

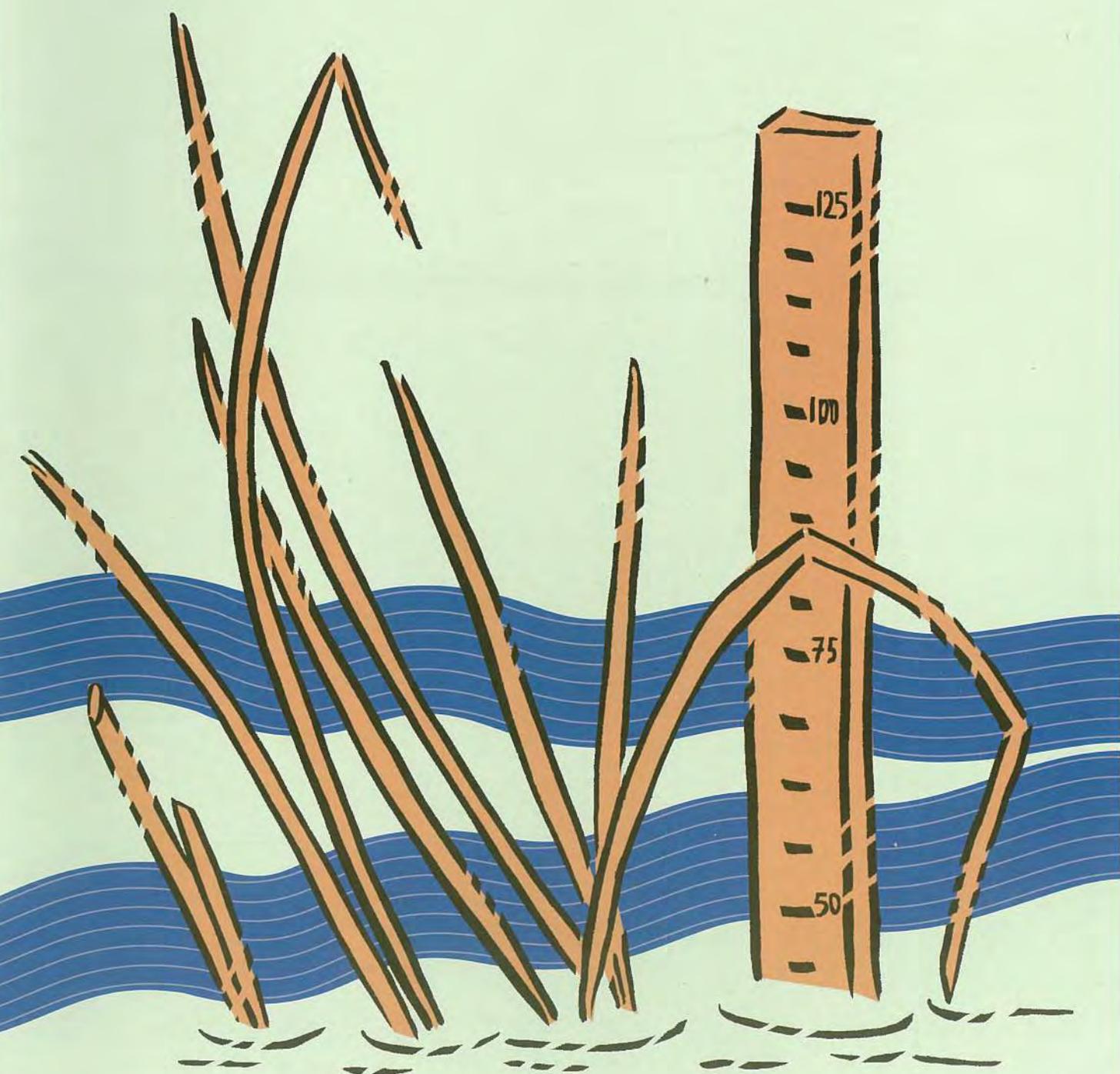


MedWet

Conservation des zones humides méditerranéennes

# L'hydrologie des zones humides

M. Acreman



# MedWet



## **L'initiative MedWet**

Le bassin méditerranéen est riche en zones humides présentant de grandes valeurs écologiques, sociales et économiques. Cependant, ces importantes ressources naturelles ont été considérablement dégradées ou détruites, essentiellement au cours du XXe siècle. MedWet est une action de collaboration concertée à long terme lancée en 1991 à Grado, Italie, pour arrêter ces pertes et inverser la tendance ainsi que pour assurer une utilisation rationnelle des zones humides dans toute la Méditerranée.

L'initiative MedWet est menée par le Comité des Zones Humides Méditerranéennes (MedCom), sous l'égide de la Convention de Ramsar sur les Zones Humides, qui réunit 25 gouvernements de la région, la Commission européenne, les Conventions de Berne et de Barcelone, ainsi que des ONG internationales. Elle recherche des partenaires et des fonds pour la mise en œuvre de la Stratégie pour la conservation des zones humides méditerranéennes, qui inclut des actions de conservation dans les zones humides d'importance majeure dans la région (en particulier sur les sites Ramsar) ainsi que la promotion des politiques nationales sur les zones humides, afin de prendre en considération la valeur des zones humides dans le processus de planification. MedWet offre également un forum destiné à l'échange régional d'expériences dans le domaine technique et publie une série d'outils de gestion des zones humides avec le soutien financier de l'Union européenne.

Le concept de MedWet et son importance pour promouvoir l'utilisation rationnelle des zones humides méditerranéennes ont été unanimement reconnus par les Parties Contractantes de la Convention de Ramsar sur les Zones Humides.

## **La série des publications MedWet**

Les zones humides sont des écosystèmes complexes qui ont de plus en plus besoin d'être gérés de façon à conserver toutes leurs valeurs et leurs fonctions. L'objectif de la série de publications MedWet est de mieux faire comprendre les zones humides méditerranéennes et les politiques qui les concernent, et de rendre disponible à leurs gestionnaires une information scientifique et technique pertinente et actualisée.



Mike Acreman

L'hydrologie des zones humides

Conservation des zones humides méditerranéennes - numéro 10

Tour du Valat, Arles (France), 112 p.

### **Titres de la collection :**

1. Caractéristiques générales des zones humides méditerranéennes
2. Fonctions et valeurs des zones humides méditerranéennes
3. L'aquaculture en milieux lagunaire et marin côtier
4. Gestion des sites de nidification pour oiseaux d'eau coloniaux
5. L'enjeu de l'eau
6. La végétation aquatique émergente, écologie et gestion
7. Conservation des poissons d'eau douce
8. Végétation des marais temporaires, écologie et gestion
9. Les salins, entre terre et mer
10. L'hydrologie des zones humides

Conservation des zones humides méditerranéennes

MedWet



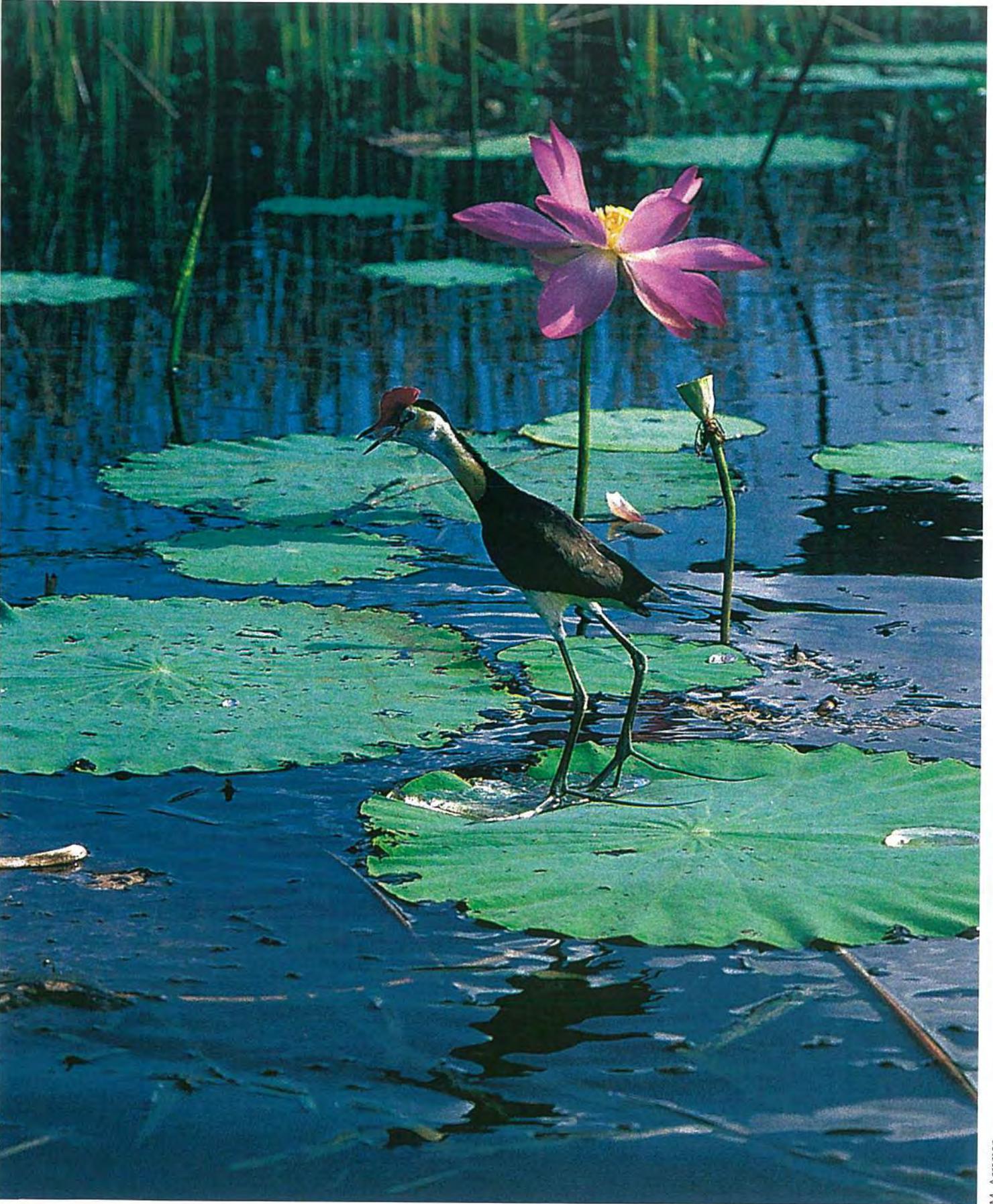
# L'Hydrologie des zones humides

Mike Acreman

Numéro 10

Collection éditée par J. Skinner et A. J. Crivelli

---



M. Acreman

# Préface

La Convention sur les zones humides a été signée en 1971. Depuis, 118 pays y ont adhéré et de très grands progrès ont été faits pour mieux comprendre à quel point il importe de conserver les zones humides dans le cadre naturel de chaque pays.

Pendant longtemps, l'accent a été mis sur les éléments de la diversité biologique des zones humides – surtout les oiseaux mais aussi les amphibiens, les poissons, les invertébrés et la flore – et l'on a négligé, dans une large mesure, ce qui caractérise une zone humide : la présence de l'eau et ses besoins en eau.

Mais les choses changent : de plus en plus, nous prenons en considération cet élément fondamental des zones humides, dans une double perspective. D'une part, les zones humides ont besoin d'eau de bonne qualité, en quantité suffisante, pour pouvoir rester en bonne santé et maintenir la diversité biologique ; d'autre part, beaucoup de zones humides assument de très importantes fonctions dans le cycle de l'eau. Ces fonctions contribuent, elles-mêmes, au maintien de la diversité biologique et procurent, en outre, des avantages importants aux sociétés humaines – non seulement aux communautés qui vivent à proximité des zones humides mais aussi, souvent, à de très nombreuses personnes vivant loin de là. Ainsi, les villes situées à l'embouchure d'un fleuve profitent des fonctions de maîtrise des crues des zones humides qui se trouvent en amont.

*L'Hydrologie des zones humides* représente une contribution importante à la construction de cette nouvelle compréhension des valeurs et des fonctions des zones humides dans le contexte de la gestion des ressources hydrologiques. Cette publication vient à point, alors que la communauté internationale entame un débat mondial sur la nécessité de changer notre compréhension, notre comportement et nos pratiques vis-à-vis de la gestion de l'eau douce et des zones côtières. *L'Hydrologie des zones humides* fait partie d'une série de publications associées à l'Initiative pour les zones humides méditerranéennes (MedWet) mais si l'on considère les problèmes généraux qui y sont abordés et les exemples qui ont été choisis dans le monde entier, elle s'adresse, en fait, à tous les pays.

Je remercie l'auteur, Mike Acreman, et la Tour du Valat, pour cette pierre importante apportée à l'édifice de notre Convention et à la gestion efficace et avisée des zones humides en général.

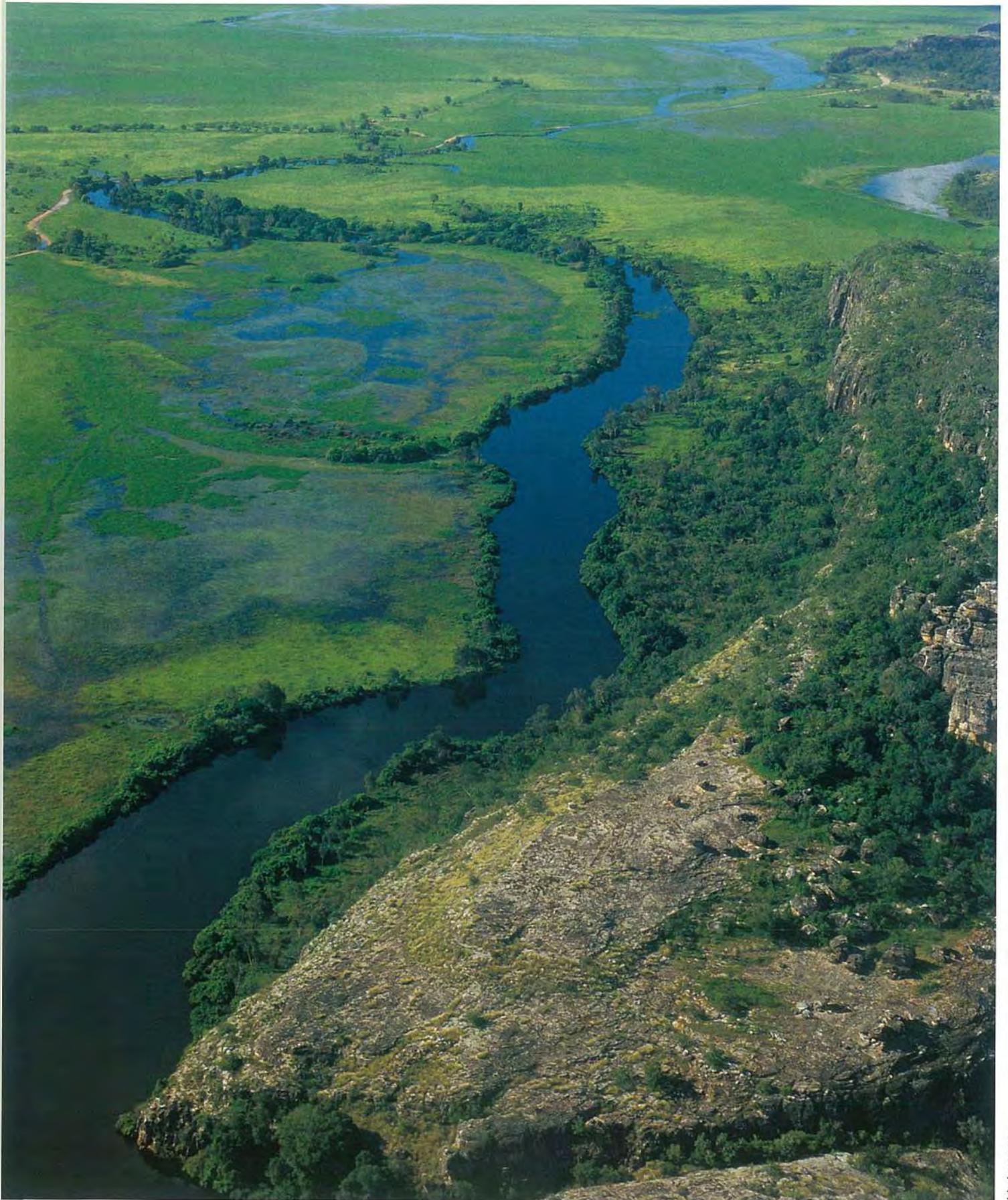
Delmar Blasco  
Secrétaire général  
Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971)



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>L'hydrologie et les zones humides</b>	<b>15</b>
Le cycle sans fin de l'eau	16
Gérer une ressource imprévisible	18
Hydrologie et écosystèmes	24
<b>Le bilan de l'eau des zones humides</b>	<b>29</b>
Les termes du bilan hydrologique	30
La modélisation hydrologique	32
Les modèles hydrologiques au service de la gestion des zones humides	34
<b>Crues et inondations</b>	<b>39</b>
Quelle est la cause des inondations	43
Les zones humides et les inondations	45
La désynchronisation des crues	49
Les méthodes traditionnelles pour la protection contre les inondations	51
Vers une nouvelle conception du rôle des inondations	53

<b>Les zones humides et les eaux souterraines</b>	<b>59</b>
L'alimentation des zones humides par les eaux souterraines	62
La recharge des eaux souterraines	63
Les influences humaines	65
La recharge artificielle des eaux souterraines	68
<b>Les besoins en eau des zones humides</b>	<b>71</b>
Les lagunes	73
Les deltas	76
Les zones humides intérieures	80
Les rivières et les plaines d'inondation	81
<b>Conclusions</b>	<b>89</b>
<b>Annexe A - La mesure du bilan hydrologique</b>	<b>94</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>101</b>
<b>Glossaire</b>	<b>103</b>
<b>Index</b>	<b>109</b>



M. Acreman

# Introduction

**L'eau est essentielle à toute forme de vie, mais qu'il y en ait trop ou pas assez peut avoir de graves conséquences pour l'Homme.**

En effet, les inondations\* et les sécheresses tuent chaque année plusieurs millions de personnes. Les inondations causent également des dommages aux biens et coupent les voies de communication, alors que le manque d'eau réduit le rendement des cultures et ne permet plus de répondre aux besoins agricoles, industriels et domestiques. Pour réduire ces risques d'inondations ou de pénurie, l'Homme a cherché à contrôler le cycle hydrologique pour aplanir les variations naturelles de la disponibilité en eau, dans le temps (en stockant l'eau pendant les périodes humides pour l'utiliser pendant les périodes sèches) et l'espace (en transférant l'eau des zones où elle abonde vers les zones où elle manque). Les ingénieurs ont joué un rôle capital dans l'aménagement des eaux en recherchant des solutions favorables aux hommes.



Des barrages permettent de retenir l'eau pendant la saison humide et de la restituer en saison sèche ou quand elle est nécessaire à l'irrigation ou à la production d'électricité.

Dès 6000 avant J.-C., les Egyptiens ont manipulé l'eau pour irriguer les cultures et vers 2800, ils ont construit le barrage de Sadd-el-Kafarra (Barrage des Payens). Les Romains sont réputés pour avoir construit, entre 50 avant et 100 après J.-C., d'énormes aqueducs pour l'adduction d'eau, comme le Pont du Gard qui alimentait Nîmes dans le sud de la France. En 1594, un barrage de 41 mètres de haut fut construit à Alicante. Toutes ces réalisations étaient considérées comme un miracle du génie civil moderne, capable de réduire les inondations, d'améliorer l'agriculture et de garantir l'approvisionnement en eau. Plus récemment, un projet hydraulique gigantesque se propose de pomper l'eau dans des puits de 450 mètres de profondeur creusés aux confins du désert de Libye et de l'acheminer jusqu'à la côte, par un pipeline de 1 000 km de long, pour irriguer des cultures.

Au XVIIIe siècle, pour réduire les risques d'inondations, le cours du Guadalquivir dans le sud-ouest de l'Espagne a été rectifié et sa longueur réduite de quelque 50 km (7,4 %). Au XIXe siècle, la récupération des plaines d'inondation au profit de l'agriculture s'est largement répandue et, pour prévenir les risques d'inondation, il a fallu endiguer les grands fleuves comme ce fut le cas du Rhône. Au XXe siècle, l'intensification de l'agriculture, le développement industriel et urbain se sont poursuivis, rendus nécessaires par la croissance démographique et possibles par l'amélioration des techniques de génie civil. Des sommets furent atteints dans

Les barrages ont joué un rôle important dans le développement de l'humanité depuis des milliers d'années.



M. Acreman

# Introduction

Pour se protéger des inondations, les rivières ont été canalisées et des digues construites.



M. Acreman

les années 1950 et 1960 avec la construction d'imposants barrages. Toutes ces prouesses techniques portaient à penser que l'Homme avait le pouvoir de contrôler totalement l'environnement.

Au cours des toutes dernières décennies, il est devenu de plus en plus évident qu'aborder la gestion de l'eau par la manière forte employée par les ingénieurs, avait ses inconvénients aussi bien que ses avantages. Partout en Méditerranée, la mise en service de puissantes pompes avait procuré un profit à court terme, mais avait aussi conduit à la surexploitation des eaux souterraines, comme cela s'est produit dans la région de la Mancha en Espagne<sup>1</sup>. La recherche d'un contrôle toujours plus fort de l'environnement a conduit à détruire par inadvertance bien des mécanismes régulateurs naturels. Ainsi, le drainage de terres agricoles, la rectification du cours des rivières et leur endiguement les isolant de leurs plaines d'inondation ont accru les risques d'inondation en aval. Par exemple, les sévères inondations que des villes allemandes et hollandaises riveraines du Rhin ont subies en 1994, ont été amplifiées par les digues existant en amont. Celles-ci, ayant séparé le fleuve de la plaine d'inondation\* pour protéger les terres agricoles l'avaient empêché de se délester dans son bassin naturel d'épandage des crues\*. A la suite de ces inondations, en 1995, deux grands bassins de rétention des crues ont été aménagés sur la rive allemande du Rhin dans le cadre d'un programme pour réduire les dommages causés par les inondations en aval et restaurer les plaines d'inondation dégradées. Ce type d'intervention sur l'environnement est le signe d'un important changement dans la mentalité des ingénieurs qui ont pris conscience qu'il valait mieux: travailler avec la nature plutôt que la combattre.

*1 - Acreman (1999)*



Les zones humides ont plus particulièrement souffert des anciennes conceptions de la gestion des eaux dues à la méconnaissance du rôle que jouent ces écosystèmes dans le cycle hydrologique. Les zones humides n'étaient considérées que comme un nid à maladies où de grandes quantités d'une eau précieuse étaient gaspillées par évaporation\*. Ainsi, l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), dans son rapport de 1970, recommandait comme mode de gestion de l'eau pour promouvoir l'agriculture de l'île grecque de Crète, le drainage des "terres à l'abandon" de la vallée de Massara.

Contrastant avec cette façon de voir, de récentes recherches<sup>1</sup> ont montré l'importance du rôle des zones humides dans l'élimination des polluants, la réduction des inondations, la recharge des eaux souterraines\* et la régulation du débit des rivières. Ces fonctions, les zones humides les remplissent gratuitement alors que les ingénieurs ont dépensé des fortunes pour les créer par la technologie. En fait, à cause de ces précieuses fonctions hydrologiques, les zones humides sont maintenant décrites comme "les reins du paysage"<sup>2</sup>. Outre leurs fonctions épuratrices et régulatrices, les zones humides procurent de nombreux produits de valeur comme les poissons et les roseaux pour couvrir les chaumières, et leurs habitats hébergent une flore et une faune sauvages qui peuvent être à la base d'une activité touristique. Par ailleurs, dans de nombreuses zones humides, le mode de vie traditionnel fait partie de l'héritage culturel des communautés locales. Du fait de ces fonctions, productions et attributs, la conservation des zones humides commence à être considérée à part entière dans la gestion intégrée des eaux. Les produits et les services

Les roselières, ici au Canada,  
un bon moyen  
de traiter les eaux usées.



M. Acreman

1 - Skinner & Zalewski (1995)

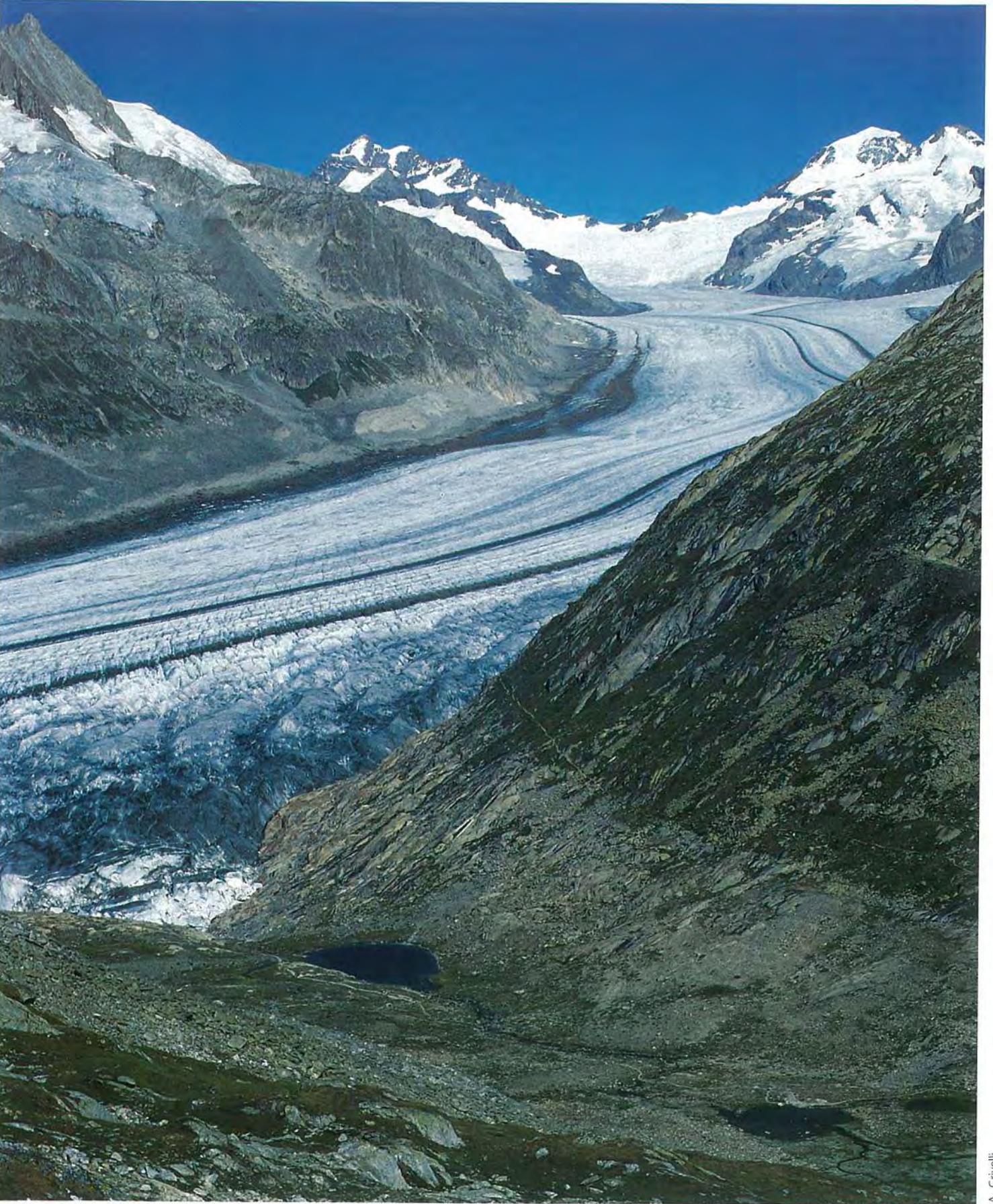
2 - Mitch & Gosselink (1993)

# Introduction

fournis par les zones humides font plus que rembourser le prix de la part de l'eau qu'il faut leur concéder.

La présente brochure se propose d'explorer les relations existant entre les zones humides et le cycle hydrologique, de détailler leurs caractéristiques hydrologiques, de montrer dans quelle mesure certaines peuvent réguler les crues, entretenir le débit des rivières en période sèche et recharger les eaux souterraines. Elle montre comment les fonctions hydrologiques de ces écosystèmes peuvent être interrompues ou éliminées par des interférences humaines. Elle conclut que la gestion durable de l'eau est mieux assurée par une utilisation judicieuse des fonctions naturelles des zones humides, associée au contrôle du cycle hydrologique par la mise en œuvre de nouvelles technologies.

Personne ne songe à barrer d'un trait de plume des siècles de réalisations humaines destinées à prévenir les inondations et gérer les eaux, mais il est de plus en plus reconnu que les technologies les meilleures et les plus aptes à engendrer une haute qualité de vie gagneraient à associer un usage judicieux des fonctions naturelles d'écosystèmes utiles à l'Homme.



A. Crivelli

# L'hydrologie et les zones humides

Les glaciers alpins constituent  
une importante réserve d'eau.



## Le cycle sans fin de l'eau

**L'eau est l'élément vital de notre Planète. Elle est à la base de la biochimie de tous les organismes vivants.**

Les hommes ont besoin d'eau pour boire, laver, cuisiner, cultiver, produire de l'électricité et faire tourner les industries. L'eau est un lieu de vie permanent pour de nombreuses espèces dont environ 8 500 espèces de poissons, et un lieu de reproduction ou un habitat temporaire pour d'autres, comme la plupart des 4 200 espèces d'amphibiens et de reptiles du monde. L'eau est également un solvant universel et le meilleur véhicule pour les sédiments, les nutriments\* et les polluants. L'eau façonne le paysage par l'érosion, le transport et le dépôt d'alluvions par les rivières, les glaciers et les calottes glacières. Par l'évaporation et la condensation elle commande les échanges d'énergie entre le sol et l'atmosphère, contrôlant ainsi le climat de la Terre.

Le volume total de l'eau de la Terre est de 1,4 milliard de kilomètres cubes, il est pour la plus grande part stocké pour de longues périodes dans les océans, les glaces polaires et les eaux souterraines. Seuls, environ 41 000 km<sup>3</sup> entrent dans le cycle hydrologique et tombent sous forme de pluie ou de neige, s'infiltrent dans le sol et les roches, coulent dans les rivières, passent par les zones humides pour finir à la mer et s'évaporer.

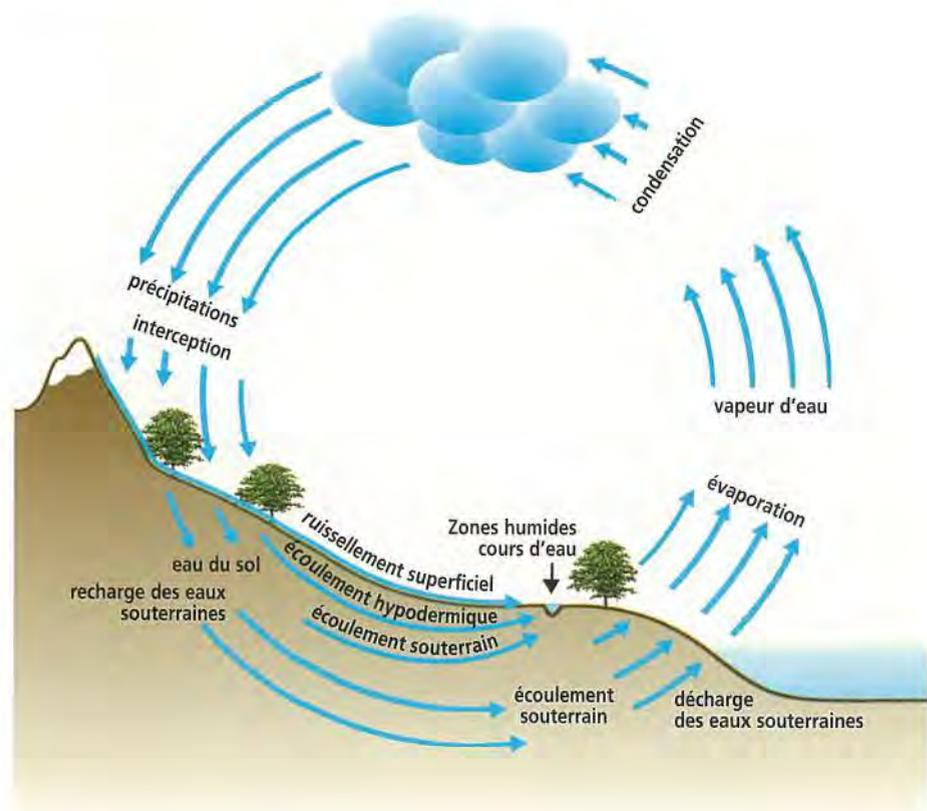
L'importance des pluies varie d'un point à l'autre du Globe. Dans le désert d'Atacama, à la frontière entre le Chili et le Pérou, il ne pleut pratiquement jamais alors qu'une hauteur de 6 mètres de pluie n'est pas rare dans certaines régions de Nouvelle Zélande. Les pluies varient également dans le temps. En un même lieu, d'une année à l'autre, les chutes de pluie peuvent être très inégales. Au début des années 1980, le monde a été témoin de scènes tragiques de sécheresse et de famine au Sahel, mais en août 1988, la même région a été ravagée par des inondations. La répartition des pluies varie également sur de plus longues périodes. Il y a eu quelque 10 000-20 000 ans, alors que les hautes latitudes étaient couvertes de glace, ce qui deviendra le désert saharien et le Moyen Orient était beaucoup plus arrosé qu'aujourd'hui et la percolation\* de l'eau dans le substratum a constitué d'importantes réserves d'eaux souterraines<sup>1</sup>. Puis le climat de ces régions est devenu beaucoup plus sec et la recharge de l'aquifère\* a été réduite.

