

# Va-t-on vers une pénurie d'eau ?

Fontaine, 27 septembre 2017

16-06-2004



Luc Descroix,



Hydrologue

**UMR PaLoc (Patrimoines Locaux, IRD et MNHN)**  
MNHN, Département HNS, 57 rue Cuvier, CP 26,  
75231 Paris Cedex 05, France

- tel : + 33 678 92 06 84 / +221 77 524 79 73
- <http://www.paloc.ird.fr/> Courriel: [luc.descroix@ird.fr](mailto:luc.descroix@ird.fr)



# Eaux et territoires

Tension, coopérations  
et géopolitique de l'eau

3<sup>e</sup> EDITION

FREDERIC LASSERE et LUC DESCROIX

 Presses de l'Université du Québec

Water Reports

23

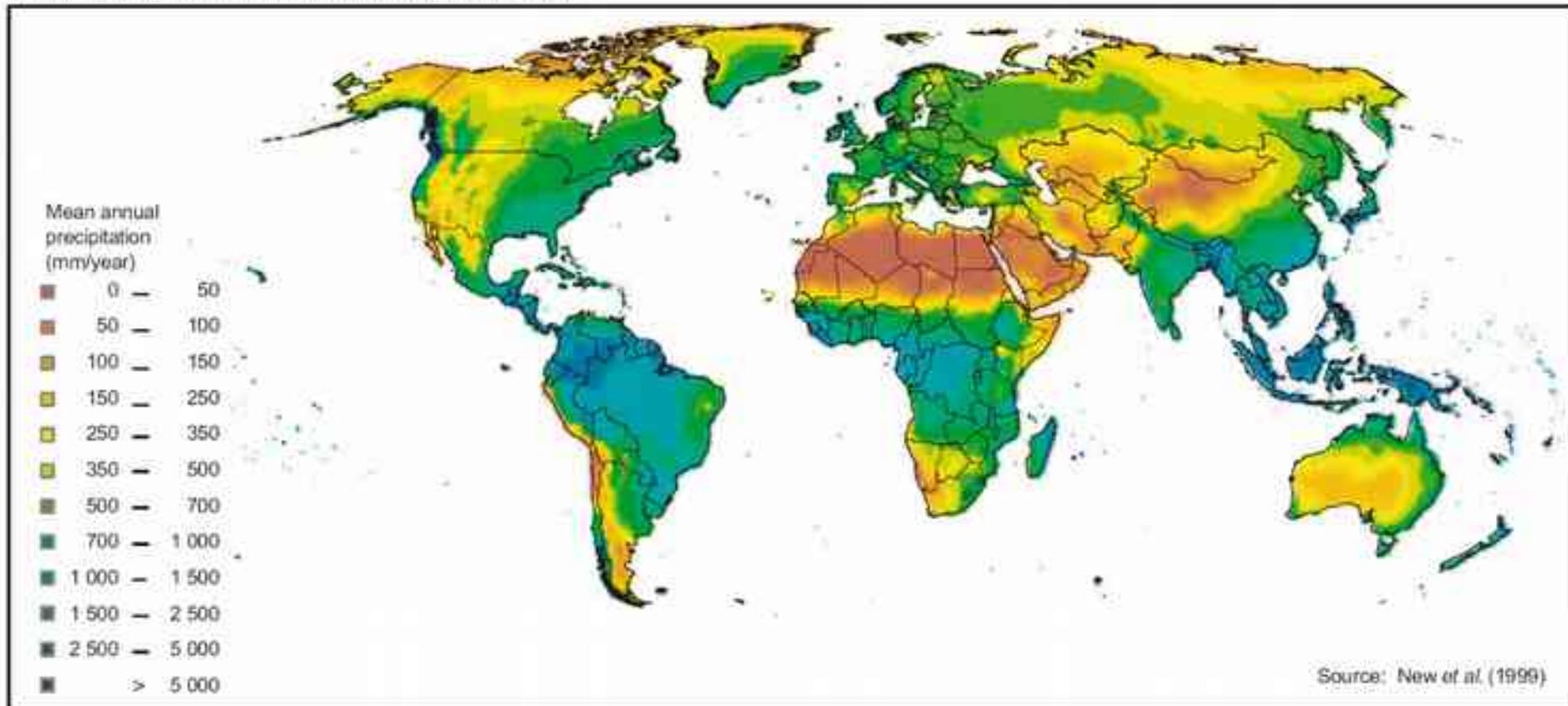


## REVIEW OF WORLD WATER RESOURCES BY COUNTRY



## Quelques données globales....

MAP 1  
World map of mean annual precipitation, 1961–1990



La distribution globale de la pluie

Source: New et al., 1999

## Abondance, rareté, tension et coopération (d'après Eaux et Territoires, 2011)

L'eau est abondante sur Terre, et sa quantité demeure la même

En 2015, chaque habitant disposait en théorie, de 5700 m<sup>3</sup> d'eau douce et devrait en disposer de 4800 m<sup>3</sup> en 2025.

Mais la ressource est très inégalement répartie et 10 pays se partagent 60% de la ressource avec en tête le Brésil, la Russie, la Chine et le Canada ; or les trois premiers ont aussi des problèmes d'aridité dans une partie de leur territoire, et la Chine 1,5 milliard d'habitants à abreuver et à nourrir !

La Chine reçoit 7% des précipitations tombant sur la Planète mais abrite 22% de sa population

L'Amazonie reçoit 15% de la pluie pour 0,3% de la population

La relative rareté de l'eau s'entend de plus en plus en termes d'eau potable et de qualité :

Chaque année, 5 millions de décès sont attribuables à une eau de mauvaise qualité, facilitant la transmission du choléra, de la typhoïde, des diarrhées.

L'accroissement des zones irriguées, des zones mal drainées, des surfaces imperméabilisées sur lesquelles stagnent les eaux de pluie, favorisent d'autres maladies hydriques telles que le paludisme et les maladies parasitaires comme la schistosomiase (bilharziose), la fièvre du Nil, etc.

La population mondiale a atteint les 7,5 milliards d'habitants en 2017 ; elle a donc triplé en 100 ans ; mais les prélèvements globaux en eau ont été multipliés, eux, par 6 ; en effet la consommation d'eau par habitant a augmenté bien plus vite que la population, surtout dans les pays dits développés.

En plus de l'augmentation de la consommation domestique avec l'élévation du niveau de vie, la production agricole a considérablement augmenté depuis le début des années 1950 surtout et en grande partie du fait d'un recours accru à l'irrigation.

Plus de 800 millions de personnes souffrent de la faim dans le monde malgré cette forte augmentation de la production, qui s'est de fait ralentie depuis les années 1980.

On est passé de 5000 barrages en 1950 à plus de 45000 de nos jours ; l'ensemble de leurs réservoirs modifie de 16% le débit naturel des fleuves et les conséquences écologiques et sociales sont parfois énormes.

La pénurie est tangible ; on utilise plusieurs seuils pour l'estimer :

- le seuil de contrainte ou d'alerte à moins de 1700 m<sup>3</sup>/hab/an, situation de 46 pays et 1,5 milliards d'habitants en 2008
- le seuil de pénurie relative, inférieur à 1000 m<sup>3</sup>/hab/an concerne 28 pays et 300 millions d'habitants en 2008
- le seuil de pénurie critique ou absolue à moins de 500 m<sup>3</sup>/h/an, intéresse l'Algérie, la Tunisie, la Palestine, Israël, la Jordanie, la Libye, l'Arabie Saoudite entre autres

Sur la Terre, il y a l'eau visible : les [océans](#), l'eau contenue dans les [calottes polaires](#), les [lacs](#), les [rivières](#), les [nuages](#) et la [pluie](#) ; et l'eau invisible : les eaux souterraines.

Si l'eau est très présente sur terre, 97 % de la [ressource](#) est de l'eau salée et 2 % est bloquée sous forme de glace. Il ne reste environ que moins de 1 % d'[eau douce](#) sous forme liquide.

Les eaux douces exploitées ont une origine continentale :

les eaux de précipitation : [atmosphère](#) ;

les eaux de surface : [rivières](#), plans d'eau ;

les eaux souterraines : elle proviennent du sous-sol (aquifères ou roches réservoirs) captées par sources naturelles ou [forages](#).

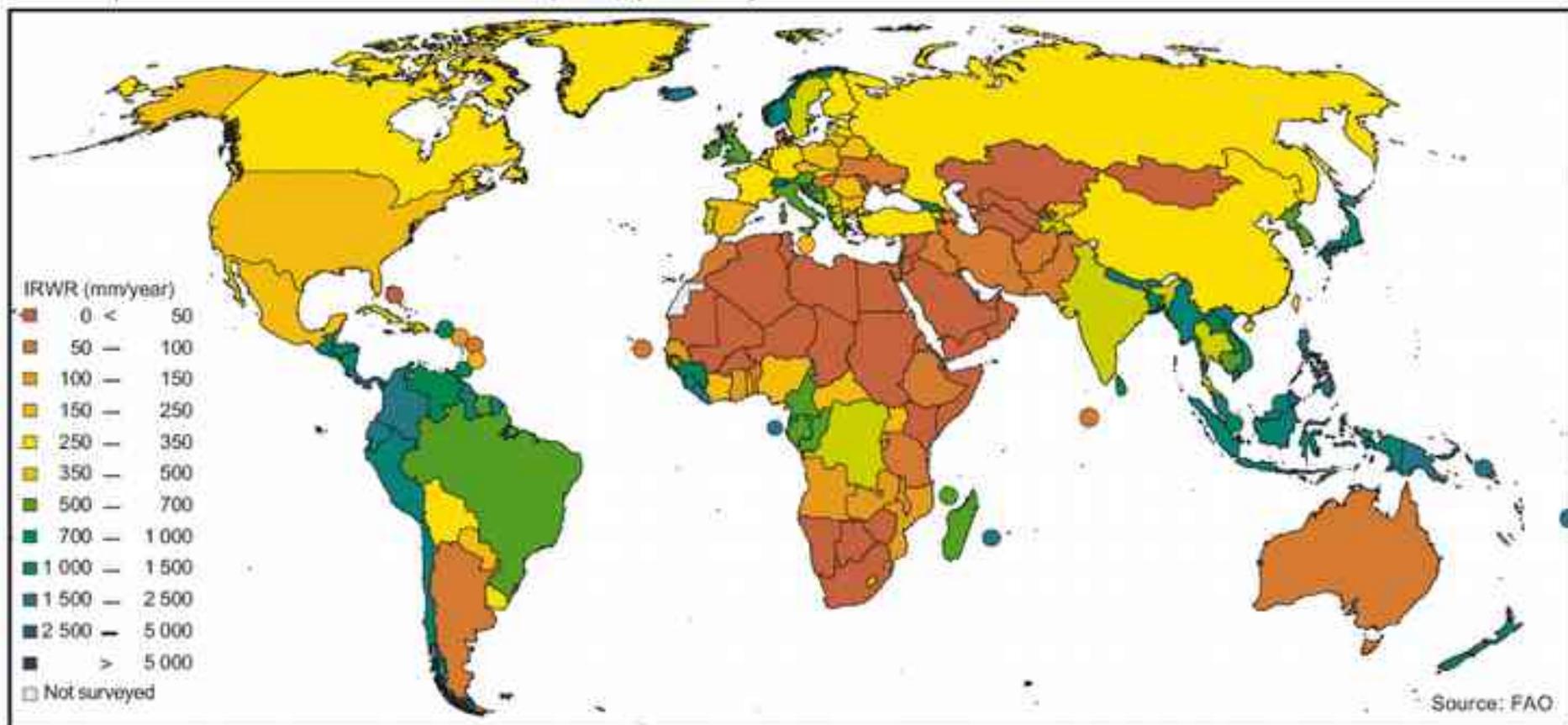
Elles représentent 0,6 % de la ressource totale en eau.

### **Stocks totaux d'eau**

**1,4 milliard de km<sup>3</sup>**

océans, mers	1,35 milliard de km <sup>3</sup>	97,3 %
glaces	27,5 millions de km <sup>3</sup>	2,15 %
eaux souterraines	8,2 millions de km <sup>3</sup>	0,63 %
lacs, rivières	207 000 km <sup>3</sup>	0,01 %
humidité du sol	70 000 km <sup>3</sup>	0,005 %
eau des cellules vivantes	1 100 km <sup>3</sup>	0,0001 %
humidité de l'air	13 000 km <sup>3</sup>	0,001 %

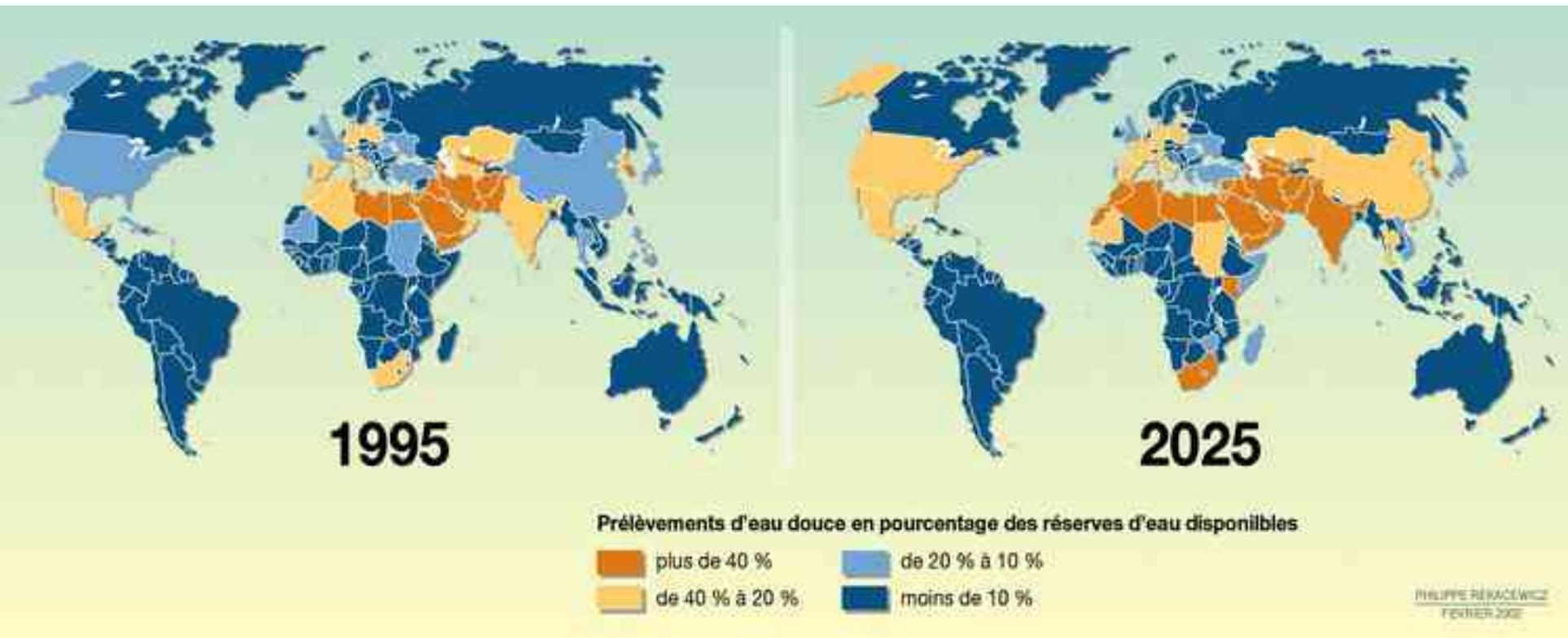
MAP 2  
World map of internal renewable water resources (IRWR), per country



La ressource renouvelable interne par pays  
(sans compter l'apport des fleuves venant d'ailleurs)

Source: FAO

# Vous avez dit Stress hydrique ?



Source : Atlas mondial de l'eau

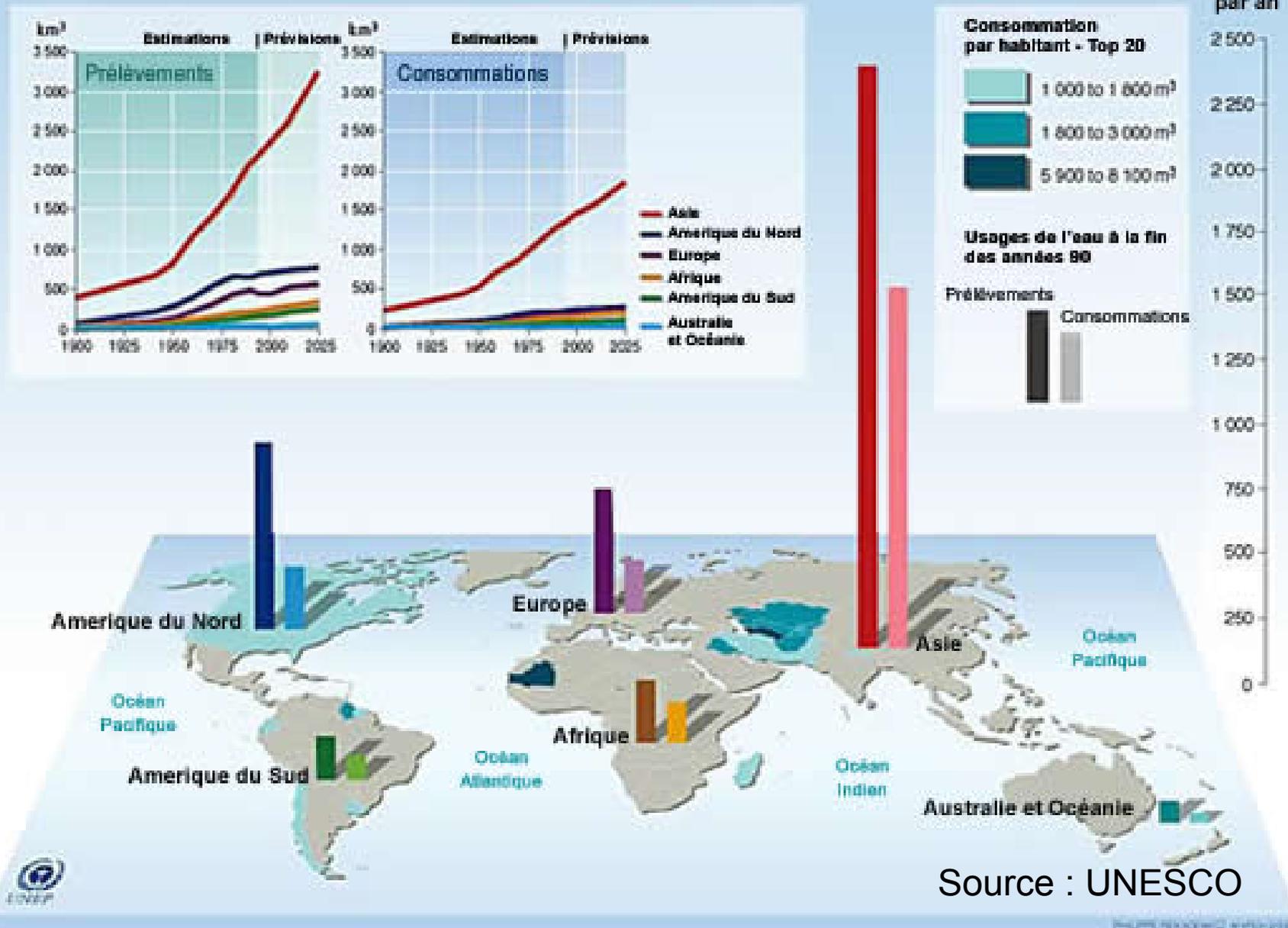
## Wikipedia

Entrent dans cette catégorie les pays dont la disponibilité en eau par an et par habitant est inférieure à 1700 m<sup>3</sup>, dans les [zones arides](#) notamment. En dessous de moins de 1000 m<sup>3</sup>/hbt/an, on parle de [pénurie](#) d'eau.

Les pays du [Proche-Orient](#), du [Moyen-Orient](#) d' [Afrique](#) et de l'[Asie](#) sont considérablement touchés par ce phénomène.

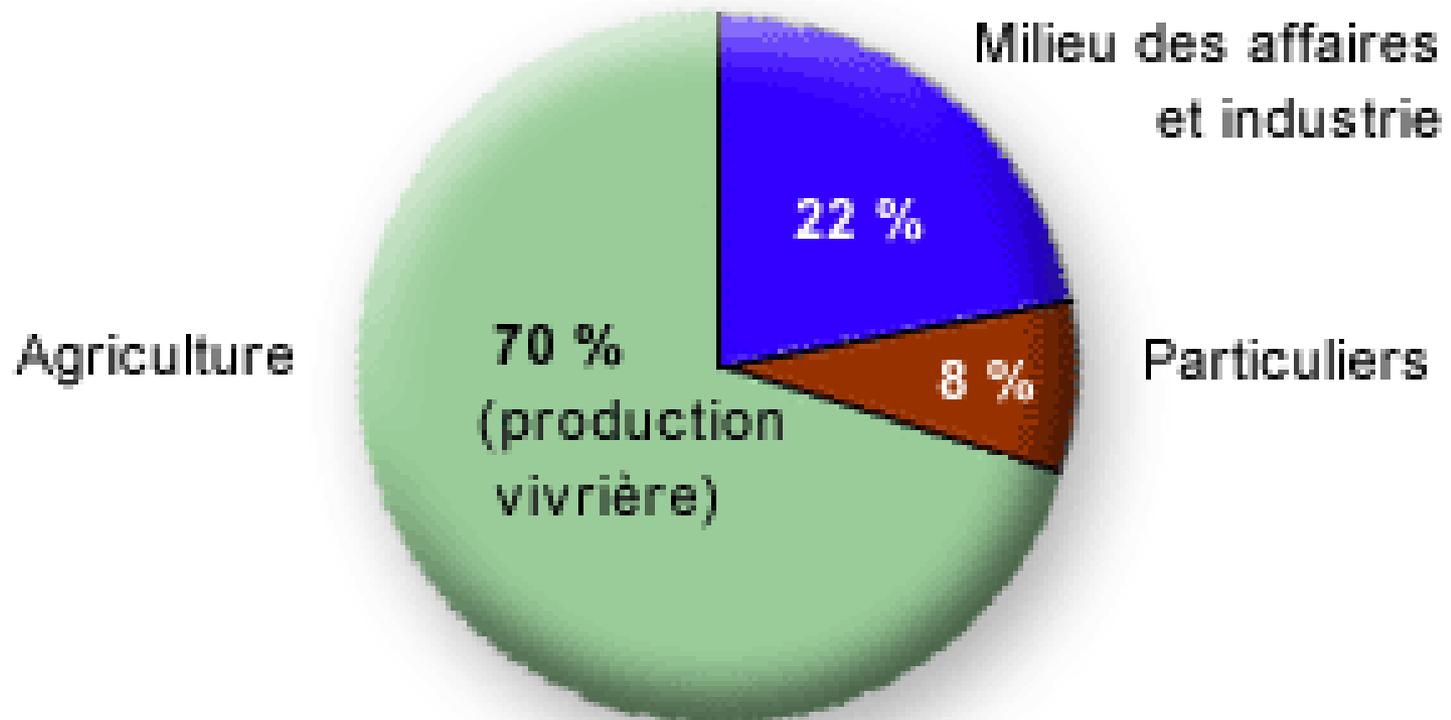
Le *stress hydrique* est aussi un indicateur en [pourcentage](#) faisant le rapport entre le besoin en eau et les ressources disponibles. Celui-ci peut atteindre ou excéder les 100%. (**c'est le cas ici dans l'Atlas Mondial de l'Eau**)

# Les Prélèvements et les Consommations d'Eau dans le Monde



Source : UNESCO

# Utilisation de l'eau dans le monde



source

Agence canadienne de développement international  
[www.acdi.gc.ca](http://www.acdi.gc.ca)

## Quelques chiffres sur l'utilisation de l'eau :

- Pour produire **1kg de salade**, il faut en moyenne 25 litres d'eau
  - \* Pour produire **1kg de blé**, il faut en moyenne 1 500 litres d'eau
  - \* Pour produire **1kg de riz**, il faut en moyenne 4 500 litres d'eau
  - \* Pour produire **1kg de fromage**, il faut en moyenne 1 100 litres d'eau
- \* Pour produire **une tonne d'acier**, il faut en moyenne 20 000 litres d'eau.
- \* Pour produire **une tonne d'aluminium**, il faut en moyenne 125 millions de litres d'eau.
- \* Pour produire **une tonne de papier**, il faut en moyenne 40 000 litres d'eau.
- \* Pour produire **une tonne de plastique**, il faut en moyenne 2 millions de litres d'eau
- \* Pour produire **une voiture**, il faut en moyenne 35 000 litres d'eau
- \* Pour produire **une tonne de médicaments**, plus de 5 milliards de litres d'eau.

source

Agence canadienne de développement international

[www.acdi.gc.ca](http://www.acdi.gc.ca)



**3L**

Cuisson  
Boisson

**3L**

Lavage  
voiture

**8L**

Autres  
lavages

**9L**

Lave  
Vaisselle

**11L**

Arrosage  
Jardin

**17L**

Lave  
Linge

**46L**

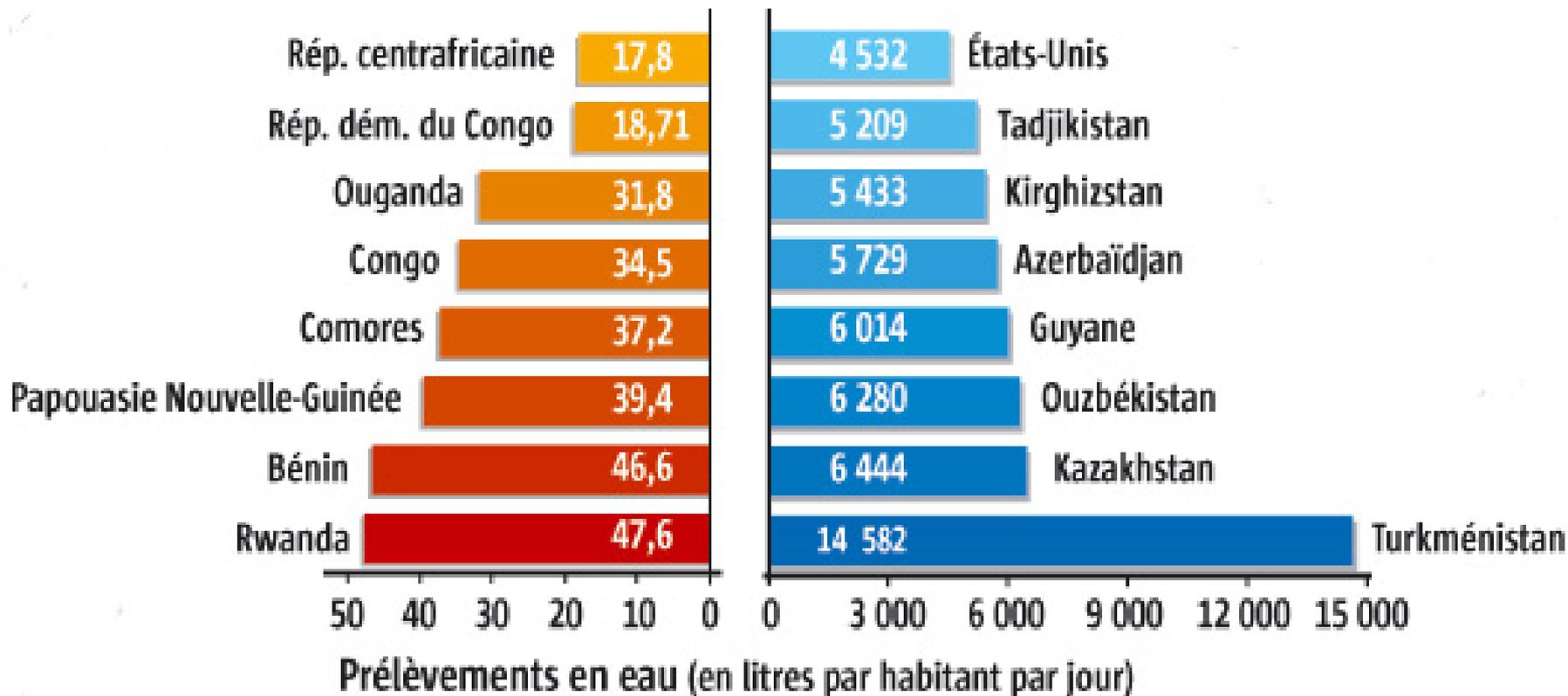
WC

**53L**

Soin du  
corps

source: Secti Environnement

Et dans la maison ?



Les pays qui consomment le moins  
(en fait les moins équipés ?)

