érik Orsenna**

**Avant-propos** Foreword by  
**Michel Laurent**

**IRD Éditions**  
Institut de recherche pour le développement

Marseille, 2012

## Ouvrage publié à l'occasion du Forum mondial de l'eau (Marseille, 12-17 mars 2012).

This book is published on the occasion of the World Water Forum (Marseille, 12-17 March 2012).

Les photos présentées dans cet ouvrage sont pour la plupart issues de la base Indigo, la banque d'images de l'IRD. Quelques-unes proviennent d'autres banques d'images. Elles sont publiées avec l'aimable autorisation des institutions et des auteurs sollicités.

Most of the photographs in this book are from Indigo, the IRD image bank. A few are from other image banks. They are published by kind permission of the establishments and of their authors.

### Coordination scientifique Scientific coordination

Bernard Pouyaud

### Coordination éditoriale Editorial coordination

Thomas Mourier

### Rédaction Written by

Claire Gout/Coéval durable

### Recherche iconographique Iconographic research

Thomas Mourier, Claire Gout/Coéval durable, Daïna Rechner

### Traduction Translated from the French by

Simon Barnard

### Mise en page et coordination fabrication Page layout and production coordination

Catherine Plasse

### Maquette de couverture Cover design

Michelle Saint-Léger

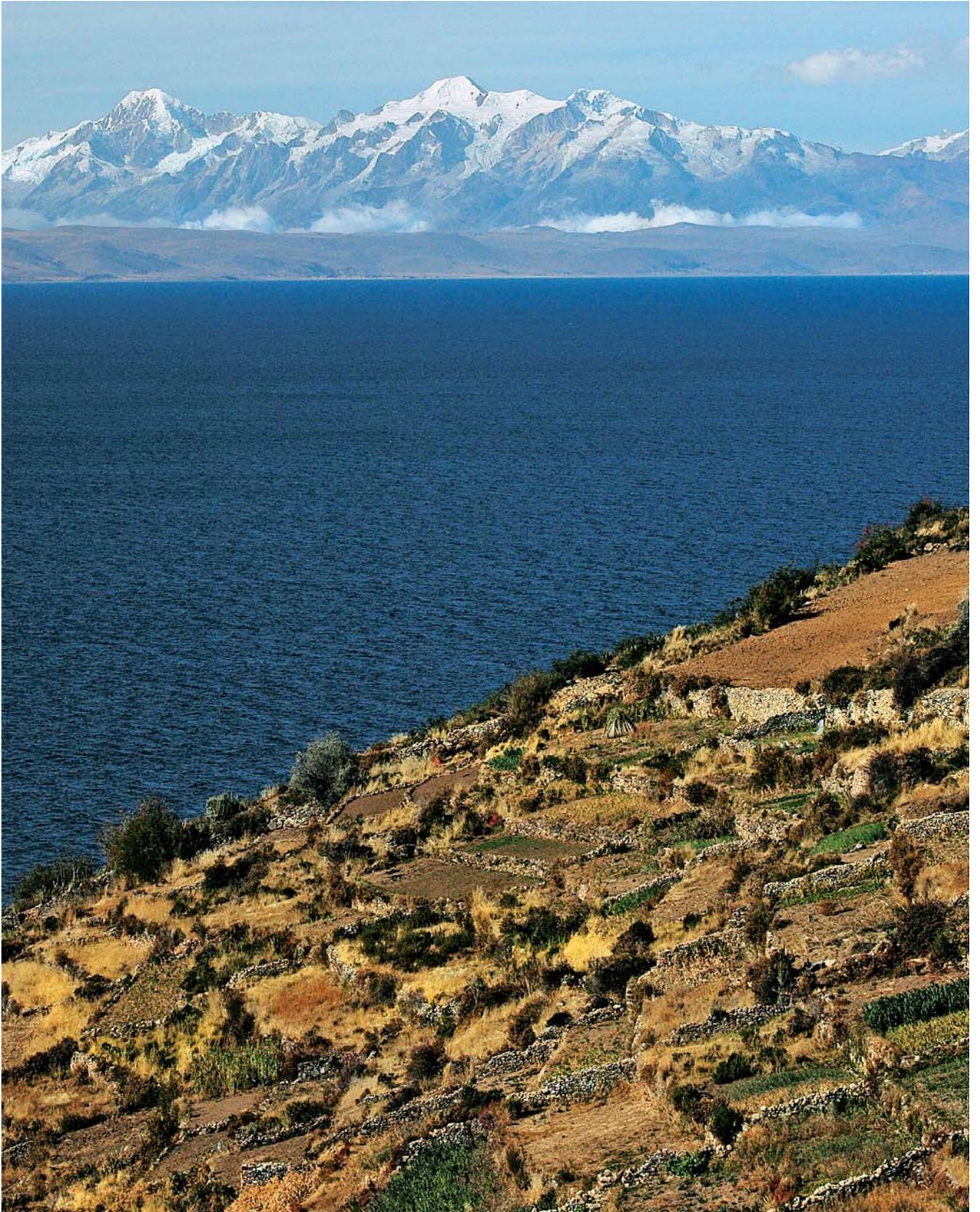
### Maquette intérieure Content layout

Catherine Plasse

Toute reproduction ou représentation, intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit (reprographie, microfilmage, scannérisation, numérisation...) de la présente publication, faite sans l'autorisation de l'éditeur, est illicite (article L 122-4 du Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992) et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. L'autorisation de reproduction de tout ou partie de la présente publication doit être obtenue auprès de l'éditeur.

© IRD, 2012

ISBN : 978-2-7099-1723-0



© IRD/M. Jégu  
Lac Titicaca. Bolivie.  
[Lake Titicaca. Bolivia.](#)

# Sommaire

## Contents

Préambule Érik Orsenna .....	9
<i>A message from Erik Orsenna</i>	
Avant-propos Michel Laurent.....	11
<i>Foreword by Michel Laurent</i>	
<b>Une planète singulière</b> .....	15
<i>A singular planet</i>	
De grands pouvoirs pour une petite molécule.....	16
<i>The great powers of a small molecule</i>	
L'eau façonne les reliefs.....	20
<i>Water moulds reliefs</i>	
Répartition de l'eau dans le monde.....	24
<i>Distribution of water in the world</i>	
Des climats aux écosystèmes .....	34
<i>From climate to ecosystem</i>	
Variations et oscillations naturelles du climat.....	44
<i>Natural climate variations and oscillations</i>	
<b>L'homme et l'eau douce</b> .....	53
<i>Man and fresh water</i>	
L'eau dans les sociétés .....	54
<i>Water and societies</i>	
L'eau des champs.....	58
<i>Water in the fields</i>	
L'eau des villes.....	72
<i>Water in towns</i>	
La multiplication des usages de l'eau.....	80
<i>The multiplication of uses of water</i>	

<b>Enjeux et déséquilibres</b> .....	87
<b>Issues and imbalances</b>	
Dérèglements climatiques.....	88
Climate change	
Des écosystèmes menacés.....	98
Threatened ecosystems	
Dégradation de la qualité de l'eau.....	108
Degradation of water quality	
Augmentation des risques liés à l'eau.....	114
Increase of water-related risks	
Favoriser l'accès à l'eau.....	122
Enhance access to water	
<b>Pour une gestion durable de l'eau</b> .....	131
<b>Sustainable development</b>	
Face à la crise.....	132
Facing the crisis	
L'eau ne fait pas le développement.....	138
Water does not make development	
Géopolitique de l'or bleu.....	142
The geopolitics of 'blue gold'	
Penser l'avenir : la gestion intégrée des ressources en eau.....	148
Thinking of the future: integrated management of water resources	
<b>Du nilomètre au satellite, 60 ans de recherches hydrologiques à l'IRD</b>	
<b>From nilometer to satellite, 60 years of hydrological research at IRD</b>	
Bernard Pouyaud, Pierre Chevallier, Éric Servat.....	153
Les encadrés et leurs auteurs.....	158
List of boxes and contributors	

© IRD/C. Luro  
Environs du parc de Torres del Paine,  
parc inscrit au patrimoine de l'humanité.  
Chili.

Near Torres del Paine National Park:  
the park is on the World Heritage List.  
Chile.



# Préambule

A message from  
Erik Orsenna

de l'Académie française

of the Académie française

Quelle plus belle histoire que celle de l'eau ?

Et puisqu'à ce personnage nous devons la vie, quelle histoire plus nécessaire à connaître ?

On dit de certaines batailles qu'elles sont mères de toutes les autres.

Permettez au romancier de vous affirmer que l'eau est la mère de toutes les histoires.

Alors vous comprendrez ma joie, et ma fierté, de vous présenter ce livre.

Tous ceux qui ont appris un morceau de cette si longue et si mystérieuse histoire se sont réunis pour vous la raconter. Avec des mots simples qui résument des années et des années de recherches.

Ô scientifiques, merci de votre effort de nous inviter dans votre monde !

Tour à tour, ces savants vont vous enchanter en même temps qu'ils vous alerteront.

Car l'eau est fragile.

Et tout ce qui la blesse est pour la vie, à commencer par la nôtre, menace directe.

Il était une fois...

Tendez l'oreille, ouvrez les yeux.

Il s'agit de nous, il y a bien bien longtemps.

Il s'agit aussi de nos enfants, pour qu'ils ne périssent pas près de puits par nous asséchés.

## **W**hat finer story than that of water?

And since we owe our lives to this character, what story is it more necessary to know?

Some battles are said to be the mothers of them all.

Please allow a novelist to tell you that water is the mother of all stories.

And then you will understand my delight and my pride in presenting this book.

All those who have learned part of this so long and mysterious story have got together to tell it to you.

In simple words that sum up years and years of research.

O scientists, thank you for making the effort to invite us into your world!

One by one, these scholars will both enchant you and sound the alarm.

Because water is fragile.

And everything that harms it is a direct threat to life, starting with our own.

Once upon a time...

Listen carefully, open your eyes.

It is about us, a long, long time ago.

It is also about our children, so that they will not perish beside wells that we have run dry.

© IRD/C. Lévêque  
Lessive et vaisselle en saison sèche.  
Côte d'Ivoire.

Washing clothes and utensils  
during the dry season. Côte d'Ivoire.



# Avant-propos

Foreword

Michel Laurent

Président de l'IRD

Executive president of IRD

## L'or bleu: enjeu majeur du XXI<sup>e</sup> siècle

L'eau est essentielle à la vie. Si cette évidence s'impose à tous, « le secteur souffre d'un manque chronique d'intérêt politique, d'une mauvaise gouvernance, et de sous-investissement, soulignait récemment l'Unesco. Il est nécessaire d'agir d'urgence pour éviter une crise globale. »

Pourtant, la ressource ne manque pas : les prélèvements annuels ne représentent, globalement, qu'un quart du stock mondial d'eau douce « utilisable ». Ce sont les fortes inégalités dans sa répartition sur la planète qui posent problème. Certaines régions, avec des ressources inférieures à 500 m<sup>3</sup> par habitant et par an, sont d'ores et déjà en situation de pénurie. D'autres, au contraire, sont régulièrement confrontées à des catastrophes dues à des précipitations excessives.

Chaque année, croissance de la population mondiale oblige, les besoins en eau augmentent de plusieurs dizaines de milliards de mètres cubes. Développements agricole, industriel et énergétique exercent une pression toujours plus forte en fonction des choix stratégiques et des engagements qu'ils induisent.

Le changement climatique a un fort impact sur les ressources en eau. Les experts du Giec prévoient des sécheresses plus intenses et des inondations plus fréquentes en de multiples points de la planète. Ces perturbations renforceront la dégradation, déjà à l'œuvre, des écosystèmes par ailleurs surexploités par des activités humaines en pleine croissance et soulignent les efforts à produire pour répondre aux Objectifs prioritaires du millénaire pour le développement.

## Blue gold: a major issue for the twenty-first century

Water is essential for life. Although this is clear to everybody, as UNESCO underlined recently "... the sector has been plagued by a chronic lack of political support, poor governance and underinvestment.", observing that "... urgent action is needed if we are to avoid a global water crisis."

But there is no shortage of water: annual abstractions represent overall only a quarter of the world's 'usable' fresh water. The problems result from the marked inequality of its distribution around the planet. Some regions possess resources of less than 500 cubic metres per person per year and already suffer from shortage. In contrast, other regions regularly experience catastrophes resulting from excessive precipitations. As the population of the world is growing, water requirements increase by several tens of billions of cubic metres every year. Agricultural, industrial and energy development exert ever-increasing

Sur le plan sanitaire, la situation est aussi très préoccupante : 80 % des maladies dans les pays du Sud sont liées à l'eau, conséquence d'un trop rare accès à une eau potable et au manque d'infrastructures d'assainissement, dû à un déficit de financements et à des choix politiques insuffisamment affirmés. L'or bleu s'impose ainsi comme l'un des enjeux majeurs du XXI<sup>e</sup> siècle. C'est pourquoi l'IRD a inscrit la question de l'eau dans les pays du Sud au cœur de ses priorités scientifiques, mobilisant sa communauté de chercheurs appartenant à des disciplines allant des géosciences aux sciences humaines et sociales.

L'Afrique subsaharienne et le sud de la Méditerranée, où la désertification progresse de manière très préoccupante, constituent avec presque la moitié des surfaces arides et semi-arides de la planète le terrain privilégié de ces recherches menées en partenariat avec la communauté scientifique internationale. Ces programmes qui associent étroitement activités de recherche, de formation et d'innovation, visent *in fine* à ouvrir la voie à une gestion durable et à un accès plus équitable aux ressources en eau dans les pays du Sud.

pressure according to the strategic choices made and the undertakings that they induce. Climate change has a strong impact on water resources. IPCC experts forecast more severe droughts and more frequent flooding in many places in the world. These disturbances will aggravate the damage already suffered by ecosystems that are also over-exploited by a strong increase in human activities, showing the efforts to be made to achieve the Millennium Development Goals.

The situation is also preoccupying from the sanitary angle: 80 percent of the diseases in Southern countries are water-related, caused by inadequate access to drinking water and the lack of sanitary infrastructure resulting from shortage of funding and political choices that are insufficiently affirmed. "Blue gold" is therefore one of the major issues of the twenty-first century. This is why IRD has made the question of the water in the countries in the South one of its scientific priorities, mobilising its scientific community in disciplines ranging from earth sciences to human and social sciences.

Sub-Saharan Africa and the southern Mediterranean, where desertification is very worrying, form nearly half of the arid and semi-arid areas of the world and are particularly targeted by this research conducted in partnership with the international scientific community. The programmes combine research, training and innovation and are finally aimed at opening the way for sustainable management and fairer access to water resources in countries in the South.



© IRD/J.-J. Lemasson  
Le site historique et l'oued de Rachid.  
Mauritanie

[Rachid: the old town and the wadi.](#)  
[Mauretania.](#)

© NASA/courtesy of nasaimages.org.

Les comètes, composées en grande partie de glace, ont participé à la création du stock d'eau de notre planète. Ici, la comète Neat (prise en 2004).

Comets, consisting mainly of ice, contribute to the earth's stock of water. Comet Neat (taken in 2004).



# Une planète singulière

## A singular planet

L'origine de notre planète est longtemps restée une énigme pour l'esprit humain. Ce n'est qu'avec le développement des sciences de la Terre et de l'Univers, à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle, que des réponses, encore provisoires mais de plus en plus étayées, ont pu être apportées. On estime aujourd'hui que notre système solaire s'est formé il y a quelque 4,6 milliards d'années par condensation d'une nébuleuse primitive constituée de gaz et de poussières. La Terre serait ainsi le résultat de l'accrétion d'amas, de planétésimaux et de météorites en plusieurs centaines de millions d'années. L'eau serait arrivée sur notre planète grâce aux comètes et aux météorites chondritiques, donnant naissance à une atmosphère primitive riche en eau qui se serait ensuite condensée, s'ajoutant aux processus de dégazage des différents constituants primitifs de la Terre. Du fait de sa masse et de sa distance optimale par rapport au Soleil, la Terre est la seule planète connue à avoir conservé l'eau sous ses trois états physiques.

The origin of the world long remained an enigma for the human mind. Still provisional but increasingly reasoned replies only took shape from the eighteenth century onwards with the development of sciences focused on the earth and the universe. It is considered today that the solar system was formed about 4.6 thousand million years ago by the condensation of a primitive nebula consisting of gas and dust. The Earth would thus be the result of the accretion of clusters, planetesimals and meteorites over a period of several hundred million years. Water is considered to have arrived thanks to comets and chondritic meteors, resulting in a primitive atmosphere rich in water that then condensed, contributing to the degassing of the various primitive components of the Earth. Because of its mass and its optimum distance from the Sun, the Earth is the only planet known to have conserved water in its three physical states.

# De grands pouvoirs pour une petite molécule

The great powers of a small molecule



© J.-P. Debenay  
Stromatolithes actuels : structures sédimentaires formées par des tapis de cyanobactéries utilisant la photosynthèse et dégageant de l'oxygène.  
Grande Barrière de corail, Australie.

Modern stromatoliths: sedimentary structures formed by carpets of cyanobacteria using photosynthesis and releasing oxygen. The Great Barrier Reef, Australia.

**P**etite molécule constituée par deux atomes d'hydrogène liés à un atome d'oxygène, l'eau a des propriétés singulières à bien des égards. En passant de 0 à 100 °C, à la pression de l'atmosphère, elle est successivement solide, liquide puis gazeuse. Autre particularité, c'est à 4 °C que sa densité est maximale, et la glace est plus légère que l'eau liquide.

Grâce aux fortes valeurs de sa capacité thermique et de ses chaleurs latentes de fonte et d'évaporation, l'eau joue un rôle essentiel de régulateur thermique à la surface de la planète. L'eau est également bon conducteur électrique et un puissant solvant, capable de dissoudre les sels et les minéraux et de favoriser ainsi nombre de réactions chimiques. L'eau sous forme liquide a ainsi permis l'émergence et le développement de la vie.

**A** small molecule consisting of two hydrogen atoms bound to one oxygen atom, water has singular properties in many respects. It is successively solid, liquid and gaseous when it is taken from 0 to 100°C at atmospheric pressure. Another feature is that its maximum density is at 4°C and ice is lighter than liquid water. Thanks to its high thermal capacity and its latent heat at melting and evaporation, water plays an essential role as a thermal regulator on the surface of the planet. Water is also a good electrical conductor and a powerful solvent that can dissolve salts and minerals and thus enhance many chemical reactions. Water in liquid form thus enabled the emergence and development of life.



© IRD/M. Jégu  
Érosion naturelle de roche plutonique granitoïde en milieu tropical. Les motifs en relief correspondent à des bandes silicifiées. Berges du rio Beni, Bolivie.

Natural erosion of granitoid plutonic rocks in a tropical environment. The relief patterns are silicified strips. Banks of the Rio Beni, Bolivia.



## L'EAU À L'ORIGINE DES FORMES VIVANTES WATER AT THE ORIGIN OF LIFE FORMS

L'apparition des premières formes de matière organique, des acides aminés, reste encore très mal expliquée. On admet néanmoins que c'est dans l'océan primitif que les algues bleues seraient apparues il y a 3,5 milliards d'années. Les premières formes de vie connues hors du milieu aquatique, des lichens, datent seulement d'environ 500 millions d'années. Au fil de centaines de millions d'années, les eaux ont successivement envahi puis déserté les terres au rythme des grandes variations climatiques et du modelage des continents par la tectonique, laissant derrière elles des organismes dont certains, au gré des mutations génétiques, ont survécu et évolué quand la majorité disparaissait. Au fil du temps, les espèces se sont diversifiées et ont colonisé à peu près tous les milieux terrestres, des plus humides aux plus arides. Elles restent cependant toutes tributaires de la présence d'eau notamment au moment de la reproduction.

The appearance of the first forms of organic matter, amino acids, is still very poorly explained. It is accepted however that blue algae appeared in the primitive ocean 3.5 thousand million years ago. Lichens, the first known life forms outside the aquatic environment, date back only about 500 million years. Over a period of hundreds of millions of years, water successively covered and then uncovered land during the great climatic variations and the forming of the continents by tectonic events, leaving behind organisms and by genetic mutation some of these survived and evolved while the majority disappeared. As time went by, the species diversified and colonised practically all the land environments from the most humid to the most arid. However, they all remained dependent on the presence of water, especially during reproduction.

L'eau, régulateur thermique,  
absorbe et redistribue une part  
de l'énergie solaire, assurant ainsi  
une relative stabilité  
des températures de l'atmosphère  
et de la surface terrestre.

Water, a thermal regulator,  
absorbs and redistributes part  
of solar energy thus ensuring  
comparatively stable  
temperatures of the air  
and the surface of the earth.  
In comparison, temperatures  
on the moon oscillate by some  
250°C between night and day.

En comparaison, sur la lune,  
les températures oscillent de  
quelque 250 °C entre la nuit  
et le jour.



*Page gauche/left*

© IRD/D. Wirrmann  
Stromatolithes fossiles du Quaternaire  
sur les rives du Salar de Coipasa. Ils témoignent  
d'un abaissement du niveau lacustre. Bolivie.

Quaternary fossil stromatoliths  
on the banks of the Salar de Coipasa.  
They indicate a fall in the level  
of the lake. Bolivia.

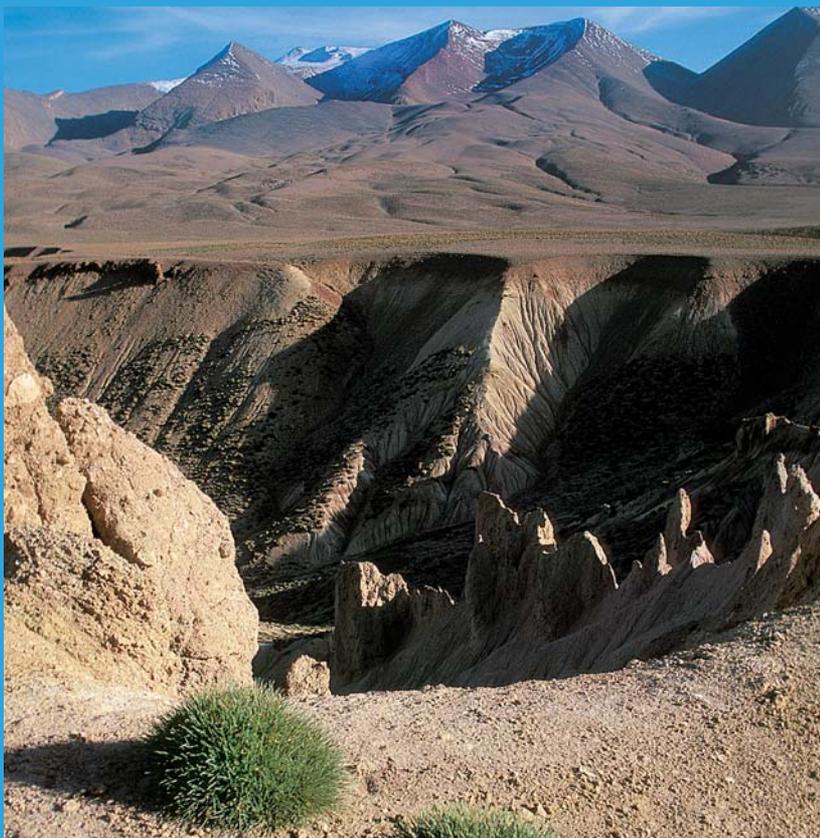
*Page droite/right*

© IRD/B. Pouyaud  
Lac du Tibet central (4 700 m).  
Même à très haute altitude, les échanges  
entre lacs et atmosphère demeurent importants.

Lake in central Tibet (4,700 m).  
Exchanges between lakes  
and the atmosphere are still considerable  
even at very high altitudes.

# L'eau façonne les reliefs

## Water moulds reliefs

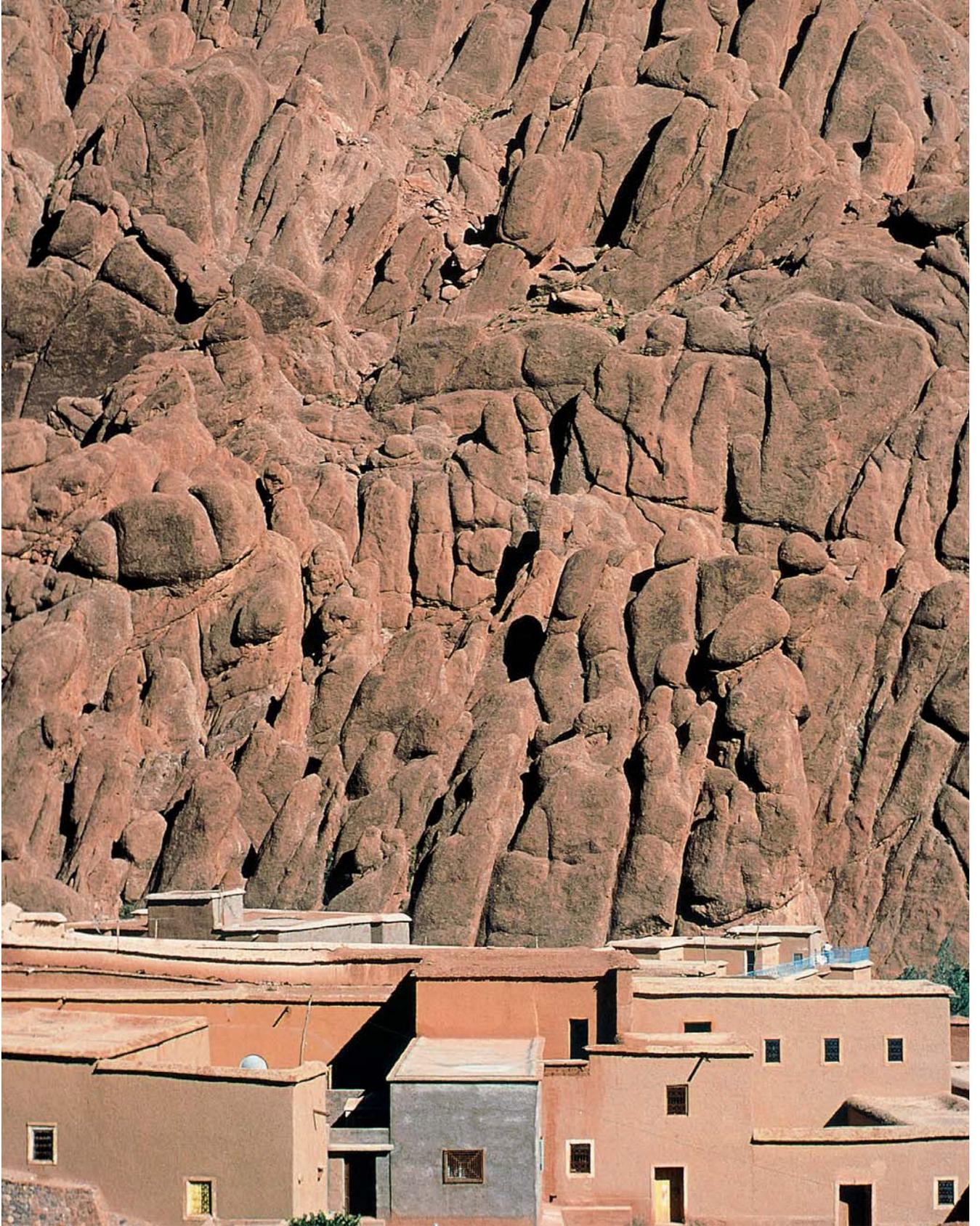


© IRD/V. Simonneaux  
Plateau sédimentaire du Tarkeddit,  
entaillé par une nouvelle vallée creusée  
par un cours d'eau descendant du massif  
du M'Goun (en arrière plan). Atlas, Maroc.

Tarkeddit sedimentary plateau  
with a new valley carved out  
by a watercourse flowing from  
M'Goun mountain (in the back-  
ground). Atlas, Morocco.

L'évolution des reliefs évoque un long affrontement entre la croûte terrestre et l'eau. Dès leur formation par les contraintes tectoniques, les reliefs créés sont lentement érodés au long des périodes géologiques. Ainsi peut-on différencier les chaînes de montagnes jeunes et actives, escarpées, des massifs érodés plus anciens. L'eau est l'agent majeur de l'érosion. Par cryoclastie, elle fait éclater les roches. Sous forme de pluie chargée de  $\text{CO}_2$ , elle en dissout certaines. Eau courante dévalant les reliefs, elle arrache, charrie, polit et roule tout sur son passage, creusant d'étroites gorges ou de larges vallées. Perdant son énergie sur les surfaces de moindre pente, elle dépose les matériaux arrachés en amont et comble les dépressions, créant terrasses et plaines alluviales.

The evolution of geographical relief illustrates a long confrontation between the earth's crust and water. As soon as it is formed by tectonic activity, the relief is slowly eroded during geological periods. We can thus distinguish between young, active mountain ranges with steep slopes and older, more eroded ranges. Water makes a major contribution to erosion. It splits rocks by cryoclastism. It dissolves some kinds of rock when it falls as rain loaded with  $\text{CO}_2$ . Running water flows downhill, ripping, carrying, polishing and rolling everything along its route, carving narrow gorges or broad valleys. It loses its energy on less sloping land and deposits the materials torn out upstream and fills depressions, creating terraces and alluvial plains.



© IRD/C. Dejoux  
Érosion due à l'eau, au vent et aux différences  
de température entre le jour et la nuit.  
Atlas, Maroc.

Erosion by water, wind and differences  
between day and night temperatures.  
Atlas, Morocco.



*Page gauche/left*

© IRD/B. Pouyaud  
 « Chapelles de marbres », cavités creusées par dissolution par les eaux du lac General Carrera en son niveau de base interglaciaire. Patagonie chilienne.

'Marble chapels': cavities formed by the dissolving of rock by the water of Lake General Carrera at its interglacial base level. Patagonia, Chile.

© IRD/M.-N. Favier  
 En Tunisie du Sud, oasis de Mides, canyon creusé par l'érosion fluviale.

Mides oasis in southern Tunisia: a canyon formed by fluvial erosion.

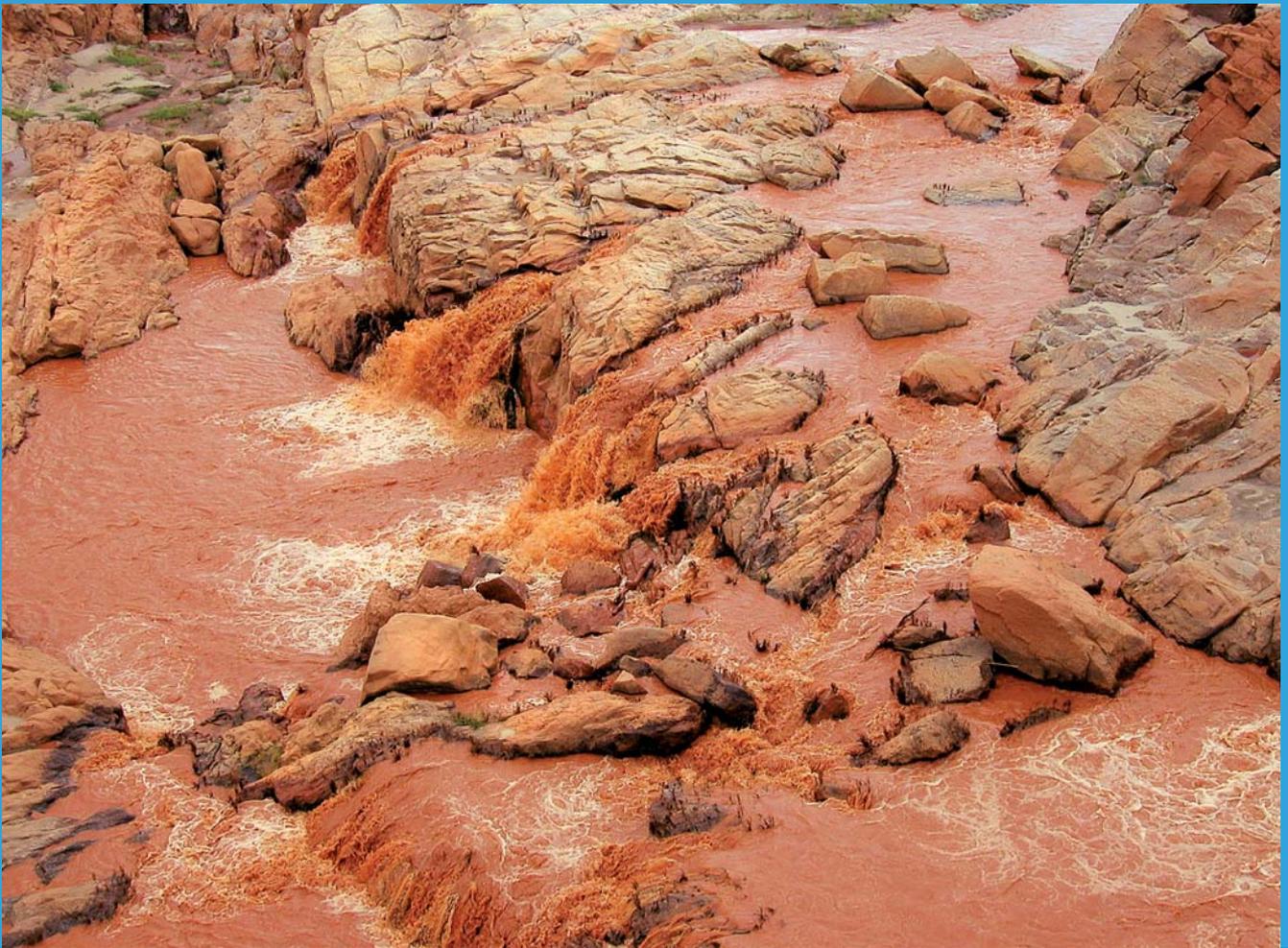
*Page droite/right*

© IRD/M. Grouzis  
 Les eaux boueuses de la Bestiboka témoignent de la forte érosion issue des hautes terres centrales déforestées. Madagascar.

The muddy water of the Bestiboka is a sign of the strong erosion of deforested highlands. Madagascar.

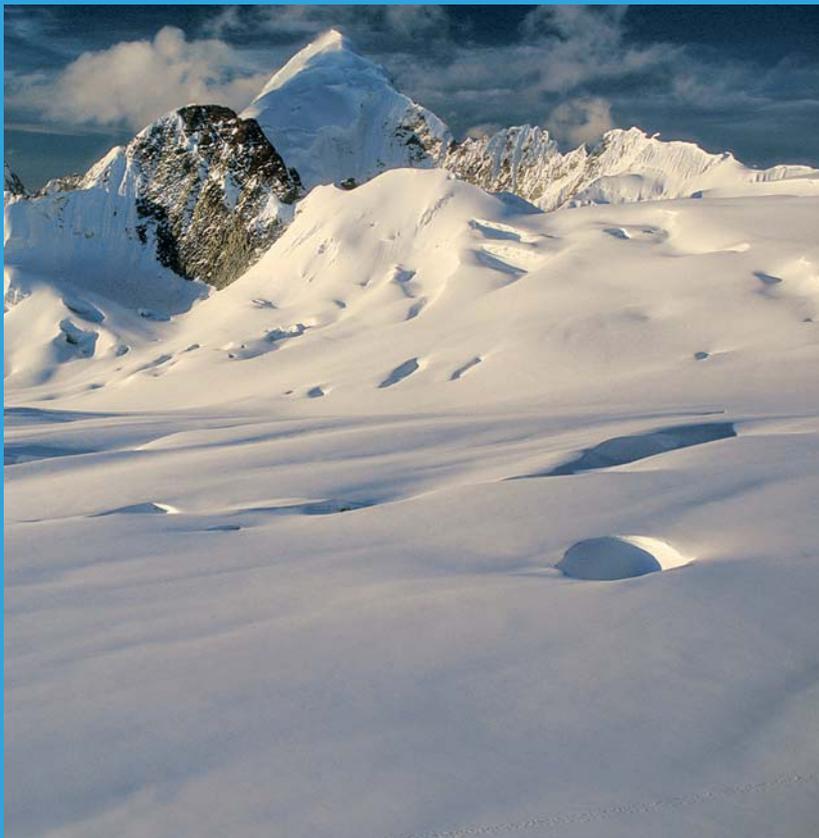
Il faut considérer les périodes géologiques dans leur durée pour comprendre comment, avec le temps et la répétition des crues, l'eau a pu façonner des reliefs aussi spectaculaires et des formes d'érosion originales.

Geological periods should be considered with regard to their length in order to understand how, with passing time and repeated flooding, water has formed such spectacular relief and original forms of erosion.



# Répartition de l'eau dans le monde

## Distribution of water in the world



© IRD/P Wagnon  
La cryosphère représente 2 % du réservoir d'eau de la planète. Volcan Coropuna, Pérou.

The cryosphere forms 2% of the earth's water reserves. Coropuna volcano, Peru.

