



Les grands barrages et leurs impacts sur l'environnement



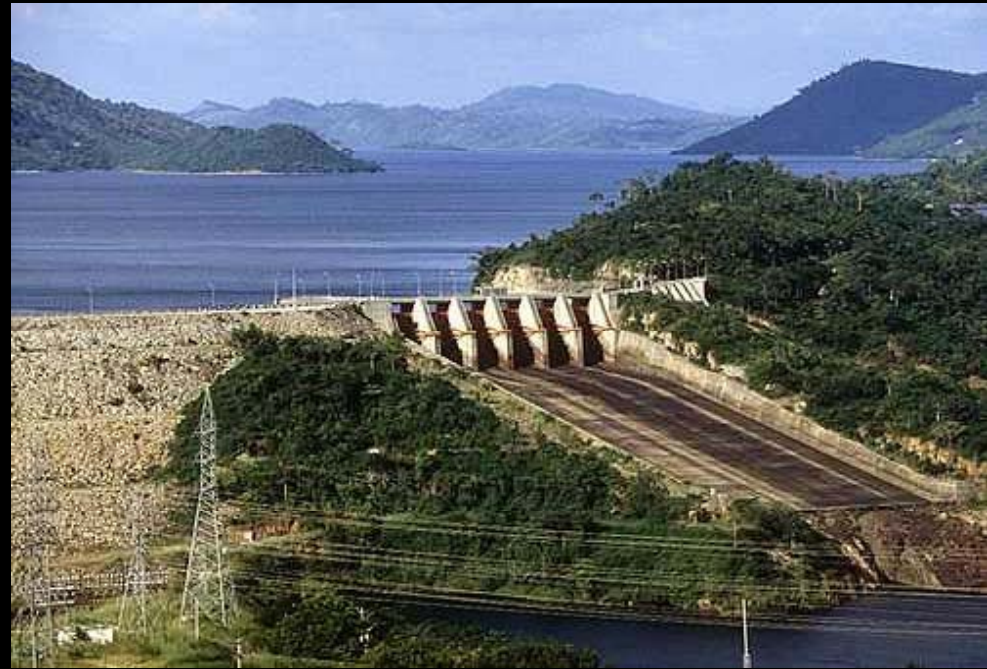
Barrage Hoover (USA)

- 1) Les barrages à travers le monde*
- 2) Les risques technologiques inhérents aux barrages*
- 3) Les impacts des barrages et réservoirs*

1) Les barrages à travers le monde

1.1) Les barrages en quelques chiffres...

*Barrage Akosombo
(Volta, Ghana)*



- Un « grand barrage » est un ouvrage de plus de 15 m de hauteur ;
- Il existe environ **36 000 ouvrages de plus de 15 m** dans le monde, **2000 de plus de 60 m** et **50 dépassant 200 m** ;
- **85%** d'entre eux ont été construits après 1950 ;
- Leurs réservoirs stockent 5500 km^3 d'eau, soit **4% du volume des lacs naturels** ;

Les barrages en quelques chiffres... (suite)

- L'extension totale de leurs réservoirs couvre approximativement un territoire de **400 000 km²** dont **8500 km²** pour le plus grand d'entre eux (Réservoir Volta, barrage Akosombo, Ghana).
- L'investissement mondial est de l'ordre de **30 milliards d'euros par an**.
- 10 000 barrages ont pour vocation l'hydroélectricité ; 3000 GWH sont produits soit **20% de la production électrique mondiale**.



*Lac Volta couvrant à lui seul
4% du territoire du Ghana*

1.2) Où sont situés préférentiellement les barrages ?

$$W(\text{kW}) = 8 Q (\text{m}^3/\text{s}) * H(\text{m})$$

*Puissance
hydroélectrique
d'un barrage*

Pour maximiser W , deux possibilités sont préférentiellement offertes par le milieu :

- H élevée : zones de montagne
- Q élevé : grands fleuves, situés dans des zones où les précipitations sont abondantes

Zones de montagne...

Les zones de montagne offrent de **fortes dénivellations** et des **précipitations abondantes** forcées par le relief (pluies orographiques)



Conduite forcée amenant l'eau du réservoir à l'usine hydroélectrique



*Barrage de la Grande Dixence (Suisse)
285 m de hauteur*

Distribution spatiale des barrages et réservoirs des Alpes françaises :

La majeure partie d'entre eux est située dans la zone où les débits spécifiques dépassent 30 l/s.km^2 .