Aujourd'hui ces eaux souterraines sont exploitées mais l'eau extraite n'est pas remplacée dans les mêmes proportions, ou ne l'est pas du tout.

*1 - Goudie (1977)*

# L'hydrologie et les zones humides

Les changements planétaires induits par l'Homme se surimposent aux cycles climatiques naturels. On s'accorde à penser qu'au XXI<sup>e</sup> siècle, la température du Globe s'élèvera d'environ 0,2°C par décennie<sup>1</sup>, certains endroits dépassant ce taux alors que d'autres seront plus frais. Les changements climatiques affecteront le cycle de l'eau de plusieurs manières. Il est probable que l'évaporation augmentera alors que les précipitations\* pourront être plus irrégulières. Il est donc à craindre que de nombreux endroits deviennent plus secs et que la fréquence et la gravité des inondations et des sécheresses s'accroissent. Tous ces facteurs ont un rôle important à jouer dans les prévisions de stockage, de détournement et d'usage de l'eau, et pour servir de toile de fond aux grandes lignes d'importantes décisions d'aménagement pouvant avoir des implications pendant les cent ans à venir ou plus.



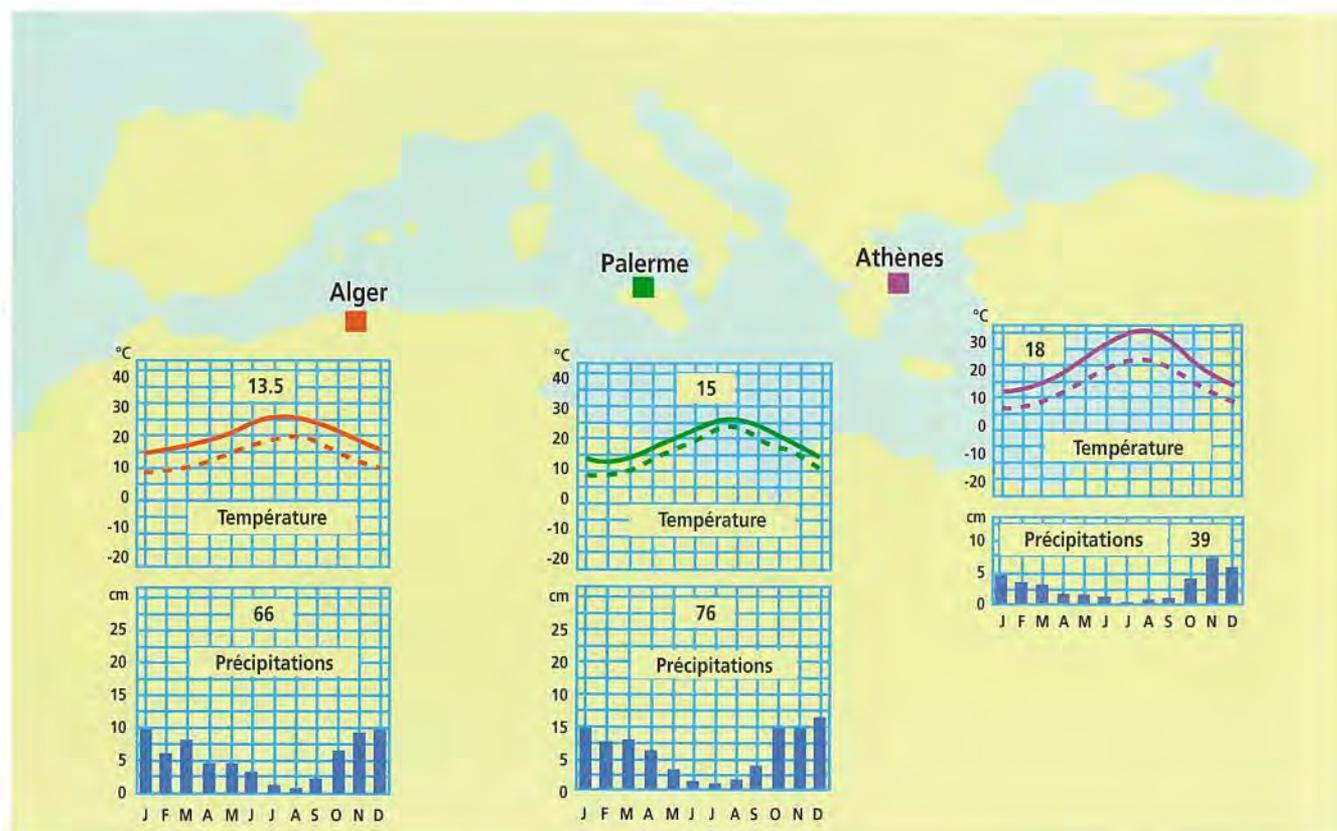
Le cycle de l'eau dans la nature.

## Gérer une ressource imprévisible

**Le climat méditerranéen est caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers secs et doux.**

Ainsi, les côtes d'Algérie et de Libye ont normalement sept mois secs ; elles ne reçoivent en moyenne que 200 mm de pluie par an et la température du mois de juillet y est habituellement de 30 °C. Un trait marquant de la région méditerranéenne, dû en partie à direction du vent et la situation des chaînes de montagnes, est la différence existant entre les côtes orientales et occidentales, Durres sur la côte albanaise reçoit environ 1 100 mm de pluie par an, alors qu'en face, à Bari sur la côte adriatique italienne, il n'en tombe que 560 mm. De même, les côtes orientales de la Grèce ne reçoivent pas plus de la moitié des pluies qui tombent à l'ouest. Une autre caractéristique importante de la région est la variabilité interannuelle des pluies et l'existence sporadique d'événements extrêmes. Par exemple, l'Espagne a subi cinq années de sécheresse au début des années 1990, alors qu'en 1997 et 1998, la pluviométrie a été supérieure à la moyenne. Comme les valeurs moyennes masquent cette forte variabilité, celle-ci doit être prise en compte dans la conception des travaux de génie civil sur les rivières comme les barrages et les ponts.

Variations de la température et de la pluviométrie autour de la Méditerranée.



# L'hydrologie et les zones humides

Quand les pluies arrivent, c'est souvent au cours de violentes tempêtes. Des précipitations dépassant 125 mm par jour, souvent accompagnées de tonnerre, ne sont pas rares et les annales font état de tempêtes plus sévères encore en certains endroits comme à Tripoli (130 mm), Haïfa (183 mm) et Malte (295 mm). Ainsi, certains territoires peuvent recevoir le total de leurs pluies annuelles en quelques jours.

La demande en eau dans le bassin méditerranéen augmente en flèche en été, particulièrement le long de la côte, au moment de l'irrigation des cultures et de l'arrivée des touristes. De nombreux barrages ont

## Transport de sédiments

Souvent les grosses tempêtes provoquent des glissements de terrain, érodent les berges des rivières et les sédiments ainsi arrachés sont transportés jusque dans les retenues des barrages. Une étude de l'importance du transport sédimentaire par les rivières dans le monde entier<sup>1</sup> montre qu'une grande partie de la Méditerranée, notamment le nord-ouest de l'Afrique, l'Italie, les Balkans y compris la Grèce et la Turquie, se classe dans la catégorie la plus élevée, avec plus de 500 tonnes transportées par km<sup>2</sup> et par an. Dans les grands bassins, les matériaux érodés restent en grande partie sur les pentes, alors que dans les petits bassins, ils ont tendance à rejoindre les rivières.

On appelle taux d'apport sédimentaire la proportion des matériaux érodés atteignant les rivières. Des données concernant la Tunisie illustrent bien la relation qui existe entre le taux d'apport sédimentaire et la taille des bassins. Elles montrent de façon encore plus significative que l'espérance de vie d'une retenue artificielle tunisienne est inférieure à cent ans. Dans un cas extrême, en 1997, un petit lac de barrage tunisien récemment achevé a été rempli de sédiments en dix minutes à la suite d'un violent orage. Ce barrage avait été conçu à partir des valeurs moyennes du transport sédimentaire dans la région, sans tenir compte des événements extrêmes.

Sédimentation dans des lacs de barrage en Tunisie<sup>2</sup>.

Nom de la retenue	Superficie du bassin versant (en km <sup>2</sup> )	Erosion (en tonnes par km <sup>2</sup> et par an)	Concentration des sédiments dans la rivière (kg/m <sup>3</sup> )	Volume de la retenue (millions de m <sup>3</sup> )	Taux de remplissage annuel (%)	Age en années (en 1980)
Mellégue	10,300	695	38	268	0,8	21,3
Nebaana	855	2 300	47,5	86,4	1,5	10
Lakhmess	131	5 070	86	8,0	2,69	9,3
Kasseb	101	2 865	53	81,9	0,5	7,5
Bézirk	84	2 430	45,6	6,5	1,76	14,8
Chiba	64	4 220	72,5	7,9	2,81	12
Masri	40	6 050	85	6,8	2,58	7,5

1 - Walling & Webb (1987)

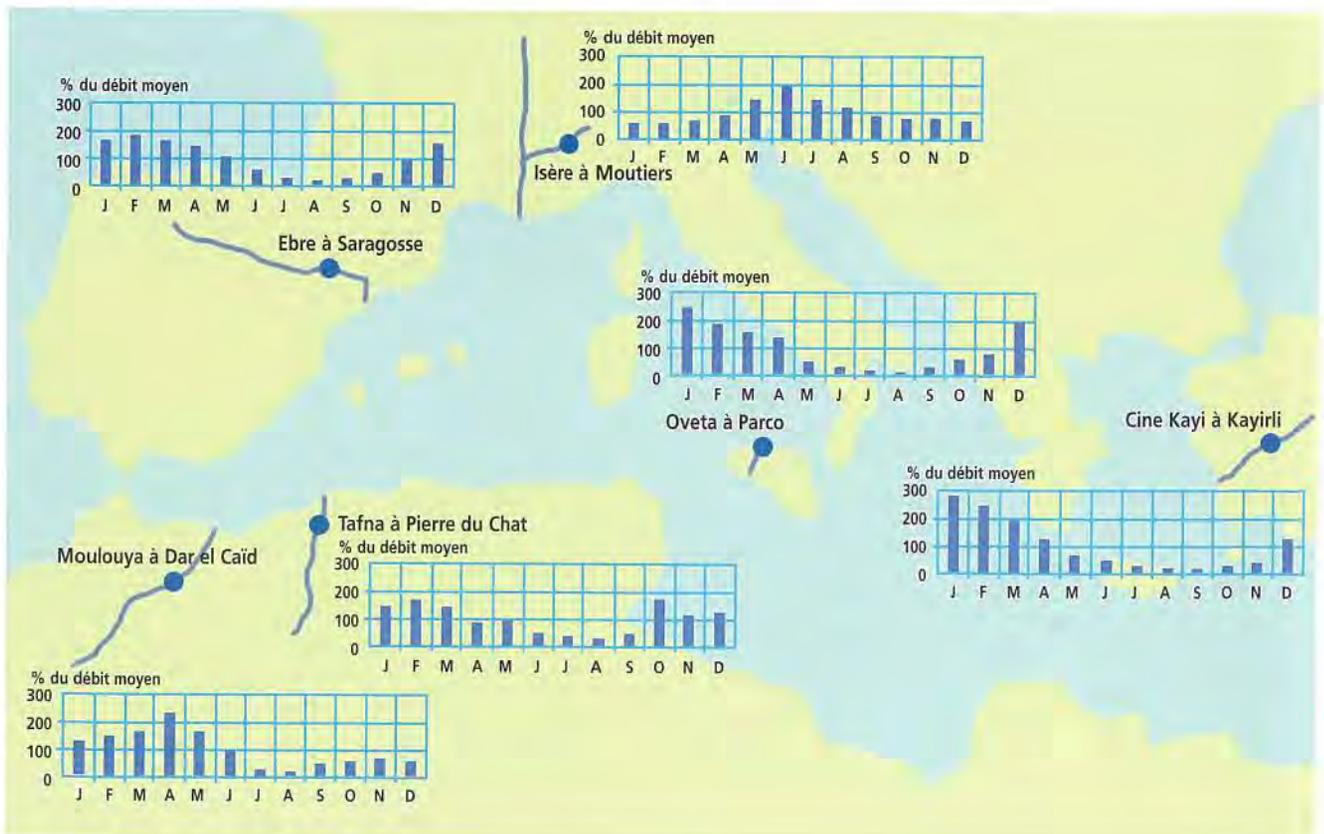
2 - D'après Ghorbel (1980)

Variation du débit des cours d'eau en Méditerranée. Le débit des cours d'eau est maximal en hiver et minimal en fin d'été, souvent avec assèchement du lit. Les débits moyens enregistrés en Espagne, en Turquie et en Italie sont révélateurs de cette tendance. Dans le cas de la Tafna à Pierre du Chat en Algérie, celle-ci est moins évidente du fait d'une importante variabilité interannuelle. Les hautes chaînes de montagne de la région, dont l'Atlas au Maroc, la Sierra Nevada en Espagne et les Alpes en Italie et en France, reçoivent beaucoup de neige qui à la fonte augmente le débit printanier des rivières. Cela apparaît clairement sur le graphique représentant le débit de l'Isère à Moutiers (Alpes françaises) et dans une moindre mesure sur celui de la Moulouya à Dar el Caïd (Maroc) où le débit d'avril à juin est grossi par la fonte des neiges de l'Atlas. Le débit des cours d'eau ne représente que 20 à 40% des précipitations du fait des pertes par évaporation et par percolation vers les eaux souterraines<sup>1</sup>.

été construits dans toute la région pour stocker l'eau en hiver pour les besoins de l'été, l'Espagne à elle seule a 847 grands barrages. Ces barrages peuvent avoir un impact significatif sur le régime hydrologique des rivières en aval.

D'autres projets de génie civil envisagent de transférer de l'eau de zones relativement excédentaires vers des régions les plus sèches. C'est le cas du projet de détournement d'une partie de l'eau du fleuve grec Acheloos pour irriguer la plaine de Thessalie. Ce projet a fait prendre conscience de l'impact écologique négatif qu'il pourrait avoir sur la zone humide de Messolonghi à l'embouchure du fleuve. De grands transferts d'eau de ce type ont été proposés ailleurs, comme en Espagne où de l'eau des fleuves du nord et de l'ouest, se jetant dans l'Atlantique, serait pompée vers le cours supérieur de l'Ebre puis à nouveau prélevée en aval dans le cours inférieur méditerranéen du fleuve.

De nombreuses régions méditerranéennes sont constituées de roches très perméables, comme les calcaires fissurés, où des niveaux aquifères renferment d'importantes réserves d'eau. Les eaux souterraines fournissent 29 % des ressources en eau en Grèce et 23 % en Italie<sup>2</sup>. Ces eaux sont essentiellement utilisées pour irriguer les cultures. L'intensification de l'agriculture (souvent subventionnée en Europe par l'Union européenne) a provoqué la surexploitation des aquifères qui,

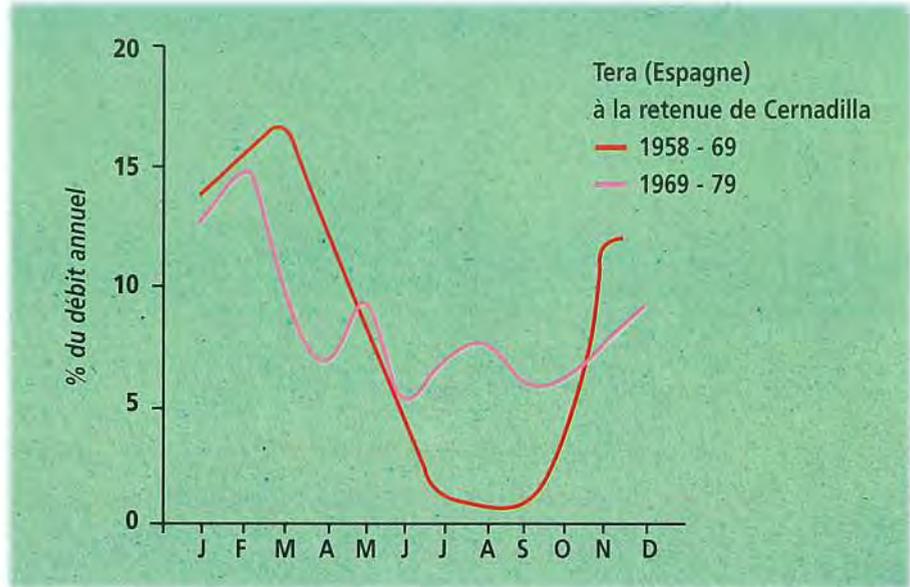


1 - Friend-Amby (1997)  
2 - EEA/UNEP (1997)

# L'hydrologie et les zones humides

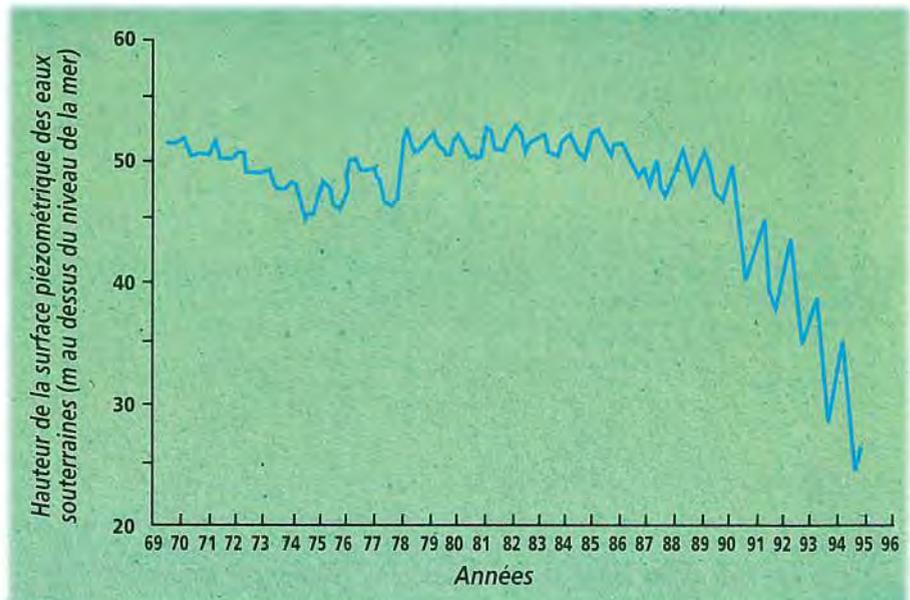
Impact du barrage de Cernadilla sur le débit de la rivière Tera en Espagne.

Le trait continu correspond au régime naturel de la rivière Tera, marqué par de hautes eaux au printemps dues aux pluies d'hiver et de basses eaux en été quand les précipitations sont faibles et l'évaporation élevée. Le trait rose montre l'impact du barrage de Cernadilla qui tend à lisser les variations saisonnières du débit<sup>1</sup>.

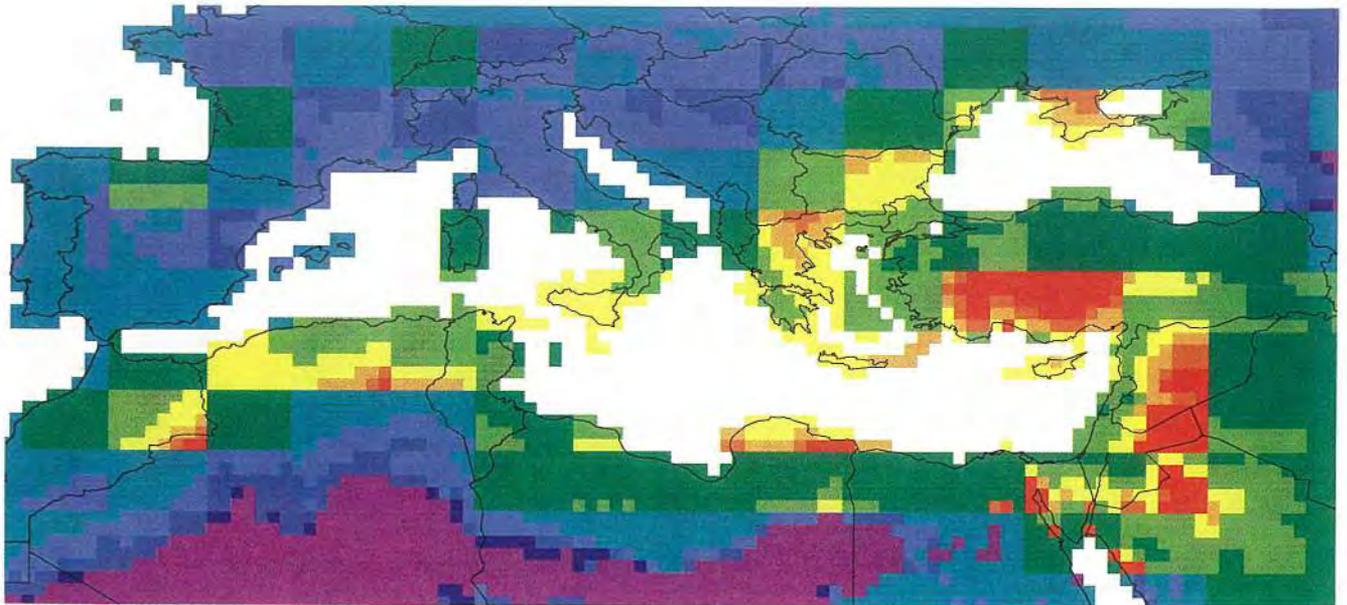


pour beaucoup d'entre eux autour de la Méditerranée, s'est traduite au cours des 10-20 dernières années, par l'abaissement de plusieurs mètres du niveau des eaux souterraines. En Espagne, 51 aquifères ont été déclarés surexploités (c'est-à-dire que les volumes pompés sont plus importants que ne le permet la recharge). En Libye où la surexploitation des eaux souterraines a déjà causé des intrusions salines dans les aquifères côtiers, on a conçu le Grand Projet de Rivière Artificielle pour transférer jusqu'à la côte méditerranéenne, l'eau des aquifères des confins du désert de Libye.

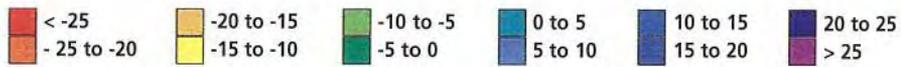
Baisse du niveau des eaux souterraines dans un forage du bassin supérieur de la vallée de Massara, Grèce. C'est un exemple typique de la baisse de niveau d'un aquifère méditerranéen fortement exploité<sup>2</sup>.



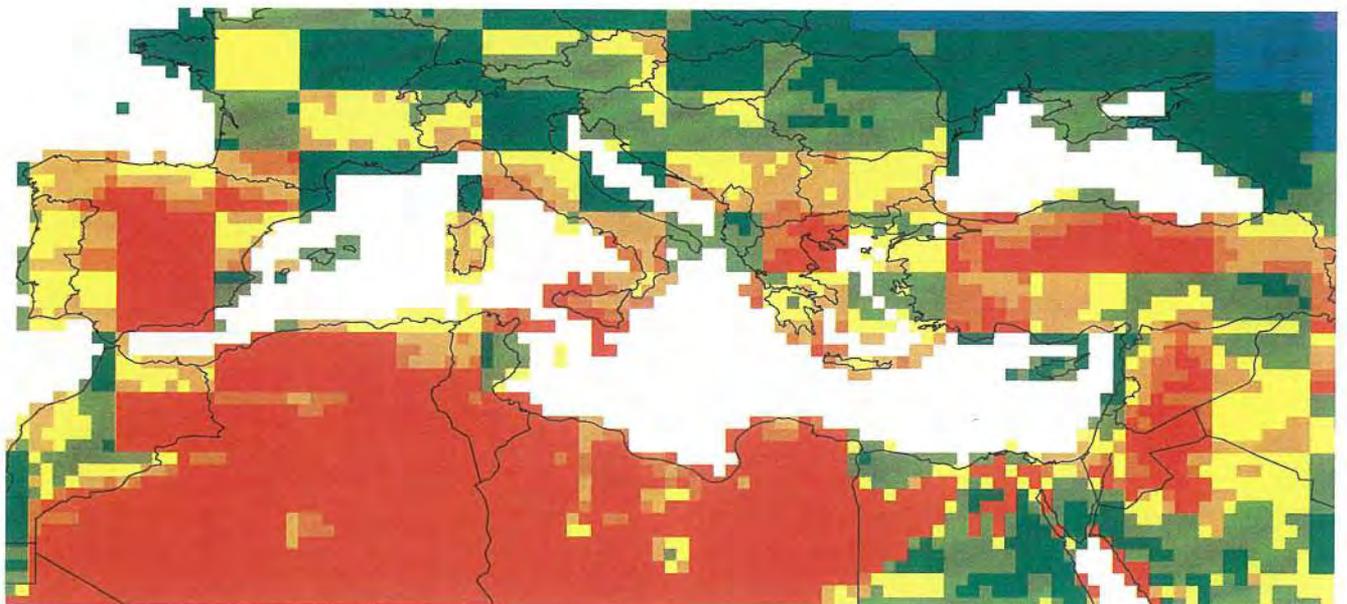
1 - Estrela et al (1996)  
2 - Acreman (2000)



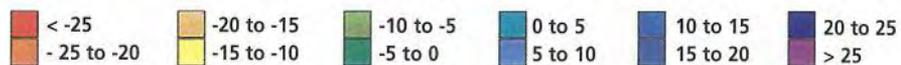
Changements dans les précipitations pendant la saison humide (d'octobre à mars) (%) - HadCM2 scénario - GHGX pour les années 2050



Les scénarios du changement climatique en 2050 pour la Méditerranée<sup>1</sup>.  
 Les données climatiques pour la période 1960-1990 ont été fournies  
 par l'Unité de recherche sur le climat de l'Université d'East Englia  
 (Royaume Uni)<sup>1</sup>.



Changements dans les précipitations pendant la saison sèche (d'avril à septembre) (%) - HadCM2 scénario - GHGX pour les années 2050



<sup>1</sup> - New et al (1999)

## Le changement climatique : un avenir incertain

L'Homme par l'utilisation de combustibles fossiles change le climat et exerce une influence toujours plus grande sur l'environnement. Cela risque d'induire à l'avenir une variabilité encore plus grande de l'hydrologie méditerranéenne. Les scénarios prévus pour l'an 2050 par le modèle climatique mondial établi par le Centre Hadley au Royaume Uni, suggèrent que les précipitations hivernales (d'octobre à mars) pourraient augmenter jusqu'à 15 % au centre et à l'ouest de l'Espagne, au sud de la France, au nord de l'Italie et sur les Alpes. Ceci serait avantageux s'il s'agissait de pluies de faible intensité qui favorisent la recharge des eaux souterraines, mais le changement climatique pourrait augmenter la fréquence des épisodes orageux et des orages plus violents pourraient accroître le risque d'inondations et de glissements de terrain. Par contre, ailleurs en Méditerranée, on s'attend à une baisse de la pluviométrie hivernale pouvant dépasser 10 % en Sicile, dans les îles grecques, au sud de la Turquie et au nord de la Libye. Pendant l'été (d'avril

à septembre), il est probable que les pluies diminueront sur une grande partie de la Méditerranée, en particulier sur l'Espagne, le nord de la Turquie et l'Afrique du Nord, où la baisse pourrait dépasser 25 %. A ce sujet, il faut noter que les pluies d'été sur ces régions sont actuellement faibles et qu'une forte variation en pourcentage ne se traduirait pas par une forte baisse du nombre de millimètres de pluie. On estime que l'augmentation de la température de 1,5 à 2°C et la diminution des pluies de 10 % qui risquent de se produire en 2050 (comme le suggère IPCC, la Commission intergouvernementale britannique sur le changement du climat – en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change) pourrait amener une réduction des ressources renouvelables en eau de 40 à 70 %<sup>1</sup>. Une gestion réussie du cycle hydrologique demandera donc la mise en œuvre de nouvelles stratégies comprenant l'utilisation des processus naturels des écosystèmes comme les fonctions régulatrices du régime des eaux que remplissent les zones humides.



## Hydrologie et écosystèmes

**Le rapport Bruntland, “Notre avenir commun”<sup>1</sup>, “Prendre soin de la Terre”<sup>2</sup> et le programme 21 de la Conférence de Nations unies sur l’environnement et le développement tenue à Rio de Janeiro en 1992, ont marqué un tournant dans notre manière de concevoir l’eau et les écosystèmes.**

Il est apparu que la vie des hommes et l’environnement sont profondément interconnectés et que les processus écologiques assurent à la Planète sa capacité à entretenir la vie, fournissant notre nourriture, l’air que nous respirons, des médicaments et bien d’autres choses que nous appelons la “qualité de la vie”. Le thème de la Conférence internationale sur l’eau et l’environnement réunie à Dublin en 1991 (une réunion préparatoire à la Conférence de Rio) portait sur l’exploitation durable de l’eau. Les participants ont conclu que “puisque toute vie dépend de l’eau, pour être efficace, la gestion des ressources en eau doit être appréhendée dans sa globalité, en associant le développement social et économique à la protection des écosystèmes naturels”<sup>3</sup>. Par exemple, les écosystèmes en amont des bassins doivent être conservés si leur maintien est vital pour la régulation du cycle hydrologique. Bien gérées, les prairies et forêts d’altitude en tête des bassins, réduisent en saison humide le ruissellement et l’érosion de sol et accroissent l’infiltration\* et la recharge des aquifères. Les écosystèmes en aval, dont les lagunes côtières, fournissent de précieuses ressources comme les nurseries à poissons, les forêts inondables et les pâturages, ils doivent être considérés comme des utilisateurs légitimes de la ressource en eau et recevoir leur part d’eau douce.

A la Conférence de Rio elle-même, il a été convenu que “dans l’exploitation et l’utilisation des ressources en eau, la priorité doit être donnée à la satisfaction des besoins élémentaires et à la sauvegarde des écosystèmes” (programme 21 chapitre 18,18.8). C’est reconnaître que l’eau peut être utile aux hommes directement et indirectement. Alors que la satisfaction des besoins domestiques et industriels et irrigation des cultures est une utilisation directe, l’approvisionnement de l’environnement est une utilisation indirecte<sup>4</sup>. Cette conception est tellement évidente qu’elle a pénétré tous les aspects de la gestion des ressources en eau. Ainsi, la nouvelle loi sur l’eau de l’Afrique du Sud stipule dans son article 9 que “la quantité, la qualité et la disponibilité de l’eau nécessaire au maintien des fonctions écologiques dont l’homme dépend doivent être épargnées de telle sorte que les utilisations humaines de l’eau, prises séparément ou cumulées, ne puissent pas compromettre le maintien à long terme

1 - WCED (1987)

2 - IUCN/UNEP/WWF (1991)

3 - ICWE (1992)

4 - Acreman (1998)

# L'hydrologie et les zones humides

des écosystèmes aquatiques et associés". L'Afrique du Sud est un pays semi-aride qui connaît les mêmes problèmes avec la ressource en eau que la Méditerranée. Sa prise de position est un exemple fort pour d'autres pays aux ressources limitées

La végétation joue un rôle particulièrement important dans le cycle hydrologique. Un arbre d'une forêt tropicale peut relarguer 11 000 m<sup>3</sup> d'eau dans l'atmosphère pendant sa vie<sup>1</sup>, mais la plupart de cette eau est recyclée sur place et n'est pas perdue pour la forêt. Les pluies tombant sur la forêt amazonienne proviennent pour 50 % de l'évaporation locale. Après sa déforestation, une région peut devenir plus chaude et plus sèche parce que l'eau ne circule plus en

## Les concepts de l'écosystème rivière

Les ingénieurs et les écologistes ne voient pas les rivières de la même façon. Les ingénieurs les considèrent comme des milieux physiques pouvant rendre des services pratiques comme l'évacuation des crues, la navigation et la fourniture d'eau. Au contraire, pour les écologistes, la rivière n'est pas une simple ressource inanimée attendant d'être exploitée, mais un système vivant. Dans la manière de voir des écologistes, deux concepts sont particulièrement importants. Le premier est le "concept du continuum rivière"\* selon lequel toutes les parties d'une rivière ont entre elles des liens d'interdépendance, de l'amont à l'aval, de la source aux zones côtières y compris les deltas et lagunes. Ce concept tient compte de l'évolution naturelle tout au long du cours des rivières, du débit, de la qualité de l'eau et des organismes vivants. En général, les nutriments et les sédiments proviennent du cours supérieur et sont recyclés en aval où ils conditionnent la croissance des végétaux. Les poissons qui migrent de la mer pour aller frayer dans le cours supérieur des fleuves sont une des illustrations les plus évidentes

de la notion de continuum rivière. Les ouvrages de génie civil comme les barrages rompent ce continuum et causent des modifications radicales du débit, de la qualité de l'eau et du déplacement des espèces. Le second concept est la notion de "retour périodique des inondations\*". Ce concept est basé sur l'importance de la connexion latérale entre les cours d'eau et leurs plaines d'inondation et il considère l'inondation de celles-ci comme la principale force conditionnant la vie des cours d'eau et non pas comme un problème qu'il faut éradiquer. Les cours d'eau fournissent nutriments et sédiments à leurs plaines d'inondation, en retour, celles-ci servent de lieu de reproduction à plusieurs espèces et améliorent la qualité de l'eau en retenant les sédiments et en absorbant nutriments et polluants.