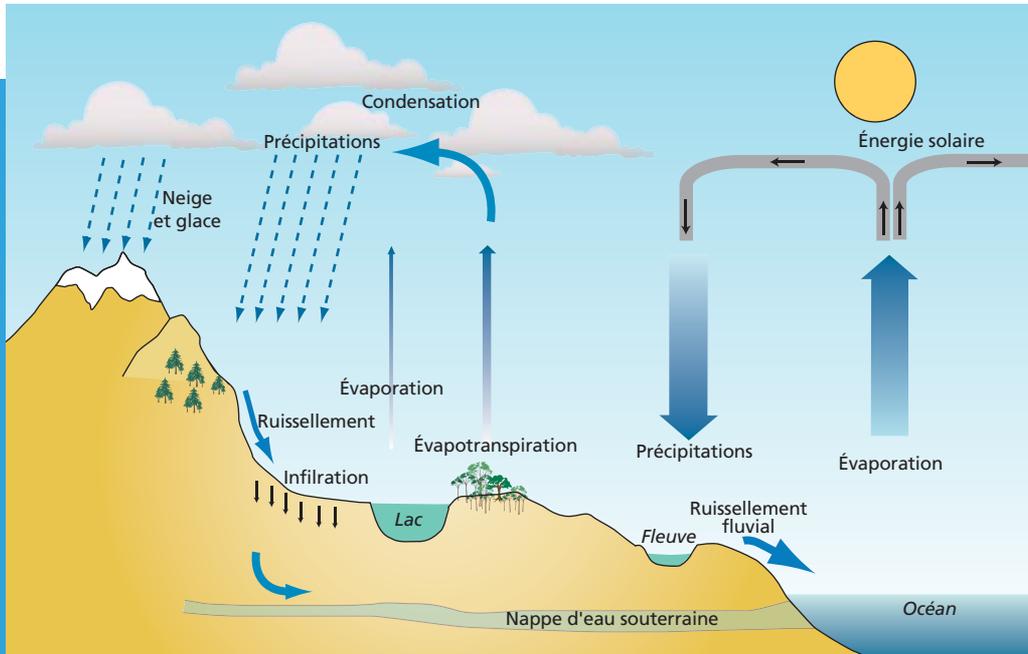
Les eaux salées des mers et des océans constituent à peu près 96,7 % du stock total des masses d'eau de la planète évalué à 1 380 millions de km<sup>3</sup>. L'eau douce, soit 40 millions de km<sup>3</sup>, est répartie entre différents réservoirs. Le plus important d'entre eux, la cryosphère, ensemble des masses d'eau sous forme solide, représente environ 2 % de l'eau planétaire. Les eaux souterraines constituent 1,1 % du stock planétaire. Eaux superficielles, eau atmosphérique et eau contenue dans les cellules vivantes représentent au final moins de 0,2 % du volume total. Pour donner une représentation de ces proportions, il faudrait imaginer la surface terrestre aplanie et uniformément recouverte d'eau : la hauteur totale d'eau, toutes masses confondues, atteindrait 2,7 km alors que l'ensemble des précipitations annuelles ne représente qu'une hauteur moyenne inférieure à 1 m.

The saltwater in the Earth's seas and oceans forms something like 96.7% of the planet's total water mass, estimated at 1380 million cubic kilometres. Fresh water, totalling 40 million cubic kilometres, is distributed between various natural reservoirs. The largest is the cryosphere—all the masses of water in solid form, forming about 2.0% of the water on the planet. Groundwater forms 1.1% of the total on the planet. Surface water, atmospheric water and water in living cells finally account for less than 0.2% of the total volume. These proportions can be represented by imagining the surface of the world as flat and covered evenly by water. The total depth of all kinds of water would be 2.7 km while total annual precipitation would have an average depth of less than 1 m.



© IRD/J. Orempuller  
L'eau salée des mers et des océans représente l'immense majorité de la masse d'eau terrestre. Ilôt (*motu*) de l'archipel des Tuvalu.

Saltwater in seas and oceans forms the great majority of the world's water mass. Islet (*motu*) in the Tuvalu Archipelago.



© IRD/M. Saint-Léger  
Le cycle de l'eau.  
La largeur des flèches  
est proportionnelle aux  
volumes des transferts  
d'eau.

The water cycle.  
The width of the arrows  
is proportional  
to the volumes  
of water transferred.

## LE CYCLE DE L'EAU THE WATER CYCLE

**L**e cycle de l'eau règle les flux entre les différents réservoirs d'eau de la Terre : l'énergie solaire reçue à la surface terrestre soumet les masses d'eaux océaniques et continentales à l'évaporation. La vapeur d'eau est redistribuée par des courants atmosphériques complexes, de façon très inégale selon les régions, sous forme de précipitations liquides ou neigeuses. Sur les continents, en arrivant au contact du sol, une partie des précipitations est à nouveau évaporée, ou sublimée dans le cas de la neige. Le reste ruisselle ou s'infiltrate et alimente les réservoirs d'eaux superficielles, lacs et rivières, et les réservoirs souterrains. Les eaux continentales retournent ensuite avec des délais très variables vers la masse océanique, bouclant ainsi le cycle de l'eau à l'échelle du globe.

**T**he water cycle regulates flows between the Earth's various natural reservoirs: solar energy at the surface of the planet causes the evaporation of sea and continental water. Water vapour is shifted by complex atmospheric currents and redistributed as rain or snow in a geographically very uneven manner. When it reaches the ground on land, part of precipitation evaporates once again and is sublimated in the case of snow. The rest flows as runoff or infiltrates and feeds surface water bodies, lakes and rivers and underground reservoirs. After very variable lengths of time, continental water returns to the ocean mass, completing the water cycle at the scale of the planet.



© IRD/D. Wirrmann  
L'évaporation des lacs et rivières participe  
au cycle de l'eau. Lac Titicaca, 3 810 m. Pérou.

Evaporation from lakes and rivers  
is part of the water cycle. Lake Titicaca,  
3,810 m. Peru.



## LA CRYOSPHERE

### THE CRYOSPHERE

La cryosphère, avec un volume de 28,2 millions de km<sup>3</sup>, joue un rôle clé dans le cycle de l'eau. Elle détermine notamment le niveau des océans: lors de la dernière glaciation, les inlandsis ont stocké un volume d'eau tel que le niveau des océans était situé 120 m en dessous de l'actuel. Bien qu'insignifiantes par rapport à la masse de la cryosphère, les neiges et glaces des massifs montagneux alimentent de nombreux écosystèmes par leurs eaux de fonte. Dans certaines régions, ces apports peuvent constituer une part notable du débit des fleuves. Les rivières des hauts bassins montagneux, andins et himalayens en particulier, assurent une part essentielle de la ressource en eau de nombreuses populations en aval.

Totalling 28.2 million cubic kilometres, the cryosphere plays a key role in the water cycle. It determines in particular the level of the seas: during the last ice age, continental ice sheets stored so much water that sea level was 120 metres below that of today. Although they are insignificant in relation to the mass of the cryosphere, the snow and ice on mountain ranges supply many ecosystems with their meltwater. In some regions, this water forms a substantial part of river flow. The rivers of the high mountain basins, especially in the Andes and the Himalayas, supply an essential proportion of the water resources of the many populations downstream.



#### Page gauche/left

© IRD/B. Pouyaud

La cryosphère représente le plus grand réservoir d'eau douce. Ici le Campo de Hielo Sur, inlandsis de 3 000 km<sup>2</sup>. Patagonie chilienne.

The cryosphere is the largest reservoir of freshwater. Campo de Hielo Sur, 3,000 sq. km ice cap. Patagonia, Chile.

#### Page droite/right

© IRD/D. Wirrmann

Les glaciers fournissent une part importante des ressources en eau de nombreuses vallées habitées et cultivées. Cordillère royale, Bolivie.

Glaciers supply a large proportion of the water resources of numerous inhabited, cultivated valleys. Bolivia.



## EAUX SOUTERRAINES GROUND WATER

**L**es eaux souterraines représentent un volume bien plus important que les lacs et rivières. Elles constituent par ailleurs très souvent une ressource appréciée, notamment du fait de leur qualité préservée par la profondeur sous la surface du sol et par leur circulation bien plus lente que celle des eaux de surface (parfois plusieurs milliers d'années). Cependant, les pompages importants et les pollutions, surtout agricoles et industrielles, font peser sur elles de lourdes menaces de dégradation, tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Ainsi, les cas de surexploitation se multiplient, en particulier dans les zones arides et semi-arides où elles constituent pourtant souvent la seule ressource disponible de manière permanente. Les eaux souterraines subissent les conséquences des changements environnementaux se produisant à la surface avec un décalage dans le temps qui peut être important. L'utilisation de cette inertie des nappes peut permettre d'améliorer la gestion de la ressource en eau.

The volume of groundwater greatly exceeds that of lakes and rivers. It is very often a resource that is appreciated, especially as its quality is conserved by its depth below ground level and the much slower movement than that of surface water (sometimes several thousand years). However, there is serious danger of the degradation of both quantity and quality as a result of substantial pumping and pollution caused in particular by agriculture and industry. Cases of over-exploitation are becoming more frequent, especially in arid and semi-arid zones where groundwater is often the only permanent resource available. Groundwater is suffering from the consequences of environmental changes at the surface with a staggering in time that can be substantial. This inertia of aquifers can be used to improve water resource management.

Dans les zones semi-arides, soit environ un tiers des terres émergées, les eaux souterraines constituent généralement la principale ressource en eau, voire parfois la seule facilement accessible. Comprendre leur fonctionnement actuel et anticiper leurs évolutions est alors un enjeu scientifique et sociétal majeur.

Dans cet objectif, l'IRD mène depuis 1990 des recherches dans le sud-ouest du Niger, près de Niamey, où les programmes internationaux Hapex-Sahel et Amma ont démontré que l'infiltration de l'eau dans le sol, et donc la recharge de la nappe phréatique, avait considérablement augmenté alors que les précipitations baissaient. Cette évolution, contraire au « bon sens » courant, s'explique pourtant : au cours des décennies 1970 et 1980, le Sahel a connu de graves sécheresses, avec une diminution des pluies d'environ 20 %. En même temps, les paysans étendaient considérablement les surfaces cultivées aux dépens de la végétation naturelle, pour alimenter une population en très forte croissance démographique et aussi pour compenser les moindres rendements agricoles dus à la fois à la perte de fertilité des terres et à la pluviométrie déficitaire. La disparition des herbes et broussailles naturelles a facilité l'apparition d'une croûte argileuse à la surface du sol, favorisant le ruissellement de l'eau sur les versants. Cette eau se concentre ensuite dans les bas-fonds et s'infiltré massivement vers la nappe phréatique, dont la recharge a été multipliée par dix en quarante ans. La hausse de la nappe phréatique est généralisée et durable. Le changement de l'occupation des terres a donc été un facteur d'évolution des ressources en eau bien plus important que la dégradation climatique. Ce phénomène singulier a été ensuite retrouvé dans d'autres régions du Sahel.

Des recherches à long terme menées dans la région de Kairouan (Tunisie centrale) ont par ailleurs permis de mieux comprendre les interactions complexes entre l'homme et son environnement. Le paysage régional est marqué par le barrage El Haouareb, dont le fonctionnement a révélé différents imprévus : souvent sec à l'amont, il a toujours de l'eau à l'aval. En effet, la majeure partie de l'eau de la retenue du barrage disparaît rapidement, par infiltration dans les fissures du massif calcaire qui le supporte, et ressort ensuite au pied du barrage par des sources pérennes. Cette facétie de la nature a posé problème aux gestionnaires de l'eau qui prévoyaient d'alimenter de grands périmètres irrigués grâce à lui. Autre évolution inattendue, la multiplication des ouvrages de protection contre l'érosion a considérablement réduit la quan-

tité d'eau atteignant le grand barrage et donc diminué la ressource en eau mobilisable pour le développement agricole de la plaine. Autre surprise, les subventions données pour passer à des techniques d'irrigation plus économes en eau ont en fait incité les paysans à étendre les surfaces irriguées, accentuant la surexploitation de la grande nappe phréatique de la plaine de Kairouan, dont la baisse continue atteint près de 1 m par an.

### Groundwater surveillance

Groundwater is the main water resource in the semi-arid zones that form about a third of the land in the world and sometimes the only one easily accessible. Understanding aquifer functioning and anticipating changes is thus a major issue for science and society.

IRD has conducted research since 1990 near Niamey in south-west Niger where the Hapex-Sahel and AMMA international programmes have shown that infiltration in the ground and hence groundwater recharge had increased considerably while precipitation had decreased. This strange trend nonetheless has an explanation. Serious droughts occurred in the Sahel in the 1970s and 1980s, with some 20% less rainfall. Meanwhile, farmers cleared natural vegetation to enlarge cultivated areas in order to feed a strongly growing population and make up for smaller yields resulting from fertility loss and the rainfall deficit. The disappearance of grasses and brush caused clayey crusting of the soil surface that enhanced runoff. The water then concentrated in low-lying land and infiltrated massively into the groundwater, whose recharge has increased 10-fold in 40 years. The rise in groundwater level is general and lasting. The change in land use has thus been a much more weighty factor in the evolution of water resources than the worsening of the climate. This singular phenomenon has been found in other parts of the Sahel.

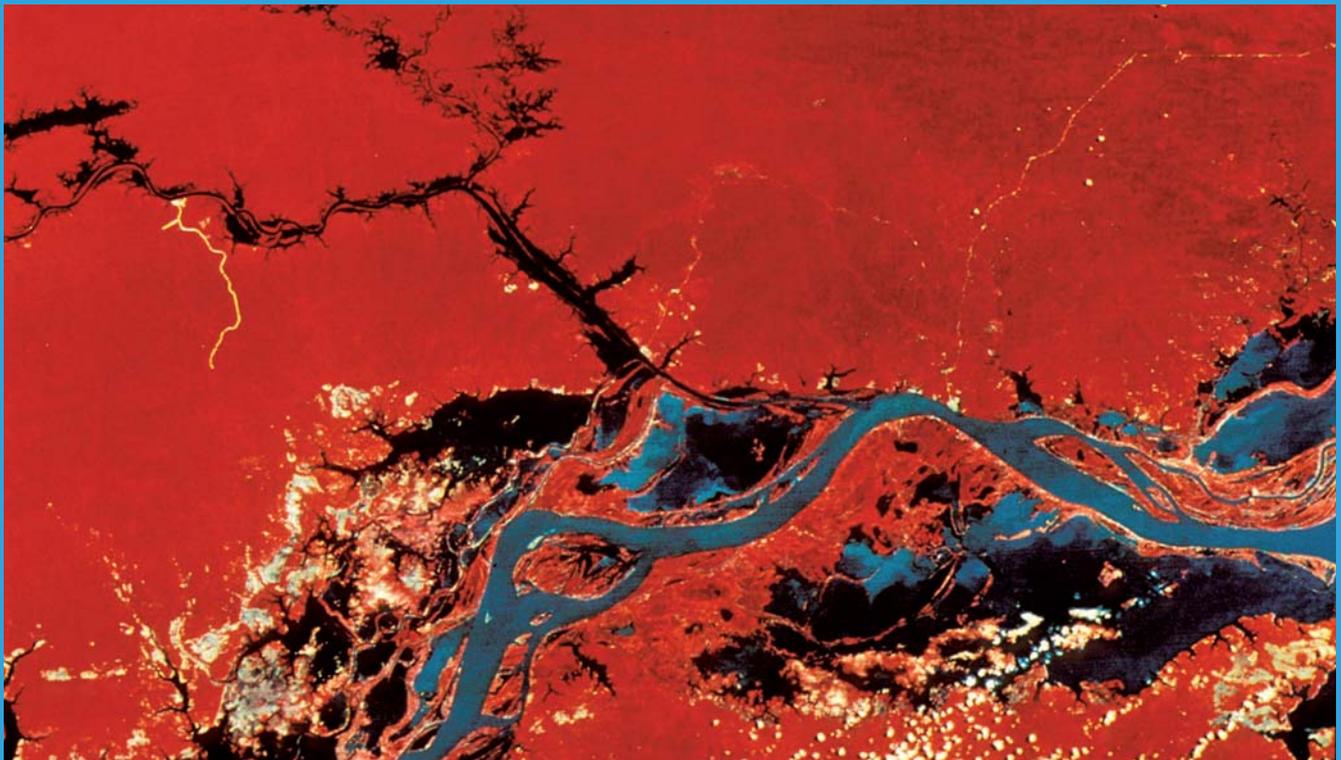
Long-term research in the Kairouan region in central Tunisia has led to better comprehension of the complex interactions between man and the environment. The regional landscape is marked by the El Haouareb reservoir whose functioning has shown unexpected features: it is often dry upstream and there is always water downstream. Indeed, most of the water impounded disappears rapidly by infiltration in fissures in the limestone bedrock and reappears as permanent springs at the toe of the dam. This practical joke played by nature causes problems as it had been planned to supply large irrigated perimeters. Another unexpected evolution is that the increase in erosion control works has considerably reduced the amount of water reaching the reservoir of this large dam and has thus reduced the volume available for agriculture in the plain. Another surprise is that the subsidies awarded for changing to irrigation techniques that are more economical as regards water use have encouraged farmers to extend irrigated areas, aggravating the over-exploitation of the large aquifer in Kairouan plain; the level of the aquifer is falling continuously by nearly 1 metre per year.

## LACS ET RIVIÈRES

### LAKES AND RIVERS

**R**éservoirs d'eau douce superficielle, les lacs et les rivières représentent les ressources les plus facilement mobilisables par l'homme. Ils sont alimentés par les eaux dites « bleues », c'est-à-dire la part des précipitations qui n'est ni évaporée ni absorbée par la végétation, mais qui ruisselle ou s'infiltre. Les régimes hydrologiques des fleuves dépendent de multiples facteurs, parmi lesquels l'étendue du bassin versant, sa situation géographique, sa pluviométrie et l'intensité de l'évaporation. L'Amazonie détient tous les records, son débit représentant 15 % du total des apports d'eau douce des fleuves à la masse océanique. L'ensemble des lacs d'eau douce représente un volume de 91 000 km<sup>3</sup>, dont 23 600 pour le seul lac Baïkal.

Natural freshwater reservoirs, lakes and rivers contain the resources with the easiest access for man. They are fed by so-called 'blue water', that is to say by the proportion of precipitation that is neither evaporated nor taken up by vegetation but that flows as runoff or infiltrates. The hydrological regimes of rivers are governed by many factors, including the area of the drainage basin, its geographic position, rainfall and the intensity of evaporation. The Amazon holds all the records with flow forming 15% of the world's total discharge of freshwater into the sea. The volume of freshwater lakes totals 91,000 cubic kilometres, of which 23,600 is in Lake Baikal alone.



© DR  
Image satellite du fleuve Amazone.  
Région de Manaus, Brésil.

Satellite image of the Amazon River.  
Manaus region, Brazil.

## Observatoire Hybam : mesurer le débit, les flux géochimiques et sédimentaires de l'Amazone

L'Amazone, le premier des grands fleuves mondiaux par les débits mesurés à l'exutoire (206 000 m<sup>3</sup>/s) et par l'étendue de son bassin versant (6 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>), draine un bassin peu anthropisé qui abrite la plus grande forêt tropicale de la planète. Ce bassin est limité à l'ouest par la chaîne des Andes, qui ne représente que 10 % de la superficie mais joue un rôle déterminant sur le climat et l'hydrologie, sur l'évolution géodynamique du bassin, et qui fournit par l'altération et l'érosion des volumes considérables de matières dissoutes et particulaires. La variabilité hydrologique saisonnière, amplifiée par la taille du bassin versant et le faible gradient topographique, génère des zones humides connexes aux fleuves de grande étendue où d'importants phénomènes de stockage sédimentaire sont observés.

Les processus biogéochimiques, tant au niveau des zones humides que des zones de mélange (eaux blanches/eaux noires), interfèrent également sur les transferts de matière au sein du bassin amazonien. Malgré une dimension continentale et une distribution sur les deux hémisphères, le bassin de l'Amazone souffre de la variabilité climatique actuelle, qui perturbe fortement le régime hydrologique en accentuant les phénomènes extrêmes (crues et étiages sévères).

Afin de connaître l'évolution à long terme – due aux variations hydroclimatiques et aux activités anthropiques – des transferts d'eau et de matières, paramètres fondamentaux pour une meilleure gestion des ressources tant hydriques que biologiques, l'observatoire de recherche en environnement Hybam sur les fleuves amazoniens a été lancé en janvier 2003 avec l'appui financier du ministère de la Recherche, de l'IRD, de l'Institut national des sciences de l'Univers, et de l'observatoire Midi-Pyrénées. Cet observatoire s'appuie sur un réseau de 18 stations hydrométriques, dont deux stations sur les fleuves de Guyane française et deux autres sur les fleuves Congo et Orénoque, respectivement les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> plus puissants fleuves du monde après l'Amazone. Un suivi hydrologique et sédimentaire, couplé à un échantillonnage régulier pour l'analyse géochimique, a été mis en place sur ce réseau selon un protocole unifié, afin d'assurer au mieux l'homogénéité des données produites.

L'observatoire Hybam intervient dans l'ensemble des pays du bassin amazonien en collaboration avec les services hydrologiques de Colombie, d'Équateur, du Pérou, de Bolivie, du Brésil, et de la Guyane française et de nombreuses universités de l'ensemble des pays concernés.

Il permet l'acquisition de données fiables et régulières, avec des pas de temps adaptés aux variations saisonnières portant sur les flux hydriques, sédimentaires et géochimiques des fleuves du bassin amazonien, de l'Orénoque et du Congo. Les techniques spatiales sont largement employées, tant pour le suivi hydrologique (niveau d'eau) des stations par altimétrie radar que pour la détermination des matières en suspension des fleuves par traitement des images spatiales (couleur de l'eau). Plus d'informations sur [www.ore-hybam.org](http://www.ore-hybam.org)

### HYBAM observatory: measuring Amazon discharge, geochemical and sediment flows

The Amazon is the first of the world's great rivers in terms of discharge measured at the mouth (206,000 m<sup>3</sup>/s) and by the size of its drainage basin (6 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>). The latter is little occupied by man and houses the largest tropical forest in the world. The basin is bounded to the west by the Andes, which form only 10% of the area but play a determinant role with regard to climate and hydrology and the geodynamic evolution of the basin; via weathering and erosion, the Andes supply considerable volumes of dissolved matter and particles. Seasonal hydrological variability, amplified by the size of the drainage basin and the small topographical gradient, generates large wetlands adjoining the rivers and substantial sediment storage is observed there.

Biogeochemical processes both in the wetlands and in mix zones (white water/black water) also interfere with matter transfer in the Amazon basin. In spite of the continental dimension and distribution in two hemispheres, the Amazon basin suffers from the present climate variability; this strongly disturbs the hydrological regime by accentuating extreme phenomena (marked flooding and low water).

In order to gain information about the long-term changes caused by hydroclimatic variations and anthropogenic activities to water and matter transport—fundamental parameters for better management of both water and biological resources—the Environmental Research Observatory HYBAM devoted to Amazonian rivers was launched in January 2003 with financial support from the French Ministry of Research, IRD, the Institut national des sciences de l'Univers and the Observatoire Midi-Pyrénées. The observatory is based on a network of 18 gauging stations, including two on rivers in French Guiana and two others on the Congo and the Orinoco, respectively the second and third largest rivers in the world after the Amazon. Hydrological and sediment monitoring combined with regular sampling for geochemical analyses has been set up in the network using a unified protocol for the best assurance of the homogeneity of the data produced. [www.ore-hybam.org](http://www.ore-hybam.org)

# Des climats aux écosystèmes

From climate to ecosystem



© IRD/G. Michon  
Forêt sèche à acacias,  
région de Shashemene. Éthiopie.

Dry forest of acacia,  
Shashemene region. Ethiopia.

La répartition des précipitations sur les continents est très inégale. La latitude, l'exposition aux vents, les reliefs, la continentalité sont les principaux facteurs de variation de la pluviométrie. Certains piémonts exposés à des courants atmosphériques chargés d'humidité océanique reçoivent ainsi plusieurs mètres d'eau par an, avec des records avoisinant les 12 m, alors que certains déserts, en régime climatique continental, peuvent rester plusieurs années sans aucune précipitation, en Namibie par exemple. Entre ces extrêmes, il existe une grande variété de régimes pluviométriques intermédiaires. Le régime des températures et des vents, lié à la latitude, à la saisonnalité et à l'altitude, conditionne l'intensité de l'évaporation. *In fine*, l'ensemble de ces facteurs génère une multitude de climats auxquels correspondent autant d'écosystèmes spécifiques.

Precipitation is very unevenly distributed on the continents. The main factors in rainfall variations are latitude, exposure to winds, the relief and continental climatic characteristics. Some piedmont areas exposed to air flows loaded with oceanic moisture thus have several metres of precipitation per year, with records in the neighbourhood of 12 metres, while some deserts with a continental climate may go for several years with no rain, the case in Namibia for example. A broad variety of intermediate rainfall regimes lies between these two extremes. The temperature and wind regime, associated with latitude, season and altitude, governs evaporation intensity. Finally, all these factors generate a multitude of climates and as many specific ecosystems.



© NaturExpose.com/O.Dangles et F. Nowicki  
En Équateur, les conditions environnementales des páramos (gel, sécheresse saisonnière) ont conduit à l'adaptation d'espèces endémiques. Ici, *Espeletia pycnophylla*.

In Ecuador, the environmental conditions in the páramos (frost, seasonal drought) have resulted in the adaptation of endemic species. Here, *Espeletia pycnophylla*.



© IRD/H. de Foresta  
Les contreforts de la base du tronc donnent une stabilité aux arbres sur des sols peu profonds et gorgés d'eau. Forêt primaire en Guyane.

The buttressed trunk bases give stability to trees in shallow, waterlogged soils.  
Primary forest in French Guiana.

© IRD/P. Dumas  
Crique forestière après la pluie.  
Montagne de Kaw, Guyane.

Forest inlet after rain. Mount Kaw,  
French Guiana.

Les climats océaniques  
et les climats tropicaux humides  
bénéficient de précipitations  
importantes et relativement  
constantes au cours de l'année.

Les écosystèmes associés,  
caractérisés par une végétation  
abondante et sempervirente,  
sont généralement des foyers  
de grande biodiversité : la forêt  
amazonienne par exemple.

Ocean climates and humid tropical  
climates experience substantial  
precipitation that are fairly  
even throughout the year.  
The associated ecosystems,  
with abundant evergreen  
vegetation, are generally centres  
of considerable biodiversity.  
The Amazon forest is an example.



© NaturExpose/O. Dangles, F. Nowicki  
Les forêts tropicales sont des foyers de  
grande biodiversité. Ici, la grenouille de cristal  
(*Sachatamia illex*). Réserve intégrale d'Otonga,  
Équateur.

Tropical forests house great biodiversity.  
Here, the Ghost Glass Frog (*Sachatamia illex*).  
Otonga Nature Reserve, Ecuador.

© IRD/T. Couvreur  
Les palmiers jouent un rôle important  
dans la constitution des forêts tropicales  
humides depuis leur formation  
il y a 100 millions d'années. Brésil.

Palms have played an important role  
in humid tropical forests since their  
formation 100 million years ago. Brazil.



## LES DÉSERTS

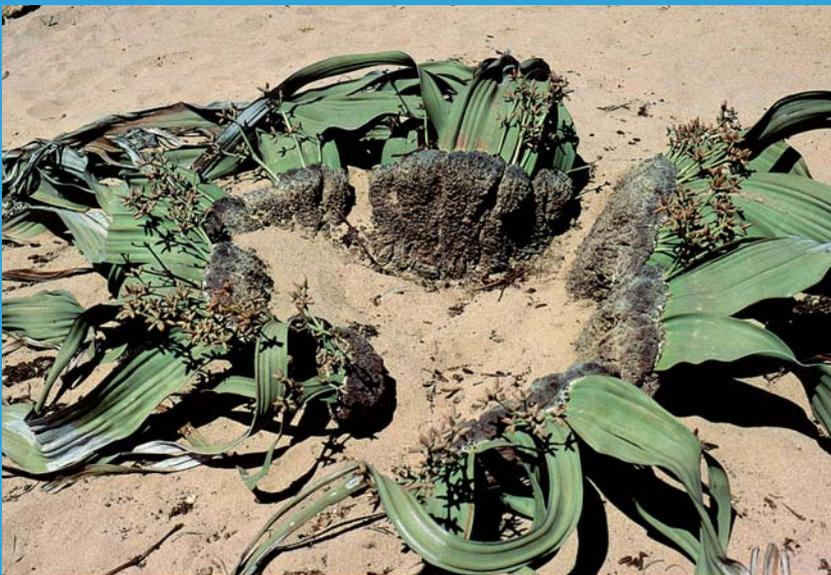
### DESERTS

Certaines régions sont caractérisées par une pluviosité très faible et très irrégulière : déserts froids des régions polaires ou déserts chauds d'Afrique et du Proche-Orient par exemple. Sous les basses latitudes, l'intensité de l'évapotranspiration accentue encore l'aridité des écosystèmes : ainsi dans le désert du Sahara, au Niger, 85 % des précipitations retournent à l'atmosphère par évaporation. Le désert du Namib est considéré comme le plus ancien : on estime que l'aridité de son climat date de 55 millions d'années environ. L'humidité est principalement apportée par des brouillards océaniques. Les déserts abritent une faune et une flore très spécifiques, certaines espèces étant considérées comme de véritables « fossiles vivants », telle la Welwitschia.

The rainfall in some regions is very small and very irregular. This is the case, for example, of the cold deserts in the polar regions and the hot deserts in Africa and the Near East. At low latitudes, intense evapotranspiration further accentuates the aridity of ecosystems. In the Sahara Desert, in Niger, 85% of precipitation evaporates and returns to the atmosphere. The Namib Desert is considered to be the oldest in the world, with an arid climate dating back some 55 million years. Moisture is brought mainly by sea mists. The desert fauna and flora are extremely characteristic of the place and some species, such as Welwitschia, are qualified as 'living fossils'.

© IRD/J.-L. Duprey  
Paysage désertique d'altitude.  
Lagune endoréique. Sud-Lípez, Bolivie.

Highland desert landscape.  
Endorheic lagoon. Sud Lípez, Bolivia.



© IRD/M.-N.F. Favier  
Paysage désertique de l'Akakus. Libye.

Desert landscape in the Akakus. Libya.

© IRD/Y. Boulvert  
Espèce endémique du désert namibien,  
*Welwitschia bainesii* (ex. *mirabilis*) peut vivre plus  
de 1 000 ans et absorbe l'eau par ses feuilles.

An endemic species in the Namibian  
desert, *Welwitschia bainesii* (ex. *mirabilis*)  
can live for more than 1000 years  
and absorbs moisture through its leaves.



D'autres climats se caractérisent par une forte saisonnalité des précipitations. C'est le cas de la plupart des climats tempérés continentaux mais surtout des climats dits à régime de mousson.

L'Afrique de l'Ouest et l'Asie du Sud-Est connaissent ainsi une alternance de périodes de sécheresse et de périodes de fortes précipitations

In other climates, precipitation is strongly seasonal. This is the case of most temperate continental climates but above all that of 'monsoon' climate regimes. West Africa and South-East Asia thus experience drought periods alternating with periods of strong precipitations.



*Page gauche/left*

© IRD/B. Mougenot  
Front de poussières atmosphériques à Matam au Sénégal, précédant une ligne de grains de la mousson africaine.

Atmospheric dust front at Matam in Senegal, preceding a line of African monsoon squalls.

*Page droite/right*

© IRD/B. Pouyaud  
Forêt tempérée de hêtres sur les flancs du volcan Mocho. Chili central.

Temperate beech forest on the flanks of the volcano Mocho. Central Chile.

## Comprendre la mousson africaine : un ambitieux objectif pour le programme Amma

**La mousson rythme la vie des 300 millions d'Africains de l'Ouest.** De l'intensité et de la durée de ses pluies dépendent l'ensemble des récoltes et des ressources en eau. En moins de quatre mois, de juin à septembre, elle apporte plus de 80 % des précipitations annuelles. Or, depuis quarante ans, on observe une modification significative du cycle saisonnier, avec une baisse du nombre de grands événements pluvieux, conjuguée paradoxalement à une augmentation du ruissellement, rendant les habitants du Sahel vulnérables, à la fois aux sécheresses et aux inondations.

**Le programme international Amma (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine)** a ainsi été lancé en 2001 pour comprendre les raisons encore méconnues des perturbations de la mousson africaine, perturbations qui se sont notamment manifestées par une sécheresse qui a frappé sans discontinuer toute l'Afrique de l'Ouest au cours du dernier tiers du xx<sup>e</sup> siècle. Cette anomalie climatique est la plus importante que notre planète ait connue depuis qu'il existe une veille météorologique mondiale, que ce soit par sa durée, son extension spatiale ou encore sa sévérité : 50 % de déficit pluviométrique moyen pendant 30 années d'affilée sur la partie nord du Sahel. Les implications sont multiples.

**Pour la communauté scientifique internationale, la question** est de savoir si une telle perturbation climatique est un des signaux précurseurs des changements majeurs du climat de notre planète attendus d'ici la fin du xxi<sup>e</sup> siècle ; ou s'il s'agit d'une perturbation d'échelle régionale, liée notamment à la déforestation massive et aux changements d'usage des sols de ces 50 dernières années. L'échelle globale et l'échelle régionale sont par ailleurs en étroite relation, via notamment le cycle de l'eau qui est un élément régulateur fondamental du climat terrestre. L'instabilité peut donc être planétaire au départ et se propager ensuite vers le niveau régional ou inversement.

**Mieux connaître les mécanismes de la mousson africaine,** c'est aussi se donner des outils pour mieux prévoir ses variations et ses répercussions sur la santé, sur les ressources agricoles et les ressources en eau. Au-delà de la curiosité « académique », il existe donc des enjeux majeurs pour les

décideurs et les gestionnaires afin de mieux informer et protéger les populations locales.

**Pour relever ce défi scientifique multidisciplinaire aux très fortes implications sociétales,** le programme Amma a été mis sur pied en 2001 sous la responsabilité conjointe de l'Insu-CNRS et de l'IRD avec la participation, en France, de Météo-France, du Cnes et de l'Ifremer et, à l'étranger, d'une trentaine d'agences de recherche appartenant à une quinzaine de pays différents.

**Amma s'intéresse particulièrement aux interactions complexes** entre les compartiments atmosphérique, continental et océanique, qui déterminent la variabilité du système de mousson sur des échelles allant de la dizaine de jours à la dizaine d'années. Le programme a innové dans ce domaine en organisant pour la première fois des campagnes de mesure coordonnées sur l'océan, l'atmosphère et le continent, grâce à l'utilisation conjointe d'avions et de navires de recherches en lien avec les dispositifs installés à terre dans toute la région, représentant au total plus d'un millier de capteurs. Le cycle de l'eau fait l'objet d'une attention spécifique mais ceux du carbone et de différents autres éléments chimiques sont également étudiés, de même que les transports et dépôts d'aérosols. Par ailleurs, le programme Amma a été le premier à placer dès le départ l'étude des impacts environnementaux et sociétaux au cœur de son questionnement.

**La communauté scientifique africaine a été massivement impliquée** dans cet effort international, à travers un réseau de 200 personnes, qui a élaboré son propre programme scientifique centré sur les questions les plus importantes pour les pays africains. La mise en œuvre des recherches liées à ce programme a bénéficié d'un fond de soutien prioritaire du ministère des Affaires étrangères français.

### Understanding the African monsoon: the ambitious objective of the AMMA programme

The monsoon governs the lives of 300 million West Africans. All crops and water resources depend in the intensity and duration of monsoon rainfall. It brings 80% of annual precipitation in less than



© IRD/T. Lebel

Survol du bassin du Niger pour la mesure des paramètres atmosphériques et de surface dans le cadre du programme Amma.

Flying over the Niger basin to measure atmospheric and surface parameters within the framework of the AMMA programme.

four months—from June to September. However, a significant change in the seasonal cycle has been observed for forty years, with fewer major rainfall events and, paradoxically, an increase in runoff, making the population of the Sahel vulnerable to both drought and flooding.

The AMMA international programme (African Monsoon Multidisciplinary Analyses) was therefore launched in 2001 to understand the still little-known reasons for the disturbances to the African monsoon, that result in particular in the continuous drought that affected the whole of West Africa during the last third of the twentieth century. It is the largest climatic anomaly in the world since the beginning of world meteorological observations—in duration, area and severity. An average rainfall deficit of 50% was observed in the northern part of the Sahel for 30 years running. There are many implications.

The international scientific community wishes to know whether a climatic disturbance of this scale is a sign of the major climate changes expected by the end of the twenty-first century or a regional disturbance linked in particular with massive deforestation and changes in land use over the past 50 years. In fact the global and regional scales are closely linked in particular via the water cycle, one of the fundamental regulators of the climate of the world. Instability might therefore be global initially and then spread to the regional scale or vice versa.

Better knowledge of the African monsoon also means acquiring tools for better forecasting of its variations and its effects on health, agricultural resources and water resources. Beyond the question of 'academic' curiosity, there are thus major issues for

decision makers and managers in order to better inform and protect local populations.

To take up this multidisciplinary challenge with very strong implications for society, the AMMA programme was set up in 2001 under the joint responsibility of INSU-CNRS and IRD, with the participation in France of Météo-France, CNES and IFREMER and, abroad, with some thirty research agencies in about fifteen different countries.

AMMA is focused in particular on the complex interactions between the atmospheric, continental and ocean compartments that determine the variability of the monsoon system on scales ranging from about ten days to about ten years. The programme has innovated in this area by organising for the first time coordinated observation programmes of sea, atmosphere and land by means of the combined use of aircraft and research ships linked with land-based facilities throughout the region, with more than a thousand sensors in all. Particular attention is paid to the water cycle but the carbon cycle and those of other chemical substances are also studied, such as the transport and deposit of aerosols. In addition, the AMMA programme was the first to place study of the environment and societal impacts at the heart of its questions right from the beginning.

The African scientific community has been massively involved in this international effort via a network of 200 persons who drew up their own scientific programme centred on the most important questions for African countries. The conducting of the research associated with the programme has benefited from a French Ministry of Foreign Affairs priority support fund.

# Variations et oscillations naturelles du climat

## Natural climate variations and oscillations



© IRD/M.-N. Favier  
Gravures rupestres de l'Akakus, témoins d'un climat ancien beaucoup plus humide que celui du Sahara actuel. Libye.