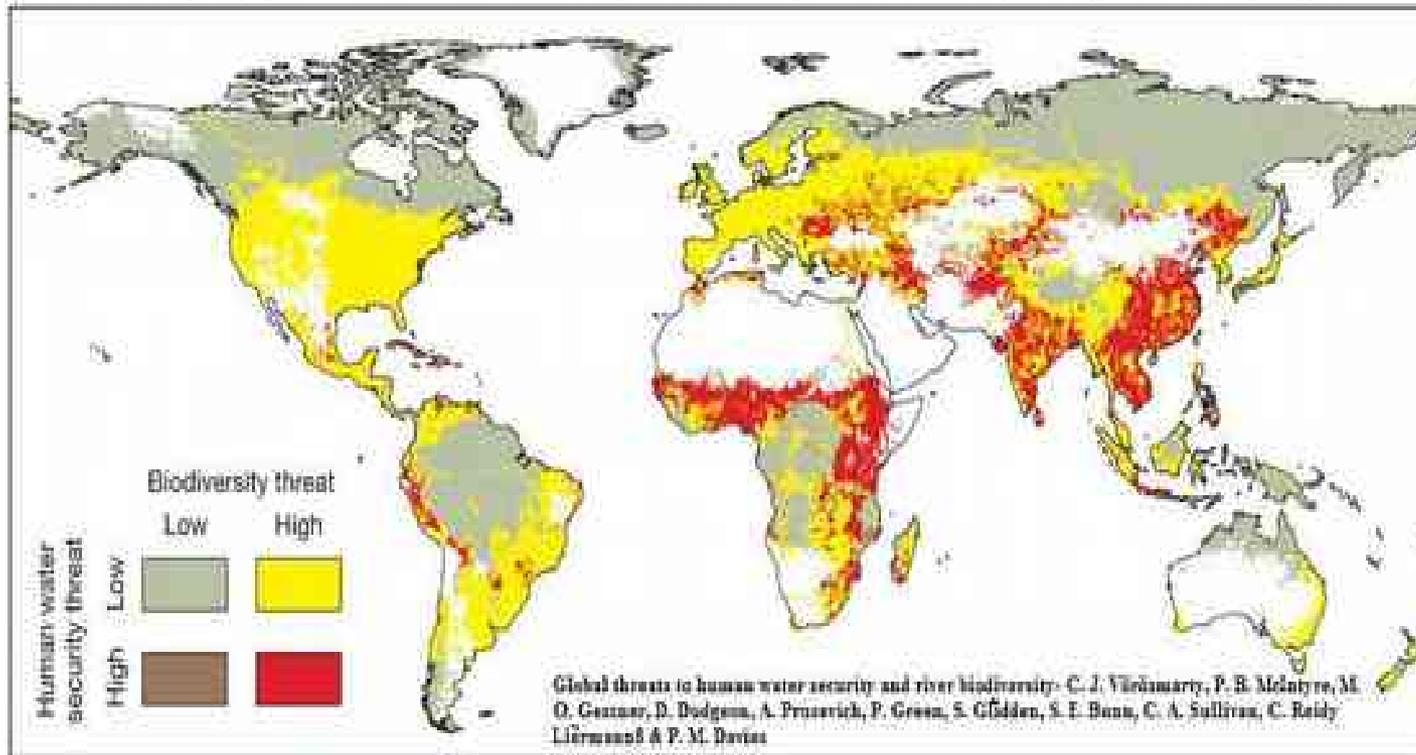
Ceux qui consomment le plus d'eau:  
Ceux du bassin de la mer d'Aral et les autres

Source: <http://www.fibrenature.com/blog/?p=26>

[L'arrière boutique](#)

Le blog du site [www.fibrenature.com](http://www.fibrenature.com)

**80% de la population mondiale dépend directement de fleuves fortement menacés**



**United Nations report : water ressources in 2015**

Vision 2050 : L'eau dans un monde durable

« Un monde durable, tel qu'on espère le voir se réaliser dans un proche avenir, est un monde où **l'eau et les ressources connexes** sont gérées dans l'intérêt du bien-être humain et de l'intégrité de l'écosystème dans une économie robuste. » (ONU)

# Eau bleue, eau verte

## Eau bleue

### Stock

### Flux

- Neige
- Aquifère peu profond
- Aquifère profond
- Cours d'eau

- Ruissellement
- Infiltration
- Percolation
- Écoulement de subsurface
- Écoulement souterrain

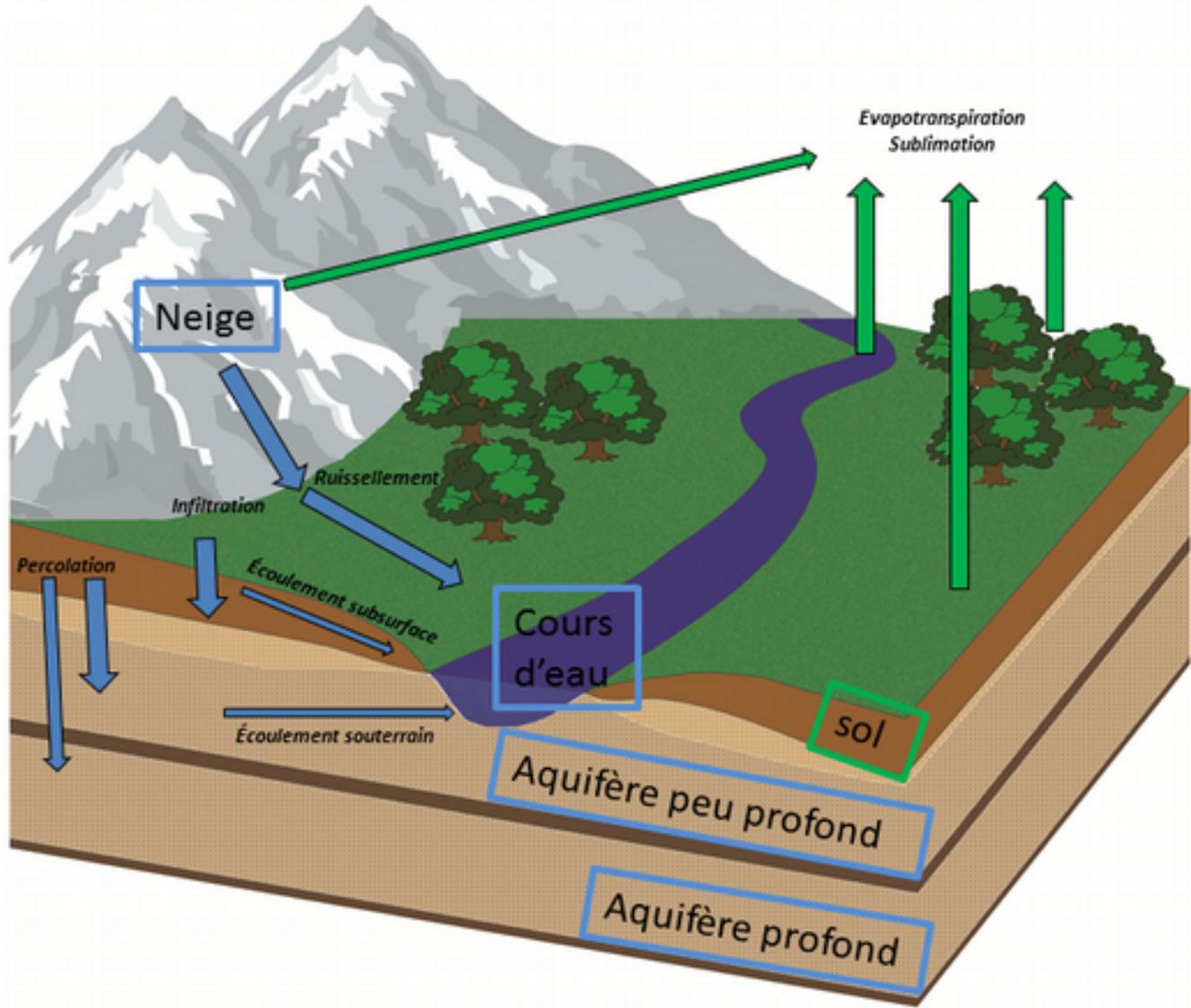
## Eau verte

### Stock

### Flux

- Teneur en eau du sol

- Évaporation
- Transpiration
- Sublimation



Source: SIMULEAU, description du modèle SWAT

# COMMENT SE PROCURER DE L'EAU DOUCE ?

Du plus facile au plus ardu

- Le plus simple : les nappes : de l'eau naturellement filtrée
- Ensuite, de l'eau de rivière, à filtrer, traiter éventuellement décontaminer
- Au-delà, la même (les mêmes) mais à aller chercher plus loin : les transferts
- Enfin, le dessalement de l'eau de mer

Les techniques de potabilisation

Filtration

traitement

En dernier ressort, l'eau de mer.... En principe inépuisable....

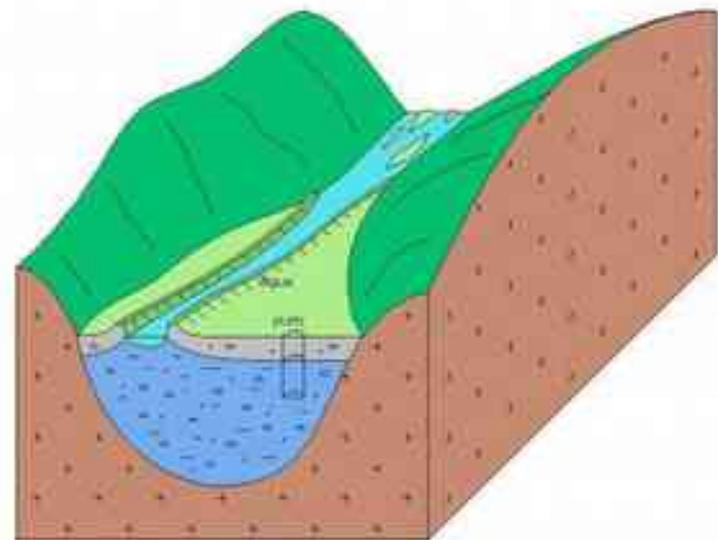
Le dessalement de l'eau de mer

De l'eau naturellement filtrée....



À Grenoble et dans la métro,  
une eau pure filtrée naturellement !





-  Socle imperméable, creusé par les glaciers
-  Sables, graviers : remplissage perméable
-  Sables, graviers imbibés d'eau = nappe alluviale

# Pour l'avenir: l'eau d'Olle





La métropole de Lyon a aussi une eau de nappe de très bonne qualité:  
Les « cailloutis fluvio-glaciaires du Bas Dauphiné »



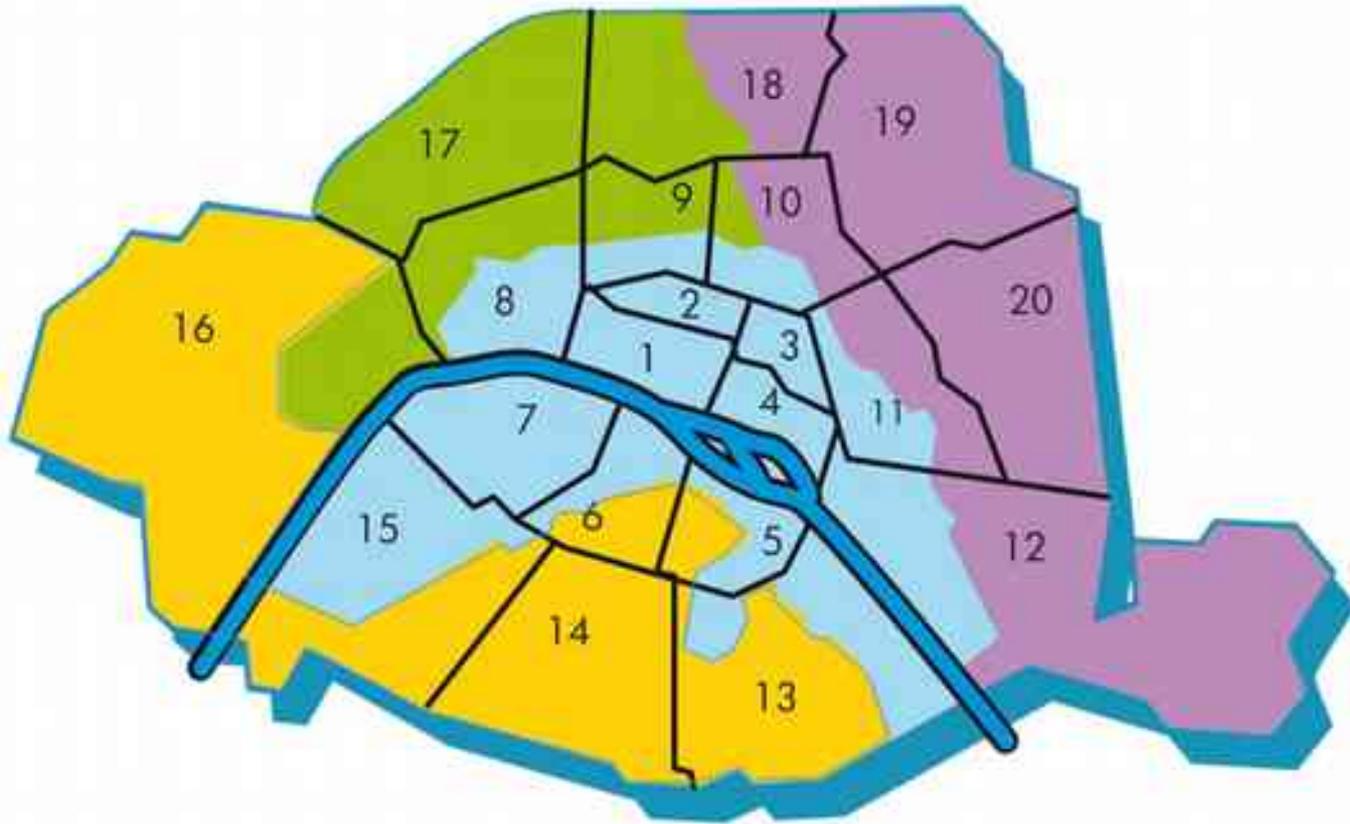
Avantage : ne nécessite pas de traitement ou peu de traitement (donc peu coûteux)

Par contre un contrôle permanent est nécessaire (d'où les deux bassins)

Mais les risques y sont nombreux surtout celui de la pollution:

- Si l'eau circule bien dans les nappes, les polluants aussi
- En cas de pollution, les alluvions (réservoir naturel) sont très difficiles à décontaminer (processus long); d'où la protection et surveillance intenses dont font l'objet les champs captants;
- Eventuellement, risque de contamination volontaire aussi

De l'eau abondante mais à traiter....



- UDI sud-ouest : Eau des sources de la Vanne traitée à L'Hay-les-Roses et eau de la Seine traitées à Orly.
- UDI nord-ouest : eau des sources de l'Avre traitée à Saint-Cloud.
- UDI est : eau de la Seine traitée à Orly et eau de la Marne traitée à Joinville.
- UDI centre : eau des sources du Loing traitée à Sorques et eau de la Voulzie traitée à Longueville.

UDI = unité de distribution

# D'où vient l'eau de Paris ?

L'approvisionnement de Paris en eau provient à part égales de cours d'eau (Seine et Marne) et de sources situées parfois jusqu'à 150 km de la Capitale !

D'importants besoins quotidiens en eau

Paris compte plus de 2 200 000 habitants. De plus, près de 1 000 000 personnes y travaillent chaque jour. Pour satisfaire leur demande, 514 000 m<sup>3</sup> d'eau potable en moyenne sont mis en distribution chaque jour (chiffre 2014).

# Paris peut-elle manquer d'eau ?

La diversité des ressources (eaux souterraines et eaux de surface) garantit une sécurité d'approvisionnement de la Capitale.

Avant d'être distribuée, l'eau potable est stockée dans 5 réservoirs principaux d'une capacité globale de 1 087 000 m<sup>3</sup> d'eau, volume correspondant à plus de 2 jours de consommation. Le réseau parisien est interconnecté avec l'ensemble du réseau de la banlieue de Paris : en cas de besoin, les différents fournisseurs d'eau peuvent se porter mutuellement secours.



Le réservoir Montsouris est ce long bâtiment recouvert de pelouse et coiffé de deux délicats pavillons de verre et de métal à l'architecture typique du XIXe siècle qui s'étale en bordure de la rue de la Tombe-Issoire.

Ce chef-d'œuvre de Belgrand, unique en son genre, stocke 203 000 m<sup>3</sup> d'eau en provenance de Nemours, Provins, Fontainebleau, les Vals de Seine, et approvisionne en eau 1/5 de la population parisienne.

Donc les parisiens boivent bien, entre autres, l'eau de la Seine...



A Niamey (Niger) on dit  
qu'on boit l'eau de  
la SEEN

C'est le nom de la filiale  
locale d'une  
multinationale française

Mais c'est bien l'eau  
du fleuve Niger,  
un des plus grands  
d'Afrique,  
que l'on boit !





Très peu d'industries, de mines et pas d'agriculture moderne et polluante en amont : très peu de risque de pollution

Ici la contrainte est celle du traitement (potabilisation), mais qui est une technique éprouvée

Les risques existent aussi :

- Pollution accidentelle ou intentionnelle (malveillance, attentat..);
- Comme dans le cas précédent (nappe) cela peut intervenir aussi dans la centrale de contrôle
- Inondation pouvant détruire les pompes et matériel de relèvement de l'eau
- Étiage total (ex Niamey en juin 1985,,,) )

Mais parfois, il faut aller chercher l'eau loin,  
dans les montagnes, dans les bassins voisins...

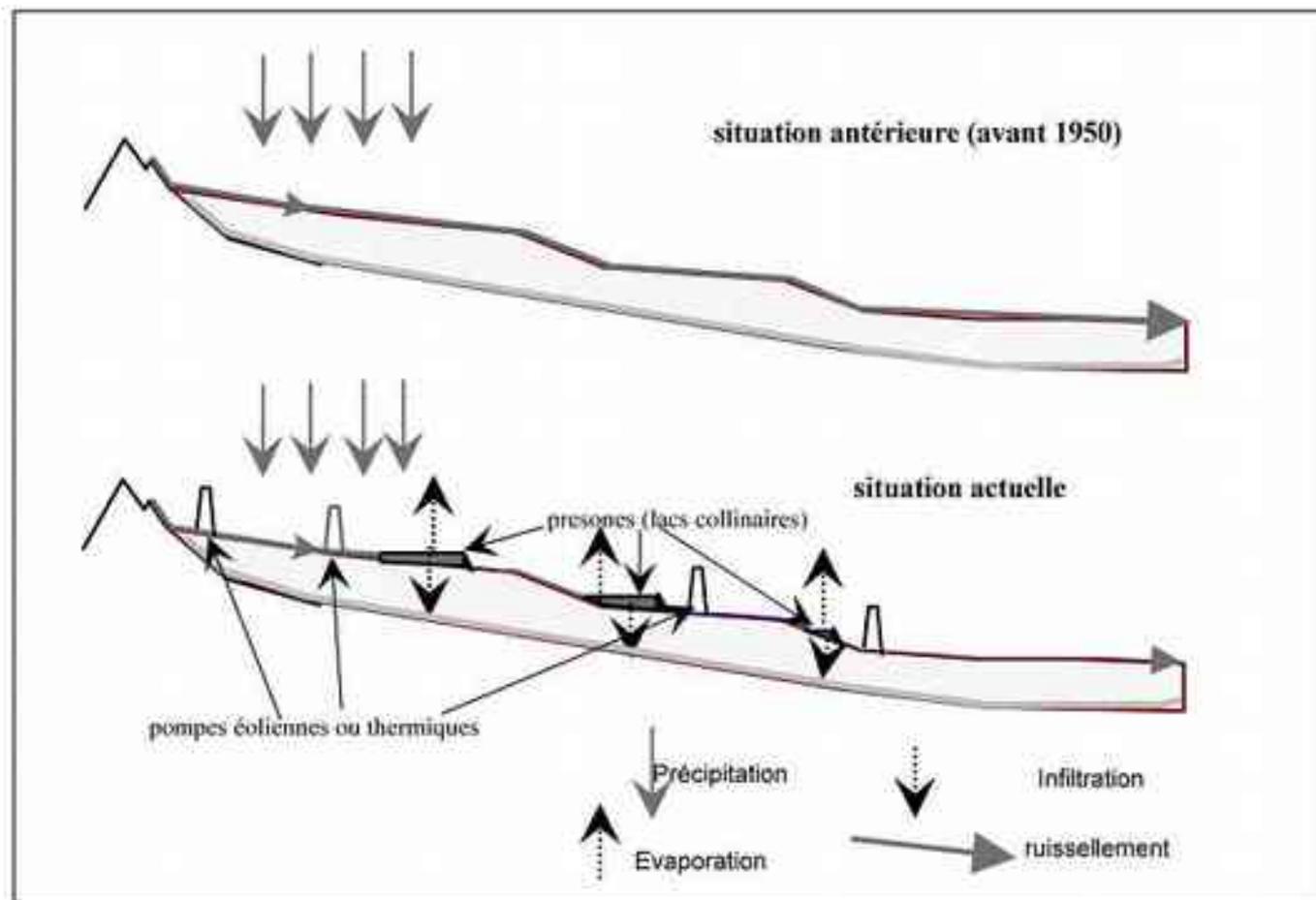
C'est ce qu'on appelle les transferts d'eau

4 exemples mexicains

Une grande propriété privée s'accapare toute l'eau tombée sur son bassin, ne laissant rien couler en aval : vers des conflits d'usage à l'échelle locale

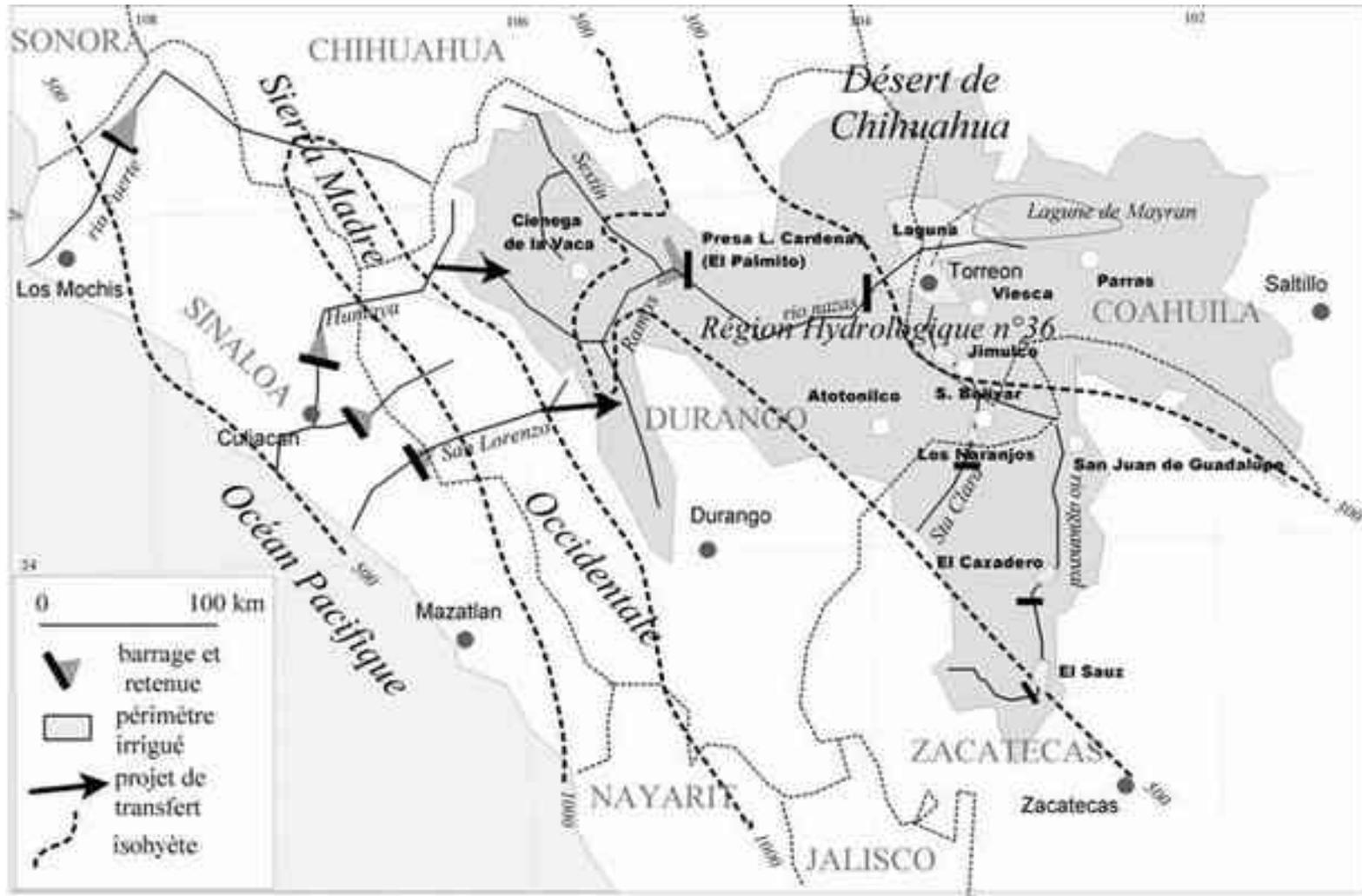
Rancho Atotonilco 45000 hectares (Etat de Durango)

Source: *Eaux et Territoires*, 2011



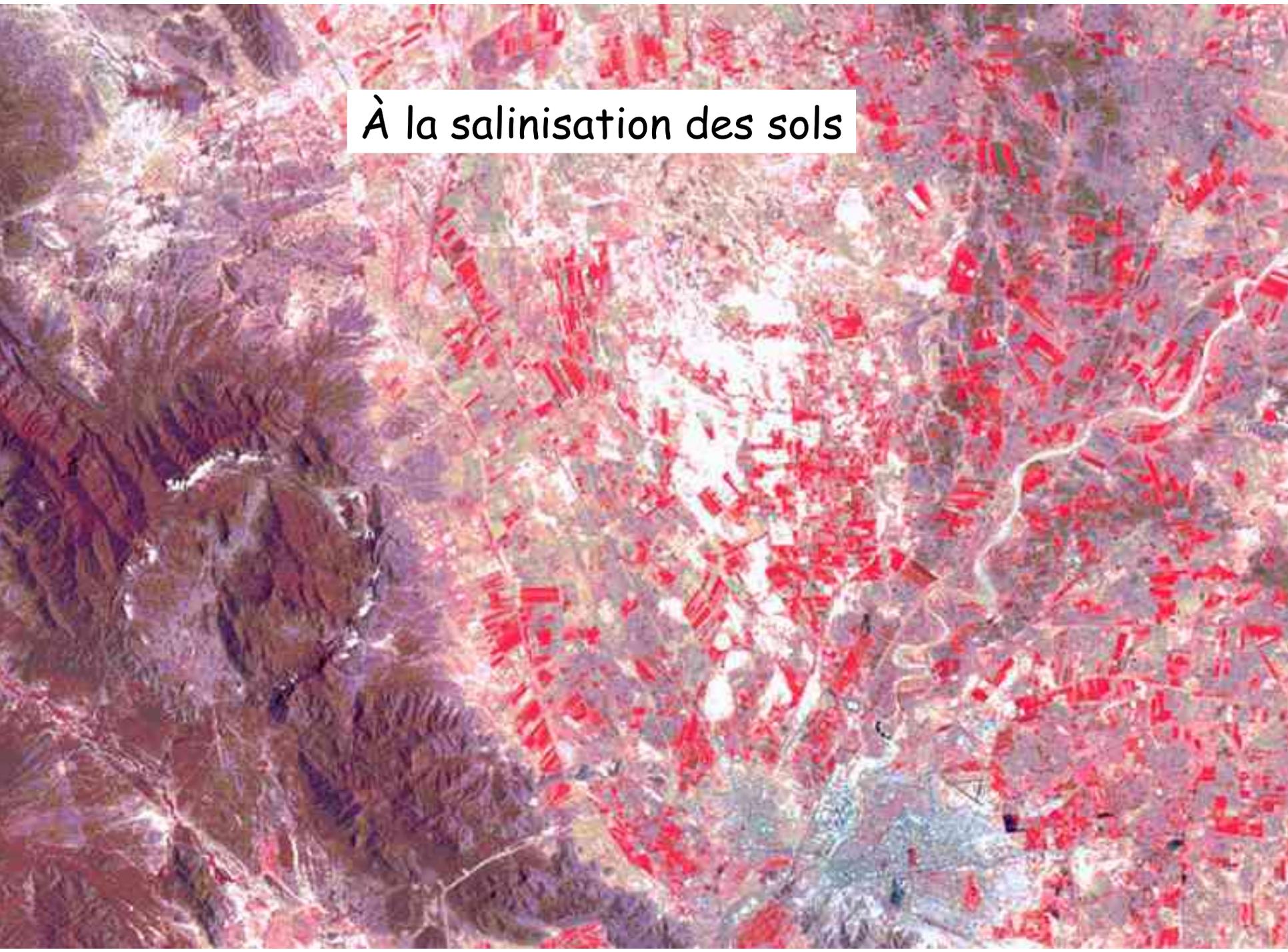
Au Nord du Mexique, le barrage de Palmito a été construit en 1944 pour permettre l'irrigation de 150000 hectares en aval, dans le désert de Chihuahua, dans un bassin endoréique

# Ses conséquences en aval...



Source: Eaux et Territoires, 2011

À la salinisation des sols



En effet,

24000 m<sup>3</sup> d'eau par hectares (8000 m<sup>3</sup> \* 3 récoltes par an)

Avec de l'eau douce

Mais l'eau douce contient quand même, dans ce cas là, 0,1 g de sel par litre

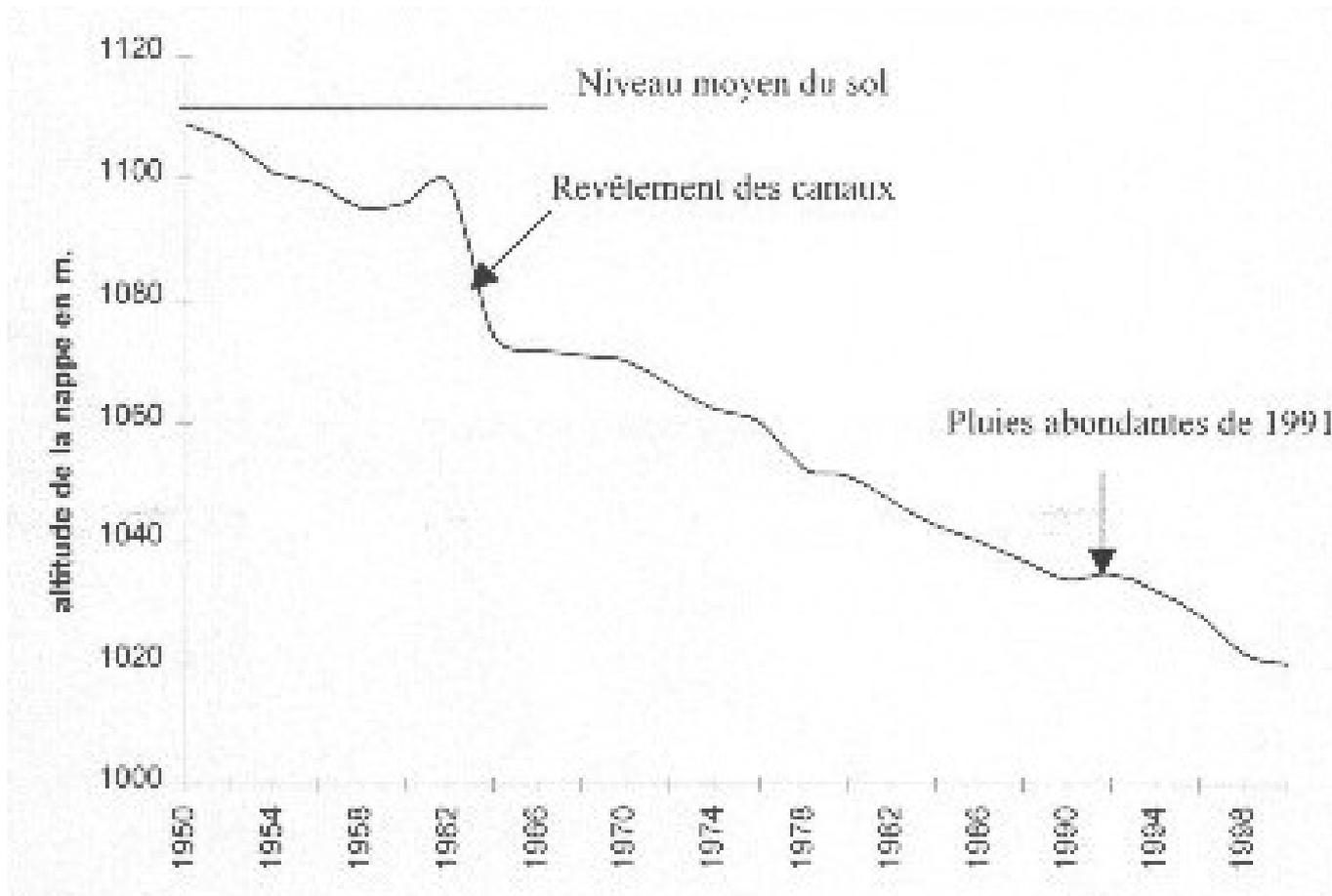
24000000 de litres d'eau à 0,1 g/l de sel

Font

2400000 g de sel par hectare et par an

Soit 2400 kg, soit 2,4 tonnes de sel par an et par hectare.....

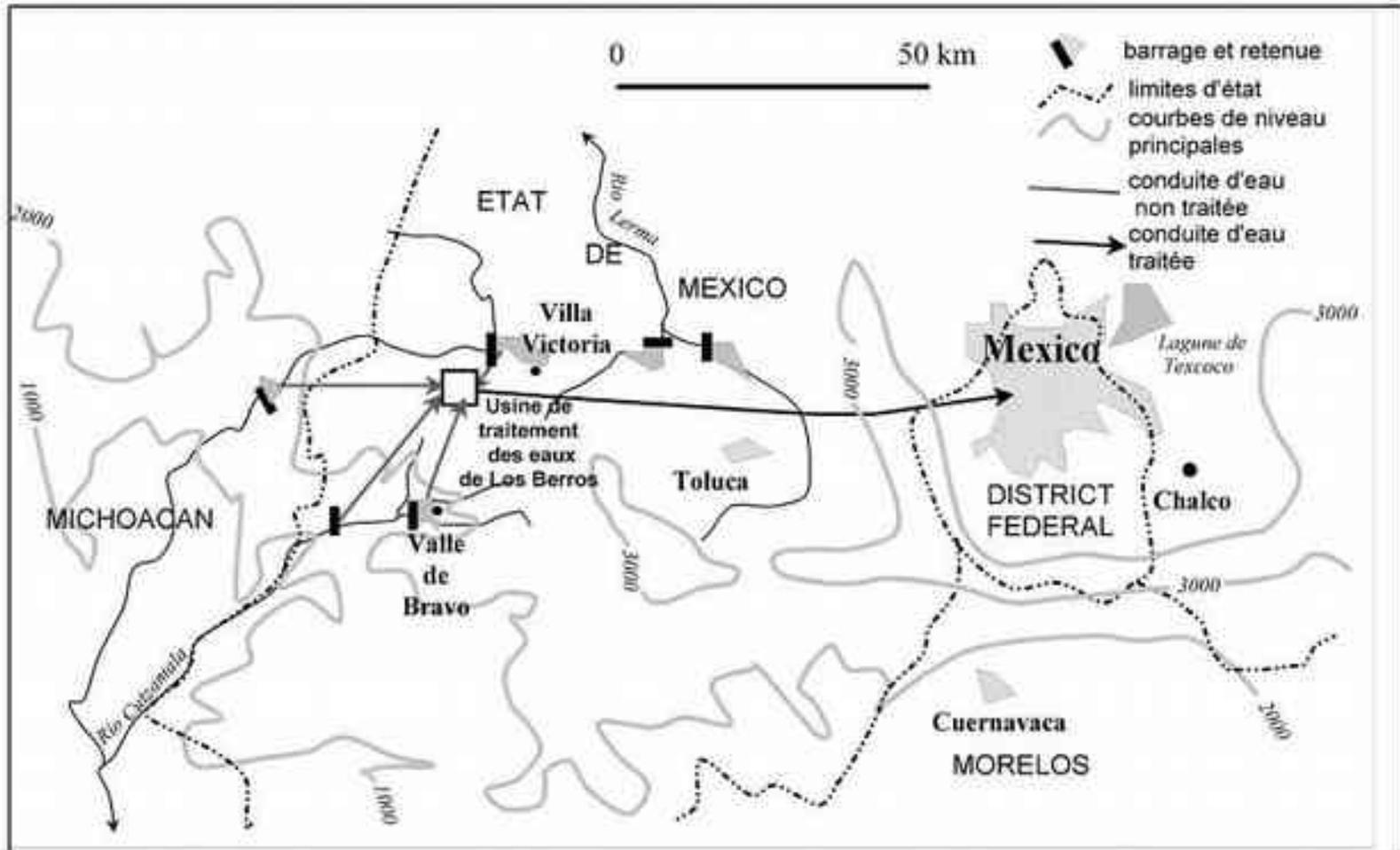
# Le manque d'eaux de surface conduit à une surexploitation des eaux souterraines



Source: *Eaux et Territoires*, 2011



# à l'échelle régionale. Changement d'affectation d'un équipement hydraulique



Source: *Eaux et Territoires*, 2011



Idem à l'échelle internationale !