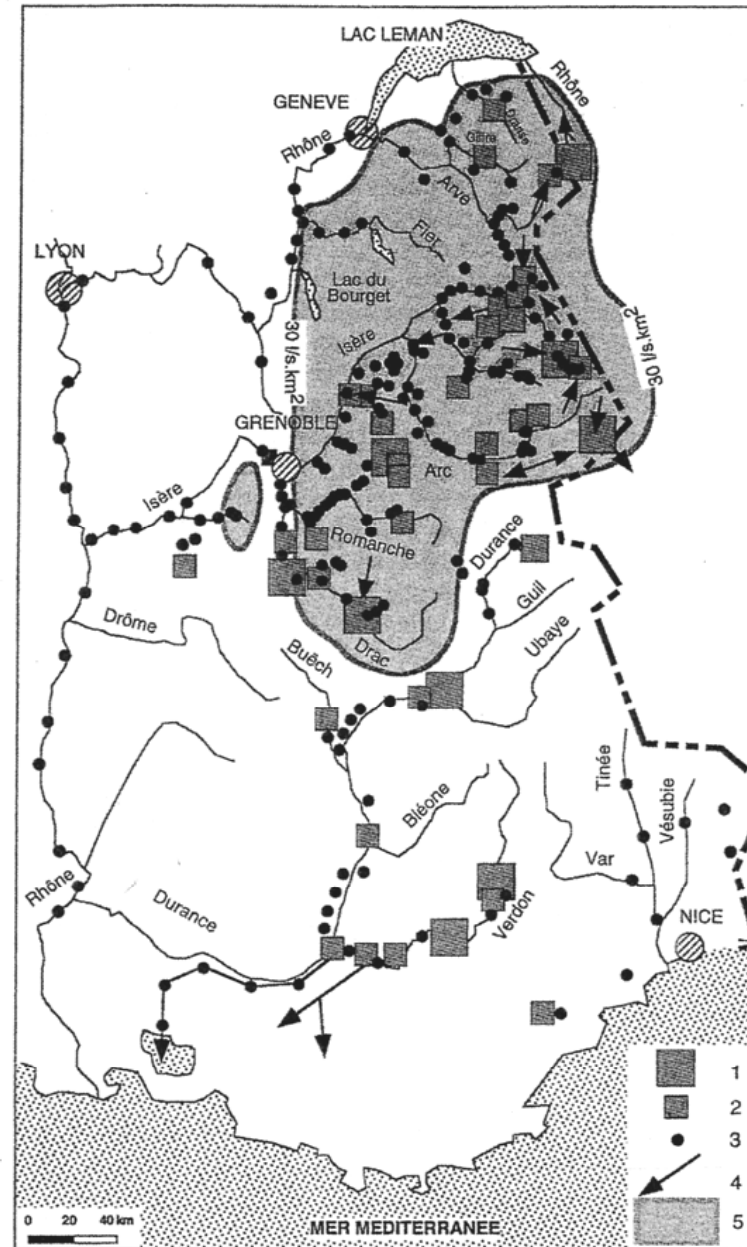
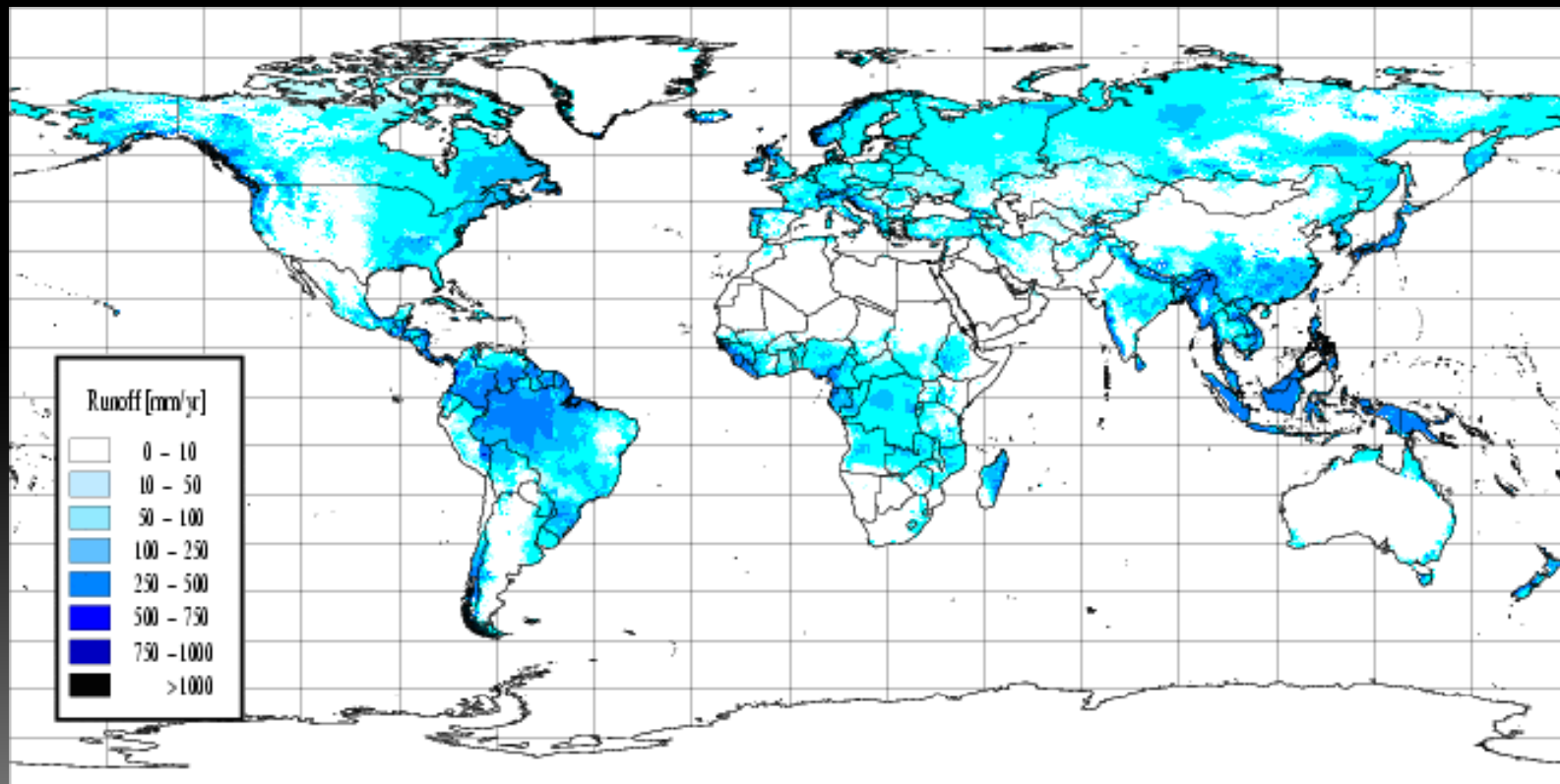


Fig. 2 : Distribution des principaux aménagements hydroélectriques dans le Alpes françaises (d'après EDOUARD et VIVIAN, 1984 ; VIVIAN, 1989, complété)
1 ; Réservoir ($\geq 100 \text{ Hm}^3$) ; 2 : Réservoir ($< 100 \text{ Hm}^3$) ; 3 : Usine hydroélectrique ($> 4500 \text{ kW}$) ; 4 : Transfert interbassin ; 5 : Zone d'écoulement $\geq 30 \text{ l/s.km}^2$

Lorsque le relief n'est pas au rendez-vous, c'est **le débit des écoulements** qui est le facteur premier de l'implantation des barrages :

- dans les **vallées des grands fleuves de la zone tempérée** ;
- dans les zones fortement arrosées du globe (**zone tropicale humide**) ou à faible évaporation (**zone des hautes latitudes**)



Carte mondiale des écoulements

Zones où les écoulements sont abondants...