En adoptant certaines des vues des écologistes sur la rivière, en travaillant avec la nature plutôt qu'en la combattant, en intégrant les caractéristiques "vivantes" des rivières dans leurs projets, les ingénieurs peuvent améliorer le caractère durable de leur gestion des cours d'eau.



boucle entre les arbres et l'atmosphère, cela peut conduire cette région à une véritable désertification\* avec une aggravation de la perte des ressources en eau. Des simulations sur un modèle de circulation mondiale où la forêt amazonienne et la savane sont remplacées par des pâturages prévoient un appauvrissement du cycle hydrologique local avec des pluies et une évaporation plus faibles et une augmentation de la température superficielle<sup>1</sup>, due aux changements de l'albédo\* et de la rugosité de la surface évaporatoire. Le total annuel des précipitations serait réduit de 26 %<sup>2</sup>. De la même façon, la modélisation de la suppression de la végétation naturelle de la région sahélienne de l'Afrique, suggère que les pluies ont été réduites de 22 % entre juin et août et que le début de la saison des pluies a été retardé d'une quinzaine de jours<sup>3</sup>. Ces écosystèmes fonctionnent donc comme des échangeurs d'eau entre la terre et l'atmosphère et, en contrepartie de l'eau qu'ils utilisent, ils rendent le service de réguler le climat mondial et régional et de maintenir les ressources en eau locales. En Afrique du Sud, une expérience a montré que l'éradication des arbres d'origine australienne, évaporant plus d'eau que les "fynbos" indigènes, peut accroître le ruissellement total d'un bassin de 6 %. De ce fait, le Ministère des ressources en eau a largement répandu un programme d'action pour l'eau qui tient compte de la relation entre le coût de l'approvisionnement en eau et de son emploi et les bénéfices réels qu'on peut en tirer.

## Le changement d'affectation des terrains et le climat en Méditerranée

Dans le cadre du programme EFEDA<sup>4</sup>, financé par la Commission européenne, des mesures météorologiques ont été effectuées dans la région de la Mancha en Espagne centrale. Les données recueillies ont été entrées dans des modèles atmosphériques, puis ces modèles ont été utilisés pour rechercher l'impact du changement de la végétation des terrains sur le climat de la région (en particulier l'humidité du sol et les

précipitations). Ces simulations ont montré que les changements radicaux de la végétation, c'est-à-dire le remplacement des forêts de toute la péninsule ibérique par des cultures sèches, provoqueraient la réduction du régime des pluies estivales dans la région ibérique ainsi que dans les zones adjacentes. Actuellement, dans le cadre du programme sur le climat et la dégradation des terroirs, sont faites d'autres simulations basées sur les changements historiques de la végétation.

# L'hydrologie et les zones humides

## Les aménagements hydrologiques et la dégradation des zones humides

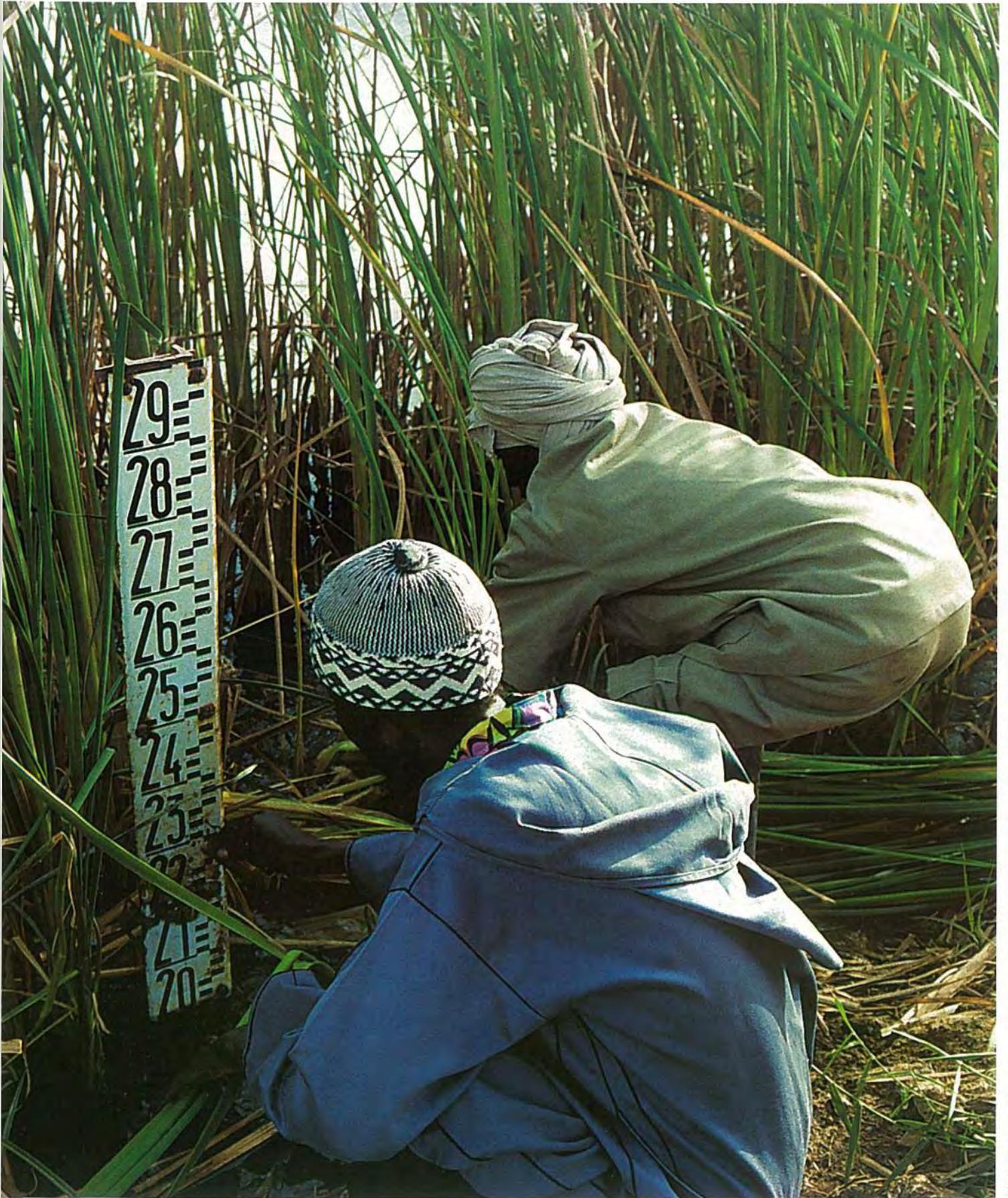
Les zones humides peuvent être le siège de transferts d'eau constituant une part importante du cycle hydrologique. Elles peuvent emmagasiner de grandes quantités d'eau et, de ce fait, agir en régulateurs naturels, elles réduisent les risques d'inondation et constituent une réserve d'eau pendant la saison sèche. Leur végétation piège les sédiments, élimine beaucoup de polluants et recycle les nutriments, si bien que l'eau qui sort d'une zone humide est souvent de meilleure qualité que lorsqu'elle y entre.

Pour de nombreuses zones humides, le processus naturel est de devenir graduellement plus sèches, voire de devenir des écosystèmes terrestres du fait de l'accumulation de sédiments et de la végétation. Les aménagements hydrologiques, directs ou indirects, ont considérablement altéré l'importance de la transformation des zones humides. Dans une certaine mesure, de nouvelles zones humides artificielles ont été créées avec les lacs de barrages, les canaux, les bassins de rétention des crues et les roselières destinées au traitement des eaux usées ou des eaux de mines. La perte de zones humides dépasse toutefois largement les gains.

L'idée que les zones humides sont des terres à l'abandon, née de l'ignorance ou de l'incompréhension de la valeur de leur rôle hydrologique, a conduit à les transformer en cultures intensives, en sites industriels ou résidentiels. Les convoitises personnelles d'agriculteurs ou de promoteurs ont été encouragés et soutenues financièrement par des directives gouvernementales. S'ajoutant à cette action directe sur le terroir, des travaux de génie civil sur les cours d'eau ont détourné l'eau de zones humides où l'on pensait qu'elle était gaspillée ou créait moins de richesses que si on l'utilisait pour l'agriculture en amont. Certaines organisations ne voient encore dans les zones humides que leur potentiel à donner des terres agricoles pour nourrir une population toujours plus nombreuse, ce qui ne peut se faire qu'en altérant le système naturel. La pollution, les décharges, les extractions minières et l'exploitation des eaux souterraines peuvent également contribuer à la perte des zones humides.

Zones humides perdues en Europe méditerranéenne<sup>1</sup>.

Pays	Périodes	ZH perdues (%)
France	1900 -1993	67
Espagne	1948-1990	60
Italie	1938-1984	66
Grèce	1920-1991	62



M. Acreman

# Le bilan de l'eau des zones humides

## Les termes du bilan hydrologique\*

**La quantité d'eau présente sur Terre est plus ou moins fixe. De l'eau est transformée dans des processus biochimiques comme la respiration et la photosynthèse, mais leurs actions ont tendance à se contrebalancer.**

Dans sa grande majorité, l'eau n'est ni créée ni détruite, elle ne fait que se déplacer d'un endroit à l'autre, changer d'aspect (glace, eau liquide ou vapeur d'eau) et de qualité (salinité, teneur en polluants par exemple) Cette conservation de la matière est un principe fondamental en hydrologie. La circulation de l'eau entre les océans, l'atmosphère et les différents endroits des continents, dont les zones humides, où elle est stockée ou coule, est un processus continu de perte et de renouvellement appelé le cycle de l'eau. L'eau tombe sous forme de pluie ou de neige, s'infiltré dans les sols et les roches, coule dans les cours d'eau vers la mer puis retourne à l'atmosphère sous forme de vapeur. Le lien est inextricable entre cette circulation hydrologique naturelle et les structures sociales, économiques et politiques qui régissent l'usage que font les sociétés des ressources naturelles.

A petite échelle, le concept de la conservation de la matière peut s'appliquer aux zones humides ou à n'importe quel autre écosystème sous la forme d'un bilan d'eau. Ce terme évoque une comptabilité financière, la somme d'argent que vous avez en banque est égale aux entrées (la somme que vous déposez) moins les sorties (la somme que vous retirez pour payer des factures). De la même façon, la quantité d'eau stockée sur une zone humide est égale aux entrées (pluie, débit



Une station de mesure du débit de la rivière Logone, Cameroun.

# Le bilan de l'eau des zones humides

entrant des cours d'eau ou des sources) moins les sorties (écoulement de surface, recharge des aquifères, évaporation). Le bilan de l'eau d'une zone humide peut être résumé par l'équation suivante :

$$dV = P + Q_e + S - E - Q_s - R \pm M \pm H$$

Où :

$dV$  est la variation de volume de l'eau de la zone humide

$P$  sont les précipitations directes sur la zone humide (pluie, neige, rosée etc.)

$Q_e$  est le débit entrant des cours d'eau et d'autres eaux de surface sur la zone humide

$S$  est le débit entrant sur la zone humide des sources et d'autres alimentations par les eaux souterraines

$E$  est l'évaporation des eaux de surface et l'évapotranspiration de la végétation et des sols de la zone humide

$Q_s$  est le débit sortant de la zone humide

$R$  est la recharge des eaux souterraines par la zone humide

$M$  est le mouvement de la marée qui peut correspondre à une entrée sur la zone humide (+) ou à un départ de la zone humide (-)

$H$  est l'influence humaine qui peut se traduire par une entrée sur la zone humide (+) (un apport d'effluent par exemple) ou une sortie de la zone humide (-) (par exemple des prélèvements pour l'irrigation).

La mesure des termes ci-dessus composant le bilan de l'eau des zones humides est décrite en annexe A.

La quantification du bilan de l'eau des zones humides donne des informations sur ses fonctions hydrologiques comme le contrôle des inondations et la recharge des eaux souterraines. Elle indique la ressource en eau potentielle que représente les zones humides pour les usages humains et comme habitats des espèces aquatiques. Lorsque les modèles hydrologiques sont basés sur les bilans d'eau, il est possible de prédire l'impact d'aménagements comme la construction de barrages.



Les stations météo automatiques sont nécessaires pour mesurer les précipitations et l'évaporation.



## La modélisation hydrologique

**Un modèle est une représentation simplifiée des processus essentiels d'un système.**

Les modèles concernant les zones humides varient en fonction de leur objet. Les modèles conceptuels cherchent à trouver des relations simples entre les éléments du cycle hydrologique. L'équation du bilan hydrologique est à la base d'un modèle conceptuel de l'hydrologie d'une zone humide. Par contre, les modèles déterministes essaient de représenter comment agissent les processus physiques, chimiques et biologiques réels. Ces modèles doivent prendre en compte la physique des mouvements de l'eau dans le sol ou l'hydraulique de l'eau circulant sur une plaine d'inondation et mettre en jeu des équations mathématiques différentielles complexes.

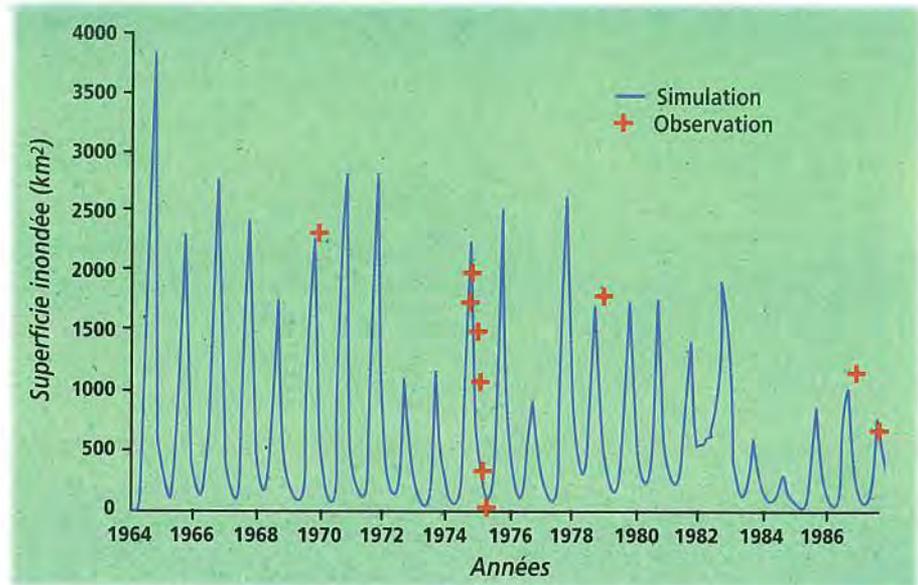
Un tableur informatique a été utilisé pour construire un modèle conceptuel de la zone humide de l'Hadejia-Nguru (Nigeria) en utilisant les mesures des différents éléments du bilan hydrologique<sup>1</sup>. Pendant la période considérée, les départs d'eau (évapotranspiration, recharge des eaux souterraines et débit sortant des rivières) sont généralement plus grands que les apports (débit entrant des rivières et précipitations directes) causant un destockage de l'eau sur la zone humide. L'évaporation est égale à environ 64 % du débit entrant des rivières. La recharge des eaux souterraines est moins importante en volume que l'évapotranspiration mais, pour la plupart des années, elle est plus importante que le débit sortant des rivières. Au total, celui-ci représente 24 % du débit entrant.

Un modèle au pas de temps mensuel basé sur le même concept a également été élaboré et le volume d'eau stocké sur la zone humide a été converti en une prédiction de la surface inondée en se référant à des mesures sur le terrain de la profondeur de l'eau. Pour tester la validité du modèle, ces prédictions ont été comparées avec des images satellitaires et des photographies aériennes représentant l'étendue des inondations. Le modèle avait bien prédit l'étendue des surfaces inondées observées.

Il est important d'avoir un bon modèle pour pouvoir estimer, les années où aucune mesure n'est faite, les réponses hydrologiques de la zone humide, comme l'étendue des inondations. Les modèles prévoient en outre les réponses du système aux changements externes et internes. Ainsi, on peut estimer quel sera l'impact sur l'hydrologie des zones humides et sur les débits sortants, des changements climatiques modifiant l'importance des pluies ou de l'évapotranspiration ou des prélèvements en amont changeant le débit entrant des rivières.

*1 - Hollis & Thompson (1993)*

# Le bilan de l'eau des zones humides



Etendue des zones inondées de l'Hadejia-Nguru prédite par un modèle hydrologique\* comparée à l'étendue réelle des inondations.



Une plaine d'inondation.

M. Acreman

Les bilans d'eau annuels (partiels) des zones humides de l' Hadejia-Nguru<sup>1</sup> (volumes en millions de m<sup>3</sup>).

Années de la retenue	Débit entrant des rivières	Pluie	Evapotranspiration	Recharge des eaux souterraines	Débit sortant des rivières	Eau stockée sur la ZH
1964	7 940	1 524	4 762	2 165	2 424	+ 113
1965	5 185	858	3 864	1 691	1 448	- 960
1966	6 603	759	4 165	1 842	1 664	- 309
1967	5 104	776	3 486	1 825	1 257	- 688
1968	4 710	542	2 990	1 544	1 323	- 605
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
1985	2 485	275	1 690	750	599	- 279
1986	2 657	153	1 477	614	1 290	- 571
1987	2 504	161	1 337	621	683	+ 24

1 - Hollis (1986)



## Les modèles hydrologiques au service de la gestion des zones humides

**Le cycle hydrologique peut être bouleversé de plusieurs manières. Il peut l'être par des aménagements intentionnels comme la construction de barrages destinés à réguler le débit des rivières en stockant l'eau pendant la saison humide pour la restituer pendant la saison sèche ou pour la production de courant électrique. Les changements peuvent aussi ne pas être intentionnels. Par exemple, le réchauffement de la Planète provoqué par la production de gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone, modifie le régime des pluies et l'évapotranspiration.**

Les aménagements hydrologiques peuvent avoir un impact positif ou négatif sur les zones humides. Dans certains cas, ils peuvent être faits pour satisfaire des objectifs de gestion. Par exemple, la création de roselières est primordiale dans beaucoup de pays européens, elles attirent des espèces rares d'oiseaux, comme le Butor, et la vente des roseaux pour couvrir les toits de chaumes procure des revenus. Le maintien de l'eau à une hauteur optimale pour les roseaux et la faune associée est capital. Cela peut se traduire par des pompages pour faire entrer ou sortir l'eau ou pour lui permettre de circuler entre les différents compartiments de la zone humide. La gestion des niveaux d'eau est compliquée par des oppositions entre les besoins, il faut tenir hors d'eau les espèces végétales terrestres comme les saules et les pelouses, assurer de bas niveaux au début de la repousse des roseaux puis les élever progressivement au fur et à mesure que les tiges grandissent. En clair, cela veut dire qu'il faut avoir une connaissance approfondie du bilan hydrologique, y compris du taux d'évapotranspiration des roseaux aux différents stades de leur croissance.

Des aménagements hydrauliques du bassin alimentant une zone humide peuvent avoir un effet négatif sur la zone humide elle-même. Par exemple, le bilan hydrologique du lac Ichkeul en Tunisie a subi l'impact de la construction de six barrages sur son bassin versant et d'un vannage supprimant les interactions entre le lac et la mer<sup>1</sup>. Avant 1984, en hiver, les entrées d'eau douce (écoulement de surface et pluie) dominaient, le niveau du lac s'élevait et l'eau submergeait les rives. En été, comme les pluies sont rares et l'évaporation élevée, l'eau du lac tombait à un niveau tellement bas que l'eau de mer pouvait entrer. Le bilan de l'eau était principalement régi par l'évaporation et le jeu des marées. Du fait des prélèvements pour l'irrigation et autres usages, il est prévu que les entrées d'eau douce

*1 - Hollis (1986)*

# Le bilan de l'eau des zones humides

seront réduites de 180 millions de m<sup>3</sup> et que l'évaporation sur les retenues des barrages occasionnera une perte supplémentaire de 70 millions de m<sup>3</sup> alors qu'on empêchera les entrées d'eau de mer (ce qui affectera également la salinité).

D'autres facteurs hydrologiques peuvent être déterminés à partir des données du bilan de l'eau. Par exemple, il est possible de calculer le temps qu'il faut pour que la totalité de l'eau du lac soit changée, c'est ce qu'on appelle le temps de renouvellement ou temps de séjour. C'est une mesure de la rapidité avec laquelle l'eau est remplacée, cette notion est importante à bien des égards, la qualité de l'eau, par exemple, en dépend. Cette notion de qualité de l'eau revêt un caractère particulier à Ichkeul où l'eau est douce en hiver mais se sale en été. Le volume du lac est de 90 millions de m<sup>3</sup>, à l'état naturel l'eau était entièrement renouvelée 3 à 4 fois dans l'année, ce qui se traduisait par une vidange rapide des sédiments, des nutriments, des sels et autres polluants. Quand tous les barrages seront achevés, le lac ne sera complètement vidé qu'une fois tous les cinq ans, d'où accumulation des sédiments et du sel et risque d'eutrophisation\* par rétention des nutriments.

Dans les conditions du régime hydrologique naturel du lac Ichkeul, la pêche et les activités pastorales ont une valeur économique qui dépasse de beaucoup les bénéfices qu'on peut attendre de l'utilisation de l'eau pour l'irrigation intensive pour laquelle les barrages ont été construits<sup>1</sup>. Le revenu de la pêche à lui seul est évalué à 650 000 US\$, alors que la fonction d'assainissement des eaux représente quelque 170 000 US\$.

**Le bilan de l'eau du lac Ichkeul, (volumes en millions de m<sup>3</sup>)<sup>2</sup>.**

	Entrées		Sorties		Temps de renouvellement (débit sortant/volume)
Conditions hydrologiques naturelles du lac (jusqu'en 1984)	Débit entrant des rivières	300	Débit sortant	330	330/90 = 3,6 fois par an
	Pluie	50	Evaporation	80	
	Entrées d'eau de mer	60	Total	410	
	Total	410			
Conditions hydrologiques du lac prévues après la construction de 6 barrages (après 2000)	Débit entrant résiduel des rivières*	50	Débit sortant	20	20/90 = 0,2 fois par an
	Pluie	50	Evaporation	80	
	Entrées d'eau de mer	0	Total	100	
	Total	100			

\* Calcul du débit entrant résiduel des rivières. L'apport des rivières au lac sera réduit de 250 millions de mètres cubes du fait des prélèvements pour l'irrigation et autres usages (180) et des pertes par évaporation sur les lacs de barrage (70).

1 - Thomas & Hollis (1991)

2 - Hollis (1986)

Les aménagements hydrauliques d'un bassin par la construction de barrages, ne nuisent pas toujours aux zones humides. Plusieurs retenues artificielles dans le Royaume Uni, dont Glahouse Reservoir en Ecosse et Rutland Water en Angleterre sont des zones humides artificielles créées pour l'alimentation en eau domestique mais, compte tenu de leur importance écologique, elles ont été désignées comme sites Ramsar et Zones de protection spéciale (sous la directive de l'Union européenne 79/409). Le lac Kariba, en Afrique du Sud, créé par la construction du barrage Kariba, abrite une importante pêche intérieure et son rivage tout entier a été classé Parc de loisir, car la présence d'eau pendant la saison sèche attire de grands troupeaux de buffles, d'élans et d'autres espèces. Toutefois, en aval, le barrage a eu des effets néfastes sur l'écologie et sur la santé des populations locales du fait de la prolifération d'espèces vectrices de maladies, comme les gastéropodes.

Dans la plupart des décisions d'aménagements, l'évaporation n'est considérée que comme une fonction négative des zones humides et les estimations des ressources en eau ne la perçoivent que comme une perte. Pourtant, la transpiration fait partie du moteur qui assure la croissance des plantes qu'elles soient cultivées ou sauvages. Il a été suggéré que de nombreuses pluies à l'intérieur des terres ont pour véritable origine l'eau évaporée localement et non l'humidité océanique<sup>1</sup>. Cette idée a été étudiée au Sahel où l'on a admis qu'elle pouvait avoir lieu<sup>2</sup>. Dans quelques zones humides, l'eau fait l'objet d'un recyclage interne et stabilise le microclimat. Dans les vallées du Sud-ouest de l'Ouganda, la conséquence de la disparition des zones humides sur le microclimat local a beaucoup pesé sur la décision

Les richesses biologiques du lac de barrage Kariba au Zimbabwe attirent de nombreux touristes.



M. Bureau / Bios

1 - Hare (1985)  
2 - Savenije & Hall (1993)

# Le bilan de l'eau des zones humides



Le lac Kariba.

M. Acreman

d'interdire le drainage des zones humides prise en 1986. Tout cela montre que les aménagements des zones humides peuvent avoir d'importantes répercussions. Par exemple, il est dit que l'évaporation sur les zones humides du Sudd dans le sud du Soudan (environ 16 milliards de m<sup>3</sup> par an) est à l'origine des pluies qui tombent sur les montagnes de l'Ethiopie. Si cela est vrai, la construction du canal Jonglei qui a pour but de capter la zone humide, réduira le volume évaporé de 4,7 milliards de m<sup>3</sup> et raréfiera les pluies en Ethiopie.



# Crues et inondations

**Les inondations sont véritablement le Dr Jeckel et Mr Hyde des processus environnementaux. Il est fréquent que les manchettes des journaux nous rappellent qu'elles peuvent être très destructrices, faisant de nombreux morts et causant de gros dégâts matériels.**

On reconnaît moins facilement le rôle créatif important qu'elles jouent dans l'irrigation naturelle, la morphologie du paysage, le maintien de la biodiversité et la fertilisation des sols des plaines d'inondation. La plupart des gens ne considèrent que les aspects négatifs des

Les activités humaines dans les bassins versants, ici au Népal, sont un facteur déterminant pour l'intensité des crues en aval.



La Loire.

J. Roche

inondations. Cela n'est pas étonnant car rien qu'en 1998 en Chine, elles ont tué 3 000 personnes, causé des dégâts pour 20 milliards de US\$ et affecté le cinquième de la population du pays. En France, on évalue les dommages causés par les inondations sur le cours moyen de la Loire à quelque 400 millions de francs par an<sup>1</sup>. Ceci explique que, partout dans le monde, on ait investi beaucoup

## Qu'est ce qu'une inondation ?

Lorsque le niveau d'un cours d'eau s'élève au dessus d'un certain seuil, on dit qu'il est en crue. Si le niveau s'élève au dessus de la crête des berges, l'eau s'épanche sur les terrains riverains, il y a inondation. Une inondation est généralement définie comme "la submersion de terrains normalement secs". Une définition plus précise est difficile à donner pour trois raisons. Premièrement, le terme "normalement sec" est plutôt ambigu parce que certaines zones riveraines peuvent être inondées tous les ans, alors que d'autres peuvent l'être souvent mais moins fréquemment, et d'autres encore le sont très rarement. Deuxièmement, la hauteur des

berges d'une rivière varie d'un point à l'autre et les hauts niveaux peuvent provoquer une inondation en un endroit alors qu'ailleurs le cours d'eau ne quitte pas son lit mineur. Troisièmement, les berges sont très souvent en pente douce ou constituent une série de paliers plutôt qu'une limite nette entre le lit du cours d'eau et la plaine d'inondation. Une inondation atteint un point critique quand l'eau submerge des terres agricoles, des routes et des voies ferrées ou entre dans les habitations et les usines. Pour l'hydrologue, l'outil de base de l'analyse de la montée des eaux d'un cours d'eau est l'hydrogramme de crue.

1 - Torterotot (1998)

# Crues et inondations

de temps et d'argent pour contrôler les inondations pour que les zones riveraines des rivières puissent être exploitées pour l'agriculture, l'industrie et l'urbanisme.

Les inondations sont un processus naturel qui fertilise les sols des plaines d'inondation. C'est l'occupation de celles-ci par l'Homme qui a fait un problème de la notion d'inondation.

Traditionnellement, les responsables de la protection contre les inondations ont été des ingénieurs formés à rechercher des solutions structurelles aux problèmes, par exemple en construisant des barrages et des digues ou en rectifiant le tracé des cours d'eau. Cette conception a souvent eu bien des inconvénients. Par exemple, l'isolement des plaines d'inondation par l'endiguement des rivières a apporté une protection locale, mais elle a aggravé les risques d'inondation en aval. De plus, quand les digues submergées n'ont pu éviter que l'eau n'envahisse les plaines riveraines, elles empêchent l'eau de retourner à la rivière, ce qui prolonge et intensifie l'inondation. De tels problèmes ont été bien mis en évidence pendant les crues du Mississippi en 1993. Celles-ci ont amené le gouvernement américain à reconsidérer le fondement même de sa stratégie de défense contre les inondations. Ces événements ont éveillé l'attention sur l'intérêt de solutions alternatives, comme la restriction des constructions à proximité du fleuve ou l'exploitation des fonctions naturelles de son bassin, incluant le stockage sur les zones humides pour réguler des débits de crues.

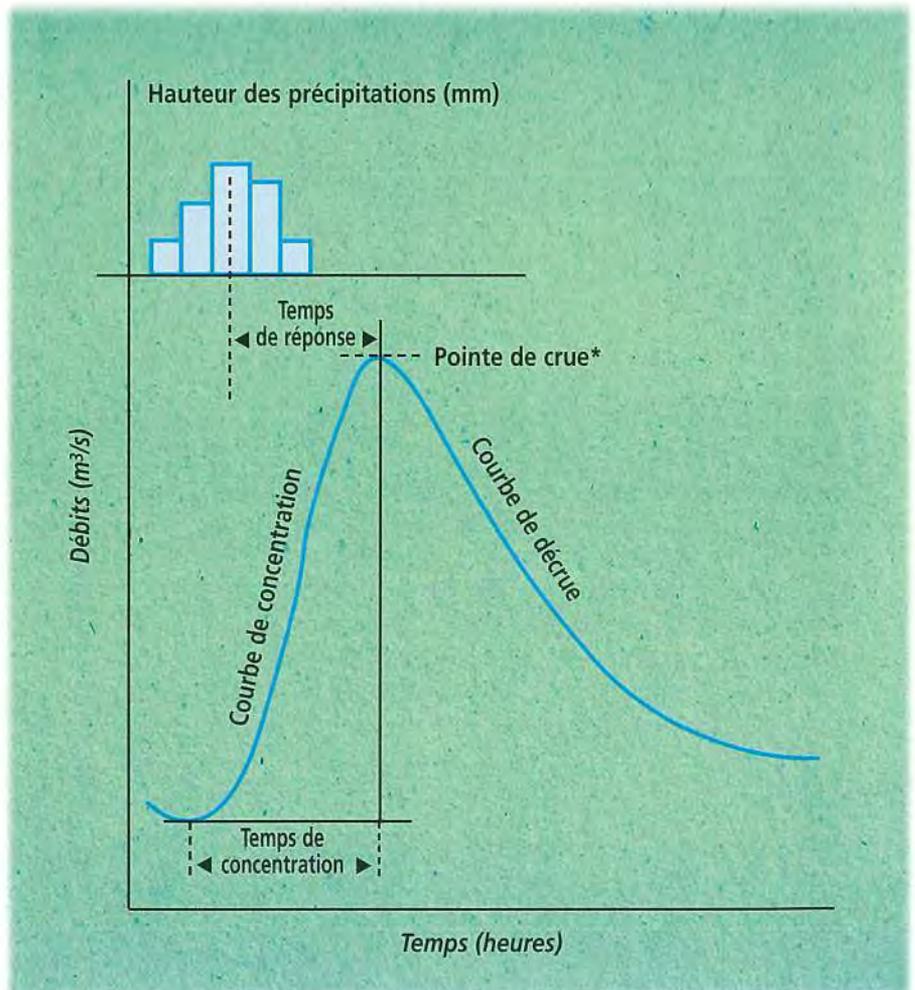
Contrairement à la perception négative, le concept du retour périodique des inondations voit dans celles-ci l'élément vital du cours d'eau, il associe les écosystèmes et les communautés rurales qui en dépendent. Grâce à leurs débordements périodiques, les principaux cours d'eau

## Les inondations : danger ou avantage

Les inondations sont une réalité, mais l'estimation de leur danger potentiel dépend de deux facteurs. Le premier est l'hydrologie physique du bassin versant et l'hydraulique du lit du cours d'eau et de sa plaine d'inondation. Ces caractéristiques déterminent la fréquence, l'importance et la durée des inondations sur les terrains riverains. Le second facteur a trait à l'usage du sol et à la perception sociale des inondations. Elle représente la sensibilité des terrains aux inondations en termes économique

et social. Ce facteur socio-économique peut être positif si l'eau d'inondation permet une irrigation naturelle, sert d'habitat aux poissons ou fertilise le sol. Dans ce cas, les inondations sont bénéfiques. Au contraire le facteur socio-économique peut être négatif si des propriétés industrielles ou résidentielles sont endommagées ou détruites. S'il y a incompatibilité entre les facteurs physiques (le hasard) et le facteur socio-économique (la vulnérabilité), les inondations sont un danger.

du monde, comme l'Amazone, le Zambèze, le Nil, le Mékong et le Gange, entretiennent sur leurs plaines d'inondation des écosystèmes aquatiques d'une productivité exceptionnelle. Dans bien des cas, le contraste est aigu avec les territoires voisins arides et semi-arides où la saison sèche est longue et intense. Pendant des siècles, ces plaines d'inondation ont joué un rôle capital pour l'économie rurale de la région, fournissant des terres agricoles fertiles à une population nombreuse. Les eaux d'inondation apportent au sol l'humidité et les nutriments essentiels et fournissent des lieux de reproduction à un grand nombre de poissons. L'eau qui s'infiltre sous la plaine d'inondation recharge les aquifères qui alimentent des puits loin de la zone inondée. Quand les eaux d'inondation se retirent, on cultive le sol et pendant la saison sèche, une humidité résiduelle persiste qui entretient des pâturages essentiels pour les troupeaux migrants et la faune sauvage.