Rock engravings in the Akakus showing a much more humid climate than that of the Sahara today. Libya.

Ce n'est qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> et au XX<sup>e</sup> siècle, à la lumière d'indices apportés par différentes disciplines dont l'archéologie, la géologie et la glaciologie que l'on a commencé à suspecter la variabilité temporelle des climats à l'échelle régionale, puis celle du climat global de la planète : vallées et indices glaciaires dans des contrées aujourd'hui tempérées, terrasses marines récentes actuellement exondées sont dues à des variations climatiques anciennes. Indépendamment de ces évolutions historiques, des événements récurrents d'envergure exceptionnelle perturbent nos climats actuels. Les phénomènes El Niño et la Niña déplacent les zones propices aux cyclones, modifient le niveau de la mer et provoquent sécheresse en Afrique et inondations en Amérique latine.

With clues brought by various disciplines such as archaeology, geology and glaciology, it was only at the end of the nineteenth century and during the twentieth that scientists began to suspect that climates were variable in time at the regional level and then on a global scale: glacial valleys and traces in areas that are temperate today and recent marine terraces now out of the water are the result of old climate variations. Independently of these historical evolutions, recurrent phenomena of an exceptional scale disturb climates today. The El Niño and La Niña phenomena displace cyclone risk zones, affect sea-level and cause drought in Africa and flooding in Latin America.



© IRD/M.-N. Favier  
Glacier nord-ouest du Huascaran et sa moraine  
du Petit Âge de Glace, illustrant le recul glaciaire  
des derniers siècles. Cordillère blanche,  
Pérou.

Glacier north-west of Huascaran  
and its little ice age moraine, illustrating  
the retreat of glaciers in recent centuries.  
Cordillera Blanca, Peru.



## GLACIERS ET CLIMAT

### GLACIERS AND CLIMATE

Les glaciers constituent de véritables archives climatiques pour la recherche sur l'évolution des climats. Piégés dans les glaces séculaires ou millénaires, pollens, poussières et insectes sont des indicateurs des climats anciens. L'analyse chimique et isotopique de carottes de glace permet par ailleurs de reconstituer des valeurs de la température de l'air et des précipitations neigeuses qui servent à comprendre et quantifier l'impact de la variabilité des climats sur le cycle de l'eau.

Glaciers form climate records for research on the evolution of climates. Trapped in ice hundreds or thousands of years old, pollen, dust and insects are indicators of former climates. Chemical and isotopic analysis of ice cores is also used to reconstitute air temperature and snowfall data used for understanding and quantifying the impact of climate variability on the water cycle.



Page gauche/left

© IRD/P. Blanchon

Le dôme englacé du volcan Sajama a restitué plus de 20 000 ans d'archives climatiques. Bolivie.

The ice dome of the Sajama volcano has provided more than 20,000 years of valuable climatic records. Bolivia.

Page droite/right

© IRD/B. Francou

Tentes de forage sur le site de carottage franco-suisse près du sommet de l'Illimani. Bolivie.

Tents at the Franco-Swiss core boring site near the summit of the Illimani. Bolivia.



## Chronique du Petit Âge glaciaire dans les Andes tropicales

Bernard Francou

**Le Petit Âge glaciaire a fait l'objet d'un intérêt particulier** de la part de la communauté des sciences de l'environnement. Ces quelques siècles, compris entre environ 1300 et 1880 de notre ère, ont été marqués par une extension des glaciers de montagne parmi les plus remarquables connues durant l'Holocène (les derniers 11 000 ans). Assez bien documentée à l'échelle mondiale, cette période permet d'étudier une oscillation froide du climat ayant eu une origine naturelle, alors que le réchauffement qui suit, au cours du xx<sup>e</sup> siècle, est pour l'essentiel associé aux activités humaines.

**Dans les Andes tropicales, Great ice\* a reconstitué et daté** à partir des moraines abandonnées par les glaciers leur extension maximum, ainsi que leurs phases de retraits postérieures. Les dates ont été obtenues sur des blocs morainiques non perturbés depuis leur dépôt en utilisant les techniques lichénométriques (calibration de la courbe de croissance d'une espèce de lichens présente sur des objets datés) et isotopiques (mesure de la quantité de cosmonucléides accumulés donnant le temps d'exposition aux rayons cosmiques, comme par exemple le béryllium 10).

**Ces résultats ont pu être croisés avec ceux provenant d'archives** documentaires (peintures, gravures, récits) disponibles en Équateur depuis la période coloniale. En utilisant des modèles numériques de terrain, on reconstruit les bilans de masse glaciaires moyens et les lignes d'équilibre. Ensuite, un modèle climat-glacier permet de reconstruire l'évolution des températures et/ou des précipitations par rapport à leur

niveau actuel, en s'appuyant sur d'autres indicateurs comme les carottes glaciaires et les indices de végétation. Les résultats montrent que le maximum glaciaire s'est produit autour de 1630-1680 en Bolivie et au Pérou, et dans le premier tiers du xviii<sup>e</sup> siècle dans les Andes du nord. On estime qu'au cœur du Petit Âge glaciaire, la température était de 0,8 °C à 1,2 °C plus basse que de nos jours, avec des précipitations de 20 à 35 % plus élevées. Les glaciers ont ensuite reculé progressivement pendant les xviii<sup>e</sup> et xix<sup>e</sup> siècles, principalement sous l'effet d'une baisse des précipitations.

### Chronicle of the Little Ice Age in the tropical Andes

The Little Ice Age has been of particular interest to the environmental science community. The period lasting a few centuries from about 1300 to 1880 AD was marked by some of the most remarkable increased mountain glaciation seen during the Holocene (the last 11,000 years). The period is fairly well documented at a global scale and means that a cold oscillation of the climate with natural causes can be studied. It contrasts with the warming that followed in the twentieth century and that has been linked mainly with human activities.

In the tropical Andes, Great Ice\* worked on abandoned moraines to reconstitute and date the maximum extension of glaciers and their subsequent retreats. The dates were obtained using moraine blocks that had remained undisturbed since they were deposited using lichenometry (calibration of the growth curve of a lichen species present on the objects dated) and isotopic methods (measurement of the quantity of cosmonucleids accumulated



giving the period of exposure to cosmic radiation; beryllium 10 [10Be] is an example).

The results were cross-referenced with data from records (paintings, engravings, narrative) accumulated in Ecuador since the colonial period. Digital models of the terrain were used to reconstruct average glacial mass and lines of equilibrium. A climate-glacier model was then used to plot the patterns of temperature and/or precipitation in relation to present levels, using other indicators such as core borings from glaciers and vegetation indexes. The results show that peak glaciation occurred around 1630-1680 in Bolivia and Peru and in the first third of the eighteenth century in the northern Andes. It is considered that at the heart of the Little Ice Age the temperature was 0.8°C to 1.2°C lower than it is today and precipitations were 20 to 35% greater. The glaciers then retreated gradually in the eighteenth and nineteenth centuries, in particular as a result of decreased precipitation.

\* Great Ice (Glaciers et ressources en eau dans les Andes tropicales: indicateurs climatiques et environnementaux) est un Laboratoire mixte international de l'IRD depuis 2011.



*Page gauche/left*

© IRD/B. Francou

Les arêtes de l'Illimani  
vues du pic central (6400 m). Bolivie.

The crests of the Illimani  
from the central peak (6,400 m). Bolivia.

*Page droite/right*

© IRD/P. Wagnon

Station météo automatique (givrée)  
installée en décembre 2000 au sommet  
du Chimborazo (6,280 m) lors de l'opération  
de carottage profond. Équateur.

Automatic weather station (frozen)  
installed in December 2000 at the summit  
of the Chimborazo (6,280 m) during  
the deep core boring operation. Ecuador.

© IRD/B. Francou

Porteuses aymara en visite au camp d'altitude  
du forage de l'Illimani. Bolivie.

Aymara porters visiting the Illimani  
high core boring camp. Bolivia.



#### UN EXEMPLE D'ANOMALIE: EL NIÑO

#### AN EXAMPLE OF AN ANOMALY: EL NIÑO

**E**l Niño est un phénomène climatique qui prend naissance tous les deux à sept ans quand l'immense réservoir d'eau chaude situé à l'ouest de l'océan Pacifique tropical, appelé *warm pool* en anglais, se déplace vers l'est. S'ensuivent des perturbations climatiques globales qui affectent notamment de nombreuses régions d'Amérique latine: pluies diluviennes, glissements de terrains, inondations au nord et sécheresse sur l'Altiplano au sud, pertes de récoltes et, *in fine*, pertes humaines et pauvreté. Le Cnes, l'Ifremer et l'IRD contribuent au dispositif de surveillance du Pacifique tropical destiné à mieux observer, comprendre et prédire l'occurrence du phénomène: observations satellitaires du niveau de la mer, mesure *in situ* de la température et de la salinité de l'eau, mesure des vents de surface, etc. Ce dispositif doit permettre, dans quelques années, de mieux informer les populations et peut-être d'anticiper les conséquences de ce phénomène.

**E**l Niño is a climatic phenomenon that takes place every two to seven years when the immense hot water reservoir—the 'warm pool'— west of the tropical Pacific Ocean moves eastward. This is followed by global climatic disturbances that affect many parts of Latin America in particular: heavy rain, landslides, flooding in the north and drought in the Altiplano in the south, harvest losses and finally human losses and poverty. The Cnes, Ifremer and IRD contribute to the surveillance system for the tropical Pacific aimed at better observation, understanding and prediction of the occurrence of the phenomenon: satellite observation of the level of the sea, in situ measurement of water temperature and salinity, measurement of surface winds, etc. The system should make it possible in a few years time to better inform populations and possibility anticipate the consequences of the phenomenon.

© IRD/L. Ortlieb  
Coulées boueuses consécutives à un épisode  
pluvieux lié à l'événement El Niño de 1991-1992.

Mudslides after rainfall associated  
with the 1991-1992 El Niño event.  
Chile.

## El Niño change : ni tout à fait le même ni tout à fait un autre

L'océan Pacifique équatorial est caractérisé, dans sa partie occidentale (au nord de l'Australie), par des eaux de surface à la température très élevée (plus de 28-29 °C). À l'inverse, à l'est (vers l'Amérique centrale), la température des eaux de surface est relativement basse (en dessous de 24 °C) en raison de la remontée d'eaux profondes plus froides (et riches en sels nutritifs). Cette répartition de la température de surface est associée au régime des vents. En période normale, les alizés de nord-est dans l'hémisphère nord et les alizés de sud-est dans l'hémisphère sud poussent les eaux chaudes de surface réchauffées vers l'ouest du Pacifique.

Tous les 2 à 7 ans, lors d'un événement El Niño, l'important réservoir d'eau chaude situé à l'ouest du Pacifique se déplace vers le Pacifique central et oriental. Ce déplacement s'accompagne de changements très importants, notamment dans l'atmosphère, où la convection et les précipitations associées au phénomène suivent ce mouvement. La partie occidentale de l'océan Pacifique équatorial connaît alors un déficit pluviométrique tandis que l'on enregistre des records de précipitations au centre et à l'est du Pacifique sur l'océan et le continent.

Les anomalies climatiques associées au phénomène El Niño se font sentir sur la quasi-totalité de notre planète. Lors d'un événement canonique, on observe ainsi des déficits pluviométriques sur le bassin amazonien, sur certains glaciers andins, dans l'océan Atlantique équatorial et le golfe de Guinée, en baie du Bengale et sur le continent Indien, alors qu'une partie de l'Amérique du Sud, de l'Afrique de l'Est et de l'Europe connaissent une augmentation sensible des précipitations.

Des chercheurs de l'IRD issus de nombreuses disciplines s'intéressent depuis longtemps au phénomène El Niño, compte tenu de ses impacts climatiques et socio-économiques touchant essentiellement la ceinture tropicale. Les premières études internationales d'envergure du phénomène ont débuté il y a plus d'une trentaine d'années. Des systèmes d'observations *in situ* et satellitaires en temps réel ont été mis en place, des études d'impacts ont été conduites, de nouvelles théories ont été proposées, la modélisation numérique et notre capacité à prévoir le phénomène se sont fortement améliorées.

Curieusement, l'analyse des événements El Niño de ces dernières années, ainsi que celle des projections climatiques du XXI<sup>e</sup> siècle, suggèrent que ses caractéristiques majeures pourraient être en train de changer. Quelle est l'origine de ce changement? Comment le caractériser au mieux? Quels

types d'observations de longue durée, *in situ* et satellitaires, utiliser? S'agit-il d'une modulation naturelle du phénomène et/ou de l'effet du réchauffement global? Quelles en sont (ou en seront) les impacts sur la circulation atmosphérique globale et régionale, en particulier sur les précipitations et le cycle de l'eau? Tels sont les enjeux essentiels des travaux actuels et futurs de l'IRD et de ses partenaires des pays du Sud.

### Is El Niño changing?

The western part of the equatorial Pacific (north of Australia) displays very high surface temperatures (over 28-29°C). In contrast, in the east (towards Central America), surface water temperature is comparatively low (less than 24°C) as a result of the rise of colder deep water, that is also rich in nutrient salts. This distribution of surface water temperature is associated with the prevailing winds. In a normal period, the north-east trade winds in the northern hemisphere and the south-east trades in the southern hemisphere push the heated surface water towards the western Pacific.

Every 2 to 7 years, when an El Niño event occurs, the large body of warm water in the western Pacific moves towards the central and eastern Pacific. This movement is accompanied by very substantial changes, especially in the atmosphere where convection and the precipitation associated with the phenomenon follow the movement. The western part of the equatorial Pacific then experiences a rainfall deficit and record precipitation is observed in the central and eastern Pacific, both at sea and on the continent.

The climatic anomalies associated with the El Niño phenomenon are felt practically everywhere in the world. During a classic event, rainfall deficits are observed in the Amazon basin, on certain Andean glaciers, in the equatorial Atlantic and the Gulf of Guinea, in the Bay of Bengal and in continental India while precipitation increases considerably in part of South America, East Africa and Europe.

IRD researchers working in numerous disciplines have long been interested in the El Niño phenomenon because of its climatic and socioeconomic impacts found mainly in the tropics. The first large-scale international studies of the phenomenon were started more than 30 years ago. Real time *in situ* and satellite observation systems were set up, impact assessments were conducted, new theories were put forward and computer modelling and our ability to forecast the phenomenon improved greatly.

Curiously, analysis of El Niño in recent years and of climatic forecasts for the twenty-first century suggest that its major features might be changing. What is the reason for the change? How can it best be characterised? What types of long-term *in situ* and satellite observations should be used? Is it a natural change of the phenomenon and/or the effect of global warming? What are (or will be) the impacts on global and regional atmospheric movements and in particular on precipitation and the water cycle? These are the key issues of the present and future work of IRD and its partners in Southern countries.

© IRD/P. Desenne

Village lacustre de pêcheurs,  
construit sur pilotis, et pirogues du marché  
flottant. Village de Ganvié, Bénin

Fishermen's village built on piles in a lake,  
floating market pirogues. Ganvié, Benin.



# L'homme et l'eau douce

## Man and fresh water

Symbolisant aussi bien la vie que la mort, l'eau occupe une place ambiguë et complexe dans les différentes cosmogonies du monde : l'homme la sait vitale mais craint aussi ses excès. Sa domestication a commencé il y a environ 10 000 ans, à la faveur de l'amélioration climatique de l'Holocène. L'homme amorce alors un changement profond dans sa relation au monde : avec les débuts de la domestication de l'eau et d'espèces végétales et animales, il commence à marquer son emprise sur les milieux naturels. De ces « révolutions néolithiques » naissent en diverses régions, de façon indépendante, des civilisations pratiquant l'agriculture et l'élevage, activités qui s'ajoutent à la chasse, à la pêche et à la cueillette. Au fil des millénaires, les sociétés ont largement adopté ce modèle en développant des techniques et des modes d'organisation propres, leur permettant de tirer un meilleur parti, moins aléatoire, des ressources naturelles et de l'eau en particulier. Toutes néanmoins en sont restées étroitement tributaires.

Symbolising both life and death, water has an ambiguous and complex position in the various cosmogonies of the world: mankind knows that it is vital but also fears excess. Domestication started about 10,000 years ago with the improvement in the climate during the Holocene period. Man then started a deep-seated change in his relation with the world. With the start of the domestication of water and of plant and animal species, he began to mark his control of natural environments. These 'Neolithic revolutions' led to the independent birth in different regions of civilisations practising crop farming and animal husbandry, adding these activities to hunting, fishing and gathering. As the millennia went by, societies made wide use of this model by developing their own techniques and modes of organisation to make the most of natural resources and water in particular in a less haphazard manner. But they all remained closely dependent on them.

# L'eau dans les sociétés

## Water and societies

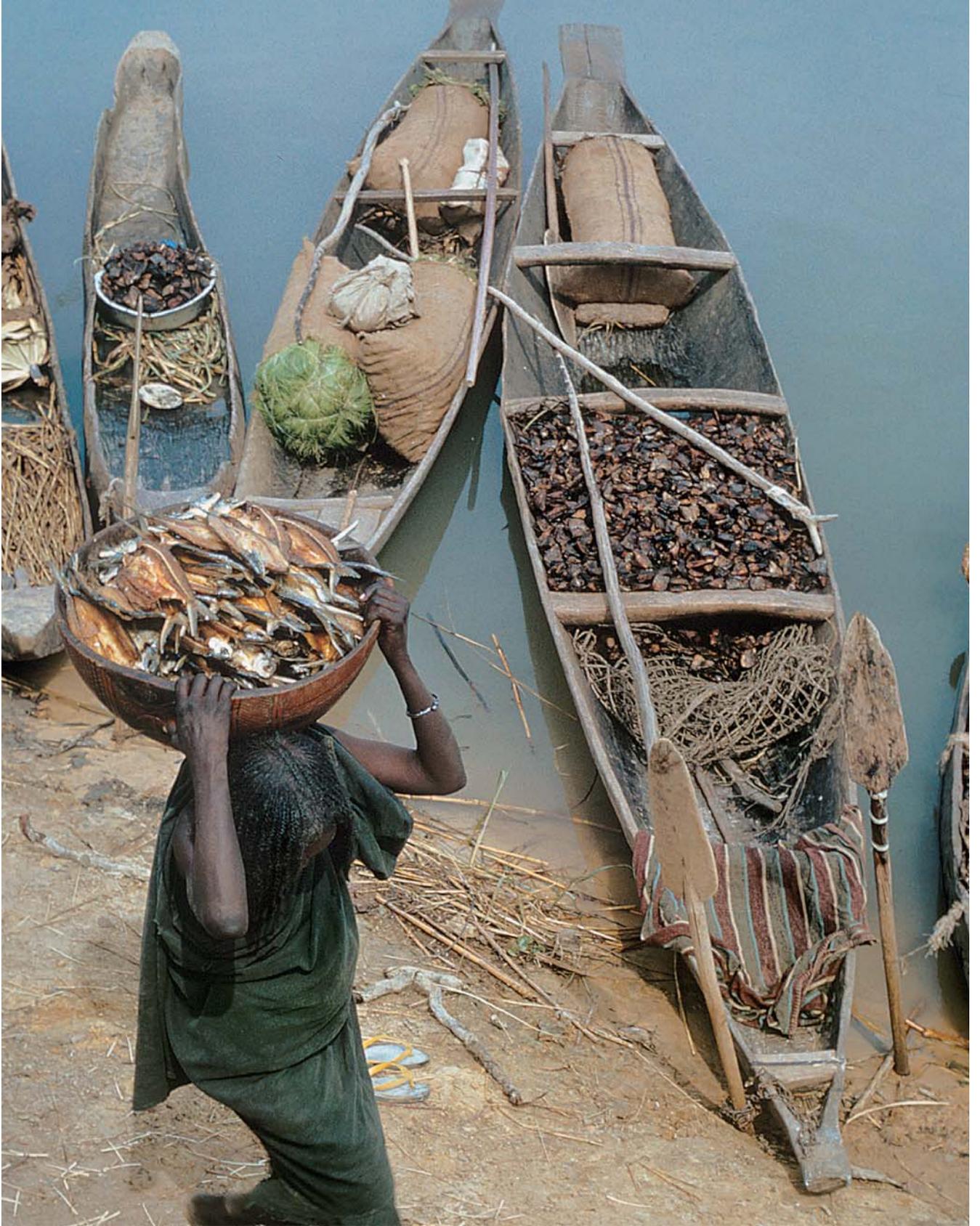


© IRD/T. Ruf  
Parchemin de 1735 illustrant les ressources  
en eau du bassin du Cariyacu et Huarmihuaycu.  
Archives nationales d'histoire de Quito,  
Équateur.

Parchment dated 1735  
illustrating the water resources of  
the Cariyacu and Huarmihuaycu  
basin. National Historical  
Archives, Quito, Ecuador.

**D**ès la préhistoire, les cours d'eau et les lacs ont été des voies de communication privilégiées et des axes de structuration des peuplements humains. Leurs rives demeurent des lieux de vie importants. Au-delà des abords directs des milieux aquatiques, l'eau reste essentielle au fonctionnement des écosystèmes dont dépendent les hommes, à l'instar de toutes les autres espèces vivantes. Avant de domestiquer l'eau, l'homme a assuré l'essentiel de ses besoins en prélevant les ressources animales et végétales des milieux naturels: bois de chauffe, matériaux de construction, fruits, plantes médicinales, etc. Malgré le développement de l'agriculture et de l'élevage, collectes et cueillettes en tout genre restent encore actuellement très répandues dans de nombreux pays du Sud. La chasse et la pêche quant à elles procurent encore une part non négligeable des protéines alimentaires de nombreuses populations rurales.

**R**ivers and lakes have served as lines of communication and structuring axes of human populations since prehistory. The banks remain important centres. Beyond the immediate proximity of aquatic environments, water has remained necessary for the ecosystems needed by man, like all other living species. Before domesticating water, man covered most of his needs by collecting animal and plant resources from natural environments: firewood, construction materials, fruits, medicinal plants, etc. In spite of the development of crop and livestock farming, gathering and picking are still common in numerous countries in the South and hunting and fishing are still a significant source of protein for many rural populations.



© IRD/C. Lévêque  
Dans ce village du delta du Chari, les produits destinés au marché sont acheminés par pirogue, Tchad.

Produce for the market is transported by pirogue in a village in the Chari delta, Chad.



*Page gauche/left*

© IRD/M. Pilon  
 Activités commerciales le long du fleuve Niger au Mali, à l'occasion de l'accostage d'un bateau.

Commerce along the Niger river in Mali when a boat puts in.

© IRD/J. L. Carranza  
 Les fleuves du bassin amazonien sont les principales voies de transport et d'activités commerciales. Embarcadère sur le rio Aguaytia, Pérou.

In the Amazon basin, rivers are the main lines for transport and trade. Landing stage on the Rio Aguaytia, Peru.

*Page droite/right*

© IRD/S. Carrière  
 Le transport urbain à Bangkok est aussi fluvial grâce aux *river boat* accessibles aux couches les plus modestes de la population. Thaïlande.

Urban transport in Bangkok is also provided by the river boats whose fares are affordable for the poorest sections of the population. Thailand.



Quand ils sont navigables,  
fleuves et rivières sont des voies  
de communication et d'échange  
privilégiées, que ce soit en milieu  
aride sur le fleuve Niger,  
en forêt amazonienne,  
ou au cœur des mégapoles.

When navigable,  
rivers are excellent lines  
of communication whether  
in arid environments as on  
the Niger, in the Amazonian  
forest or in the centres  
of megalopolises.



# L'eau des champs

## Water in the fields



© IRD/A. Pierret  
Les cultures de décrue permettent de profiter, en saison sèche, de la fertilité des alluvions déposées par les crues du fleuve durant la mousson. Laos.

Flood recession crops make it possible to profit in the dry season from alluvium deposited by river floods during the monsoon season. Laos.

L'eau, les sols et la diversité génétique des espèces sont les ressources naturelles fondamentales de l'agriculture et l'élevage. Avec la domestication des espèces végétales et animales, l'homme a dû apprendre à subvenir aux besoins en eau des plantes et des animaux : choix des terrains et des saisons pour les semis, accès à des zones de pâture et d'abreuvement pour le bétail... Avec l'irrigation, qui permet de s'affranchir en partie de la saisonnalité des pluies et de limiter l'impact des aléas climatiques, l'homme a franchi un pas de plus vers le contrôle du milieu naturel. L'irrigation a aussi permis l'extension des surfaces agricoles. Si les cultures pluviales et de décrue sont encore majoritaires, l'agriculture irriguée, avec 280 millions d'ha soit 18 % des terres cultivées, fournit 40 % de la production agricole mondiale.

Water, soil and the genetic diversity of species are the fundamental natural resources of crop and livestock farming. When plants and animals were domesticated, man learned to cover their water requirements: choice of land and seasons for sowing, access to grazing and water for cattle, etc. With irrigation, a partial solution to the seasonal characteristics of rainfall and a way of limiting the impact of meteorological uncertainties, man moved nearer to the control of the natural environment. Irrigation also made it possible to extend agricultural areas. Although rainfed and flood-recession crops are still dominant, irrigated farming is used on 280 million hectares, that is to say 18% of the cultivated area and accounts for 40% of world agricultural production.



© IRD/F. Molle  
Noria datant du XIV<sup>e</sup> siècle,  
qui servait à apporter les eaux de l'Oronte  
aux terres alentours. Ville de Hama, Syrie.

A fourteenth century noria that was used  
to lift water from the river Orontes  
to the surrounding land. Hama, Syria.

Les terrasses agricoles, présentes sur tous les continents, témoignent du contrôle de l'homme sur le cycle de l'eau à l'échelle locale : le relief est entièrement restructuré en fonction des besoins en eau des plantes et pour limiter le ruissellement et l'érosion.

Farmed terraces are seen on all the continents and demonstrate man's control of the water cycle at the local level: the relief is entirely restructured according to plant water requirements and to limit runoff and erosion.



© IRD/B. Moizo

Le système de terrasses permet de contrôler le niveau de la lame d'eau nécessaire au développement du riz, ici en phase de repiquage. Madagascar.

The terrace system makes it possible to control the water depth required for the development of rice, here at the transplanting stage. Madagascar.



© IRD/É. Roose  
Aménagement d'une vallée du Haut Atlas :  
cordons de pierres, terrasses en gradins irrigués  
et agroforesterie. Maroc.

Development of a valley in High Atlas:  
stone lines, stepped irrigated terraces  
and agroforestry. Morocco.



## L'ÉLEVAGE

### ANIMAL HUSBANDRY

L'utilisation des ressources en eau pour l'élevage a fortement évolué au cours des millénaires. Dans les premières formes d'élevage, les pasteurs utilisaient les ressources végétales locales et les points d'eau naturels, ce qui a pu impliquer le recours au nomadisme ou à la transhumance. L'intensification progressive des modes de production s'est faite avec l'irrigation de pâturages, puis beaucoup plus récemment avec la multiplication de cultures irriguées à vocation fourragère comme le maïs et le soja, destinées à l'alimentation de cheptels de plus en plus éloignés. Les différentes formes d'élevage existent encore à l'heure actuelle, mais le nomadisme pastoral est en déclin dans de nombreuses régions du monde. Dans les pays du Sud, l'élevage reste le plus souvent associé à l'agriculture au sein de petites exploitations familiales.

The use of water resources for livestock farming has evolved strongly over the millennia. In the first forms of animal husbandry, pastoralists used local plant resources and natural water points, which could mean the use of nomadism or transhumance. The gradual intensification of production procedures used the irrigation of pasture and then, much more recently, the multiplication of irrigated forage crops like maize and soya destined for increasingly remote herds and flocks. The different forms of livestock farming still exist today but pastoral nomadism is declining in many regions of the world. In the southern countries, animal husbandry is generally associated with crop farming on small family farms.



*Page gauche/left*

© IRD/V. Simonneaux

Le berger et son troupeau parcourent chaque jour de longues distances à la recherche de pâturages, ici sur le lac temporaire asséché de l'Izzourar. Haut Atlas central, Maroc.

Every day, the shepherd and his flock travel for long distances in search of grazing—here in the dry temporary lake Izzourar. Central High Atlas, Morocco.

*Page droite/right*

© IRD/O. Barrière

Ce berger peut mener son troupeau à la nage pour atteindre les pâturages du Bourgou, dans le delta intérieur du fleuve Niger. Mali.

This Peul herdsman swims to lead his livestock to the Bourgou grazing land in the Inner Niger delta. Mali.



## L'AQUACULTURE AQUACULTURE

Les ichtyologues multiplient les recherches sur la biologie des espèces halieutiques les plus prisées et/ou menacées afin d'optimiser les techniques traditionnelles d'élevage, de surveiller les effectifs des populations sauvages et de tenter la domestication de nouvelles espèces. Ainsi, en Guinée forestière, des tilapias ont été introduits dans les rizières sans en diminuer le rendement et fournissent désormais de nouvelles protéines très appréciées des populations régulièrement soumises à des pénuries alimentaires. En Asie du Sud-Est, l'IRD évalue les potentialités de différentes espèces de poissons-chats, notamment au niveau génétique, pour appuyer une pisciculture traditionnelle déjà très développée. Sur les lacs boliviens, les recherches sont orientées sur les pratiques d'élevage des truites arc en ciel.

Ichthyologists are increasing research focused on the biology of the most sought-after or most threatened fish species in order to optimise traditional rearing techniques, to monitor wild population numbers and to attempt the domestication of new species. Tilapia have been introduced in rice field in Forest Guinea without affecting rice yields and now provide a new source of protein for populations that suffer regularly from food shortages. In South-East Asia, IRD is evaluating the potential of different catfish species, especially at the genetic level, to supply already strongly developed traditional fish farming. In the lakes of Bolivia, research is focused on rainbow trout rearing practices.



*Page droite/right*

© IRD/D. Paugy

Panier d'*Heterotis niloticus*.

Introduite dans de nombreuses régions, cette espèce se développe et se reproduit bien dans les plans d'eau assez vastes. Bénin.

A basket of *Heterotis niloticus*. Introduced in numerous regions, this species grows and reproduces well in fairly large water bodies. Benin.

© IRD/S. Hem

Exploitation d'un étang à acadja, technique de pêche traditionnelle qui améliore la productivité grâce à des récifs artificiels de branchages. Guinée.

Exploitation of a lagoon using acadja fishing, a traditional technique in which artificial reefs made of branches improve productivity. Guinea.

*Page gauche/left*

© IRD/M. Jégu

Bassins flottants d'élevage de truites près de l'île de Suriqui sur le Titicaca. Bolivie.

Floating trout rearing basins near the island of Suriqui in Lake Titicaca. Bolivia.





## Diversité ichtyologique et aquaculture

Marc Legendre

**Le développement actuel et futur de la pisciculture requiert** une connaissance approfondie de la structure génétique, de l'histoire de vie et des performances des espèces de poissons en relation avec leur environnement, de même que la définition, sur cette base, de solutions zootechniques adaptées aux modèles et contextes locaux. Cet enjeu est particulièrement crucial dans les régions tropicales, en raison de leur potentiel aquacole élevé et de la dépendance actuelle de la pisciculture vis-à-vis d'espèces allochtones.

**Faisant suite à 25 ans d'implication de l'IRD dans le domaine** de la pisciculture tropicale, l'équipe Diva (Diversité ichtyologique et aquaculture; UMR ISE-M) a pour objectif de renforcer ces connaissances en vue du développement d'une aquaculture raisonnée de différentes espèces de poissons autochtones. Actuellement, les recherches sont développées en réseau avec des chercheurs et partenaires institutionnels dans deux régions du monde où la diversité biologique en poissons d'eau douce est particulièrement élevée, l'Indonésie et l'Amazonie.

**Dans ces deux zones géographiques, les travaux portent sur** des espèces d'intérêt aquacole pour la consommation humaine (par ex. Pimelodidae en Amazonie, Pangasiidae en Indonésie) ou l'ornement. Les recherches réalisées produisent en outre des connaissances utiles à la gestion des pêches et à la conservation de ces ressources.

**Le programme scientifique de l'équipe associe plusieurs** disciplines de l'ichtyologie pour développer une approche

intégrée allant d'une meilleure compréhension de l'évolution des groupes d'espèces et populations étudiés et de leurs relations phylogénétiques jusqu'au développement de systèmes d'élevage adaptés aux espèces cibles et aux différents contextes de mise en œuvre.

**Des approches synergiques, incluant biologie moléculaire,** biométrie et ostéologie visent à caractériser la diversité biologique et les rythmes de diversification évolutive. Ces recherches sont menées conjointement avec l'analyse de l'organisation spatiale et temporelle des systèmes populationnels basée sur l'utilisation de marqueurs moléculaires. L'étude en milieu naturel et en conditions contrôlées des traits d'histoire de vie permet de définir l'aptitude des espèces à répondre aux changements de l'environnement et leur adaptabilité à différents contextes d'élevage. Plus particulièrement, les recherches concernent les stratégies reproductrices, les habitats et les variations des exigences des poissons au cours de leur développement vis-à-vis des facteurs environnementaux.

**L'acquisition de ces bases biologiques de l'élevage permet** d'optimiser les techniques de reproduction contrôlée et les méthodes d'élevage et d'alimentation des jeunes stades de vie. En parallèle, des recherches ciblées sur la phase de grossissement visent au développement d'une aquaculture intégrée, basée sur le recyclage et la valorisation de déchets agro-industriels (par exemple tourteau de palmiste-asticot-poisson).

### Ichthyological diversity and aquaculture

The present and future development of fish-farming requires close knowledge of the genetic structure, life history and performances of fish species in relation to their environment, together with the development on this basis of zootechnic solutions adapted to local models and contexts. This is a particularly crucial issue in tropical regions because of their high potential for aquaculture and the present dependence of fish-farming on introduced species.

Following IRD's 25 years of involvement in tropical fish-farming, the objective of the DIVA team (Diversité ichthyologique et aquaculture, an ISE-M joint research unit) is to improve this knowledge with a view to developing rational aquaculture using various indigenous fish species. Research is currently being conducted by a network of researchers and institutional partners in two parts of the world with particularly strong diversity of freshwater fish—Indonesia and Amazonia.

Work in these two geographic zones is focused on species of aquacultural interest for human consumption (for example the Pimelodidae in Amazonia and the Pangasiidae in Indonesia) or for ornamental purposes. The research carried out also generates useful knowledge for fisheries management and for the conservation of resources.

The team's scientific programme combines several disciplines in ichthyology to develop an integrated approach ranging from better understanding of the groups of species and populations studied and their phylogenetic relations to the development of rearing systems suitable for the target species and the various implementation contexts.

Synergic approaches including molecular biology, biometrics and osteology are used to characterise biological diversity and rates of evolutionary diversification. This research is conducted in conjunction with analysis of the spatial and temporal organisation of popu-

lation systems based on the use of molecular markers. The study of life-history traits in the natural environment and under controlled conditions is used to define the ability of species to respond to changes in the environment and to determine their adaptability to different rearing contexts. More particularly, research work covers reproductive strategies, habitats and variations in the requirements of fish during their development with regard to environmental factors.

The acquisition of these biological bases of rearing makes possible the optimisation of controlled reproduction techniques and the methods used for rearing and feeding young stages. In parallel, targeted research on the fattening stage aims at developing integrated aquaculture based on the recycling and use of agroindustrial wastes (for example, palm oil cake-grubs-fish).

*Page gauche/left*

© IRD/M. Legendre

Bateau vivier et cage flottante d'élevage de *Pangasius bocourti* (poisson-chat) dans le delta du Mékong, Vietnam.

Boat and floating cage for rearing basa fish (*Pangasius bocourti*, a catfish) in the Mekong delta, Vietnam.



*Page gauche/left*

© IRD/J.-P. Montoroi  
Bassin versant du lac collinaire  
d'El Gouazine. Tunisie.

Drainage basin of the El Gouazine  
hill lake. Tunisia.

*Page droite/right*

© IRD/C. Lévêque  
Lac de barrage de Gboyo. Ces ouvrages  
permettent aux troupeaux de s'abreuver  
mais servent également à la pratique  
de cultures maraîchères. Côte d'Ivoire.

Reservoir of the Gboyo dam.  
The facility provides water  
for livestock and is also used  
for market garden crops. Côte d'Ivoire.

## LES PETITS BARRAGES

### SMALL DAMS

**P**our capter et conserver l'eau de pluie dans les milieux arides, une myriade de petits barrages (moins de 15 m de haut) ont vu le jour pendant la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle. Ces aménagements à taille humaine, retenues de bas-fonds et lacs collinaires, ont connu un très vif succès auprès des populations auxquelles ils fournissaient une nouvelle ressource. Initialement strictement destinés à l'abreuvement du bétail ou à l'irrigation, ils sont rapidement devenus multi-usages et des espaces clés des terroirs villageois, attirant les convoitises et induisant de nouvelles problématiques foncières, sanitaires et sociales. Avec le programme Petits barrages, l'IRD a mené des études pluridisciplinaires au Brésil, au Mexique, en Tunisie et en Côte d'Ivoire. Le suivi et l'analyse comparative des évolutions de ces hydrosystèmes aménagés doivent permettre d'orienter les projets et les pratiques vers une meilleure durabilité.

**A** large number of small dams (less than 15 metres high) were built in the second half of the twentieth century to impound rainwater in arid environments. These developments on a human scale—bottom land and hill dams were extremely popular with the populations supplied with a new water resource. Initially strictly reserved for watering cattle or for irrigation, they soon became multi-use developments and key areas for villages, generating greed and causing new landholding, sanitary and social problems. With its Petits barrages (small dams) programme, IRD has conducted multidisciplinary studies in Brazil, Mexico, Tunisia and Côte d'Ivoire. Monitoring and comparative analysis of the evolution of these developed hydrosystems should make it possible to guide projects and practices and achieve better sustainability.