*Source: Eaux et Territoires, 2011*

Comme pour le transfert des eaux du Colorado vers la Californie, quand il n'y a pas de pente, il faut pomper.....

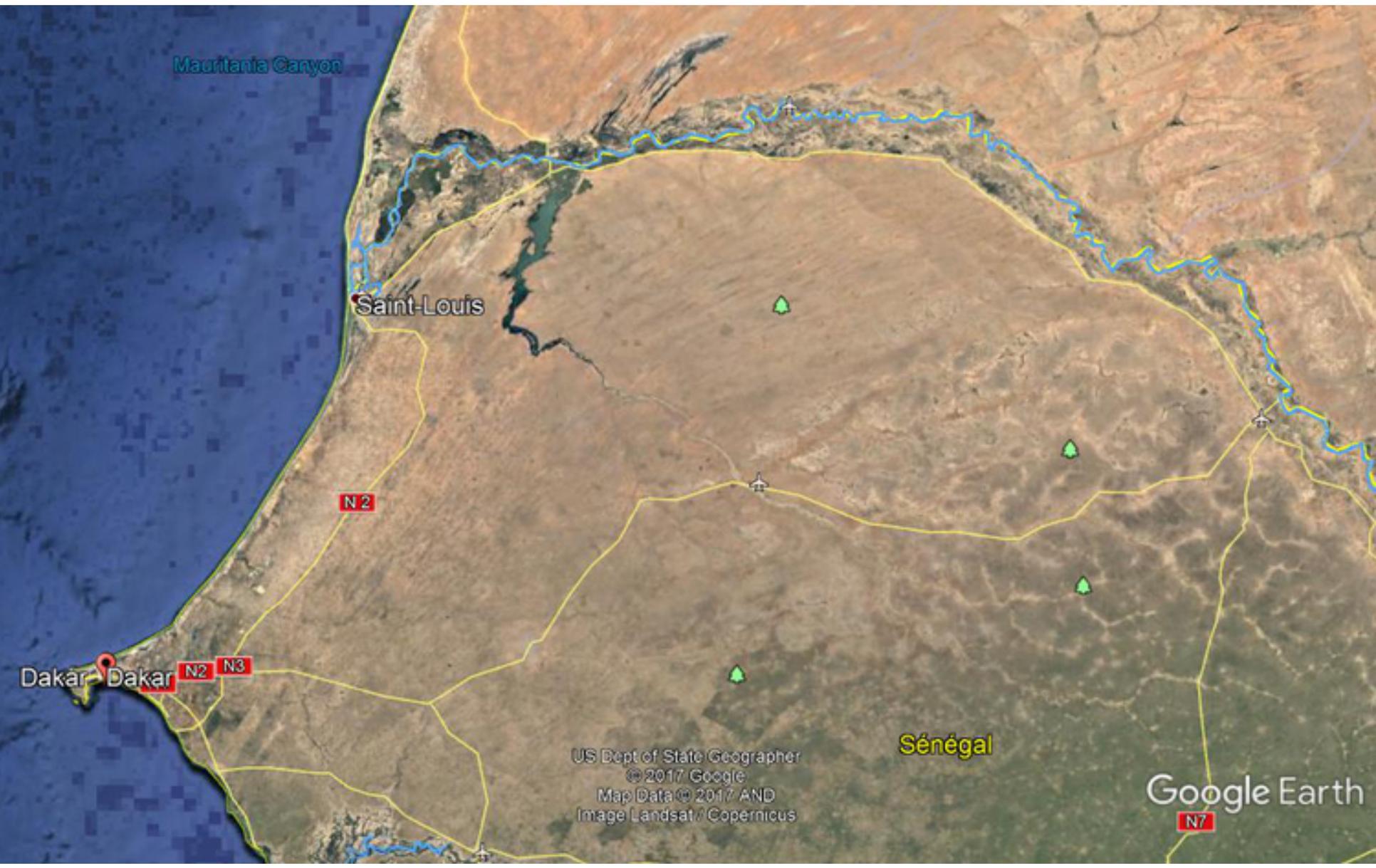
Ex : le canal du bas Rhône Languedoc (irrigation)



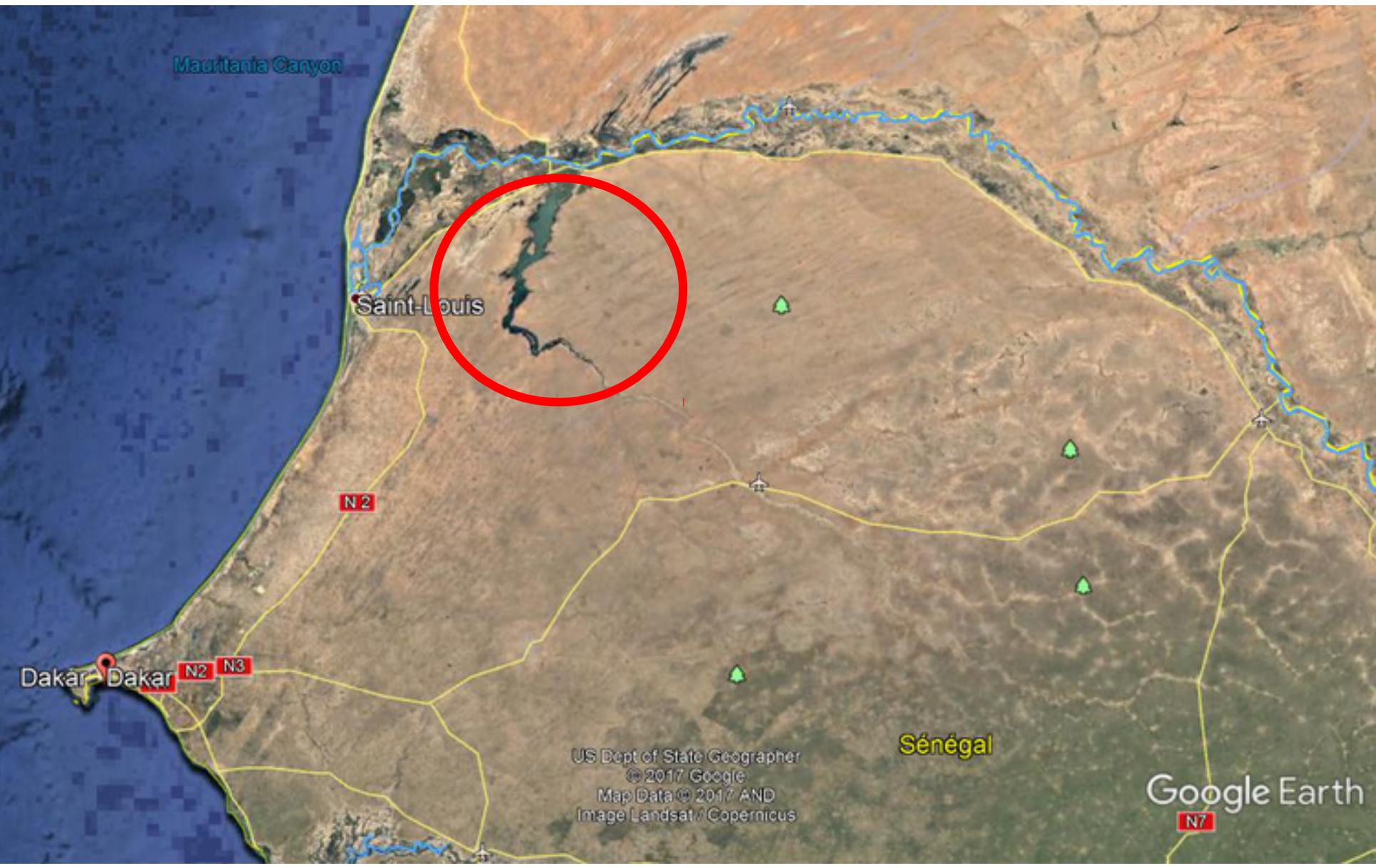


RESEAU HYDRAULIQUE RÉGIONAL (en km)	AUTRES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES (en km)
Canal	Adjonction
Réseau Aquo Domitia	Usine d'épuration d'effluents, ou à eau pure, ou à eau brute
Station de pompage	Station de pompage de renforcement particulier
Périmètres irrigués	Autres périmètres irrigués (hors plan de gestion SR)
Nouveaux périmètres en création (selon le 2011)	

# Pour Dakar, l'eau du Lac de Guiers, diverticule du fleuve Sénégal (pour l'AEP)



# Pour Dakar, l'eau du Lac de Guiers, diverticule du fleuve Sénégal (pour l'AEP)





kamika22-pt





Dans certains cas, on va chercher l'eau loin, dans d'autres pays :

- Israël achète l'eau de cours d'eau côtiers turcs
- des expériences de transport d'iceberg ont été tentées

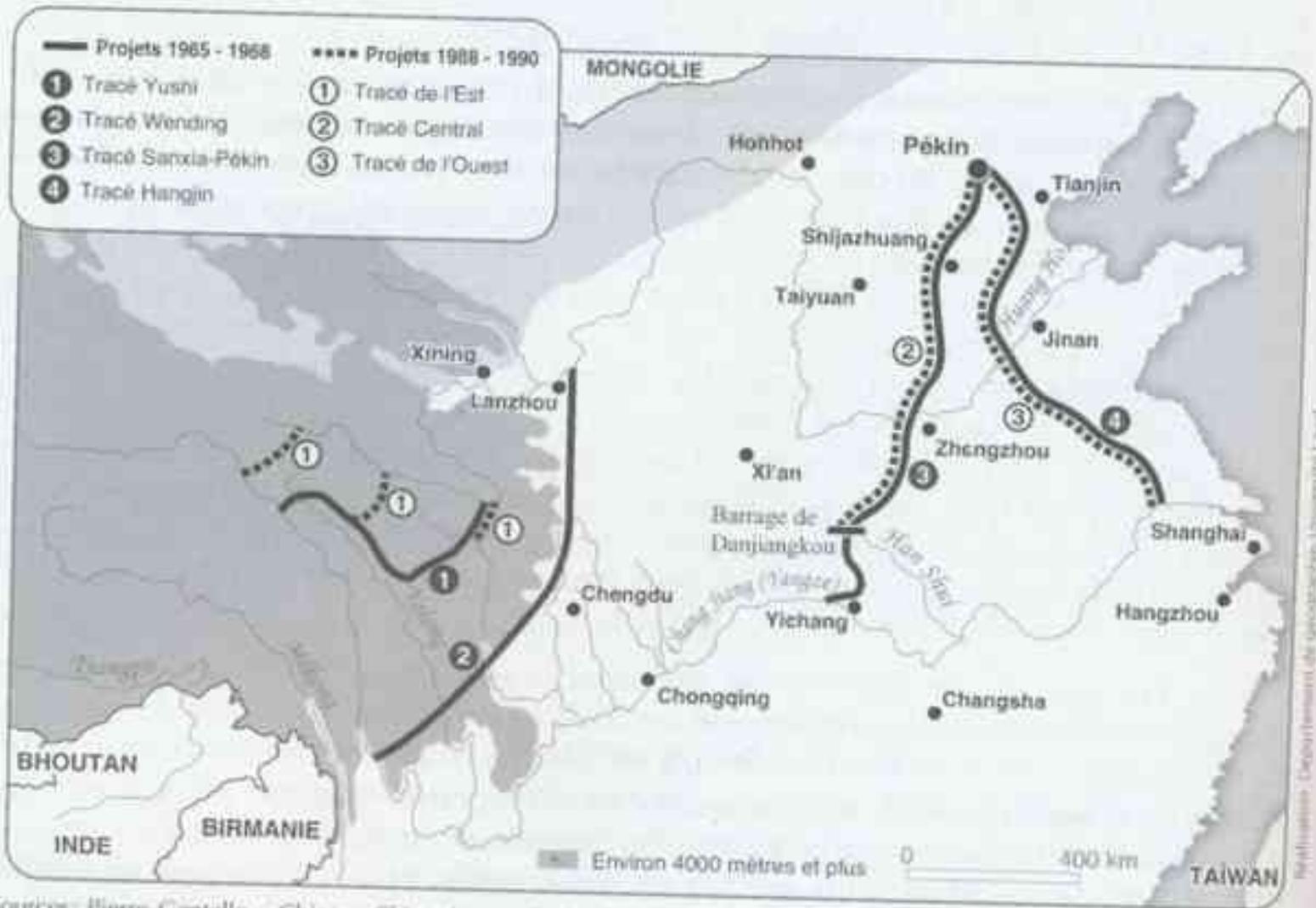
Des projets de transfert pharaoniques...

Figure 12.2.  
La difficile gestion de l'eau en Chine

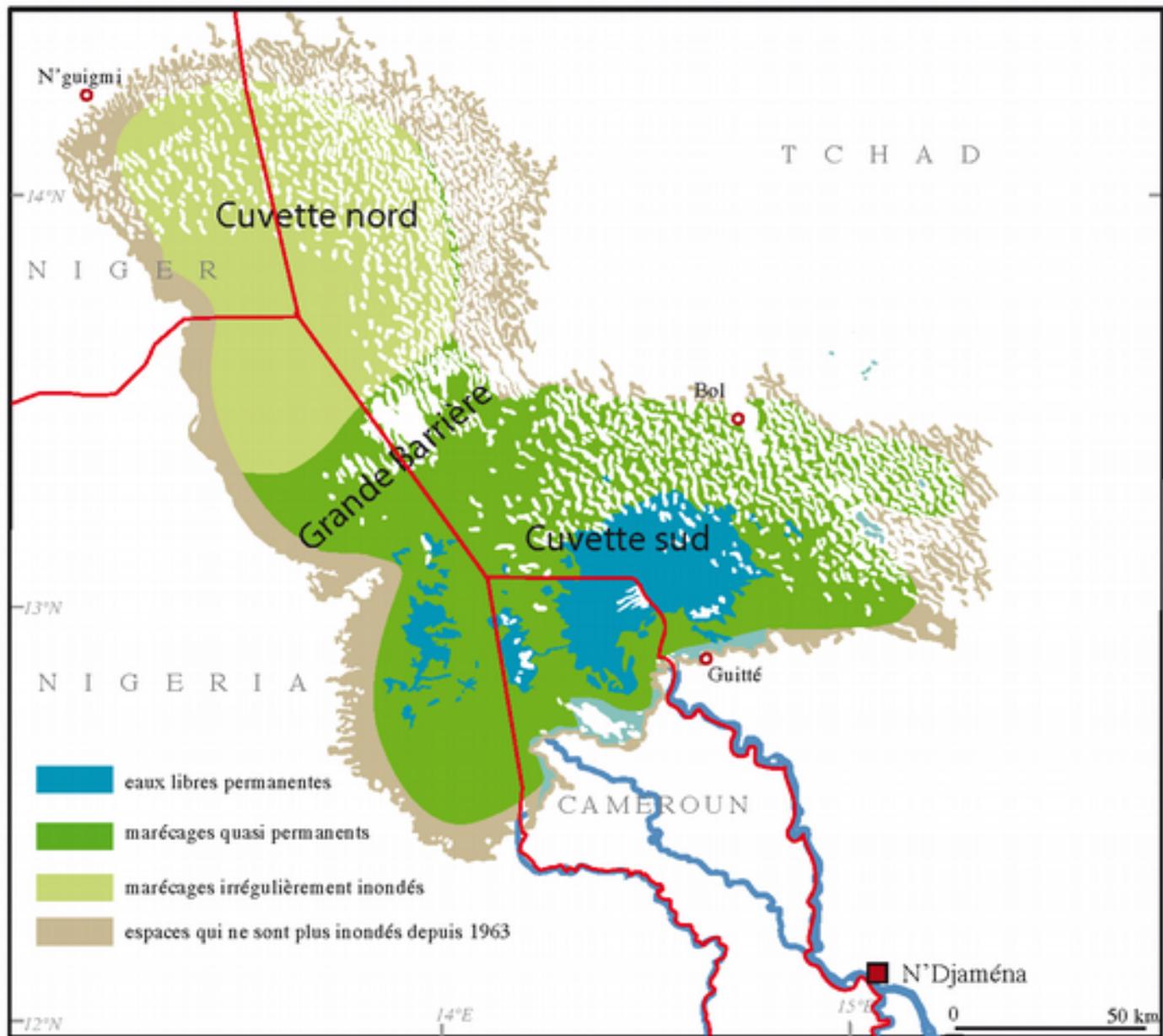


Source: Frédéric Lasserre, « La guerre de l'eau aura-t-elle lieu ? », dans Frédéric Lasserre et Emmanuel Guillon, *États et enjeux : nouvelles d'une géopolitique critique*, L'Harmattan, Montréal et Paris, 2002.

Figure 12.3.  
Les projets de transfert des eaux du Yangze

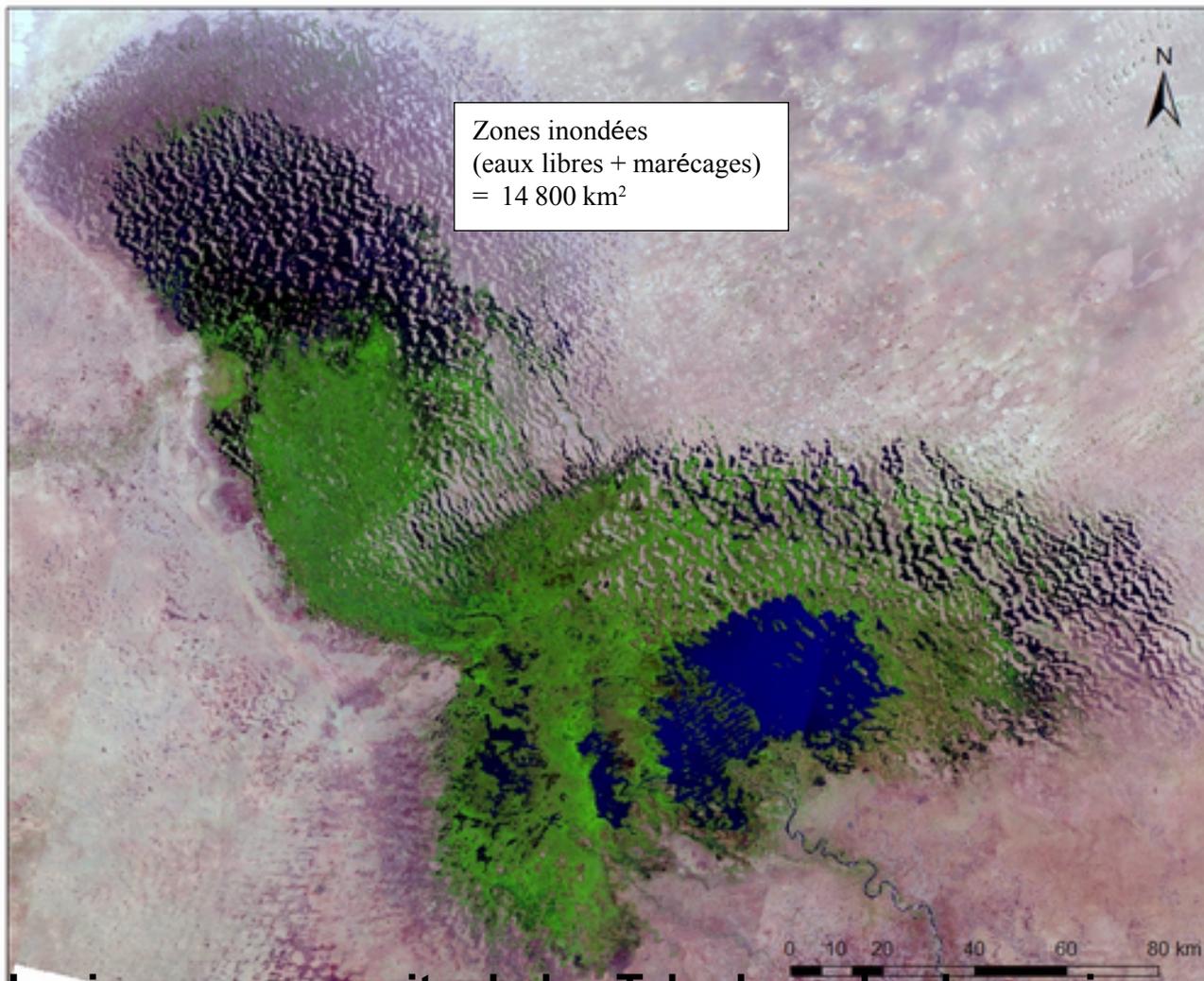


Sources: Pierre Gentelle, « Chine », *Chine, Japon, Corée. Géographie universelle*, volume 4, Hachette-Rocclus, Paris, 1994, p.85; South China Morning Post, 17 août 1997.



**Carte schématique de la situation moyenne du lac Tchad autour de 2010**

Source : d'après Lemoalle, 2014 (*Atlas du lac Tchad*)



**Une image composite du lac Tchad proche du maximum de la crue lacustre de 2013**

Source : images Landsat 8 entre le 12 avril et le 23 mai 2013, fournies par la Nasa,

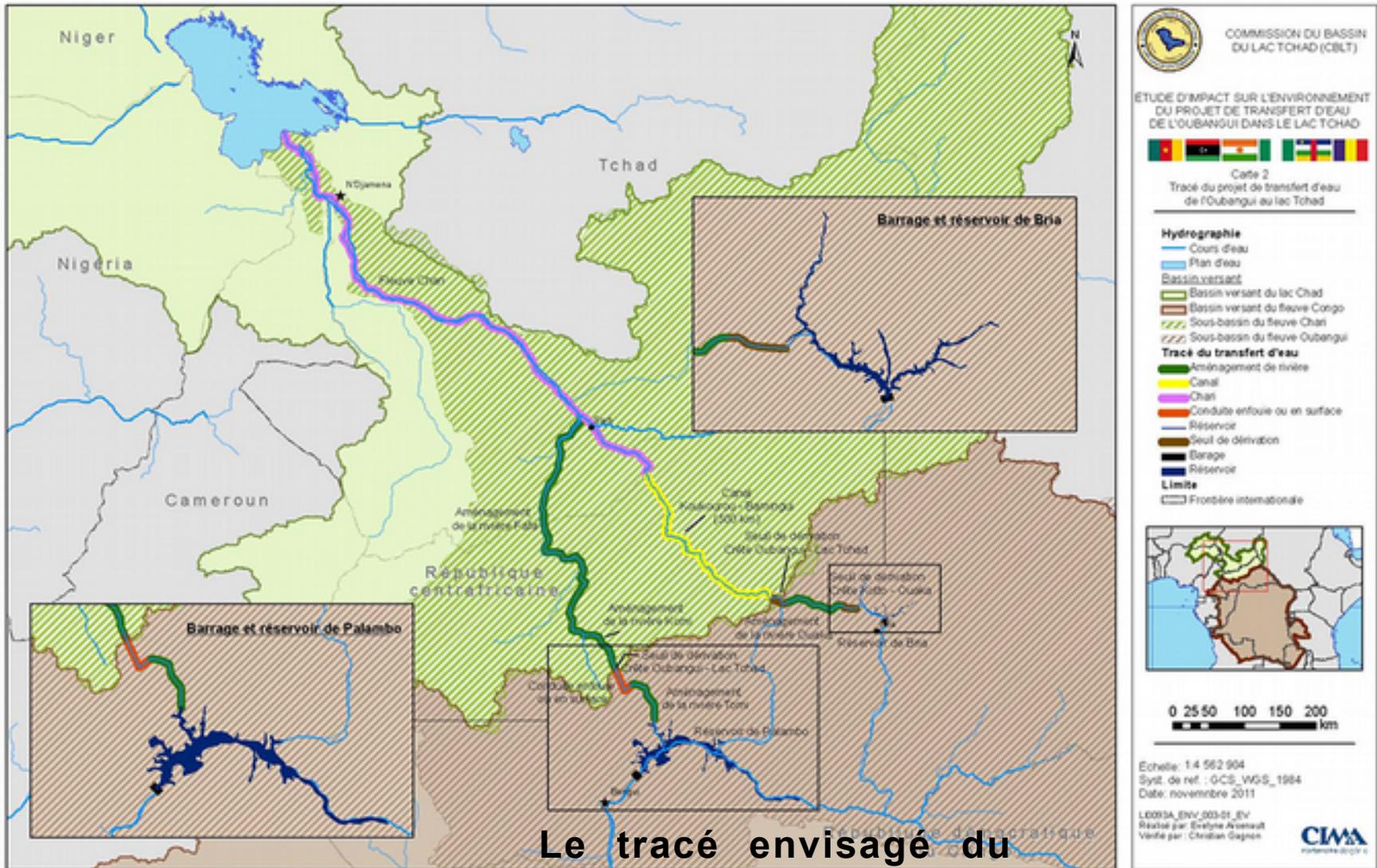
mises en forme pour cette étude par Pierre Don-Donné Goudoum.

In Lemoalle et al. 2014



## La population du Lac et celle de son environnement régional

Source : auteurs. Réalisation : O. Ninot  
 In Lemoalle et al , 2014



Source : Cima International, 2011.

Cité par Lemoalle et al, 2014

Des projets de compensation non moins pharaoniques..

Partage des eaux du Nil entre l'Égypte et le Soudan (1952)  
en vue de l'équipement avec le futur barrage d'Assouan :

Total écoulé annuel :  $82 \text{ km}^3$  /an en moyenne

$58,5 \text{ km}^3$  /an pour l'Égypte

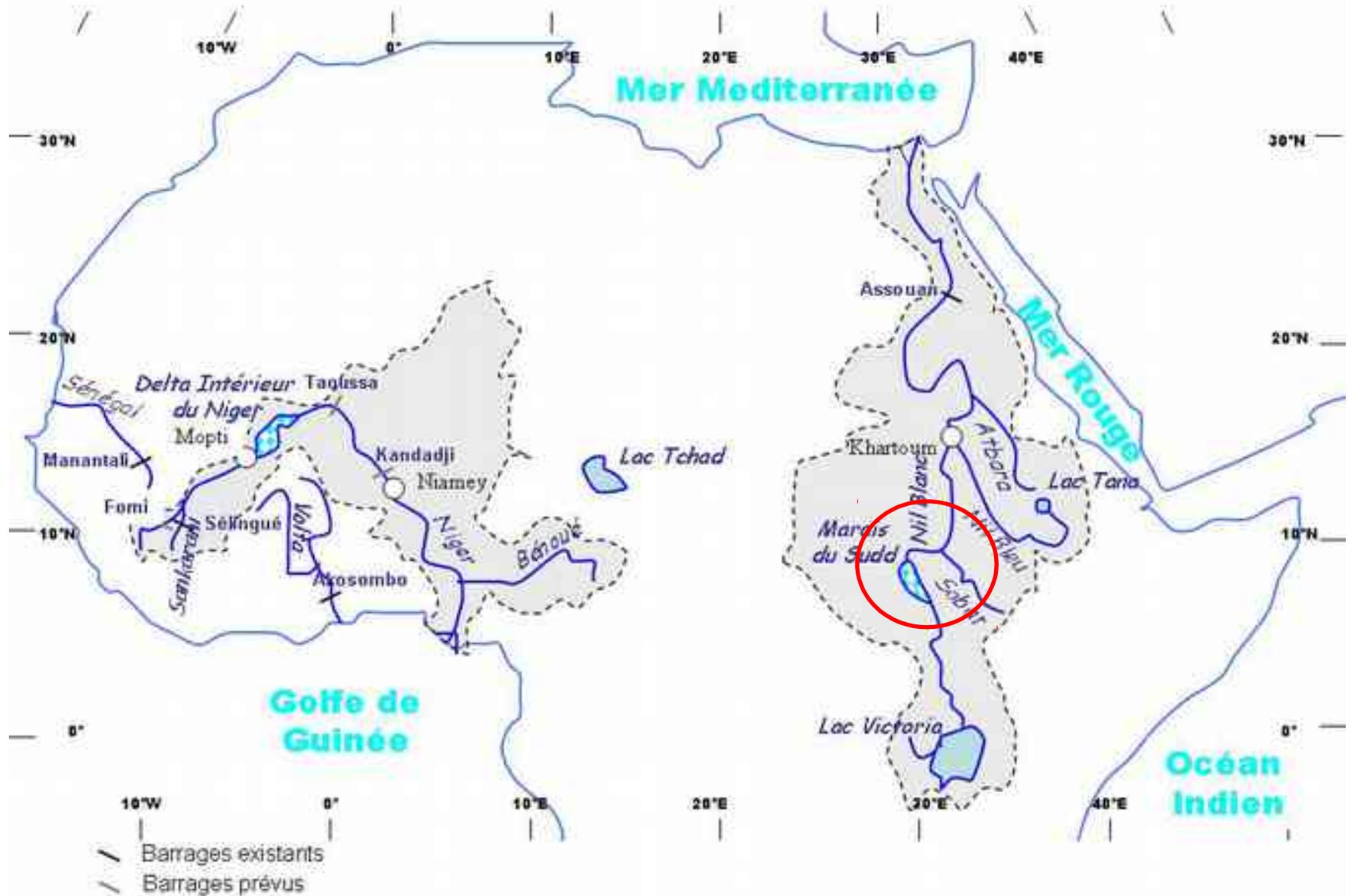
$21,5 \text{ km}^3$  /an pour le Soudan

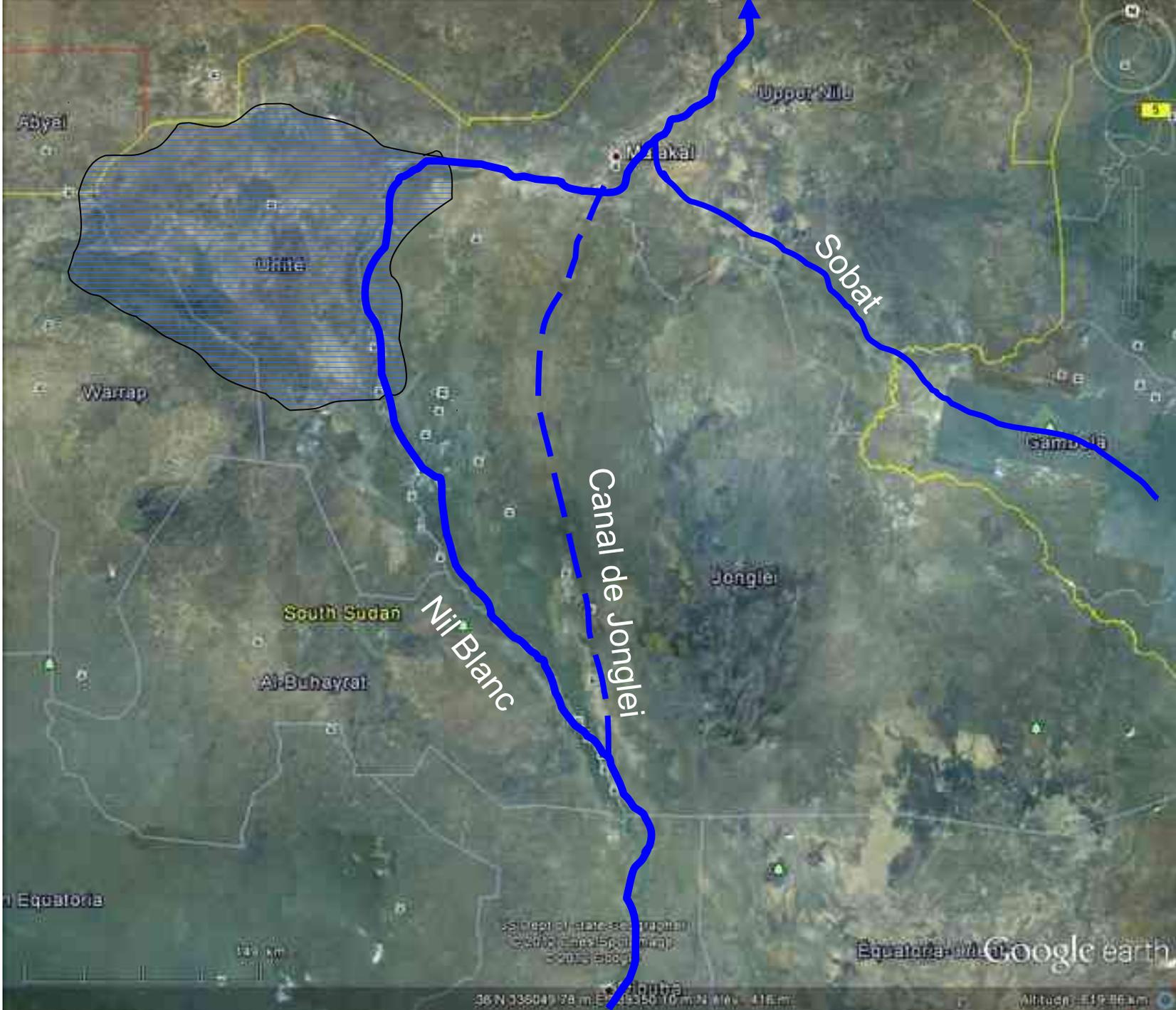
$12 \text{ km}^3$  /an d'évaporation supplémentaire due au plan  
d'eau du barrage d'Assouan

En fait sous estimé, il est plutôt proche de  $15 \text{ km}^3$  /an

D'où l'idée de compenser.....