L'hydrogramme de crue.

## Quelle est la cause des inondations ?

**Les inondations sont un phénomène naturel. Le lit des cours d'eau est naturellement calibré pour contenir un débit moyen.**

Toutefois, des débits plus importants dépassant la capacité du chenal peuvent se produire périodiquement. L'eau alors franchit les berges et inonde les terrains adjacents. Les inondations ne devraient pas être considérées comme des cataclysmes, mais simplement comme faisant partie des variations naturelles des processus hydrologiques.

Les crues sont généralement la réponse à de fortes pluies ou à la fonte des neiges ou à la combinaison des deux, mais elle peuvent aussi résulter d'autres facteurs comme la rupture d'un barrage naturel ou construit par l'homme. En règle générale, les inondations sur les grands bassins sont provoquées par de longues périodes pluvieuses durant des semaines ou des mois, alors que sur les petits bassins, elles sont normalement causées par des pluies brèves mais intenses comme celles tombant au cours d'orages. L'importance des crues est aussi déterminée par la proportion des pluies atteignant les cours d'eau et par la vitesse du ruissellement. Les arbres et les autres types de végétation dense aident à absorber l'eau et facilitent son infiltration dans le sol, ce qui réduit la quantité d'eau qui ruisselle et accroît la durée de son trajet jusqu'aux cours d'eau. Les sols accaparés par les aménagements urbains (avec leurs grandes surfaces de toits, de routes, de parcs pour automobiles etc.) ou gelés ou compactés par le piétinement du bétail ou les engins agricoles, ont tendance à s'imperméabiliser. Dans ce cas, une grande partie des pluies atteint rapidement les cours d'eau par ruissellement ce qui est un facteur de haut risque d'inondation.

La déforestation et le surpâturage des pelouses aggravent le risque d'inondation.



La déforestation dans l'Himalaya est un facteur aggravant des inondations du Gange et du Bramapoutre en aval au Bangladesh<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> - Agarwal & Chak (1991)

## Fréquence des crues

De même que l'intensité des chutes de pluie varie d'un orage à l'autre, l'importance des crues va de très fréquentes mais mineures augmentations du débit des cours d'eau jusqu'à des événements majeurs mais rares au cours desquels des zones de grande étendue sont inondées. L'amplitude des crues est exprimée en terme de débit de la rivière (habituellement en  $m^3/s$ ) ou en terme de hauteur de crue (m). La fréquence des crues est exprimée en terme de probabilité, ou de chance, qu'elle se produise. Une crue centennale ne se produit en moyenne qu'une fois tous les cent ans, elle n'a qu'une chance sur cent de se produire au cours d'une année quelconque.

La relation entre l'amplitude et la rareté des crues est un outil que les hydrologues utilisent dans leurs calculs, appelé "courbe de fréquence des crues\*\*".

La courbe de fréquence des crues de l'Oued Isser en Algérie<sup>1</sup>.

Il est remarquable que deux crues d'importance semblable sont beaucoup plus fortes que toutes les autres, ce qui montre la grande variabilité des crues dans la région méditerranéenne.

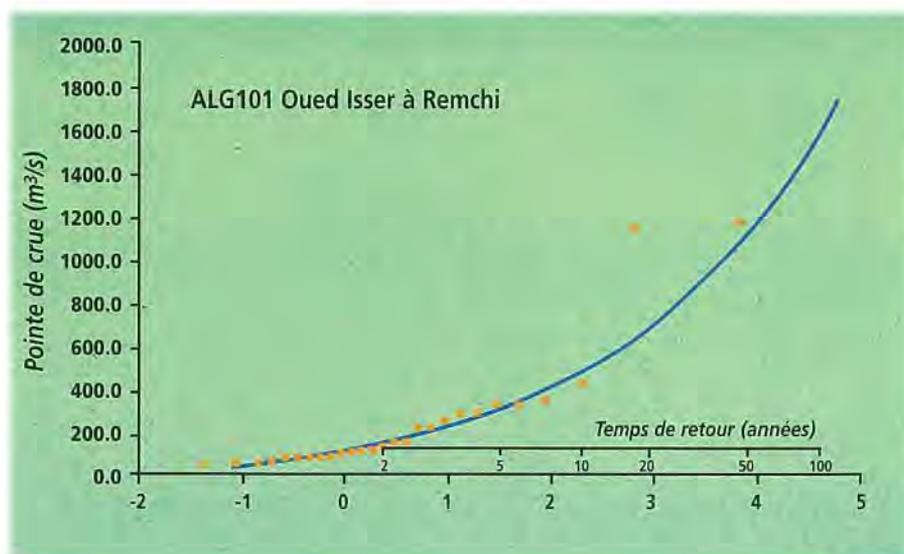
Cela montre aussi le danger qu'il y a à se référer aux données de courtes périodes pour la conception des ouvrages. Si le cours d'eau n'avait été suivi que sur une courte période ne révélant que les crues les plus petites et les plus fréquentes et masquant les plus importantes, plus rares, la courbe aurait eu un aspect tout différent. La crue centennale aurait été beaucoup plus basse et les digues de protection ou les ponts auraient été sous-dimensionnés.

Généralement plus un ouvrage est construit solidement, plus il est cher, si bien que les projets de ponts et de digues répondent à des normes pour que les ouvrages puissent résister aux crues d'une certaine sévérité.

Ainsi, une digue édiflée aux normes d'une crue centennale ne sera en moyenne submergée qu'une fois tous les cent ans.

Comme des dommages causés par les ruptures de barrages sont particulièrement catastrophiques, la construction de ces ouvrages répond généralement à un cahier des charges des plus rigoureux.

Les barrages sont calculés pour résister à une crue ayant une période de retour de 10 000 ans ou plus.



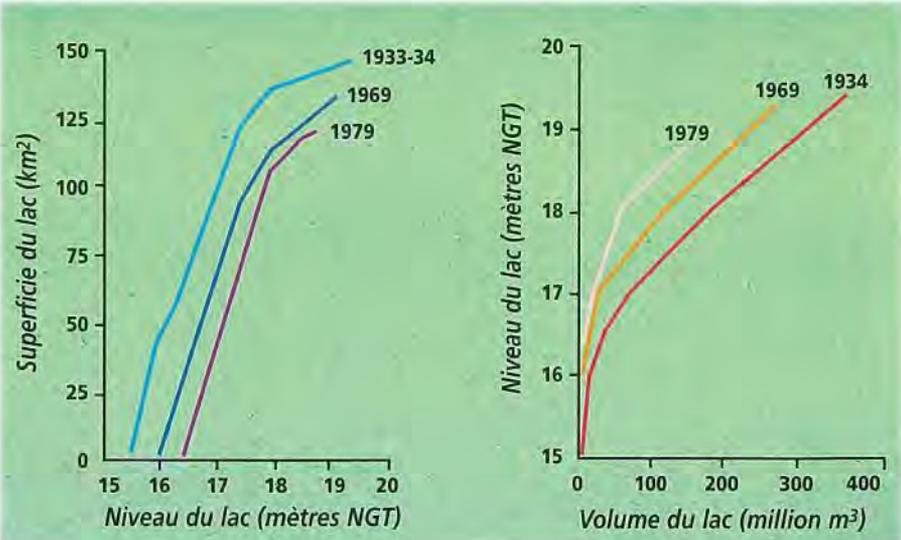
1 - Meigh & Farquharson (1985)

## Les zones humides et les inondations

**Bien des preuves, tant anecdotiques que vérifiées, suggèrent l'importance du rôle que jouent les zones humides dans la taille et la durée des inondations.**

Par exemple, au centre de l'Amérique du Sud, pendant la saison humide, la zone humide du Pantanal absorbe les crues du fleuve Parana, réduisant ainsi le risque d'inondations en aval<sup>1</sup>. De même, en Asie du Sud-Est, en période de hautes eaux, le Mékong s'épanche dans la zone humide du Tonlé Sap qui peut stocker quelque 46 milliards de m<sup>3</sup> d'eau<sup>2</sup>, ce qui réduit considérablement le risque d'inondation de Phnom Penh, la capitale du Cambodge.

Dans la région méditerranéenne, de nombreuses zones humides contribuent également à réduire les risques d'inondation en aval. L'Algérie en donne un excellent exemple avec le lac Fetzara qui occupe une dépression peu profonde de 13 700 ha dans la plaine d'inondation de l'Oued Seybouse. L'importance de ce lac dans la régulation des crues n'est apparue qu'après son drainage complet dans les années 1930, lorsqu'il n'a plus pu stocker les excédents d'eau de l'oued. Dans les années 1980, des inondations ont provoqué d'importants dégâts en aval. Depuis, le vannage barrant l'émissaire reste fermé en hiver pour retenir les eaux de crue qui sont relâchées régulièrement pendant le printemps et l'été. L'efficacité des processus naturels de la zone humide a été recréée artificiellement. En Tunisie, le Sebkhet Kelbia remplissait la même fonction de stockage des crues réduisant les risques d'inondation à Kairouan en aval. Depuis 1933, sa



Les relations entre la profondeur, la surface et le volume du Sebkhet Kelbia en Tunisie, montrant les effets d'un colmatage progressif<sup>3</sup>.

1 - Bucher et al (1993)  
2 - Van der Linden (1990)

3 - Hollis (1992)

## La réduction des crues par les zones humides

En France, la Saône, affluent du Rhône, illustre très bien le rôle que jouent les zones humides comme régulateurs de crue. Les débits sont enregistrés à Mâcon et à Crozon-au-Mont-d'Or. Entre le 1er novembre 1975 et le 29 avril 1976, il y a eu deux fortes crues et plusieurs autres plus petites. Le cours de la rivière entre les deux stations de mesure du débit est jalonné de plusieurs plaines d'inondation. En période de basses eaux et pendant les petites crues (inférieures à 900 m<sup>3</sup>/s), le débit est plus important en aval qu'en amont du fait de plusieurs affluents qui grossissent la Saône entre les deux stations de mesure. Au contraire, pendant les grandes crues (supérieures à 900 m<sup>3</sup>/s), le débit en aval est moins

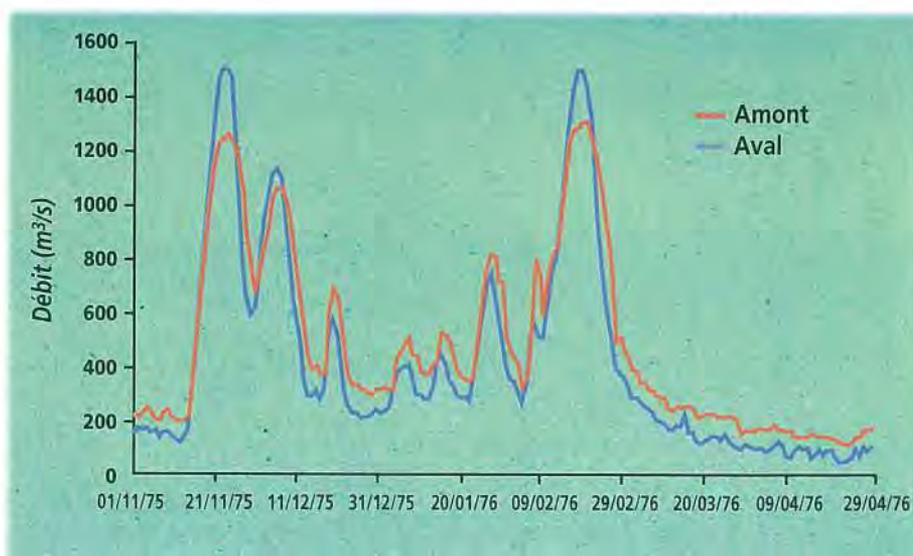


J. Roché

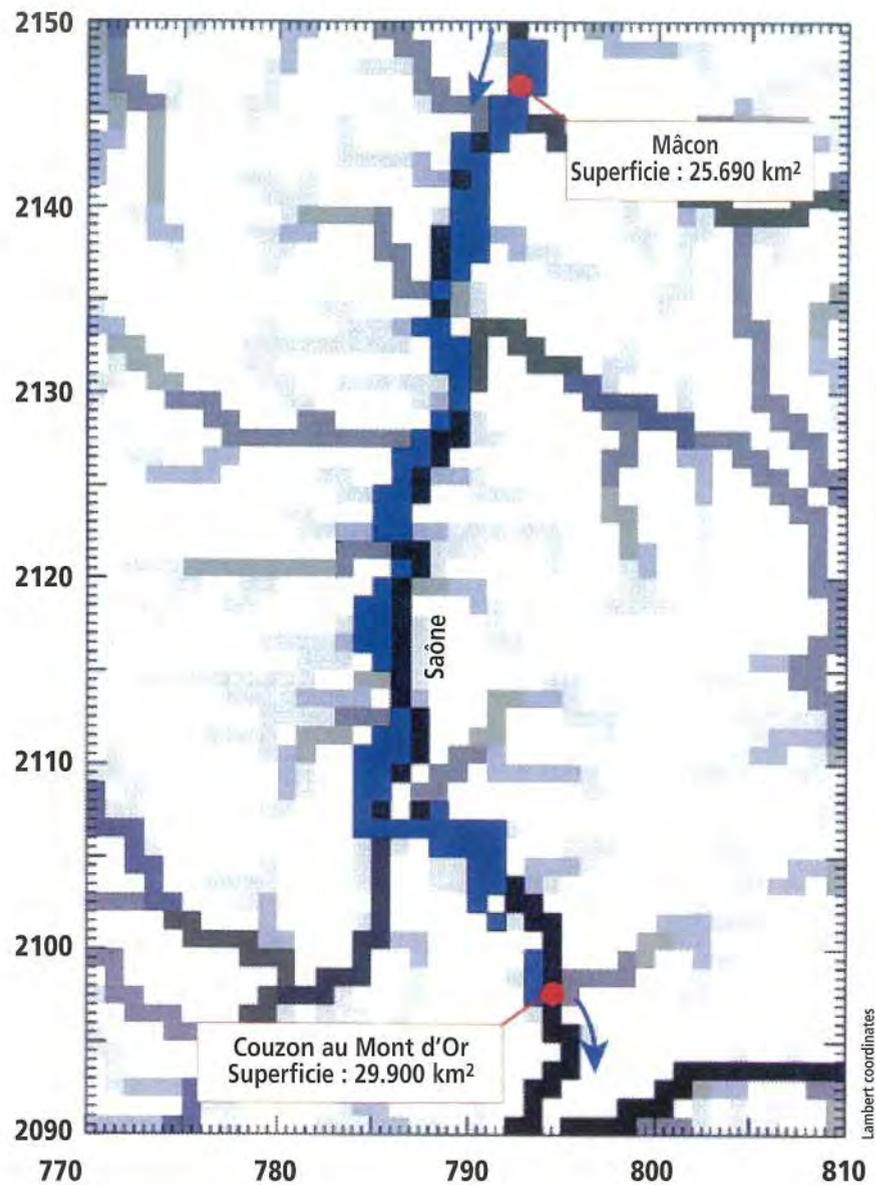
Champs de céréales inondés dans la plaine de la Saône.

important qu'en amont parce que les plaines d'inondation ont stocké une partie de l'eau de crue. Ces zones humides jouent donc un rôle capital dans la réduction des pics de crue, et par là, assurent une importante protection contre les inondations des villes en aval comme Lyon.

Débit de la Saône mesuré du 1er novembre 1975 au 29 avril 1976 à deux stations (en amont en bleu et en aval en rouge), montrant l'effet réducteur des plaines d'inondations sur les crues<sup>1</sup>.



# Crues et inondations



La carte de la vallée de la Saône d'après un système d'information géographique montrant l'étendue des plaines d'inondation<sup>1</sup>.

1 - Sauquet, comm. pers.



capacité a été réduite des deux-tiers à cause de la sédimentation provoquée par une sérieuse érosion des sols en amont du bassin. A la fin des années 1960 et au début des années 1970 sa capacité de stockage s'est montrée insuffisante pour atténuer les grandes inondations qui ont fait de nombreux morts et ont coupé les routes nord-sud principales, les voies de chemin de fer et les lignes téléphoniques.

Pendant des années, les ingénieurs hydrauliciens et les hydrologues ont étudié la circulation de l'eau dans le lit des cours d'eau et sur les plaines d'inondation. Lorsque l'eau coule vers l'aval, la friction entre l'eau en mouvement et le fond du lit réduit la vitesse du courant et de ce fait le niveau monte dans le cours d'eau. Ce phénomène a deux effets, le pic de débit diminue pendant une crue au fur et à mesure que l'onde de crue se propage vers l'aval (sauf si s'ajoute un affluent important) et la durée de l'hydrogramme de crue augmente. Ces deux effets sont amplifiés si pendant une crue l'eau s'épanche sur la plaine d'inondation adjacente au cours d'eau, puisque l'eau s'étale sur une plus grande surface. Ils le sont encore plus si la plaine d'inondation est fortement perméable, comme on en trouve par exemple en Inde sur des sols sableux<sup>1</sup>, du fait des pertes d'eau par infiltration.

Cette importante fonction de "réduction des inondations" des zones humides a une valeur directe claire. Ainsi, au Massachusetts aux Etats-Unis, la vallée du cours principal de la rivière Charles est jalonnée de 3 800 ha de zones humides où sont stockées naturellement les eaux de crue. On a estimé que si on avait détruit ces zones, l'accroissement des dommages causés par les inondations aurait coûté 17 millions de dollars US par an<sup>2</sup>. On en a conclu que la conservation des zones humides était l'option la plus économique pour se protéger des inondations. Dans la plupart des cas, l'inondation des plaines d'inondation est provoquée par le débordements des cours d'eau. Cela n'est toutefois pas toujours vrai. La plaine d'inondation du cours central de l'Amazone est noyée par l'élévation du niveau des eaux souterraines qui affleurent. Dans ce cas, la plaine d'inondation aggrave la crue plutôt qu'elle ne la réduit<sup>3</sup>.

1 - Leblois & Sauquet (1997)

2 - US Corps of Engineers (1972)

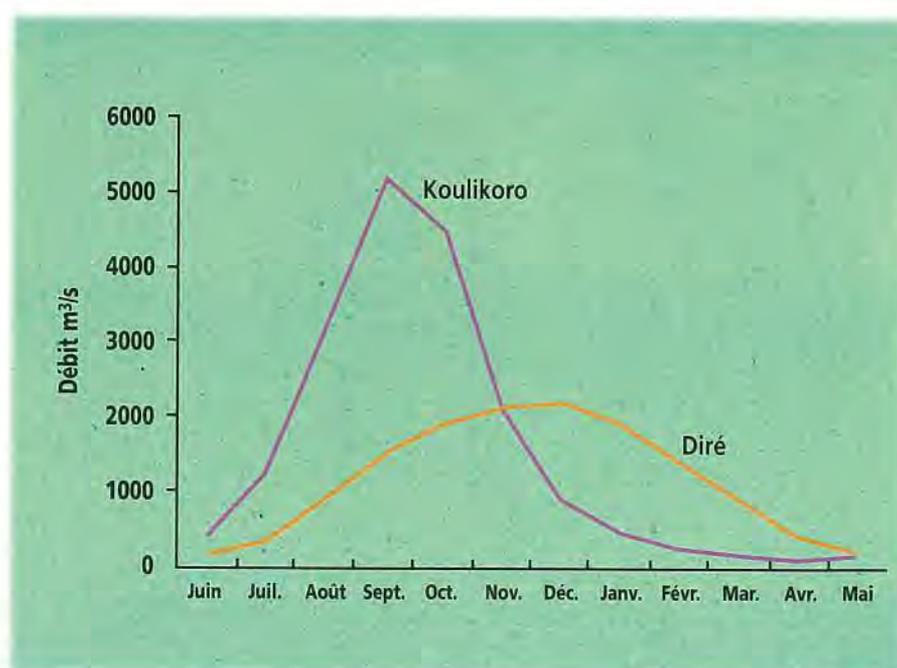
3 - Hodnett et al (1997)

## La désynchronisation des crues\*

**Le processus décrit ci-dessus réduit l'importance des pics de crue, il en retarde également l'arrivée.**

Cela donne plus de temps pour l'évacuation des gens, du bétail ou la protection des biens là où les inondations peuvent causer des dommages. Là où elles sont bénéfiques, comme dans le delta intérieur du Niger au Mali, les agriculteurs ont tiré parti de la période des pluies et des inondations. Le Niger prend sa source en Guinée, à seulement 200 km de l'Océan Atlantique, dans les monts Fouta Djallon où les pluies dépassent 2 000 mm par an. Dans sa partie la plus septentrionale en bordure du désert saharien du Mali, la hauteur annuelle des pluies n'est que de 200 mm environ<sup>1</sup>. Le pic de crue entrant dans le delta à Koulikoro est généralement d'environ 6 000 m<sup>3</sup>/s, mais il peut atteindre jusqu'à 8 000 m<sup>3</sup>/s. A Diré, le pic du débit sortant est d'environ 2 300 m<sup>3</sup>/s. C'est un exemple classique d'écoulement à travers un delta avec réduction des pics de crue et une durée des hautes eaux plus grande à la sortie qu'à l'entrée.

Sur tout le delta, la saison humide s'étend de mai à octobre, la plupart des pluies tombant entre juin et septembre. L'hydrogramme de l'écoulement à l'entrée correspond pratiquement à la saison des pluies, avec peut-être un mois ou presque de décalage, le pic se situe à la fin de la période pluvieuse. Quant à l'hydrogramme de l'écoulement à la sortie, il est beaucoup plus étalé et plus plat, en outre il est décalé



Débit moyen entrant sur le delta intérieur du Niger au Mali à Koulikoro et débit sortant à Diré. Hydrogrammes pour la période allant de 1979 à 1987, incluant deux années de sévère sécheresse.



dans le temps de deux à trois mois. Ceci n'est pas seulement vrai qu'à Diré, il l'est aussi plus en aval à 600 ou 700 km de là, à Niamey et à Malanville sur la frontière du Bénin.

Dans cette zone très aride, les agriculteurs ont tiré avantage de cet aplatissement et de cet allongement de l'hydrogramme de crue pour leurs pratiques culturales. Ils plantent du riz vers la fin de la saison des pluies en juillet. Le temps qui s'écoule entre les pluies et les inondations donne aux graines le temps de germer et aux plantules de s'implanter. Puis l'inondation s'installe et permet la croissance rapide des jeunes plants. La récolte a lieu en décembre à la décrue. Lorsque la crue se retire, elle laisse derrière elle une bande de sol saturé d'eau. Un mois ou deux avant la saison des pluies, des cultures sèches sont plantées sur cette bande où l'humidité est suffisante pour que les plantes commencent à pousser et installent leur système racinaire. L'arrivée de la saison des pluies leur permet de poursuivre leur croissance jusqu'à la récolte. L'importance de ces activités n'est pas seulement limitée à leur valeur économique intrinsèque, elle réside également dans le fait qu'elles permettent de faire simultanément un certain nombre d'options culturales différentes, ce qui, compte tenu de la variabilité du climat et de la variabilité du rendement des récoltes qui en découle, augmente les chances d'avoir suffisamment de nourriture.



Dans le delta intérieur du Niger au Mali les agriculteurs profitent du décalage des pluies et des inondations.

M. Acreman

## **Les méthodes traditionnelles pour la protection contre les inondations**

**A travers toute l'histoire de l'humanité, l'industrialisation, l'expansion urbaine et l'intensification de l'agriculture ont marché de paire avec une gestion de l'eau toujours plus forte. Par exemple, des canaux d'irrigation élaborés des Andes aux canaux d'exploitation des eaux souterraines (Kariz) du Pakistan.**

Certains systèmes, comme les prairies inondables, en fonction en Europe depuis le Moyen-âge, sont maintenus en eau pour améliorer la production de foin et des cultures, mais d'une façon plus contrôlée.

De rapides avancées technologiques, particulièrement au cours du XXe siècle, ont conduit à penser que l'homme est en mesure de contrôler la nature et d'éliminer les risques naturels comme les inondations. La protection contre les inondations fut confiée à des ingénieurs qui ont construit des digues et des barrages, ou ont élargi et rectifié le lit des cours d'eau pour protéger les zones riveraines. Bien qu'elle ait eu un certain succès, cette méthode ne manque pas d'inconvénients.

En premier lieu, l'accroissement de la dimension du lit ou la construction de digues sur une section de rivière ne réduit pas le débit. Cela empêche l'épanchement et le stockage du trop-plein d'eau sur la plaine d'inondation et élimine l'atténuation des crues. Donc, les endiguements offrent une protection contre les inondations immédiatement derrière ces défenses, mais l'eau de crue doit aller quelque part. En pratique, les endiguements ne font que transférer le problème en aval où ils provoquent des pics de crue plus grands et aggravent les dégâts causés par les inondations et l'érosion des berges. Cela fut le cas pour le Rhin en 1994. L'existence de digues en amont amplifia les sérieuses inondations qui frappèrent les villes situées sur le cours inférieur du fleuve. Les digues en isolant ce dernier de sa plaine d'inondation ont protégé des terres agricoles, mais ont empêché le fleuve d'accéder à ses bassins naturels de stockage. En 1995, deux grands bassins de stockage des crues ont été créés sur la rive allemande du Rhin par suppression des digues, dans le cadre d'un programme pour réduire les dommages causés par les inondations en aval et restaurer les écosystèmes dégradés de la plaine d'inondation. Second inconvénient de ces défenses contre les crues, elles donnent souvent un faux sentiment de sécurité qui se traduit par une exploitation intensive des terrains qu'elles protègent.



Mais elles n'offrent qu'un certain niveau de protection. Que se produise une crue plus sévère que celles prévues dans la conception des digues et l'eau passe par dessus. Les inondations sont alors souvent plus dévastatrices que si les digues n'existaient pas. Cela s'est produit au Bangladesh où agriculture intensive et urbanisation se sont développées à l'abri de digues qui n'ont pas résisté à des crues plus fortes que prévu et qui ont provoqué des inondations catastrophiques très destructrices et meurtrières.

Le troisième inconvénient tient au fait que l'eau qui est passée par dessus les digues ne peut pas regagner le lit du cours d'eau quand s'amorce la décrue. Ce problème a été très net pendant les inondations du Mississippi de 1993 qui ont causé des dégâts pour 12 à 16 milliards de dollars et tué 38 personnes. L'eau a séjourné sur les terres agricoles, dans les maisons et sur les routes longtemps après la décrue du fleuve. Cela a incité le gouvernement américain à repenser sa méthode de lutte contre les inondations. Le Directeur adjoint du corps des ingénieurs américains a déclaré "il est peu probable que vous voyiez davantage de retenues ou de levées sur le plus grand système fluvial des Etats-Unis".

Le quatrième problème tient au fait que les barrages et les endiguements empêchent les processus naturels de régénération comme la fertilisation des sols des terres agricoles riveraines par les dépôts périodiques de limons pendant la période d'inondation. De plus, les barrages en amont peuvent contribuer à la protection contre les inondations, mais ce sont des pièges à sédiments et l'eau qui en sort est pratiquement dépourvue de matières en suspension. Ceci réduit l'effet bénéfique des inondations et rend l'eau plus érosive pour les rives et le lit des cours d'eau.



Péniches sur le Mississippi.

## Vers une nouvelle conception du rôle des inondations

**On commence à considérer plus volontiers les inondations comme des processus naturels dont on peut tirer pas mal de profits et que les dangers qu'elles représentent sont le fait des hommes qui vivent et construisent sur la plaine d'inondation.**

Trois idées fortes sont au centre de cette nouvelle conception du rôle des inondations : globalité, intégration et gestion.

- globalité, parce que chaque bassin devrait être considéré dans son entier de façon à ce que l'aménagement d'une de ses parties n'ait pas d'effet néfaste sur les autres. Cette idée inclut le "concept du continuum rivière" qui considère que dans un cours d'eau tous les processus sont liés entre eux de l'amont à l'aval, et le "concept du retour périodique des inondations" qui prend en compte les interactions entre les cours d'eau et leurs plaines d'inondation ;
- intégration, parce qu'il faudrait que collaborent toutes les parties prenantes, c'est-à-dire les différentes organisations et institutions responsables de ou intéressées par l'eau ;
- gestion, et non pas aménagement, parce qu'on devrait laisser les plaines d'inondation jouer leur rôle naturel et, au lieu de protéger les zones vulnérables, y décourager toute nouvelle mise en valeur et inciter à transférer certaines activités sur les terrains plus hauts.

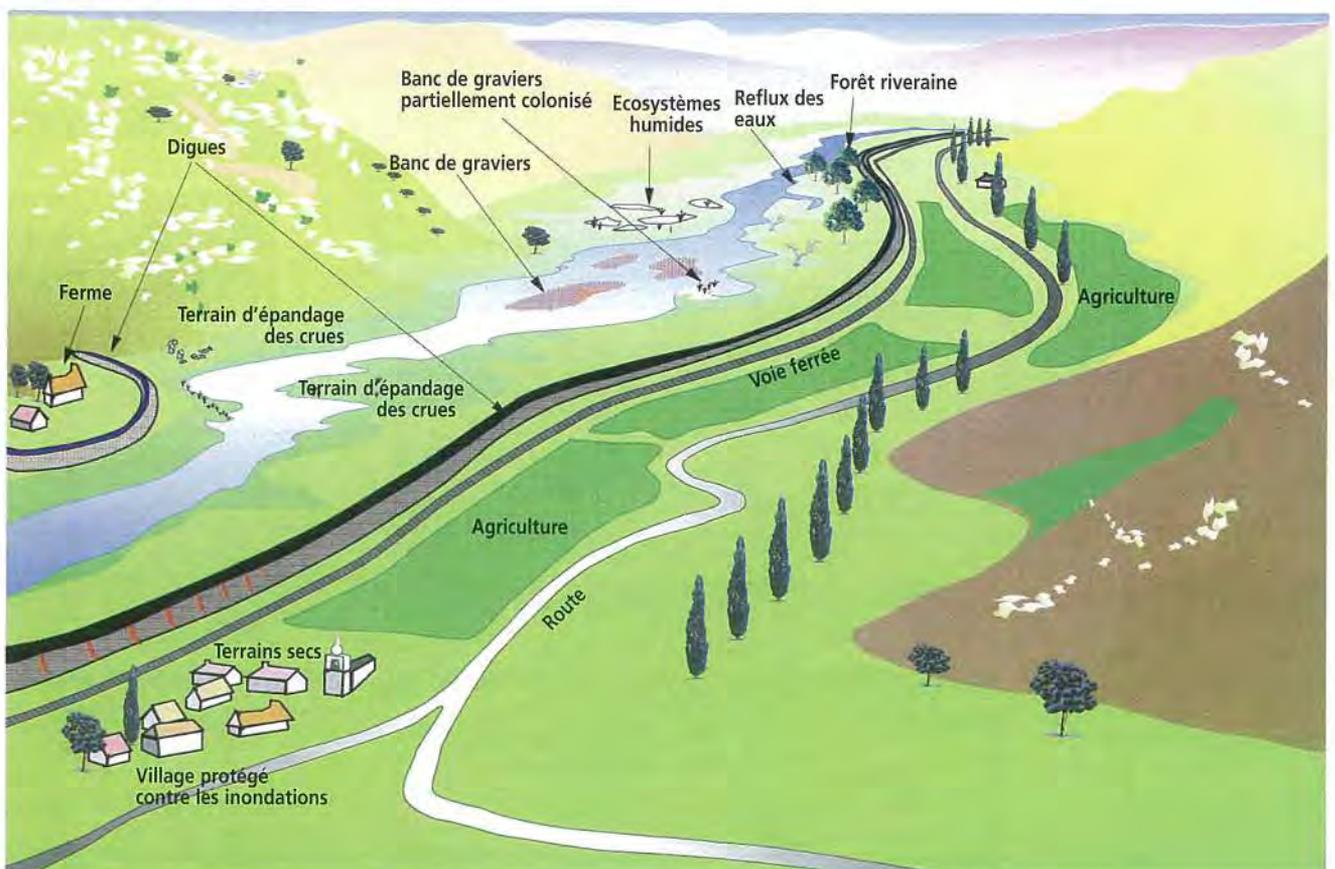


L'urbanisation se développe  
derrière les digues.