## Petits barrages, grands enjeux

Un petit barrage est un ouvrage de retenue d'eau implanté en tête de réseau hydrographique pour stocker une partie des écoulements en vue de leur utilisation ultérieure. Ces infrastructures sont utilisées depuis la plus haute Antiquité (bassin méditerranéen, Inde, Asie) mais leur nombre s'est extraordinairement accru depuis les années 1970-1980 dans toutes les zones méditerranéennes et tropicales sèches. Dotés d'une digue de hauteur inférieure à 15 m, les petits barrages sont équipés de déversoirs de conception rustique et, parfois, d'une vanne de fond. Leur capacité de rétention varie de quelques dizaines de milliers au million de mètres cubes. Leur coût unitaire est de l'ordre du demi-million d'euros et souvent nettement moins. Leur création répond à deux objectifs principaux :

- **participer au développement économique et social des zones rurales** en mobilisant de nouvelles ressources en eau qui génèrent diversification des activités et revenus et contribuent à freiner l'exode rural ;
- **contribuer aux politiques de gestion et de conservation des eaux et des sols** en protégeant les grands barrages situés à leur aval contre une sédimentation trop rapide.

Bien que portés par de nombreuses agences de développement, les petits barrages sont restés étrangers à la recherche académique jusqu'au début des années 1990. La mobilisation internationale sur le devenir des ressources en eau, le développement de la recherche sur l'environnement et le besoin de post-évaluations objectives ont alors conduit l'IRD à lancer le programme de recherche pluridisciplinaire « Petits barrages », avec pour principales missions : (i) l'analyse et la modélisation des nouveaux processus hydro-sédimentaires, écologiques, économiques, sanitaires et sociaux

générés par l'implantation des réservoirs ; (ii) l'évaluation des potentialités et contraintes associées à leur mise en valeur ; (iii) la représentation théorique du fonctionnement et de l'exploitation de ces nouveaux écosystèmes.

Ce programme initié simultanément en Afrique de l'Ouest, dans le Nordeste brésilien, au nord du Mexique et dans le bassin sud et est méditerranéen se poursuit aujourd'hui en Afrique de l'Ouest et en Méditerranée. Partout, leur nombre croissant et leur concentration définissent de nouveaux territoires hydrologiques aux impacts mal maîtrisés. Le risque environnemental majeur est celui de la rupture de digue, parfois répercutée en cascade de site en site. Si leurs performances économiques sont régulièrement dénoncées comme sous-optimales, nos recherches ont démontré qu'ils constituent un levier efficace d'atténuation des effets des changements globaux (climatiques, pressions démographiques) qui affectent les sociétés rurales des régions semi-arides. Nombreux et dispersés, les petits barrages soutiennent des services écosystémiques variés à fort impact régional. Ceux-ci leur confèrent une vocation multi-usages fortement appréciée des populations (usages domestiques, petite irrigation, abreuvement du bétail, pêche, recharge des nappes phréatiques, etc.). Les petits barrages constituent aussi des zones humides qui contribuent au maintien de la biodiversité aquatique et terrestre. Ce sont enfin de bons pièges à sédiments qui peuvent prolonger significativement la durée de vie des grands ouvrages situés plus en aval. Des modalités de gouvernance garantissant la protection des infrastructures, la préservation des ressources, la gestion des risques sanitaires et un partage équitable des bénéfices sont les conditions de leur succès. Aujourd'hui, l'intensification agricole avec ses

corollaires phytosanitaires ainsi que l'intervention de nouveaux acteurs représentent des facteurs de risques peu documentés que la recherche doit embrasser, en adaptant ses méthodes et ses outils (diagnostics et modélisations participatives en premier lieu).

### Small dams, big issues

A small dam is a structure at the head of a hydrographic system for impounding part of flow for subsequent use. These structures have been used since very ancient times (in the Mediterranean basin, in India and in Asia) but the number has increased phenomenally since the 1970s-1980s in all Mediterranean and dry tropical zones. They have an embankment height of less than 15 metres and are equipped with rustic spillways and sometimes a bottom gate. Reservoir capacity varies from a few tens of thousands to a million cubic metres. Unit cost is around half a million euros and often distinctly less. They respond to two main objectives:

- participating in the economic and social development of rural zones by using new water resources that generate the diversification of activities and income and that contribute to halting rural exodus;
- contributing to water and soil management and conservation policies by protecting large dams downstream from silting up too quickly.

Although they are backed by numerous development agencies, small dams were not addressed by academic research until the 1990s. International mobilisation concerning the future of water resources, the development of research on the environment and the need for objective post-evaluations led IRD to launching a

'small dams' multidisciplinary research programme. Its main missions are: (i) analysis and modelling of the new hydro-sedimentary, ecological, economic, sanitary and social processes resulting from the creation of reservoirs, (ii) evaluation of the potential and constraints associated with their use, and (iii) theoretical representation of the functioning and use of these new ecosystems.

The programme was initiated simultaneously in West Africa, the Nordeste in Brazil, northern Mexico and the south and east of the Mediterranean basin and continues today in West Africa and the Mediterranean. Everywhere, the increasing number and concentration of small dams are defining new hydrological territories with poorly mastered impacts. The major environmental risk is the failure of a dam, sometimes in a chain from site to site. Although their economic performances are regularly criticised as being sub-optimal, our research has shown that they are an effective tool for mitigating the effects of the global changes (climate change, population pressure) that affect rural societies in semi-arid regions. Scattered and numerous, small dams support varied ecosystem services with a strong regional impact. This gives them a multi-use function much appreciated by the population (domestic uses, small-scale irrigation, water for cattle, fishing, recharging aquifers, etc.). Small dams also create wetlands that contribute to the maintaining of aquatic and land biodiversity. Finally, they are good silt traps that can significantly lengthen the lives of large dams located further downstream. Their success requires governance procedures that guarantee the protection of infrastructure, the conservation of resources, the management of sanitary risks and the fair sharing of benefits. Today, the intensification of farming and its phytosanitary corollaries and the involvement of new stakeholders are risk factors that have been little documented and that the research sector must address, adapting its methods and tools (with participative diagnoses and modelling heading the list).

« Place de la Fontaine », « rue du Lavoir », la toponymie urbaine reflète le rôle structurant des points d'accès à l'eau dans l'histoire de l'édification des villes. Les aqueducs, inventés par les Grecs anciens, puis diffusés par les Étrusques, les Romains et les Byzantins, ont représenté des investissements colossaux pour l'alimentation en eau de cités prospères: Rome, Istanbul, Nîmes, Lyon, Zaghouan en Tunisie...

Aujourd'hui, plus de la moitié de l'humanité vit en ville et cette proportion ne cesse d'augmenter: on estime qu'en 2030, 5 milliards de personnes seront des urbains. Parallèlement, la demande individuelle en eau augmente en milieu urbain avec les changements de modes de vie même si cette tendance tend à s'inverser dans les pays industrialisés. Cette double évolution place de nombreuses villes face à un défi majeur, tant en ce qui concerne l'approvisionnement en eau que pour la mise en place de systèmes d'assainissement adéquats.

Access to water in the history of the building of towns is often reflected in modern street names. Aqueducts, invented by the ancient Greeks and spread by the Etruscans, Romans and Byzantines, supplied water to prosperous cities like Rome, Istanbul, Nîmes, Lyons, Zaghouan in Tunisia, etc. More than half the world's population now lives in cities and the proportion is increasing. It is estimated that 5 thousand million people will be city-dwellers by 2030. Changes in ways of life mean that individual demand for water is also increasing in cities, although this trend is tending to reverse in the industrialised countries. Many towns thus face a major challenge with regard to both water supply and the installation of sanitation systems.

# L'eau des villes

## Water in towns



© IRD/T. Mourier  
Le pont du Gard constitue l'ouvrage d'art le plus remarquable de l'aqueduc de Nîmes construit par les Romains au I<sup>er</sup> siècle pour alimenter la cité depuis Uzès. France.

The Pont du Gard is the most remarkable structure on the Nîmes aqueduct built by the Romans in the first century AD to supply the town with water from Uzès. France.



© IRD/J.-P. Montoroi  
L'expansion rapide et mal contrôlée de Bangkok a contribué à l'amplitude catastrophique des inondations de 2011, lors de la mousson. Thaïlande.

The rapid, poorly controlled expansion of Bangkok contributed to the catastrophic scale of floods during the 2011 monsoon. Thailand.



© IRD/M. Dukhan

Avec un afflux de populations rurales constant, la ville de Quito, capitale de l'Équateur, juchée au cœur des Andes, doit faire face à une demande croissante en eau potable.

With a constant influx of people from the country, Quito, the capital of Ecuador in the heart of the Andes has to face increasing demand for potable water.

In cities of the South, the modern central districts contrast with the precariousness and insalubrity of the working class areas and shantytowns where water points are few and far between and sewerage systems often nonexistent.

Dans les grandes villes des pays du Sud, la modernité des quartiers centraux contraste avec la précarité et l'insalubrité des quartiers populaires et bidonvilles où les points d'eau sont rares et les systèmes d'assainissement souvent inexistants.



© IRD/J.-P. Montoroï  
Les habitations traditionnelles en bordure d'un canal côtoient les immeubles modernes en construction. Bangkok, Thaïlande.

Traditional houses along a canal in Bangkok rub shoulders with modern blocks being built. Thailand.

## Aguandes, un partage concerté de l'eau entre ville et campagne

La fonte des glaciers avec le réchauffement climatique, la pression démographique et la crise énergétique engendrent dans les Andes équatoriennes une course à l'exploitation des ressources en eau, fragilise leur pérennité et détériore les conditions de vie des communautés indigènes. Face aux tensions qui surgissent, l'État équatorien a décidé de mettre en place une administration de la ressource hydrique par entité hydrographique orientée vers la gestion intégrée des bassins versants.

Le bassin versant d'approvisionnement en eau de Quito, capitale de l'Équateur, est situé entre 2000 et 5900 m d'altitude et se présente comme un modèle pour l'étude de différentes problématiques complexes. C'est une zone très peuplée, avec une forte croissance démographique à l'origine d'une hausse de la demande de services de base et d'une réduction de la disponibilité d'eau à usage agricole au profit d'une urbanisation galopante. La demande en eau concerne plusieurs secteurs concurrentiels, principalement ceux de l'eau potable et de l'irrigation. Cette demande, supérieure à la ressource disponible, génère des transferts d'eau importants en provenance des *páramos*, zones de crêtes à plus de 3500 m d'altitude, vers les zones urbaines. Depuis 2008, les acteurs du bassin de Quito se sont réunis pour définir une vision commune du bassin versant et imaginer des actions à court et moyen termes pour mettre en œuvre une gestion intégrée à l'échelle du bassin. Le projet Aguandes et l'équipe de l'UMR G-EAU (IRD, Cirad, Irstea, Engref, IAMM/Ciheam) apportent leur conseil scientifique aux acteurs des réformes sociales et institutionnelles en cours, tout en maintenant les partenariats scientifiques classiques avec les institutions universitaires et techniques équatoriennes. Leurs activités sont

concentrées sur l'élaboration de différentes plates-formes de simulation des bilans offre/demande à différents horizons grâce à des analyses hydrologiques détaillées. Les bilans actuels et les difficultés d'approvisionnement qui pourraient surgir à l'horizon 2050 sont présentés et expliqués au conseil de bassin, représentatif de l'ensemble des usagers. Ces échanges ont permis de consolider une vision du bassin à long terme et de retenir différentes actions concrètes pour y parvenir: limitation du pâturage dans les zones hautes, création de zones protégées sur des terres rachetées par la ville, etc. Enfin, les problèmes de répartition de la ressource et la surveillance des ouvrages hydrauliques de captation ont été analysés afin de limiter les tensions entre les communautés andines et la ville de Quito. Alors que la ville raisonne et agit selon le droit écrit, les communautés traditionnelles restent attachées au droit d'usage et considèrent l'eau issue des *páramos* comme des ressources propres.

### AGUANDES, concerted sharing of water between town and country

The melting of glaciers as a result of the warming of the climate, population pressure and the energy crisis are causing a race for the exploitation of water resources in the Ecuadorean Andes; this affects resource sustainability and worsens the living conditions of indigenous communities. Faced with emerging tensions, the Ecuadorean government decided to set up a water resource administration for each hydrographic unit and focused on the integrated management of drainage basins.

The drainage basin supplying water to Quito, the capital of Ecuador, is at an altitude of 2000 to 5900 metres and is a model for the study of the various complex problems. The zone is highly



© IRD/P. Cayré  
Paysage agricole du bassin  
d'approvisionnement en eau de Quito,  
Équateur.

The agricultural landscape of the basin  
supplying water to Quito, Ecuador.

populated with strong population growth resulting in increased demand for basic services and a reduction in the availability of water for agriculture because of strongly increasing urbanisation. Demand for water is from several competing sectors, mainly drinking water and irrigation. Demand exceeds available resources and generates substantial conveyance of water from the 'páramos'—crest zones at an altitude of more than 3 500 metres—to the urban areas. Since 2008, stakeholders in the Quito basin have met to define a joint vision of the drainage basin and think of short and medium-term actions to implement integrated management at basin scale. The AGUANDES project and the UMR G-EAU team (IRD, CIRAD, IRSTEA, ENGREF and IAMM/CIHEAM) provide scientific advice for the players in the ongoing social and institutional reforms while maintaining classic scientific partnerships with Ecuadorean university and technical institutions. Their activities are concentrated on developing the various supply/demand balance situations at various horizons, using detailed hydrological analyses. The present balances and the supply

difficulties that could occur at the horizon 2050 are presented and explained to the basin council, representing all the users. These discussions have made it possible to consolidate a long-term vision of the basin and to choose various concrete actions to achieve this: limiting grazing in the high areas, creating protected zones in land purchased by the city, etc. Finally, the problems of the distribution of resources and the supervision of water intake works were analysed to limit tension between the Andean communities and the city of Quito. While the city reasons and acts in accordance with written law, the traditional communities are still attached to the right of use and consider that the water from the 'páramos' is their resource.



© IRD/M. Jégu  
Diversité des fruits et légumes alimentant  
les marchés de la ville de Cochabamba.  
Bolivie.

The variety of fruit and vegetables  
on the markets in the city of Cochabamba.  
Bolivia.

© IRD/M. Michaux-Cloarec  
Fruits sur le marché du village d'Ubud  
sur l'île de Bali. Indonésie.

Fruits on the market in the village of Ubud  
in the island of Bali. Indonesia.a

Towns and the country are often rivals for the allocation of water resources. The distribution between cities and farms has become a development issue as urban populations are using an increasing amount of water and purchasing more and more agricultural produce.

Villes et campagnes sont souvent rivales quant à l'affectation des ressources en eau.

La répartition de la ressource entre villes et campagnes est devenue un enjeu de

développement, les populations urbaines augmentant leur demande en eau tout en consommant toujours plus de produits agricoles.



© IRD/M. Jégu  
Légumes et crudités  
prêts à consommer destinés  
aux populations urbaines  
de Cochabamba. Bolivie.

Fresh vegetables for the urban  
population of Cochabamba.  
Bolivia.

© IRD/J.-L. Janeau  
Marché flottant à Halong.  
Vietnam.

Halong floating market.  
Vietnam.

# La multiplication des usages de l'eau

## The multiplication of uses of water



© IRD/D. Rechner  
Saris séchant au soleil sur les ghâts  
du Gange à Bénarès au petit matin. Inde.

Saris drying in the early morning  
sun on the ghâts of the Ganges  
at Benares. India.

L'eau est omniprésente dans les sociétés humaines qui, aujourd'hui, la traitent fort mal : rares sont les cours d'eau encore vierges de tout aménagement et de toute pollution. L'eau a toujours été une ressource indispensable pour différents usages : de la lessive familiale aux baignades ludiques, en passant par l'orpaillage et la production d'énergie par les moulins. Aujourd'hui, avec le développement des industries, d'une part, et l'accroissement démographique d'autre part, les usages se sont multipliés et intensifiés. Les pressions sur les ressources en eau sont donc de plus en plus fortes et donnent lieu à des conflits d'intérêts entre les différents usagers.

Water is omnipresent in human societies and the latter treat it very badly. Watercourses free of any development or pollution are rare. Water has always been an essential resource for various uses—from family washing to swimming for recreation by way of panning for gold and driving mills. Uses have now become numerous and more intense as a result of the development of industries on the one hand and population increase on the other. The pressures on water resources are therefore increasingly strong and result in conflicts of interest between users.



© IRD/J. J. Braun  
Corvée d'eau en Inde du Sud.

Carrying water in Southern India.



© IRD/J. Gardon

Le lac de Milluni est contaminé par les eaux des drainages acides de mine. Les oxydes métalliques donnent ces étranges couleurs. Bolivie.

Lake Milluni is contaminated by acid mine drainage. Metal oxides give these strange colours. Bolivia.

© IRD/J. Gardon

L'activité minière consomme de très grandes quantités d'eau. Ici, on provoque l'évaporation de lagunes de confinement d'eaux contaminées. Région d'Oruro, Bolivie.

Mining uses very large quantities of water. Here, tailings impoundments are evaporated. Oruro region, Bolivia.

Les activités industrielles et minières, consommatrices d'eau, et les transports fluviaux modifient fortement la qualité et le volume de la ressource, ainsi que les conditions d'accès pour les usages quotidiens des populations.

Industry, mining and water transport considerably affect the quality and quantity of the resource and the conditions of access by populations for everyday uses.

© IRD/J.-L. Duprey  
Lagune contaminée par les mines de Milluni près de La Paz, en Bolivie.

Water contaminated by the Milluni mines near La Paz in Bolivia.





© IRD/T. Mourier

Les centrales nucléaires utilisent de l'eau douce pour leur fonctionnement mais elles doivent surtout disposer d'importants stocks immédiatement mobilisables pour le refroidissement des réacteurs en cas d'incident. Ici la centrale de Golfech, sur la Garonne. France.

Freshwater is used in the functioning of nuclear power stations but the latter must also have large stocks for immediate use to cool reactors in case of an incident. Here, Golfech power station on a bank of the Garonne. France

La production d'énergie hydro-électrique et nucléaire mobilise, sans les consommer, d'importantes quantités d'eau, obligeant à construire des aménagements qui modifient les cours d'eau et les écosystèmes associés (vallées ennoyées par ex).

The production of hydroelectric and nuclear power requires the use, but without consumption, of large quantities of water. This involves the construction of works that modify watercourses and the related ecosystems (submersion of valleys for example).



© IRD/B. de Mérona  
Le barrage de Petit-Saut en Guyane, en 1997 : la sortie des turbines et le seuil aval de ré-oxygénation. La mise en eau du barrage a provoqué l'ennoyement des plaines de l'amont.

The Petit-Saut dam in French Guiana in 1997: turbines discharge and the tailrace aeration weir. The filling of the reservoir submerged the plains upstream.

© IRD/E. Bemus

Les enfants sont chargés des corvées d'eau.  
Jeunes filles remplissant des outres  
faites de peaux de bêtes. Niger.

Children often have the job of carrying  
water. Young girls filling containers made  
from animal skins. Niger.



# Enjeux et déséquilibres

## Issues and imbalances

L'eau douce a été et reste une ressource indispensable au développement des hommes. Les sociétés modernes ont pu valoriser les différents réservoirs d'eau disponibles par l'irrigation, la production d'énergie, l'industrie. Mais depuis quelques décennies, et de façon de plus en plus aiguë, le constat de nos excès s'impose. Les prélèvements d'eau douce ont triplé depuis 1950, la majorité des cours d'eau et des nappes sont pollués par des activités humaines, des nappes fossiles sont exploitées et la biodiversité de la plupart des milieux aquatiques est en forte régression. Les tendances actuelles et les premiers effets des dérèglements climatiques ne font qu'accroître ces dysfonctionnements des écosystèmes pourtant vitaux pour l'ensemble des espèces vivantes. Parallèlement, les inégalités de l'accès à la ressource ne cessent de s'accroître : alors que l'eau courante fait l'objet d'un accès généralisé en Europe et en Amérique du Nord par exemple, dans les pays du Sud, plus d'un milliard de personnes sont encore privées d'accès à l'eau potable.

Fresh water has been and still is an essential resource for human development. Modern societies have succeeded in using the various natural reservoirs available for irrigation, production of energy and industry. However, for some decades and in an increasingly acute manner, we have had to take note of our excesses. Abstraction of fresh water has tripled since 1950, most watercourses and aquifers have been polluted by human activities, fossil groundwater is exploited and the biodiversity of most aquatic environments is regressing strongly. Current trends and the first effects of climate change aggravate these malfunctions in ecosystems that are vital for all living species. At the same time, inequality in access to water resources is increasing. For example, while running water is commonly available in Europe and North America, more than a thousand million people in Southern countries still have no access to potable water.

# Dérèglements climatiques

## Climate change

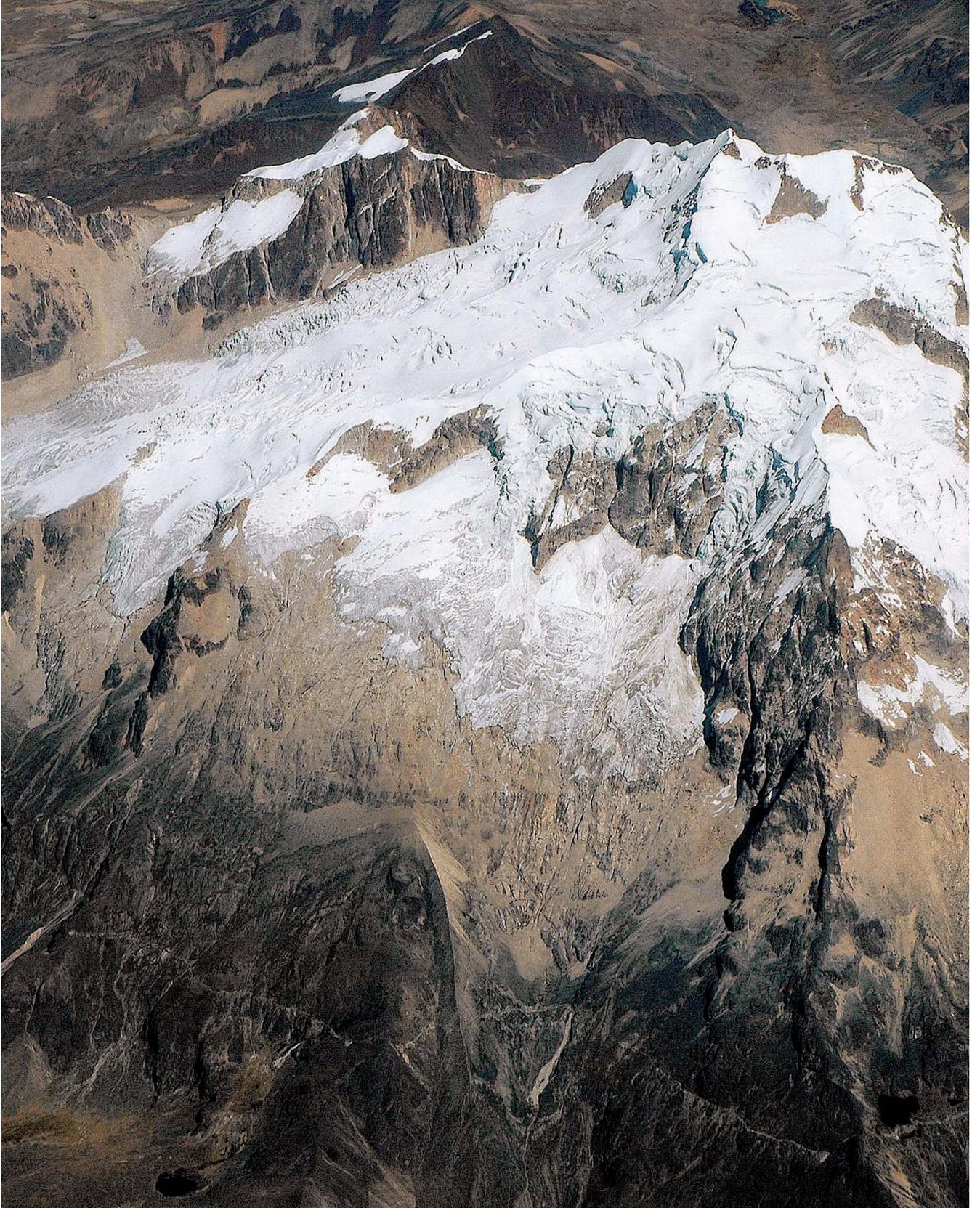


© IRD/M. Dukhan  
Le fleuve Sénégal lors de l'inondation d'octobre 1999. Relevé hydrologique du niveau à la hauteur de Podor. Sénégal.

The Senegal river during the October 1999 flood. Hydrological readings at Podor. Senegal.

Le dérèglement du climat mondial fait désormais l'objet d'un constat unanime. L'augmentation des gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone, et son origine anthropique, sont des faits avérés. Le réchauffement global entraîne depuis plusieurs décennies déjà le recul des glaciers, la fonte des calottes polaires et le réchauffement des pergélisols. Les avis divergent sur la rapidité et l'ampleur des effets à venir mais quelques conséquences semblent toutefois inéluctables. La montée du niveau des océans privera l'humanité d'une part notable des territoires côtiers actuels qui comptent parmi les plus peuplés. Les événements climatiques extrêmes, cyclones, tempêtes avec des précipitations d'intensité exceptionnelle mais aussi sécheresses, verront leur fréquence et leur amplitude augmenter. Enfin, on craint une perturbation des régimes pluviométriques avec une accentuation des climats arides ou, au contraire, très humides.

Global climate change has now been recognised by all. The increase in greenhouse gas emissions, including CO<sub>2</sub> produced by human activity, is a proven fact. For several decades, global warming has caused the shrinking of glaciers, the melting of polar ice and the thawing of permafrost. Opinions differ with regard to the speed and scale of events to come but there seem to be several inevitable consequences. The rise in sea level will mean that humanity will lose a substantial part of the present coastal areas that are among the most populated regions. The frequency and scale of extreme climatic events—cyclones, gales with exceptionally intense precipitation and also droughts—will increase. Finally, disturbance of rainfall regimes will accentuate arid and very humid climates.



© IRD/B. Francou  
Le sommet du Huayna Potosí (6092 m)  
mis à nu par le retrait glaciaire. Le glacier  
de Zongo, à gauche, est étudié par l'IRD  
depuis 1991. Bolivie.

The summit of Huayna Potosí (6,092 m)  
left bare by the retreat of the glaciers.  
Zongo glacier on the left has been studied  
by IRD since 1991. Bolivia.



## CONSÉQUENCES SUR LE CYCLE DE L'EAU

### CONSEQUENCES FOR THE WATER CYCLE

Le réchauffement climatique global influera assurément sur le cycle de l'eau : l'accélération des transferts entre océans et atmosphère entraînera une augmentation globale des précipitations mais aussi une accentuation des inégalités préexistantes entre régions déficitaires et régions excédentaires. On estime que la fonte des glaciers, en particulier dans l'Himalaya, va provoquer une augmentation du débit dans les hauts bassins des fleuves comme l'Indus, le Gange, le Brahmapoutre, le Mékong, le Yangzi Jiang et le Huang He pendant 3 à 5 décennies, suivie par une diminution inéluctable quand les glaciers auront disparu.

Global warming will certainly affect the water cycle. An acceleration of transfer between sea and atmosphere will lead to an overall increase in precipitation and also an accentuation of existing inequalities between regions with deficits and those with excesses. It is considered that the melting of glaciers, especially in the Himalayas, will cause increased flow in the upper basins of rivers like the Indus, the Ganges, the Brahmaputra, the Mekong, the Yangtze Kiang and the Huang He for three to five decades, followed by an inevitable decrease when the glaciers have gone.



#### Page gauche/left

© IRD/P. Blanchon

Dans les Andes, la disparition des glaciers affectera directement les systèmes agricoles des vallées. Champs de céréales au pied du massif de l'Illimani. Bolivie.

The disappearance of glaciers in the Andes has a direct effect on the farming systems in the valleys. Fields of grain crops at the foot of Mount Illimani. Bolivia.

#### Page droite/right

© IRD/O. Évrard

Avec la fonte des glaciers himalayens et l'amplification des perturbations climatiques, une aggravation des crues est probable. Ici, Mékong en crue et ciel de mousson. Laos.

Floods will probably worsen with the retreat of the Himalayan glaciers and the amplification of climatic disturbances. Here, the Mekong is in flood beneath a monsoon sky. Laos.

## Great Ice : vingt ans d'observation du climat et de la ressource en eau à partir des glaciers des Andes tropicales

Comme toutes les chaînes de montagne, les Andes agissent comme un château d'eau. C'est particulièrement vrai sur leur segment tropical où les populations se concentrent dans les zones les plus sèches, vallées intra-andines et piémonts pacifiques, tandis que les précipitations viennent d'Amazonie. Le rôle des glaciers dans la régularisation du débit des rivières croît, à superficie égale, de l'équateur vers le sud à mesure que le régime des précipitations devient plus contrasté (saison des pluies/saison sèche) et irrégulier (forte variabilité d'une année sur l'autre). Face à la décrue rapide des glaciers andins tropicaux depuis la fin des années 1970, l'IRD a constitué une équipe pour analyser le phénomène et en déterminer l'impact hydrologique. Lancé en 1991 en Bolivie, puis étendu au Pérou et à l'Équateur, le programme Great Ice est devenu un observatoire pérenne de l'environnement en 2001 et s'est structuré en Laboratoire mixte international (LMI) en 2011. Il fournit depuis 15-20 ans à la communauté internationale (WGMS, Giec) des données régulières et une expertise sur les glaciers s'étendant sur une surface proche de 1 900 km<sup>2</sup> de la Bolivie à la Colombie. Ses études ont permis de quantifier l'ampleur de la déglaciation depuis les années 1950. Les massifs glaciaires ont ainsi perdu en un demi-siècle 40 %-50 % de leur surface et de leur volume et de nombreux glaciers de moins de 1 km<sup>2</sup> ont disparu. Cette récession est liée à une perte de glace équivalente à une tranche d'eau de 0,5 m à 1,2 m/an. Le réchauffement de l'atmosphère est responsable de cette évolution, mais il agit plus en changeant le bilan radiatif à la surface du glacier (davantage de précipitations liquides, moins de chances que des manteaux neigeux persistent longtemps à basse altitude) que par effet direct sur la fusion de la glace. En un demi-siècle, la hausse des températures a atteint près de 0,7 °C dans cette partie de Andes. Great Ice révèle que cette hausse a eu lieu surtout à partir de 1976, date qui coïncide avec le début du déclin accéléré des glaciers. 1976 correspond aussi au réchauffement du Pacifique, ce qui met en évidence la forte dépendance dans laquelle se trouvent les glaciers des Andes centrales vis-à-vis des variations de tempé-

rature des eaux superficielles du Pacifique tropical. On a observé en effet que les glaciers fondent beaucoup lors des phases chaudes (*El Niño*) et bien moins pendant les phases froides (*La Niña*). Localement, les événements chauds peuvent être aussi plus secs, ce qui renforce l'effet de la température sur la fusion.

**Le déstockage de la glace a eu pour conséquence d'augmenter le débit des rivières dans les hauts bassins dominés par le régime glaciaire, tandis que les étiages se sont creusés dans les bassins au régime « pluvio-nival », où les glaciers étaient résiduels.** La forte sensibilité des glaciers à l'augmentation de la température atmosphérique et les fortes hausses simulées dans les Andes tropicales par les modèles climatiques dans le pire scénario envisagé par le Giec laissent prévoir que de nombreux massifs seront sans glaciers dès le milieu du siècle. Dans cette éventualité, la ressource en eau sera davantage contrôlée par le régime des précipitations. Aussi, analyser le fonctionnement des aquifères, préciser le rôle joué par la nature du sol et la dynamique des écosystèmes seront des questions clés pour pouvoir établir des prévisions fiables sur la ressource en eau provenant des régions d'altitude. De nouvelles perspectives pour Great Ice.

### GREAT ICE: 20 years of observing glaciers, climate and water resources in the tropical Andes

The Andes operate as a reservoir, like all mountain ranges. This is particularly the case in the tropical segment of the range where the population is concentrated in the driest zones—intra-Andes and Pacific piedmont— whereas precipitation is from Amazonia. The role of glaciers in the regularisation of river discharges increases southward from the equator for the same land area as the precipitation regime becomes more contrasted (dry season/rainy season) and irregular (strong variability from one year to the next). Given the rapid retreat of the tropical Andean glaciers since the end of the 1970s, IRD set up a team to analyse the phenomenon and determine its hydrological impact. Launched in 1991 in Bolivia and then extended to Peru and Ecuador, the Great Ice programme became a permanent environment watch in 2001 and an international joint



laboratory in 2011. For 15 to 20 years, it has supplied the international community (WGMS, IPCC) with regular data and expert opinions on glaciers covering an area of nearly 1900 km<sup>2</sup> from Bolivia to Colombia. Its studies have made it possible to measure the scale of deglaciation since the 1950s. In half a century, glaciers have lost 40-50% of their area and volume and numerous glaciers with an area of less than one square kilometre have disappeared. This retreat involves a loss of ice that is equivalent to a water depth of 0.5 to 1.2 metres per year. The warming of the atmosphere is responsible for this change but it acts more by changing radiation balance at the surface of the glacier (more liquid precipitation and less chance of snow remaining on the ground for a long time at low altitudes) than by directly melting the ice. In half a century, the temperature has risen by nearly 0.7°C in this part of the Andes. Great Ice shows that this increase occurred above all from 1976 onwards, coinciding with the beginning of the accelerated retreat of the glaciers. 1976 also marked the warming of the Pacific, showing the strong dependence of the central Andean glaciers on tempera-

ture variations at the surface of the water of the tropical Pacific. Indeed, it has been observed that glaciers retreat considerably during warm phases (El Niño) and much less during cold periods (La Niña). Locally, hot events may also be drier and increase the effect of temperature on melting.

The melting of the ice increases the discharges of the rivers in the high catchments dominated by a glacier regime and low water levels are falling in pluvio-nival basins where glaciers were residual. The strong sensitivity of glaciers to increases in air temperature and the strong increases simulated for the tropical Andes by climate models in the worst case scenario envisaged by the IPCC indicate that many mountain ranges will have no glaciers by the middle of the century. If this happens, water resources will be controlled more by the precipitation regime. Thus analysis of the functioning of aquifers, determining the role played by the nature of the soil and the dynamics of ecosystems will be key questions for making reliable forecasts of water resources from highland regions. These are the new prospects for Great Ice.

© IRD/B. Francou  
Arrivée au sommet de l'Antisana (5767 m)  
pour procéder aux mesures annuelles  
d'accumulation. En arrière-plan, l'Antisana  
Nord. Équateur.

Arrival at the summit of Mount Antisana  
(5,767 m) to perform annual measurements  
of accumulation. Antisana Norte  
is in the background. Ecuador.



## DES RÉFUGIÉS D'UN NOUVEAU TYPE

### A NEW TYPE OF REFUGEE

**P**armi les premiers territoires affectés par le changement climatique figurent les régions de très faible altitude qui sont sujettes à la submersion par l'élévation du niveau des océans: nombreux deltas comme celui du Brahmapoutre au Bangladesh, ainsi que les îles et atolls de l'océan Indien et du Pacifique. Dans d'autres régions, c'est la persistance de sécheresses qui provoque une telle dégradation des conditions environnementales que les modes de vie, voire de survie, des populations sont menacés. À moyen et long termes, on s'attend à une intensification des migrations de ces réfugiés d'un nouveau type, parfois qualifiés de réfugiés environnementaux. « Selon certaines estimations, il y a aujourd'hui quelque 30 millions de réfugiés environnementaux [...]. Le changement climatique pourrait être l'une des raisons de (leur) multiplication par 5, d'ici à 2050 » Unesco.

Very low-lying regions subject to submersion by a rise in sea level are among the first areas affected by climate change. This concerns numerous deltas such as that of the Brahmaputra in Bangladesh and islands and atolls in the Indian Ocean and the Pacific. In other regions, continued drought is causing such degradation of the environmental conditions that the way of life or even the survival of populations is threatened. In the medium and long term, we expect the intensification of migrations of a new type of refugee, sometimes referred to as environmental refugees. 'It is estimated that there are presently some 30 million environmental refugees [...] It has been suggested that the number of environmental refugees could rise to 150 million by 2050 as one of the results of climate change.' (Unesco).

© IRD/B. Marty  
L'élévation du niveau moyen de l'océan  
conjuguée à un épisode El Niño est susceptible  
de submerger les atolls de faible altitude.  
Archipel des Tuamotu.

The rise in average sea level combined  
with an El Niño episode can submerge  
low-lying atolls. Tuamotu Archipelago.



*En haut/high*

© IRD/M. Dukhan  
Avec les dérèglements climatiques, les phénomènes extrêmes comme les très fortes précipitations sont amenés à se multiplier. Ici, inondations à Donaye. Sénégal.

With climatic irregularity, extreme phenomena like extremely heavy rain are becoming more common. Here, flooding at Donaye. Senegal.

*En bas/down*

© IRD/M. Dukhan  
Inondations à Donaye, Sénégal. Les villageois ont tenté de contenir la crue avec des sacs de sable, puis ont été évacués.

Flooding at Donaye, Senegal. The villagers tried to contain the flood with sandbags but were then evacuated.