*Localisation préférentielle des grands réservoirs dans le monde
(volume > 500 hm³)*

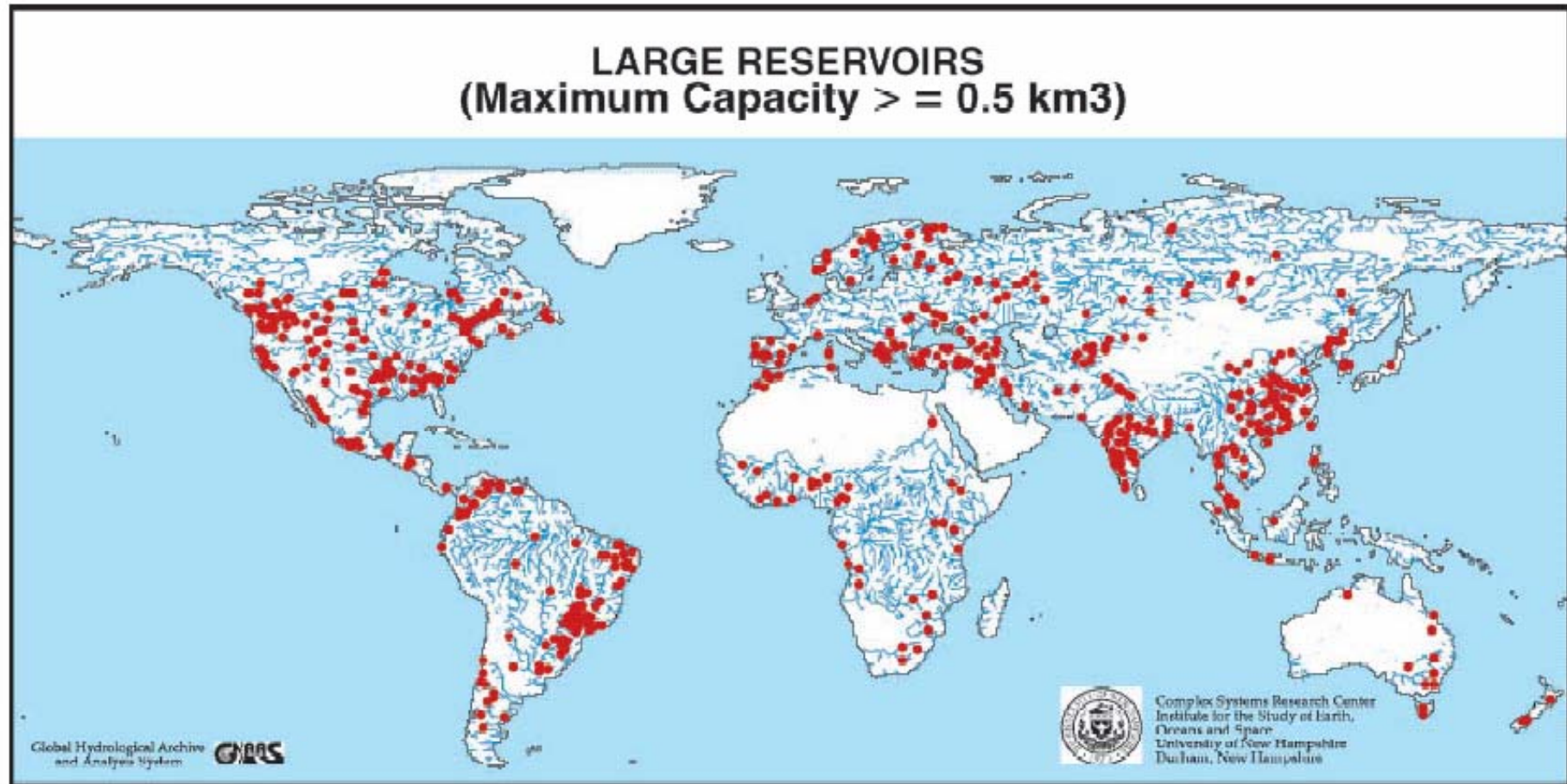


Fig. 1. Geographical distribution of the 633 large reservoirs (LRs) used in this study. Each LR has a maximum storage capacity of 0.5 km^3 or greater. The remaining smaller registered reservoirs (SRs) ($n \approx 44,700$) are also considered, but using a nonspatial statistical approach.

Barrages de grands bassins fluviaux



Barrage des Trois Gorges (Chine)



Barrage d'Inanda (Afrique du Sud)

1.3) Les principaux types de barrage...