Par un autre projet pharaonique !!





Abyai

Upper Nile

Malakal

ONRS

Sobat

Warrap

Gambela

Canal de Jonglei

Jonglei

South Sudan

Nile Blanc

Al-Buhayrat

Equator

Equator Google earth

36°N 338049.78 m.E 45350.10 m.N Alt: 416 m

Altitude: 419.86 km





Cela signifie que ces pays étaient prêts à supprimer une zone humide de 20000 km<sup>2</sup>.....

Des projets n'ayant pas toujours fait l'objet d'entente entre pays..



Le 2 avril 2011, le gouvernement éthiopien a lancé les travaux de construction d'un nouveau barrage sur les eaux du Nil Bleu, dans la [région Benishangul-Gumuz](#), située à 40 km de la frontière soudanaise.

L'ampleur du projet et sa position stratégique ont des implications géopolitiques pour la région, d'abord pour l'Éthiopie qui verra son poids s'accroître par rapport à ses voisins, ensuite pour l'Égypte et le Soudan qui craignent une perte de leurs prérogatives sur le fleuve. Au terme de sa construction – prévu pour 2016, le barrage du “Millénaire” ou barrage de la “Renaissance” sera le premier barrage hydroélectrique d'Afrique et le dixième du monde en termes de puissance. Ses objectifs sont doubles : prévenir les inondations (il permettra de retenir 62 milliards de m<sup>3</sup> d'eau), et augmenter la production d'énergie électrique (sa puissance électrique devrait atteindre 5 250 mégawatts). (Anne Sophie Sebban, l'Expansion, 12/11/2012)



« Pharaonique, titanesque, gigantesque. Les qualificatifs ne manquent pas pour qualifier le barrage de la Renaissance en construction en **Ethiopie** depuis le 2 avril 2011. Avec ses 145 mètres de haut et 1800 mètres de long, celui qui deviendra le 1er barrage d'Afrique pourrait à terme fournir une puissance de 6000 MW.



Image © 2017 DigitalGlobe

Google Earth



Image © 2017 DigitalGlobe

Google Earth

Avantage des transferts : permettent d'accéder à des volumes importants pour des coûts le plus souvent raisonnables, même pour l'irrigation (donc peu coûteux)

## Inconvénients

- peuvent poser des problèmes d'accaparement de terres ou d'eau
- peuvent avoir des conséquences géopolitiques entre deux pays ou deux régions si un consensus n'est pas trouvé
- peuvent provoquer des déséquilibres hydrologiques et hydrographiques: débits de base trop faibles dans le cours d'eau ponctionné, d'où concentration des polluants, ensablement par diminution des capacités de transport, eau insuffisante pour la faune existante...

Enfin dernier moyen de se procurer de l'eau douce :  
Le dessalement de l'eau de mer:

Îles du Cap Vert

Projet à Dakar

De nombreuses usines dans les émirats du Golfe,

## Plusieurs méthodes de dessalement

### Le dessalement par multiflash

- La méthode de dessalement la plus répandue est la **distillation multiflash** : l'eau est chauffée, puis pompée dans des réservoirs où elle se vaporise brutalement (d'où le nom de "flash"). Après plusieurs vaporisations successives, la vapeur condensée devient de l'eau pure.

## Le dessalement par réfrigération

- La réfrigération est une méthode fondée sur la différence entre les points de congélation de l'eau douce et de l'eau salée. Les cristaux de glace sont séparés de la saumure, lavés du sel, puis fondus.

## Le dessalement par osmose inverse

- Dans le procédé appelé **osmose inverse**, la pression permet de faire passer l'eau douce à travers une fine membrane qui ne laisse pas passer les minéraux (le sel).

*Source: la documentation française*

## Le dessalement par électrodialyse

L'**électrodialyse** est utilisée pour les eaux saumâtre. Le sel se dissout dans l'eau en ions négatifs (-) et en ions positifs (+), qui sont mis en mouvement par un courant électrique à travers des membranes anionique (-) et cationique (+), ce qui diminue la quantité de sel dans l'eau.

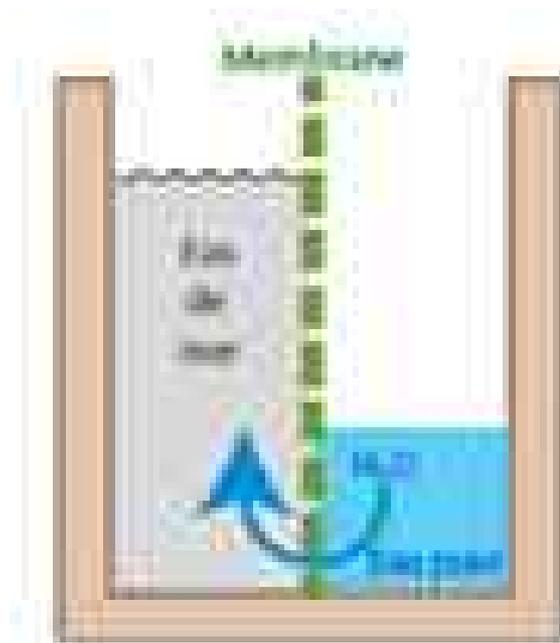
En termes de coût :

L'énergie nécessaire pour le dessalement est de :

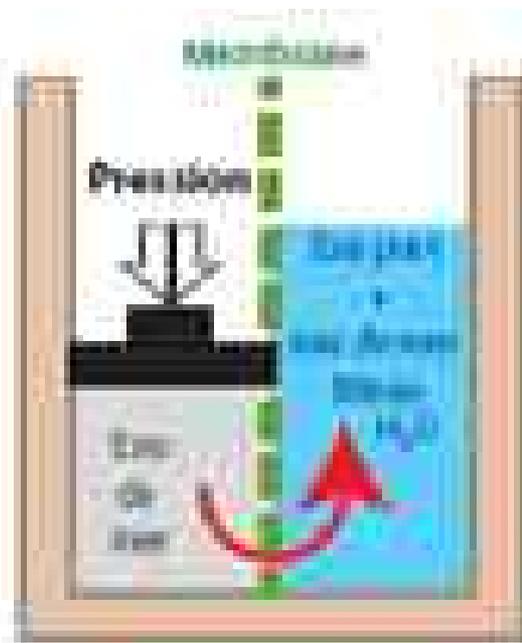
15 kWh par m<sup>3</sup> par distillation      coût 0,65 à 1,8 €/m<sup>3</sup>

3,5 kWh par m<sup>3</sup> par osmose inverse coût 0,4 à 0,8 €/m<sup>3</sup>

*Source: la documentation française*



OSMOSE



OSMOSE INVERSE

Source: la documentation française

# Un pays très dépendant du dessalement: l'Arabie Saoudite



Source: la documentation française



A Dakar, un projet énergivore et controversé



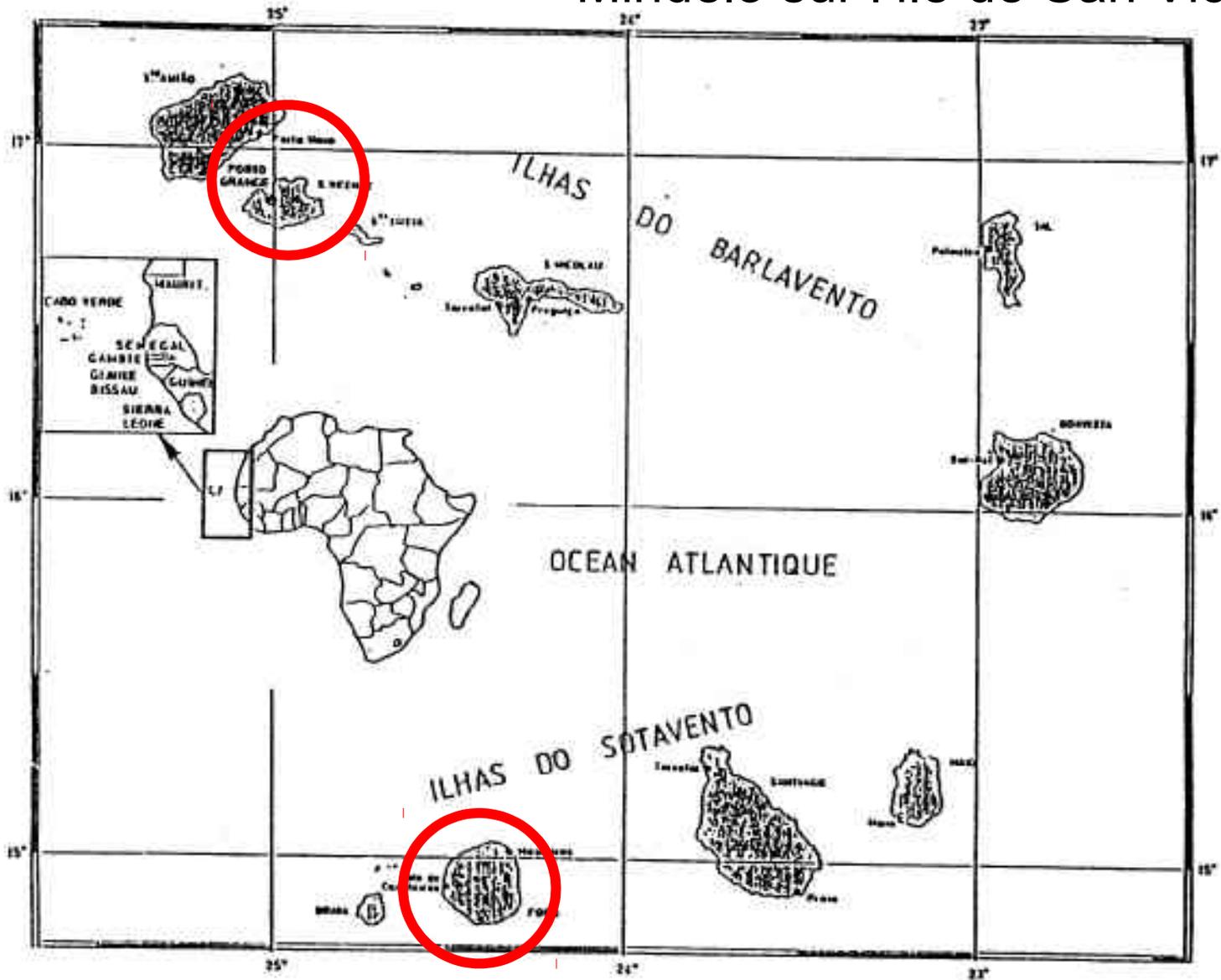
Ce site industriel, d'une capacité de production 75 000 m<sup>3</sup>/jour, d'un coût de 135 milliards FCFA (dont 40 milliards financés par la coopération japonaise) (*200 millions d'euros dont 60 millions fournis par la JICA*) et mis en œuvre par la SONES, comprendra non seulement l'usine de dessalement sur 4 ha, à 100 m du phare, mais aussi une station de pompage d'1 ha sur la plage.

Comme les littoraux et îles tropicales bordées par des eaux froides, les îles du cap Vert sont arides !

D'où le recours au dessalement de l'eau de mer, déjà à l'œuvre dans les deux îles les plus peuplées



# Mindelo sur l'île de San Vicente



Praia (la capitale) sur l'île de Santiago

Avantage : on n'a pas fini de consommer toute l'eau de mer  
(inépuisable ??)

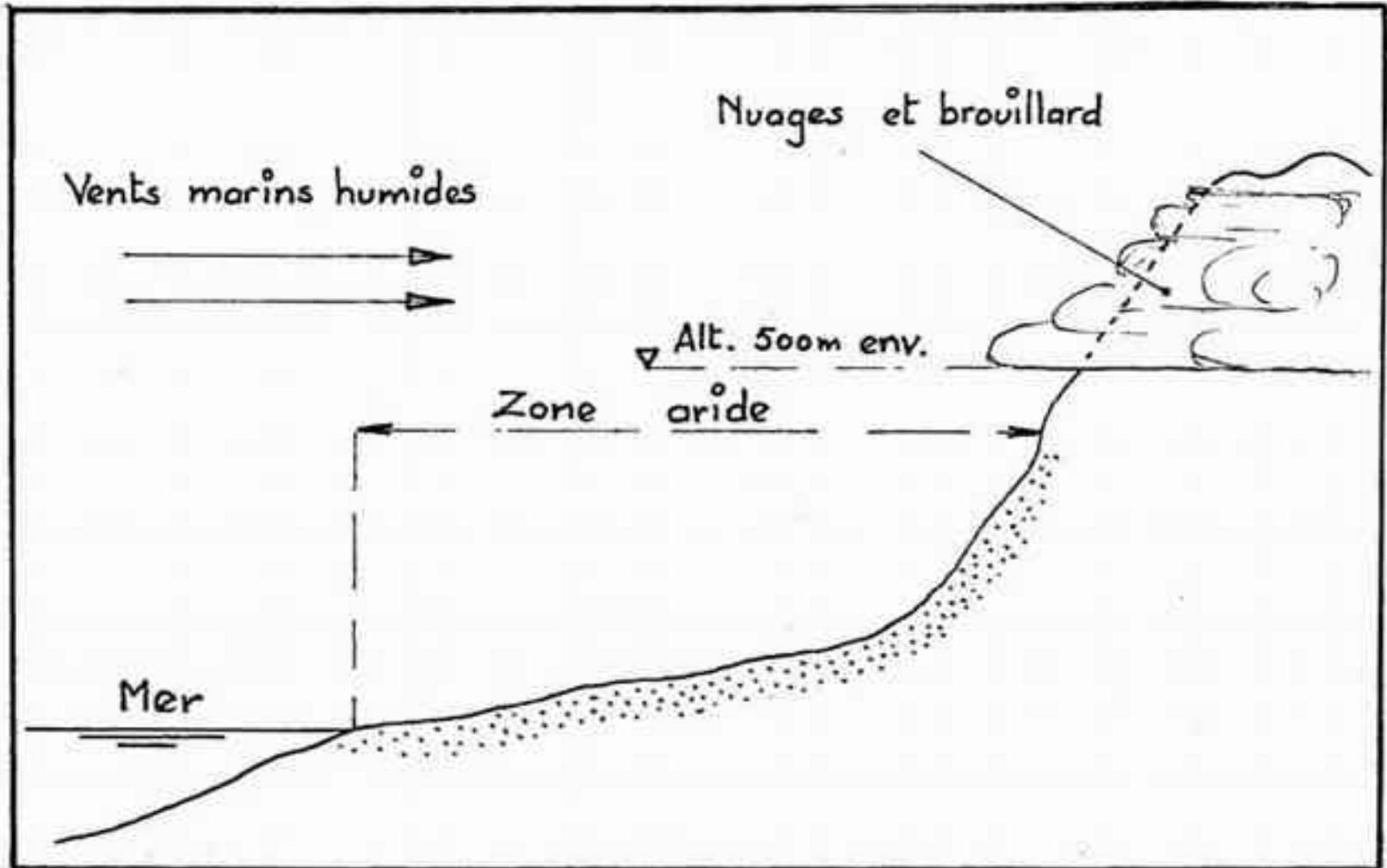
Inconvénient : énergivore !!

Et polluant : Quel que soit le procédé utilisé, toutes les usines de dessalement produisent d'importantes quantités de saumure  
Mais les unités d'osmose inverse sont beaucoup plus neutres que les unités de distillation, de ce point de vue

Et ces usines consomment de grandes quantités d'énergie donc le plus souvent de GES...

Donc à réserver aux cas d'extrême pénurie.....

Et les précipitations occultes ?



1. Régions favorables à la condensation.



2. Brouillards et zones arides tropicales (la Recherche, déc. 1992).

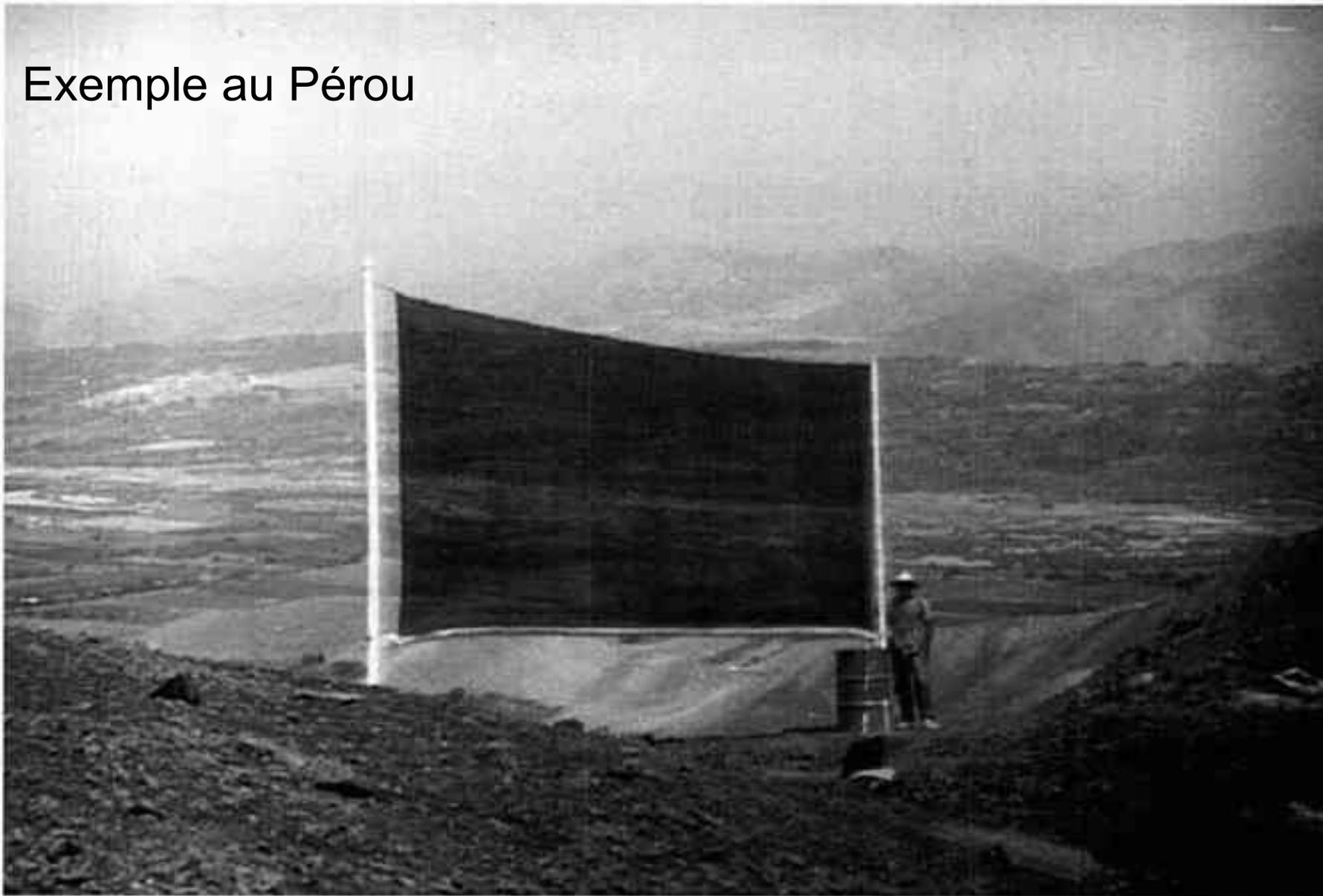
Exemple aux Iles du cap Vert



3. Station expérimentale à Santiago (Îles du Cap-Vert).

Source: Bouloc , 1993, *La Houille Blanche*

## Exemple au Pérou



4. *Capteur expérimental près de Lima.*

*Source: Bouloc , 1993, La Houille Blanche*

Quelques cas d'école



Figure 7.1.  
L'eau dans le bassin du Jourdain

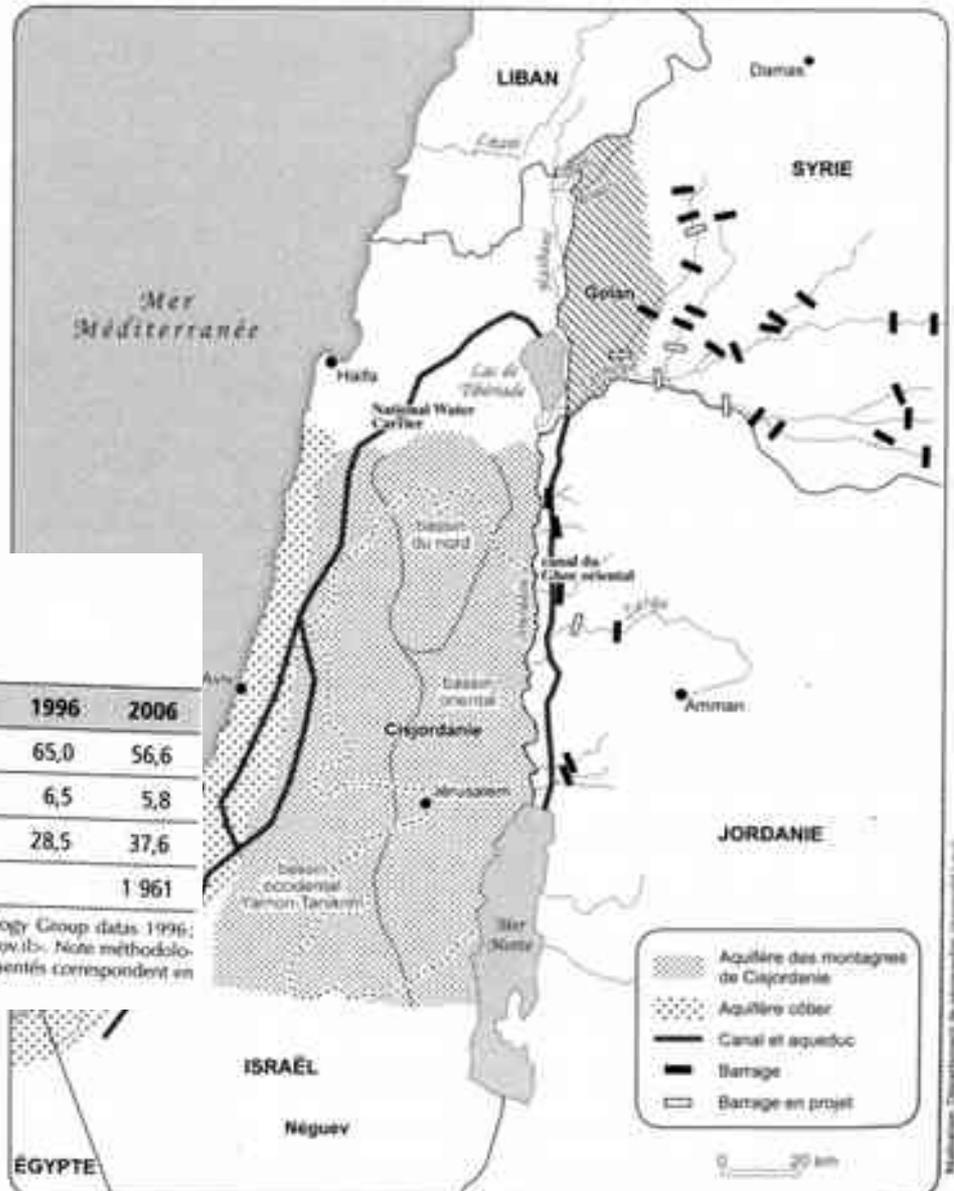


Tableau 7.2.  
Évolution des prélèvements d'eau en Israël, par grand secteur  
(dans les frontières de l'époque)

	1962	1965	1970	1990	1992	1996	2006
Secteur agricole (%)	83	80,9	79,9	67,4	62	65,0	56,6
Secteur industriel (%)	4	4,1	4,8	5,9	7	6,5	5,8
Secteur urbain (%)	13	15,0	15,3	26,7	31	28,5	37,6
Volume prélevé total (Mm <sup>3</sup> )		1 329	1 564	1 804			1 961

Sources: Georges Mutin, *L'eau dans le monde arabe*, Ellipses, Paris, 2000, p. 98; Palestine Hydrology Group (datés 1996); Central Bureau of Statistics, *Statistical Abstract of Israel 2008*, Jérusalem, <<http://www.cbs.gov.il>>. Note méthodologique: les statistiques israéliennes parlent de consommation, mais, comme les volumes présentés correspondent en gros aux volumes produits, il s'agit probablement de volumes prélevés.

De la tension ???

Sources: Georges Mutin, *L'eau dans le monde arabe*, Ellipses, Paris, 2000, p. 85; Alwyn Rowley, «The water issue in the Palestinian-Israeli peace process», *Survival*, vol. 39, n° 2, 1997; *The Economist*, 23 décembre 1995; Arnan Soffer, *Rivers of Fire. The Conflict over Water in the Middle East*, Rowman & Littlefield, Lanham, 1998, p. 122.

L'ensemble Israël Palestine Jordanie est probablement le groupe de pays où la rareté de l'eau est la plus aiguë

Il y a clairement accaparement de la ressource par un de ces pays

Mais cela n'empêche pas certains chercheurs et spécialistes de l'eau de coopérer

Le niveau de la mer Morte a baissé de plus de 40 m depuis 1950, et continue de s'abaisser, les volumes résiduels de ses émissaires étant très faible en regard de l'évaporation

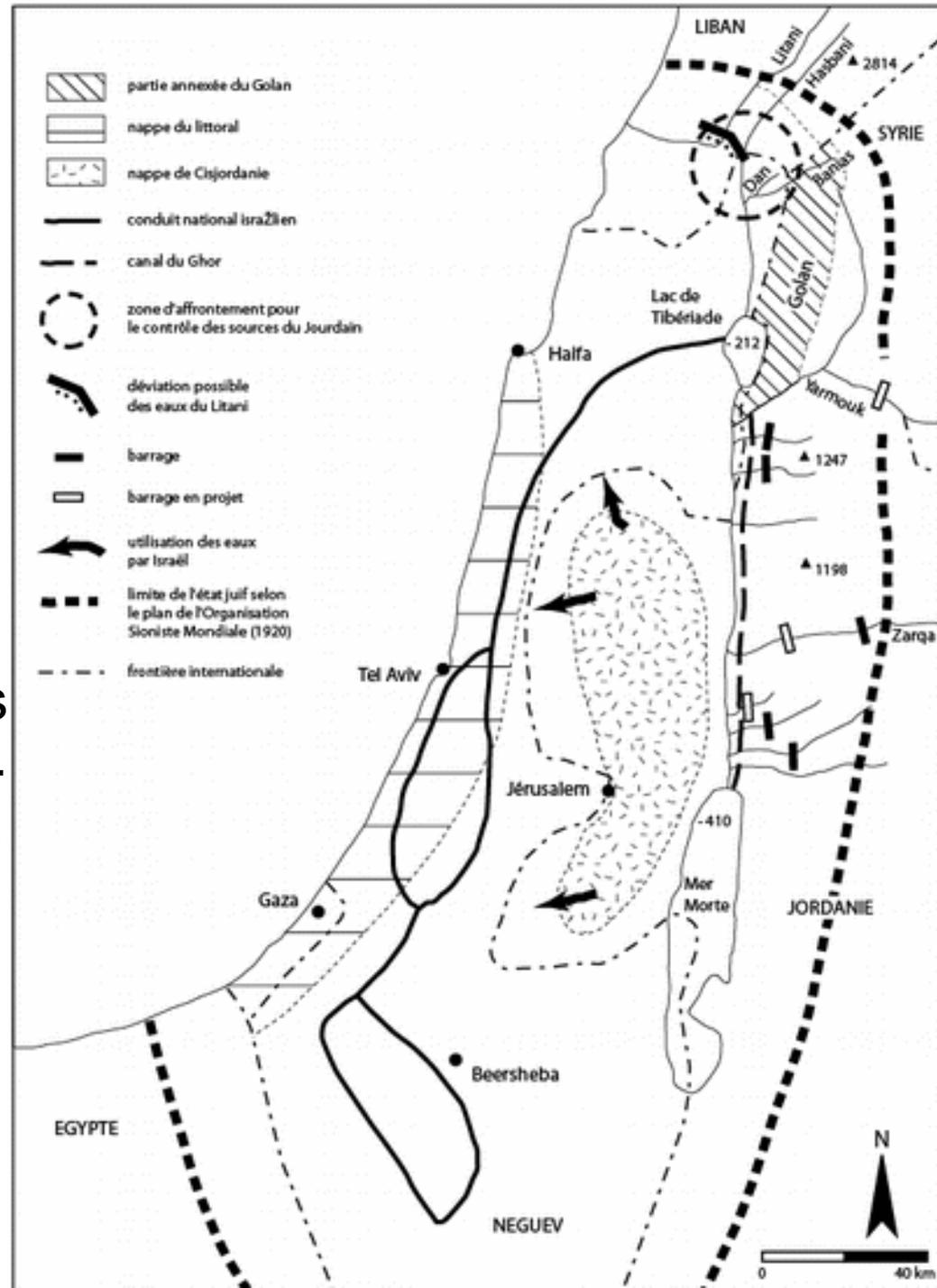
Palestiniens, Jordaniens et Israéliens sont à peu près d'accord sur un projet de remise à niveau par l'eau de mer venue du Golfe d'Aqaba (mer Rouge)

# Le bassin de la Mer Morte

Israël consomme  
2,5 km<sup>3</sup> d'eau par an

Soit toute l'eau du Jourdain  
(0,55 km<sup>3</sup>/an)

Tout ce qui provient de Syrie  
(Yarmouk)- 0,5 km<sup>3</sup>/an- et des  
affluents jordaniens - 0,5 km<sup>3</sup>-  
plus l'aquifère palestiniens de  
Cisjordanie -0,3 km<sup>3</sup>- plus  
0,3 km<sup>3</sup>/an d'eau de mer  
dessalée





Golan

Tiran

© 2013 ORIGN/ME  
US Dept of State Geographer  
© 2013 Google  
© 2013 Cnes/Spot Image

Google earth

Figure 10.2.  
Nil Blanc, Nil Bleu: des régimes fort différents



Tableau 10.1.  
Origine des eaux du Nil

Cours d'eau	Régime d'alimentation	Part du débit annuel moyen	Part du débit moyen en période de crue
Bahr el-Ghazal	Pluies équatoriales	14	5
Sobat	Pluies tropicales	14	5
Nil bleu	Pluies tropicales	59	68
Atbara	Pluies tropicales	13	22

Source : Michael Tirtil, « Developing the Nile », World Crops, janvier-février 1973, p. 11.

Sources : Georges Mutin, *L'eau dans le monde arabe*, Ellipses, Paris, 2000, p. 41 ; Anou Elbance, *Hydropolitics in the Third World. Conflict and Cooperation in International River Basins*, United States Institute of Peace Press, Washington, 1999, p. 35 ; Habib Aydi, *L'eau au Proche-Orient*, Karthala, Paris, 1997, p. 32 ; Tarek Majzoub, *Les fleuves du Moyen-Orient*, L'Harmattan, Paris, 1994, p. 92 ; Mahmoud Abu Zaid, « Environmental impacts of the Aswan high dam », *Water Resources Development*, vol. 5, n°3, septembre 1989 ; Masahito Murakami, *Managing Water for Peace in the Middle East - Alternative Strategies*, United Nations University Press, Tokyo, 1995, p. 55 ; UNESCO, *Débit de certains cours d'eau d'Afrique*, Paris, 1995 ; *International Rivers, Ethiopia's Gate 3 Dam: Sowing Hunger and Conflict*, Berkeley, 2008 ; *African Dams at a glance*, 2009, <<http://www.internationalrivers.org/files/AfricanDams.pdf>> ; FAO Nile, *Water Infrastructure in The Nile Basin*, <<http://www.fao.org/nr/water/annex/WaterInfrastructure.pdf>>, février 2009.

Figure 10.1.  
Le bassin du Nil

Tableau 10.8.