Un conflit d'intérêt a opposé par le passé les ingénieurs hydrauliciens dont le but était d'évacuer l'eau de crue aussi vite que possible, les gestionnaires de la ressource en eau, confrontés aux manques d'eau pendant la saison sèche et les protecteurs de la nature cherchant à conserver la biodiversité des cours d'eau et des zones humides. Ce conflit a incité à considérer des solutions alternatives permettant de gérer les inondations plutôt que les empêcher, de se servir des processus hydrologiques naturels plutôt que les combattre. Par exemple, le Fonds Mondial pour la Nature (WWF), a lancé la campagne "Rivières vivantes" où les cours d'eau sont considérés comme des écosystèmes fonctionnels et non pas comme de simples canalisations pour évacuer les eaux de crue.

Une solution évidente consiste à réduire les risques que font courir les inondations non pas en réduisant les pics de crue, mais en restreignant l'aménagement des plaines d'inondation. Aux Etats-Unis, une méthode efficace mais coûteuse consiste à acheter les terrains situés près des cours d'eau dans l'"allée des inondations" définie comme la zone inondable par les crues centennales, et de les consacrer à des parcs de loisir ou de les mettre en réserves. Du fait de leur affectation, ces terrains ne souffrent pas et peuvent même tirer profit d'être

Vers un compromis entre la protection contre les inondations des zones critiques et la conservation des processus naturels des cours d'eau.



# Crues et inondations

De nombreuses rivières naturelles se divisent en plusieurs bras.



M. Acreman

temporairement inondés. Une telle approche n'est évidemment pas possible dans les pays fortement peuplés, mais alors d'autres mesures peuvent être prises. On peut protéger les parties les plus importantes des plaines d'inondation contenant des terres arables, des habitations, des routes et des industries et laisser les autres comme terrains d'épandage où peuvent être maintenus les processus naturels d'inondation et d'ajustement du cours d'eau. De coûteux ouvrages de génie civil, qu'un contrôle complet de la rivière rendraient nécessaires, sont ainsi évités et la création de bassins naturels de stockage réduit les risques d'inondation en aval en même temps qu'elle favorise la conservation d'habitats pour la faune sauvage. Dans certains pays, les maisons construites sur les plaines d'inondation n'ont pas de pièces habitables au rez-de-chaussée qui est consacré à l'entrepôt d'objets facilement remplaçables. On accepte alors la possibilité d'inondations occasionnelles ne causant pas de grosses pertes économiques.

Les parties supérieures des bassins comme les forêts et les prairies qui ont été dégradées peuvent être restaurées, ce qui favorise l'infiltration de l'eau dans les sols et les roches. Cela réduit non seulement les risques d'inondation en aval, mais également l'érosion des sols, alors que la recharge des aquifères accroît la ressource en eau. Une telle restauration a été entreprise dans l'ouest du Pakistan où l'érosion des sols est forte, où les inondations causent de gros dégâts et où la réduction de la recharge des aquifères est en partie responsable de la baisse du niveau des eaux souterraines.

Restaurer les zones humides et rétablir leur connexion avec les cours d'eau en supprimant les endiguements est un autre exemple. Le risque



d'inondation en aval s'en trouve réduit et de surcroît, la submersion de la plaine d'inondation fertilise le sol par apports de limons, recharge les eaux souterraines et améliore l'habitat d'un grand nombre d'espèces aquatiques. A la suite des récentes inondations le long du Rhin, on a pris des dispositions pour rétablir la connexion du fleuve avec la plaine d'inondation à l'amont des grandes villes. Cette mesure sans danger pour l'environnement est considérée comme la plus économique. Dans le même ordre d'idées, un vaste projet a démarré dans la Napa Valley en Californie aux Etats-Unis, consistant à supprimer des digues pour diminuer les risques d'inondation. Il a été élaboré une méthode de zonage des plaines d'inondation basée sur la combinaison du risque (probabilité d'inondation d'une certaine importance pendant un certain temps) et de la vulnérabilité (le coût socio-économique de l'inondation)<sup>1</sup>. Cette méthode permet d'identifier les zones qui doivent bénéficier de la plus grande protection et celles qu'il vaut mieux consacrer au stockage de l'eau.

## Des crues artificielles\* sur le Phongolo

A la fin des années 1960, le barrage de Pongalapoort a été construit sur le fleuve Phongolo au nord-est de l'Afrique du Sud, près de la frontière du Swaziland et du Mozambique, dans le but d'irriguer 40 000 ha de terres agricoles pour des colons blancs, sans production d'énergie électrique<sup>2</sup>.

Aucune évaluation ne fut faite de l'impact du détournement sur la plaine d'inondation où 70 000 indigènes Tembe-Thonga dépendaient des inondations pour leurs cultures d'après-crise, la pêche et d'autres ressources de la zone humide, ni sur la biodiversité de la réserve de chasse de Ndumu. En fait, aucun colon n'est venu utiliser le système d'irrigation. Le barrage a complètement changé le régime des crues du fleuve, réduisant l'habitat humide et la productivité de l'agriculture et des pêches. Sa construction représente le cas classique d'un aménagement et d'une gestion désastreux.

En 1978, un atelier s'est réuni sur le site pour reconsidérer l'avenir du barrage et étudier la façon de minimiser les impacts négatifs sur la plaine d'inondation. Des lâchers contrôlés furent planifiés pour réhabiliter le système cultural indigène et améliorer la pêche et les habitats sauvages. Mais les premiers lâchers ne furent pas faits à la bonne période de l'année et les cultures furent emportées par les eaux ou pourrissent<sup>3</sup>. En 1987, le Ministère de l'Eau et les autorités tribales se mirent d'accord pour une expérimentation avec la participation de la communauté. Des comités de l'eau furent créés représentant cinq groupes d'usagers : les pêcheurs, les éleveurs, les cultivateurs, les femmes et le personnel de santé (aussi bien les secouristes que les herboristes et les devins traditionnels), qui furent mandatés pour décider du moment des lâchers. Ces comités ont appliqué avec succès le point de vue des populations et ont amélioré la gestion du bassin fluvial dans l'intérêt des usagers de la plaine d'inondation et de l'environnement.

# Crues et inondations

Lâcher d'eau au barrage de Roseires, Soudan.



M. Acreman

Dans quelques bassins, la reconnaissance du grand bénéfice qu'on peut tirer des inondations a franchi un pas supplémentaire avec la création d'inondations artificielles. Par exemple, en Afrique de l'Ouest, la construction du barrage Manantali sur le fleuve Sénégal pour produire de l'électricité et l'endiguement des deux rives empêchant les inondations ont eu de nombreux effets négatifs sur l'environnement. Avant ces aménagements, la submersion naturelle de la plaine d'inondation entretenait 250 000 hectares de cultures d'après crue, de forêts fournissant du bois de chauffage et de construction, et d'habitat pour des espèces sauvages. Pendant le délai nécessaire à la pose des turbines, on a créé des inondations artificielles par des lâchers d'eau du barrage, mais ces lâchers ont été irréguliers et modestes et n'ont permis d'inonder que 50 000 ha. Faisant une analyse de la relation coût-bénéfice, Horowitz et Salem Murdock (1990) ont calculé que l'option la plus économique consiste à utiliser le barrage pour la production conjointe d'inondations artificielles et d'électricité. D'autres inondations artificielles ont été expérimentées à partir d'autres rivières comme le Kafue et le Logone<sup>1</sup>. Un inconvénient majeur est que la plupart des barrages n'ont pas été prévus pour faire des lâchers importants et qu'il y a peu de coordination entre les agriculteurs et les pêcheurs locaux. L'exemple le plus réussi est celui du Phongolo en Afrique du Sud qui implique la population locale à la gestion du barrage.

<sup>1</sup> - Acreman & Hollis (1996)



# Les zones humides et les eaux souterraines

**D'une certaine manière, chaque zone humide entretient entre les eaux souterraines et les eaux de surface, des interactions qui lui sont propres, cela rend difficile la généralisation des relations entre les eaux souterraines et les zones humides.**

L'importance des eaux souterraines passe facilement inaperçue parce qu'elles sont hors de la vue et souvent hors de l'esprit. Pourtant c'est une ressource précieuse partout en Méditerranée où en maints endroits l'eau de surface est rare parce que la plus grande part des pluies s'évapore ou s'infiltré dans le sol et percole dans les roches sous-jacentes.



Les eaux souterraines se trouvent entre les grains ou les fines fissures des roches perméables comme le calcaire, la craie et certains grès. Ces roches contenant de l'eau sont appelées aquifères. Les eaux souterraines émergent des aquifères sous forme de sources ou peuvent être extraites de puits ou de forages\* par pompage. Les eaux souterraines sont d'une exploitation relativement bon marché et elles sont généralement d'excellente qualité car dans leur cheminement de la surface à l'aquifère elles traversent des sols qui jouent le rôle de filtre. Souvent, elles circulent, bien que très lentement, et pour qu'elles se maintiennent à un certain niveau dans le sol, il faut qu'elles soient réalimentées par la percolation d'eau de surface.

Lorsqu'il existe des aquifères le long des côtes, leur surface est normalement en pente vers le rivage et les eaux souterraines se perdent en mer. Si cette pente est forte, l'aquifère a un débit suffisant pour éviter que l'eau de mer ne s'y infiltre, mais si un aquifère côtier est soumis à des pompages excessifs, des intrusions d'eau de mer peuvent se produire allant jusqu'à contaminer les puits qui se salent. Dans les régions humides du monde, les aquifères sont rechargés par percolation des pluies, mais dans les zones arides comme le désert saharien et le Moyen-Orient, ce type de recharge est actuellement peu important. Les eaux souterraines y sont vieilles de quelque 10 000 à 20 000 ans ; elles proviennent de l'infiltration de pluies qui à cette époque étaient beaucoup plus importantes qu'aujourd'hui dans ces régions alors que des phases glaciaires affectaient les hautes latitudes. Actuellement ces nappes fossiles ne sont pas réapprovisionnées et elles ne le seront pas dans un proche avenir, si bien que les extractions d'eau ne constituent pas une exploitation durable de la ressource.

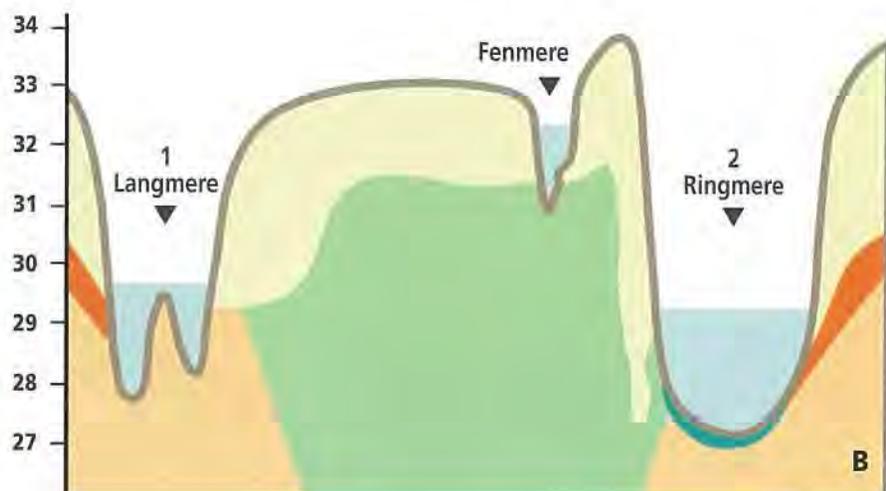
Les relations entre les zones humides et les eaux souterraines sont compliquées. De nombreuses zones humides doivent leur existence à des sols ou des roches imperméables qui limitent les mouvements verticaux de l'eau. Par exemple, de l'Irlande à la Sibérie, les tourbières sont très peu perméables et la percolation descendante de l'eau y est faible. On en conclut communément qu'il y a peu d'interaction entre les zones humides et les eaux souterraines, et de nombreux hydrologues ont considéré comme improbable la possibilité pour les zones humides de recharger les aquifères. Cependant, certaines zones humides doivent leur existence à l'émergence des eaux souterraines sous forme de sources, alors que d'autres, alimentées par des eaux de surface comme les plaines d'inondation, occupent des sols très perméables favorables à l'infiltration rapide des eaux qui réalimentent ou "rechargent" les eaux souterraines.

# Les zones humides et les eaux souterraines

Les liens unissant les zones humides aux eaux souterraines sous-jacentes sont très variables, ce qui rend difficile l'extrapolation des résultats d'études scientifiques d'un site à l'autre. Par exemple, les Breckland Meres (Langmere, Ringmere et Fenmere) sont trois riches zones humides apparemment semblables à l'est du Royaume-Uni. Langmere est en continuité hydrologique avec la nappe de la Craie et son régime est sous la dépendance des fluctuations des eaux souterraines. La connexion de Ringmere avec la nappe de la Craie est moins bonne du fait d'une fine couche de matière organique sur le fond, mais l'influence des eaux souterraines est encore très forte. Fenmere est isolée de la craie sous-jacente par des alluvions argileuses et les fluctuations du niveau de l'eau reflète largement le bilan des pluies et de l'évaporation<sup>1</sup>.

Pour certaines zones humides en communication avec un aquifère sous-jacent, les interactions peuvent varier en fonction des conditions dominantes. Quand le niveau des eaux souterraines est haut, l'aquifère peut alimenter la zone humide (décharge des eaux souterraines), mais lorsque le niveau des eaux souterraines baisse, le gradient hydraulique s'inverse et la zone humide peut alimenter l'aquifère (recharge des eaux souterraines). Une telle dynamique a été signalée pour des marécages de Biélorussie<sup>2</sup> tantôt alimentés par les eaux souterraines, tantôt les alimentant. De la même façon, certaines zones du Grand Marais des Cyprès en Floride (USA) rechargent la nappe alors que la percolation est faible sous certaines autres<sup>3</sup>.

Trois zones humides (Langmere, Ringmere et Fenmere, Royaume Uni), pourtant d'aspect extérieur très semblable, ont des relations différentes avec les aquifères sous-jacents. Cela rend difficile l'extrapolation des résultats d'études scientifiques d'un site à l'autre<sup>4</sup>.



1 - Denny (1993)  
2 - Kiselev (1975)

3 - Heimburg (1984)  
4 - MENR (1981)

## L'alimentation des zones humides par les eaux souterraines

**Dans le monde entier, il existe de nombreux exemples de zones humides entretenues par des eaux souterraines, comme c'est le cas de celles qui occupent le fond de vallées où les eaux souterraines alimentent des sources ou des suintements.**

Au Parc national d'Amboseli au Kenya, l'eau du Kilimanjaro percole dans les laves poreuses et ressort sous forme de sources. Celles-ci alimentent une série de petits marécages qui constituent une importante source d'eau pour la faune et une attraction majeure du Parc<sup>1</sup>. Sur l'île espagnole de Majorque, les grandes roselières de la zone humide S'Albufera sont entretenues toute l'année par des sources.



Le Kilimanjaro dans le parc national d'Amboseli.

N. Granier / Bios

### L'oasis Azraq

En Jordanie, l'oasis Azraq est une étape traditionnelle des caravanes de chameaux et on estime à 40 000 le nombre de nomades qui en dépendent pour l'eau et le pâturage. Des marais doux y sont entretenus par deux sources alimentées par un aquifère local. Récemment l'accroissement des pompages sur cet aquifère pour alimenter en eau la

ville d'Amman, a pratiquement asséché ces sources provoquant une grave dégradation écologique, un déclin de l'agriculture et l'exode des populations. L'importance des marais de l'oasis a été reconnue et une partie de l'eau pompée sur l'aquifère est désormais repompée vers Azraq pour aider à restaurer ce riche écosystème<sup>2</sup>.

1 - Acreman & José (2000)

2 - Fariz & Hatough-Bouran (1998)

## La recharge des eaux souterraines

**Certaines rivières et zones humides sont situées sur des sols ou des roches perméables surmontant un aquifère.**

Dans ce cas, l'eau percole à travers les strates supérieures et alimente la nappe d'eau souterraine. C'est ce qu'on appelle la recharge des eaux souterraines. Les hydrogéologues distinguent deux types principaux de recharge : la recharge directe et la recharge indirecte. La recharge est directe quand l'eau traverse directement le substrat perméable pour atteindre l'aquifère. La recharge est indirecte quand l'eau commence par circuler horizontalement dans le sol avant d'alimenter une rivière ou une zone humide situées sur un substrat perméable. L'eau traverse alors ce substrat pour recharger l'aquifère.

En région méditerranéenne, la recharge indirecte peut jouer un rôle très important. Pour la vallée de Massara en Crète, un peu moins de la moitié de la recharge de l'aquifère (environ 10 millions de m<sup>3</sup> en 1971) provient de la percolation sous le lit des ruisseaux du bassin<sup>1</sup>. En année humide, cette recharge peut dépasser 19 millions de m<sup>3</sup><sup>2</sup>. Ce processus contribue largement à maintenir l'aquifère dont on prélève actuellement 22 millions de m<sup>3</sup> pour les besoins de l'agriculture (pour l'irrigation d'oliviers et de vignes).

En Afrique de l'Ouest, la plaine d'inondation du fleuve Sénégal comprend des sols très perméables<sup>3</sup>. Les strates, par interconnexion hydraulique, constituent un aquifère superficiel rechargé par les crues du fleuve plutôt que par les pluies<sup>4</sup>. Une zone s'étendant jusqu'à 25 km du fleuve a été étudiée à l'aide d'une douzaine de transects géophysiques et un réseau de 138 piézomètres\* installés entre 1970 et 1972<sup>5</sup>.

### La plaine d'inondation de Kairouan en Tunisie

En Tunisie centrale, les oueds Zeroud, Merguellil et Neebuana qui traversent la plaine de Kairouan rechargent l'aquifère quand ils sont en crue. Bien qu'il s'agisse de rivières éphémères qui s'assèchent, l'eau qui a alimenté l'aquifère peut être exploitée

toute l'année pour l'irrigation. Autour de la ville de Kairouan, la nappe est artésienne (c'est-à-dire qu'elle atteint la surface du sol par sa seule pression) et fournit de l'eau de boisson à la population. Si la recharge n'avait pas lieu, les puits s'assécheraient.

1 - Bromley et al (1996)  
2 - FAO (1972)

3 - BRGM (1982)  
4 - GERSAR/CACG et al (1988)

5 - Illy (1973)



Les piézomètres ont montré que l'aquifère superficiel est alternativement rechargé et drainé par le fleuve. Des études isotopiques ont montré que l'aquifère est rechargé par percolation verticale de l'eau d'inondation. Le volume infiltré a été estimé à 250 millions de m<sup>3</sup> par an auxquels la pluie ajoute quelque 30 millions de m<sup>3</sup>. Huit puits d'observation ont été suivis et, près de Matam, des essais de débit ont été effectués. L'étude est arrivée à la conclusion que l'aquifère, composé de plus de 50 mètres de sables et de graviers "...est rechargé quand le fleuve est en crue". Ce travail n'a pas pris en compte les aquifères plus profonds. Le "Groundwater Monitoring Project" (programme de suivi des eaux souterraines) d'un montant de 37 millions de dollars US a couvert la vallée entière jusqu'à Manantali, il a nécessité l'installation de centaines de piézomètres, la création d'une base de données et trois ans d'observations. La vallée moyenne n'a pas été étudiée en détail dans le cadre du programme, mais un examen ultérieur des informations de la base de données<sup>1</sup> a montré que l'eau d'inondation alimente l'aquifère de la plaine d'inondation et que celui-ci est ultérieurement drainé par le fleuve en période de basses eaux.



M. Acreman

Mesures du niveau de la nappe dans une zone humide du Kent, Royaume uni.

1 - Hollis et al. (1996)

# Les zones humides et les eaux souterraines

## Les influences humaines

**Dans le monde entier, les aquifères constituent une ressource en eau d'une grande valeur, mais leur surexploitation peut entraîner la dégradation des processus qui assurent l'existence et la qualité des eaux souterraines.**

L'histoire des Tablas de Daimiel, une zone humide espagnole, montre comment l'exploitation des eaux souterraines peut affecter l'interaction entre les eaux de surface et l'aquifère. Les Tablas sont un marécage à la confluence de deux rivières : la Guadiana et la Ciguëla. Leur étendue maximale est de 15 km<sup>2</sup> et la profondeur d'environ un mètre. Elles sont essentiellement alimentées par les apports de l'aquifère calcaire de la Mancha occidentale, alors que les eaux des rivières Guadiana et Ciguëla constitue une source d'appoint. Les Tablas sont un des deux parcs nationaux aquatiques espagnols. Ce statut assure une protection légale à la zone humide elle-même, mais pas au bassin du cours supérieur de la Guadiana qui l'alimente. Les Tablas ont été retenues comme site Ramsar et comme réserve de la biosphère de l'UNESCO.

Depuis les deux dernières décennies, l'exploitation de l'aquifère s'est intensifié, passant de 200 millions de m<sup>3</sup> en 1974 à 600 millions en 1987. Ce dernier chiffre dépasse de 200 à 300 millions de m<sup>3</sup> l'estimation de la recharge moyenne de l'aquifère sur le bassin. Cette surexploitation a provoqué une chute du niveau des eaux souterraines de 20 à 30 mètres et a réduit le débit de la Guadiana.

**Le bilan hydrologique des Tablas de Daimiel avec et sans exploitation des eaux souterraines (volumes en millions de m<sup>3</sup>)<sup>1</sup>.**

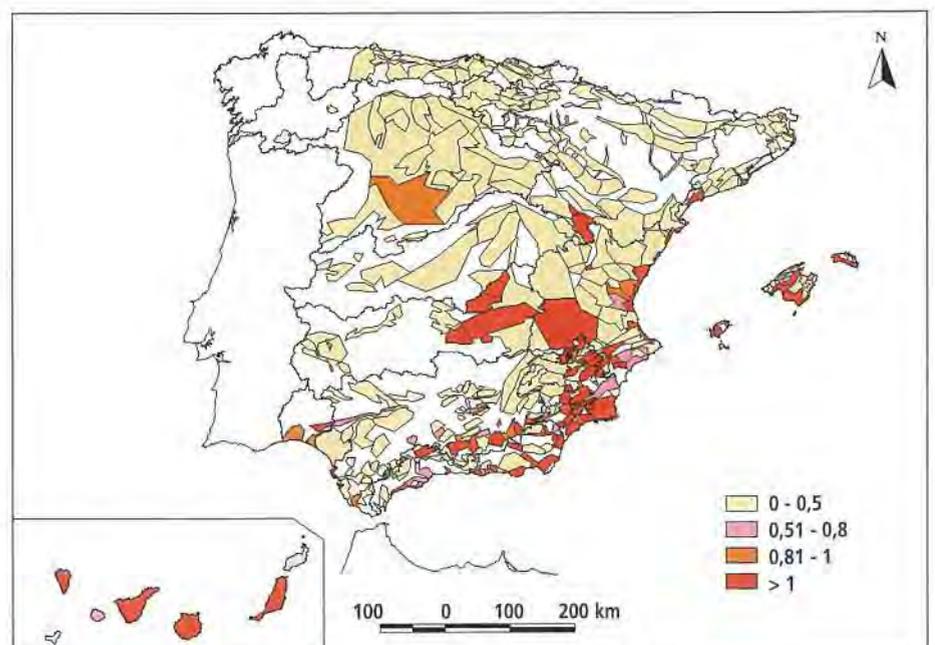
	Entrées		Sorties	
Bilan hydrologique annuel avant l'exploitation importante des eaux souterraines	Pluie	7	Evaporation	9
	Ruissellement de surface	210	Ruissellement de surface	242
	Eaux souterraines	45	Prélèvements pour l'irrigation	11
	total	262	total	262
Bilan hydrologique annuel dans la situation actuelle avec une exploitation importante des eaux souterraines	Pluie	7	Evaporation	9
	Ruissellement de surface	124	Recharge des eaux souterraines	33
			Ruissellement de surface	88
	total	131	total	129
Prévision de bilan hydrologique annuel futur avec une exploitation importante des eaux souterraines	Pluie	7	Evaporation	9
	Ruissellement de surface	40-70	Recharge des eaux souterraines	40-70
			Ruissellement de surface	0
	total	50-80	total	50-80

1 - D'après MIMAM (1998)

Il en a résulté un changement dans le fonctionnement des Tablas de Daimiel devenues une zone de recharge de l'aquifère au lieu d'être alimenté par lui. L'impact écologique de l'exploitation des eaux souterraines a été considérable. En 1988, le gouvernement espagnol a approuvé un programme expérimental pour restaurer la zone humide. Ce programme consiste en trois actions : a) forage de puits pour recharge d'urgence de l'aquifère de la zone humide ; b) transfert vers la Ciguëla d'eau prélevée sur un autre bassin, le volume transféré pouvant atteindre 60 millions de m<sup>3</sup> par an; et c) construction d'une retenue d'eau pour alimenter la zone humide. Ce programme s'est attaqué aux symptômes du mal et non à sa cause. Il vaudrait mieux inciter les agriculteurs à utiliser moins d'eau, soit en pratiquant une irrigation plus efficace et en adoptant des cultures consommant moins d'eau, soit par des mesures financières pénalisant l'usage abusif de l'eau.

La surexploitation de la zone humide tunisienne du Garaet El Haouaria a détruit la fonction de recharge de celle-ci entraînant des conséquences désastreuses. Cette zone humide couvre 3 600 ha à la pointe de la péninsule du Cap Bon. Chaque hiver, une étendue d'eau libre jouait un grand rôle sur l'une des principales voies de migration des oiseaux entre l'Europe et l'Afrique, et elle rechargeait un aquifère superficiel qui à son tour alimentait une nappe plus profonde. On pratiquait sur le Garaet la chasse, l'élevage et la pêche. Mais au début des années 1960, des canaux de drainage d'environ 4 mètres de large débouchant en mer ont été creusés pour assécher la zone en hiver. L'Etat y installa des fermiers sans terres et on commença à forer des puits pour irriguer à partir de l'aquifère superficiel des plantations

Aquifères surexploités en Espagne, où l'extraction annuelle dépasse la recharge<sup>1</sup>.



1 - EEA (1998)

# Les zones humides et les eaux souterraines



La vallée de Massara en Crète.

M. Acreman

d'agrumes et des cultures maraîchères. On a ainsi extrait chaque année 7 milliards de m<sup>3</sup> d'eau de cet aquifère sans se soucier des processus assurant sa recharge ni de la grave altération du bilan hydrologique causée par l'action des canaux de drainage. Le niveau des eaux souterraines a chuté de 9 mètres entre 1980 et 1995. On a dû abandonner certains puits contaminés par des intrusions d'eau de mer. Cela a contraint les jeunes agriculteurs à l'exode alors que les vieux continuent à vivre tant bien que mal de cultures arrosées par les pluies.

Sur l'île grecque de Crète, à Phaistos (où était située la société utopique de Platon), il existaient des zones humides alimentées par des affleurement des eaux souterraines. Mais en 1984, on a installé un réseau extensif de pompage sur la nappe pour développer l'agriculture en amont, dans la vallée de Messara. Actuellement, pour irriguer 100 km<sup>2</sup> d'oliviers et 22 km<sup>2</sup> de vignes, on extrait environ 45 millions de m<sup>3</sup> par an de l'aquifère dont la recharge ne totalise que 20 à 30 millions de m<sup>3</sup>. La conjonction de cette surexploitation et de plusieurs années peu pluvieuses a provoqué une chute du niveau des eaux souterraines de 20 mètres en dix ans et les zones humides ont été complètement détruites.

## La recharge artificielle des eaux souterraines\*

**Le stockage de l'eau dans les aquifères souterrains présente beaucoup d'avantages. Il n'y a pas de perte par évaporation et l'eau reste fraîche.**

Toutes les méthodes qui permettent d'accroître le stock d'eau souterraine sont donc potentiellement d'un grand intérêt pour l'approvisionnement en eau. Il y a toutefois des inconvénients, il faut extraire l'eau des aquifères et le coût des pompages est élevé. Il y a en outre des risques de pollution à partir des sites de recharge ou par lessivage des produits chimiques employés en agriculture.

La recharge artificielle des aquifères n'est pas une idée nouvelle, elle est pratiquée depuis trente ans en Israël, mais elle a tendance à se développer en réponse à l'accroissement de la population et à la pression sur la ressource en eau qui en découle. C'est une technique particulièrement utile dans les régions chaudes et arides où les pluies sont rares et l'évaporation élevée. Dans bien des régions d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, les pluies sont en moyenne très faibles (moins de 500 mm par an) et nombreuses sont celles qui tombent à l'occasion d'orages violents ne durant que quelques heures et provoquant des crues et des inondations subites. Dans ce cas, la plus grande partie de l'eau est perdue par évaporation. Pour mieux utiliser l'eau de ces pluies, on a construit des barrages pour recharger



Lac de barrage et pisciculture dans le nord d'Israël.

# Les zones humides et les eaux souterraines

les eaux souterraines là où un aquifère est proche de la surface du sol et où les terrains sont très perméables. Ainsi des zones humides artificielles temporaires sont créées retenant les eaux de crue et leur permettant de percoler dans le sol jusqu'à l'aquifère. Ce système a un inconvénient, les sédiments charriés par les eaux s'accumulent derrière le barrage et colmatent le fond de la retenue, ce qui gêne l'infiltration. Toutefois, dans bien des cas, les limons souvent très fertiles, sont récupérés et épandus sur les terres agricoles.

Des recharges artificielles sont potentiellement réalisables dans d'autres régions de la Méditerranée. Par exemple, des propositions ont été faites concernant la Bande de Gaza<sup>1</sup>. La recharge des eaux souterraines a lieu actuellement dans le lit du Wadi Gaza. Elle pourrait être doublée par la construction de petits déversoirs créant une retenue temporaire de 50 ha. Cela aiderait à résoudre le sérieux problème de manque d'eau que connaît la Bande de Gaza où les ponctions annuelles d'eau sur l'aquifère dépassent la recharge en eau douce de 39 millions de m<sup>3</sup> et la limite de sécurité de 49 millions. La recharge artificielle des eaux souterraines est aussi employée pour accroître la ressource en eau dans des régions plus humides comme les Pays Bas où de l'eau du Rhin alimente l'aquifère de dunes sableuses près d'Amsterdam.

La recharge artificielle d'aquifères est un autre exemple d'une meilleure utilisation des processus naturels au profit de l'Homme, en travaillant avec la nature plutôt que contre elle.

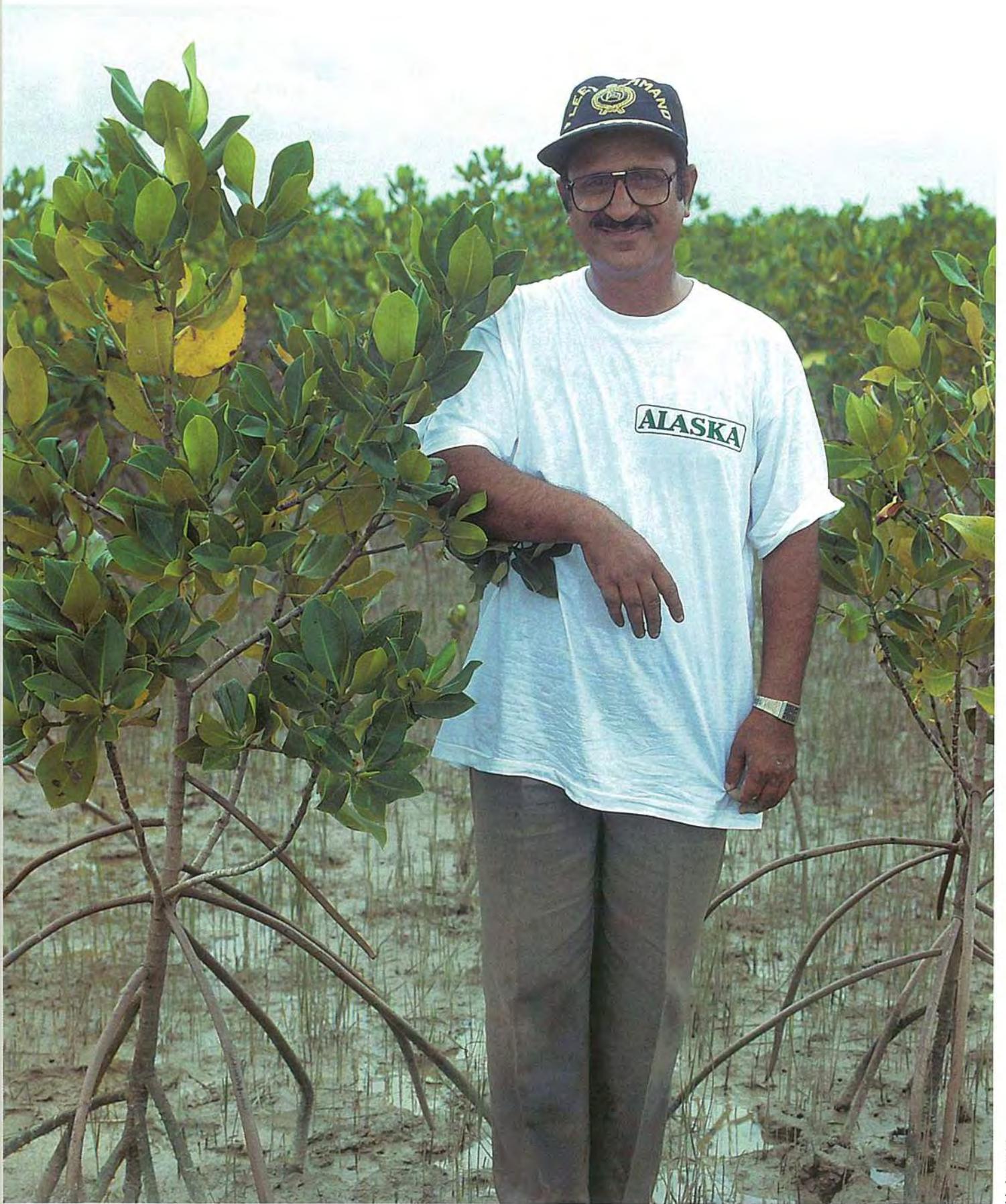
## Recharge artificielle des eaux souterraines en Israël

En Israël, il existe deux procédés permettant d'utiliser les eaux de crue pour recharger les eaux souterraines : le procédé Shiquma au nord de la Bande de Gaza et le procédé Nahalei Menashe près de Cæsarea.