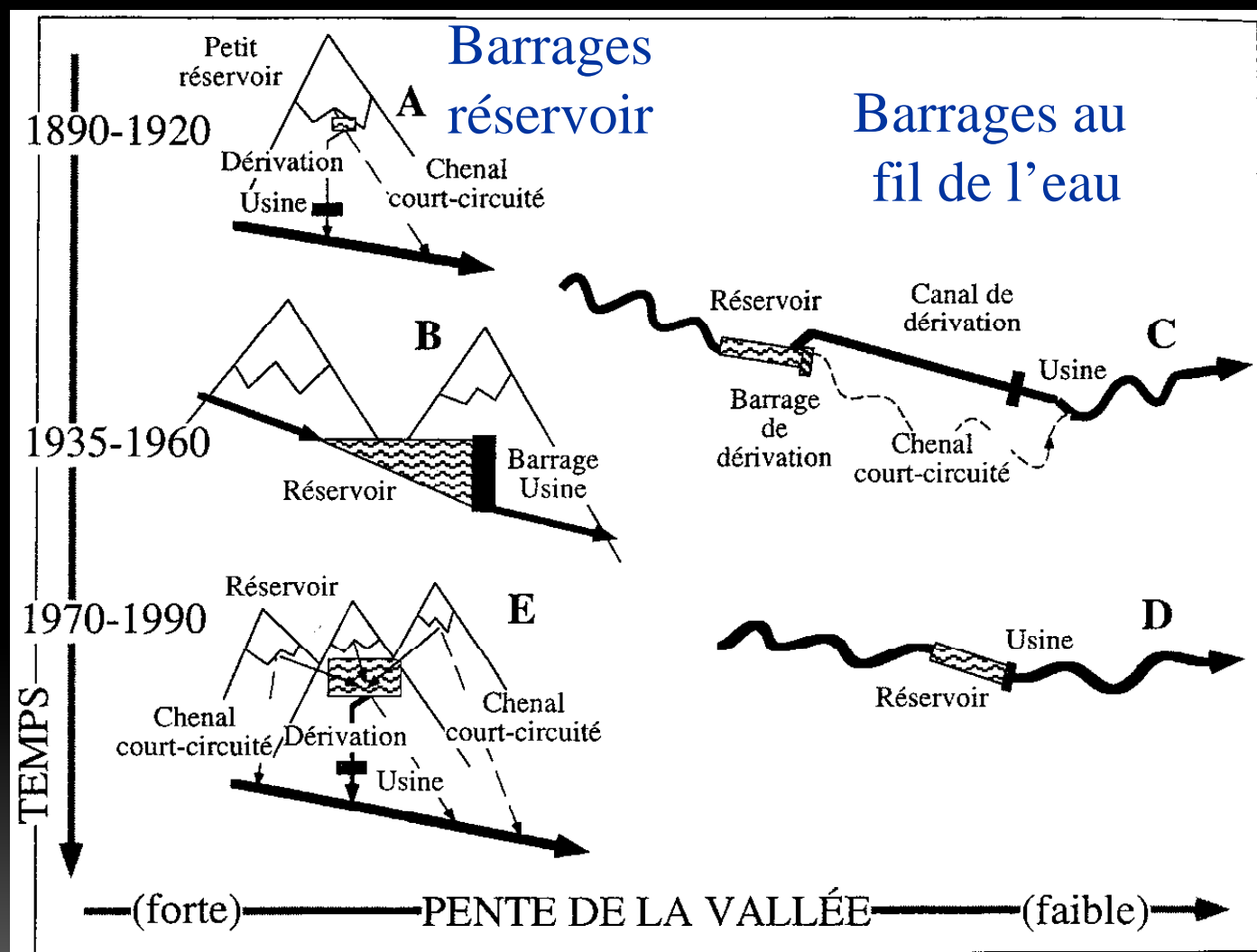


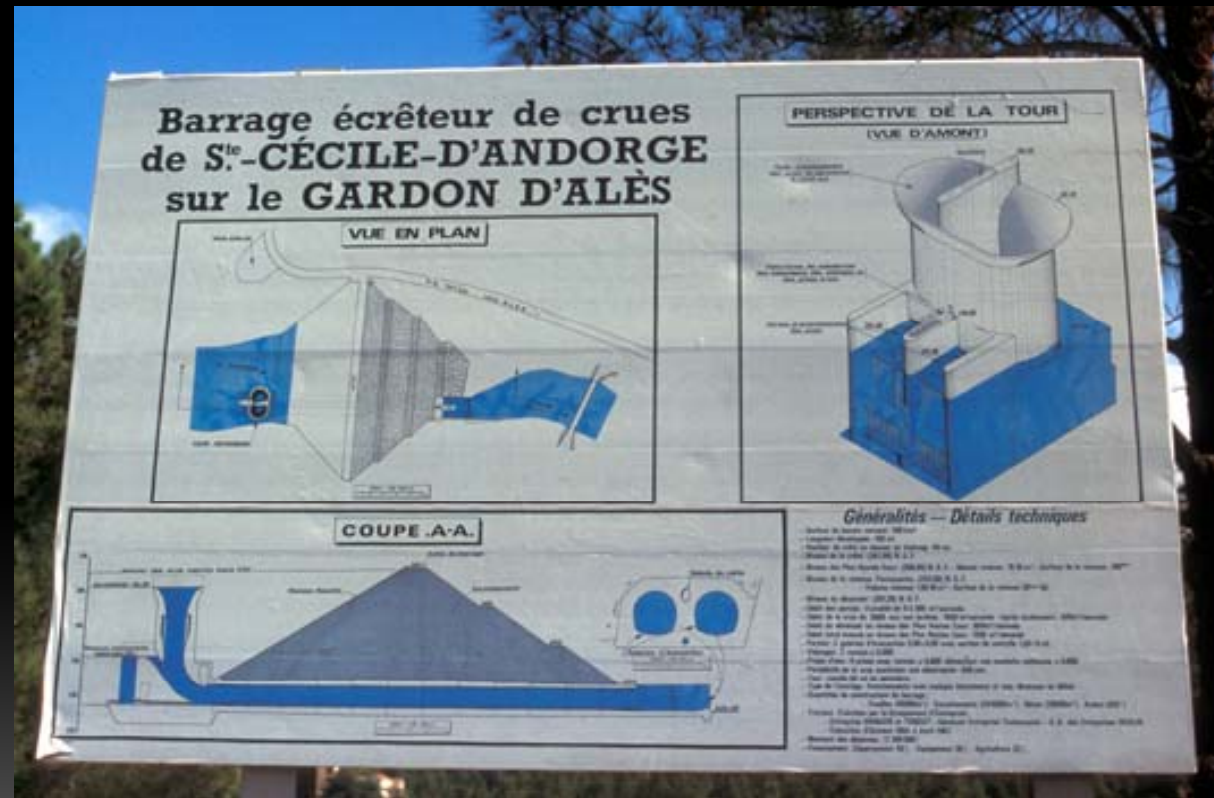
Fig. 1 : Typologie simplifiée des aménagements hydroélectriques alpins depuis le début du XX^e siècle (source : Peiry et al., 1997, modifié)

1.4) La vocation des barrages...

Production d'énergie électrique

Actuellement, la production mondiale d'énergie électrique est chaque année d'environ 14 500 milliards de kWh dont 18 % par les ressources hydrauliques

Lutte contre les crues et les inondations
(stockage d'eau en période hydrologique critique)



Soutien des étiages (basses eaux exceptionnelles)



Irrigation dans la vallée
du Nil près de Louxor



Stockage agricole
Lac Nasser sur le Nil en amont
du barrage d'Assouan

Stockage d'eau pour l'industrie ou l'eau potable

Récréation (bases de loisir nautique)



Ecluses du barrages des 3 gorges

Amélioration de la navigation fluviale

- Régulation des niveaux d'eau dans la retenue.
- Ecluses permettant le franchissement du barrage par la navigation fluviale.