## Vulnérabilité du lac Tchad

Florence Sylvestre, Jacques Lemoalle, Guillaume Favreau

Observé du sol ou depuis l'espace, le lac Tchad apparaît comme un objet hydrologique étonnamment fluctuant, mosaïque de terres fertiles et d'eaux douces peu profondes aux usages multiples : pêche, élevage et agriculture s'y imbriquent pour constituer un des milieux naturels parmi les plus productifs de l'Afrique sahélienne. C'est aussi un lac aux ressources en eau vulnérables, à la fois du fait des aléas climatiques mais aussi des pratiques agricoles intensives qui se développent sur son bassin versant.

Partagé par quatre pays riverains (Cameroun, Niger, Nigéria, Tchad), le lac se révèle un marqueur très sensible des changements du régime de mousson, enregistrés par des fluctuations rapides du niveau d'eau. À plus longue période de temps, les sédiments du fond du lac ainsi que les eaux des aquifères à faible taux de renouvellement représentent de précieuses archives des variations climatiques et environnementales passées.

Durant les dernières décennies, il n'a pas toujours été facile pour les scientifiques d'aller observer le lac Tchad sur le terrain : situation politique tendue, crise humanitaire ou troubles militaires ont coïncidé, par malchance, avec une période où le lac s'est rétracté de façon particulièrement rapide de plusieurs milliers de kilomètres carrés au cours des années 1970. Depuis, les niveaux du lac oscillent dans un état de « petit lac », déjà observé au début du xx<sup>e</sup> siècle. À l'Holocène, des fluctuations paléohydrologiques encore plus importan-

tes ont été reconstituées, en lien avec les changements climatiques globaux.

Comprendre l'impact des usages sur les flux sédimentaires, mieux simuler la réponse du lac au climat, quantifier les ressources des aquifères sont quelques-uns des objectifs scientifiques majeurs que les chercheurs de l'IRD se sont fixés avec leurs partenaires du Sud. Ces connaissances, pour certaines issues de travaux menés par l'Institut depuis les années 1950, sont indispensables pour anticiper l'impact possible du changement global ainsi que pour estimer finement les conséquences de grands projets internationaux, coordonnés par la Commission du bassin du lac Tchad et destinés à sécuriser le développement des régions riveraines du lac.

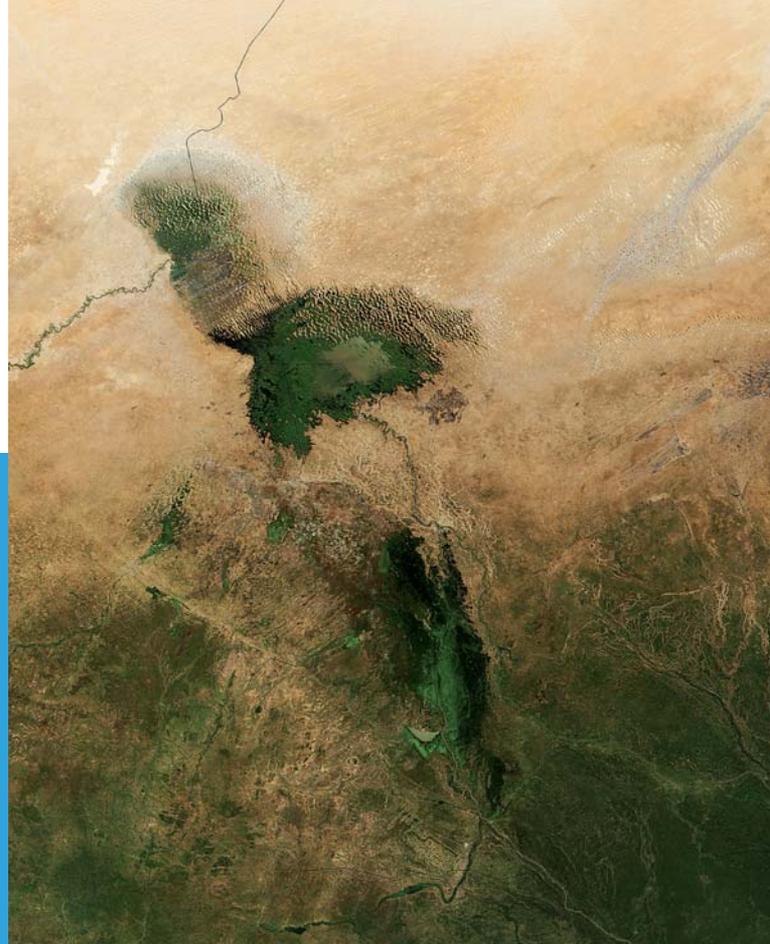
### The vulnerability of the water of lake Chad to climate

Observed from the ground or from space, Lake Chad appears to be an astonishingly fluctuating hydrological object, a mosaic of fertile land and shallow freshwater with many uses: fishing, animal husbandry and crop farming rub shoulders, forming one of the most productive natural environments of the Sahel. It is also a lake whose water resources are vulnerable, both because of climatic phenomena and also because of the intensive agriculture developing in its drainage basin.

Shared by four neighbouring countries (Cameroon, Niger, Nigeria and Chad), the lake is a very sensitive marker changes in the monsoon regime, with very distinct changes in the water level. Over longer periods of time, the lake bottom sediment and groundwater with a slow rate of renewal are valuable records of past climatic and environmental variations.

It has not always been easy in recent decades for scientists to observe Lake Chad in the field. Unfortunately, tense political situations, humanitarian crises and military troubles have coincided with a period during which the lake has decreased particularly rapidly—by several thousand square kilometres in the 1970s. Since then, the water level has oscillated in the “small lake’ state already observed at the beginning of the twentieth century. Even more substantial paleohydrological fluctuations have been reconstructed for the Holocene; these were related with global climate changes.

Understanding the impact of uses on sediment flows, better simulating the response of the lake to the climate and quantifying aquifer resources are among the major scientific objectives set by IRD scientists with their southern partners. This knowledge, some of which is from work conducted by the Institute since the 1950s, is essential for anticipating the possible impact of global climate change and for close assessment of the consequence of large international projects coordinated by the Lake Chad Basin Commission and aimed at ensuring the security of the development of the regions adjoining the lake.



*Page gauche/left*

© IRD/M. Cadou

Vue aérienne du lac Tchad. La baisse de niveau du lac se manifeste par l'émergence de cordons dunaires puis par l'assèchement complet de cette cuvette.

An aerial view of Lake Chad. The fall in the level of the surface of the lake is shown by the emergence of ridges of dunes and then the complete drying of this basin.

*Page droite/right*

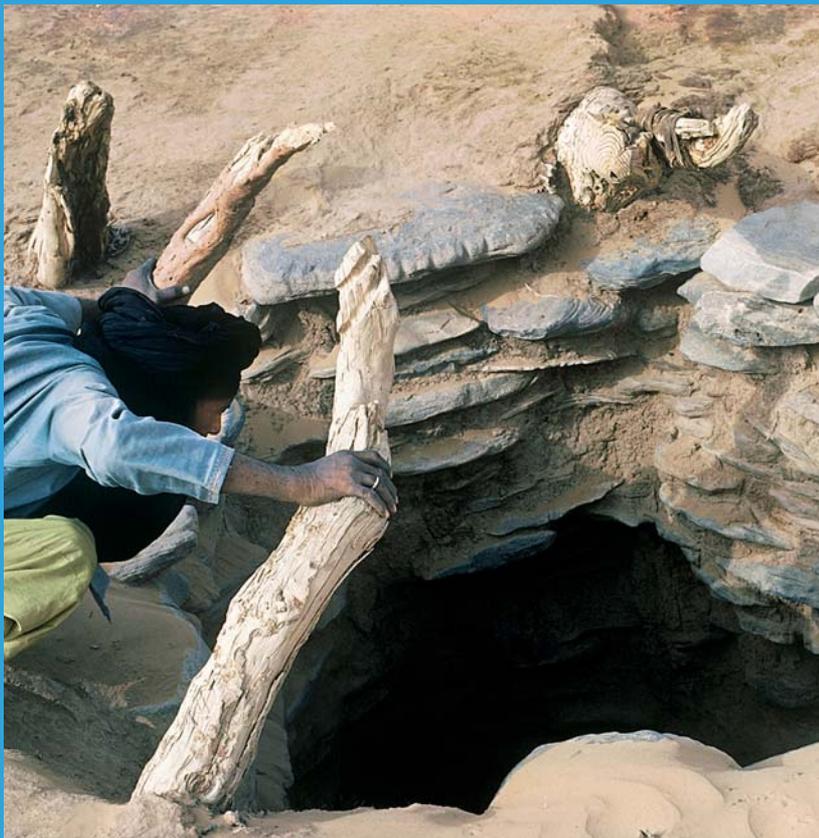
© IRD/DR

L'existence d'un gigantesque mégalac Tchad a fait l'objet de débats passionnés tout au cours du xx<sup>e</sup> siècle.

The existence of a gigantic megalake Chad was the subject of impassioned discussion throughout the twentieth century.

# Des écosystèmes menacés

## Threatened ecosystems



© IRD/E. Bernus

Le niveau d'eau des puits est un sujet de préoccupation et fait l'objet d'une surveillance quotidienne, ici au Niger.

The water levels in wells is a subject for concern and monitored daily, as here in Niger.

Les ressources en eau mobilisables par l'homme sont les lacs et rivières et les eaux souterraines. À l'exception des nappes fossiles, elles sont alimentées au rythme des précipitations. Elles ne sont donc renouvelées que dans la mesure où les prélèvements ne dépassent pas les apports. Actuellement, une partie des stocks souterrains diminue sous l'effet de pompages trop importants, ce qui entraîne une baisse du niveau des nappes phréatiques. De même, l'assèchement de lacs et de mers intérieures comme la mer d'Aral et la disparition de zones humides, quand ils ne sont pas la conséquence d'un changement climatique local, indiquent que la ressource en eau est exploitée au-delà de ses capacités de renouvellement.

The water resources that man can use consist of lakes, rivers and groundwater. These, with the exception of fossil aquifers, are fed by precipitation and are therefore only replenished insofar as abstraction does not exceed inflow. Today, some groundwater stocks are diminishing as a result of excessive pumping that causes a lowering of groundwater levels. Likewise, when the drying up of lakes and inland seas like the Aral Sea and the disappearance of wetlands are not the result of local climate change they are caused by exploitation of the resource beyond its capacity for renewal.



© ESA  
Les vestiges de la mer d'Aral, autrefois alimentée par l'Amou-Daria et le Syr-Daria, aujourd'hui en grande partie asséchée par la surexploitation des deux fleuves.

The remains of the Aral Sea, which used to be fed by the Amu Darya and the Syr Darya, and now dry to a considerable degree after the over-exploitation of the two rivers.

## Aral : une mer asséchée

La mer d'Aral était un vaste lac peu profond au cœur de l'Asie centrale et aux confins du désert du Karakoum. Elle revêtait historiquement une très grande importance, puisqu'elle-même et les deux fleuves qui l'alimentent, l'Amou-Daria au sud et le Syr-Daria au nord, marquaient depuis l'Antiquité une étape sur la route de la soie entre l'Orient et l'Occident. Au début du xx<sup>e</sup> siècle, peu après la révolution d'Octobre, le bassin de la mer d'Aral, alimenté par les montagnes du Pamir à l'est qui culminent à près de 7500 m, est inclus dans les républiques soviétiques d'Asie (actuellement Kazakhstan, Kirghizstan, Ouzbékistan, Tadjikistan et Turkménistan), à l'exception d'une petite zone dans le nord de l'Afghanistan. La mer d'Aral et les vastes deltas de ses deux affluents sont alors principalement exploités pour la pêche, pour l'élevage et pour une agriculture de subsistance par des populations souvent nomades.

Après la Seconde Guerre mondiale, le pouvoir central de Moscou décide de favoriser une culture quasi exclusive de coton. Les objectifs sont clairs : donner une identité à l'Asie centrale dans le schéma productiviste du territoire soviétique, fixer les populations nomades et, enfin, alimenter le nationalisme autour d'une vaste entreprise hydraulique partagée. Des travaux de dérivations des deux rivières vers des périmètres irrigués gigantesques sont entrepris dès les années 1950. Ces prélèvements systématiques et sans retour conduisent, à partir du début des années 1960, à une diminution importante, voire à l'utilisation presque totale des débits de l'Amou-Daria et du Syr-Daria, conduisant à un déséquilibre entre les apports d'eau à la mer et son évaporation.

À la fin des années 1980, avec le déclin du communisme, des scientifiques d'abord, puis des journalistes, dénoncent la catastrophe écologique : la mer d'Aral a diminué de 50 % en surface et de 70 % en volume. Vingt ans plus tard, alors que les républiques sont désormais indépendantes, elle est devenue une mosaïque de lacs, les parties nord et sud étant définitivement déconnectées. Mais il y a plus grave : l'apport naturel de sel par les rivières et la diminution du volume stocké ont conduit à une augmentation de la teneur en sel de la mer qui a détruit sa ressource halieutique. De plus, les deux régions

deltaïques au nord et au sud, où la densité de population est importante, ont évolué de zones humides en zones agricoles rapidement stérilisées par le sel qui s'y est déposé, avec des conséquences sanitaires dramatiques pour les populations.

Depuis le début des années 2000, la mobilisation internationale a conduit à un début de réhabilitation qui, si elle est loin d'être aboutie, porte quelques fruits. La principale stratégie est de mieux piloter les prélèvements hydrauliques réalisés tout le long des deux fleuves, d'améliorer la rentabilité des réseaux de canaux, de diversifier l'agriculture et de restaurer progressivement les zones humides des deltas, où vivent les populations. Des zones de pêche ont été reconstituées dans des lacs naturels ou artificiels, de nouvelles digues ont été construites et des ouvrages hydrauliques réhabilités, des marais et des roselières ont réapparu, permettant le retour des oiseaux migrateurs et favorisant la réalimentation des nappes, une prise de conscience des populations a été favorisée... Mais la grande mer d'Aral a disparu pour longtemps encore.

### Aral, a dry sea

The Aral Sea was a vast shallow lake in the heart of Central Asia and at the edge of the Karakum Desert. Historically, it was extremely important as the lake and the two rivers that feed it, the Amu Darya in the south and the Syr Darya in the north, had been on the silk route from the east to the west since Antiquity. In the early twentieth century, shortly after the October Revolution, the Aral Sea basin fed from the Pamir mountains in the east that peak at nearly 7500 metres became part of the Asian Soviet republics (now Kazakhstan, Kyrgystan, Uzbekistan, Tajikistan and Turkmenistan), with the exception of a small zone in northern Afghanistan. The Aral Sea and its large deltas were mainly used for fishing, livestock and subsistence farming by the frequently nomadic local populations.

After World War 2, the central authorities in Moscow decided to favour cotton as practically the only crop. The aims were clear: give Central Asia an identity in the productivist pattern of Soviet territory, settle the nomad populations and finally drum up nationalism

centred on a vast joint hydraulic project. Work on diverting the two rivers to gigantic irrigation perimeters was undertaken in the 1950s. Regular abstraction with no return to the rivers resulted in the early 1960s in a considerable, almost total reduction in the flows of the Amu Darya and the Syr Darya, leading to an imbalance between inflow to the sea and evaporation.

At the end of the 1980s when communism was declining, first scientists and then journalists decried the ecological catastrophe: the Aral Sea had decreased by 50% in area and 70% in volume. Twenty years later, with the new independent republics, it has become a mosaic of lakes, with a definitive break between the northern and southern parts. But there is worse: the natural inflow of salt in river water and the reduction of the volume of the sea led to an increase in salinity that destroyed the fisheries resources. In addition, the two delta regions in the north and the south, where population density is high, have changed from being wetlands to agricultural land that was rapidly sterilised by the salt deposited there, with dramatic sanitary consequences for the population.

International mobilisation since the early 2000s has led to the beginnings of rehabilitation which, although far from being complete, has given some results. The main strategy used is the better management of abstraction of water along the two rivers, improvement of the profitability of the canal networks, the diversification of farming and the gradual restoration of the delta wetlands where the population lives. Fishing zones have also been reconstituted in natural or artificial lakes, new embankments have been built, hydraulic works have been rehabilitated and marshes and reed beds have reappeared, allowing the return of migratory birds and enhancing the recharge of aquifers. Awareness by the population has been enhanced... But the great Aral Sea will not return for a long time.



© PD-Usgof-Nasa

Vingt ans seulement séparent ces deux clichés de la mer d'Aral.

En haut 1989. En bas 2008, la mer subsiste seulement au nord et à l'ouest du bassin.

These two photos of the Aral Sea were taken at an interval of only 20 years. Top: 1989. Bottom: 2008, when the sea remained only in the north and west of the basin.



## DÉGRADATION DES ÉCOSYSTÈMES

### DEGRADATION OF ECOSYSTEMS

**A** la surexploitation locale des ressources en eau s'ajoute la dégradation de certains écosystèmes qui perturbe le cycle de l'eau à l'échelle des bassins versants. La déforestation et la mise en culture de sols fragiles sur de fortes pentes affectent directement la capacité d'absorption des sols et, par conséquent, l'alimentation des nappes souterraines. L'érosion, phénomène naturel, est alors artificiellement accélérée, entraînant entre autres conséquences une perte de fertilité des sols arables, des perturbations du régime hydrique des cours d'eau et une aggravation des phénomènes d'inondations. « Chaque année (l'érosion) rend improductifs 20 millions d'hectares dans le monde » C. Valentin et J. Albergel. L'irrigation mal maîtrisée, quant à elle, peut provoquer une salinisation des sols et une baisse de fertilité qui deviennent irréversibles si des techniques appropriées ne sont pas mises en œuvre.

In addition to local over-exploitation of water resources, the degradation of certain ecosystems disturbs the water cycle at drainage basin level. Deforestation and the cultivation of fragile soils on steep slopes have a direct effect on the absorption capacity of the soil and hence the charging of aquifers. Erosion, a natural phenomenon, is then accelerated artificially. Among other things, this causes loss of fertility of arable soils, disturbance to the hydrological regimes of watercourses and more serious flooding. 'Each year [erosion] makes 20 million hectares of land unproductive' (C. Valentin & J. Albergel). Poorly mastered irrigation can cause soil salinisation and decreased fertility that become irreversible if the appropriate techniques are not applied.



#### Page gauche/left

© IRD/O. Barrière

L'agriculture sur brûlis pratiquée sans temps de régénération du couvert végétal provoque une dégradation durable des sols: assèchement, perte de fertilité, érosion. Guyane.

Slash and burn farming with no time allowed for regeneration of the plant cover causes lasting soil degradation: drying, loss of fertility and erosion. French Guiana.

#### Page droite/right

© IRD/M. Grouzis

La déforestation pour la mise en culture fragilise les sols ferrallitiques tropicaux qui s'effondrent alors massivement sous l'effet des pluies et du ruissellement. Madagascar.

Deforestation for cultivation makes tropical ferrallitic soils fragile, with massive collapses caused by rain and runoff. Madagascar.



## Eau et zones arides : des enjeux lourds et multiples

Eric Servat

Il est aujourd'hui facile de dresser une liste des inquiétudes relatives à l'eau qui assaillent nos sociétés : disparité géographique de sa distribution, entraînant ici des stress hydriques et là des catastrophes liées à la surabondance; explosion démographique augmentant chaque année les besoins en eau; changement climatique induisant des sécheresses plus longues et des inondations plus nombreuses; écosystèmes surexploités et dégradés; absence d'infrastructures ayant pour conséquences le fait que, dans les pays en développement, 80 % des maladies sont liées à l'eau...

Parallèlement, nombreuses sont les zones arides et semi-arides d'ores et déjà menacées par la désertification, et donc la dégradation des sols, en raison de divers facteurs parmi lesquels la sécheresse, mais aussi la surexploitation des ressources. Ces zones sèches sont des écosystèmes extrêmement fragiles. La rareté des ressources en eau douce, la maigre épaisseur des terres arables et la faible productivité de la biomasse les rendent particulièrement vulnérables aux pratiques d'exploitation nuisibles telles que le surpâturage, le déboisement ou une irrigation inadaptée qui favorise la salinisation des sols. On comprend donc aisément que, dans les zones arides et semi-arides, les enjeux planétaires de l'eau soient encore exacerbés. En effet, ce sont près de 25 % des habitants de la planète qui vivent dans ces régions qui conjuguent forte croissance démographique, pauvreté et mortalité infantile, tout en ne disposant que de seulement 2 % des ressources mondiales en eau. Fragilité des écosystèmes secs et

limites des ressources disponibles y sont ainsi rarement prises en compte car les priorités sont autres, souvent tournées vers la cruciale question des moyens de survie des populations.

Et pourtant, il est facile de comprendre que, dans ces régions tout particulièrement, la croissance continue de la demande en eau, d'une part, et la fréquente surexploitation de la ressource disponible, d'autre part, sont peu compatibles. Y compris dans un futur proche marqué par des bouleversements importants issus des effets simultanés (et parfois contraires) du changement climatique et des activités humaines. Cette situation accroît les enjeux politiques, économiques et sociétaux autour de la ressource en eau et crée des tensions qui dépassent parfois le cadre national et pourraient être à l'origine de ce que l'on appelle les « guerres de l'eau ».

On conçoit aisément que, même en faisant appel à des ressources supplémentaires dites « non conventionnelles » (réutilisation des eaux usées, dessalement de l'eau de mer), qui posent d'autres problèmes énergétiques ou environnementaux, il faudra désormais, à fortiori dans les zones arides et semi-arides, répartir l'eau autrement et faire évoluer les pratiques en matière d'usages. La nécessaire gouvernance de la ressource en eau doit s'inscrire dans une perspective multiple : sociétale, économique et environnementale.

Le laboratoire HydroSciences Montpellier, unité mixte de recherche associant l'IRD, le CNRS et les universités Montpellier-I et -II, mobilise une grande part de ses compétences à développer les connaissances autour de ces questions. Celles-



ci constituent les enjeux de demain auxquels il convient de faire face car ils sont la clé d'une gestion durable de la ressource en eau, vitale pour nos sociétés et pour chacun d'entre nous.

### **Water and arid zones: serious, multiple issues**

It is easy today to draw up a list of the concerns related to water that impinge on our societies: geographical disparity of distribution leading in some places to water stress and in others to catastrophes caused by excesses, strong population growth increasing water requirements every year, climate change inducing longer droughts and more floods, overexploited, degraded ecosystems, absence of infrastructure that means that 80% of diseases in developing countries are water-related, etc. In parallel, numerous arid and semi-arid zones are already threatened by desertification and hence soil degradation as a result of various factors including drought but also the overexploitation of resources. These dry zones are extremely fragile ecosystems. The scarcity of freshwater resources, the shallow arable soils and low biomass productivity make them particularly vulnerable to harmful practices such as over-grazing, deforestation or unsuitable irrigation tending to cause soil salinisation. It is thus easy to understand that the global issues of water are further aggravated in arid and semi-arid zones. Indeed, nearly 25% of the world population lives in these regions that feature strong population growth, poverty and infant mortality but that have only 2% of global water resources. The fragility of dry ecosystems and the limited resources available are rarely taken into account as the focus is on other priorities and often the crucial question of means of survival of the populations. However, it is easy to understand that especially in these regions the continuous

increase of demand for water on the one hand and the frequent over-exploitation of available water resources on the other are not very compatible. This is also true for a near future that will be marked by serious upsets caused by the simultaneous (and sometimes contrary) effects of climate change and human activities. This situation increases the political, economic and social issues centred on water resources and creates tensions that sometimes go beyond a national framework and could trigger what are called 'water wars'. It is easy to understand that even if extra, 'unconventional' water resources (reuse of wastewater, desalinated sea water) are used, that raise other energy or environmental problems, it is now necessary in particular in arid and semi-arid zones to share out water differently and make practices of use evolve. The necessary governance of water resources should form part of a multiple societal, economic and environmental approach. The HydroSciences Montpellier laboratory, a joint research unit combining IRD, CNRS and Montpellier Universities 1 and 2, devotes a large proportion of its competences to increasing knowledge on these questions. These are tomorrow's issues that must be faced as they are the key to the sustainable management of the water resources that are vital for our societies and for each one of us.

#### *Page gauche et droite/left and right*

© IRD/E. Servat

Dans les zones rurales arides et semi-arides, la moindre ressource en eau est utilisée pour développer la production agricole, principale source de revenus des populations. Douars en bordure de l'Atlas, Maroc.

The slightest water resource in arid and semi-arid rural zones is used for farming, the main source of income for local people. Douars, at the edge of the Atlas Mountains, Morocco.

## **Perturbations des régimes des fleuves : l'impact des changements climatiques et anthropiques en Afrique de l'Ouest**

**Les cours d'eau d'Afrique de l'Ouest ont connu ces dernières** décennies des modifications significatives de leur débit et de leur régime, avec une recrudescence des crues et des étiages plus marqués. Ces phénomènes mettent en jeu l'avenir de la ressource en eau et donc la sécurité alimentaire dans cette région semi-aride, de même que la gestion des risques de crue et de pénurie. Dans ce contexte, un programme nigéro-français développé en complément du programme Amma s'applique à évaluer la part des facteurs naturels et celle des facteurs anthropiques dans cette évolution, de façon à fournir aux décideurs l'information nécessaire pour l'aménagement des terroirs. L'équipe est constituée de chercheurs de l'IRD et de l'université Abdou Moumouni de Niamey, de l'Autorité du bassin du Niger (ABN) et de la Direction de l'hydraulique du Niger.

**La grande sécheresse dont souffre cette région depuis 1968** a provoqué, dans un premier temps, une forte baisse des débits des grands cours d'eau (Niger, Sénégal, Gambie, Volta, Chari...). Mais un comportement particulier des cours d'eau strictement sahéliens a été observé : alors que leurs bassins subissaient une baisse des précipitations plus prononcée que les bassins plus méridionaux (donc plus pluvieux), les cours d'eau voyaient paradoxalement leurs débits augmenter. Après analyse, il apparaît que cette augmentation des débits est liée à l'accroissement des surfaces dénudées suite à l'érosion, avec ou sans mise en culture des sols, et sur lesquelles le ruissellement est fortement accru.

**On a observé également que le ruissellement devenait** plus rapide et plus intense, ce qui provoque une concentration des eaux plus rapide : l'arrivée des crues devient plus précoce

dans la saison alors que le régime des pluies n'a pas évolué dans ce sens. La capacité des bassins à retenir l'eau étant amoindrie, le régime et les débits des cours d'eau sont modifiés.

**On considère que le défrichement de la brousse et des forêts** claires de l'Afrique semi-aride a conduit à un accroissement rapide des surfaces dénudées. Il semble aussi que le système agraire, qui repose sur une re-fertilisation des champs par des périodes de jachère, soit devenu inefficace : sous l'effet de la pression démographique, les temps de jachère ont été réduits, ce qui entraîne une diminution des rendements due à une fatigue des sols. Cet appauvrissement des sols aboutit souvent à leur encroûtement, principal facteur de l'accroissement du ruissellement. Le risque de crue est par ailleurs à réévaluer dans les politiques d'aménagement du fait de l'extension des zones urbanisées.

**Ces programmes développés en Afrique de l'Ouest par l'IRD** et ses partenaires du Sud sont destinés à proposer aux décideurs des aménagements de terroirs susceptibles de rendre compatibles l'indispensable hausse de la production agrosylvo-pastorale avec la restauration des sols et des terroirs.

### **Disturbed river regimes: the impact of climate and anthropogenic changes in West Africa**

In recent decades, the watercourses of West Africa have displayed significant changes in discharge and regime, with an increase in floods and more marked low water levels. These phenomena call into question the future of water resources and hence of food security in this semi-arid region and also the management of risks of

Alors que la population mondiale et, avec elle, les besoins en eau, augmentent, les processus en cause dans la diminution des ressources s'aggravent, plaçant de nombreuses régions du monde face à des perspectives de crises environnementales majeures.

While the world population is increasing, and water requirements with it, the processes involved in the decrease in resources are worsening, with numerous regions of the world facing major environmental crises.

flooding and water shortage. In this context, a Niger-France programme developed as a complement to the AMMA programme is evaluating the share of natural factors and that of anthropogenic factors in this trend, with the aim of supplying decision makers with the information required for regional development purposes. The team consists of scientists at IRD and University Abdou Moumouni in Niamey, the Niger Basin Authority (NBA) and the Direction de l'hydraulique in Niger.

The severe drought suffered by the region since 1968 first caused a strong decrease in the discharges of the major rivers (Niger, Senegal, Gambia, Volta, Chari, etc.). However, the strictly Sahelian watercourses have displayed particular behaviour: whereas their basins suffered a more marked decrease in precipitation than the basins further south (that thus had more rainfall), paradoxically the discharges of watercourses increased. Analysis showed that this increase in discharges was linked to the increased area of bare land following erosion, with or without cultivation, and where runoff has increased strongly.

It has also been observed that runoff has become faster and more intense, causing a more rapid concentration of water. The floods

arrive earlier in the season whereas the rainfall regime does not match this. As the retention capacity of the basins has decreased, the regime and discharges of the watercourses have changed.

It is considered that the clearance of brush and open forest in semi-arid Africa has led to a rapid increase in bare soil area. It also seems that the agrarian system based on the re-fertilisation of fields by fallow periods has become ineffective. Fallow periods have been shortened under pressure from population growth and this has resulted in decreased yields caused by soil fatigue. The impoverishment of soils often results in crusting, the main factor in increased runoff. Indeed, floods risks should be reassessed in development policies as urban areas are spreading.

These programmes developed in West Africa by IRD and its southern partners are aimed at proposing to decision makers land development solutions with compatibility between the essential increase in agro-sylvo-pastoral production and the restoration of soils and local areas.

# Dégradation de la qualité de l'eau

## Degradation of water quality



© IRD/J.-P. Montoroï  
Pollution des sols en Afrique du Sud :  
dépôt salin par suintement à travers  
les déblais miniers.

Soil pollution in South Africa:  
saline deposit by seepage  
through mine tailings.

L'intensification de nombreuses activités humaines a des conséquences néfastes sur la qualité des ressources en eau. Les nitrates polluent fortement la plupart des eaux douces d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie, conséquence directe de l'intensification massive des pratiques de fertilisation chimique des terres agricoles. Les activités minières et industrielles sont responsables de l'augmentation alarmante de la concentration de métaux lourds et d'arsenic. Les produits pharmaceutiques se diffusent dans les cours d'eau et affectent directement les espèces halieutiques en tant que perturbateurs endocriniens. Les polluants organiques, quant à eux, provoquent une eutrophisation des milieux aquatiques, détruisant la biodiversité naturelle au profit d'espèces invasives. Tous facteurs confondus et en moyenne à l'échelle du globe, ce sont la moitié des espèces d'eau douce qui ont ainsi disparu depuis 1970.

The intensification of many human activities has harmful effects on the quality of water resources. Nitrates seriously pollute most of the fresh water in North America, Europe and Asia, a direct consequence of the massive intensification of the application of inorganic fertilisers on agricultural land. Mining and industry are responsible for the alarming increase in concentrations of heavy metals and arsenic. Pharmaceuticals spread in watercourses and have a direct effect on fish as endocrinal disruptors. Organic pollutants cause the eutrophisation of aquatic environments, destroying natural biodiversity to the benefit of invasive species. The combination of all factors averaged at a global scale shows that half of fresh water species have disappeared since 1970.



© IRD/J.-P. Montoroi  
Pollution acide des sols d'une ancienne usine.  
Les eaux ferrugineuses sont drainées  
par des canaux à ciel ouvert. Afrique du Sud.

Acid pollution of the soil by an old factory.  
Ferruginous water flows in open channels.  
South Africa.



## LA QUESTION DE L'ASSAINISSEMENT THE QUESTION OF SANITATION

**S**i l'accès à l'eau potable de l'ensemble des populations reste évidemment une priorité, il doit obligatoirement s'accompagner d'un accès à l'assainissement pour préserver la qualité de ressources déjà bien affectées. Selon l'ONU-eau, en 2008, « plus de 40 % de la population mondiale vit sans un système sanitaire satisfaisant ». La situation est particulièrement critique dans les villes, où la concentration de l'habitat et des déchets crée des situations d'insalubrité extrême. En Europe, 92 % des foyers urbains sont connectés à des égouts, mais cette situation privilégiée ne concerne que 45 % des populations urbaines en Asie et 18 % dans les principales villes d'Afrique. On estime d'autre part qu'en 2030 les populations urbaines de ces deux continents auront doublé par rapport à l'an 2000.

**A**lthough the availability of potable water for populations remains a priority, it must necessarily be accompanied by sanitation to conserve the quality of resources that are already markedly affected. According to UN Water in 2008, 'more than 40 per cent of the world's population [...] continue to live without improved sanitation'. The situation is particularly critical in cities where the concentration of dwellings and wastes creates situations of extreme insalubrity. In Europe, 92% of urban households are connected to mains drainage systems but this privileged situation concerns only 45% of the urban population in Asia and 18% in the main cities of Africa. It is also estimated that in 2030 the urban populations of the two latter continents will have doubled in comparison with the figure for 2000.



*Page gauche/left*

© IRD/S. Robert

L'afflux de population dans les mégapoles du Sud conduit à l'extension de bidonvilles sans eau potable ni assainissement. La Paz, Bolivie.

Population flow into the megalopolises of the South leads to spreading shantytowns with neither drinking water nor sanitation. La Paz, Bolivia.

*Page droite/right*

© IRD/M.-A. Pérouse de Monclos

Bidonvilles lagunaires: des sanitaires précaires pourtant considérés comme « améliorés ». Port Harcourt, Nigeria.

Waterfront shantytowns: makeshift sanitation that is nonetheless considered as 'improved'. Port Harcourt, Nigeria.

## Contaminants émergents en milieu aquatique

La diversité des molécules et produits synthétisés par l'homme est en constante progression. À cette diversité s'ajoute celle de leurs produits de transformation dans les milieux aquatiques, difficile à appréhender. Le développement de la recherche permet d'obtenir des informations précises sur le mécanisme d'action des contaminants au niveau moléculaire et cellulaire, notamment grâce au développement des outils analytiques et bio-analytiques, mais il permet rarement d'extrapoler aux effets sur les organismes entiers. C'est dans ce contexte que sont apparues les notions de contaminants émergents, d'effets émergents et de risques émergents: contaminants émergents telles les nouvelles molécules ou celles nouvellement détectées grâce aux progrès analytiques (résidus de médicaments); effets émergents dus à des molécules connues qui perturbent une fonction dans des organismes en induisant des effets non attendus (perturbateurs endocriniens); risques émergents liés à la méconnaissance de leur occurrence et de leurs effets dans l'environnement (nanoparticules).

À titre d'exemple, la caractérisation de la présence de résidus de médicaments dans les compartiments du milieu aquatique a conduit à un questionnement sur les risques associés. Pour mieux connaître ces contaminants émergents, des chercheurs de l'UMR Hydrosciences se sont intéressés aux processus pouvant conduire à l'atténuation naturelle des contaminants émergents dans les milieux aquatiques. Il s'agit pour l'essentiel de processus d'adsorption sur les phases solides tels les sédiments et les sols, de processus de dégradation sous l'action des micro-organismes (biotransformation) ou sous l'action des radiations solaires (phototransformation). Dans certains cas, ces processus de transformation peuvent également conduire à la formation de produits qui présentent des risques aussi élevés que les substances parentes pour les organismes aquatiques. Ces contaminants émergents ne sont pas considérés comme des contaminants persistants, à l'inverse par exemple des polychlorobiphényles (PCB) ou des dioxines. On les considère en revanche comme des substances « pseudo-persistantes » car, même si leurs temps de vie sont courts dans les milieux aquatiques,

elles y sont émises en continu, le plus souvent via les rejets des stations d'épuration.

### Emerging contaminants in aquatic environments

The diversity of the compounds and products synthesised by man is increasing continuously. To this variety is added that of the products of their transformation in aquatic environments, a feature that is difficult to address. The development of research gives precise information about the mechanisms of action of these contaminants at molecular and cellular levels, in particular thanks to the development of analytical and bioanalytical tools, but it rarely goes as far as extrapolating their effects on whole organisms. The notions of emerging contaminants, emerging effects and emerging risks have appeared in this context: emerging contaminants such as new molecules or those newly detected by progress in analysis (medication residues), emerging effects of known molecules and that disturb a function in organisms by inducing unexpected results (endocrinal disruptors) and emerging risks related to poor knowledge of their occurrence and effects in the environment (nanoparticles).

For example, characterisation of the presence of medication residues in the compartments of aquatic environments has led to asking questions about the related risks. To gain better understanding of these emerging contaminants, researchers at UMR (joint research unit) Hydrosciences addressed the processes that can lead to the natural mitigation of emerging contaminants in aquatic environments. This mainly involves process of adsorption on solid-phase materials such as sediment and soil, degradation by micro-organisms (biotransformation) or under the effect of solar radiation (photo-transformation). In some cases these transformation processes may also lead to the formation of substances with risks as high as their parent substances for aquatic organisms. These emerging contaminants are not considered as persistent contaminants, unlike polychlorinated biphenyls (PCBs) and dioxins for example. However, they are considered as pseudo-persistent substances as even though their lives are short in aquatic environments, they are emitted continuously, generally via outflow from sewage treatment stations.

## Pollution par les drainages de mine : vers un traitement biologique ?

L'exploitation minière conduit à l'extraction de grandes quantités de matériaux riches en sulfures, qui sont concentrés et transformés sur place. Les déchets de ces différentes opérations, exposés à l'air et aux eaux météoriques, sont alors très sensibles à l'altération. Ils libèrent pendant des siècles des eaux acides très riches en fer et sulfates. Ces lixiviats, appelés drainages miniers acides (DMA), contiennent également des teneurs extrêmes en métaux (Pb, Zn, Cu, Tl, Cd...) et métalloïdes (As, Sb...). Ils sont toxiques pour l'écosystème et représentent une menace pour la ressource en eau dans de nombreuses régions de la planète.