A Shiquma, un petit barrage a été construit pour créer un réservoir de stockage des eaux de crue d'où elle sont pompées vers de vastes bassins d'épandages aménagés sur les dunes sableuses de la côte pour en recharger l'aquifère. La recharge annuelle moyenne atteint environ 3,5 millions de m<sup>3</sup>.

Ce procédé a souffert du colmatage des bassins d'épandage par de fins limons qui, à la saison sèche, forment une croûte et gênent la percolation. En outre, l'eau est chère du fait du coût des pompages, 0,3 \$US le m<sup>3</sup> (à comparer avec le prix de 0,8 \$US le m<sup>3</sup> d'eau obtenu par dessalement de l'eau de mer). Le procédé Nahalei Menashe ne souffre pas des sédiments de la même façon puisque le débit de crue est détourné dans un réservoir extérieur où l'eau décante et à partir duquel l'alimentation des bassins d'infiltration se fait par gravité.

1 - Bloom et al (1995)



M. Acreman

# Les besoins en eau des zones humides

**Toutes les zones humides, y compris les lagunes côtières, les deltas et les estuaires, ont besoin pour survivre d'apports d'eau douce et des sédiments et nutriments qu'elle transporte.**

La gestion durable d'un bassin ne peut être réalisée qu'en établissant, par l'intermédiaire de ces apports, un lien entre toutes ses parties depuis les hauteurs de l'amont jusqu'aux zones côtières.

C'est la présence d'eau pendant un laps de temps significatif qui modifie les sols et leurs microorganismes ainsi que les communautés végétales et animales. C'est elle qui fait que les zones humides

Les mangroves, ici dans le delta de l'Indus au Pakistan, ont besoin d'eau douce pour survivre.

fonctionnent de plusieurs façons, leurs habitats étant soit totalement aquatiques soit totalement secs. Il va donc de soi que les zones humides ont besoin d'un apport d'eau douce. Ceci est également vrai pour les zones humides côtières comme les estuaires et les lagunes qui doivent recevoir de l'eau douce à certaines périodes de l'année.

Beaucoup de régions méditerranéennes manquent d'eau et gérer la ressource de façon à ce qu'il y en ait assez pour les usages domestiques, agricoles et industriels est déjà une tâche immense. Ceci explique pourquoi il est tenu si peu compte des autres utilisateurs comme l'environnement. En vérité, la situation est souvent présentée comme un conflit entre demandes compétitrices, comme s'il y avait lieu de choisir entre l'eau pour les gens ou l'eau pour la nature. C'est oublier que les zones humides fournissent une bonne partie de notre nourriture (poissons, coquillages, canards), des matériaux de construction comme les roseaux, des pâturages pour les bovins les moutons et les chèvres, et que la vie qu'elles abritent et leurs paysages attirent des millions de touristes. Huit des 29 espèces méditerranéennes mondialement menacées sont des oiseaux d'eau. On compte parmi elles la Sarcelle marbrée (*Marmaroneta angustirostris*), l'Erismature à tête blanche (*Oxyura leucocephala*) et le Pélican frisé (*Pelecanus crispus*). Par exemple, la Camargue, au sud de la France génère environ 2 millions d'euros rien que par la chasse, et 1 275 euros par hectare de roselière pour les roseaux destinés aux toits de chaumes<sup>1</sup>. En outre, des milliers de touristes paient pour le pur plaisir de chevaucher par les marais. Donc, si l'accès à l'eau pour la boisson, l'agriculture et l'industrie représente pour les gens un usage direct de la ressource, ils en font un usage indirect quand il laisse une part de l'eau aux zones humides.



La sarcelle marbrée.

1 - Mathevet (in press)

# Les besoins en eau des zones humides

## Les lagunes

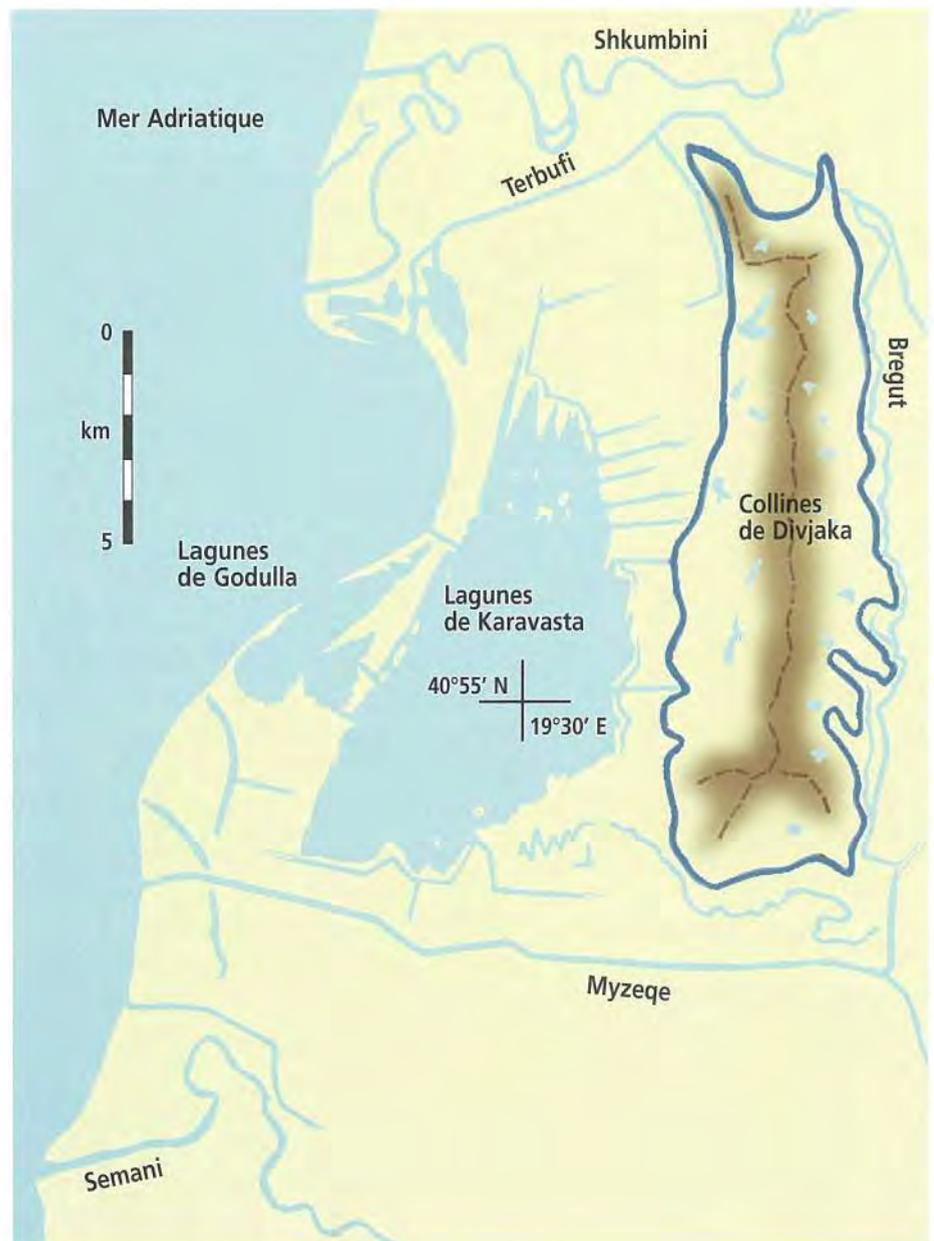
**Il existe de nombreuses lagunes sur les côtes méditerranéennes où elles s'étendent sur 600 000 à 700 000 hectares.**

Elles représentent un élément conséquent de l'environnement par l'importance de ses pêcheries et de ses habitats naturels. Bien qu'en communication avec la mer, elles soient salées, elles ont besoin d'eau douce. Souvent, les ingénieurs n'ont pas conscience de cela et beaucoup de lagunes en sont cruellement privées du fait de la confiscation de l'eau en amont pour l'irrigation ou d'autres usages. La gestion intégrée de n'importe quel bassin hydrologique implique le maintien des connexions entre ses différents compartiments depuis les hauteurs de l'amont jusqu'aux zones côtières incluant les lagunes. C'est le concept du continuum.

La conservation des lagunes passe par la compréhension de leur fonctionnement hydrologique. Les lagunes sont de petits plans d'eau peu profonds adjacents à la côte et reliés à la mer par d'étroits chenaux. Elles ont une origine variée, mais le plus souvent elles se forment lorsque des dunes de sables empêchent un courant d'eau douce d'atteindre la mer, l'eau s'accumule alors côté terre et donne naissance à un lac dont le niveau s'élève jusqu'à ce qu'une sortie à la mer soit trouvée (par exemple, un point bas dans les dunes). Le fonctionnement hydrologique des lagunes est fondamental pour leur fonctionnement écologique. Pendant la saison sèche estivale, l'évaporation est forte, les apports continentaux d'eau douce sont peu importants et l'eau de mer pénètre par le chenal dans les lagunes dont la salinité s'élève. Cette situation s'inverse l'hiver quand l'évaporation est faible et que les apports continentaux remplissent les lagunes d'eau douce, ce qui abaisse la salinité et provoque l'évacuation en mer du trop-plein d'eau. En fin d'hiver, ces sorties d'eau stimulent l'entrée dans les lagunes des alevins d'importantes espèces de poissons, comme les mullets (*Mugil spp.*) et les anguilles (*Anguilla anguilla*). Les eaux peu profondes et tièdes des lagunes sont extrêmement productives, les poissons, se nourrissant des débris organiques de la vase, d'algues et d'invertébrés, y atteignent l'âge adulte et y restent plusieurs années. Lorsqu'ils en sortent, ils sont piégés dans des nasses. La Grèce à elle seule a environ 43 500 ha de lagunes qui ont produit 2 000 tonnes de poisson en 1981.

De petites modifications de l'hydrologie des lagunes peuvent avoir de sérieuses conséquences. La réduction des apports d'eau douce provoque une stratification thermique abaissant la teneur en oxygène et une absence de dilution amenant de très fortes salinités. En outre,

de fortes concentrations de nitrates et de phosphates provenant des engrais agricoles provoquent une eutrophisation du milieu favorables à la croissance excessive des plantes et à la consommation de tout l'oxygène disponible. La modification de la morphologie du chenal de communication avec la mer peut également avoir de graves conséquences. La passe de l'Etang de Leucate dans le sud de la France a été agrandie pour permettre aux bateaux de plaisance d'accéder à une marina. La salinité de l'eau de l'Etang est passée de 30 à 38 g/l, réduisant de 75 % les captures de poissons.



La lagune de Karavasta entretient une importante pêche et un habitat pour des espèces rares d'oiseaux comme le Pélican frisé. Toutefois, la gestion de l'eau au profit de l'agriculture a provoqué de sévères dégradations.

# Les besoins en eau des zones humides

## La lagune de Karavasta

La lagune de Karavasta est le premier site Ramsar d'Albanie, elle est située sur la côte Adriatique à 75 km au sud de la capitale Tirana, entre deux deltas, le delta du Shkumbini et celui du Semani. La zone entourant la lagune a été totalement drainée pour des raisons agricoles, grâce à un système de fossés, de digues et de stations de pompage. Un canal de drainage, notamment, encercle presque entièrement la lagune empêchant les apports d'eau de l'extérieur. En outre, plusieurs petites retenues ont été créées sur le cours supérieur des ruisseaux qui débouchent dans la lagune. Le manque d'apports d'eau douce à la lagune a deux conséquences, la première est l'augmentation de la salinité par non dilution, la seconde est la diminution du recrutement de jeunes poissons du fait de la réduction des sorties en mer d'eaux lagunaires peu salées. A cause des faibles entrées d'eau douce et de la forte évaporation estivale, la lagune de Karavasta est devenue hypersaline (48 à 58 g/l). Le peu d'eau qui entre dans la lagune contient

beaucoup de nutriments provenant des engrais agricoles. Un risque d'hyperculture existe quand, en juin, la température de l'eau atteint 30°C. L'écosystème continue à fonctionner grâce aux vents persistants qui re-oxygènent la masse d'eau et remettent les sédiments en suspension. Les principales espèces commerciales de poissons sont les mullets et les anguilles qui dépendent de la qualité de l'eau et des sédiments. Le rendement durable pourrait être au total de 100 à 150 tonnes par an, mais les prises ont chuté ces dernières années à cause de la surpêche et de la dégradation de la qualité de l'eau. La lagune a un besoin impérieux d'eau douce supplémentaire. Une solution potentielle serait de la restaurer en détournant de l'eau des principaux cours d'eau, mais ceux-ci sont fortement pollués. On lui préfère la solution qui consiste à créer en bordure de la lagune des zones humides comme les roselières pour piéger les nutriments apportés par les canaux<sup>1</sup>.



Bordigues dans la lagune de Karavasta, Albanie.

A. Crivelli

## Les deltas

**Beaucoup de grands fleuves méditerranéens, comme le Nil, l'Ebre, le Rhône et le Pô, ont de vastes deltas.**

Comme pour les lagunes, les anciennes conceptions de la gestion de l'eau les ont souvent négligés, les privant d'un apport vital d'eau douce et de sédiments. Ceci a engendré des problèmes d'érosion côtière, des intrusions salines, la perte de terres agricoles et un déclin de la diversité biologique. La connexion d'un fleuve avec son delta joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'écosystème. Les deltas sont formés des sédiments arrachés par l'érosion en amont, charriés par les fleuves et déposés quand l'énergie fluviale chute à l'embouchure. Leur forme caractéristique, à laquelle ils doivent leur nom, provient de la divagation des fleuves sur leurs dépôts. Le processus classique d'édification d'un delta consiste en un gain progressif de la terre sur la mer au fur et à mesure que les sédiments charriés par le fleuve s'accumulent à son (à ses) embouchure(s). Mais il arrive que le poids des sédiments provoque l'enfoncement du plancher marin et que leur accumulation se poursuive sans modification des limites du delta. Dans ce cas, la moindre réduction de l'apport de sédiments peut se traduire par la dégradation du delta et son enfoncement dans la mer par subsidence, ce qui pose de graves problèmes aux ingénieurs pour la défense de la côte.

Les deltas ont de riches potentialités agricoles et beaucoup sont consacrés à la riziculture. En Espagne, 65 % de la superficie du delta



Le delta du Pô.

# Les besoins en eau des zones humides

de l'Ebre, ont été convertis en rizières et seulement 20 % sont restés naturels (10 % d'écosystèmes sableux, 5 % de lagunes et 5 % de marais). Le delta de l'Ebre conserve néanmoins une certaine richesse biologique. Il offre un refuge permanent ou temporaire à quelque 180 000 oiseaux appartenant à 330 espèces, dont 81 nichent régulièrement et 28 occasionnellement. Jusqu'à la création du Parc national en 1986, la chasse était une des activités principales avec, chaque année, entre 35 000 et 50 000 oiseaux tués. Mais, le maintien du delta, tant pour la nature que l'agriculture, a besoin d'un apport d'eau douce et de sédiments. La construction de barrage sur tout le cours du fleuve (atteignant un sommet à la fin des années 1960 avec les barrages-réservoirs de Mequinenza et Ribarroja) a considérablement réduit le débit et l'apport de sédiments a été abaissé à 1 % de son volume originel. Le delta a cessé d'être engraisé, mais la subsidence et la montée de la

## Les effets du barrage d'Assouan sur le Nil

La construction du Haut-Barrage d'Assouan sur le Nil en Egypte a été achevée en 1968. La fonction première de ce barrage-réservoir était de fournir de l'eau d'irrigation. Ainsi la superficie des terres irriguées s'est accrue de 500 000 hectares entre 1970 et 1990. Ceci a contribué à nourrir un pays en pleine expansion démographique, qui, au cours de la même période, est passé de 30 à 52 millions d'habitants. En outre, une centrale électrique d'une puissance de 2 100 mégawatts a été installée pour favoriser le développement industriel. Le niveau de la retenue du barrage est maintenu au plus bas quand démarre la saison des pluies pour pouvoir stocker suffisamment d'eau de la crue. Mais la plaine d'inondation et le delta ont été privés de l'apport des sédiments et des nutriments charriés par ces eaux et leur perte de fertilité a dû être compensée par l'apport de 13 000 tonnes de nitrate de chaux par an ce qui a pollué les eaux de surface et souterraines. Les nutriments apportés par

le fleuve à la mer entretenaient une riche pêcherie de sardines, mais depuis la construction du barrage, les captures sont passées de 22 618 millions de tonnes en 1968 à seulement 13 450 millions de tonnes en 1980 et le déclin continue. Les populations de poissons ont également chuté dans le cours inférieur du Nil. Sur les 47 espèces commerciales recensées en 1948, il n'en reste que 17 aujourd'hui.

Le delta du Nil est constitué des sédiments charriés par le fleuve. La réduction de sa charge en limons a certainement contribué au retrait récent du rivage de 2 km entre 1971 et 1988<sup>1</sup>. Mais l'histoire géomorphologique du delta est complexe et les relations ne sont pas simples à établir. Néanmoins, les ouvrages de protection de la côte ont et continueront à coûter des millions de dollars par an. A cause de la réduction du débit d'eau douce et de la surexploitation des eaux souterraines, des intrusions d'eau salée affectent l'aquifère sous le delta jusqu'à 30 km à l'intérieur des terres et ont contaminé cette source d'eau de boisson et d'irrigation..

mer persistent. On prédit qu'en l'an 2100, le niveau marin relatif aura monté de 70 cm et qu'environ la moitié du delta sera sous la mer. Même si les terres agricoles sont protégées par des digues, l'exploitation de l'eau et les intrusions salines seront des problèmes capitaux. Il est à craindre que des problèmes semblables à ceux de l'Ebre se produisent dans le delta du Göksü au sud de la Turquie. Actuellement le Göksü est un des rares grands cours d'eau turcs qui ne soient ni barrés ni canalisés. L'eau qui s'infiltré sous son lit contribue à réalimenter l'eau souterraine du delta. Celui-ci a une grande importance écologique. Il abrite 327 espèces d'oiseaux sédentaires ou migrateurs, dont 12 sont mondialement menacées et ses pêcheries côtières sont prospères. Il reçoit environ un million de visiteurs par an et 80 % de sa population travaille dans l'agriculture consacrée principalement au riz, blé, fruits, légumes et fleurs. Parmi les nombreux projets d'aménagement proposés sur le bassin du Göksü, le barrage de Kayraktepe constitue la plus grande menace pesant sur le fleuve et son delta. Ce barrage privera le fleuve d'eau, de sédiments et de nutriments, provoquant l'érosion du delta.

**Le Göksü en Turquie est l'un des derniers fleuves sans barrage.**

Le delta de l'Indus au Pakistan a de multiples fonctions et productions parmi lesquelles les arbres des mangroves jouent un rôle capital<sup>1</sup>. En cassant la force du vent et des vagues, ils protègent la côte et Port



A. Crivelli

<sup>1</sup> - Meynell & Qureshi (1995)

# Les besoins en eau des zones humides

Qasim. La hauteur des vagues peut atteindre six mètres au large des mangroves, mais elle n'est au maximum que de 0,5 m dans les bras du fleuve ainsi abrités. Les mangroves stabilisent également les rives et la morphologie de ces bras. Les courants concentrés dans ces chenaux contribuent au curage de leur lit, réduisant ainsi la sédimentation. Les bras maintiennent donc leur morphologie par auto-nettoyage. Sans les mangroves Port Qasim devrait être protégé par des ouvrages de génie civil comme des digues et nécessiterait des dragages permanents et à raison de 1 \$US/m<sup>3</sup> curé, l'opération ne serait pas rentable. Les mangroves abritent aussi des pêcheries extensives. En 1988, 29 000 tonnes de crevettes ont été récoltées représentant 68 % des exportations de poisson du Pakistan, s'élevant à 100 millions de \$US. Les habitants du delta récoltent des feuilles qui donnent un foin très nourrissant pour le bétail et des branches comme bois de chauffage représentant plus de 18 000 tonnes par an. En outre, le delta héberge une faune très variée allant des crabes aux dauphins et aux hérons et son potentiel touristique est élevé. Mais l'écosystème mangrove dépend des apports d'eau douce et de sédiments de l'Indus. Or, ces apports ont été très fortement réduits par la construction de barrages et la mise en place de programmes d'irrigation en amont, ce qui a provoqué la dégradation du delta. Ce constat renforce les évaluations antérieures des mangroves du monde entier qui ont montré que la complexité et la productivité des zones humides côtières augmentent avec la disponibilité en eau douce<sup>1</sup>.

L'Accord sur l'eau de l'Indus, signé en 1991, précise la répartition de l'eau du fleuve entre les provinces et la part devant être réservée au delta. Un débit moyen de 390 m<sup>3</sup>/s, soit un volume de quelque 12 milliards de m<sup>3</sup> par an, a été considéré comme un "optimum", mais la répartition de l'eau au cours de l'année n'a jamais été précisée, doit-on maintenir un débit faible mais constant ou provoquer des pics de crue de courte durée ? En fait, les grandes crues ne peuvent pas être totalement maîtrisées en amont et, à certaines périodes, elles assurent un apport d'eau relativement important au delta. Par contre, les années sans crue, l'apport d'eau douce peut être presque nul.

Il est clair que les deltas remplissent d'importantes fonctions et fournissent des produits de valeur. Mais ce rôle ne peut être maintenu que par l'apport d'eau douce et de sédiments provenant du bassin versant. Les ouvrages de génie civil qui interrompent la connexion entre bassins et deltas peuvent être la cause de dégradations. Restaurer l'apport d'eau douce et de sédiments aux deltas pourrait faire partie de la nouvelle conception pour trouver une solution durable aux problèmes actuels comme l'érosion des côtes et les intrusions salines, c'est-à-dire de travailler avec la nature plutôt que contre elle.

<sup>1</sup> - Lugo & Snedaker (1974)



## Les zones humides intérieures

**A l'atelier de 1993 sur les ressources en eau du Zambèze<sup>1</sup>, il y avait un consensus parmi les ingénieurs pour penser que l'eau qui n'était pas exploitée pour des usages humains, en particulier l'eau qui se perd en mer, était gaspillée.**

Cette conception n'est pas nouvelle. Déjà Napoléon disait "si je devais diriger un pays comme l'Égypte, pas une seule goutte d'eau ne serait autorisée à couler dans la Méditerranée". Pourtant, la richesse de nombreuses zones humides côtières est directement proportionnelle aux apports d'eau douce. Ainsi, l'eau du Zambèze entretient les pêcheries extensives intérieures des zones de Sofala à l'embouchure du fleuve. Ces pêcheries représentent pour le Mozambique une importante source de revenus à l'exportation de quelque 50 à 60 millions de US\$ par an. L'abondance des crevettes est directement liée aux apports d'eau douce pendant la saison humide et le gain pourrait être accru de 10 millions de US\$ par an si on relâchait correctement les eaux de crue, actuellement inutilisées, du barrage de Cahora Bassa<sup>2</sup>.

La même relation positive entre l'apport d'eau douce et la production de crevettes a été trouvée pour la zone des Tortugas en Floride aux USA<sup>3</sup>. Ces zones humides estuariennes qui reçoivent de l'eau du Parc national des Everglades, sont une démonstration supplémentaire du lien étroit qui unit les écosystèmes à travers le cycle hydrologique.

Assurer l'apport d'eau douce à toutes les parties d'un bassin, y compris les lagunes, les deltas et la zone côtière, fait partie de la gestion durable des bassins dans la nouvelle conception recommandant de travailler avec la nature plutôt que contre elle.

*1 - Matiza et al (1995)  
2 - Gamelsrød (1992)*

*3 - Newbold & Mountford (1997)*

# Les besoins en eau des zones humides

## Les rivières et les plaines d'inondation

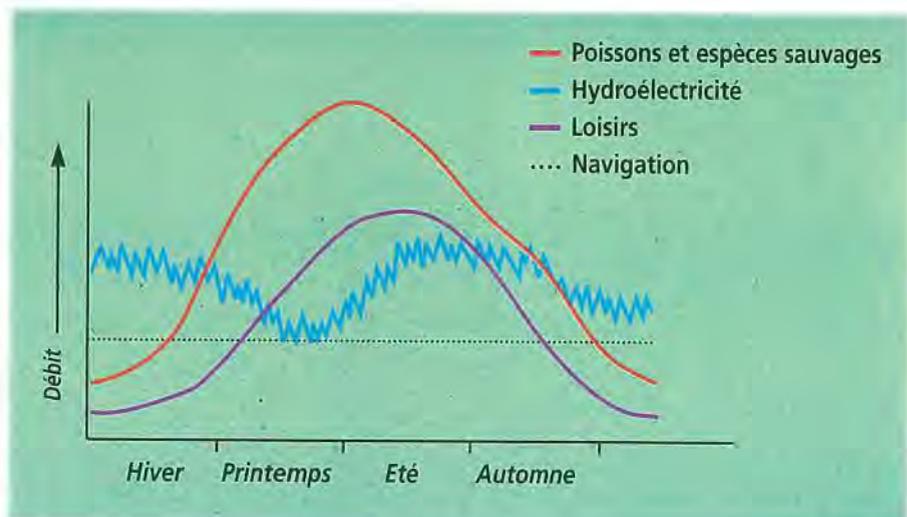
**Les ingénieurs sont souvent confrontés au difficile défi de satisfaire des usages compétitifs des rivières.**

L'effort des ingénieurs a porté sur l'optimisation de la faculté des cours d'eau à évacuer les crues, à diluer les effluents, à fournir de l'eau à l'agriculture, à l'industrie et aux usages domestiques, à servir de voie de navigation et, en temps de guerre, de barrière de protection naturelle.

Une rivière saine n'est pas seulement de l'eau propre. Une rivière est un système vivant dont les processus naturels maintiennent la structure et les capacités à recycler les eaux usées comme les effluents urbains et les engrais agricoles. Pour appliquer la nouvelle conception, travailler avec la nature plutôt que contre elle, il faut que l'écosystème soit maintenu.

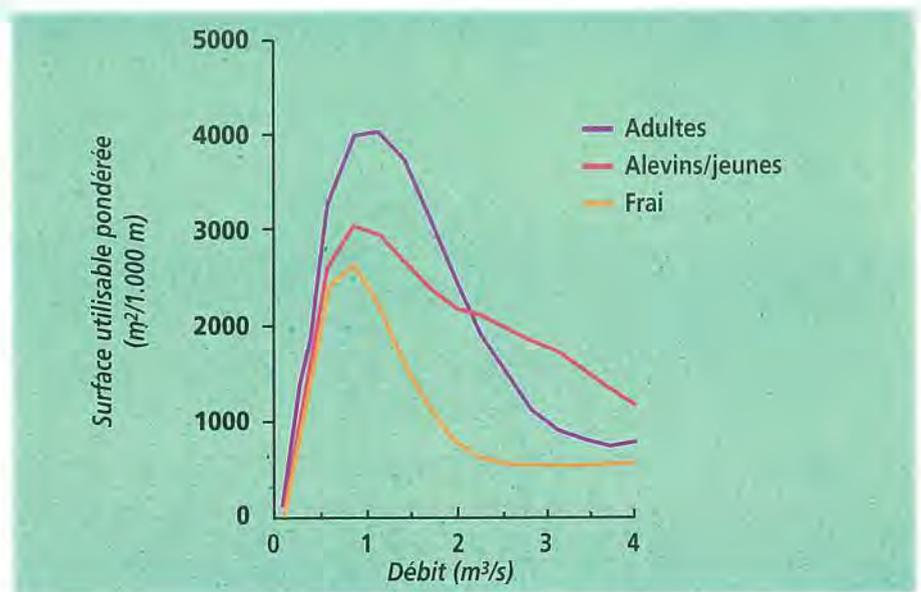
Les besoins en eau des écosystèmes riverains des rivières et des différentes espèces qui les composent est un problème complexe qui a fait l'objet de nombreux travaux partout dans le monde. Les acacias de la forêt riveraine de la vallée de l'Indus, ont besoin d'être inondés pour leur approvisionnement en eau et en nutriments. Les jeunes arbres doivent être inondés au moins dix jours par an. Plus tard, quand ils ont 8-10 ans, leurs racines sont capables d'atteindre la nappe permanente d'eau souterraine. Les roseaux (*Phragmites australis*), quant à eux, demandent des sols bien alimentés en eau, mais ils

Le régime des rivières peut être différent suivant l'usage qu'on en fait. Pour les poissons et autres espèces sauvages, il faut un hydrogramme naturel avec des débits de crue et d'étiage\*. Pour les loisirs (navigation de plaisance et autres distractions nautiques), des débits moins importants suffisent, alors que pour la navigation des gros bateaux, un niveau d'eau constant est idéal. Les barrages pour la production d'électricité changent radicalement le régime des rivières. Répartir l'eau d'une rivière de façon à satisfaire des usages aux besoins opposés est un problème majeur que rencontrent les planificateurs de bassins.



Indices de profondeur de l'eau et de vitesse du courant définissant les habitats convenant aux stades alevins et jeunes de la truite de rivière, d'après les observations faites par plongées par la National Rivers Authority South Western Region (Royaume Uni)

Des modèles hydrauliques obtenus avec PHABSIM, étalonnés par des mesures de terrain, établissent les variations spatiales de profondeur et de vitesse de l'eau et prédisent le changement de ces deux termes en fonction du débit des cours d'eau<sup>1</sup>.



peuvent supporter de courtes périodes d'assèchement<sup>2</sup>. Certaines espèces ont des besoins spécifiques à certaines étapes de leur vie, ainsi, il faut une profondeur d'eau minimale de 1,8 mètres pour que le Palla, poisson d'Asie, se reproduise.

Les recherches du Service des pêches et de la faune sauvage des Etats-Unis sur les besoins des espèces fluviales ont abouti à la mise au point d'un système informatisé appelé PHABSIM (pour Physical HABitat SIMulation) qui met en relation le régime des cours d'eau et les besoins de certaines espèces, comme les poissons. De nombreuses espèces ont des préférences pour certaines conditions physiques telles que la profondeur d'eau et la vitesse du courant, et ces préférences



L'utilisateur des modèles hydro-écologiques tels que PHABSIM, exige d'obtenir de nombreuses données sur le terrain.

1 - Johnson et al (1993)  
2 - Newbold & Mountford (1997)

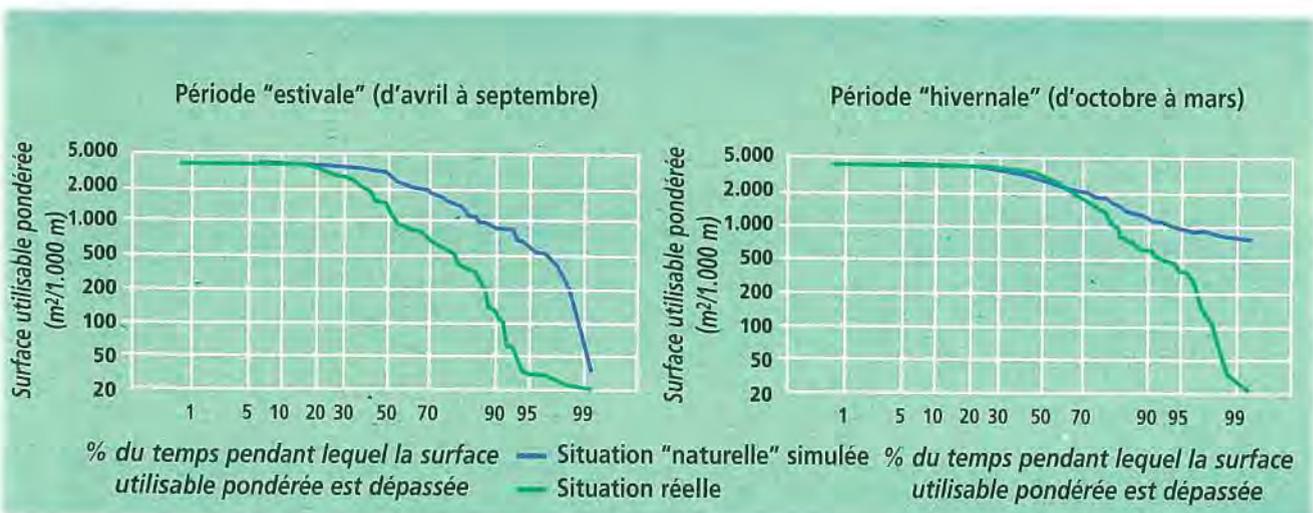
# Les besoins en eau des zones humides

peuvent changer avec la croissance des individus. Toute modification, disons une diminution de la profondeur, de ces conditions change donc directement l'habitat favorable à ces espèces.