Volumes du bassin du Nil en provenance de chaque pays du bassin, et volumes prélevés, 1998  
(en km<sup>3</sup>/an)

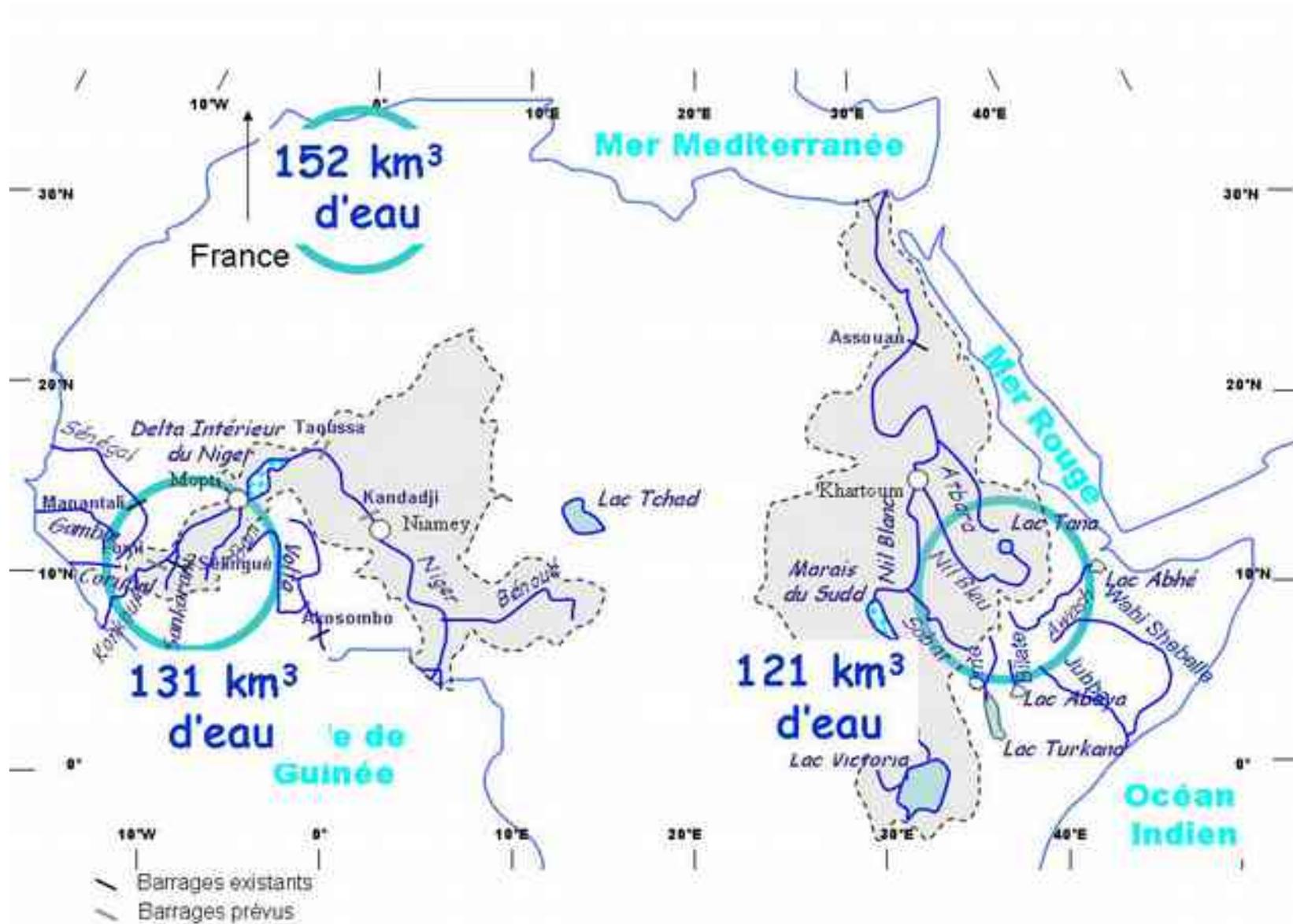
Pays	Ressources internes renouvelables	Prélèvements
Burundi	3,6	0,10
Rwanda	6,3	0,80
Congo	nd	0,36
Ouganda	39,0	0,20
Kenya	20,2	2,10
Tanzanie	80,0	1,20
Soudan	35,0	17,80
Érythrée	2,8	Inclus dans les prélèvements éthiopiens
Éthiopie	110,0	2,20
Égypte	1,8	55,10

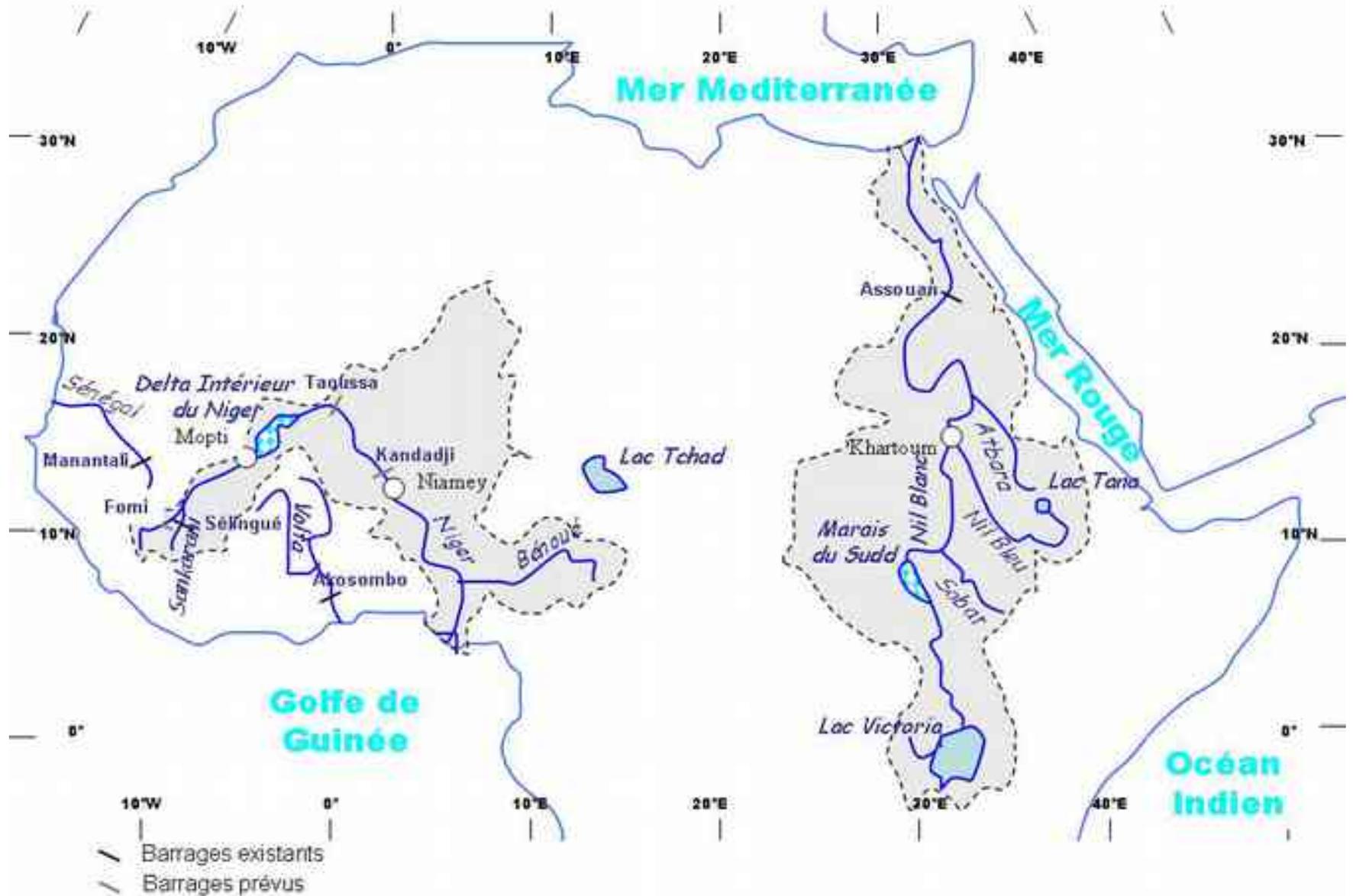
Ressources internes : ne sont pris en considération que les volumes provenant du territoire du pays, non les volumes qui proviennent d'outre-frontières. Source : FAO.



1: Georges Mutin, *L'eau dans le monde arabe*, Ellipses, Paris, 2000, p. 43; Arun Elhance, *Hydropolitics in the Third World. Conflict and Cooperation in International River Basins*, United States Institute of Peace Press, Washington, 1999, p. 55; Hâhib Ayeb, *L'eau au Proche-Orient*, Karthala, Paris, 1997, p. 32; Tarek Majzoub, *Les fleuves du Moyen-Orient*, L'Harmattan, Paris, 1994, p. 92; Mahmoud Abu Zeid, « Environmental impacts of the Aswan High Dam on Water Resources Development », vol. 5, n° 3, septembre 1989; Masahiro Murakami, *Managing Water for Peace in the Middle East - Alternative Strategies*, United Nations University Press, Tokyo, 1995, p. 55; UNESCO, *Débat de certains cours d'eau d'Afrique*, Paris, 1995; International Rivers, *Ethiopia's Gibe 3 Dam: Solving Hunger and Conflict*, Berkeley, 2008; African Dams at a glance, 2009, <<http://www.internationalrivers.org/files/AfricanDams.pdf>>; FAO Nile, *Water Infrastructure in The Nile Basin*, <<http://www.fao.org/newwater/facolle/WaterInfrastructure.pdf>>, février 2009.

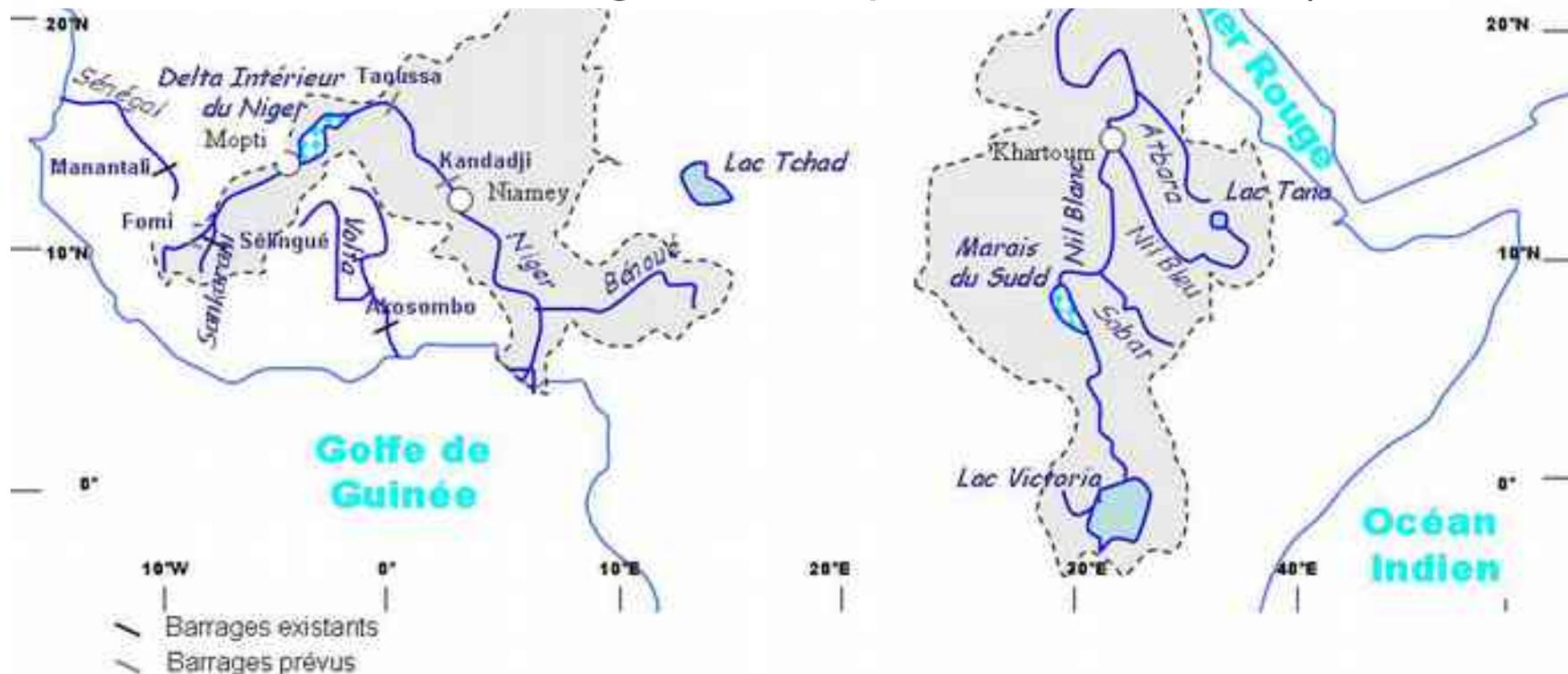
# Un enjeu régional et international : le contrôle des eaux !





10°W 0° 10°E 20°E 30°E 40°E

2 très grands bassins,  
deux très grandes zones humides menacées  
(sans compter delta du Sénégal, bassin du lac Tchad,  
delta de l'Okavango en Afrique méridionale,,)



Cours d'eau	station	BV km <sup>2</sup>	Module total km <sup>3</sup> /an	débit moyen en m <sup>3</sup> /s	débit spécifique en l/s/km <sup>2</sup>
Niger	Mopti	270000	55	1744	6,46
Nil Bleu	Khartoum	325000	59	1871	5,76
Niger	Niamey	700000*	27	856	1,22
Nil Blanc	Khartoum	1850000**	27	856	0,46

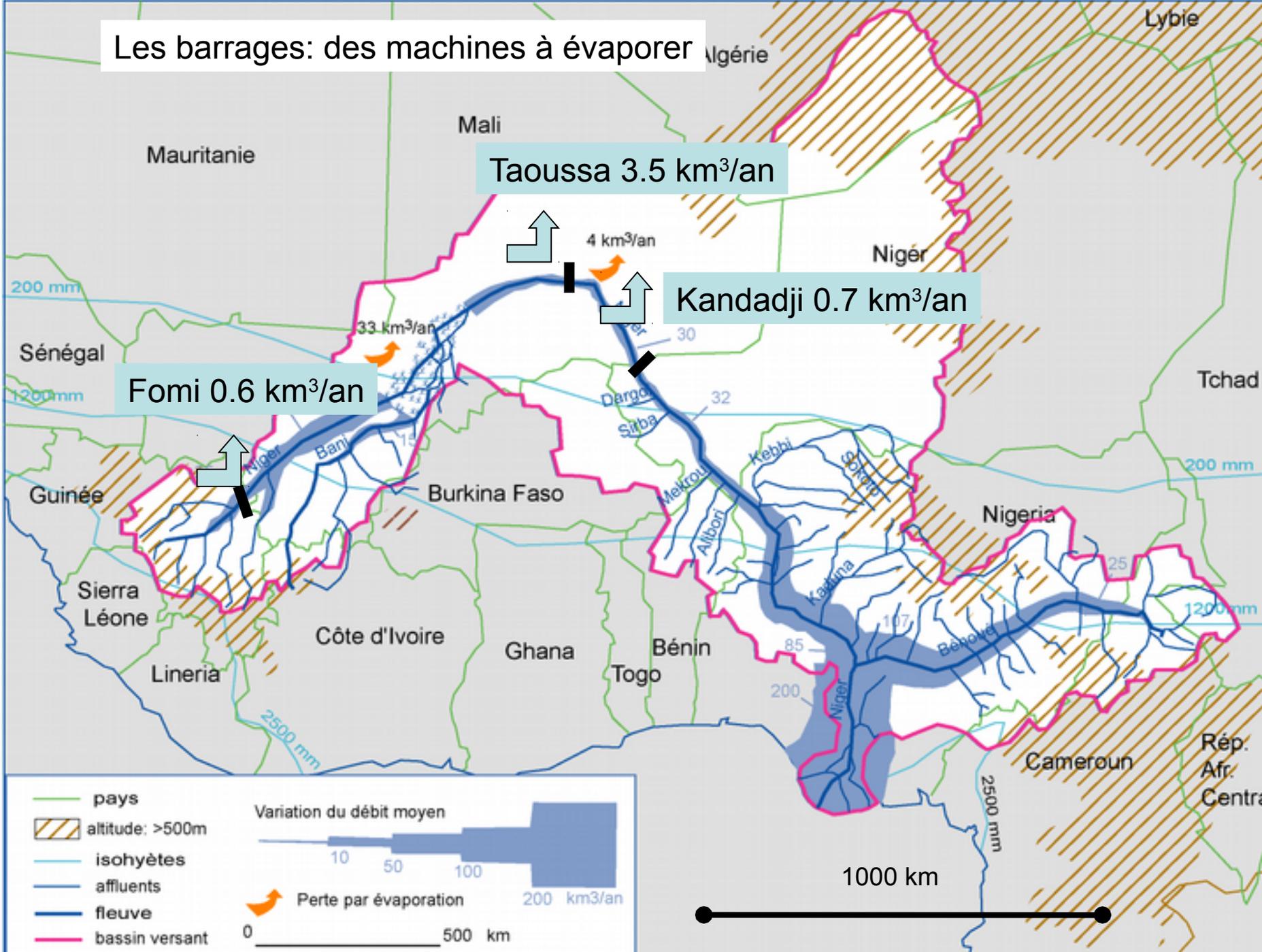


## Les projets de barrage:

- accroissent l'évaporation (surtout Taoussa)
- menacent l'existence même du Delta intérieur (Fomi)

Barrages	cours d'eau	volume stocké en km <sup>3</sup>	Superficie réservoir en km <sup>2</sup>	Rapport volume/superf	Évaporation en mm	volume évaporé en km <sup>3</sup>
<i>Fomi</i>	<i>Niger</i>	<i>6,2</i>	<i>507</i>	<i>12.2</i>	<i>1500</i>	<i>0,6</i>
<i>Taoussa</i>	<i>Niger</i>	<i>3</i>	<i>1460</i>	<i>2.05</i>	<i>3000</i>	<i>3,5</i>
<i>Kandadji</i>	<i>Niger</i>	<i>1,6</i>	<i>282</i>	<i>5.67</i>	<i>3000</i>	<i>0,7</i>
Sélingué	Sankarani	2	409	4.89	1800	0,6
Manantali	Bafing (Ht Sénégal)	11,3	506	22.33	2500	1
Akosombo	Volta	148	8500	17.41	1800	12,3
Assouan	Nil	162	6216	26.06	3000	14,9

# Les barrages: des machines à évaporer



De la surconsommation ???



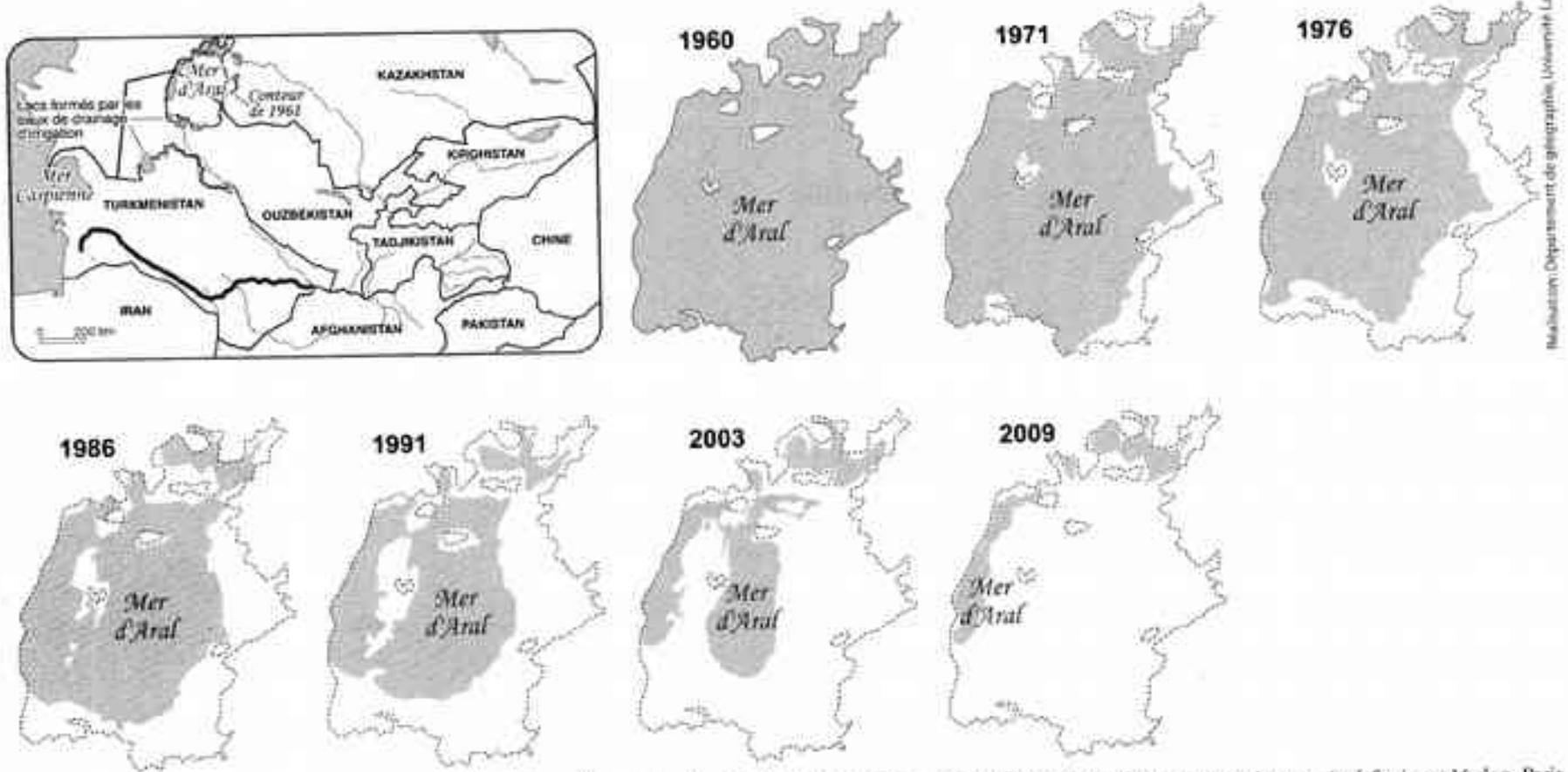
Tableau 11.1.  
**Développement des surfaces irriguées, républiques d'Asie centrale**  
 (en milliers d'hectares)

	1950	1965	1970	1975	1980	1985	2000
Ouzbékistan	2 276	2 639	2 696	3 006	3 476	3 930	4 281
Kirghistan	937	861	883	911	956	1 009	1 072
Tadjikistan	361	468	518	567	617	653	719
Turkménistan	454	514	643	819	927	1 107	1 800
Kazakhstan	1 393	1 368	1 451	1 648	1 961	2 172	2 350
<b>Total</b>	<b>5 421</b>	<b>5 850</b>	<b>6 191</b>	<b>6 851</b>	<b>7 937</b>	<b>8 871</b>	<b>10 222</b>

Source : René Létolle et Monique Mainguet, *Aral*, Springer-Verlag, Paris, 1993, p. 146; FAO Stats, 2009.

Source: *Eaux et Territoires*, 2011

Figure 11.1.  
Évolution de la surface de la mer d'Aral de 1960 à 2009



Mansour Département de géographie, Université Laval

Sources: German Remote Sensing Data Center (DFD); *Chronology of the dessication of the Aral Sea*, 1997; René Létolle et Monique Manguet, *Aral*, Springer-Verlag, Paris, 1993, p. 190; Central Asia Research and Remediation Exchange (CARRE), Département des sciences géologiques, Université d'État de San Diego; MODIS Rapid Response System, NASA, <<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>>, 4 septembre 2003; NASA Image, 27 août 2009.

Source: *Eaux et Territoires*, 2011

## En Chine aussi !! Mais surtout pour des cultures vivrières

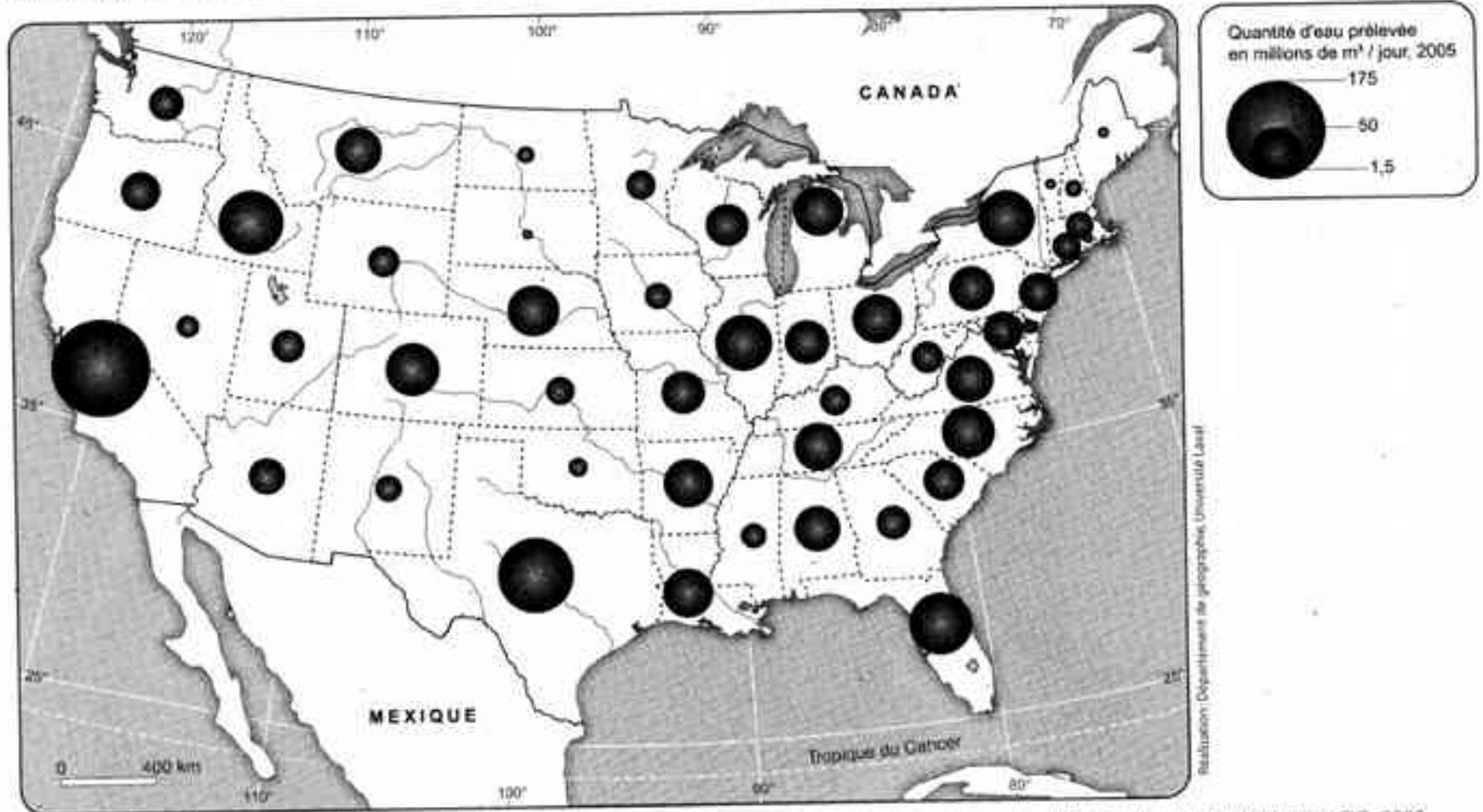
Tableau 12.3.  
Assèchement du Huanghe : moyenne de la durée et de la longueur du segment à sec,  
depuis l'embouchure

	Période d'assèchement (jours)	Segment à sec, en km
1972 (première occurrence)	19	310
1975	13	278
1978	5	104
1980	8	104
1981	36	662
1985	0	0
1991	16	131
1995	122	683
1996	136	579
1997	226	704
1998	142	490
1999	42	300

Note : Le fleuve jaune s'est asséché dans son cours inférieur pour la première fois en 1972, pendant 19 jours, mais les ruptures du flot jusqu'en 1980 avaient été nettement plus courtes, ce qui n'a pas été à même d'alerter les autorités gouvernementales. Le fleuve s'est asséché presque chaque année pendant la décennie 1990, pour des périodes de durée croissante en moyenne et sur des segments de plus en plus longs.

Sources : Zheng Yaxin, « Tapping new sources of water and reducing water consumption », communication prononcée dans le cadre du colloque *Stakeholders and Decision-Making: Sustainable Development Through Integrated Water Management*, Beijing, 5-16 octobre 1998 ; Changming Liu et Hongxing Zheng, « Hydrological cycle changes in China's large river basin: The Yellow River drained dry », dans Martin Beniston (dir.), *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*, Kluwer, Dordrecht, 2002, p. 212.

Figure 14.3.  
Des régions fort consommatrices



Sources: USGS, *Offstream Water Use*, 1995; U.S. Geological Survey, *Estimated Use of Water in the United States in 2005*, Circular 1344, Washington, DC, 2009.

Source: *Eaux et Territoires*, 2011

Quelques paradoxes....



Et pourtant... : IL Y A TROP D'EAU AU SAHEL !!



Et pourtant : IL Y A TROP D'EAU!!



En fait,  
de plus en plus d'eau,  
mais dans un temps de plus en plus court,  
et de moins en moins exploitable !  
Donc on assiste à une perte de qualité





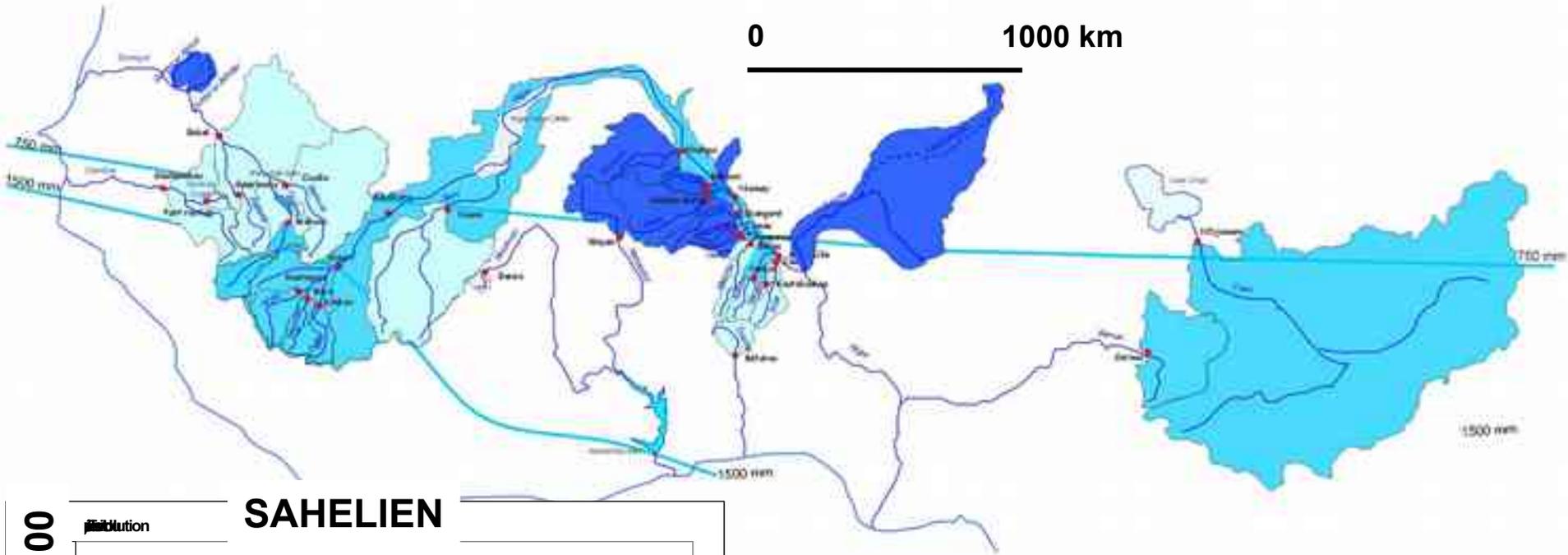
**Et les villes inondées en aval !! Niamey en 2010;  
en 2012, en 2013, en 2016 et 2017** *Courtoisie Ibrahim Mamadou*



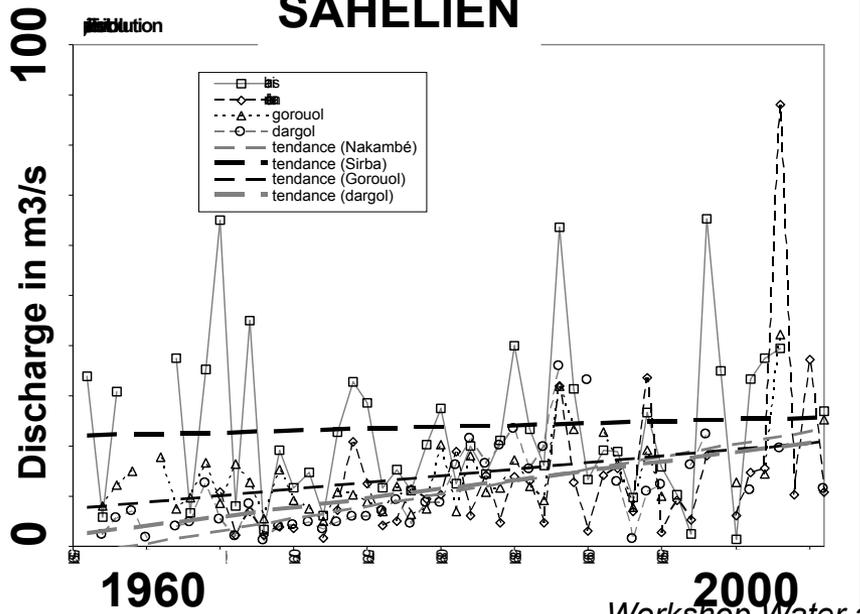
...ou Agadès le 1<sup>er</sup> sept 2009.....