Depuis une quinzaine d'années, le laboratoire Hydrosiences Montpellier et ses partenaires étudient les processus de transfert des métaux et métalloïdes toxiques dans les bassins versants impactés par des pollutions d'origine minière. Les recherches sont menées sur différents sites miniers abandonnés ou en activité en France métropolitaine, au Maroc, en Espagne, en Bolivie..., dans le cadre de projets nationaux (Insu, ANR) et européens, et de l'Observatoire des sciences de l'Univers Oreme. L'objectif est de mieux comprendre comment se forment les drainages de mine mais également comment ces pollutions sont naturellement atténuées dans le milieu naturel. Il s'agit d'identifier les mécanismes physicochimiques mis en jeu et le rôle des micro-organismes. En effet, aussi inhospitaliers soient-ils, les DMA abritent des communautés florissantes d'eucaryotes, Archaea et bactéries qui y trouvent un milieu favorable à leur développement. Ces micro-organismes sont capables, dans certains cas, de modifier la forme chimique des polluants métalliques et de les transformer ainsi en composés moins toxiques ou moins mobiles. Ces recherches ont permis par exemple de montrer que l'atténuation naturelle de l'arsenic dans les DMA était en grande partie due à l'activité de bactéries capables d'oxyder le fer et l'arsenic.

L'acquisition de nouvelles connaissances sur la biogéochimie des drainages de mine permettra, à terme, d'améliorer les modèles de transport réactif capables de simuler la formation des DMA sur le long terme et leur atténuation dans l'hydrosystème aval. La découverte de micro-organismes adaptés aux milieux extrêmes et impliqués dans la biotransforma-

tion d'éléments toxiques peut offrir des potentialités intéressantes pour le développement de procédés passifs de traitement biologique des eaux acides minières.

### Pollution by mine drainage: towards biological treatment?

Mining involves the extraction of large quantities of material rich in sulphides that are concentrated and processed at the site. Exposed to air and rainfall, the wastes resulting from these various operations weather easily. For centuries, they release acid water with very high iron and sulphate contents. This leachate called acid mine drainage (AMD) also contains high levels of metals (Pb, Zn, Cu, Tl, Cd, etc.) and metalloids (As, Sb, etc.). These are toxic for the ecosystem and form a threat to water resources in many regions of the world. For some fifteen years, the HydroSciences Montpellier laboratory and its partners have studied the processes of transfer of toxic metals and metalloids in drainage basins affected by mining pollution. The research is conducted at various abandoned or working mines in metropolitan France, Morocco, Spain, Bolivia, etc. within the framework of national (INSU, ANR) and European projects and the Observatoire des sciences de l'Univers (OREME). The aim is that of gaining better understanding of how mine drainage forms and also how this pollution is mitigated naturally in the natural environment. This involves identifying the physico-chemical mechanisms involved and the role of microorganisms. Indeed, even though it is extremely inhospitable, AMD contains flourishing communities of eukaryotes, Archaea and bacteria that find AMD favourable for their development. In some cases, these microorganisms can modify the chemical form of metal pollutants, making them less toxic and less mobile. For example, this research has shown that the natural mitigation of arsenic in AMD is the result to a considerable degree of the activity of bacteria that oxidise iron and arsenic.

The acquisition of new knowledge of the biogeochemistry of mine drainages will make it possible in time to improve reactive transport models capable of simulating the formation of AMD in the long term and its mitigation in the downstream hydrosystem. The discovery of microorganisms adapted to extreme environments and involved in the biotransformation of toxic substances may have interesting potential for the development of passive processes for the biological treatment of acid mine drainage.

La proximité de l'eau ne présente pas que des avantages. Les eaux stagnantes ou polluées sont des facteurs de risques sanitaires. Les phénomènes de glissements de terrain et d'inondations existent depuis toujours mais leurs conséquences en termes de bilan humain tendent à s'accroître avec notamment l'urbanisation anarchique des bidonvilles dans des zones à risques. La dégradation des écosystèmes en amont, notamment l'érosion accrue consécutive à la mise à nu des sols, accentue les phénomènes de ruissellement. La fréquence et la violence des catastrophes naturelles augmentent. Le changement climatique en cours devrait encore accentuer ces risques. L'institut universitaire des Nations unies pour l'environnement et la sécurité humaine évalue à deux milliards le nombre de personnes qui y seront exposées en 2050 si des mesures préventives fortes ne sont pas mises en place.

## Augmentation des risques liés à l'eau

### Increase of water-related risks



© IRD/S. Hardy  
Les autorités municipales de La Paz ont choisi de faire passer dans des drains souterrains les nombreux torrents qui traversent la ville, afin de maîtriser à la fois l'aléa crue et la déstabilisation des versants. Bolivie.

The city authorities of La Paz have chosen to route the numerous torrential streams that cross the city in underground drains in order to master both flood risks and slope destabilisation. Bolivia.

The proximity of water does not just have advantages. Stagnant or polluted water is a sanitary risk factor. Landslides and floods have always existed by their consequences for human life are tending to become more marked, in particular as a result of the anarchic shantytown building in risk zones. The degradation of ecosystems upstream and especially increased erosion following the clearing of land aggravate runoff. The frequency and violence of natural catastrophes are increasing. Ongoing climate change will probably further increase these risks. The United Nations University Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS) considers that two thousand million people will be vulnerable by 2050 unless preventative measures are stepped up.



© IRD/A. Nikiéma  
Les inondations de septembre 1999 à  
Ouagadougou ont fait 150 000 sinistrés,  
dont 50 000 ont définitivement perdu  
leur logement. Burkina Faso.

Floods in September 1999 in Ouagadougou.  
Of the 150,000 victims, 50 000 lost their homes.  
Burkina Faso.

## Ruissellement urbain et risques d'inondations en zone intertropicale

Les agglomérations urbaines sont particulièrement exposées aux risques d'inondations. L'imperméabilisation des sols et la densification du drainage ont en effet tendance à augmenter les volumes ruisselés et les débits de pointe des crues. Le risque est donc très présent en milieu urbain, avec par ailleurs des enjeux sociaux et économiques élevés.

Dans les pays du Sud, le contexte est aggravé par certains facteurs. Les précipitations de la bande intertropicale sont en effet caractérisées par des épisodes intenses pouvant atteindre plusieurs centaines de millimètres en 24 heures. Les infrastructures de drainage nécessitent par conséquent de lourds budgets, souvent peu compatibles avec les ressources disponibles. De fréquents exemples, comme à Ouagadougou en 2010, illustrent la gravité de la situation.

La caractérisation et le diagnostic du risque pluvial dans les pays du Sud sont depuis longtemps parmi les thèmes de recherche de l'IRD. À la fin des années 1970, le programme « Ruissellement urbain en Afrique de l'Ouest » a consisté à mettre en place dans plusieurs capitales (Niamey, Ouagadougou, Lomé, Cotonou, Abidjan, Bamako) une quinzaine de petits bassins expérimentaux, destinés à étudier le fonctionnement hydrologique, à identifier les spécificités de l'urbanisation africaine.

Après avoir proposé dans les années 1980 une méthode de calcul des débits de fréquence rare (décennal, centennial...) adaptée au contexte urbain et péri-urbain des villes d'Afrique de l'Ouest, les travaux ont ensuite évolué, à partir des années 1990, vers de nouvelles méthodes visant à spatialiser l'aléa. De nouveaux sites péri-urbains ont été instrumentés en zone montagneuse, à Mexico et Quito, et ont conduit à mieux prendre en compte la composante spatiale, due par exemple à l'influence du relief. En Afrique de l'Ouest, les recherches se sont orientées vers la cartographie des zones inondables, pour représenter les écoulements dans les voiries urbaines et les échanges hydrauliques entre voiries et bâti.

Les travaux développés par l'IRD dans le contexte urbain de la bande intertropicale ont finalement contribué à mettre en place des éléments originaux pour le diagnostic des risques d'inondations, pour la simulation de différents projets

d'aménagements et pour la prise de décision en matière de stratégie de protection contre les inondations.

### Urban runoff and flood risks in the tropics

Urban centres are particularly exposed to flood risks. Making the ground impervious and dense drainage tend to increase runoff and peak flood flows. The risk is therefore very high in urban areas, where the social and economic stakes are also considerable.

The context is worsened by several factors in the countries in the South. Precipitation in the tropics is in the form of intense events with rainfall depth of as much as several hundred millimetres in 24 hours. As a result, drainage infrastructure requires large budgets that are often not very compatible with the resources available. The gravity of the situation is illustrated by frequent examples, such as Ouagadougou in 2010.

The characterisation and diagnosis of rainfall risks in the countries in the South have long been part of the research themes at IRD. In the late 1970s, the programme entitled 'Ruissellement urbain en Afrique de l'Ouest' ('Urban runoff in West Africa') consisted of setting up some 15 experimental basins in several capital cities (Niamey, Ouagadougou, Lomé, Cotonou, Abidjan and Bamako) for the study of hydrological functioning and to identify the specific features of African urbanisation.

A method for calculating discharges with long return frequencies (10-year, 100-year, etc.) adapted to the urban and periurban context of West African towns was proposed in the 1980s. The work then evolved in the 1990s towards new methods aimed at the spatialisation of risks. Other periurban sites were set up in mountain areas, in Mexico City and Quito, and led to better allowance for the spatial component, caused for example by the influence of relief. In West Africa, research was focused on mapping flood risk zones to represent discharges in urban streets and water exchanges between streets and buildings.

The work carried out by IRD in urban contexts in the tropics finally contributed to setting up original features for assessment of flood risk, for the simulation of various development projects and for decision making in flood protection strategy.



© IRD/S. Hardy

Avec l'extension urbaine sur de fortes pentes, les glissements de terrain sont de plus en plus importants lors des forts épisodes pluvieux. Quartiers populaires de La Paz, Bolivie.

With urban spread on steep slopes, landslides are increasingly serious during periods of heavy rain. Working class areas of La Paz, Bolivia.



## L'EAU, FOYER DE MALADIES À VECTEURS WATER, THE CRADLE OF VECTOR DISEASES

**S**i l'eau est un facteur de développement pour l'homme, elle l'est aussi pour une multitude de parasites. Le développement des surfaces irriguées et de nouveaux points d'eaux superficielles comme les petits barrages a eu pour conséquence indirecte la création de nouveaux sites de prolifération pour les vecteurs de maladies comme le paludisme, les bilharzioses, l'onchocercose, les dengues et la fièvre jaune. Les eaux de drains mal entretenus dans les systèmes irrigués et les eaux stagnantes sont des foyers d'infections, particulièrement dans les régions chaudes, les plus touchées étant l'Afrique subsaharienne et l'Asie du Sud. Chaque année, plus d'un million de personnes décèdent du paludisme en Afrique et, parmi elles, une majorité d'enfants de moins de 5 ans. Quand elles ne tuent pas, ces maladies sont invalidantes, comme l'onchocercose qui provoque la cécité. Elles constituent, outre le drame humain, un frein au développement des populations les plus pauvres.

**A**lthough water is a factor in human development, it is also a factor in the development of a host of parasites. The increase of irrigated areas and new surface water points such as small dams has indirectly caused the creation of new sites for the proliferation of the vectors of diseases such as malaria, bilharzia, onchocerciasis, dengue fever and yellow fever. Water in poorly maintained drains in irrigation systems and stagnant water are centres for infection, especially in hot regions, with the most seriously affected being sub-Saharan Africa and Southern Asia. Every year, more than a million people die of malaria in Africa, the majority being children less than 5 years old. When they are not mortal, these illnesses are incapacitating. For example, onchocerciasis causes blindness. In addition to the human tragedy aspect, they form a brake to the development of the poorest populations.



*Page gauche/left*

© IRD/P. Gazin

Les populations du delta du Brahmapoutre sont particulièrement exposées aux inondations et aux maladies parasitaires liées à l'eau. Ici, réunion de prévention sanitaire. Bangladesh.

The population of the Brahmaputra delta is particularly exposed to flooding and water-related parasite diseases. Here, a sanitary prevention meeting. Bangladesh.



*Page droite/right*

© IRD/M. Dukhan

*Anopheles sundaicus* est l'une des 60 espèces de moustiques vecteurs du *plasmodium*, responsable du paludisme. Espèce d'Asie du Sud-Est.

*Anopheles sundaicus* is one of 60 mosquito species that are vectors of *Plasmodium* that causes malaria. Species from South-East Asia.

© IRD/B. Vergnes

ADN de *leishmania*, protozoaire parasite de la leishmaniose inoculé par certains phlébotomes se reproduisant en milieu aquatique.

DNA of *Leishmania*, the protozoan parasite causing Leishmaniasis, inoculated by the bite of certain species of sand fly that reproduce in humid zones.



## La lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest : le programme OMS-OCP

Bernard Pouyaud

L'onchocercose, ou cécité des rivières, est une maladie transmise à l'homme par de petites mouches, les simulies (*Simulium damnosum*), qui inoculent par leurs piqûres des filaires dont l'action sur l'organisme humain entraîne, à terme, la cécité. Lancé en 1974 grâce aux efforts de quatre agences internationales (OMS, Pnud, Banque mondiale et FAO), le programme OMS/OCP (Programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest) concernait à son apogée la santé de 30 millions de personnes dans 11 pays. Basée sur l'élimination des larves aquatiques des simulies, vecteurs de la maladie, la lutte s'est appuyée pendant 14 ans sur des épandages aériens hebdomadaires d'insecticides dans les rivières, gîtes de reproduction des simulies.

Vue l'étendue de la zone couverte par ce programme et face à la nécessité de mieux contrôler les conditions d'utilisation des insecticides, la transmission des données hydrologiques par satellite a permis, à partir de la fin des années 1980, d'améliorer l'efficacité du programme. Dans les années 1990, le réseau a compté jusqu'à une centaine de plates-formes hydrologiques de télétransmission. L'utilisation de données hydrologiques en temps réel a permis l'obtention de dosages d'une précision rarement atteinte ainsi qu'une réduction du coût de traitement grâce à la mise au point par l'IRD d'un logiciel de prévision des débits.

Un nouveau traitement à base d'ivermectine fut ensuite à l'origine du programme Apoc, né en 1995 avec l'objectif d'éli-

miner l'onchocercose des pays où elle existait encore sous forme endémique, avec une extension à l'Afrique centrale et de l'Est.

Lorsque le programme OCP a pris fin en 2002, l'onchocercose était quasiment éradiquée en tant que problème de santé publique dans les pays de l'aire d'intervention. On estime que le programme a protégé 18 millions d'enfants du risque de cécité, évité à 600 000 personnes de devenir aveugles et permis de réhabiliter 250 000 km<sup>2</sup> de terres agricoles. Au total, le bilan du programme OCP est largement positif, tant sur le plan du contrôle de la maladie que sur celui de la protection de l'environnement.

### Control of onchocercosis in West Africa: the WHO-OCP programme

Onchocercosis or 'river blindness' is a disease spread to man by a small black fly (*Simulium damnosum*) whose bite inoculates roundworms whose effects on the human body finally lead to blindness. Launched in 1974 thanks to the efforts made by four international agencies (WHO, UNDP, the World Bank and the FAO), at its peak the programme concerned the health of 30 million people in 11 countries. Based on the elimination of the aquatic larvae of *Simulium*, the vectors of the disease, control was carried out for 14 years using weekly aerial spraying of insecticides over rivers where *Simulium* reproduces.

Given the size of the zone covered by WHO/OCP (Onchocercosis Control Programme) in West Africa and in the light of the need for better control of the use of insecticides, the transmission of



hydrological data by satellite improved the effectiveness of the programme from the end of the 1980s onwards. In the 1990s, the network had up to about a hundred hydrology teletransmission platforms. The use of hydrological data in real time enables dosages whose accuracy is rarely attained and a reduction in the cost of treatment thanks to the development by IRD of a discharge forecasting program.

New treatment based on ivermectin was then used in the APOC programme that started in 1995 with the aim of eliminating onchocercosis in the countries where it still existed in endemic form, with an extension into central and East Africa.

When the OCP programme came to an end in 2002, onchocercosis had been practically completely eradicated as a public health problem in the intervention area. It is estimated that the programme has protected 18 million children from a risk of blindness, prevented 600 000 people from becoming blind and enabled the rehabilitation of 250 000 square kilometres of agricultural land. The results of the OCP programme are very positive with regard to both control of the disease and protection of the environment.

*Page gauche/left*

© IRD/B. Pouyaud  
Campagne OCP, chutes de la Fatala,  
Fouta D’Jalon, Guinée.

OCP, Fatala Falls, Fouta D’Jalon, Guinea.

*Page droite/right*

© IRD/H. Guillaume  
Gîtes à simulies, insectes hématophages  
vecteurs de l’onchocercose, une maladie  
invalidante appelée « cécité des rivières ».  
Guinée.

Habitat of *Simulium*, haematophagous  
insects that are the vector of onchocercosis,  
an incapacitating disease called 'river  
blindness'. Guinea.

L'accès à l'eau est défini comme la disponibilité d'un point d'eau à moins de 200 m de l'habitation. Il est à noter que, dans cette définition, la qualité de l'eau n'est pas prise en considération. Si la distribution de l'eau est désormais individuelle dans les pays les plus riches, elle reste encore largement collective, sous forme de puits, fontaines, sources ou marigots, pour une grande part de la population mondiale. Outre les problèmes de qualité, en particulier au niveau bactériologique, l'accès à des points d'eau parfois très éloignés des lieux de vie est un frein au développement: les corvées d'eau, charge majoritairement dédiée aux femmes et aux enfants, empiètent d'autant sur les temps qui pourraient être consacrés à des activités productives ou à l'éducation.

Having access to water is defined as the availability of a water point less than 200 metres from a dwelling. It should be noted that water quality is not taken into consideration in this definition. Although the distribution of water is now individual in the richest countries, it is still mainly collective, in the form of wells, standpipes, springs or channels, for a large proportion of the population of the world. In addition to problems of quality—especially bacteriological characteristics—access to water points that are sometimes very far from dwellings slows development. The carrying of water, generally by women and children, takes up time that could be devoted to productive activities or education.

## Favoriser l'accès à l'eau

### Enhance access to water



© IRD/P. Haeringer  
Approvisionnement en eau auprès  
d'un particulier. Technique du bec verseur  
à hauteur de récipient porté sur la tête.  
Côte d'Ivoire.

Delivering water to a private  
person. The technique  
uses a spout at the level  
of the vessel carried  
on the head. Côte d'Ivoire.



© IRD/P. Bousses

L'accès à l'eau est souvent difficile dans les pays du Sud. Les femmes du village viennent chercher de l'eau à la pompe. Cameroun.

Access to water is often difficult in countries in the South. Village women come to get water from the pump. Cameroon.



**L'EAU POTABLE : UN BIEN RARE ET CHER POUR LES PLUS PAUVRES**  
**POTABLE WATER: RARE AND EXPENSIVE FOR THE POOREST**

**D**ans le monde, 1,1 milliard de personnes n'ont accès ni à l'eau potable ni à l'assainissement qui doit aller de pair, principalement dans les mégapoles des pays du Sud. Si l'on considère que 90 % de l'augmentation démographique prévue d'ici 2050 se situera dans ces mêmes pays, on comprend l'urgence et l'ampleur de la crise de l'eau. Chaque année, 1,4 million d'enfants meurent de maladies diarrhéiques qui pourraient être évitées avec un accès à l'eau potable et à l'assainissement. Alors que la consommation quotidienne peut atteindre jusqu'à 300 l d'eau par personne dans certains pays, des millions de personnes doivent chaque jour parcourir plusieurs kilomètres pour apporter au foyer quelques dizaines de litres du liquide vital.

**A**round the world, 1.1 thousand million persons—mainly in megalopolises in southern countries, have no access to either potable water or the sanitation that should go with it. The urgency and the scale of the water crisis is understood when it is considered that 90% of the population increase forecast by 2050 will be in these countries. Every year, 1.4 million children die of diarrhoeal diseases that could be avoided by access to potable water and sanitation. Whereas daily consumption can be as much as 300 litres per person in some countries, millions of people must go several kilometres every day to bring home a few dozen litres of this vital liquid.

« Les pauvres des villes doivent souvent acheter leur eau à des fournisseurs privés et paient jusqu'à 50 fois plus que leurs voisins plus riches pour un litre d'eau » (Unesco)

'The urban poor pay up to 50 times more for a litre of water than their richer neighbours, since they often have to buy their water from private vendors.' (Unesco)



*Page gauche/left*

© IRD/V. Simonneaux

Le remplissage des bidons au puit.  
Lac asséché de l'Izzourar. Haut Atlas central,  
Maroc.

Filling containers at the well. The dry lake  
Izzourar. Central High Atlas, Morocco.

*Page droite/right*

© IRD/M. Jégu

Les populations pauvres dépourvues d'accès  
à l'eau potable sont parfois contraintes  
d'acheter boissons gazeuses et eaux minérales  
pour satisfaire leurs besoins vitaux.

Poor people with no access to drinking water  
sometimes have to purchase fizzy drinks  
and mineral water to cover their vital needs.



## EAU ET TOXICITÉ CHIMIQUE WATER AND CHEMICAL TOXICITY

Les pollutions chimiques n'épargnent pas les pays riches mais les moyens financiers et techniques dont ils disposent permettent de contrôler et rétablir, quoique de plus en plus difficilement, une qualité acceptable de l'eau si ce n'est optimale. En revanche, les populations les plus pauvres sont totalement démunies devant ces problèmes. Au Bangladesh, la surexploitation de nappes phréatiques a provoqué une baisse de leur niveau et, en conséquence, une augmentation de leur concentration en arsenic, un élément présent à l'état naturel dans les sols. Ces eaux, impropres à la consommation, sont pourtant les seules disponibles pour les populations locales. Dans de nombreuses régions d'Europe de l'Est et de Russie, les concentrations en métaux lourds issus de l'industrie sont aussi alarmantes. Ces altérations chimiques de la qualité de l'eau, encore trop peu étudiées, affectent directement la santé et l'avenir de centaines de millions de personnes.

Chemical pollution does not spare rich countries but their financial and technical resources mean that it is possible to monitor and re-establish—although with increasing difficulty—water quality that is acceptable if not optimal. However, the poorest populations have no way of handling these problems. The over-exploitation of aquifers in Bangladesh has caused a lowering of their level and hence an increase in the levels of arsenic, a substance present naturally in the ground. This water is not suitable for consumption but is nevertheless is all that is available to the local people. Alarming concentrations of heavy metals of industrial origin are also found in numerous regions of Eastern Europe and Russia. These chemical degradations of water quality that have a direct effect on the health and future of hundreds of millions of people have not been sufficiently studied.

## Grandes villes du Sud : vulnérabilité sanitaire et nouvelle ingénierie urbaine du cycle de l'eau

Les développements économiques et technologiques des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles ont permis la mise au point d'une ingénierie urbaine perfectionnée, coûteuse mais efficace, pour l'encadrement du cycle de l'eau dans les villes. Les systèmes élaborés reposent principalement sur la technologie des réseaux centralisés et sur une prise en charge publique de l'aménagement et de la gestion. Dans les villes modernes, un danger sanitaire proche de zéro a ainsi été obtenu durablement.

Les situations actuelles de nombreuses villes du Sud montrent l'impossibilité d'adapter une telle approche dans ces contextes urbains où l'expansion de l'espace habité précède souvent la mise en place de tout réseau. Les configurations spatiales et sociales qui en résultent aggravent les vulnérabilités. Le mode libéral et dérégulé de développement économique, la délégation fréquente de la gestion des équipements aux acteurs privés et la très faible solvabilité d'une grande partie de la population réduisent les possibilités d'un investissement public rentable sur le long terme. Les études de la qualité de l'eau dans les retenues artificielles, dans la filière de potabilisation et de distribution et dans les pratiques domiciliaires montrent la vulnérabilité de la qualité de l'eau. À une circulation incontrôlée des eaux usées s'ajoutent un état du réseau et une gestion des flux qui exposent l'eau distribuée aux infiltrations et aux contaminations. Ces dernières sont également facilitées par l'irrégularité de l'offre qui contraint les habitants à de multiples modes de ravitaillement, de transport et de stockage.

Populations et acteurs urbains conçoivent alors des solutions palliatives ou complémentaires pour accéder à l'eau, solutions certes moins satisfaisantes, plus incertaines, et porteuses de vulnérabilités sanitaires et environnementales accrues mais, de fait, économiquement et socialement viables.

Une nouvelle ingénierie urbaine du cycle de l'eau peut ainsi émerger pour peu que les pouvoirs publics et les acteurs de

l'aide au développement acceptent de réévaluer leurs standards sanitaires et économiques et de s'investir dans la mise en œuvre de solutions alternatives.

### Cities in the South: sanitary vulnerability and new water cycle urban engineering

Nineteenth and twentieth century economic and technological developments made it possible to achieve perfected urban engineering—costly but effective—for water cycle management in cities. The systems developed are based mainly on mains network technology and public development and management. Sanitary danger of close to zero has thus been obtained sustainably in modern cities.

The present situation in numerous southern towns shows that it is impossible to adapt such an approach in urban contexts in which the spread of the urban area often precedes the installation of any network whatsoever. The resulting spatial and social configurations increase vulnerability. The liberal, deregulated mode of economic development, the frequent delegation of the management of installations to private operators and the very poor solvency of a large proportion of the population reduce the possibility for public investment that is profitable in the long term. Studies of water quality in artificial impoundments, in the treatment and distribution of drinking water and in domestic practices show the vulnerability of water quality. Uncontrolled movement of waste water is added to the poor condition of the system and flow management that expose the water distributed to infiltration and contamination. The latter is also aggravated by irregular delivery that obliges the population to use many types of supply, transport and storage.

Populations and urban players then design palliative or complementary solutions for access to water. These solutions are less satisfactory, more uncertain and display increased sanitary and environmental variability but are more viable from the economic and social points of view.

New urban engineering may thus emerge if the public authorities and development aid players agree to revise their sanitary and economic standards and work on the implementation of alternative solutions.

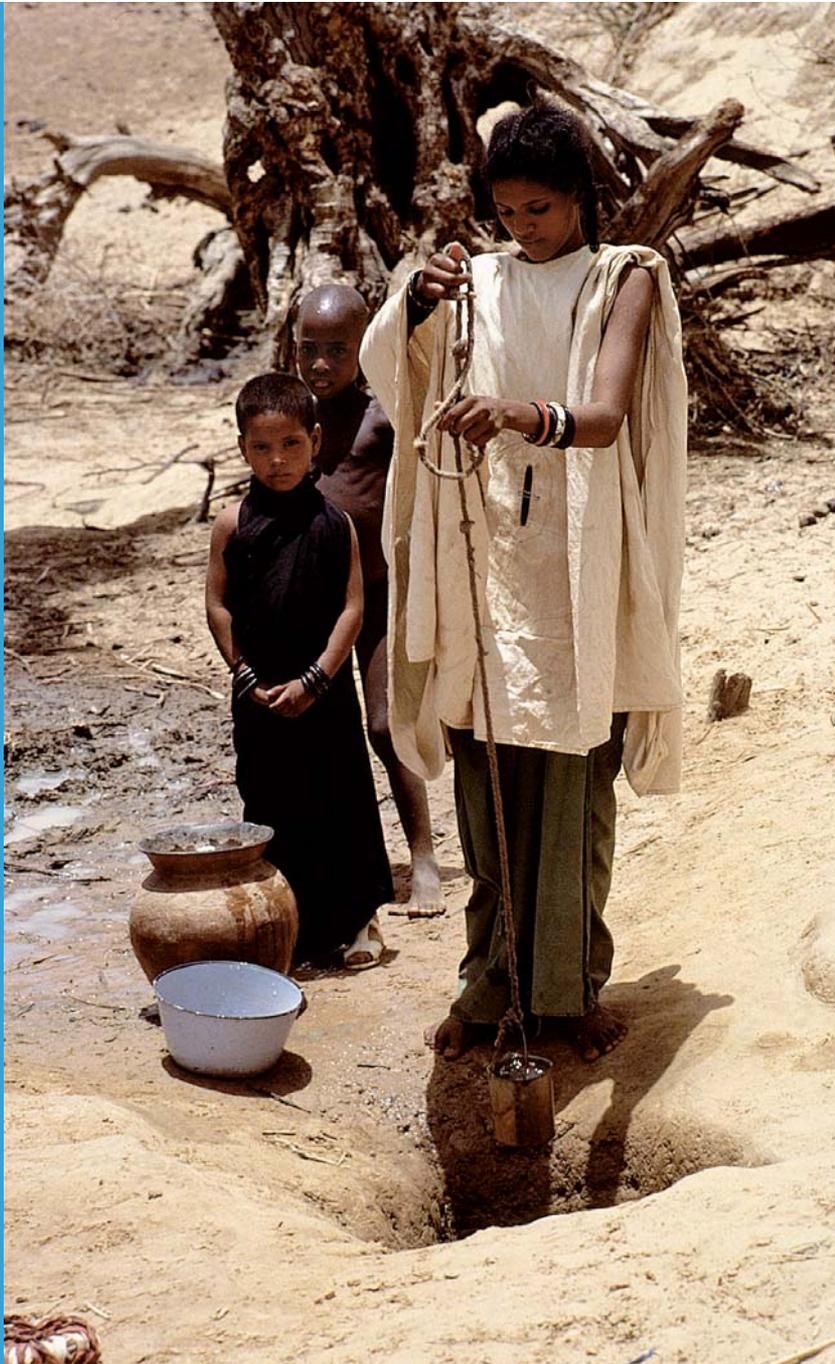
Page gauche/left

© IRD/J.-J. Braun

Point d'eau dans la région de Maddur.

Les femmes sont de corvée et font plusieurs kilomètres pour chercher l'eau. Inde.

Water point in the Maddur region. Women carry water for several kilometres. India.



*Page gauche/left*

© IRD/F. Sodter

Pour cette jeune femme kel tamasheq qui puise l'eau dans le fond du marigot, chaque litre d'eau compte. Burkina Faso.

Every litre counts for this young Kel Tamasheq women drawing water from the bottom of a channel. Burkina Faso.

*Page droite/right*

© IRD/V. Simonneaux

De nombreux villages du monde risquent d'être abandonnés par manque d'eau. Ici, ancien village berbère de Zriba, Tunisie.

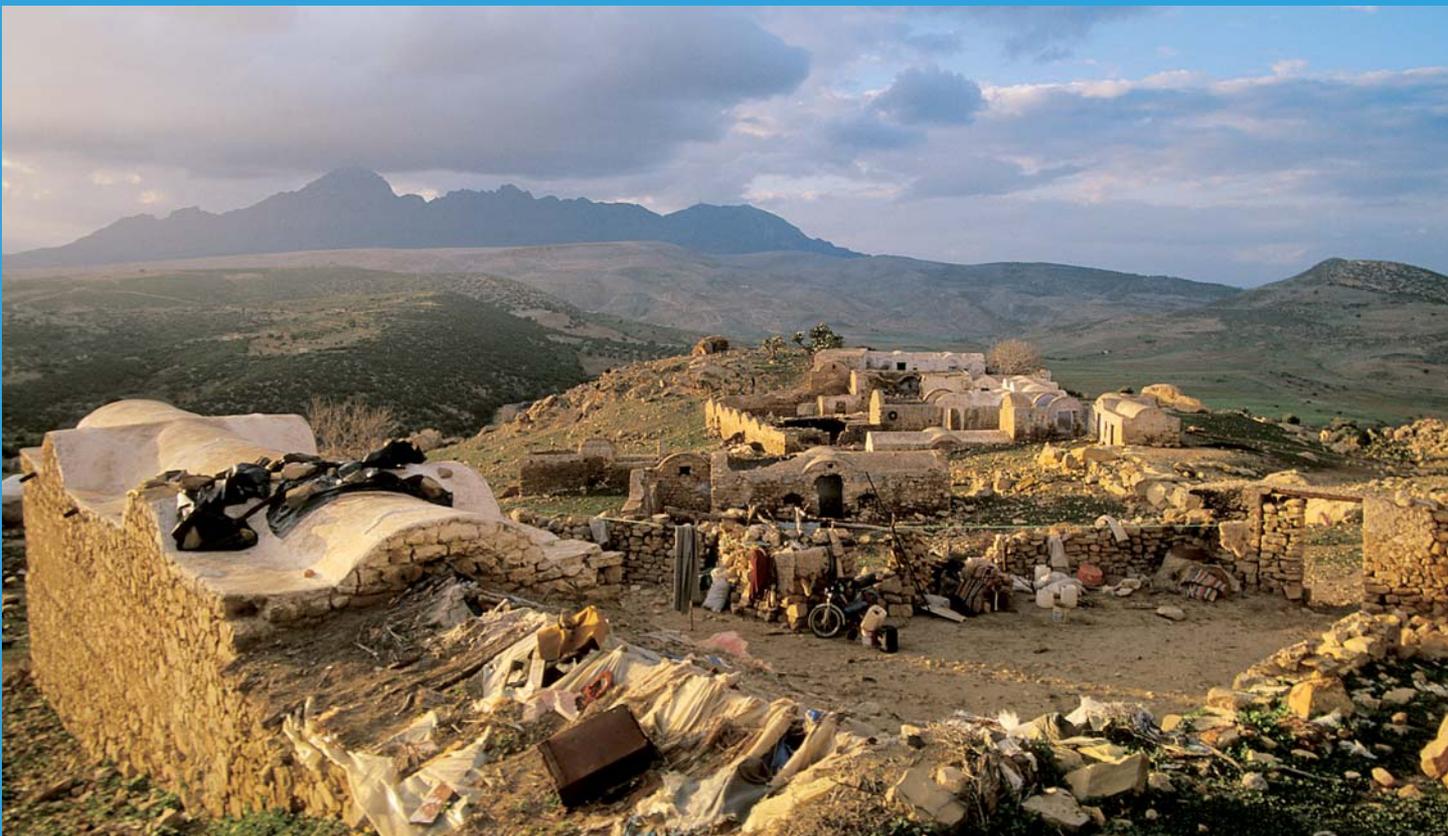
Many villages in the world risk being abandoned for lack of water. Here, Zriba, an old Berber village in Tunisia.

## QUEL ACCÈS À L'EAU DANS L'AVENIR ?

### WHAT ABOUT ACCESS TO WATER IN THE FUTURE?

**P**rès d'un milliard de personnes vivent dans des bidonvilles des pays du Sud sans accès à l'eau potable et à l'assainissement. L'accroissement démographique va par ailleurs fortement amplifier le phénomène. Chaque jour, 2 millions de tonnes de déchets d'origine humaine sont jetées dans les cours d'eau sans aucun traitement. Certains pays, comme la Libye, l'Égypte, les États de la péninsule arabique, ont un rythme de consommation qui dépasse déjà les capacités de renouvellement des ressources en eau. Les écosystèmes producteurs des eaux bleues sont en constante dégradation. Comment alors améliorer l'accès à une eau de qualité, en quantité suffisante pour l'ensemble de l'humanité ? Comment éviter que les inégalités actuelles ne s'exacerbent encore, laissant sur le bord de la route du développement une partie de la population mondiale ?

Nearly a thousand million people live in shantytowns in southern countries and have no access to drinking water and sanitation. The increasing population will also strongly amplify the phenomenon. Every day, 2 million tonnes of untreated human wastes are dumped in watercourses. Water consumption in some countries such as Libya, Egypt and the Arab peninsula states already exceeds the replenishment capacity of their resources. Ecosystems producing blue water are becoming constantly more degraded. So how can access to quality water in sufficient quantity be improved for the whole of humanity? How can the present inequality be prevented from worsening, leaving a proportion of the world population left at the roadside as regards development?



© IRD/C. Luro

Le Parc national Torres del Paine entre Cordillère, lacs et glaciers, forêts et steppes de Patagonie a été déclaré « réserve de la biosphère » en 1978 par l'Unesco, Chili

Torres del Paine National Park in Patagonia, encompassing mountains, lakes and glaciers, forests and steppe, was designated a World Biosphere Reserve by Unesco in 1978. Chile.



# Pour une gestion durable

## Sustainable development

Pour la première fois, l'humanité voit remis en cause les fondements mêmes de sa relation au monde: les concepts de progrès, de modernité, de développement technique et économique montrent aujourd'hui leurs limites, à l'origine d'une crise environnementale sans précédent. Depuis 1992 et le sommet de la Terre de Rio, une communauté internationale d'intellectuels, de scientifiques et de responsables politiques œuvre pour inscrire l'objectif de durabilité dans les politiques de développement: durabilité écologique, mais aussi sociale et économique. L'infléchissement des dynamiques anciennes est lent, émaillé de réussites en demi-teinte avec des blocages idéologiques et économiques. La gestion de l'eau, or bleu de notre époque, tient un rôle déterminant dans la construction des nouveaux équilibres qui permettront de sortir de cette crise majeure. Instances internationales, gouvernements, communauté scientifique, mouvements citoyens s'emploient à proposer des visions à long terme et à les mettre en œuvre.

**H**umanity is seeing the very foundation of its relation with the world called into question for the first time. The concepts of progress, modernity and technical and economic development are now showing their limits, causing an environmental crisis. Since 1992 and the Earth Summit in Rio, an international community of intellectuals, scientists and political leaders have been working on making the sustainability objective part of development policies —ecological and also social and economic sustainability. Changing the direction of the old dynamics is slow, dotted with mixed successes and ideological and economic blockages. The management of water, the blue gold of our times, has a determinant role in the building of new balances that will make it possible to overcome this major crisis. International authorities, governments, the scientific community and citizens' movements are working on proposing and implementing long-term visions.