PHABSIM a été utilisé pour estimer, à partir d'exemples du passé ou de projections dans le futur, l'impact écologique (en terme d'habitat favorable), de modifications de débit causées par des prélèvements d'eau ou des barrages. La méthode a été adaptée à la situation de plusieurs pays dont la France, le Royaume-Uni, la Norvège, le Canada, l'Autriche et la Nouvelle-Zélande. Manifestement, une méthode comme PHABSIM est bien adaptée aux espèces très sensibles au courant, comme les espèces se nourrissant au fil de l'eau (telles que le Saumon et la Truite). De toute évidence, si une méthode basée sur les conditions d'écoulement des rivières convient pour ces espèces, elle convient également pour des espèces moins sensibles au courant. On a donc choisi le Saumon et la Truite comme espèces indicatrices pour fixer les besoins en matière de débit.

Des méthodes plus générales ont été mises au point pour déterminer le débit devant être réservé aux rivières à partir de l'opinion d'experts et de l'avis des parties prenantes. En Australie, la Nouvelle Galles du Sud à un climat semblable à celui de nombreuses régions méditerranéennes, avec des précipitations annuelles moyennes de 500 mm concentrées sur les mois d'hiver. L'eau des grands cours d'eau, comme le fleuve Murray et le Murrumbidgee, alimente un vaste réseau d'irrigation, dans une zone plus aride où de nombreuses rivières s'assèchent en été. Ces dernières années, dans ces cours d'eau, les blooms d'algues se sont multipliés et le nombre des poissons indigènes a baissé alors que les espèces étrangères ont envahi

Courbes de la durée des habitats favorables à la truite de rivière dans la rivière Allen, montrant comment évolue l'aire d'habitat favorable en fonction des variations saisonnières du débit. Ces courbes représentent les prévisions de disponibilité de l'habitat pour les conditions réelles (c'est-à-dire avec des débits réduits par des pompages sur les eaux souterraines) et pour des conditions "naturelles" (c'est-à-dire après suppression de l'influence de ces pompages simulée à l'aide d'un modèle d'écoulement souterrain). L'exemple choisi montre combien l'habitat est réduit pour les alevins et les jeunes truites surtout pendant les débits étiage de l'été. Ceci est particulièrement important pour cette espèce, si à une période cruciale de l'année, le manque d'habitat à un certain stade de son développement se traduit par une limitation de la population tout entière<sup>1</sup>.



<sup>1</sup> - Johnson et al (1993)

Une plaine d'inondation  
au Burkina Faso.



M. Acreman

le milieu. Le gouvernement de la Nouvelle Galles du Sud a reconnu que la viabilité économique de la région à long terme dépendait du maintien de la bonne santé des rivières. Il a donc mis en place de nouvelles mesures, avec la participation des communautés locales, pour partager l'eau entre besoins des hommes et de l'environnement. La rivière Lachlan, affluent du Murray, débite en moyenne 1,3 milliards de m<sup>3</sup> par an dont 60 % s'écoulent en quatre mois (de juin à septembre). On lui a attribué 20 millions de m<sup>3</sup> au titre du "Contingent pour une haute sécurité environnementale". Sur le bassin de cette rivière, trois barrages de retenue totalisent une capacité de 1 406 millions de m<sup>3</sup>. De l'eau est relâchée de ces barrages à certaines périodes de l'année pour assurer un certain débit à la rivière et réaliser une série d'objectifs comprenant :

- la protection des niveaux d'eau naturels dans les flaques de la rivière et les zones humides pendant la période où la rivière ne coule pas ;
- le maintien ou la restauration des processus d'inondations naturelles et l'attribution d'eau de crue aux écosystèmes des zones humides naturelles et de la plaine d'inondation ;
- imiter ou maintenir partout la variabilité naturelle du débit.

Le problème est qu'on ne connaît pas avec précision le lien entre les modes d'écoulement et les objectifs (réduction des blooms d'algues, maintien des espèces de poissons indigènes). Le mieux est d'adopter une gestion adaptative où différents régimes d'écoulement sont essayés en fonction des dures contraintes de la disponibilité en eau.

# Les besoins en eau des zones humides

En certains endroits, il est clair que la priorité est de conserver le régime de crue d'une rivière. Les études sur la plaine d'inondation de l'Hadejia-Nguru au nord du Nigeria<sup>1</sup> ont montré l'importance de son inondation pour le maintien des pêcheries, des forêts humides et des terres agricoles. Mais les inondations ont été considérablement réduites par la construction, en amont des zones humides, d'un grand barrage dont l'eau est destinée à une production céréalière intensive. L'analyse économique de la zone humide et du projet de la rivière Kano<sup>2</sup>, un des grands programmes d'irrigation, a montré que la zone humide produisait un bénéfice net d'au moins 32 US\$ pour 1 000 m<sup>3</sup> d'eau (au taux de change de 1989), alors que le rapport des récoltes obtenues dans le cadre du programme d'irrigation ne représentait que 0,15 US\$ pour 1 000 m<sup>3</sup> et tombait à 0,0026 US\$ en ajoutant les frais de fonctionnement. Et cette analyse n'a pas tenu compte de la valeur des fonctions hydrologiques de la zone humide comme la recharge des eaux souterraines. La démonstration étant faite qu'il était plus efficace d'utiliser l'eau pour alimenter la zone humide que pour une irrigation intensive, des représentants des autorités responsables, dont les offices de l'eau de l'Etat, les autorités pour l'Aménagement du bassin de la rivière et les départements ministériels, se sont réunis pour discuter d'options possibles. Ils ont reconnu à l'unanimité que

De nombreuses espèces  
frayent de préférence  
dans les plaines d'inondation.



M. Acreman

1 - Hollis et al (1996)  
2 - Barbier et al (1991)

## Définir un régime d'écoulement compatible avec certains objectifs

Une méthode a été établie pour définir un régime d'écoulement permettant de subvenir aux besoins des utilisateurs tout en maintenant de hautes eaux minimales pour chasser les sédiments et de basses eaux minimales pour conserver un habitat pour les poissons<sup>1</sup>. On admet que le débit d'une rivière varie naturellement des crues à l'assèchement total des rivières. Par conséquent, un régime d'écoulement ciblé doit être précisé dans un cadre statistique, par exemple on prévoit que la rivière s'assèche naturellement pendant trois mois tous les deux ans.

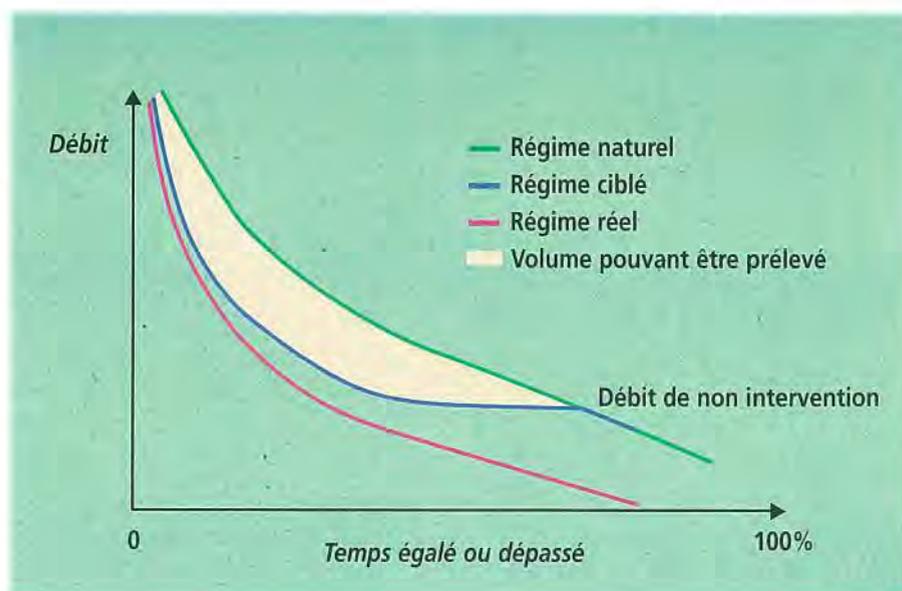
La courbe de durée des débits est un outil utilisé par l'hydrologue pour décrire les relations entre la grandeur du débit et la

durée pendant laquelle le débit est égalé ou dépassé<sup>2</sup>. On a utilisé des modèles hydrologiques comme ceux de PHABSIM pour définir une catégorie de débits critiques :

- Débit écologique\* plancher – qui permet le maintien d'un habitat minimal nécessaire à la survie des espèces cibles ;
- Débit écologique convenable – qui permet le maintien d'un habitat de basses eaux pour les espèces cibles ;
- Débit écologique souhaitable – qui permet le maintien des liens unissant toutes les parties du cours de la rivière pour les espèces cibles ;
- Débit écologique optimal – qui maximalise l'habitat utilisable par les espèces cibles ;
- Débit de maintenance du lit – qui chasse les limons du lit.

Courbes de durée des débits naturelle, réelle et ciblée pour une rivière hypothétique.

Dans ce bassin, les prélèvements sont la cause de l'abaissement des débits réels. La différence entre les courbes naturelle et ciblée représente le volume qui peut être prélevé. Il est remarquable que la courbe ciblée rejoint la courbe naturelle. Si le débit égale ce niveau ou lui est inférieur, aucun prélèvement ne devrait se faire. Ce débit est quelquefois appelé "débit de non intervention".



1 - Petts et al (1996)  
2 - from Evans (1997)

# Les besoins en eau des zones humides



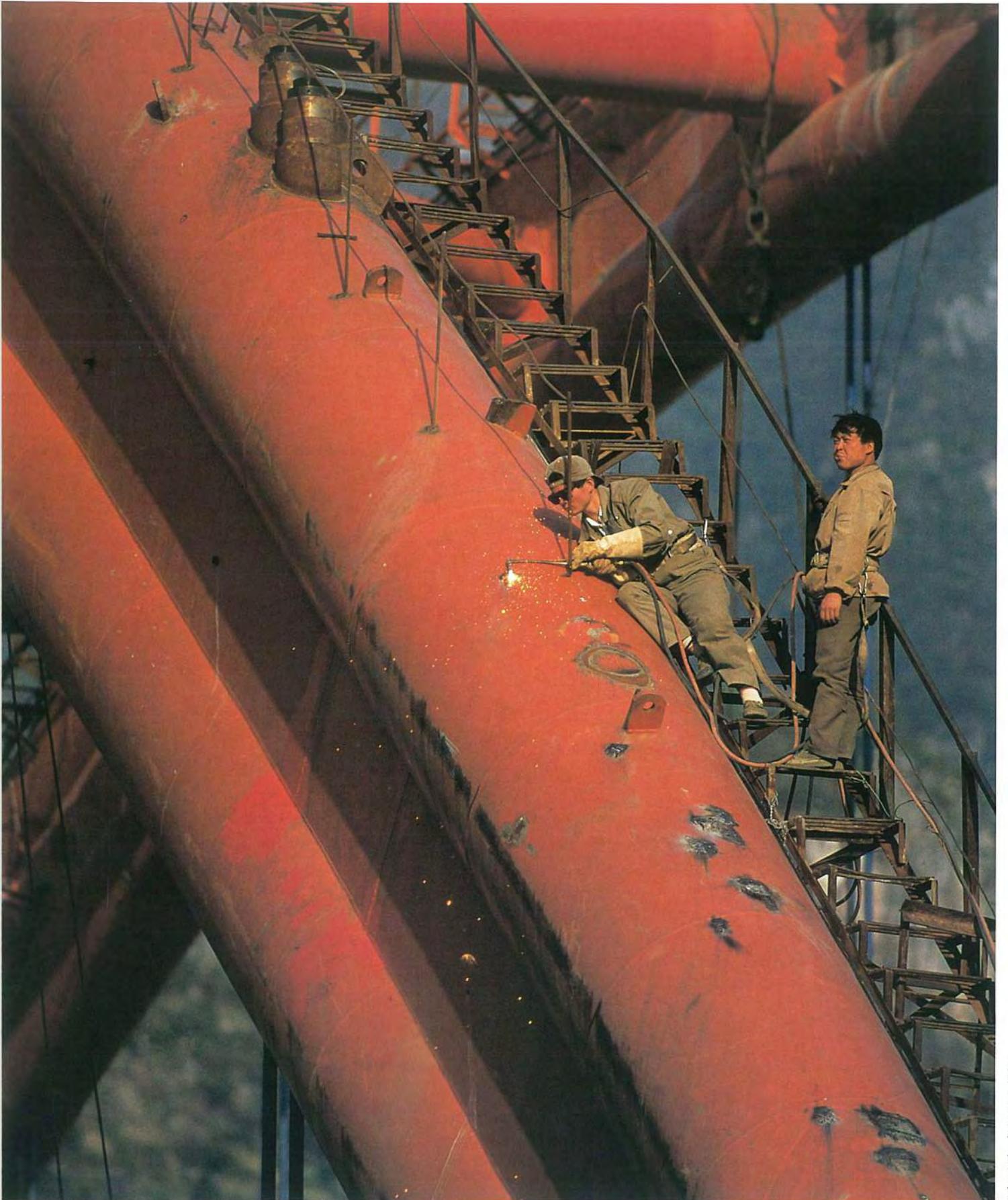
Creusement d'un puit  
au Cameroun.

M. Acreman

des inondations artificielles devaient avoir un rôle central dans la gestion intégrée du bassin. Une des recommandations principales était : "Il faut maintenir l'inondation des zones humides rendue possible par des lâchers artificiels d'eau des barrages pendant la saison sèche, pour permettre la production de riz, de cultures sèches, de bois de chauffage, de bois d'œuvre, de poissons et autres espèces sauvages, pour maintenir la biodiversité et assurer la recharge des eaux souterraines"<sup>1</sup>.

Rares sont les barrages construits de manière à permettre des lâchers d'eau suffisants pour créer des crues artificielles. Même ceux qui laissent passer beaucoup d'eau continuent à piéger la majeure partie des sédiments. L'eau provenant d'une retenue peut également avoir des caractéristiques différentes de celles de la rivière. Elle est souvent plus froide et pauvre en nutriments. Par conséquent, bien qu'à l'avenir il soit possible de gérer les barrages de façon plus douce pour l'environnement, ils imposent toujours de fortes contraintes à la conservation et la restauration des écosystèmes en aval.

1 - HNWCP/NIPSS (1993)



Schwarzbach / Argus / Biot

# Conclusions

**Il est fondamental de comprendre le cycle hydrologique pour gérer les ressources en eau et l'environnement aquatique.**

La région méditerranéenne est caractérisée par de fortes variations hydrologiques saisonnières (hiver humides et doux et étés secs et chauds), et interannuelles. Ainsi, les pluies et la température et avec elles l'évaporation, le débit des cours d'eau, la mobilisation des sédiments, la recharge des eaux souterraines et la disponibilité en eau, connaissent de grands changements d'une année à l'autre. Dans des cas extrêmes, la totalité des précipitations annuelles peut tomber au cours de quelques orages torrentiels. Pour réduire

La construction du barrage des Trois gorges en Chine, un bon exemple de ce qu'il ne faut pas faire.



Crue du fleuve Kizilirmak en Turquie.



J. Roché

les inondations et pour fournir davantage d'eau aux usages agricoles, domestiques et industriels, les ingénieurs hydrauliciens ont cherché à contrôler toujours plus le cycle hydrologique. La région méditerranéenne possède maintenant des milliers de barrages, de digues, de transferts d'eau par détournements et connexions entre les bassins. Si ces solutions d'«ingénierie dure» pour résoudre les problèmes hydrologiques ont eu beaucoup d'avantages à court terme, elles ont œuvré contre la nature et de ce fait ne peuvent pas être durables sur le long terme. Leurs conséquences négatives sur l'environnement naturel sont nombreuses, comprenant la perte de pêcheries, l'érosion côtière et même l'aggravation de l'effet des grandes inondations.

Au cours des quelques décennies passées, il y a eu une prise de conscience grandissante de l'importance des zones humides et des autres hydrosystèmes naturels. Non seulement ils possèdent de riches pêcheries, des oiseaux d'eau et un attrait touristique lucratif,

Evolution des groupes participant à la planification des projets d'aménagement des eaux dans les pays développés<sup>1</sup>.

• Equipes	Dates approximatives d'apparition
• Ingénieurs	• avant la Seconde Guerre mondiale
• Ingénieurs + économistes	• après la Seconde Guerre mondiale
• Ing + économistes + spécialistes de l'environnement	• fin des années 1970
• Ing + économistes + environnementalistes + sociologues	• fin des années 1980
• Ing + économistes + environnementalistes + sociologues + populations concernées	• début des années 1990
• Ing + économistes + environnementalistes + sociologues + populations concernées + ONG	• milieu des années 1990
• Ing + économistes + environnementalistes + sociologues + populations concernées + ONG + consentement public	• début des années 2000

1 - D'après Goodland (1997)

mais encore, nombreux sont ceux qui jouent un rôle capital dans le cycle hydrologique, réduisant les inondations, améliorant la qualité de l'eau et assurant la recharge des eaux souterraines. Résultat d'une prise de conscience toujours plus grande du rôle vital des fonctions des écosystèmes, une nouvelle conception a vu le jour, selon laquelle des solutions durables sont à rechercher en travaillant avec la nature et non contre elle. Dans certains cas, des spécialistes de l'environnement sont associés à la planification de l'eau et aux options de développement en complément du savoir-faire traditionnel des ingénieurs.

## Une démarche intégrée

De nombreux ministères et différentes agences gouvernementales sont concernés par l'eau et les ressources des zones humides, c'est le cas de ceux qui ont en charge l'irrigation, la production d'énergie, la navigation, la défense contre les inondations, l'environnement et la ressource en eau. En outre, l'eau et les écosystèmes humides sont un enjeu pour de nombreux groupes non gouvernementaux comme des associations de protection de la nature locales, des industries privées, des coopératives agricoles et des clubs de loisir (pêche, nautisme). Par tradition, ces secteurs ont travaillé séparément, chacun poursuivant ses buts et objectifs personnels, lesquels pouvaient entrer en conflit avec ceux d'autres secteurs. De plus, les projets d'exploitation des zones humides ne concernent souvent qu'une partie de leur bassin, sans considérer comme il le faudrait les impacts sur les autres parties en amont et en aval. Le grand avantage des zones humides c'est qu'elles concernent de nombreux secteurs, l'ensemble de leurs bassins fournit tout à la fois une ressource en eau, une protection contre les inondations, un habitat pour des espèces sauvages. Mais, pris séparément, les projets des différents secteurs justifient difficilement la

conservation des zones humides, d'où la nécessité d'aborder la réalisation de ces projets de façon globale et intégrée. Globale, signifie qu'elle doit prendre en compte la totalité du bassin de telle sorte que l'exploitation d'une partie ne nuise pas aux autres parties. Intégrée, signifie que tous les secteurs doivent pouvoir en tirer avantage.

La responsabilité de l'exploitation de l'eau (eau à usage domestique, irrigation, contrôle des crues) a d'abord incombé aux ingénieurs formés aux travaux de génie civil et qui normalement cherchent une solution structurelle aux problèmes, comme l'édification de barrages, le détournement de cours d'eau et les endiguements. La formation de ces ingénieurs doit être plus large et inclure la connaissance des fonctions hydrologiques des zones humides de telle sorte que les occasions d'utiliser les systèmes naturels soient plus pleinement exploitées. En outre, pour échafauder de saines politiques d'exploitation et prendre de bonnes décisions, les planificateurs et les décideurs devraient être informés sur les fonctions générales des zones humides et sur la façon de faire un meilleur usage des recherches scientifiques les concernant.

L'eau, source de vie,  
dans un village de Cameroun.



M. Acreman

Les ingénieurs commencent à reconnaître le bien-fondé de la conception écologique de la rivière système vivant. Selon elle, tous les éléments du bassin sont liés de l'amont à l'aval, depuis les écosystèmes humides des hauteurs jusqu'aux estuaires, deltas et lagunes côtières (c'est le "concept du continuum rivière"). La conception écologique prend également en compte les liens latéraux existant entre la rivière et les zones humides riveraines et elle considère la submersion des plaines d'inondation comme une force directrice pour la vie de la rivière (c'est le "concept du retour périodique des inondations").

De leur côté, les écologues commencent à comprendre les difficultés rencontrées par les ingénieurs pour résoudre les problèmes ardues que posent les contraintes financières et temporelles. La recherche de solutions durables pour une gestion hydrologique demande la plus étroite coopération entre les ingénieurs, les écologues, les représentants d'autres disciplines comme les géomorphologues, les économistes et les sociologues, ainsi que les communautés locales qui ont leur mot à dire.

Par le passé, les planificateurs et les décideurs ont considéré comme légitimes usages de l'espace, les forêts, l'agriculture, l'industrie, l'habitat et la conservation de la nature, n'attachant qu'un intérêt secondaire à l'impact hydrologique, négatif ou positif, que pouvaient avoir ces usages. Dans une région très sèche comme la Méditerranée, la gestion de l'eau devrait être considérée comme un usage légitime de l'espace, ce qui veut dire que les parties du bassin comme les zones humides et les forêts d'altitude doivent être gérées en premier lieu pour permettre à leurs fonctions potentielles

# Conclusions

d'améliorer le cycle hydrologique pour le plus grand profit de l'homme.

Pour réaliser une saine gestion hydrologique ; il faudrait prendre en considération ce qui suit :

- planifier et gérer à l'échelle du bassin, les zones côtières, les deltas, les lagunes et les vasières intertidales inclus ;
- intéresser toutes les parties prenantes au processus, les agences de l'eau, les autorités locales, les organisations non gouvernementales et les communautés locales incluses ;
- mettre les données hydrologiques à la disposition de toutes les parties prenantes pour permettre un débat ouvert sur la répartition de l'eau ;
- entreprendre la collecte des données et faire des recherches sur le cycle hydrologique en Méditerranée pour comprendre pleinement la variabilité naturelle et l'influence des impacts humains comme le changement climatique ;
- former les ingénieurs à apprécier les fonctions hydrologiques naturelles des zones humides et autres écosystèmes et former les écologistes à la compréhension des problèmes pratiques de la gestion de l'eau auxquels les ingénieurs sont confrontés ;
- s'assurer que tous les utilisateurs de l'eau, y compris les écosystèmes, sont considérés équitablement dans la répartition de l'eau, ce qui peut aller jusqu'à faire des lâchers de crues artificielles à partir de barrages ;
- prendre en compte les conceptions écologiques comme le "concept du continuum rivière" et le "concept du retour périodique des inondations" dans la gestion hydrologique.

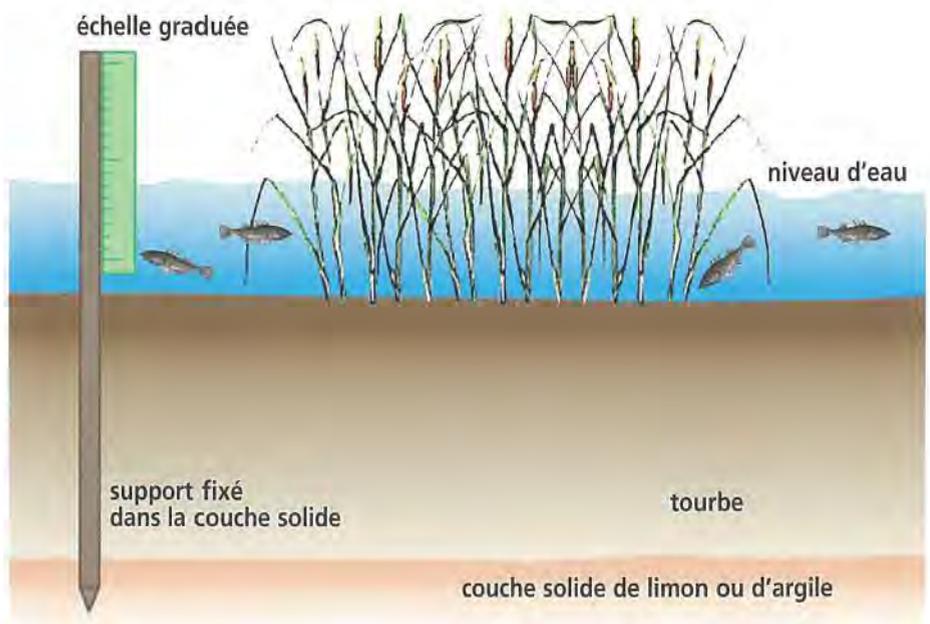
## Annexe A

### La mesure du bilan hydrologique

#### Les eaux de surface

Il est très important de mesurer le volume d'eau stockée sur une zone humide. Ce volume ne peut pas être déterminé directement, sa quantification est indirecte. A partir de levés topographiques du terrain, on peut établir une corrélation entre le niveau et le volume de l'eau d'une zone humide, c'est ce qu'on appelle une courbe hypsométrique\*. On utilise cette courbe pour calculer le volume stocké total pour un niveau d'eau donné ou la variation de volume entre deux niveaux d'eau donnés consécutifs. La courbe doit être ajustée périodiquement dans le cas de zones humides où la sédimentation change la topographie, comme cela se produit, par exemple, dans la zone humide tunisienne du Sebkhet Kelbia (voir la figure page 45)

En eau libre, les niveaux d'eau peuvent être facilement mesurés à partir d'une simple échelle limnimétrique graduée, solidement fixée sur un support ancré dans le substrat dur. Le problème avec les zones humides, c'est que souvent ce type de substrat manque à proximité des plans d'eau libre. Par exemple, on sait bien que la tourbe gonfle et se contracte en fonction de sa teneur en eau et de ce fait



Les niveaux d'eau doivent être mesurés par rapport à un point de référence fixe. Dans une zone humide la surface du sol peut s'élever ou s'abaisser en fonction de la teneur en eau. Dans ce cas, l'échelle graduée doit être implantée dans le substrat rocheux ou dans une couche solide du sol.

le niveau du sol s'élève et s'abaisse de 20 à 30 cm au cours de l'année. Il est de ce fait essentiel que le niveau de l'échelle graduée soit contrôlé à partir d'un point coté fixe, situé à proximité. Les niveaux d'eau de certaines zones humides ne sont pas les mêmes dans différentes parties du système, il faut alors faire des mesures en plusieurs endroits. Une autre méthode pour estimer le volume de l'eau stockée sur une zone humide est de mesurer l'étendue de la zone submergée sur des images satellitaires ou des photographies aériennes et de la corrélérer à une profondeur moyenne calculée à partir d'un certain nombre de mesures sur le terrain. Cette méthode convient particulièrement aux grandes zones humides très complexes. Elle a été utilisée dans la zone humide soudanaise du Sudd<sup>1</sup> et dans les zones humides de l'Hadejia-Nguru au Nigeria<sup>2</sup>. Pour estimer la surface des plans d'eau, une méthode automatisée a été mise au point, appelée SHYLOC (System for HYdrology using Land Observation for model Calibration- système de calibration des modèles en hydrologie par les observations de terrain)<sup>3</sup>. Cette méthode a été utilisée pour de grandes étendues d'eau comme le lac Karla en Grèce et pour des réseaux de canaux de drainage, les marais du Kent du Nord au Royaume Uni par exemple.

Le stockage de l'eau dans le sol est suivi en mesurant la hauteur des eaux souterraines dans un piézomètre. Un piézomètre est un tube en matière plastique ou en acier d'environ 5 cm de diamètre, implanté dans un trou creusé jusqu'à une profondeur dépassant la limite présumée des plus bas niveaux des eaux souterraines, perforé à sa base et qui permet de mesurer la pression dans l'aquifère à une profondeur fixe (la base du tube). Il est important de noter que le niveau auquel l'eau se stabilise dans un piézomètre n'est pas la limite supérieure de saturation, mais le niveau auquel la pression de l'eau dans le sol est en équilibre avec la pression atmosphérique. Il n'est pas facile de traduire la mesure de ce niveau en volume total des eaux souterraines, mais deux mesures plus la connaissance de la superficie de la zone et de la porosité des terrains peuvent fournir une estimation de la variation de volume nécessaire au calcul des bilans hydrologiques.

## **Les précipitations**

Les précipitations représentent le poste principal des entrées du bilan hydrologique des zones humides. Elles tombent soit directement sur celles-ci, soit sur les parties hautes des bassins et alimentent les zones humides sous forme d'un écoulement de surface ou de jaillissement de sources.

La pluie est mesurée à l'aide de pluviomètres dont la surface réceptrice est standardisée (par exemple 400 cm<sup>2</sup>). Certains sont de simples récipients où l'eau est stockée et que l'on vide généralement après chaque jour pluvieux. Si on a besoin d'informations plus précises

1 - Sutcliffe & Parks (1987)  
2 - Thompson & Hollis (1995)

3 - Shepherd et al (1997)



sur le régime des pluies, on peut utiliser un pluviomètre enregistreur ou pluviographe. Certains pluviographes transcrivent en continu la hauteur de pluie sur un graphique, alors que les pluviographes à augets basculeurs contiennent deux petits récipients en équilibre autour d'un axe, destinés à recueillir la pluie. Ces augets ont un volume connu correspondant généralement à 0,1 ou 0,5 mm de pluie. L'un d'eux se remplit de pluie puis se vide automatiquement par basculement sous l'effet de son poids. Le second auget prend alors sa place, se remplit et se vide à son tour et ainsi de suite. L'appareil enregistre le nombre de basculements des augets donc la hauteur de pluie tombée dans un intervalle de temps donné, l'heure par exemple.

Un pluviomètre doit être installé loin des arbres et des constructions susceptibles de faire écran à la pluie, il est admis que la distance séparant l'appareil d'un obstacle doit être d'environ 1,5 fois la hauteur de celui-ci. De même, un pluviomètre ne doit pas être exposé aux vents forts qui créent des turbulences autour de l'appareil et peuvent dévier la trajectoire des gouttes de pluie amenant une sous-estimation de la hauteur des précipitations. Comme la répartition des pluies varie dans l'espace, l'Office météorologique international (OMI) recommande une densité minimale d'un pluviomètre pour 600 à 900 km<sup>2</sup> en plaine sous les climats tempérés, méditerranéens et tropicaux.

Les radars et les satellites météorologiques permettent désormais de mesurer la variation spatiale des pluies avec des pixels de 1 à 25 km<sup>2</sup>, mais leur précision est souvent médiocre et ils doivent être étalonnés à partir de pluviomètres conventionnels.

La mesure des chutes de neige est considérablement plus difficile que celle des pluies. Certains pluviomètres sont équipés de système de chauffage ou bien on se contente de faire fondre la neige recueillie par les pluviomètres classiques. Une meilleure méthode consiste à mesurer la hauteur de neige tombée et de la convertir en équivalent en eau en se référant à la densité de la neige (approximativement 10 cm de neige représentent 1 cm d'eau).

### **Le débit des cours d'eau**

La quantité d'eau qui entre ou sort d'une zone humide par ruissellement est mesurée en établissant pour une section donnée des cours d'eau une relation entre l'écoulement total et la hauteur de l'eau dans la section. Cette relation s'appelle courbe de tarage, elle est réalisée en reportant sur un graphique les résultats d'un certain nombre de mesures de débit effectuées avec un courantomètre pour différentes hauteurs d'eau. Une autre méthode consiste à barrer le cours d'eau par un déversoir dont on a calculé la courbe de tarage théorique, mais une telle structure est chère et peut contrarier la migration des poissons

et d'autres espèces. Lorsque la courbe de tarage est prête, on peut l'utiliser pour convertir les mesures de hauteurs d'eau en débit. Pour les rivières dont le débit varie lentement, celles alimentées par les eaux souterraines par exemple, une mesure quotidienne de la hauteur d'eau sur une échelle limnimétrique graduée suffit. Pour les cours d'eau dont le débit varie rapidement; il faut enregistrer en continu les variations de hauteur à l'aide d'un limnigraphe solidement fixé.

## **L'eau du sol et les eaux souterraines**

La mesure des interactions entre les zones humides et les eaux souterraines est très difficile, qu'il s'agisse des apports par les sources ou des pertes par infiltration. Une méthode pratique a souvent consisté à mesurer les autres termes du bilan hydrologique et d'admettre, en vertu du principe de la conservation de l'eau, que la différence de volume est due aux échanges avec les eaux souterraines. L'infiltration de l'eau dans le sol peut être mesurée à l'aide d'un infiltromètre\*. Par exemple, des tubes en plastique de 1,5 mètre de longueur et de 100 mm de diamètre ont été enfoncés verticalement dans le sol des zones humides de l'Hadejia-Nguru au Nigeria<sup>1</sup>. Ces appareils, dont l'ouverture supérieure était fermée pour éviter l'évaporation, étaient remplis d'eau et le niveau était mesuré tous les trois jours. Un taux moyen d'infiltration d'environ 15 mm par jour a ainsi été mesuré.