*Courtoisie Akly et Eve Janodet*

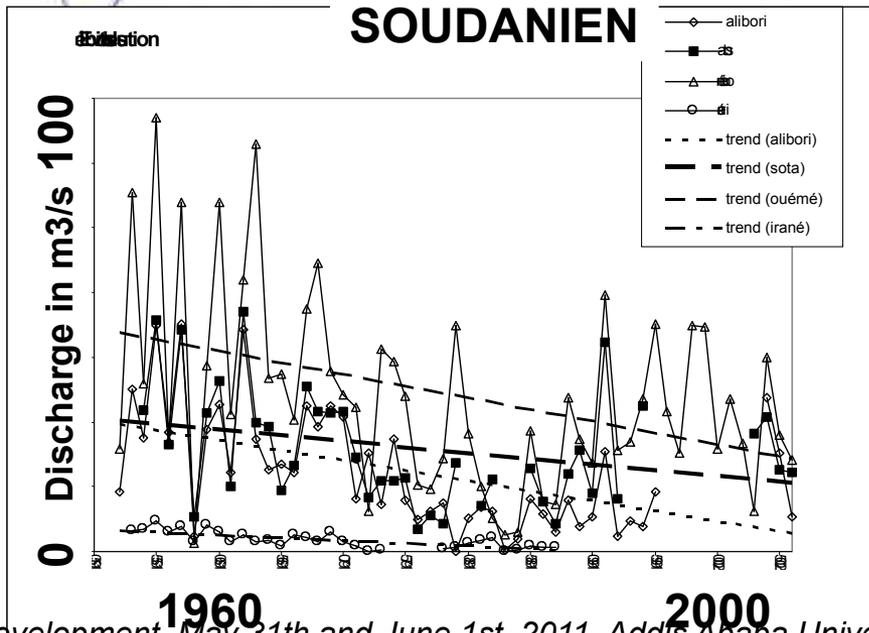
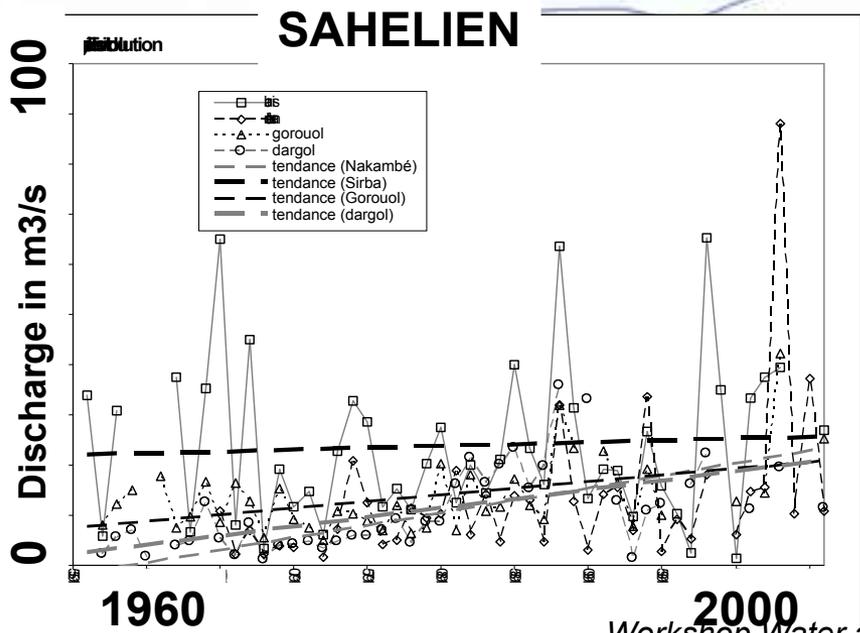
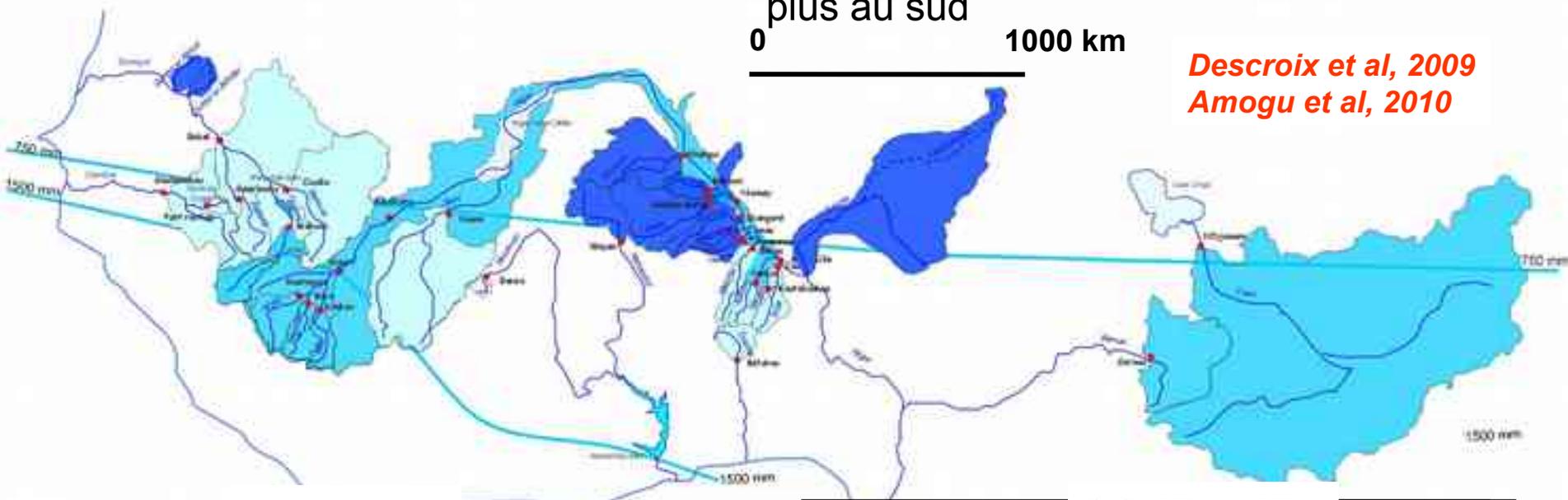
C'est ce qu'on observe au Sahel,



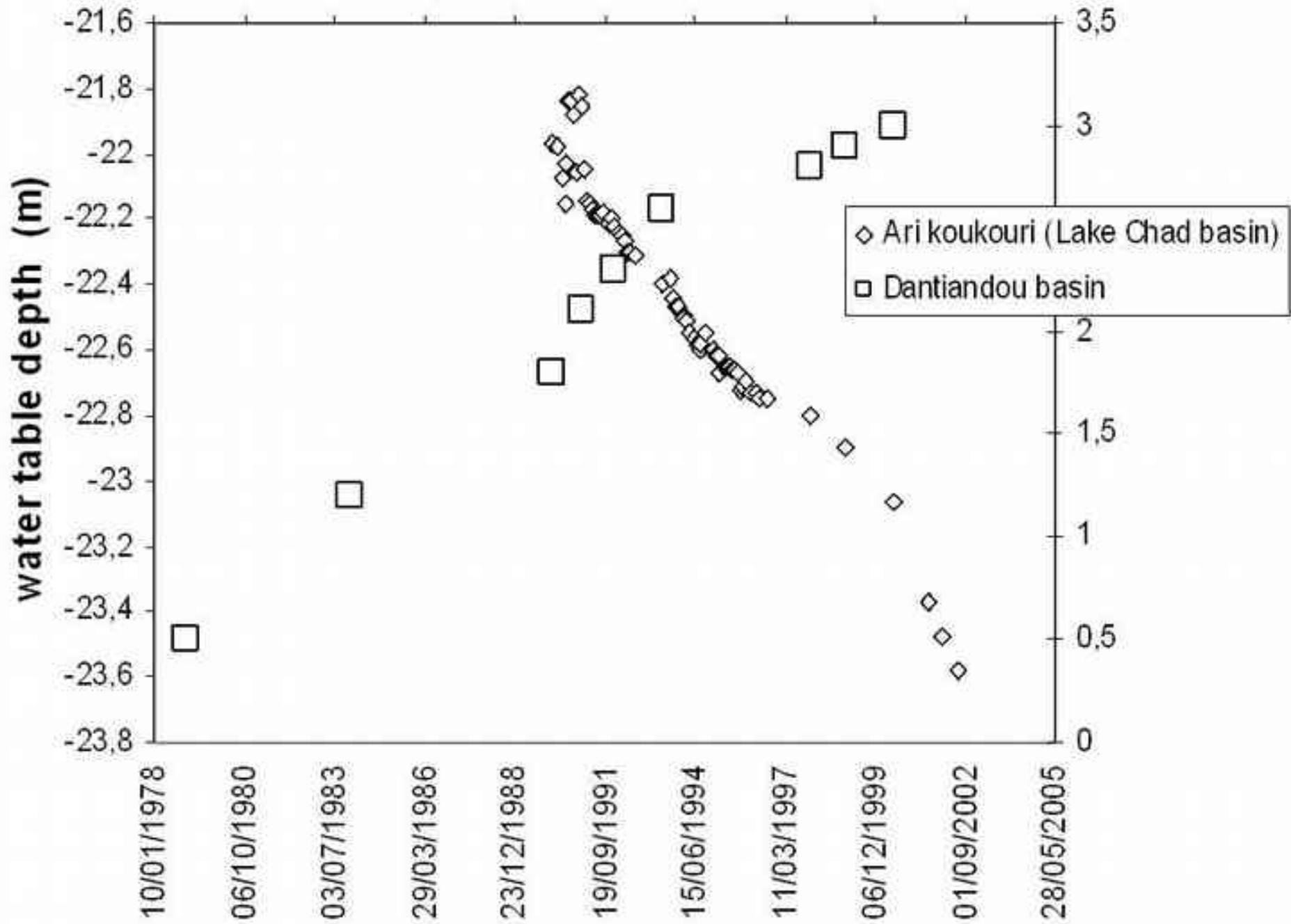
### SAHELIEN



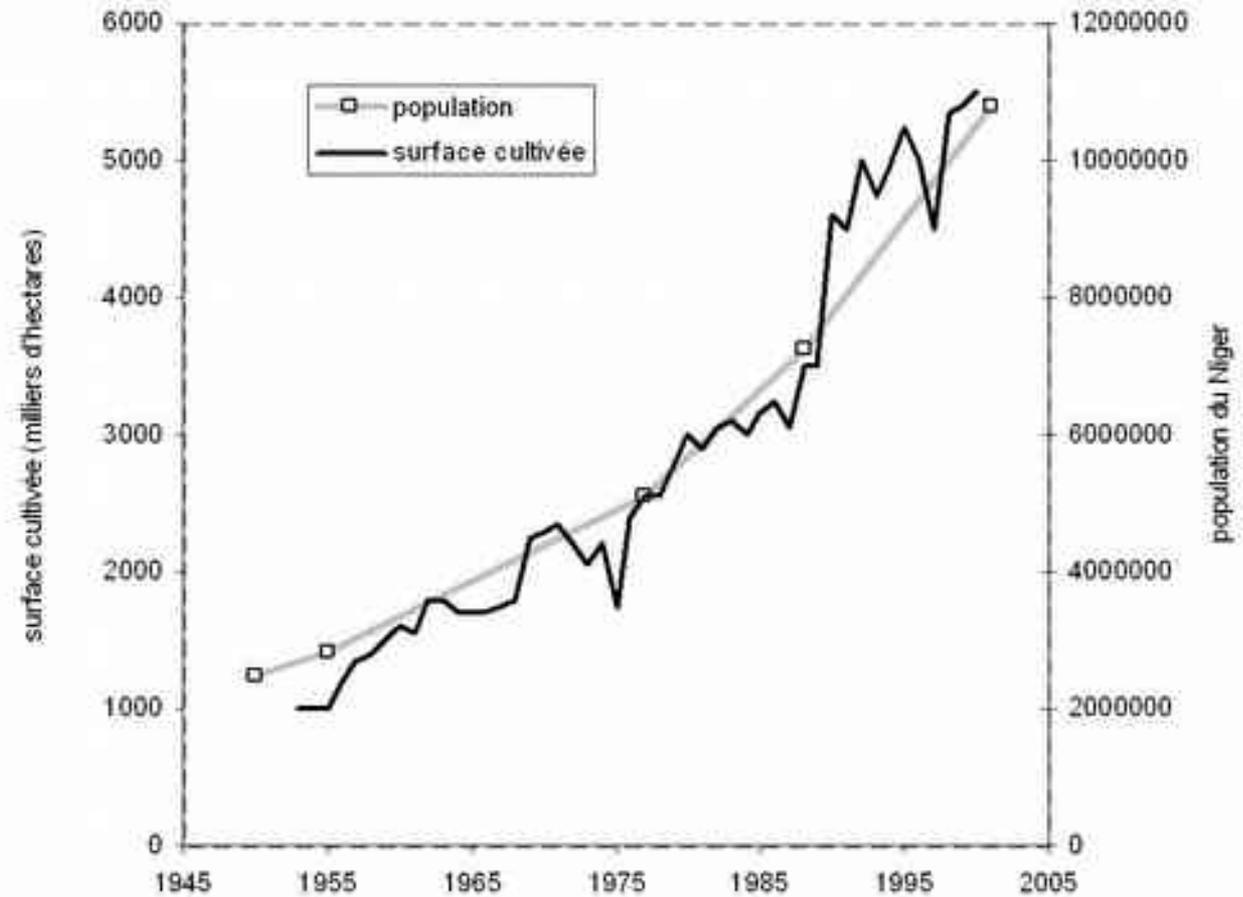
C'est ce qu'on observe au Sahel, mais pas dans la zone de climat soudanien,  
plus au sud



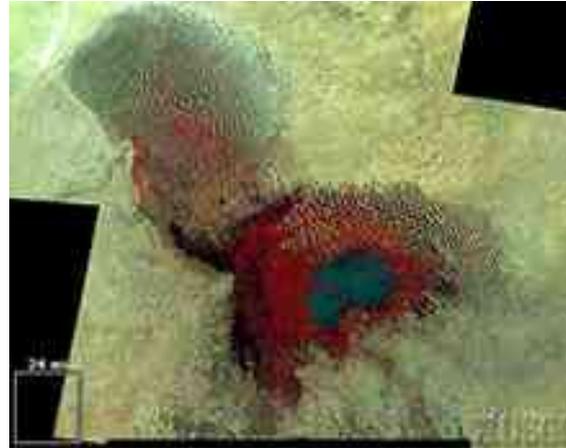
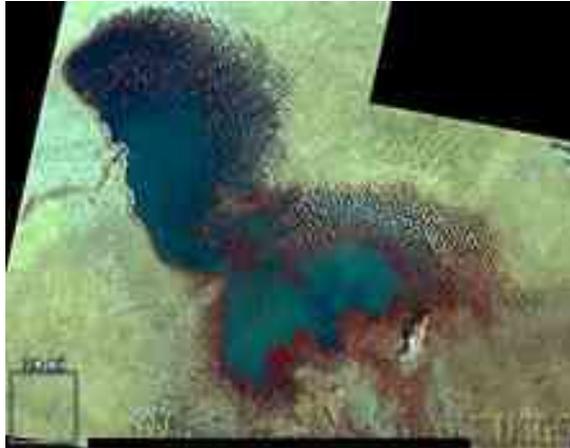




# La seule explication est en effet La croissance démographique et les changements conséquents d'occupation des sols



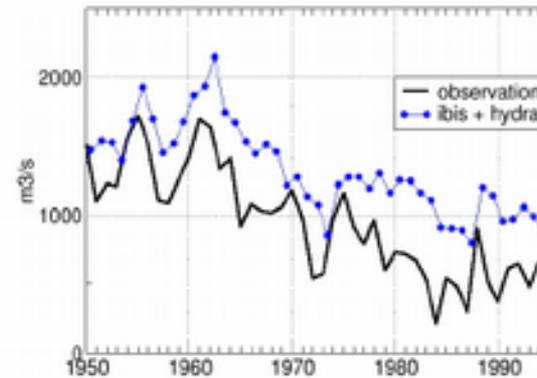
Guengant et Banoïn, 2003



Images satellitaires du lac Tchad (NASA), impact de la sécheresse des années 70-80.  
(document Guillaume Favreau et Rim Zairi, 2005)

## QUESTION:

Pourquoi la nappe baisse t-elle  
sous le Lac Tchad  
Alors qu'elle remonte  
dans le degré carré de Niamey ??



Simulation de l'évolution pluridécennale des débits du Chari à N'Djaména  
sans prise en compte de l'irrigation (impact climatique seul), Favreau, 2005.  
(document Guillaume Favreau et Rim Zairi, 2005)

# Un exemple des conséquences hydrologiques d'une guerre

ECOHYDROLOGY

*Ecohydrol.* 3, 382–391 (2010)

Published online 1 October 2010 in Wiley Online Library  
(wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/eco.166

---

## **Conflict, migration and land-cover changes in Indochina: a hydrological assessment**

G. Lacombe,<sup>1</sup> A. Pierret,<sup>1,2</sup> C. T. Hoanh,<sup>1</sup> O. Sengtaheuanghoung<sup>3</sup> and A. D. Noble<sup>1</sup>

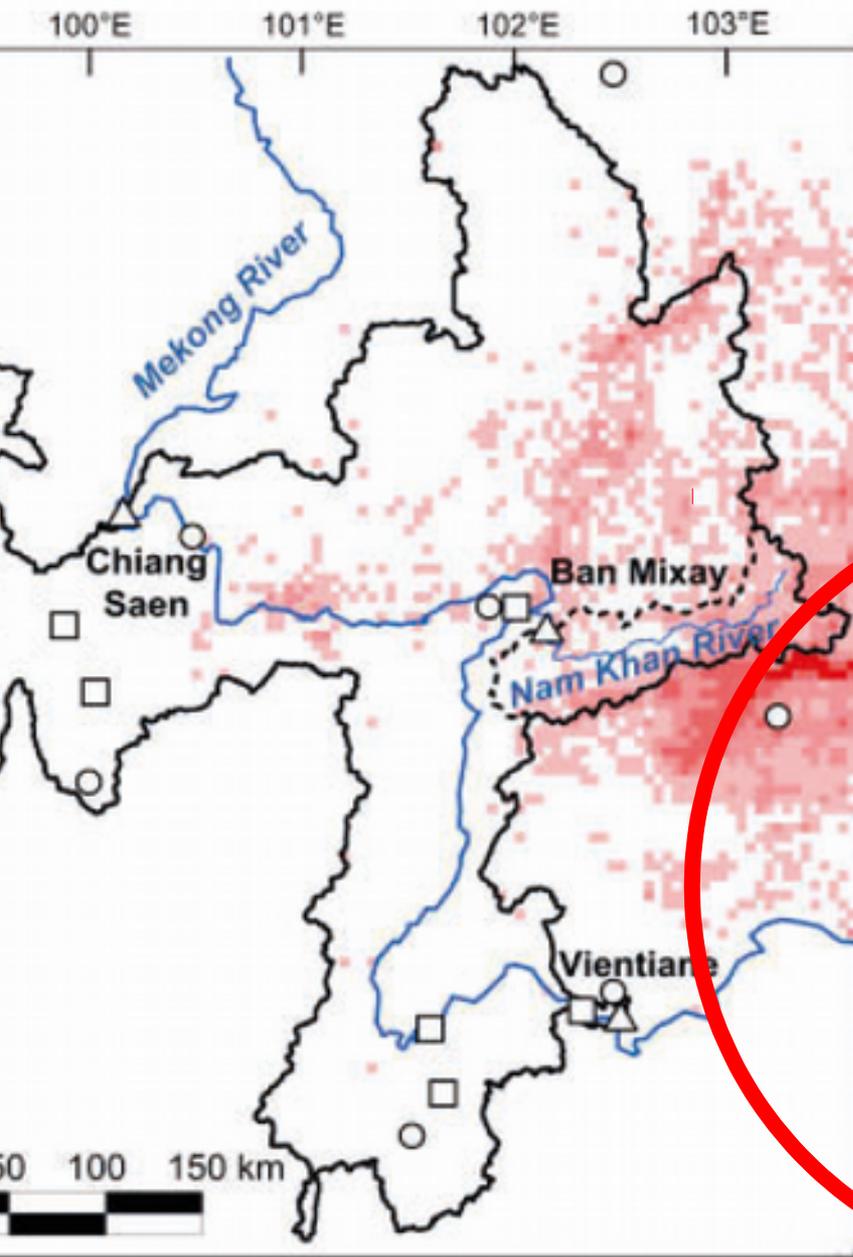
<sup>1</sup> *International Water Management Institute (IWMI), PO Box 4199, Vientiane, Lao PDR*

<sup>2</sup> *Institut de Recherche pour le Développement (IRD), PO Box 5992, Vientiane, Lao PDR*

<sup>3</sup> *National Agriculture and Forestry Research Institute (NAFRI), PO Box 811, Vientiane Lao PDR*

---

# CONFLICT, MIGRATION AND LAND-COVER CHANGES IN INDOCHINA



Daily gauges :

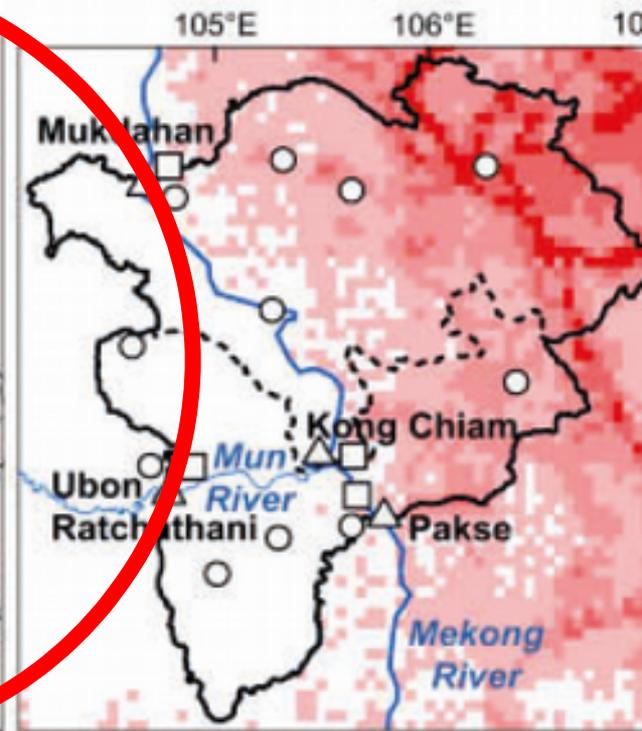
- △ River water level
- Rain
- Evaporation

Bombing densities ( $\text{kg.km}^{-2}$ ) :

$10^4$   $10^5$   $4 \cdot 10^5$



□ Sub-catchment



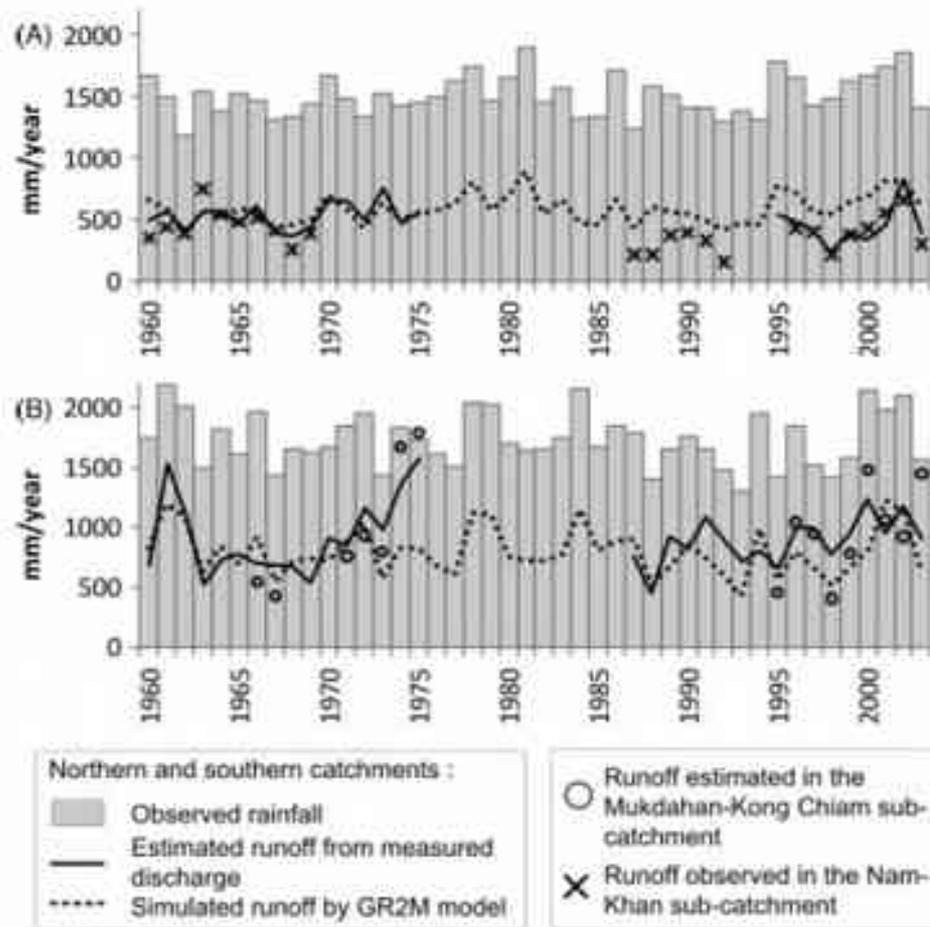


Figure 2. Hydrological changes in northern catchment (A) and southern catchment (B).

# Cas 1: plus d'eau !!!

CONFLICT, MIGRATION AND LAND-COVER CHANGES IN INDOCHINA

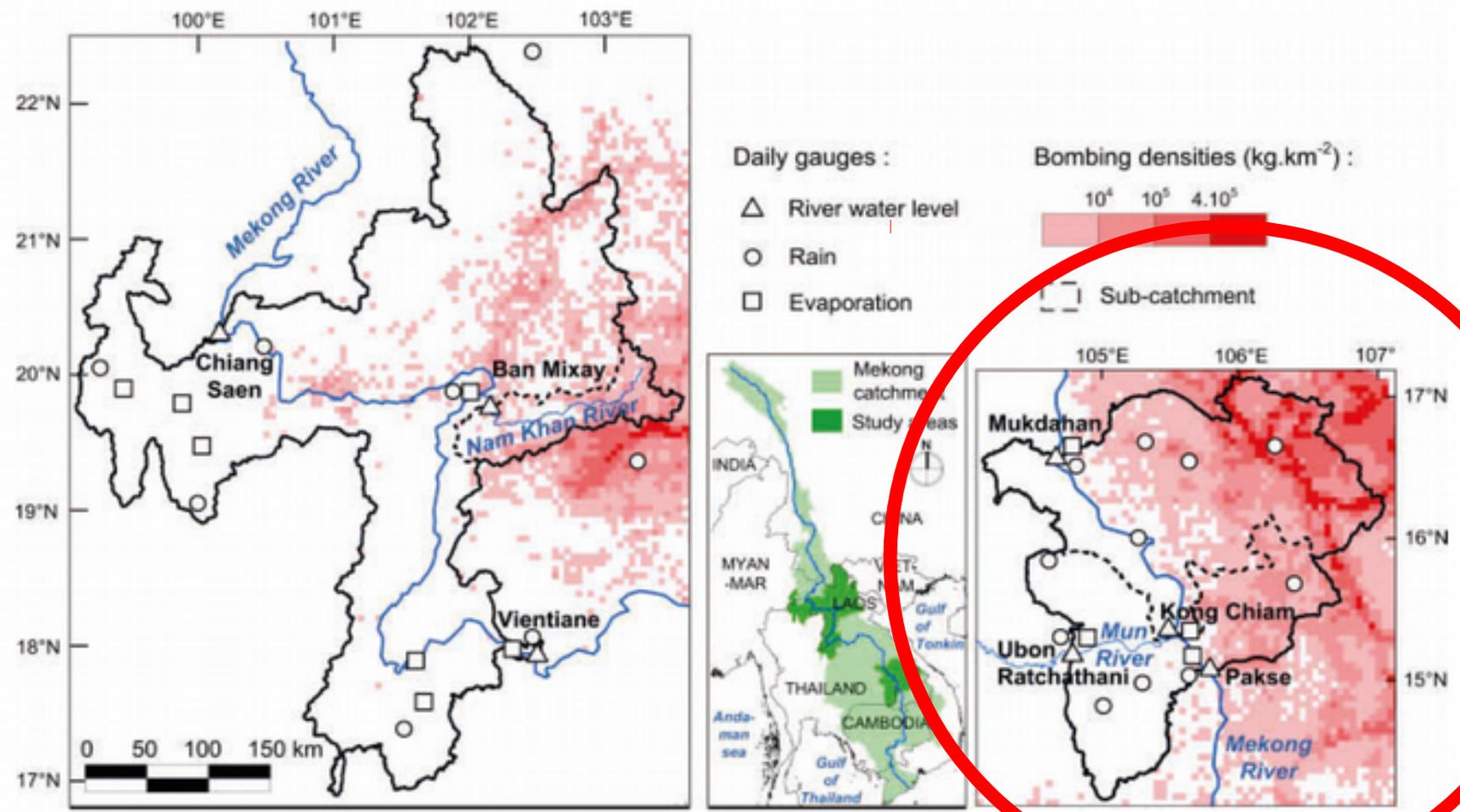
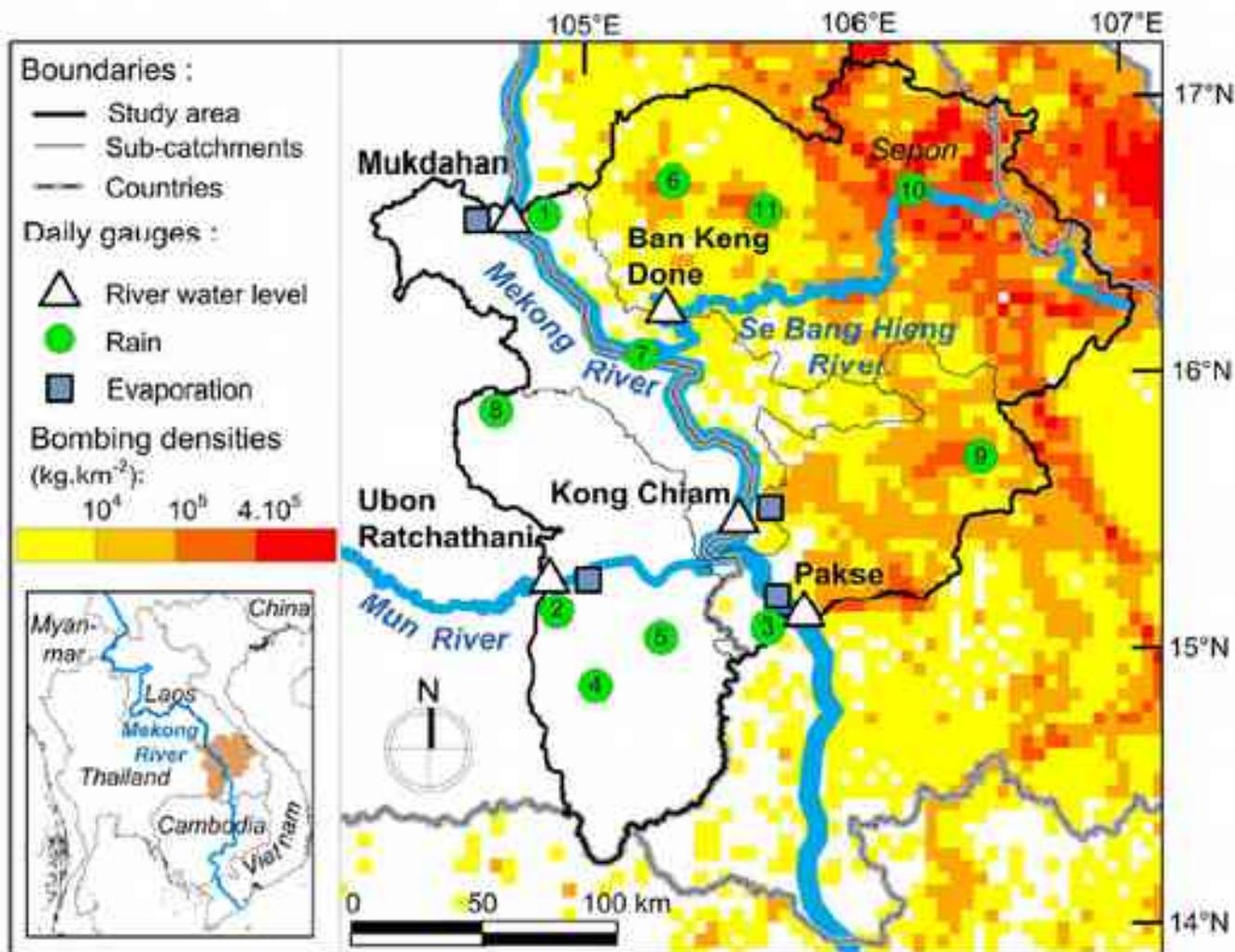