# Face à la crise

## Facing the crisis

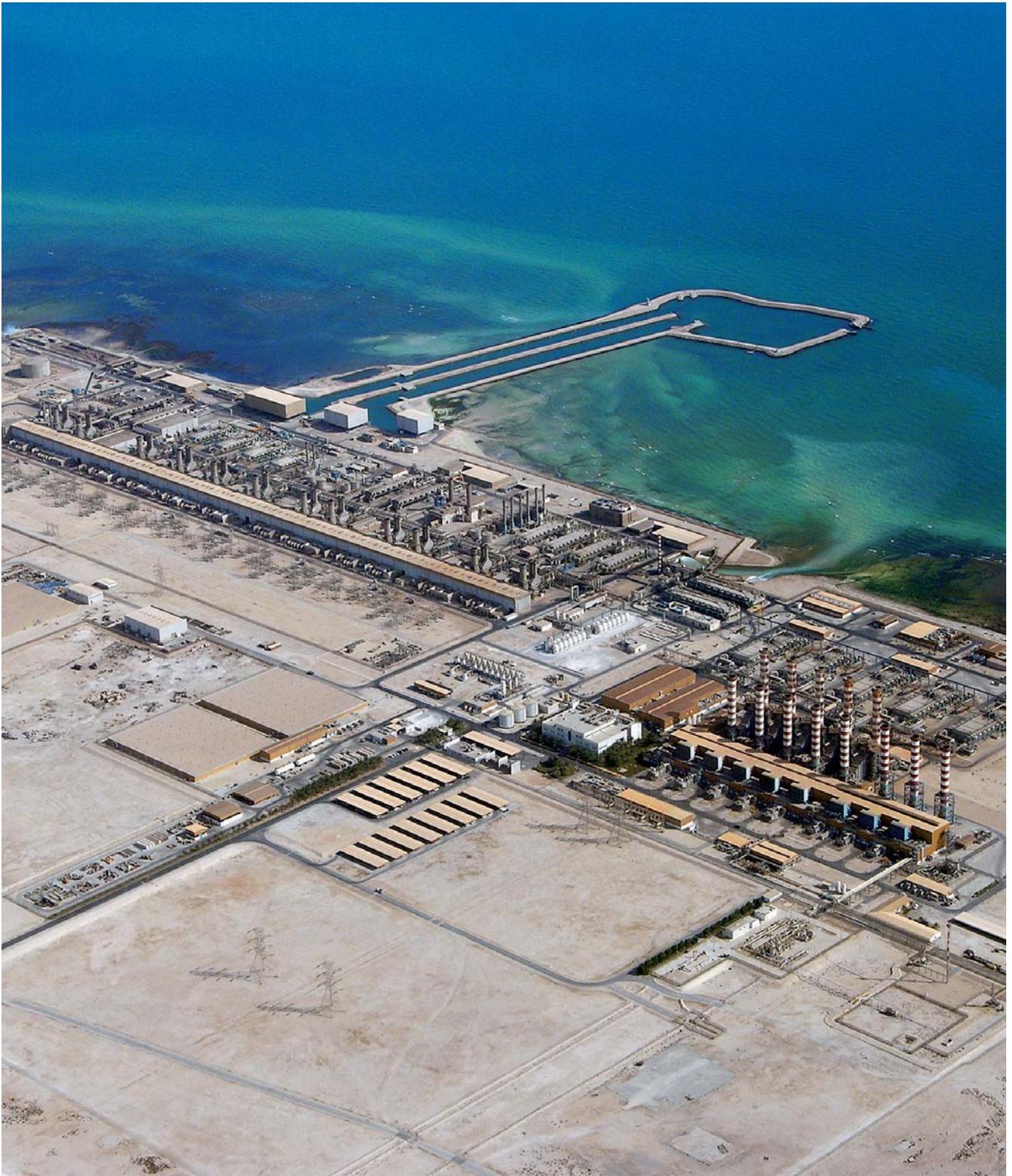


© IRD/M. Jégu  
Slogan contre la vie chère sur les murs  
de La Paz. Bolivie.

Complaint about the high cost  
of living on a wall in La Paz.  
Bolivia.

L'homme a su développer différentes techniques de désalinisation pour se procurer de l'eau douce à partir de l'eau salée. Les marins ont utilisé de longue date la technique de la distillation qui reproduit le phénomène naturel de l'évaporation. Depuis les années 1960, ce procédé est appliqué dans les usines de dessalement. Une nouvelle technique domine aujourd'hui en termes de volumes produits et de rentabilité : en 2008, l'osmose inverse représentait déjà 60 % des 53 millions de m<sup>3</sup> quotidiens d'eau dessalée produite dans le monde. Toutefois, malgré l'essor de ces techniques dans des pays riches comme les États-Unis et l'Espagne, ou dans les pays producteurs de pétrole comme l'Arabie saoudite et les Émirats arabes unis, le dessalement produit actuellement moins d'1 % de l'eau douce consommée dans le monde. Coûteux et « énergivore », il ne peut être utilisé que dans une minorité de pays et participe par ailleurs à l'émission de gaz à effets de serre.

Various desalination techniques have been developed to obtain fresh water from salt water. Seafarers long used distillation and this has been used in desalination plants since the 1960s. The new reverse osmosis method is now dominant as regards volumes produced and profitability, accounting for 60% of the 53 million cubic metres of desalinated water produced in the world every day in 2008. However, although used increasingly in rich countries like the United States and Spain and in oil-producing countries like Saudi Arabia and the UAE, desalination currently produces less than 1% of the fresh water used in the world. Costly, it can only be used in a few countries and it also contributes to greenhouse gas emissions.



© Panoramio/A. Massard-Combe  
C'est au prix d'un lourd investissement  
et d'une importante consommation d'énergie  
que les usines de dessalement permettent  
de produire de l'eau douce. Usine de Doha,  
Qatar.

Seawater desalination plants produce  
fresh water with heavy investment and large  
energy consumption (usually fossil fuels).  
Doha plant, Qatar.



*Page gauche/left*

© IRD/B. Osès

La déforestation de la forêt amazonienne entraîne une destruction immédiate de la biodiversité et à moyen terme la stérilisation des sols. Guyane.

Deforestation in the Amazon causes the immediate destruction of biodiversity and, in the medium term, sterile soils. French Guiana.

*Page droite/right*

© IRD/G. Michon

Les plantations industrielles de palmier à huile pour la production d'agrocarburants sont en plein essor en Asie du Sud-Est et contribuent fortement à la déforestation.

Commercial plantations of oil palms for biofuel production are increasing strongly in South-East Asia and make a substantial contribution to deforestation. Indonesia.

## IMBRICATIONS DE CRISES

### LINKED CRISES

**C**rise de l'eau et crise énergétique sont étroitement imbriquées : elles s'entretiennent et s'aggravent mutuellement. Le dessalement de l'eau requiert une importante consommation d'énergie. Quant aux agrocarburants, ils sont sources d'émission de gaz à effets de serre et de pollution atmosphérique. Ils nécessitent par ailleurs l'affectation de ressources en eau et de terres agricoles au détriment des productions alimentaires. S'ensuivent une spéculation sur les terres arables, un accroissement de la déforestation dans les pays tropicaux et, par effet de ricochet, une augmentation du prix des produits agricoles alimentaires. Alors que les Objectifs du millénaire pour le développement (OMD) visent à « réduire de moitié, entre 1990 et 2015, la proportion de la population qui souffre de la faim », est-il raisonnable de consacrer de précieuses ressources en eau et des terres arables à la production de carburant ?

The water crisis and the energy crisis are closely linked, feeding and aggravating each other. Desalination requires a large amount of energy. Biofuels are sources of greenhouse gas emission and air pollution. They also require the allocation of water resources and farmland at the expense of food crops. This is followed by speculation in arable land, increased deforestation in tropical countries and, by a ricochet effect, an increase in the price of agricultural foodstuffs. When the Millennium Development Goals include 'Halve, between 1990 and 2015, the proportion of people who suffer from hunger', is it reasonable to devote precious water and arable land to fuel production?





*Page gauche/left*

© IRD/J.-P. Montoroi

Maison traditionnelle à proximité d'une plantation d'arbres fruitiers. On remarquera les énormes jarres collectant les eaux de pluie. Thaïlande.

A traditional house near a plantation of fruit trees. Rainwater is collected in enormous pots. Thailand.

*Page droite/right*

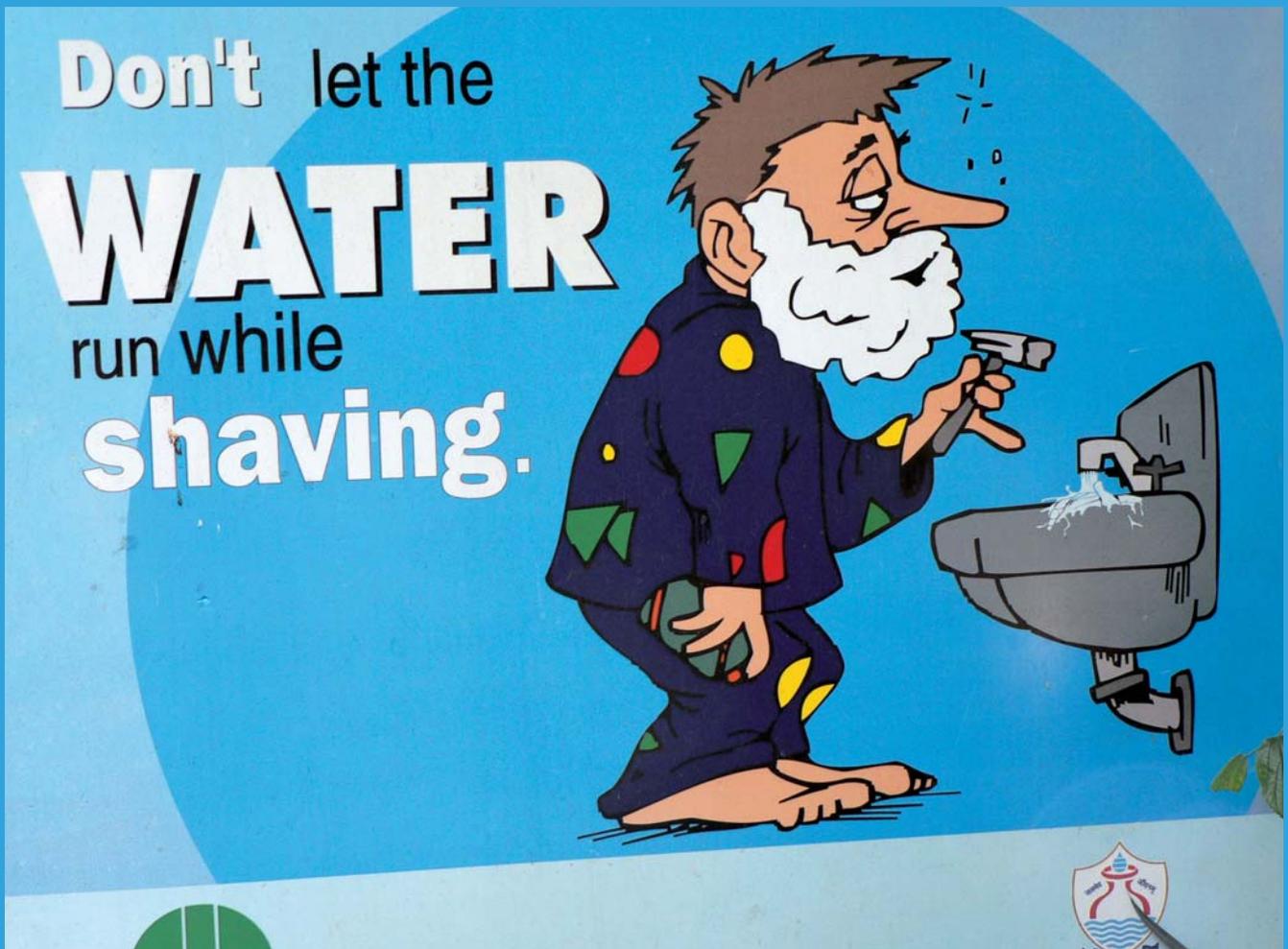
© IRD/D. Rechner

Campagne de sensibilisation de la municipalité de New Delhi contre le gaspillage de l'eau en milieu urbain : « ne laisse pas couler l'eau pendant que tu te rases ». Inde.

An awareness campaign by the New Delhi city authorities to prevent wastage of water in the city. India.

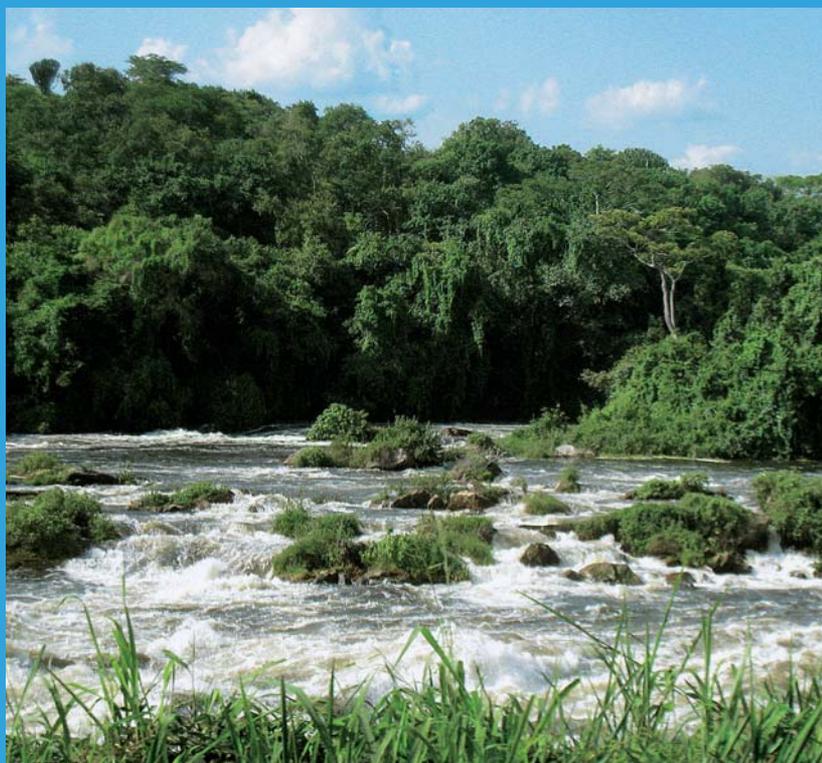
Malgré l'émergence de nouvelles technologies, la mutation de nos modes de consommation vers une gestion plus économe, voire le recyclage de l'eau, sont devenus indispensables.

In spite of the emergence of new technologies, changing our consumption modes by more economical management has become essential, and this could include the recycling of water.



# L'eau ne fait pas le développement

Water does not make development



© IRD/F. Courtin

Le Nil et ses rives forestières à l'exutoire du lac Kyoga. Le Nil blanc (Nahr-el-Abiad) prend sa source au lac Victoria alors que le Nil bleu est issu du lac Tana en Éthiopie.

The Nile and its forest banks at the outflow from Lake Kyoga. The White Nile (Nahr-el-Abiad) rises at Lake Victoria while the Blue Nile flows from Lake Tana in Ethiopia.

L'eau suffit-elle à assurer le développement des régions et nations qui en disposent en abondance? Les pays « de l'amont », titulaires des zones de production de la ressource hydrique, bénéficient d'une suprématie naturelle sur ceux de l'aval. C'est par exemple le cas de la Turquie, où prennent source le Tigre et l'Euphrate qui irriguent la Syrie et l'Irak. À l'inverse, d'autres pays, comme le Lesotho et l'Éthiopie, pourtant véritables châteaux d'eau, n'en restent pas moins parmi les pays les plus pauvres du monde. Les pays « de l'aval », l'Afrique du Sud et l'Égypte respectivement, historiquement dotés d'organisations étatiques fortes et centralisées, ont su s'assurer et conserver la suprématie de l'accès et du contrôle de la ressource en eau au point d'imposer la limitation du prélèvement de la ressource par les pays de l'amont. Alors que 85 % des eaux du Nil proviennent des montagnes éthiopiennes, ce pays ne compte que très peu de surfaces irriguées et endure régulièrement sécheresses et famines.

Is water enough to ensure the development of regions that have an abundant supply? The upstream 'production' countries naturally dominate those downstream. This is the case of Turkey where the Tigris and the Euphrates rise and whose waters are used in Syria and Iraq. But other upstream states like Lesotho and Ethiopia are among the poorest places in the world. The 'downstream' countries—South Africa and Egypt—have strong central state organisation and have ensured and conserved supremacy in water resources to the point of imposing limits on upstream countries. Although 85% of the flow of the Nile is from Ethiopia, the latter has only a very small irrigated area and drought and famine are frequent.



© DR  
Le bassin du fleuve Congo se partage entre l'Angola, le Burundi, le Cameroun, la République centrafricaine, le Congo, la République démocratique du Congo, le Rwanda, la Tanzanie et la Zambie.

The Congo River basin, shared between Angola, Burundi, Cameroon, Central African Republic, Republic of the Congo, Democratic Republic of the Congo, Rwanda, Tanzania and Zambia.

Water is not riches in itself. Long-term political vision, technical mastery, investment and effective equipment are essential for obtaining fresh water, a necessary but insufficient resource.

L'eau n'est pas une richesse en soi : vision politique à long terme, maîtrise technique, investissements et équipements efficients sont indispensables pour valoriser l'eau douce, ressource nécessaire mais non suffisante



*Page gauche/left*

© DR

Le barrage Inga 2, en République démocratique du Congo, fonctionne actuellement en sous-régime du fait de problèmes de maintenance et de précipitations insuffisantes dans le bassin du fleuve Congo.

The reservoir of the Inga 2 dam in the Democratic Republic of the Congo currently functions at under capacity because of maintenance problems and insufficient rainfall in the Congo River basin.

*Page droite/right*

© D. Martínez Vicente

Usine de dessalement de Rambla Morales. Province d'Almería, Espagne.

Desalination plant.  
Rambla Morales, Almería, Spain.



## DE L'EAU OUI, MAIS À QUEL PRIX ?

### WATER, YES, BUT AT WHAT PRICE?

**L**es Objectifs du millénaire pour le développement ciblaient une diminution de moitié des exclus de l'accès à l'eau à l'horizon 2015 par rapport à la situation de 1990. Si les progrès réalisés jusqu'à aujourd'hui pour l'accès à l'eau potable sont encourageants, le développement de l'assainissement affiche un retard important, notamment dans les zones rurales. Or, l'absence de services de l'eau concerne en majorité les populations les plus pauvres. Plus que les contraintes physiques, ce sont des contraintes économiques qui freinent la généralisation des services de l'eau. Deux courants de pensée s'affrontent : l'un considère l'eau comme un bien commun et son accès comme un droit universel. Le second estime que la distribution de l'eau et son traitement sont des services marchands, cette logique économique pouvant se traduire par des difficultés d'accès pour les populations les plus vulnérables.

**T**he Millennium Goals included halving the number of persons with no access to water by 2015 in comparison with the situation in 1990. Although the progress made to date in access to drinking water is encouraging, the development of sanitation is seriously lagging, especially in rural areas. The lack of water services mainly concerns the poorest people. Economic rather than physical constraints slow the generalisation of water services. There is a clash between two lines of thought. One considers water to be a common good and access to it as a universal right. The other views the distribution and treatment of water as commercial services and this economic logic can result in difficulties of access for the most vulnerable populations.

# Géopolitique de l'or bleu

## The geopolitics of 'blue gold'



© IRD/F. Molle

L'absence d'accord sur le statut juridique des eaux de l'Oronte, fleuve qui prend sa source au Liban puis traverse la Syrie et la Turquie, est symptomatique des tensions qui affectent cette région marquée par le manque d'eau. Ici l'Oronte près de Qaraoun au Liban.

The absence of an agreement concerning the legal status of the water of the Orontes, a river that rises in Lebanon and then crosses Syria and Turkey, is symptomatic of the tensions affecting this region marked by shortage of water. Here, the Orontes near Qaraoun in Lebanon.

L'eau suscite depuis toujours des rivalités et des tensions entre groupes sociaux, entre régions ou entre États : les luttes des communautés indiennes face aux haciendas sont encore vives en Amérique latine. Les revendications des agriculteurs face aux villes se multiplient dans de nombreuses régions, de l'Andalousie au bassin du Colorado. Les questions de partage des eaux du Jourdain, du Syr Daria ou de l'Indus attisent les conflits latents ou déclarés entre pays riverains, amont et aval. Aujourd'hui, face à la l'augmentation de la demande pour une ressource dont l'offre restera limitée, d'aucuns prédisent un **xxi<sup>e</sup>** siècle marqué par des « guerres de l'eau ». D'autres pensent au contraire que l'obligation de partage de la ressource peut être un facteur de paix, voire même de collaboration et de solidarité entre États.

**W**ater has always generated rivalry and tension between social groups, regions and states. The struggles between Indian communities and the haciendas are still keen in Latin America. Farmers' claims with regard to cities are increasing in many regions, from Andalusia to the Colorado basin. The question of the sharing of the water of the Jordan, the Syr Darya and the Indus fan latent or open conflicts between neighbouring countries—upstream and downstream. Today, with increased demand for a resource whose supply will remain limited, some forecast that the twenty-first century will be marked by 'water wars'. In contrast, others consider that the obligation to share water resources can be a factor for peace or even collaboration and solidarity between countries.



© IRD/B. Pouyaud  
« Patagonie sans barrages ».  
Au titre de la conservation du patrimoine naturel, une partie de la population s'oppose à la construction d'une chaîne de barrages sur les fleuves Baker et Pascua. Chili.

'Patagonia without dams'.  
For reasons of natural heritage conservation, part of the population is against the building of a series of dams on the Baker and Pascua rivers. Chile.

## UNE RESSOURCE EN PARTAGE

### A SHARED RESOURCE

**P**lus de 260 fleuves et rivières majeurs sont transfrontaliers. Au xx<sup>e</sup> siècle, le thème de la gestion transnationale des cours d'eau à des fins autres que la navigation a fait son entrée dans le droit international. Conventions, accords, déclarations tentent de fixer les droits et devoirs des pays riverains pour un partage équitable et une gestion raisonnée des ressources communes. Toutefois, ces textes n'ont encore que rarement valeur de loi. Les négociations sont d'autant plus complexes que les enjeux de développement et de pouvoir sont importants et qu'elles engagent les politiques des États sur des échéances à long terme, souvent à contre-courant des stratégies nationales instaurées depuis des siècles. La communauté scientifique alimente activement ces dynamiques en fournissant bilans, analyses et expertises objectives permettant d'éclairer les choix des décideurs.

**M**ore than 260 major rivers cross frontiers. In the twentieth century, the transnational management of watercourses for purposes other than navigation entered international law. Conventions, agreements and declarations attempt to fix the rights and obligations of neighbouring countries for the fair sharing and reasoned management of joint resources. However, these texts rarely have force of law. Negotiations are all the more complex as the development and power issues are important and engage state policies in the long term and often in the opposite direction to that of national strategies that have been used for centuries. The scientific community is feeding these dynamics actively by supplying balances, analyses and objective expert opinions to clarify the choices made by decision makers.



© IRD/T. Changeux

Les chutes d'Iguaçu, à la frontière du Brésil et de l'Argentine, sont inscrites au patrimoine mondial de l'humanité depuis 1984.

The Iguazu Falls at the border of Brazil and Argentina have been on the World Heritage List since 1984.

## Vers une gestion transfrontalière

Les ressources en eau, superficielles ou souterraines, sont réparties sur la planète de façon contrastée selon les conditions géographiques. Elles sont également très variables dans le temps, en fonction des saisons, des années et des épisodes hydrométéorologiques – sécheresses, inondations... – qui, du fait du changement climatique, deviennent de plus en plus graves et fréquents.

Or, près de 300 bassins hydrographiques, et beaucoup plus encore d'aquifères, sont partagés entre plusieurs pays qui se trouvent ainsi en situation d'interdépendance, mais aussi de solidarité en ce qui concerne la gestion quantitative et qualitative de cette ressource vitale et capricieuse.

Les risques de tension liés à ces inégalités d'accès à l'eau, risques accentués par le changement climatique, ont amené la communauté internationale à s'intéresser de plus en plus à cette problématique pour développer les connaissances, les outils et les méthodes en vue de promouvoir la concertation et la coopération, d'abord dans les bassins hydrographiques transfrontaliers et, plus récemment, pour les eaux souterraines partagées.

Un guide méthodologique intitulé « Vers une gestion concertée des systèmes aquifères transfrontaliers » a ainsi été récemment établi par un groupement piloté par l'Académie de l'eau, comprenant l'Unesco, le BRGM et l'Office international de l'eau, avec le soutien de l'Agence française de développement.

## Towards trans-border management

Water resources, whether surface or underground, are distributed over the world in a contrasted manner according to geographic conditions. They also vary considerably in time according to seasons, years and hydrometeorological events—droughts, floods, etc.—that are becoming increasingly serious and frequent as a result of climate change.

Nearly 300 hydrographic basins and many more aquifers are shared by several countries. They are thus in a situation of interdependence and also of solidarity with regard to the quantitative and qualitative management of this vital, capricious resource.

The risks of tension related to inequality in access to water are accentuated by climate change and have led the international community to focusing more and more on the problem in order to develop knowledge, tools and methods to encourage dialogue and cooperation, first of all with regard to trans-border hydrographic basins and more recently for shared groundwater.

A methodological guide entitled 'Vers une gestion concertée des systèmes aquifères transfrontaliers' has recently been drawn up by a group steered by the Académie de l'Eau and including Unesco, BRGM and the International Office for Water, with support from Agence française de développement (AFD).

## L'EAU DANS LE MARCHÉ MONDIAL WATER IN THE WORLD MARKET

**S**i l'eau est un bien difficilement exportable, les productions agricoles et industrielles composent au contraire le socle du commerce mondial. Les analystes utilisent désormais le concept d'eau virtuelle pour mesurer les échanges commerciaux en termes de quantité d'eau consommée pour produire les biens. Certaines régions du monde exportent massivement des produits agricoles vers des régions en situation de déficit hydrique comme le Moyen-Orient et l'Afrique. Ces transferts d'eau virtuelle assurent à priori un certain rééquilibrage de la répartition des produits de l'eau à l'échelle mondiale, mais placent les pays importateurs en situation de dépendance alimentaire. Les produits agricoles étant soumis aux spéculations des marchés financiers mondiaux, on peut assister, comme en 2007-2008, à une flambée des prix qui affecte directement les populations les plus pauvres.

**A**lthough water is a good that is very difficult to export, in contrast agricultural and industrial goods form the foundation of world trade. Analysts now use the virtual water concept to measure trade flows in terms of the quantities of water used to produce goods. Some regions in the world make massive exports of agricultural products to regions with water shortages such as the Middle East and Africa. A priori, these transfers of virtual water ensure a degree of rebalancing of water products at a global scale but put importing countries in a position of food dependence. As agricultural products are subject to speculation on world financial markets, prices can rocket as in 2007-2008 and this affects the poorest populations.

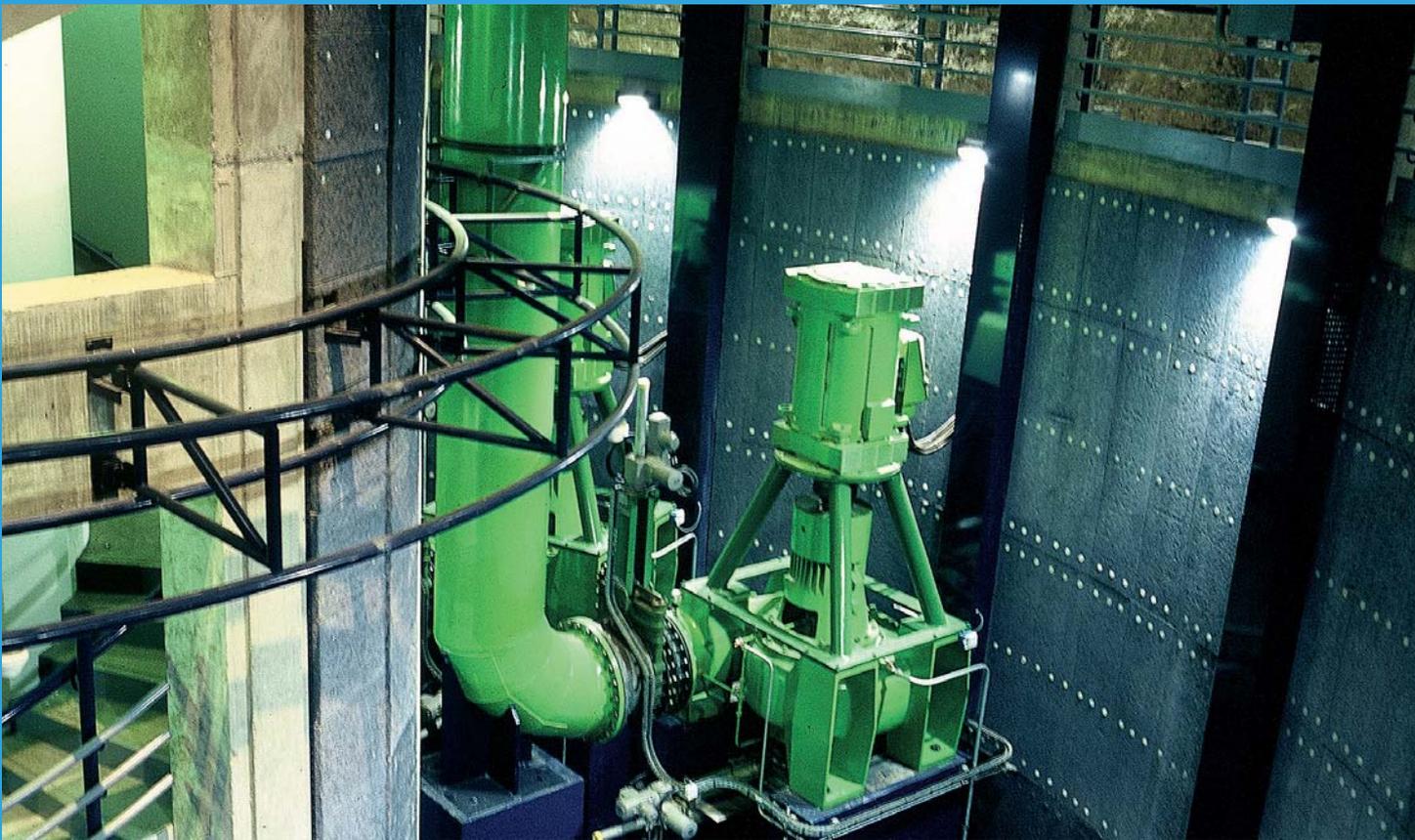


© IRD/S. Velut  
Valparaíso, le port le plus important du Chili, possède un marché ouvert sur le monde entier. Les exportations sont principalement constituées de produits alimentaires.

Valparaíso, the largest port in Chile, has a market open to the whole world. Exports consist mainly of food products.

L'immense demande de services de distribution et d'assainissement de l'eau constitue un marché mondial stratégique pour des entreprises devenues multinationales, mais les États doivent-ils céder leur souveraineté sur un secteur aussi vital ?

The immense demand for water distribution and sanitation services is a strategic world market for companies that have become multinationals, but should states give up their sovereignty in such a vital sector?



© BRGM/F. Michel  
Pompe de la station d'épuration  
de Valenton, Essonne.

Pump at the Valenton treatment station,  
Essonne department.

# Penser l'avenir : la gestion intégrée des ressources en eau

## Thinking of the future: integrated management of water resources

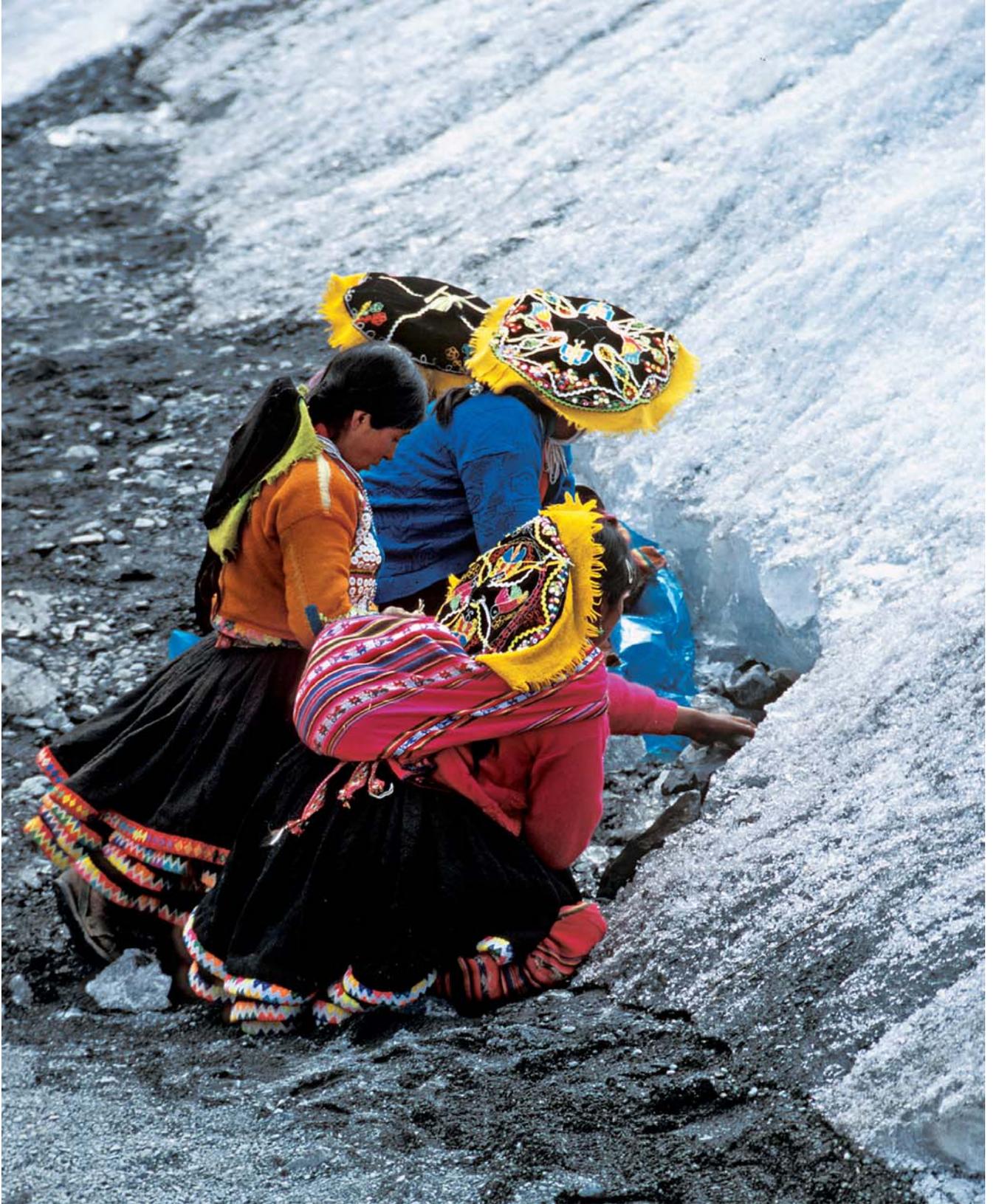


© IRD/J.-C. Pintaud  
La Montagne des Sources, parc provincial  
de la Rivière Bleue. Nouvelle-Calédonie.

The Montagne des Sources,  
Rivière Bleue Provincial Park.  
New Caledonia.

La gestion intégrée des ressources en eau désigne un ensemble d'actions raisonnées visant à optimiser l'usage des ressources hydriques tout en préservant le fonctionnement des écosystèmes. D'abord empiriques, les principes de la gestion intégrée ont été conceptualisés à partir de 1992 en préparation du sommet de Rio de Janeiro. La recherche s'appuie sur des études largement pluridisciplinaires pour appréhender la complexité du fonctionnement des milieux, évaluer les impacts des perturbations d'origine anthropique ou climatique et proposer des modes de gestion plus durables. Les approches utilisées doivent croiser les dimensions socio-culturelles, économiques et politiques avec les facteurs hydrologiques, écologiques et climatiques. Elles ont vocation à tirer les leçons du passé et permettre d'anticiper les évolutions futures, démographiques et climatiques, en proposant des orientations durables.

Integrated management of water resources is a set of reasoned actions aimed at optimising use while conserving the functioning of ecosystems. Empirical at first, the principles of integrated management were conceptualised in 1992 prior to the Earth Summit in Rio de Janeiro. Research is based on multidisciplinary studies to address the complexity of environments, to assess the impacts of disturbances caused by man or climate and to propose more sustainable modes of management. The approaches used must combine socio-cultural, economic and political aspects with hydrological, ecological and climatic factors. They are aimed at learning from the past and anticipating future population and climatic trends by proposing sustainable approaches.



© IRD/B. Francou  
La gestion intégrée doit prendre en compte les aspects culturels et sociaux. Le pèlerinage du Qoyllur Rit'ï rassemble chaque année plusieurs dizaines de milliers d'Indiens dans un culte voué aux divinités des glaces. Pérou.

Integrated management must take cultural and social aspects into account. The Qoyllur Rit'ï pilgrimage is made by several tens of thousands of Indians each year to honour mountain spirits. Peru.