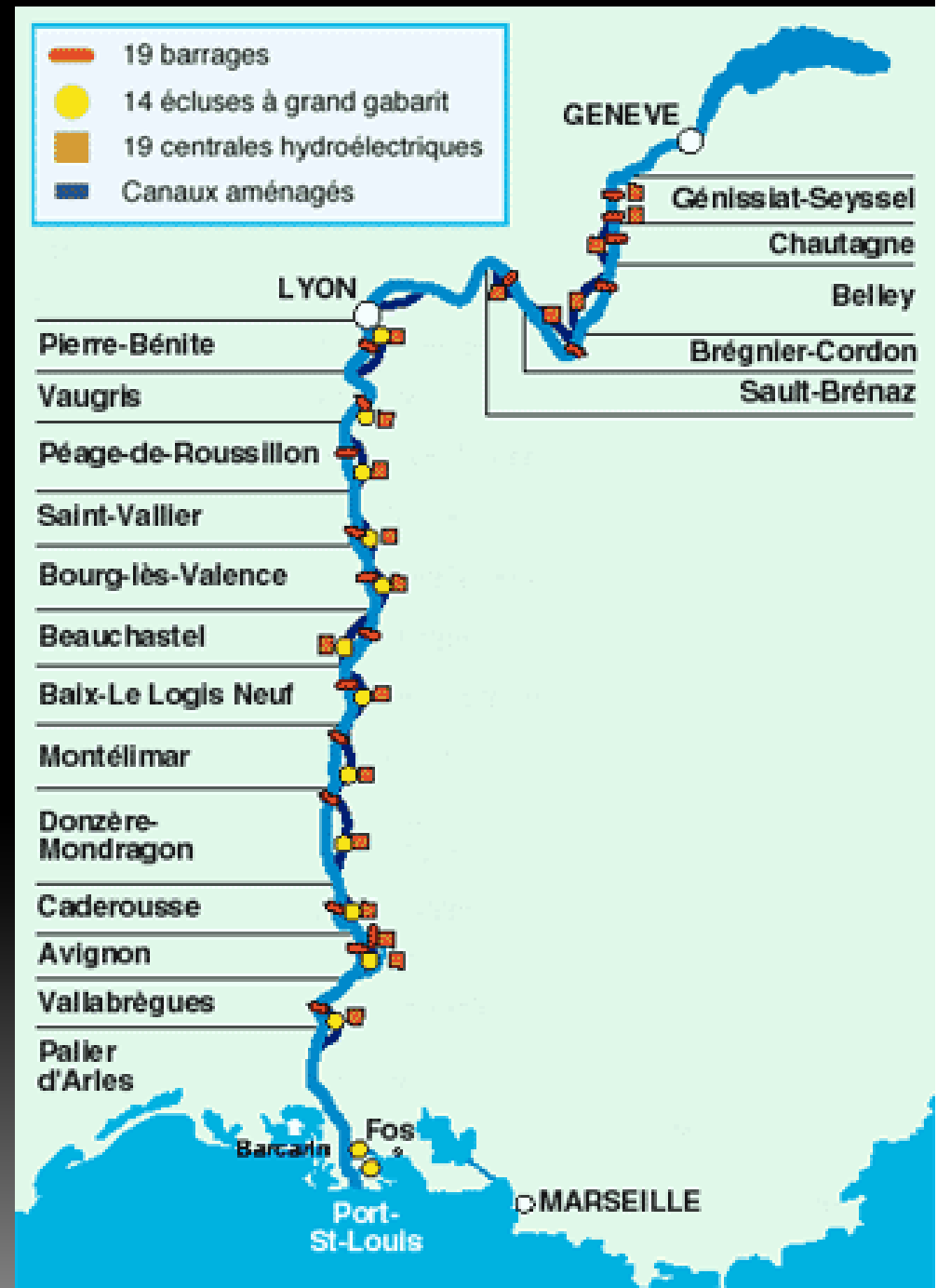
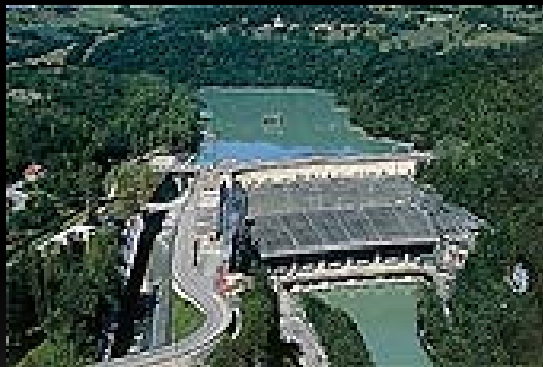


Contraintes des variations de niveau du fleuve pour la navigation (Yangtze)

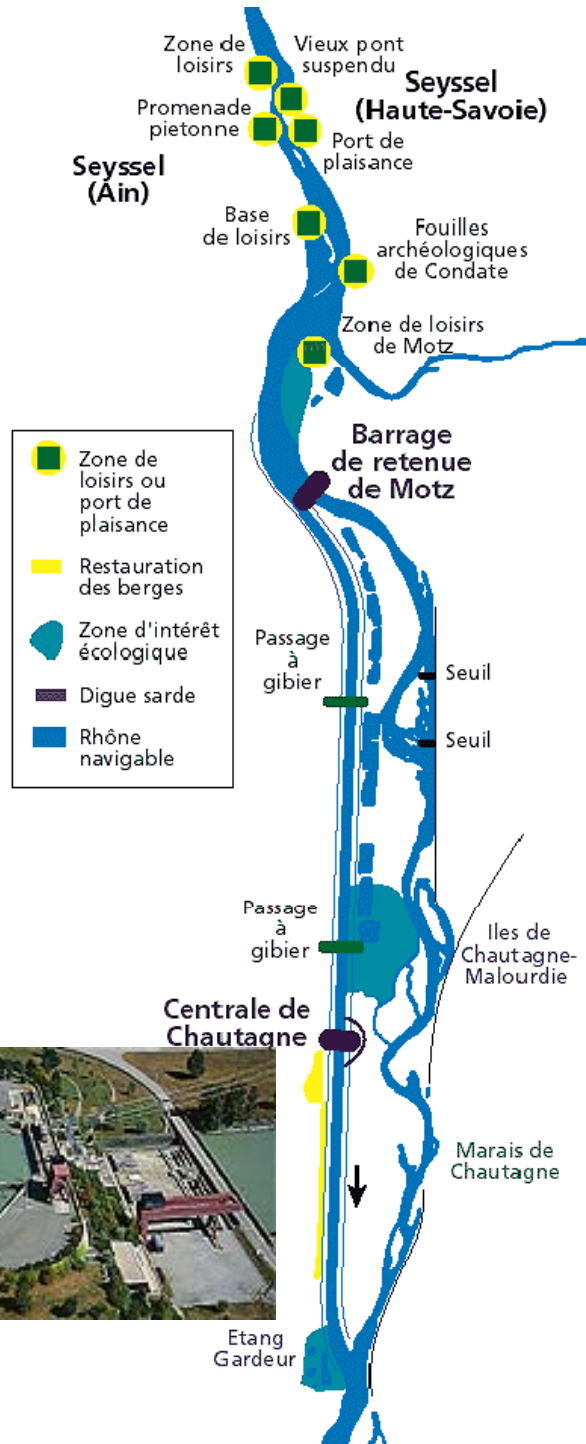


Lower Granite Lock & Dam

Un exemple de vocation multiple : l'aménagement du Rhône



Aménagements types du Haut-Rhône



Source : CNR



2) Les barrages, facteur de risque technologique

2.1) Principales catastrophes imputables à des ruptures ou submersions

• Argentine	(1970 4-1),	100 morts	Mendoza
• Brésil	(1960 28-3),	1000 morts	L'Oros
• Chine	(1993 27-8)	+240 morts	province de Qinghai
• Colombie	(1972 25-2)	60 morts	Foledon
• Corée du Sud	(1962 28-10)	163 morts	Sunchon
• Espagne	(1802)	608 morts	
	(1959 9-1)	144 morts	Wega de Fera
• Etats-Unis	(1874 16-5)	144 morts	Williamstown (Massachussetts)
	(1889 31-5)	2204 morts	Johnstown (Pennsylvania)
	(1928 13-3)	~700 morts	Saint Francis (California)
	(1972 26-2)	+450 morts	Logan (Virginia)
	(1976 7-6)	140 morts	Teton (Idaho)
• France	(1895 27-4)	87 morts	Bouzey (Vosges)
	(1959 2-12)	423 morts	Malpasset (Var)
• Angleterre	(1864 12-3)	250 morts	Sheffield
• Inde	(1979 11-8)	~30000 morts	Machhu
• Indonésie	(1967 27-11)	160 morts	Kebumen
	(2009 27-03)	> 100 morts	Tangerang (Jakarta)
• Italie	(1923 1-12)	600 morts	Gléno
	(1963 9-10)	2118 morts	Vaiont
	(1985 19-7)	264 morts	Tesero
• Ukraine	(1961 13-3)	145 morts	Kiev