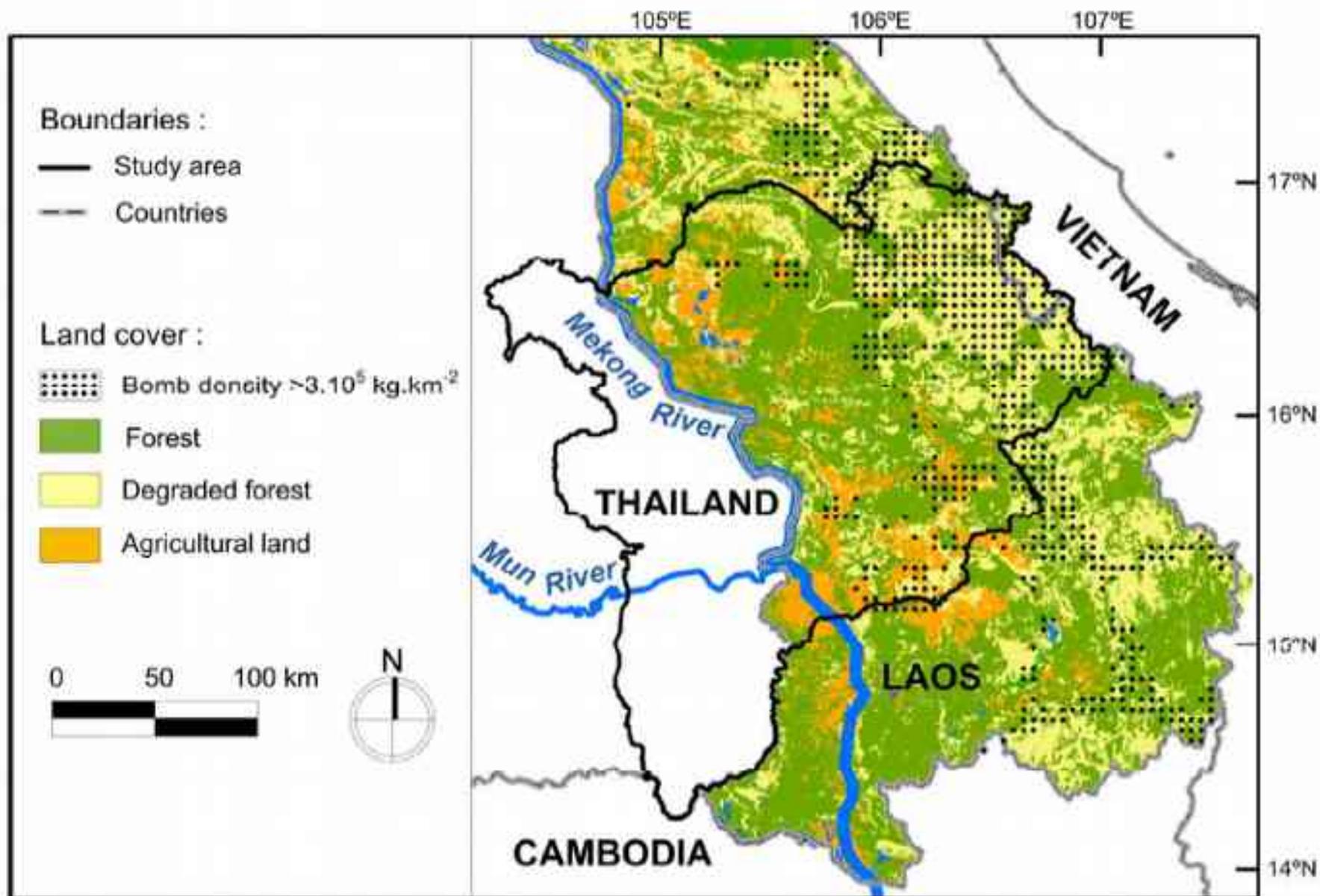
Figure 1. Hydro-meteorological stations and bombing densities over the period 1965–1973 in the study areas.



Hydro-meteorological stations and bombing densities cumulated from October 1965 to September 1973 in the study area according to Lacombe et al. (2010)  
199x157mm (300 x 300 DPI)



Aerial view of heavily cratered zones close to rain gauge 10 in Fig. 1. Pictures taken on 24 Dec. 2005. ©  
2013 Cnes/Spot Image, Digital Globe  
80x87mm (300 x 300 DPI)



Land cover in 2002 and heavily bombed areas in Southern Laos  
 145x101mm (300 x 300 DPI)

# Cas 2 : moins d'eau !

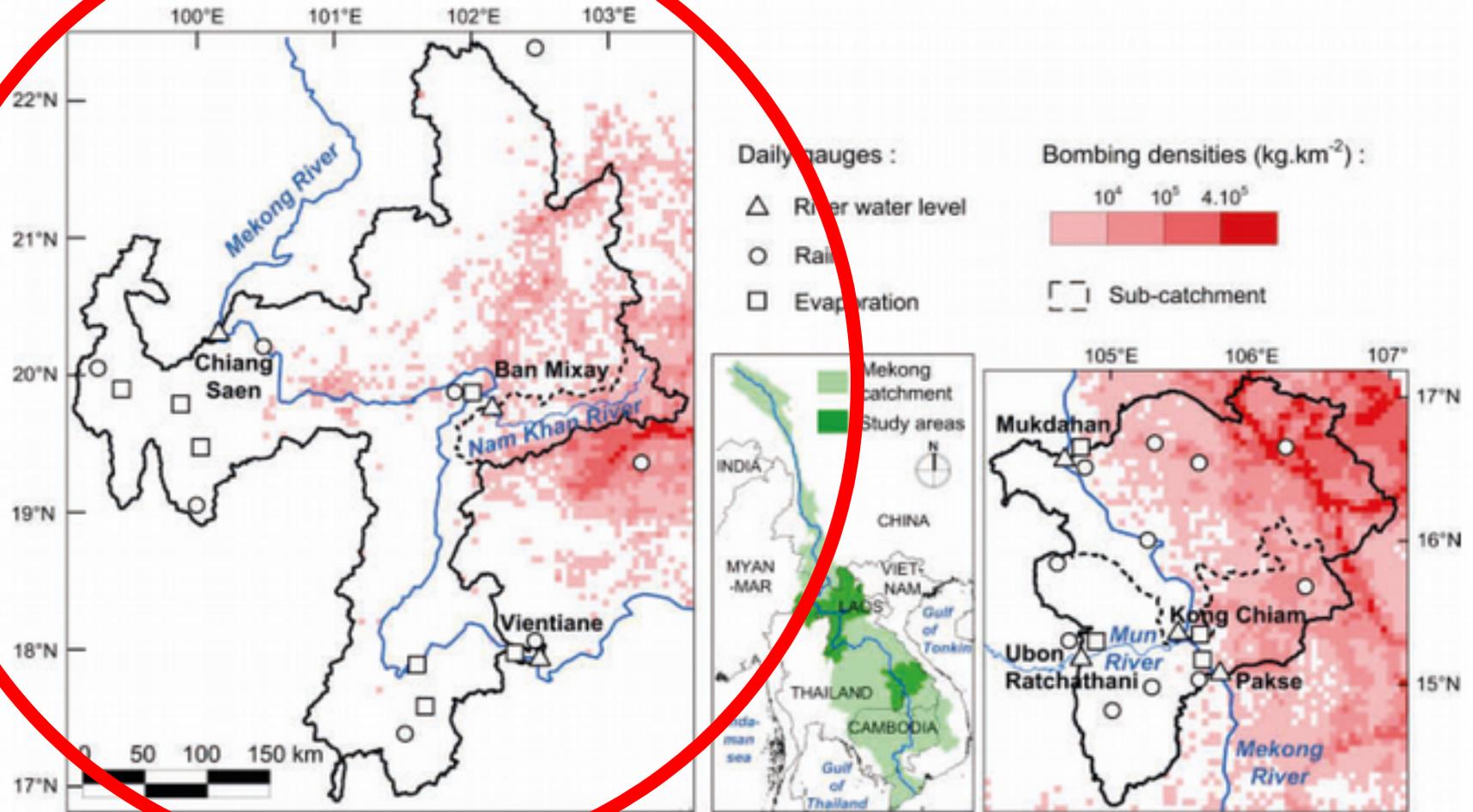


Figure 1. Hydro-meteorological stations and bombing densities over the period 1965–1973 in the study areas.

Et où a-t-on déplacé les Hmongs ?

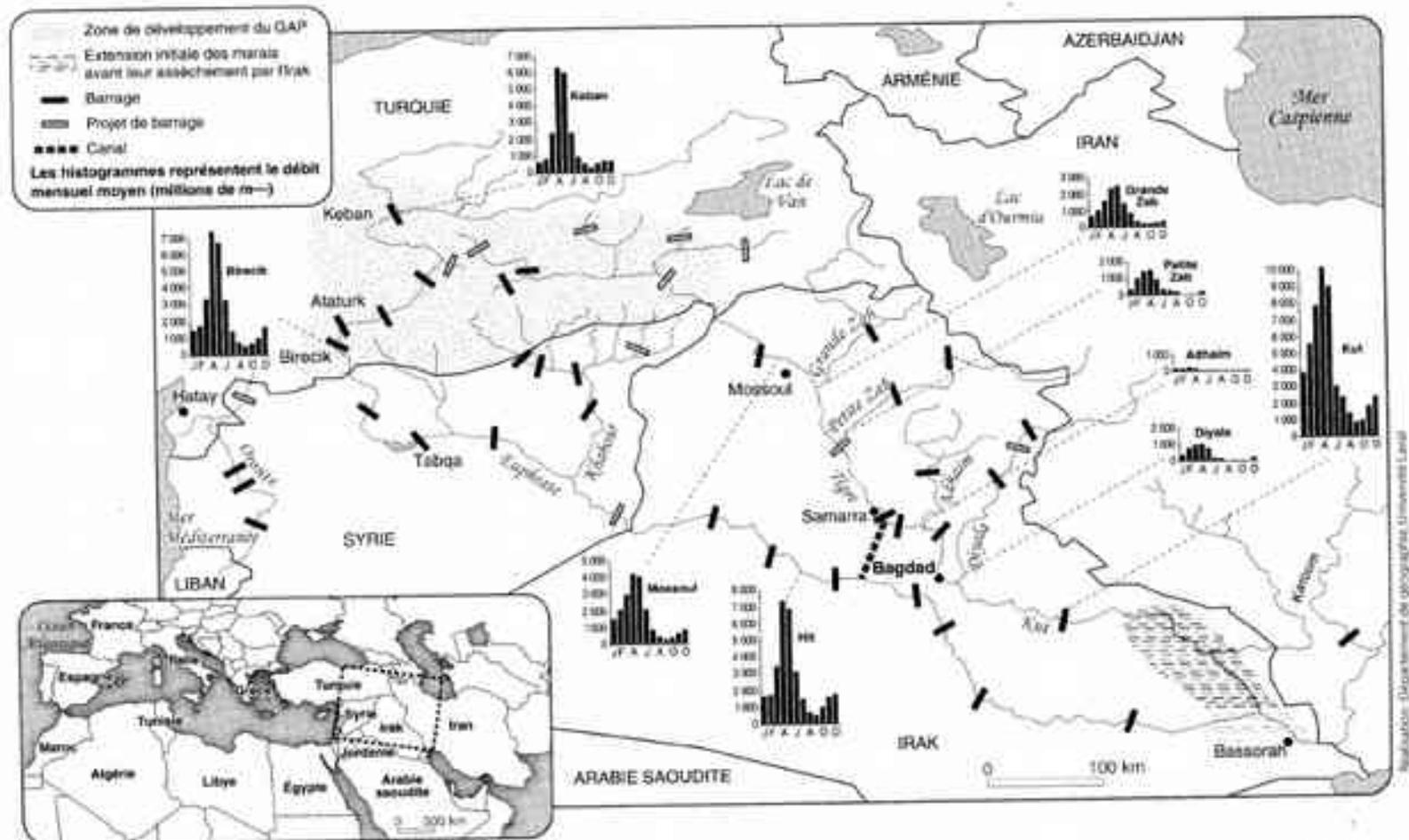




Toujours la géopolitique...



Figure 9.1.  
Le bassin du Tigre et de l'Euphrate



Sources: Georges Mutin, *L'eau dans le monde arabe*, Ellipses, Paris, 2000, p. 65, 72; Azim Elhance, *Hydropolitics in the Third World. Conflict and Cooperation in International River Basins*, United States Institute of Peace Press, Washington, 1999, p. 126; Tarek Majzoub, *Les fleuves du Moyen-Orient*, L'Harmattan, Paris, 1994, p. 121; Arnon Soifer, *Rivers of Fire. The Conflict over Water in the Middle East*, Rowman & Littlefield, Lanham, 1999, p. 97; Nuri Kliot, *Water Resources and Conflict in the Middle East*, Routledge, Londres, 1994, p. 103; Masahiro Murakami, *Managing Water for Peace in the Middle East - Alternative Strategies*, United Nations University Press, Tokyo, 1995, p. 40; General Directorate of State Hydraulic Works, <<http://www.dsi.gov.tr>>; Southeastern Anatolia Regional Development Administration, <<http://www.gap.gov.tr/gapeng.html>>.

Donc, en cas de pénurie extrême comme au Proche Orient ;

Palestine, Israël, Jordanie, Arabie Saoudite,  
Sud Ouest des Etats Unis

Possibilité de réattribuer l'eau d'irrigation à la demande domestique : les grandes villes de la côte sud californienne rachètent depuis 20 ans les droits d'eau des agriculteurs irrigants de la basse vallée du Colorado

L'Arabie peut arrêter de produire du blé irrigué dans le désert : ce pays et la Libye peuvent arrêter de pomper dans des nappes fossiles et importer les produits agricoles produits avec cette eau fossile...

Et on peut aussi dessaler..

## Conclusion

- beaucoup d'eau sur terre
- a priori bien assez pour tout le Monde malgré une répartition très inégale
- des régions sur-consommatrices
- si on utilisait dès aujourd'hui partout toutes les techniques permettant d'utiliser moins d'eau (en irrigation, en procédés industriels, en refroidissement, etc), on assurerait un bien meilleur renouvellement de l'eau
- contrairement à ce qu'on croit, il n'y a jamais eu de vraie guerre de l'eau, comme si c'était trop grave pour pouvoir s'imaginer

## Conclusion (suite)

### Exemples d'efforts en cours en irrigation

- aspersion (pression) bien plus économique que déversement (gravité)
  - sur cultures en ligne (maraîchage, arboriculture), le goutte à goutte est bien plus économique que l'aspersion
- À chaque étape on diminue l'évaporation et les pertes en ligne (idem avec la couverture totale)

## Conclusion (suite)

En domestique et urbain, et au quotidien....

- chercher les fuites (50% des pertes à Mexico ou au Caire)
- adopter des pommeaux de douche et des chasses d'eau consommant moins d'eau
- sélectionner ses appareils électro-ménagers
- et éventuellement, fermer les robinets

A landscape photograph showing a body of water in the foreground, a sandy bank, and several large, mature trees with dense green foliage. The sky is overcast with grey clouds. The text "Merci de votre accueil !!" is overlaid on the lower part of the image.

**Merci de votre accueil !!**



Archives ONF ~ 1900



1996

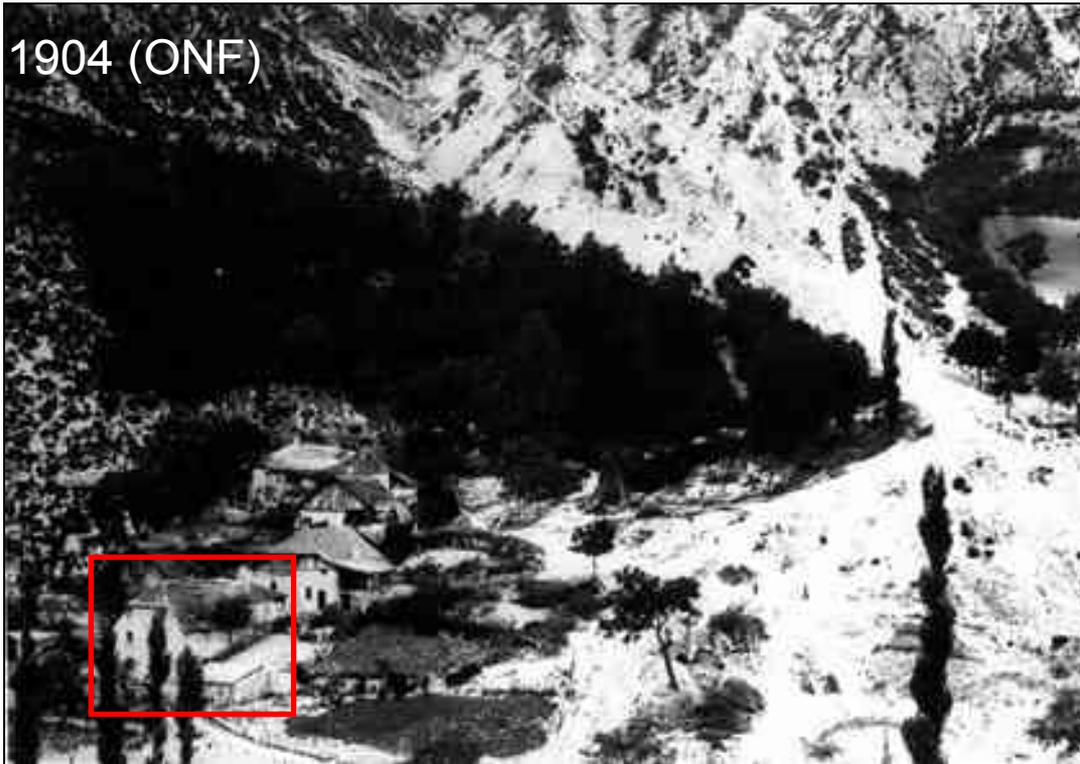


Courtoisie de Frédéric Liébault  
IRSTEA Grenoble

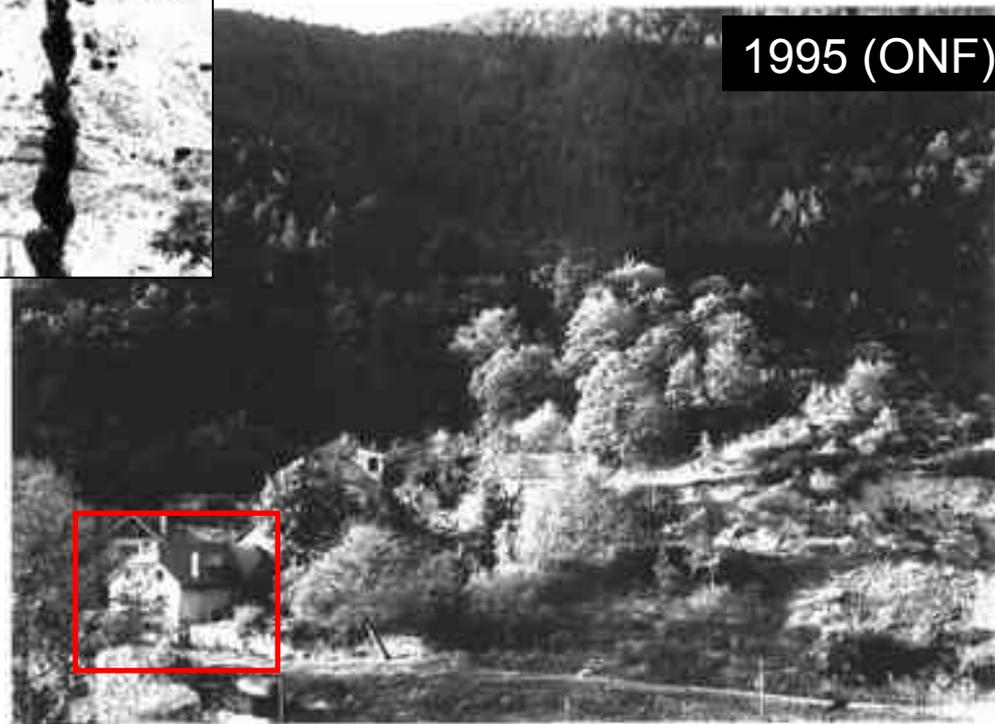
N. Landon

# Pourquoi la Drôme s'enfonce?

1904 (ONF)



1995 (ONF)



**Courtoisie de Frédéric Liébault  
IRSTEA Grenoble**

# Une reconquête forestière qui a affecté les sources sédimentaires

1904



Les gorges de Pommerol  
(Baronnies)

2002



Courtoisie de Frédéric Liébault  
IRSTEA Grenoble

# L'extinction torrentielle: un phénomène anthropique ?

1899



Archives photographiques ONF-RTM

2005



Courtoisie de Frédéric Liébault  
IRSTEA Grenoble



Le Brusquet en 1880 et en 1990

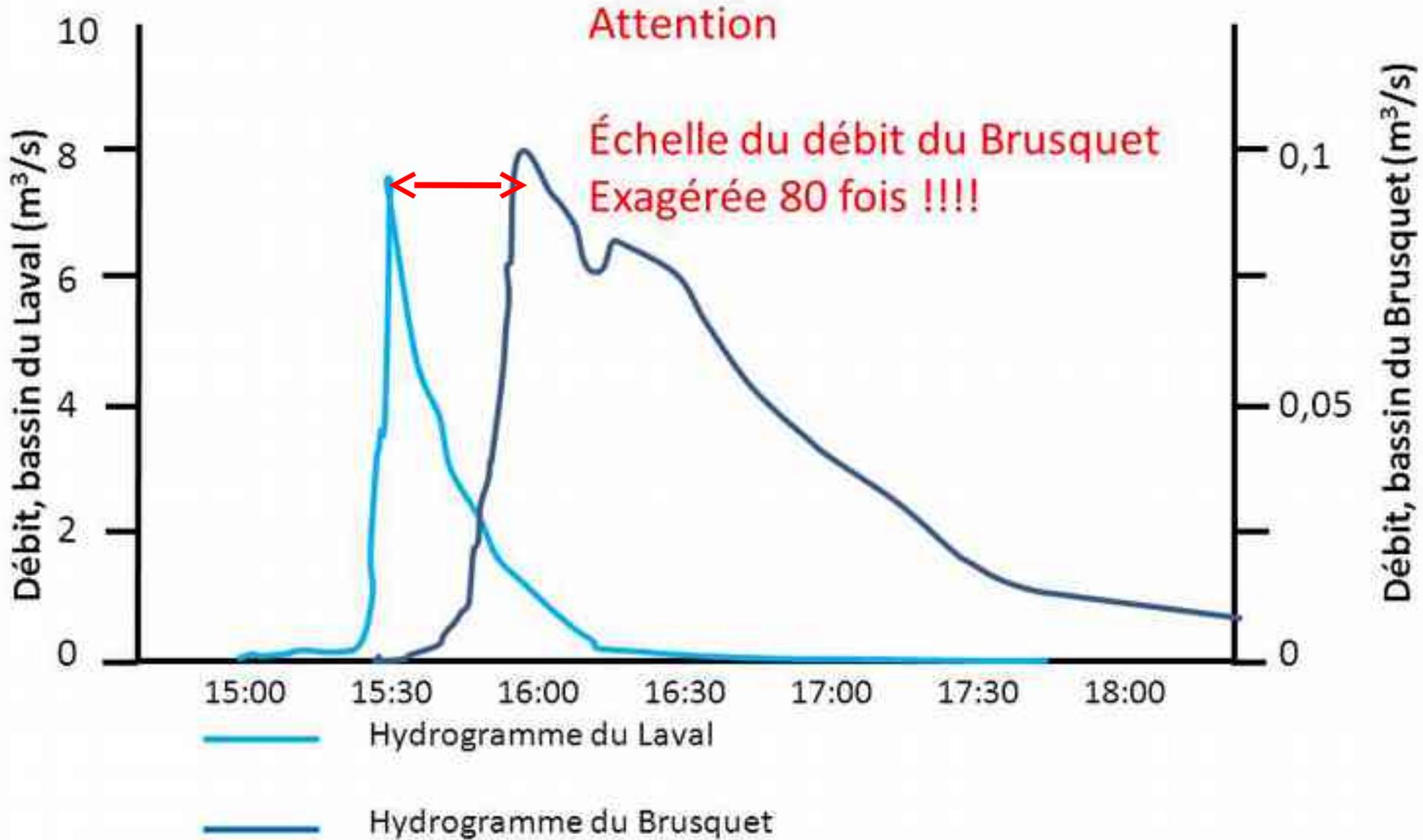
Site de Draix (IRSTEA) Alpes du Sud;  
Un bassin versant a été intégralement  
reboisé, l'autre laissé à nu.  
Ils ont la même taille (1 km<sup>2</sup>)  
On peut comparer les débits à la sortie

Le Laval, état actuel

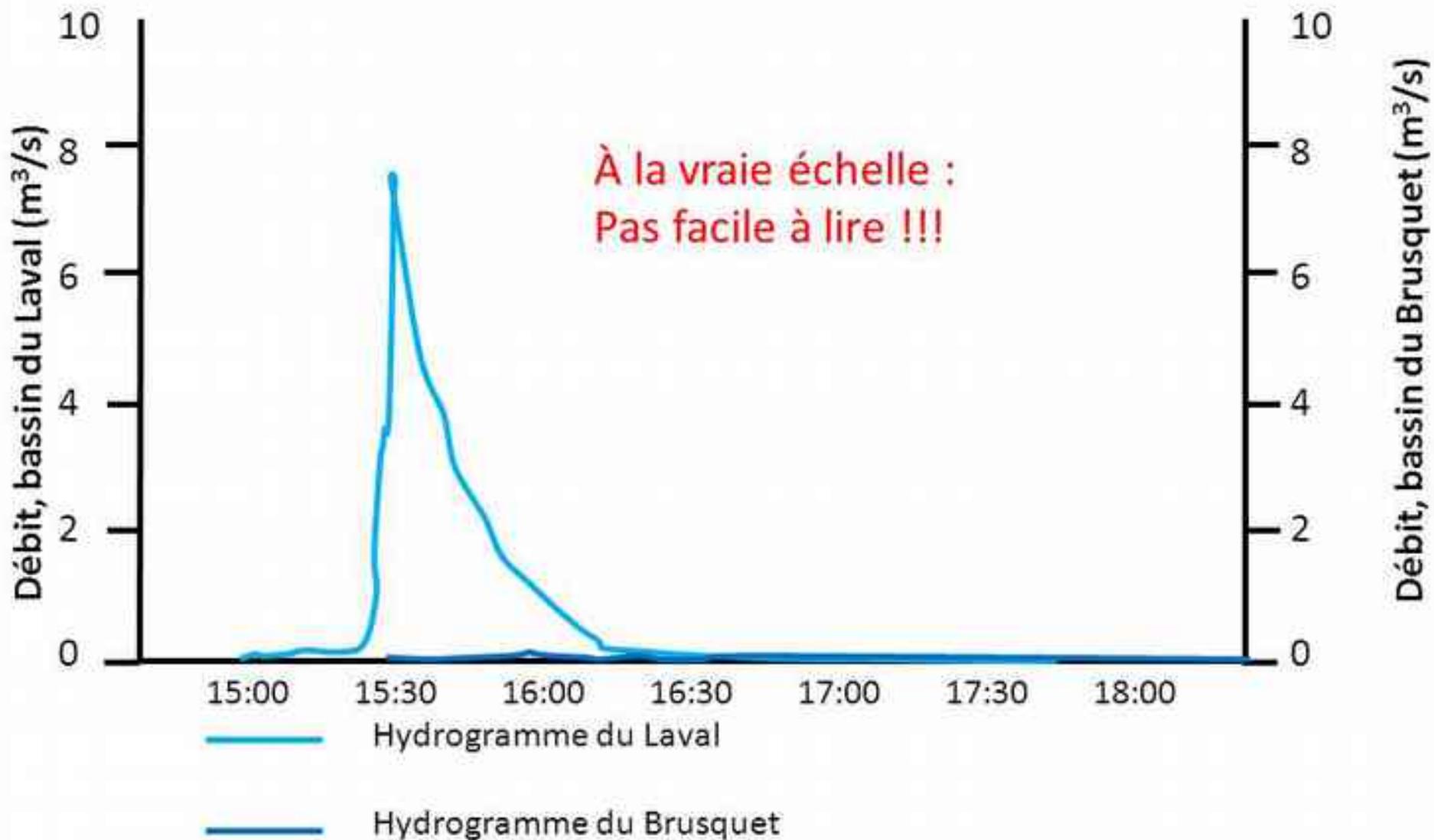


Figure 5.1 : Drapage de l'orthophotographie sur le MNT du Laval et du Moulin

# Crue du 6 juillet 1987



## Crue du 6 juillet 1987



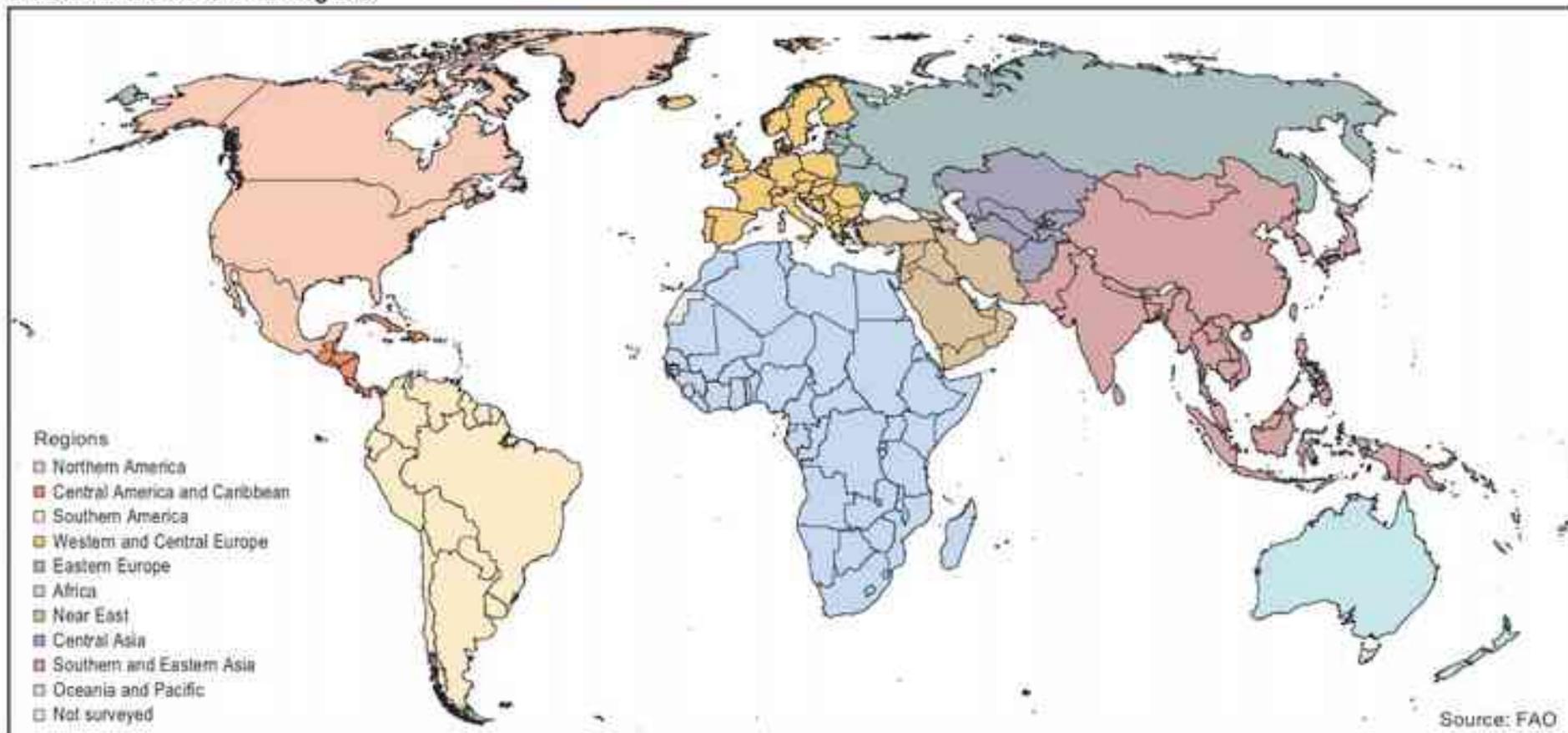
# Effet hydrologique du reboisement dans les Alpes du Sud