Le recours aux isotopes\* peut être une méthode utile pour mesurer la recharge des eaux souterraines. Les isotopes sont des atomes d'un élément chimique donné (comme l'oxygène pour l'eau) qui ont des masses atomiques différentes mais les mêmes propriétés chimiques. Ainsi, l'eau de rivière et l'eau souterraine peuvent être chimiquement identiques mais avoir des isotopes différents, ce qui permet de déterminer leur origine. On a analysé les concentrations naturelles en isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène des eaux de pluie, de rivière, d'inondation et souterraines des zones humides de l'Hadejia-Nguru au Nigeria<sup>1</sup>. Elles ont montré qu'il existe une relation linéaire entre les concentrations en deutérium (isotope lourd stable de masse 2 de l'hydrogène de masse 1) et O18 (isotope lourd de l'oxygène O16) dans la pluie, les eaux d'inondation et souterraines, mais que la relation est plus variable pour l'eau de rivière du fait que "l'évaporation provoque une déviation de la relation linéaire parce que l'hydrogène est fractionné plus vite que l'oxygène". Ces travaux ont montré en outre que la composition des eaux de rivière et souterraines ne sont les mêmes que lorsque la plaine d'inondation est submergée, ce qui signifie que les eaux souterraines sont rechargées quand les zones humides sont inondées. Le débit d'une source peut être mesuré directement en construisant autour de celle-ci, une enceinte étanche munie d'un orifice de sortie,

*1- Schultz (1976)*



généralement une entaille, dont on connaît la relation existant entre son débit et le niveau de l'eau dans l'enceinte. Une autre méthode est de quantifier les propriétés de l'aquifère alimentant la source. Le débit spécifique de cet aquifère est le volume d'eau qui peut s'écouler librement par gravité vers une source. Il peut être calculé à partir d'essais de débit qui consistent à pomper l'eau d'un puits et, après pompage, de mesurer le temps qu'il faut pour que la nappe retrouve son niveau d'origine.

### **L'évaporation**

L'évapotranspiration met en œuvre un certain nombre de processus qui transforment l'eau liquide en vapeur d'eau gazeuse. Elle associe l'évaporation à partir des eaux libres, des sols et d'autres surfaces, à la transpiration des végétaux. L'importance de l'évaporation et de la transpiration végétale dépend de plusieurs variables.

Premièrement, la température et l'humidité de l'air. L'air vaporise l'eau plus rapidement s'il est sec et chaud que s'il est froid et déjà humide. Deuxièmement, la vitesse du vent. Quand l'évaporation se produit, l'air se sature d'humidité au dessus de la surface évaporante, et ne peut guère en prendre plus. Donc plus fort est le vent, plus rapidement l'air humide est chassé et remplacé par de l'air plus sec plus favorable à l'évaporation.

Troisièmement, l'énergie solaire, le plus souvent mesurée en termes de nombre d'heures d'ensoleillement. Pour qu'un kg d'eau passe de l'état liquide à l'état de vapeur, il faut fournir à 10 °C, 2 470 kilojoules (ou 590 kilocalories).

Quatrièmement, l'eau disponible. Il est clair qu'un jour chaud, sec et venté a potentiellement un fort pouvoir évaporant, mais si le sol est sec, il n'y n'aura pas d'évaporation. De même, la possibilité qu'ont les plantes à approvisionner leurs feuilles en eau dépend de la disponibilité de l'eau dans le sol.

En 1802, Dalton a défini les éléments de base de l'évaporation de l'eau libre. En 1948, Penman a proposé une méthode, devenue depuis une référence, qui, à partir des mesures météorologiques de base, permet d'estimer l'évapotranspiration d'"une surface ayant un couvert végétal court, en pleine activité, recouvrant complètement le sol, d'une hauteur uniforme et ne manquant pas d'eau". Des recherches ultérieures ont mis au point des facteurs correctifs pour différents types de cultures ou lorsque l'approvisionnement en eau est limité. Plus récemment, des instruments spécifiques ont été fabriqués pour mesurer l'évapotranspiration, comme Hydra, réalisé par l'Institut d'hydrologie du Royaume-Uni.

L'estimation de l'évaporation à partir des données météorologiques demande donc de mesurer les variables suivantes :

- la température de l'air à l'aide de thermomètres ;
- l'humidité de l'air à l'aide d'un psychromètre composé de deux thermomètres couplés, l'un au bulbe sec et l'autre humide, ou d'un hygromètre ;
- la vitesse du vent mesurée avec un anémomètre ;
- le rayonnement solaire direct de courte longueur d'ondes, mesuré directement avec un pyranomètre ou indirectement à partir de la durée d'insolation à l'aide d'un héliographe ;
- le rayonnement réfléchi de grande longueur d'onde mesuré avec un pyranomètre ;
- la température du sol mesurée à l'aide d'un thermocouple ou d'un capteur de flux de chaleur.

Une méthode moins théorique pour mesurer l'évaporation est le lysimètre\*. Un lysimètre est un appareil dans lequel un prisme de sol, généralement d'environ 10 m<sup>2</sup> de section droite, est hydrologiquement isolé des terrains environnants de même nature que lui. Dans le cas qui nous intéresse, il s'agit d'une portion de zone humide isolée dans la zone humide. De l'eau est pompée dans ou hors du lysimètre pour y maintenir les mêmes conditions d'humidité du sol que dans les terrains environnants. Les entrées d'eau dans le lysimètre sont donc la pluie et les introductions par pompage et les sorties d'eau sont les pompages d'extraction et l'évaporation. En mesurant avec soin le volume des pluies et des pompages, on peut quantifier le volume évaporé.

Un taux d'évaporation moyen d'une surface d'eau libre méditerranéenne peut être de 5 mm par jour. Tandis que l'évapotranspiration d'un plan d'eau entièrement recouvert de nénuphars peut être réduite de 15 %, celle des plantes qui poussent hors de la surface de l'eau et ont une grande surface de feuilles et de tiges, comme la jacinthe d'eau, peut être supérieure de 50 % à l'évaporation de l'eau libre<sup>1</sup>. Cependant, ces taux peuvent varier au cours de l'année, ainsi l'évapotranspiration des roselières, suivant l'état végétatif des roseaux, varie, par rapport à l'évaporation de l'eau libre, de 96 % en avril à 123 % en août<sup>2</sup>. Certains chiffres montrent que l'évapotranspiration de certaines plantes puisse être de plusieurs fois supérieure à l'évaporation de l'eau libre. C'est souvent le cas quand la zone humide est peu étendue et isolée dans un environnement aride. Une arrivée d'air chaud et sec des terres environnantes lui fournit un surcroît d'énergie qui augmente considérablement l'évapotranspiration. Ce phénomène est appelé "effet d'oasis".

1 - Anderson & Idso (1985)

2 - Gilman (1998)

Quelques chiffres publiés des taux d'évapotranspiration de différentes plantes des zones humides (l'évaporation de l'eau libre étant égale à 1).

Climats	Espèces	Croissance forte	Croissance faible	Croissance annuelle	Sources
• Savane tropicale	<i>Eichbornia crassipes</i>	1,35	1,02	1,15	Brezny et al, 1973
	<i>Ipomaea aquatica</i>	1,24	1,01	1,1	Brezny et al, 1973
	<i>Brachystegia</i>	1,35	0,3	0,8	Balek & Perry, 1973
• Steppe	<i>Scriptus acutus</i>	2,0	0,7	1,35	Stearns & Bryan, 1925
• Désert	<i>Eichbornia crassipes</i>	1,44		1,44	Anderson & Idso, 1985
	<i>Nymphaea</i>	0,95		0,95	Cooley & Idso, 1985
	<i>Tamarix galica</i>	2,0	0,35	1,02	Turner & Halpenny, 1941
	<i>Typha latifolia</i>	1,62	0,77	1,18	Blaney et al, 1938
• Australie	<i>Typha</i>		0,6	0,6	Linacre et al, 1970
• Ouganda	<i>Papyrus</i>		0,6	0,6	Rijks, 1969
• Europe centrale	<i>Phragmites</i>	1,80	0,8	1,2	Smid, 1975
• Méditerranée	<i>Scirpus acutus</i>	1,5	1,1	1,25	Muckel & Blaney, 1945
	<i>Scirpus acutus</i>	1,2	2,0	1,35	Blaney & Muckel, 1955
• Humide sub-tropical	<i>Eichbornia crassipes</i>			3,2	Penfold & Earle, 1948
				3,7	Timmer & Weldon, 1967
				5,3	Rodgers & Davis, 1972
• Humide maritime	<i>Jonc, carex</i>	0,74	0,81		Beltman, 1988
	<i>Calamagrostis canescens</i>	1,1	2,0	1,55	Priban & Ondok, 1980
	<i>Phragmites australis</i>	1,8	0,8	1,2	Smid, 1975
	<i>Phragmites australis</i>	2,0	1,2	1,6	Newson & Gilman, 1983
	<i>Phragmites australis</i>	0,96	1,23		Gilman et al, 1998
	<i>Sphagnum</i>	1,5	0,9	1,2	Egglemann, 1963
	<i>Sphagnum</i>	1,45	0,9	1,14	Bay, 1966
	<i>Sphagnum</i>	2,5	2,0	2,25	Clymo, 1970
	<i>Sphagnum</i>	0,8	0,6	0,7	Johansson, 1974
	<i>Typha latifolia</i>	2,5	2,0	2,25	Kovarik, 1958
• Humide continental	<i>Typha</i>	0,8	0,7	0,75	Eisenhlor, 1979
	<i>Thuja occidentalis</i>	1,0	0,7	0,85	Munro, 1979

# Glossaire

**Albédo** : fraction de l'énergie solaire réfléchi par le sol ou la végétation.

**Aquifère** : une couche de terrain contenant (ou pouvant contenir) de l'eau.

**Aquifère surexploité** : aquifère dont on extrait plus d'eau que ne le permet le taux de recharge sur le long terme.

**Bilan hydrologique** : prise en compte des volumes d'eau (sous forme de glace, d'eau ou de vapeur d'eau) entrant dans le cycle hydrologique, en partant du principe qu'il n'y a ni perte ni destruction d'eau.

**Capacité d'infiltration** : quantité d'eau de surface pouvant pénétrer dans le sol par unité de temps.

**Concept du continuum rivière** : prise en compte des liens unissant l'ensemble de l'écosystème rivière et des transferts d'énergie de l'amont à l'aval, de la source de la rivière aux zones côtières.

**Concept du retour périodique des inondations** : la libre communication des cours d'eau avec leurs plaines d'inondation est capitale car la submersion périodique de celles-ci est considérée comme la principale force conditionnant la vie des cours d'eau et non pas comme un problème qu'il faut éradiquer.

**Courbe de fréquence des crues** : relation entre la taille des crues et la probabilité qu'elles se produisent.

**Courbe hypsométrique** : relation entre le niveau et le volume d'une zone humide.

**Crue** : accroissement rapide du débit et du niveau d'un cours d'eau.

**Crue artificielle** : lâcher d'eau d'un lac de barrage pour créer une crue en aval.

**Débit écologique** : débit d'une rivière nécessaire au maintien d'une espèce aquatique ou d'un écosystème.

**Désertification** : dégradation d'un territoire par disparition de sa végétation provoquée par la sécheresse.

**Désynchronisation de crue** : décalage temporel entre une chute de pluie et la crue qu'elle provoque.

**Etiage** : faible débit d'un cours d'eau pendant une sécheresse prolongée.

**Eutrophisation** : enrichissement d'un milieu aquatique en nutriments provoquant un développement exagéré de la végétation qui abaisse la teneur en oxygène de l'eau.



**Evaporation :** départ d'eau vers l'atmosphère à partir des plantes, des sols et des plans d'eau.

**Forage :** trou vertical creusé pour atteindre un aquifère dont on extrait l'eau par pompage.

**Infiltration :** passage de l'eau de l'extérieur vers un terrain perméable à travers la surface du sol elle-même perméable.

**Infiltromètre :** tube de grand diamètre implanté verticalement dans le sol et rempli d'eau pour mesurer le taux d'infiltration. La quantité d'eau cédée par l'appareil par unité de temps est égale à la capacité d'infiltration.

**Inondation :** débordement d'un cours d'eau provoquant la submersion d'un territoire normalement sec.

**Isotopes :** atomes d'un élément chimique donné (comme l'oxygène de l'eau) ayant des masses atomiques différentes mais les mêmes propriétés chimiques. Les isotopes de l'eau des rivières et des eaux souterraines peuvent être différents.

**Lysimètre :** appareil qui permet de mesurer avec précision certains termes du bilan hydrologique comme l'infiltration et l'évapotranspiration. Il comprend un dispositif étanche dans lequel une portion de terrain reste en communication avec l'atmosphère par sa surface (généralement d'environ 10 m<sup>2</sup>), mais est hydrologiquement isolée de l'environnement où elle est placée (par exemple une portion de zone humide isolée au sein de la même zone humide).

**Modèle hydrologique :** caractérisation des processus hydrologiques par des équations mathématiques.

**Nutriments :** sels minéraux nutritifs comme les phosphates et les nitrates.

**Percolation :** circulation de l'eau sous l'effet de la gravité dans la porosité saturée d'un terrain.

**Plaine d'inondation :** terrain plat bordant un cours d'eau, inondé au cours des fortes crues.

**Piézomètre :** tube en acier ou en matière plastique, d'environ 5 cm de diamètre, implanté verticalement dans le sol, en communication avec les eaux souterraines par sa base et dans lequel le niveau d'eau indique la pression régnant dans l'aquifère.

**Pointe de crue :** maximum atteint par le niveau ou le débit d'un cours d'eau pendant une crue.

**Précipitation :** chute d'eau atmosphérique au sol, comprenant la pluie, la neige et la rosée.

**Recharge des eaux souterraines :** circulation de l'eau vers un aquifère pour sa réalimentation.

**Recharge artificielle :** eau répandue sur des sols perméables au dessus d'un aquifère pour provoquer sa réalimentation.

**Scénario de changement climatique :** possibilité d'un changement futur du climat, mais pas nécessairement la prédiction de ce qui va arriver.

**Système d'information géographique (SIG) :** système informatique permettant d'exploiter des bases de données pour l'analyse et la gestion d'entités géographiques physiques ou humaines.

**Ramsar :** Abréviation pour désigner la Convention sur les zones humides d'importance internationale qui s'est tenue en 1972 dans la ville iranienne de Ramsar.

**Sites Ramsar :** Zones humides importantes inscrites au titre de la Convention sur les zones humides d'importance internationales.

**Taux d'apport sédimentaire :** quantité de matériaux érodés sur un bassin versant atteignant une rivière.

**Temps (ou durée) de renouvellement :** temps qui s'écoule pour que toute l'eau d'une zone humide soit remplacée.

**Zones humides :** désignent l'ensemble des eaux continentales, stagnantes ou courantes, naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, douces, saumâtres ou salées, ainsi que les eaux marines dont la profondeur n'excède pas 6 mètres à marée basse.

**Zones de Protection spéciale :** zones importantes pour la conservation des espèces sauvages désignées par la Directive 79/409 de la Communauté européenne.



# Bibliographie

- Acreman, M. C. (Ed)** - Principles of water management for people and the environment. In: de Shirbinin, A. & Dompka, V. (Eds) Water and population dynamics. American Association for the Advancement of Science. Washington, D.C., USA, 1998.
- Acreman, M. C. (Ed)** - Guidelines for the sustainable management of groundwater-fed catchment GRAPES (Groundwater and river Resources Action Programme on a European Scale) Final Report to European Commission. Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 2000.
- Acreman, M.C. & Hollis, G.E. (Eds)** - Water management and wetlands in sub-Saharan Africa. IUCN Gland Switzerland and Cambridge UK, 1996.
- Acreman, M.C. & José, P.** - Wetlands. In: Acreman, M.C. (Ed) Hydrology of the UK, a study of change. Routledge, London, UK, 2000.
- Acreman, M.C. et al** - Groundwater and River Resources Action Programme on a European Scale. Second Annual report to the European Commission. Contract ENV4-CT95-0186. Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 2000
- Agarwal, A. & Chak, A. (Eds)** - Floods, floodplains and environmental myths. Centre for Science and Environment, New Delhi, India, 1991.
- Anderson, M. & Idso, S.B.** - Evaporation rates of floating and emergent aquatic vegetation. Proceedings of the 17<sup>th</sup> Conference on Agriculture and Forest Meteorology, May 1985, Scottsdale, Arizona, USA, 1985.
- Barbier, E.B., Adams, W.M. & Kimmage, K.** - Economic valuation of wetland benefits: The Hadejia-Jama'are floodplain, Nigeria. London Environmental Economics Centre. Discussion Paper DP 91-02. International Institute for Environment and Development, London, UK, 1991.
- Biswas, A. K.** - Land and water management for sustainable agricultural development in Egypt and constraints. Report to FAO and Government of Egypt. FAO, Rome, Italy, 1991.
- Blom, J. Stakelbreek, A & van der Weerd, R.** - Artificial recharge of the Coasta aquifer in the Gaza Strip. Report to the Netherlands Ministry of Foreign Affairs, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, 1995.
- BRGM** - L'hydraulique villageoise dans les pays membres du CILSS: situation au Sénégal. Club du Sahel/CILSS/OCDE, France, 1982.

# Bibliographie

- Breuer, C., Poultney, C. & Nyathi, Z.** - Community-based hydrological management of the Phongolo floodplain. In: Acreman, M.C. & Hollis, G.E. (Eds) Water management and wetlands in sub-Saharan Africa. IUCN Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 1996.
- Bromley, J. et al** - EFEDA-2: Hydrology Group. Contract N°EV5V-CT93-0282. FINAL REPORT. Institute of Hydrology. Wallingford. UK, 1996.
- Bucher, E.M., Bonetto, A., Boyle, T.P., Canevari, P. Castro, G., Huszar, P. & Stone, T.** - Hidrovia - an initial environmental examination of the Paraguay-Parana Waterway. Wetlands for the Americas, Manomet, USA and Buenos Aires, Argentina, 1993.
- Chene, J.M. & Erlich, M.** - On combining the classic propagation models with a multivariate seasonal multi-model competition system - application for real-time forecasting for the River Niger Basin. Fourth International Symposium Multivariate analysis of hydrologic processes, Colorado, USA, 1985.
- Commission of the European Communities** - Wise use and conservation of wetlands. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament COM (9), Brussels, Belgium, 1995.
- Denny, P.** - Water management strategies for the conservation of wetlands. Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 7, 387-394, 1993
- Estrela, T. Marcuello, C. & Iglesias, A.** - Water resources problems in Southern Europe - an overview report. European Topic Centre on Inland Waters, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 1996.
- European Commission** - Karavasta Lagoon - wetland management project. Report to PHARE programme. Tour du Valat, Arles, France, 1996.
- European Environment Agency** - Europe's environment: the search assessment. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 1998.
- Evans, D.** - Assessing the flow needs of rivers. Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 11, 323-328, 1997.
- FAO** - Study of water resources and their exploitation for irrigation in Eastern Crete, Greece, 1972.
- Fariz, G. H. & Hatough-Bouran, A.** - Population dynamics in arid regions: the experience of the Azraq Oasis Conservation Project. In: de Shirbinin, A. & Dompka, V. (Eds) Water and population dynamics; case studies and policy implications. American Association for the Advancement of Science, Washington DC, USA, 1998.
- FRIEND-AMHY** - European Water Archive, Institut of Hydrology, Wallingford, UK, 1997.

- Gamelsrod, T.** - Improving shrimp production by Zambia river regulation. *Ambio*, 21, 145-147, 1992
- Gash, J.H.C., Nobre, C.A. Roberts, J.M. & Victoria, R.L. (Eds)** - Amazonia deforestation and climate. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1996.
- GERSAR/CAGG, Euroconsult, Sir Alexander Gibb, SONAD** - Plan directrice de Développement Intégré pour la Rive Gauche de la vallée du fleuve Sénégal. Schéma Directeur de Matam. Document provisoire. 3 volumes, 1988.
- Ghorbel, A.** - Les transports solides en Tunisie, Division des Ressources en Eau, Tunis, Mimeo, 1980.
- Gilman, K., Hudson, J.A. & Crane, S.** - Evaluation of reedbed re-creation at Ham Wall, Somerset. Report to Somerset County Council, RSPB and English Nature. LIFE project 91-1/UK/026. Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 1998.
- Goodland, R.** - Environmental sustainability in the hydro industry. In: Dorsey, T., Steiner, A., Acreman, M.C. & Orlando, B. Large dams, learning from the past, looking to the future. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK and the World Bank, Washington D.C., USA, 1997.
- Goudie, A.S.** - Environment change. Oxford University Press. Oxford, UK, 1977.
- Hadejia-Nguru Wetlands Conservation Project/National Institute for Policy and Strategic Studies** - Proceedings of the workshop on the management of the water resources of the Komodugu-Yobe basin. National Institute Press, Kuru, Nigeria, 1993.
- Hare, F.K.** - Climate variations, drought and desertification. WMO-N° 653. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1985.
- Heimberg, K.** - Hydrology of north-central Florida cypress domes. In: Ewel K.C. and Odum H.T., (Eds) "Cypress Swamps" Univ. of Florida, Gainesville, USA, 1984.
- Hodnett, M.G., Vendrame, I. De O Marques Filho, A. Oyama, M.D. & Tomasella, J.** - Soil water storage and groundwater behaviour in a catenary sequence beneath forest in central Amazonia. II Floodplain water table behaviour and implications for streamflow generation. *Hydrology and Earth System Sciences* 1, 279-290, 1997.
- Hollis, G.E.** - The modelling and management of the internationally important wetland at Garaet El Ichkeul, Tunisia. International Waterfowl Research Bureau Special Publication N° 4., Slimbridge, UK, 1986.
- Hollis, G.E.** - The hydrological functions of wetlands and their management. In: Gerakis, P.A. (Ed) Conservation and management of Greek wetlands.

# Bibliographie

- Proceedings of a workshop on Greek wetlands, Thessaloniki, Greece, 17-21 April 1989. IUCN, Gland, Switzerland, 1992.
- Hollis, G.E., Adams, W.M. & Aminu-Kano, M.** - The Hadejia-Nguru wetlands - environment, economy and sustainable development of a sahelian floodplain wetland. IUCN, Gland, Switzerland, 1996.
- Hollis, G.E. & Thompson, J.R.** - Hydrological model of the floodplain. In: Hollis, G.E., Adams, W.M. & Aminu-Kano, M. (Eds) The Hadejia-Nguru wetlands. IUCN-The World Conservation Union, Gland Switzerland and Cambridge, UK, 1993.
- Horowitz, M. & Salem-Murdock, R.** - Senegal River Basin Monitoring Activity Synthesis. Institute for Development Anthropology, Binghamton, New York, USA, 1990.
- International Conference on Water and the Environment, Dublin Conference.** - World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1992
- Illy, P.** - Etude hydrogéologique de la vallée du fleuve Sénégal. Projet hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal. 1 volume et 2 annexes, France, 1973.
- Houghton, J.T., Meiro Filho, L.G. & Callander, B.A. (eds.)** - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 1995: the science of climate change. 1996.
- IUCN/UNEP/WWF** - Caring for the Earth. IUCN, Gland, Switzerland, 1991.
- Johnson, I. Elliott, C.R.N. & Gustard A.** - River Allen instream flow requirements.
- Report to National Rivers Authority.** Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 1993.
- Kiselev, P.A.** - Study of water balance of stratified aquifers based on analysis of their regime during hydrological investigations on marshy land and adjacent areas. Hydrology of marsh-ridden areas, Proc. of the Minsk Symp. (June, 1972), Unesco/IAHS, Paris, France, 1975.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. & Simmers, I.** - Groundwater recharge – a guide to understanding and estimating natural recharge. International Association of Hydrogeologists, Volume 8. Heise, Hannover, Germany, 1990.
- Lean, J. & Warrilow, D.** - Simulation of the regional impact of Amazon deforestation. *Nature*, 342, 411-413, 1989.
- Leblois, E. & Sauquet, E.** - Scale effects in runoff mapping. In: FRIEND : Flow regimes from International Experimental and Network data Projects H-5-5 (IHP IV) and 1.1 (IHP V), third report : 1994-1997, CEMAGREF Publishing, Antony, France, 1997.
- Lugo, A.E. & Snedaker, S.C.** - The properties of mangroves in South Florida. In: Snedaker, S.C. & Lugo, A.E. (Eds) The role of



mangrove ecosystems in the maintenance of the environmental quality and high productivity of desirable fisheries. Centre of Aquatic Science, Florida, USA, 1973.

- Lugo, A.E. & Snedaker, S.C.** - The ecology of mangroves. *Ann. Rev. Ecol. System.* 5, 39-64, 1974.
- Matiza, T., Crafter, S. & Dale, P.** - Water resources use in the Zambezi basin. Proceedings of a work held at Kasane, Botswana, IUCN, Gland, Switzerland, 1995.
- Meigh, J. & José, P.** - World flood study. Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 1985.
- MENR** - Amboseli National Park Management Plan. Wildlife Planning Unit, Ministry of Environment and Natural Resources, Nairobi, Kenya, 1981.
- Mathevet, R.** - Commercial value of reed and the impact of agro-environmental policies in the Rhône delta, southern France. 2<sup>nd</sup> International Wildlife Management Congress. The Wildlife Society, 28 June-2<sup>nd</sup> July 1999, Gödöllő, Hungary, in press.
- Meynell P.-J. & Qureshi, M.T.** - Water resources management in the Indus river delta, Pakistan. In: Acreman, M.C. & Lahmann, E. (Eds) *Managing water resources*. Parks Special Issue 5, 15-23, 1995.
- MIMAM** - The new White paper of water in Spain. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, Spain, 1998.
- Mitsch, W.J. & Gosslink, J.G.** - *Wetlands*, Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 1993.
- Nielsen S.A., Refsgaard J.C. & Mathur V.K.** - Conceptual modelling of water loss on floodplains and its application to River Yamuna upstream of Delhi. *Nordic Hydrology*, 22, 265-274, 1991.
- New, M., Hulme, M. & Jones, P.** - Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, 12, 829-856, 1999.
- Newbold, C. & Mountford, O.** - Water level requirements of wetland plants and animals. *English Nature Freshwater Series* n° 5. English Nature, Peterborough, UK, 1997.
- Oberlin, G., Gilard, O. & Givone, P.** - The potentialities of a risk disaggregation between vulnerability and hazard: example of the relative stability induced for flooding risk alleviation.
- European School on Natural Hazards**, Orvieto, Italy, 1996.
- Petts, G.E., Crawford, C. & Clarke, R.** - Determination of minimum flows. National Rivers Authority R&D Note 449, National Rivers Authority Bristol, UK, 1996.
- Poultney, C.** - Water committees take action. *ILEIA Newsletter*, 1, 92, 18-20, 1992.

# Bibliographie

- Savenijie H.G. & Hall, M.J.** - Climate and land use a feedback mechanism? Proceedings of the Delft Conference on Water and the Environment: the key to Africa's Development. June 3-4 1993. IHE Delft, The Netherlands, 1993.
- Schultz International Limited** - Hadejia River Basin Study: volume E: Water Resources. Canadian International Development Agency, Canada, 1976.
- Shepherd, I.M., Al-Khudhairy, D., Kaiser, C., Thompson, J.R., Zalidis, G., Hadjiakiannakis, & Refsgaard, A.** - SHYLOC: System for hydrology using land observation for model calibration, 1997.
- Shukla, J. Nobre, C. & Sellers, P.** - Amazon deforestation and climate change. *Science*, 247, 1322-1325, 1990.
- Skinner, J. & Zalewski, S.** - Functions and values of Mediterranean wetlands. *MedWet - Conservation of Mediterranean Wetlands* volume 2. Tour du Valat, Arles, France, 1995.
- Sutcliffe, J. & Parks, Y.P.** - Hydrological modelling of the Sudd and Jonglei Canal. *Hydrological Sciences Journal* 32, 143-159, 1987.
- Thomas, D.H.L. & Hollis, G.E.** - Use and non-use values in the conservation of Ichkeul National Park, Tunisia. *Environmental Conservation*, 18, 119-130, 1991.
- Thompson, J.R. & Hollis, G.E.** - Hydrological modelling and the sustainable development of the Hadejia-Nguru wetlands, Nigeria. *Hydrological Sciences Journal*, 40, 97-116, 1995.
- Torterotot, J.P.** - Estimer le coût des dommages dus aux inondations fluviales. In: *Les inondations, 1997-1998*. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Paris, France, 1998.
- US Corps of Engineers Cited by Sather, J.M. and Smith, R.D.** - An overview of major wetland functions and values. Report for US Fish and Wildlife Service. FWS/OBS-84/18. September 1994, USA, 1972.
- Van der Linden, A. M.** - Situation sketch on water management in the floodplains of Cambodia. In: *Marchand, M. & Udo de Haes, H.A. (Eds) The people's role in wetland management*. 237-247. CML, Leiden, The Netherlands, 1990.
- Walling, D.E. & Webb, B.W.** - Material transport by the world's rivers: evolving perspectives. In: *Water for the future; hydrology in Perspective*. International Association of Scientific Hydrology, Publication 164, 313-329, 1987.
- World Conference on Environment and Development** - Our common future. Oxford University Press, Oxford, UK, 1987.
- Xue, Y & Shukla, J.** - The influence of land surface properties on Sahel climate. Part 1 Desertification. *Journal of Climatology*, 6, 2232-2245, 1993.



# Index

Afrique du Sud : 24, 25, 26, 36, 57

Albanie : 18, 75

Algérie : 18, 23, 68

Allemagne : 11

Australie : 83, 84

Autriche : 83

Bande de Gaza : 69

Cambodge : 45

Canada : 83

Chili : 16

Chine : 40, 42, 45

Egypte : 10, 42, 76, 77

Espagne : 10, 11, 18, 20, 23, 26, 61, 64, 65, 76, 77

Etats unis : 41, 52, 54, 56, 61

Ethiopie : 37

Ex URSS : 60, 61

France : 10, 23, 40, 46, 47, 72, 76, 83

Grèce : 12, 18, 19, 20, 23, 63, 67

Guinée : 49

Hollande : 11, 69

Inde : 42, 43

Israël : 19, 68

Italie : 18, 19, 20, 23, 76

Kenya : 62

Lybie : 10, 18, 19, 21, 23

Mali : 49

Malte : 19

Maroc : 23, 68

Mozambique : 80

Niger : 49

Nigeria : 32, 33, 85, 97

Norvège : 83

Nouvelle-Zélande : 16, 83

Ouganda : 36

Pakistan : 51, 52, 55, 78, 79, 81

Pérou : 16

Royaume uni : 36, 60, 61, 83, 95

Sahara : 60

Sénégal : 64

Soudan : 37

Tunisie : 19, 23, 34, 35, 45, 48, 66, 68, 94

Turquie : 19, 23, 78



## Station Biologique de la Tour du Valat : Etudier pour mieux gérer

Créée en 1954 par Luc Hoffmann, la Station biologique de la Tour du Valat est un organisme privé, géré par la Fondation Sansouire, reconnue d'utilité publique. Une équipe de près de 80 personnes se consacre aux activités scientifiques, à la gestion du domaine et aux actions de conservation.

Une politique efficace de conservation de la nature doit s'appuyer sur des connaissances scientifiques issues d'une recherche rigoureuse. Dans ce cadre, la Tour du Valat a mis en place un programme de recherche sur le fonctionnement des zones humides et plus particulièrement sur les roselières, les mares temporaires et les rizières. Elle s'implique aussi dans des études à long terme sur les oiseaux d'eau coloniaux en Camargue et en région méditerranéenne. Le département de la conservation s'efforce de promouvoir le transfert des connaissances obtenues par les chercheurs et les gestionnaires à travers le développement de plans de gestion pour les zones humides méditerranéennes, la mise en place de stages de formation, le conseil et l'appui aux politiques promouvant la gestion rationnelle de ces ressources, l'édition d'ouvrages de vulgarisation.

Dans ce contexte, la Tour du Valat s'est donnée pour mission ***“d'arrêter la perte et la dégradation des zones humides méditerranéennes et de les restaurer”***.



CONVENTION ON WETLANDS  
CONVENTION SUR LES ZONES HUMIDES  
CONVENCIÓN SOBRE LOS HUMEDALES  
(Ramsar, Iran, 1971)

## La Convention Ramsar

La Convention sur les zones humides, adoptée à Ramsar, Iran, en 1971, est un traité intergouvernemental qui constitue le cadre des activités nationales et de la coopération internationale en matière de conservation et d'utilisation rationnelle des zones humides et de leurs ressources, comme moyens de parvenir au développement durable dans le monde entier. En mars 1999, la Convention compte 114 Parties contractantes, ayant inscrit 970 zones humides sur la Liste Ramsar des zones humides d'importance internationale. Ces zones humides couvrent, au total, une superficie de 70,6 millions d'hectares.