Probabilité de rupture de barrage sur 16 000 ouvrages (Chine exclue) : 1 rupture par an



***Catastrophe de Malpasset,
Fréjus, France, 2 décembre 1959
423 victimes***

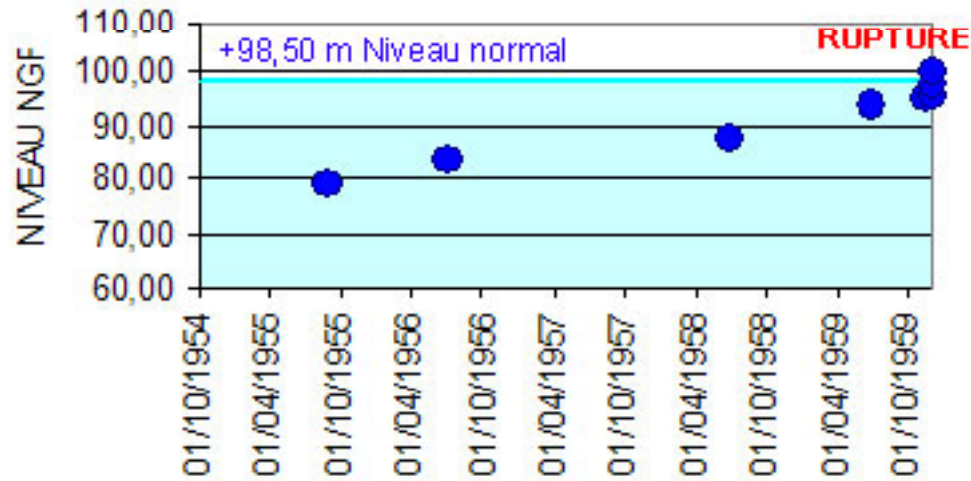
Hauteur de l'ouvrage : 66 m

Vue de la retenue pleine
avant la rupture

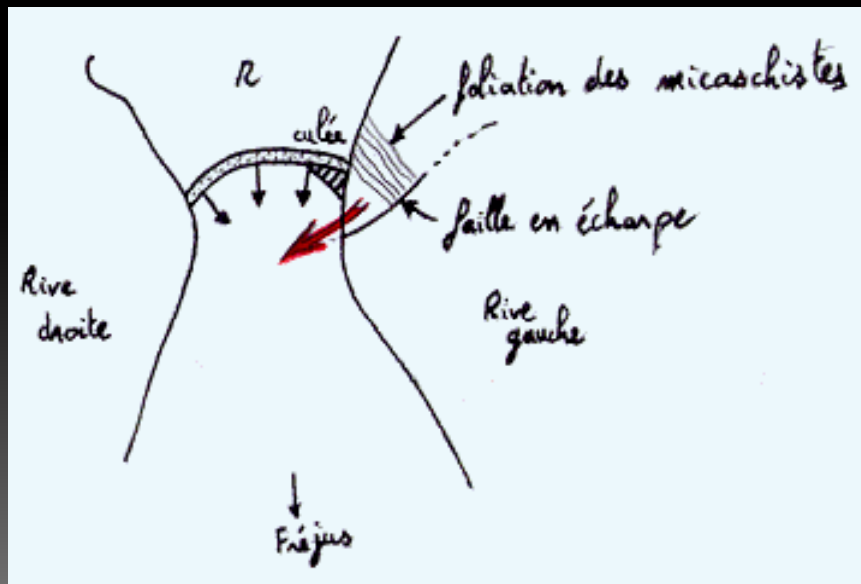


**Volume de la retenue :
50 millions de m³**

COTES DE REMPLISSAGE

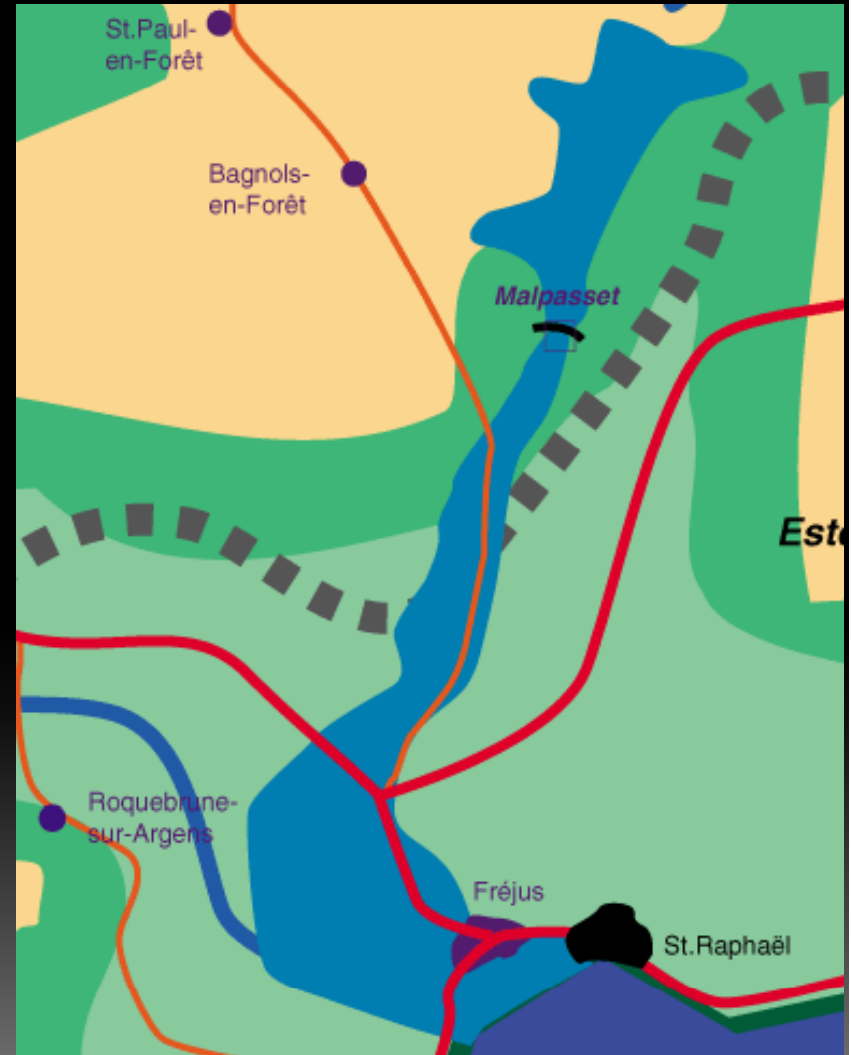


Evolution du remplissage avant rupture



Causes géologiques de la rupture

Malpasset (suite)