HYDROGRAMMES des crues du 6/6/87 sur les bassins du Laval et du Brusquet (Alpes du Sud) (attention échelles différentes).:

- Pic de crue 80 fois plus élevé dans le bassin nu
- début d'écoulement retardé de 20 minutes dans le bassin boisé
- débit de base plus important après la pluie sur le bassin boisé (stockage dans la litière et le sol , aucun stockage dans le bassin resté à nu)

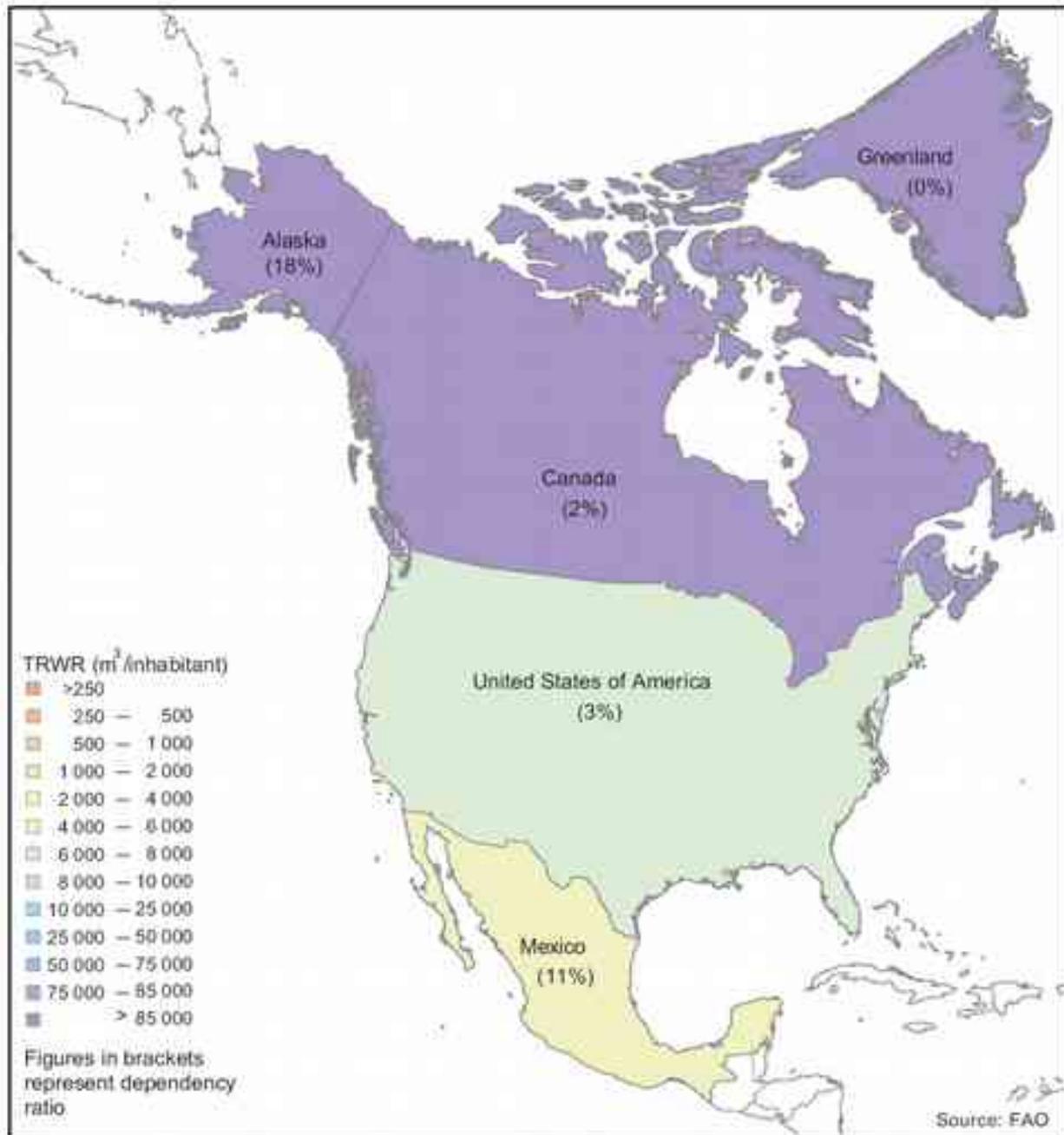
MAP 3

Division of the world in ten regions



MAP 4

Water resources in the Northern America region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



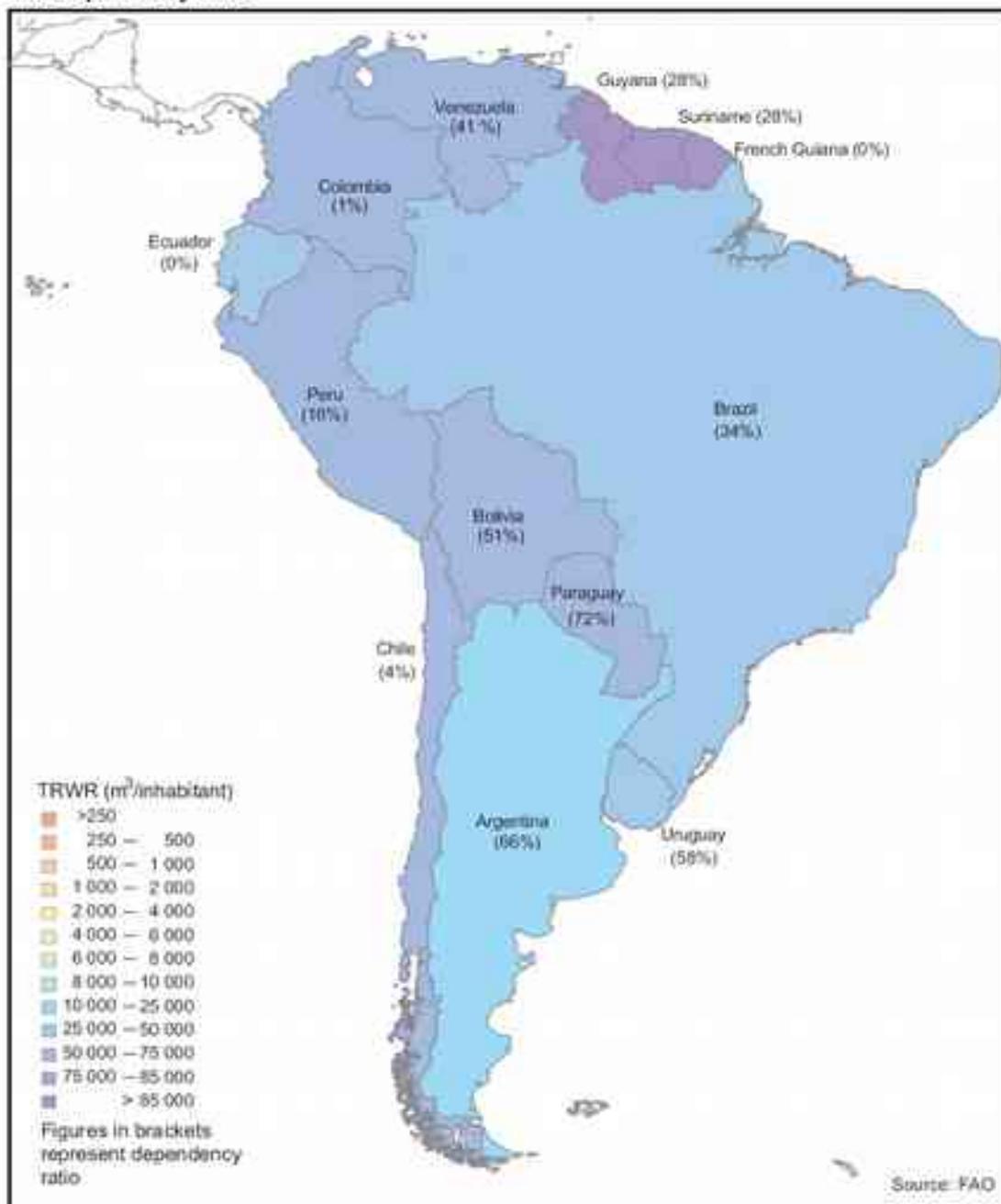
MAP 5

Water resources in the Central America and Caribbean region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



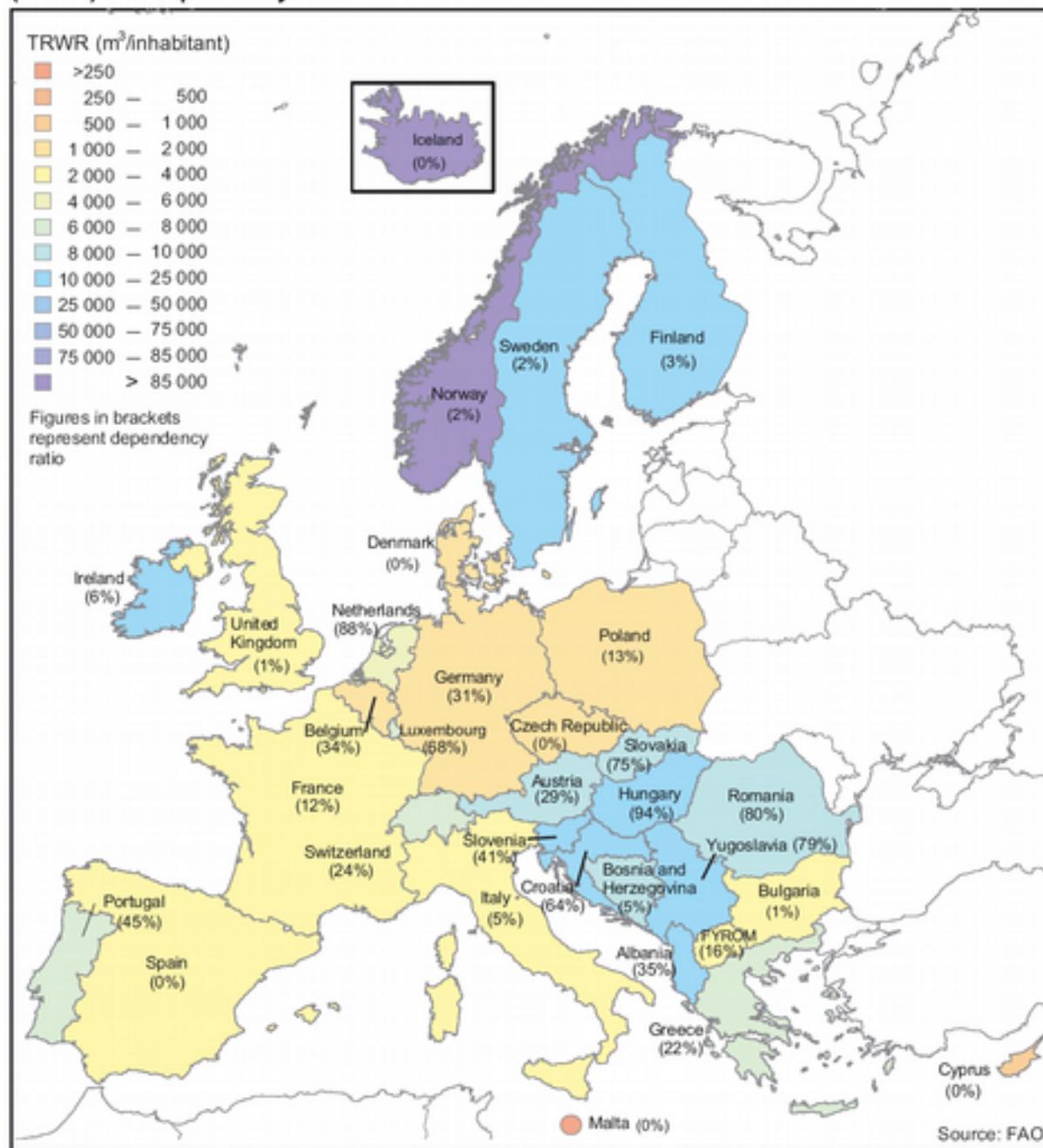
Map 6

Water resources in the Southern America region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



MAP 7

Water resources in the Western and Central Europe region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



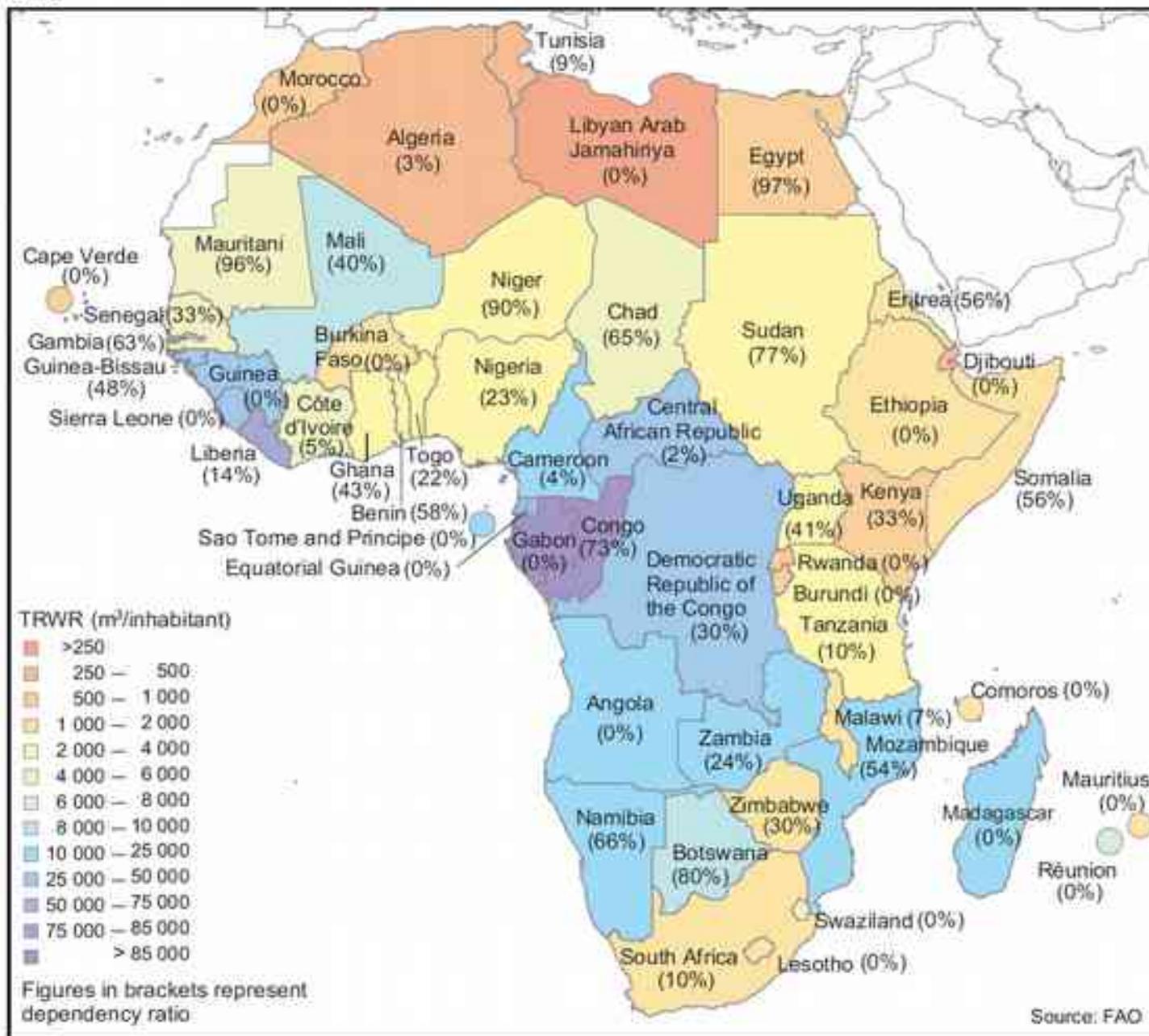
MAP 8

Water resources in the Eastern Europe region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



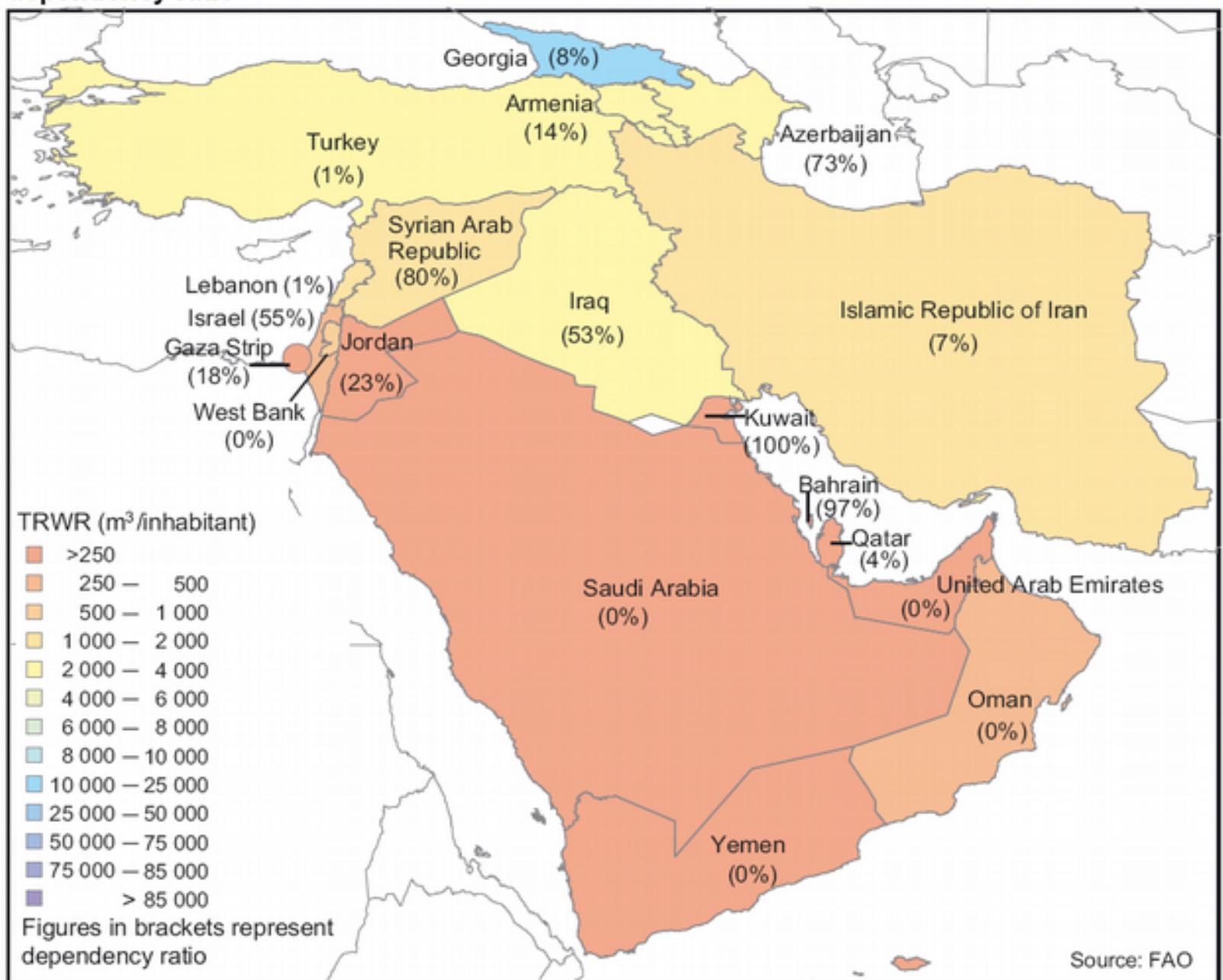
MAP 9

Water resources in the Africa region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



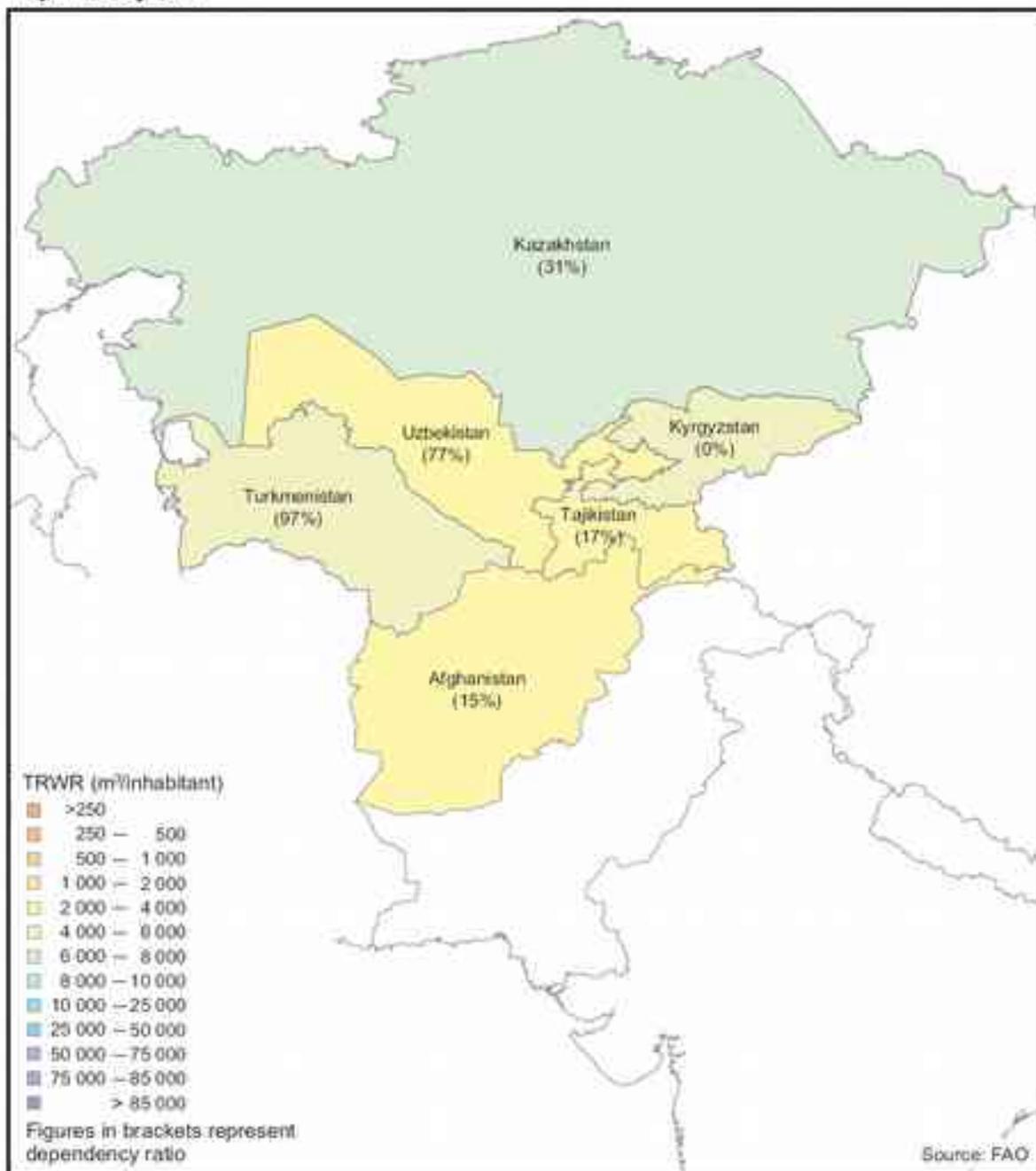
MAP 10

### Water resources in the Near East region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



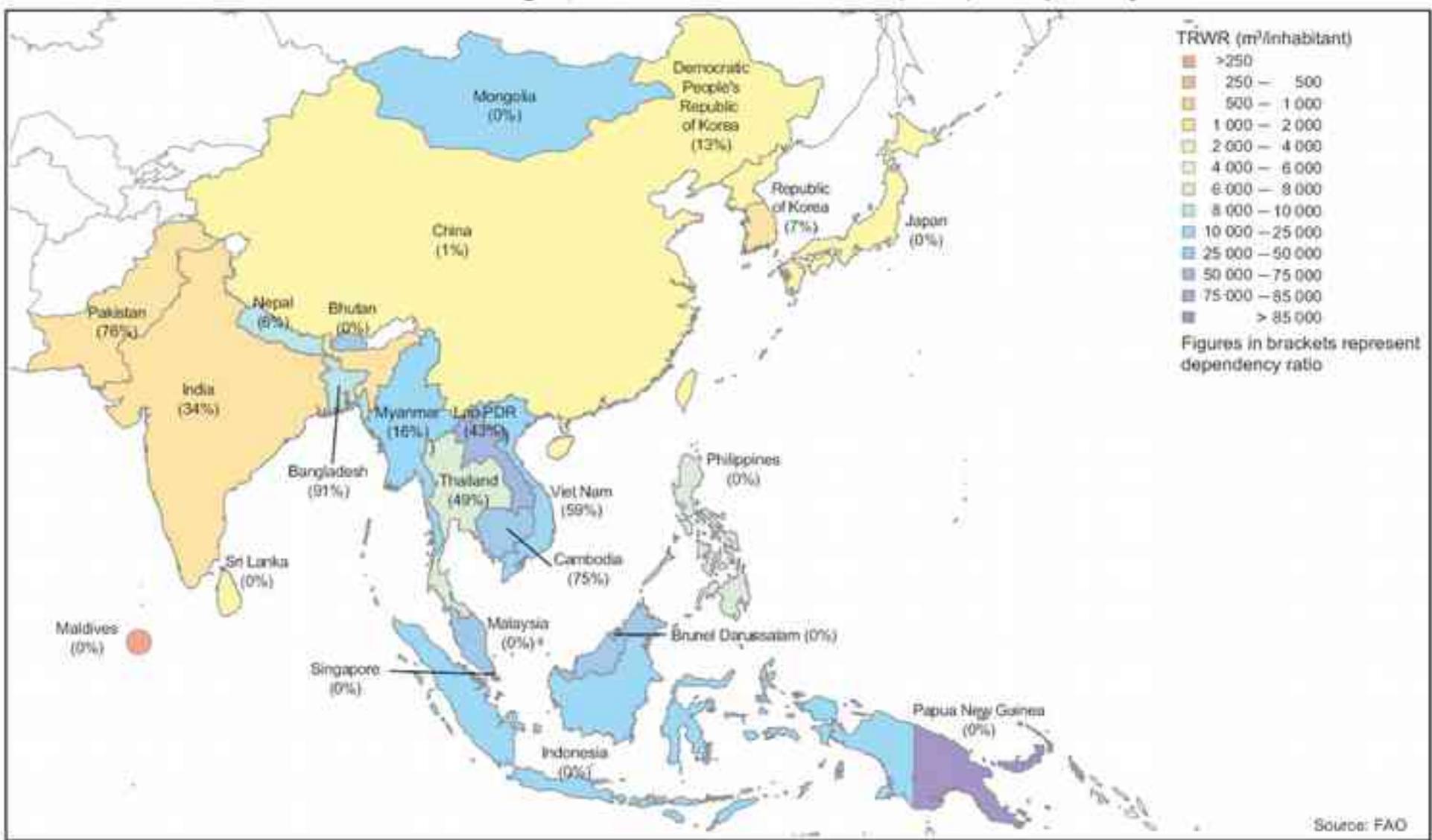
MAP 11

Water resources in the Central Asia region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



MAP 12

Water resources in the Southern and Eastern Asia region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



Source: FAO

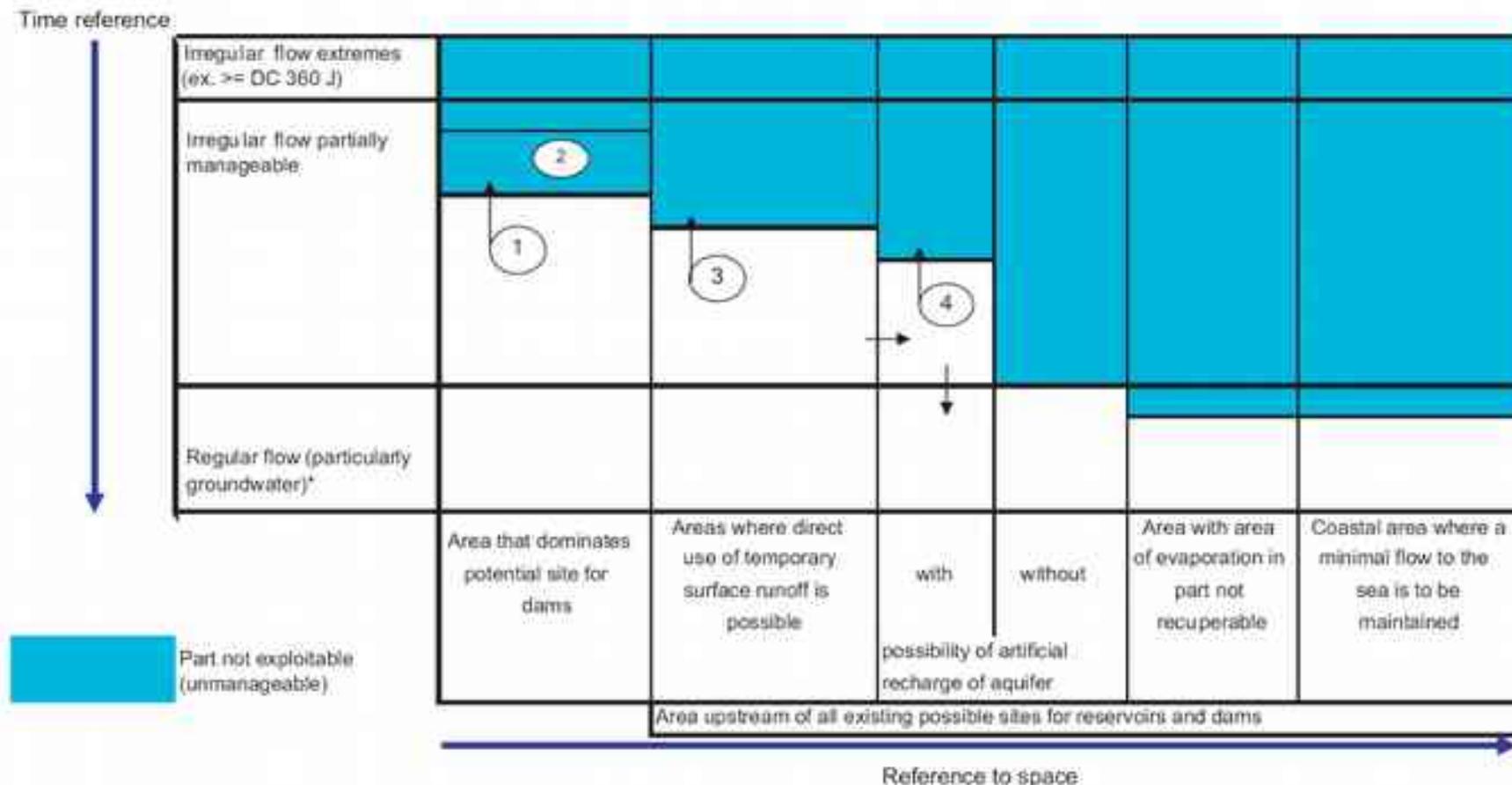
MAP 13

Water resources in the Oceania and Pacific region, total renewable water resources (TRWR) and dependency ratio



- Blue water is the source of supply. It is equivalent to the natural water resources (surface and groundwater runoff).
- Green water is the rainwater directly used and evaporated by non-irrigated agriculture, pastures and forests.

**FIGURE 2**  
**Water: natural resources and technically exploitable resources**



- Notes:
1. According to the sum of the capacities of the reservoirs and the variability of the inflow.
  2. Flow evaporated from reservoirs and dams (according to their surface).
  3. According to the variability of the inflow.
  4. According to the intake capacity of the aquifers.
- \* Reserved flow not included.

Source: FAO/BRGM, 1996.