## La gestion intégrée de l'eau : la quête d'un nouveau Graal?

La « **Gestion intégrée des ressources en eau** » (Gire ou IWRM en anglais) est définie comme « un processus qui promeut la gestion et le développement coordonnés de l'eau, du territoire et des ressources associées, de manière à optimiser le bien-être économique et social d'une façon équitable et sans compromettre la durabilité des écosystèmes vitaux » (Technical Advisory Committee 2000). Il s'agit d'un processus complexe qui requiert la prise en compte de multiples relations de dépendances et rétro-actions entre les activités humaines, le cycle hydrologique et le fonctionnement biologique des écosystèmes aquatiques. Il faut aussi intégrer la grande variabilité spatiale et temporelle de ces phénomènes. Cette démarche intégrée vient en opposition à la superposition de politiques sectorielles, définies selon des rationalités différentes et pour une diversité de territoires politico-administratifs.

**Une première simplification consiste à considérer le bassin versant** comme un espace sur lequel : i) définir l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques ; ii) identifier les activités humaines qui dépendent de cet état ou le modifient ; iii) caractériser les déterminants techniques, sociaux et économiques qui motivent ces dynamiques socio-économiques ; iv) évaluer les évolutions de ce système complexe sous différents scénarios de gestion ou d'aléas ; v) déterminer des plans d'action sur la ressource en eau à cette échelle. La Gire ajoute très souvent également une dimension d'intégration « participative » : impliquer le public pour un diagnostic partagé, pour des plans d'actions jugés équitables et une plus grande effectivité de la mise en œuvre des mesures collectivement adoptées.

**Cette gestion intégrée s'apparente dans bien des cas à la** quête du Graal. Dans les instances de gestion concertée de l'eau, la quête des compromis est souvent difficile entre usagers en compétition sur l'eau et l'espace, du fait d'asymétries de pouvoir, de remise en cause d'usages ou de droits considérés comme acquis, d'incompréhensions entre les visions du monde sous-jacentes aux projets de territoire qui s'opposent. En outre, la Gire doit également prendre en compte le maintien des organisations sectorielles qui génèrent des incohérences entre politiques de l'environnement, de l'agriculture, d'urbanisme et limitent la portée des décisions impactant les milieux aquatiques. Les marges de manœuvre en termes de régulation locale peuvent ainsi être très réduites car dépendant, à travers la mise en œuvre de ces politiques sectorielles, de déterminants qui ne peuvent se réguler au niveau du bas-

sin versant : pression démographique, prix agricoles, normes, etc. Enfin, il demeure de nombreuses lacunes d'informations pour des choix collectifs éclairés sur les différents enjeux, soit parce que les dispositifs de mesures sont incomplets, soit parce que les données ne sont pas partagées, car jugées trop stratégiques par certains acteurs présents à la fois dans les dispositifs de politique sectorielle et de gestion intégrée.

### **Integrated water resources management: The quest for a new Holy Grail?**

Integrated water resources management (IWRM) is defined as '... a process which promotes the coordinated development and management of water, land and related resources in order to maximise the resultant economic and social welfare, paving the way towards sustainable development, in an equitable manner without compromising the sustainability of vital ecosystems.' (Global Water Partnership, 2000). It allows for many relations of dependence and retroaction between human activities, the water cycle and the biology of aquatic ecosystems, together with their great spatial and temporal variability. This integrated approach contrasts with the superposition of sectoral policies defined using different rationalities and for a variety of politico-administrative territories. The first simplification consists of considering a drainage basin as an area in which (i) the state of the water and aquatic ecosystems is defined, (ii) human activities that depend on or modify this state are identified, (iii) technical, social and economic determinants involved are characterised, (iv) evolutions of this complex system are evaluated for various management scenarios or risks, and (v) action plans for the water resource are determined at this scale. IWRM very often includes 'participative' integration with the public involved for joint diagnosis, fair action plans and greater effectiveness in the implementation of jointly chosen measures. In many cases integrated management is something of a Holy Grail. In concerted management bodies, the quest for a compromise is often difficult between users competing for water and space because of asymmetric power, the calling into question of uses or rights thought to be firmly held and incomprehension between visions of the world underlying opposing territorial projects. IWRM must also allow for the maintaining of sectoral organisation features that cause incoherence between environmental, farming and town planning policies and that reduce the scope of decisions affecting aquatic environments. There is sometimes very little room for local regulation as, with the implementation of sectoral policies, this depends on determinants that cannot be regulated at basin level: population pressure, farm prices, standards, etc. Finally, enlightened decision making encounters many information gaps, either because measurement facilities are inadequate or because data are not shared as certain stakeholders in both sectoral policy facilities and integrated management find them too strategic.

## Un programme au service de la gestion des territoires méditerranéens : Sicmed

Les régions du pourtour méditerranéen connaissent actuellement des modifications socio-environnementales importantes liées notamment à une démographie croissante, des pressions climatiques fortes et de très nombreux aménagements de toutes sortes. Les anthropo-écosystèmes (AES) méditerranéens sont exploités depuis des milliers d'années mais la situation actuelle est d'autant plus préoccupante que les ressources ne suffisent plus aux besoins des populations. Ainsi, dans les pays du sud et de l'est méditerranéen, les ressources en eau sont à présent insuffisantes pour la consommation humaine et pour les activités agricoles et touristiques. Ceci induit des tensions fortes sur les cycles hydrologiques et biogéochimiques et provoque ou accentue la dégradation des AES méditerranéens. Les situations critiques de plus en plus fréquentes liées aux ressources naturelles entraînent des conflits d'usages.

Dans ce contexte, pour permettre une connaissance approfondie des facteurs de dégradation, de résilience et de réhabilitation des AES méditerranéens sous l'influence des changements globaux, le programme Sicmed (Surfaces et interfaces continentales en Méditerranée) développe des activités de recherche, de formation et de transfert dédiées à la compréhension des principaux écosystèmes de la région méditerranéenne avec une triple mission :

- 1) prévoir l'évolution des processus bio-hydro-géochimiques sous les contraintes anthropiques et climatiques actuelles et à venir en menant des recherches interdisciplinaires sur des zones pilotes ;
- 2) concevoir des solutions techniques pour la mise en œuvre d'une gestion raisonnée des systèmes étudiés ;
- 3) transmettre les connaissances acquises aux décideurs et aux gestionnaires privés et publics des pays concernés.

Le programme Sicmed est l'une des composantes du chantier Mistrals (Mediterranean Integrated Studies at Local and Regional Scales). Il est construit avec de multiples partenaires scientifiques, des pays méditerranéens et aussi d'autres pays impliqués dans la recherche en Méditerranée. Il est financé par l'Irstea, le CNRS/Insu, l'Inra et l'IRD.

### SICMED: a programme at the service of the management of mediterranean territories

The regions around the Mediterranean are currently undergoing important socio-environmental changes related in particular to population growth, strong climatic pressure and very many developments of all kinds. Mediterranean anthropo-ecosystems (AES) have been exploited for thousands of years but the present situation is all the more worrying as the resources no longer cover the requirements of populations. Thus water resources in the countries south and east of the Mediterranean are now insufficient for human consumption and for activities in agriculture and tourism. This causes strong demand on the hydrological and biogeochemical cycles or accentuates the degradation of Mediterranean AES. Increasingly frequent critical situations involving natural resources lead to conflicts of use.

In this context, the SICMED (Surfaces et interfaces continentales en Méditerranée) programme conducts research, training and transfer devoted to understanding the main ecosystems in the Mediterranean region to gain in-depth knowledge of the factors in the degradation, resilience and rehabilitation of Mediterranean AES under the influence of global change. Its mission is threefold:

- 1) forecasting the evolution of bio-hydro-geochemical processes under present and future anthropogenic and climatic constraints by running multidisciplinary research in pilot zones,
- 2) designing technical solutions for the implementation of the rational management of the systems studied,
- 3) delivering the knowledge gained to decision makers and private and public managers in the countries concerned.

SICMED is one of the components of the Mistrals (Mediterranean Integrated Studies at Local and Regional Scales) programme. It has been built up with numerous scientific partners in Mediterranean countries and also other countries involved in research in the Mediterranean region. It is funded by IRSTEA, CNRS/INSU, INRA and IRD.

© IRD/A. Laraque  
Campagne hydrologique  
sur le fleuve Amazone. Brésil.

Hydrological observations  
on the Amazon. Brazil.



# Du nilomètre au satellite

## 60 ans de recherches hydrologiques à l'IRD

From nilometer to satellite  
60 years of hydrological research at IRD

L'hydrologie, et les sciences de l'eau en général, constituent l'un des domaines majeurs de recherche de l'IRD depuis sa fondation, lorsqu'il s'appelait encore Orstom, voici plus de 60 ans. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, le développement des territoires qui constituaient alors l'empire colonial français devait s'accompagner d'une meilleure connaissance de leurs potentiels et en premier lieu de leurs ressources en eau, indispensables au développement de l'agriculture, qu'elle soit de rente ou nourricière. Par ailleurs, la construction des routes et des ponts nécessaires aux transports terrestres, l'érection de barrages hydro-électriques, la fourniture d'eau pour les villes et villages, etc. exigeaient la disponibilité de données hydrologiques fiables. Les hydrologues de l'IRD furent donc d'abord des ingénieurs chargés de déployer des réseaux d'observation hydrologique sur l'ensemble des bassins versants des grands fleuves africains, puis d'exploiter les données acquises en développant des méthodes originales d'estimation des débits de projets d'aménagement hydraulique, modules interannuels et crues de fréquences rares.

Les bases essentielles de la connaissance des grands bassins versants ayant été progressivement acquises, les décennies 1960 et 1970 virent les études hydrologiques se porter vers l'étude de bassins versants plus petits, avec toujours les mêmes objectifs d'aménagement des territoires.

Après les indépendances africaines, la propriété et la gestion des réseaux hydrologiques furent progressivement transmises aux nouveaux États qui se dotaient de services hydrologiques autonomes. La recherche hydrologique se

**H**ydrology and water sciences in general have been a major field of research at IRD since it was founded as ORSTOM more than 60 years ago. After World War 2, the development of the territories that then formed the French colonial empire required better knowledge of their potential and first and foremost of the water resources essential for farming, whether this consisted of food crops or cash crops. In addition, the construction of the roads and bridges required for land transport, the building of hydroelectric dams, water supply for towns and villages, etc. required reliable hydrological data. IRD hydrologists were therefore first of all engineers with the task of deploying hydrological observation networks in all the drainage basins of the major African rivers and then that of using the data gathered by developing original methods of estimating project discharges, interannual modules and floods with long return frequencies.

The essential bases of knowledge of the major drainage basins were assembled gradually and in the 1960s and 1970s the focus of hydrological studies switched to the study of smaller catchments, with the same development objectives. After the independence of African countries, the ownership and management of the hydrological networks were handed over gradually to the new states, which established independent

développa alors considérablement, renforcée par un important recrutement de jeunes chercheurs français formés dans les grandes écoles et à l'université. Simultanément, l'Institut accueillait parmi ses « élèves » de nombreux jeunes étudiants africains, puis latino-américains, qui allaient progressivement constituer les communautés scientifiques hydrologiques dans leurs pays. Le réseau de ces anciens élèves recouvre encore aujourd'hui une réalité certaine. Dans les années 1980, un réaménagement de l'Institut a favorisé, au sein d'un département spécialisé unique, la coordination de recherches hydrologiques au Sud de plus en plus diverses, incluant aussi des biologistes. Récemment enfin, à partir de 2001, les unités issues de ce département se sont ouvertes à la mixité institutionnelle en s'associant avec des universités et des établissements d'enseignement supérieur, principalement à Montpellier, Grenoble et Toulouse, ainsi qu'avec des instituts de recherche nationaux comme le Cirad, le CNRS, l'Inra et l'Irstea. Si la coordination des recherches hydrologiques menées par des chercheurs français en Afrique, et plus généralement au Sud, en a été rendue plus complexe, l'accès à de nouvelles compétences, l'émulation partenariale et le renforcement des liens avec les établissements académiques ont offert de nouvelles opportunités et voies de recherche, tout en accroissant le volume, la qualité et la reconnaissance internationale de ses résultats.

hydrological services. Research in hydrology then developed considerably and was strengthened by substantial recruiting of young French researchers trained at grandes écoles and universities. Simultaneously, the 'trainees' hosted by the Institute included numerous young African and then Latin American students who gradually formed scientific communities in hydrology in their countries. The network of these former students is still active.

In the 1980s, the reorganisation of the Institute enhanced the coordination of increasingly varied research in hydrology in the South in a single specialised department that also included biologists. Finally, from 2001 onwards units of this department opened up to cross-institutional endeavours by forming associations with universities and higher education establishments, mainly in Montpellier, Grenoble and Toulouse and with national research institutes such as CIRAD, CNRS, INRA and IRSTEA. Although the coordination of the hydrological research conducted by French researchers in Africa and in the South in general has become more complex, access to new competences, emulation in joint work and the strengthening of links with academic establishments have provided new research opportunities and pathways while increasing the volume, quality and international recognition of results.

This scientific community has always adapted rapidly to the technological progress that has marked the last half century—in the field of data processing of course but also in satellite teletransmission and remote

## Le suivi des grands bassins fluviaux par altimétrie radar

**En Afrique, face au défi de la croissance démographique et du réchauffement climatique, avec par ailleurs des risques de conflits liés à la présence de nombreux bassins transfrontaliers, la gestion des ressources en eau est devenu un enjeu majeur de développement.** Pour assurer le suivi des grands bassins fluviaux, les équipes de l'IRD (Espace-DEV, GET, Legos), en collaboration avec des équipes internationales, ont mené différents programmes de recherche pour adapter les données fournies par les radars altimètres embarqués à bord des missions satellite, initialement utilisées pour l'étude des glaces et du plein océan, pour mesurer le niveau des fleuves. En fonction du temps de propagation de l'onde émise par le satellite et après traitement des données, on peut en effet obtenir une mesure de l'élévation de la surface par rapport au niveau de la mer. Chaque croisement d'une surface en eau avec la trace au sol du satellite constitue ainsi une « station virtuelle » permettant de mesurer la variation dans le temps du niveau d'eau, comme le feraient des milliers de stations au sol. La méthode assure une couverture inégale avec une nette amélioration des capacités de surveillance du niveau des fleuves. Ces mesures ont été testées, validées et calibrées grâce à de nombreuses campagnes de terrain menées en Amazonie en partenariat avec l'Agence nationale de l'eau brésilienne et le Service géologique du Brésil.

**Le programme Amesd (African Monitoring of the Environment for Sustainable Development)** a permis de transférer ces méthodes développées par l'IRD et ses partenaires à la Commission internationale du bassin Congo-Oubangui-Sangha dans le cadre de deux services: le premier est une aide à la prévision de la navigation sur le fleuve Congo Oubangui, pour faciliter le trafic commercial entre Kinshasa/Brazzaville et Bangui. Le second vise à surveiller le site unique et fragile de la cuvette centrale du Congo, vaste système inondé riche en biodiversité, peu connu mais cependant soumis aux pressions de la déforestation.

**Dans le cadre du programme SEAS Gabon, et pour assurer le suivi des ressources en eau confié par le gouvernement gabonais au Plan Climat du Gabon et à l'Agence gabonaise d'études et d'observations spatiales, un programme de for-**

mation de techniciens et d'ingénieurs va permettre de suivre les niveaux d'eau par altimétrie et de caractériser différents paramètres dérivés par modélisation comme les pentes, les débits des rivières, les stocks d'eau de surface et souterraine.

### Monitoring major river basins using radar altimetry

The management of water resources in Africa has become a major development issue in the face of population increase and climate warming, together with risks of conflict as there are numerous trans-border basins. In order to monitor large river basins, IRD teams (Espace-DEV, GET, Legos), working with international teams, have conducted various research programmes to use the data provided by radar altimeters mounted on satellite missions and initially used for the study of ice and the open sea to measure river levels. The propagation time of the wave emitted from the satellite and processing of the data enable measurement of the elevation of the surface of the water in relation to sea level. Every intersection of a water surface and the vertical position of the satellite is thus a 'virtual station' for the measurement of the variation of water level in time, as would be done at thousands of land-based stations. The method provides unequalled coverage and a marked improvement of the capacity for the surveillance of rivers. These measurements have been tested, validated and calibrated during numerous field missions carried out in the Amazon in partnership with the Brazilian water agency (ANA) and the Brazilian geological service (SGB).

The AMESD programme (African Monitoring of the Environment for Sustainable Development) made it possible to transfer these methods developed by IRD and its partners to the International Commission for the Congo-Oubangui-Sangha Basin for two services. The first is forecasting aid on the Congo Oubangui to facilitate river traffic between Kinshasa/Brazzaville and Bangui. The second is the surveillance of the unique, fragile central Congo basin, a vast flooded system with rich biodiversity that is little known but nevertheless exposed to pressure from deforestation. As part of the SEAS Gabon programme and to handle the monitoring of water resources entrusted by the government of Gabon to the Climate Plan for Gabon and the 'Agence gabonaise d'études et d'observations spatiales' (AGEOS), a training programme for engineers and technicians will make it possible to monitor water levels using altimetry and characterise the different parameters drawn from modelling, such as slopes, river discharges and stocks of surface and groundwater.

## Megha-Tropiques : un nouveau venu pour estimer les précipitations depuis l'espace

Le 12 octobre 2011 a vu le lancement réussi d'un nouveau satellite: Megha-Tropiques (MT). Fruit d'une collaboration entre la France (Cnes) et l'Inde (Isro), MT a été lancé depuis la base spatiale de Sriharikota, pour rejoindre une orbite spécialement conçue pour l'observation de l'eau atmosphérique dans la ceinture intertropicale. Inclivée sur l'équateur à 20°, la mission MT offre un échantillonnage sans égal (jusqu'à 6 fois par jour) des tropiques. Les objectifs scientifiques de la mission s'articulent autour de trois grands axes: la mesure du bilan d'eau (Megha signifie « nuage » en sanscrit) et d'énergie de la région tropicale, l'étude du cycle de vie des orages tropicaux et enfin la prévision météorologique des cyclones et autres événements hydrométéorologiques intenses. Megha-Tropiques contribuera à améliorer l'estimation des précipitations, avec des applications attendues en hydrologie tropicale et pour le suivi du cycle de l'eau continentale et des ressources dans des zones sensibles.

L'observation spatiale est essentielle pour des zones souffrant actuellement d'un déficit chronique d'observation pluviométrique: le bassin amazonien et le Sahel sont deux exemples contrastés de zones très vulnérables à la variabilité pluviométrique et mal couvertes par les réseaux pluviométriques opérationnels. La pluie est une entrée principale des modèles représentant le fonctionnement des surfaces continentales, les écosystèmes, l'hydrologie; modèles que des observations spatiales des différents compartiments du cycle de l'eau contribuent à améliorer. Les observations MT nous aideront par ailleurs à mieux comprendre et appréhender les risques liés à la variabilité pluviométrique, que le lien avec la pluie soit immédiat comme pour les inondations, ou indirect comme pour la propagation des maladies à vecteurs.

L'Institut de recherche pour le développement et plusieurs de ses partenaires du Sud sont impliqués dans la mission. L'IRD joue un rôle central dans le plan de validation international de Megha-Tropiques, à travers plusieurs de ses UMR (GET, LTHE et Locean). Ces activités s'appuient sur le réseau de partenaires, les infrastructures et plusieurs programmes de l'IRD en zone tropicale: ORE Amma-Catch en Afrique de l'Ouest, Hybam en Amérique du Sud, la cellule franco-indienne Cefirse à Bangalore. Un super site de validation équipé du radar hydrométéorologique polarimétrique Xport est mis en place au Burkina Faso en partenariat avec la Direction de la météorologie, l'Asecna, l'université de Ouaga-

dougou et la fondation 2IE. Vingt-et-une équipes internationales (Amérique du Sud, du Nord, d'Afrique, d'Asie et d'Europe) ont déjà rejoint la communauté scientifique MT pour contribuer à l'étude du climat et de l'hydrométéorologie en zone tropicale.

<http://meghatropiques.ipsl.polytechnique.fr/>

### A newcomer for estimating precipitation from space

A new satellite, Megha-Tropiques (MT), was launched successfully on 12 October 2011. The fruit of collaboration between France (CNES) and India (ISRO), MT was launched from the Sriharikota base and placed in an orbit specially designed for observation of atmospheric moisture in the tropics. With an inclination of 20° to the equator, the MT mission provides unequalled sampling of the tropics (up to 6 times a day). The scientific goals of the mission concern three main axes: measurement of the water balance ('Megha' means 'cloud' in Sanskrit) and the energy balance in the tropics, study of the life cycles of tropical storms and finally the forecasting of cyclones and other intense hydro-meteorological events. Megha-Tropiques will help to improve precipitation forecasts, with applications expected in tropical hydrology, and for the monitoring of the continental water cycle and of resources in sensitive zones.

Observation from space is essential for zones currently suffering from a chronic lack of rainfall observations: the Amazon basin and the Sahel are contrasted examples of zones that are very vulnerable to rainfall variability and poorly covered by operational rainfall networks. Rainfall is a major input in models representing the functioning of continental surfaces, ecosystems and hydrology and spatial observations of the various compartments of the water cycle help to improve them. MT observations will also help us to better understand and address the risks related to rainfall variability, whether the link is immediate as for floods or indirect as for the spread of vector diseases.

Institut de recherche pour le développement and several of its partners in the South are involved in the mission. IRD is playing a central role in the international validation plan for Megha-Tropiques via several of its joint research units (GET, LTHE and LOCEAN). These activities are based on a network of partners, infrastructures and several IRD programmes in the tropics: ORE AMMA-CATCH in West Africa, HYBAM in South America and the Franco-Indian CEFIRSE unity at Bangalore. A validation super site equipped with Xport hydrometeorological polarimetric radar is installed in Burkina Faso in partnership with the Direction de la météorologie, ASECNA, Université de Ouagadougou and the 2IE Foundation. The MT scientific community has already been joined by 21 international teams (from South America, North America, Africa, Asia and Europe) to contribute to the study of climate and hydrometeorology in the tropics.

<http://meghatropiques.ipsl.polytechnique.fr/>

Cette communauté scientifique s'est toujours rapidement adaptée aux avancées technologiques qui marquèrent ce dernier demi-siècle, l'informatique bien sûr, mais aussi la télétransmission et la télédétection satellitaires qui ont radicalement transformé l'environnement scientifique et les capacités d'investigation.

Initialement engagés dans l'évaluation des conséquences de l'aménagement des territoires sur les bassins versants naturels, à toutes les échelles concernées, de la parcelle au grand bassin fluvial, les chercheurs de l'IRD ne furent ni surpris, ni désarçonnés, lorsque la prise en compte des changements environnementaux planétaires, et en premier lieu du changement climatique, fit irruption dans leur champ scientifique, modifiant à tout jamais la nature des relations entre l'homme et son environnement. Depuis, ce nouveau paradigme a été intégré dans toutes les recherches, qu'il s'agisse de documenter la puissance et la rapidité de ce changement global sous ses diverses acceptions, ses conséquences sur l'évolution des ressources en eau ou la pérennité de leur disponibilité pour les activités humaines. Les chercheurs de l'IRD abordent à présent ces nouveaux fronts scientifiques que constituent les changements environnementaux et les enjeux sociétaux émergents en entraînant avec eux chercheurs et universitaires du Nord et du Sud. Tels sont ainsi les nouveaux défis à relever pour cette communauté qui, riche de son histoire et de ses acquis, mais également capable de s'adapter et de se renouveler, reste plus que jamais mobilisée au service du développement.

**Bernard Pouyaud, Pierre Chevallier, Éric Servat**

sensing. These have transformed the scientific environment and investigation capacities. Initially involved in the evaluation of the consequences of development in natural catchment areas at all the scales involved from field to large river catchment, IRD researchers were neither surprised nor disconcerted when the taking into account of global environmental changes, and climate change first and foremost, burst into their scientific field and changed the relations between man and his environment for ever. Since then, this new paradigm has been incorporated in all research, whether for documenting the power and rapidity of this global change in its various meanings, its consequences for the future of water resources and their sustainability for human activities.

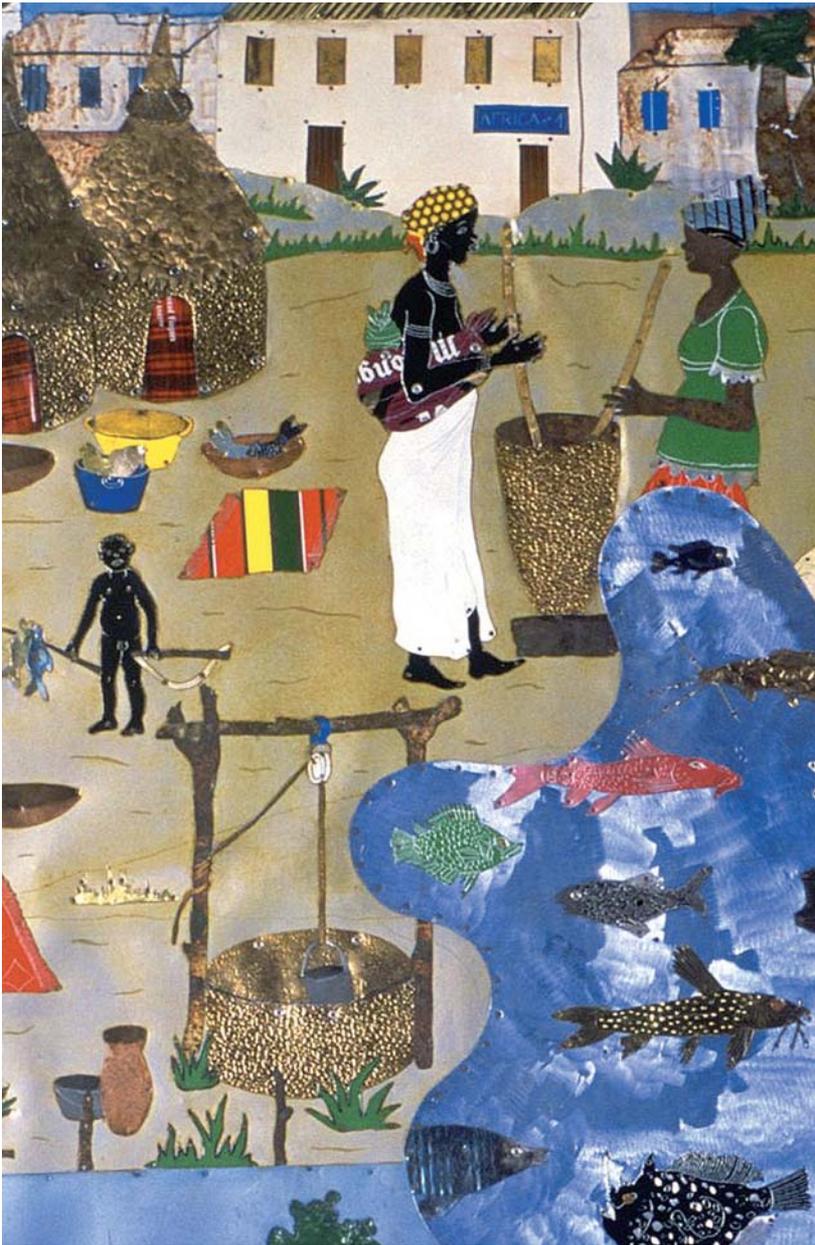
IRD researchers are now addressing these new scientific fronts that consist of environmental changes and emerging societal issues with scientists and academics in the North and the South. These are the new challenges to be met by this community that is rich in history and achievements but also capable of adapting and changing, and more than ever mobilised in the service of development.

# Les encadrés et leurs auteurs

## List of boxes and contributors

La surveillance des eaux souterraines Groundwater surveillance .....	31
<b>Christian Leduc</b> , hydrogéologue, IRD, UMR G-EAU (Gestion de l'eau, acteurs, usages, AgroParisTech-Engref/Irstea/Ciheim-IAMM/Cirad/IRD/SupAgro)	
Observatoire Hybam: mesurer le débit, les flux géochimiques et sédimentaires de l'Amazone HYBAM observatory: measuring Amazon discharge and geochemical and sediment flows .....	33
<b>Jean-Loup Guyot</b> , hydrologue, IRD, UMR GET (Géosciences Environnement Toulouse, CNRS/IRD/UPS/Cnap/Cnes), observatoire ORE-Hybam	
Comprendre la mousson africaine: un ambitieux objectif pour le programme Amma Understanding the African monsoon: the ambitious objective of the AMMA programme .....	42
<b>Thierry Lebel</b> , hydrométéorologue, IRD, UMR LTHE (Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, CNRS/IRD/Université Joseph-Fourier)	
Chronique du Petit Âge glaciaire dans les Andes tropicales Chronicle of the Little Ice Age .....	48
<b>Bernard Francou</b> , glaciologue, IRD, UMR LTHE (Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, CNRS/IRD/Université Joseph-Fourier)	
El Niño change: ni tout à fait le même ni tout à fait un autre Is El Niño changing? .....	51
<b>Thierry Delcroix</b> , océanographe, IRD, UMR Legos (Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales, Cnes/CNRS/IRD/UPS)	
Diversité ichtyologique et aquaculture Ichthyological diversity and aquaculture .....	66
<b>Marc Legendre</b> , ichtyologue, IRD, UMR ISE-M (Institut des sciences de l'évolution-Montpellier, UM2/CNRS/IRD), équipe Diversité ichtyologique et aquaculture (Diva)	
Petits barrages, grands enjeux Small dams, big issues .....	70
<b>Jean Albergel</b> , hydrologue, IRD, UMR Lisah (Laboratoire d'étude des interactions sol-agrosystème-hydrosystème, SupAgro/Inra/IRD) <b>Philippe Cecchi</b> , écologue, IRD, UMR G-EAU (Gestion de l'eau, acteurs, usages, AgroParisTech-Engref/Irstea/Ciheim-IAMM/Cirad/IRD/SupAgro), programme Petits barrages	
Aguandes, un partage concerté de l'eau entre ville et campagne AGUANDES, concerted sharing of water between town and country .....	76
<b>Patrick Le Goulven</b> , hydrologue, <b>Jean-Christophe Pouget</b> , hydrologue, <b>Roger Calvez</b> , hydrologue, <b>Odile Fossati</b> , écologue, IRD, UMR G-EAU (Gestion de l'eau, acteurs, usages, AgroParisTech-Engref/Irstea/Ciheim-IAMM/Cirad/IRD/SupAgro), projet Aguandes	
Great Ice: vingt ans d'observation du climat et de la ressource en eau à partir des glaciers des Andes tropicales GREAT ICE: 20 years of observing glaciers, climate and water resources in the tropical Andes .....	92
<b>Bernard Francou</b> , glaciologue, IRD, UMR LTHE (Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, CNRS/IRD/Université Joseph-Fourier)	
Vulnérabilité au climat des eaux du lac Tchad The vulnerability of the water of lake Chad to climate .....	96
<b>Florence Sylvestre</b> , paléoclimatologue, Cerege (Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement, Aix-Marseille Université/CNRS/IRD/Collège de France) <b>Jacques Lemoalle</b> , hydrobiologiste, IRD, UMR G-EAU (Gestion de l'eau, acteurs, usages, AgroParisTech-Engref/Irstea/ Ciheim-IAMM/Cirad/IRD/SupAgro), <b>Guillaume Favreau</b> , hydrogéologue, IRD, UMR HSM (Hydrosciences Montpellier, CNRS/IRD/UM1/UM2)	

Aral, une mer asséchée Aral, a dry sea .....	100
<b>Pierre Chevallier</b> , hydrologue, IRD, UMR HSM (Hydrosiences Montpellier, CNRS/IRD/UM1/UM2)	
Eau et zones arides : des enjeux lourds et multiples Water and arid zones: serious, multiple issues .....	104
<b>Eric Servat</b> , hydrologue, IRD, UMR HSM (Hydrosiences Montpellier, CNRS/IRD/UM1/UM2)	
Perturbations des régimes des fleuves : l'impact des changements climatiques et anthropiques en Afrique de l'Ouest Disturbed river regimes: the impact of climate and anthropogenic changes in West Africa .....	106
<b>Luc Descroix</b> , hydrologue, IRD, UMR LTHE (Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, CNRS/IRD/Université Joseph-Fourier/G-INP) <b>Pierre Genthon</b> , hydrogéologue, IRD, UMR HSM (Hydrosiences Montpellier, CNRS/IRD/UM1/UM2)	
Contaminants émergents en milieu aquatique Emerging contaminants in aquatic environments .....	112
<b>Hélène Fenet</b> , chimiste de l'environnement, <b>Claude Casellas</b> , chimiste de l'environnement, <b>Aurélien Escande</b> , biologiste, <b>Elena Gomez</b> , chimiste de l'environnement, <b>Serge Chiron</b> , chimiste de l'environnement, UM1/IRD, UMR HSM (Hydrosiences Montpellier, CNRS/IRD/UM1/UM2)	
Pollution par les drainages de mine: vers un traitement biologique? Pollution by mine drainage: towards biological treatment? ...	113
<b>Corinne Casiot</b> , biogéochimiste, <b>Marina Héry</b> , microbiologiste, <b>Odile Bruneel</b> , microbiologiste, CNRS/UM2/IRD, UMR HSM (Hydrosiences Montpellier, CNRS/IRD/UM1/UM2)	
Ruissellement urbain et risques d'inondations en zone intertropicale Urban runoff and flood risks in the tropics .....	116
<b>Christophe Bouvier</b> , hydrologue, IRD, UMR HSM (Hydrosiences Montpellier, CNRS/IRD/UM1/UM2)	
La lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'ouest : le programme OMS-OCP Control of onchocercosis in West Africa: the WHO-OCP programme .....	120
<b>Bernard Pouyaud</b> , hydrologue, IRD, UMR HSM (Hydrosiences Montpellier, CNRS/IRD/UM1/UM2)	
Grandes villes du Sud : vulnérabilité sanitaire et nouvelle ingénierie urbaine du cycle de l'eau Cities in the South: sanitary vulnerability and new water cycle urban engineering .....	127
<b>Stéphanie Guitton</b> , géographe, UMR Prodig (Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique, CNRS/UP1/UP4/UP7/Ephe/IRD) <b>Dominique Couret</b> , géographe, IRD, UMR Devsoc (Développement et sociétés, UP1/IRD)	
Vers une gestion transfrontalière Towards trans-border management .....	145
<b>Jean-Louis Oliver</b> , Secrétaire général de l'Académie de l'eau	
La gestion intégrée de l'eau: la quête d'un nouveau Graal? Integrated water management: The quest for a new Holy Grail? ....	150
<b>Patrice Garin</b> , agronome, <b>Olivier Barreteau</b> , modélisateur, Irstea, UMR G-EAU (Gestion de l'eau, acteurs, usages, AgroParisTech-Engref/Irstea/Ciheam-IAMM/Cirad/IRD/SupAgro)	
Un programme au service de la gestion des territoires méditerranéens: Sicmed SICMED: a programme at the service of the management of mediterranean territories .....	151
<b>Christian Leduc</b> , hydrogéologue, IRD, UMR G-EAU (Gestion de l'eau, acteurs, usages, AgroParisTech-Engref/Irstea/Ciheam-IAMM/Cirad/IRD/SupAgro)	
Le suivi des grands bassins fluviaux par altimétrie radar Monitoring major river basins using radar altimetry .....	155
<b>Frédérique Seyler</b> , hydrogéologue, IRD, UMR Espace-DEV (L'espace au service du développement, IRD/UM2/UAG/UR)	
Un nouveau venu pour estimer les précipitations depuis l'espace A newcomer for estimating precipitation from space ...	156
<b>Marielle Gosset</b> , hydrométéorologue, IRD, UMR GET (Géosciences Environnement Toulouse, CNRS/IRD/UPS/Cnap/Cnes)	

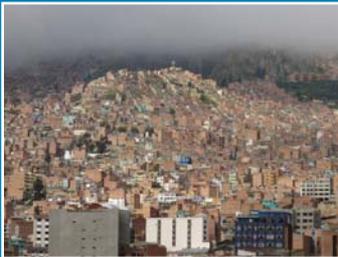


© IRD/P. Galabert

Photogravure :  
Atelier 6 (Montpellier, France)

Achévé d'imprimer sur les presses  
de l'imprimerie IME (Baume-les-Dames, France)

Dépôt légal :  
mars 2012



Dans le contexte actuel de changement climatique, de surexploitation des ressources et d'impacts anthropiques sur l'environnement, la question de l'eau s'impose comme l'un des défis majeurs du XXI<sup>e</sup> siècle. L'accès à l'eau potable pour le plus grand nombre est ainsi inscrit parmi les Objectifs du millénaire pour le développement.

La répartition et la disponibilité de l'eau, ses usages, qu'ils soient domestiques, agricoles, industriels ou énergétiques, ainsi que la qualité de l'eau sont également au cœur de la recherche scientifique, comme en témoigne cet ouvrage. Le lecteur y trouvera des textes accessibles à tous, accompagnés d'une abondante iconographie. Les principaux programmes de recherche menés sur le thème de l'eau par l'IRD et ses partenaires du Sud y sont présentés sous forme d'encadrés. L'ouvrage s'adresse à tous ceux qui souhaitent découvrir les principaux enjeux actuels liés à l'eau dans une perspective de gestion durable.

In the present context of climate change, over-exploitation of resources and anthropogenic impacts on the environment, the question of water is one of the major challenges of the twenty-first century. Access to drinking water for the greatest number is one of the Millennium Development Goals.

The allocation and availability of water, its uses—for domestic, agricultural and industrial purposes and for energy production—and its quality are also central to scientific research, as is shown in this book. The reader will find texts that everyone can understand, with numerous illustrations. The main research programmes on water conducted by IRD and its partners from the South are described in boxes. The book is aimed at all those who wish to learn about the current issues related to water with focus on sustainable management.



Institut de recherche  
pour le développement

44, bd de Dunkerque  
13572 Marseille cedex 02  
editions@ird.fr  
www.editions.ird.fr

35 €

ISBN 978-2-7099-1723-0



9 782709 917230