Zone dévastée par l'onde de crue

Malpasset (suite)



Vue aval après la rupture





Vues des dégâts occasionnés à la ville de Fréjus par l'onde de crue





Catastrophe de Situ Gintung, 27 mars 2009, banlieue de Jakarta

2 h du matin, 103 victimes



10 m de haut, 70 M m³ eau ;
Vieux d'un siècle
Débordement puis rupture



CRACKS HAD ALREADY BEEN DISCOVERED AT THE BOTTOM OF THE EMBANKMENT LAST FEBRUARY 2008. THE ADMINISTRATION HAD SINCE PREPARED EVACUATION ROUTES IN CASE OF FLOODING AND ALSO HELD A FLOOD EVACUATION SIMULATION EXERCISE LAST YEAR. IT WAS ALSO STATED THAT THE INCIDENTS OF SITU GINTUNG WAS PROBABLY DUE TO LACK OF ROUTINE INSPECTIONS. THEREFORE, THE GOVERNOR OF JAKARTA CALLED FOR IMMEDIATE INSPECTIONS FOR ALL 26 DAMS IN THE CAPITAL.

Vague de 3 m de haut



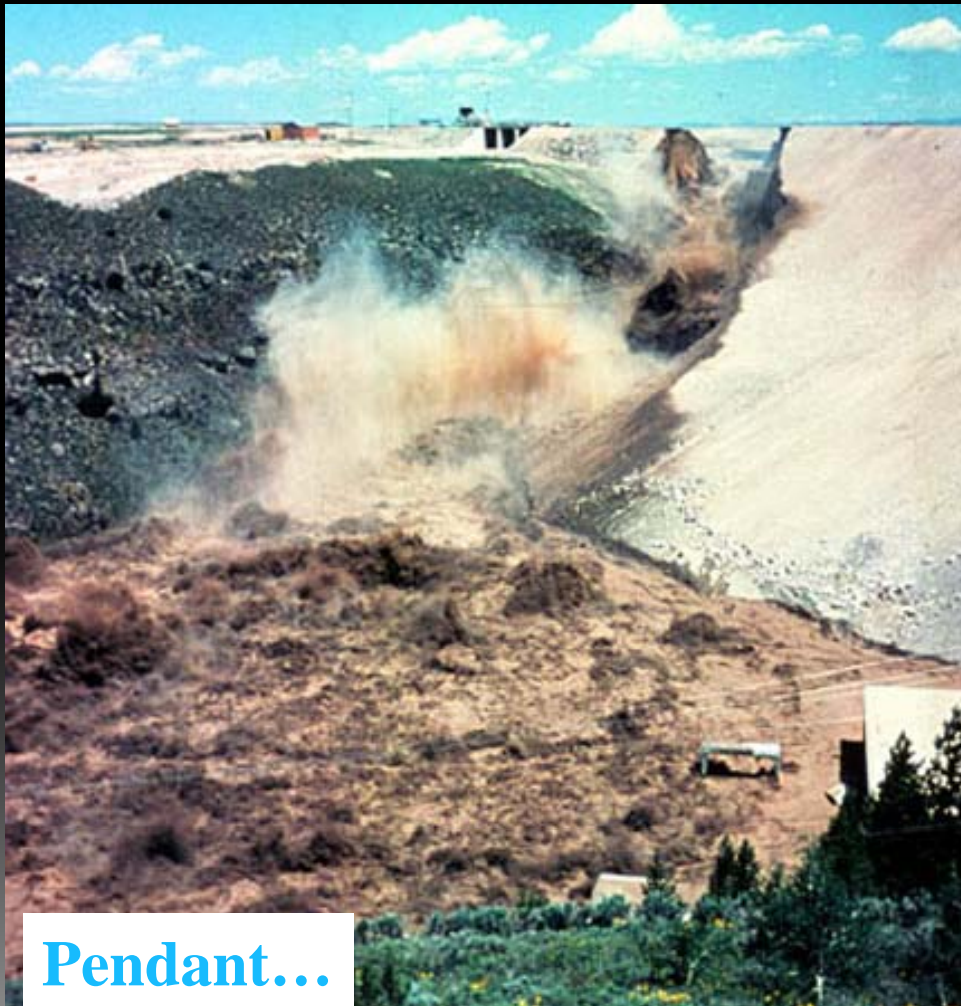


Rupture du barrage de Johnstown, 1889

Le 31 mai 1889, Johnstown en Pennsylvanie fut dévasté par le plus grave déluge de l'histoire des Etats-Unis (>2200 morts). A une vingtaine de kilomètres en amont d'une rivière, un lac de 5 km de long – 140 m plus haut que la ville - était retenu par un vieux barrage très mal entretenu. A 16h07, les habitants entendirent un grondement sourd. Ils surent immédiatement que c'était le barrage qui venait de céder après une nuit d'averses continues. Vingt millions de tonnes d'eau déferlèrent dans la vallée étroite, emportant d'énormes débris ; la vague atteignit la hauteur de 18 m et la vitesse de 65 km/h, rasant tout sur son passage.

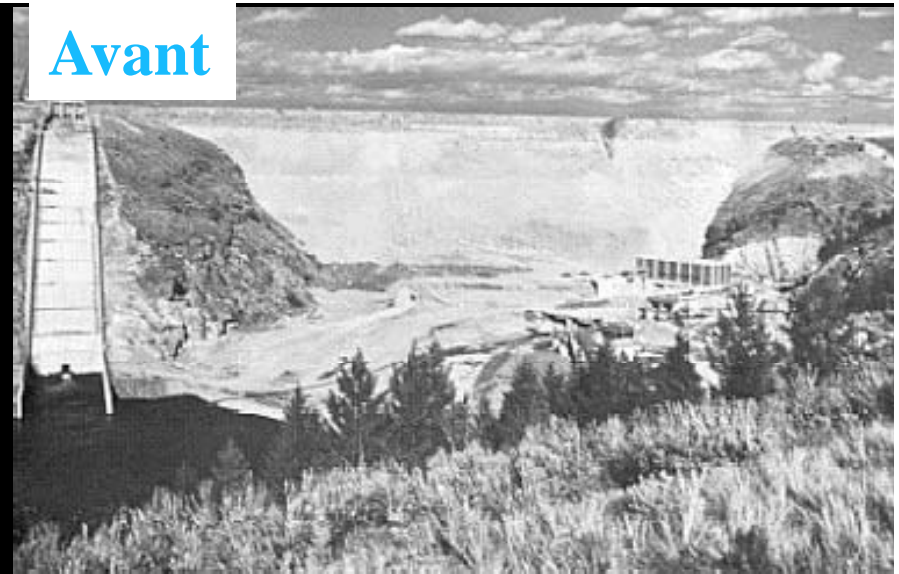
Rupture du barrage du Grand Teton

Près de Rexburg, Idaho, le samedi 5 juin 1976. D'une hauteur de 120 mètres, c'est le plus haut barrage ayant subi une rupture. Elle entraîna le décès de 140 personnes et causa plus d'un milliard de \$ de dégâts.



Pendant...

Avant



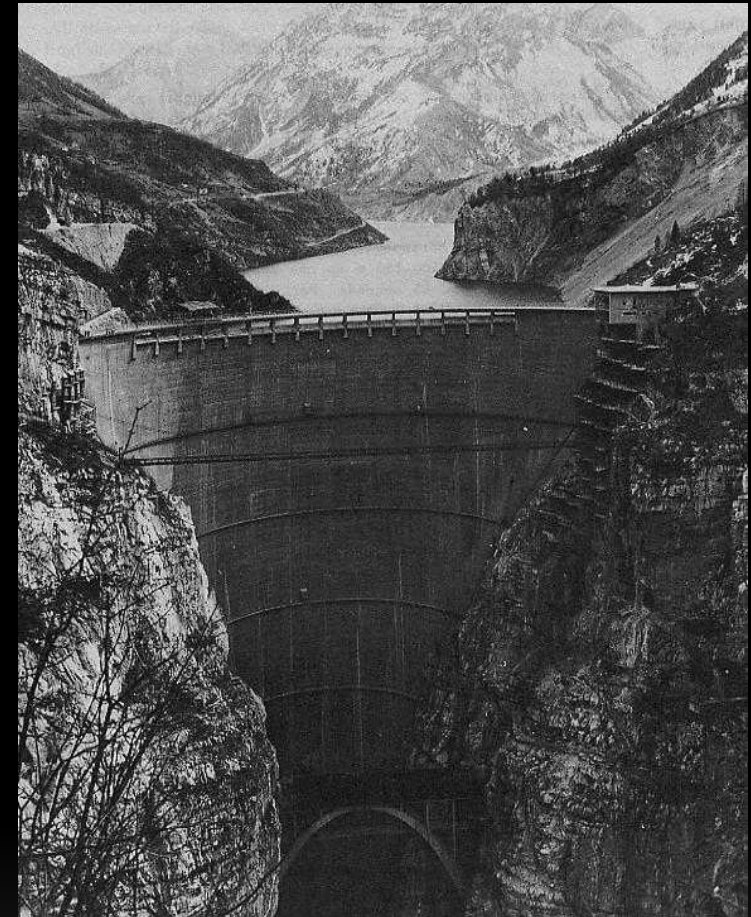
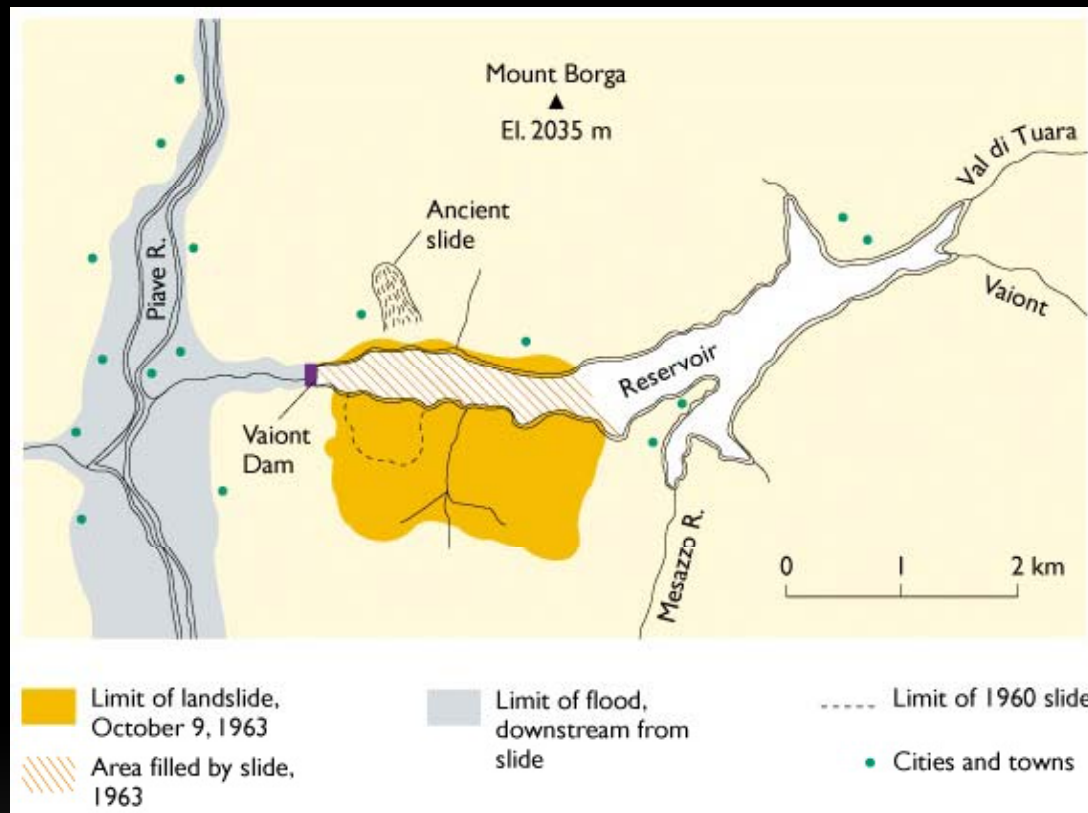
Après



Catastrophe de Vaiont en 1963 (SE Alpes, Italie)



Catastrophe de Vaiont

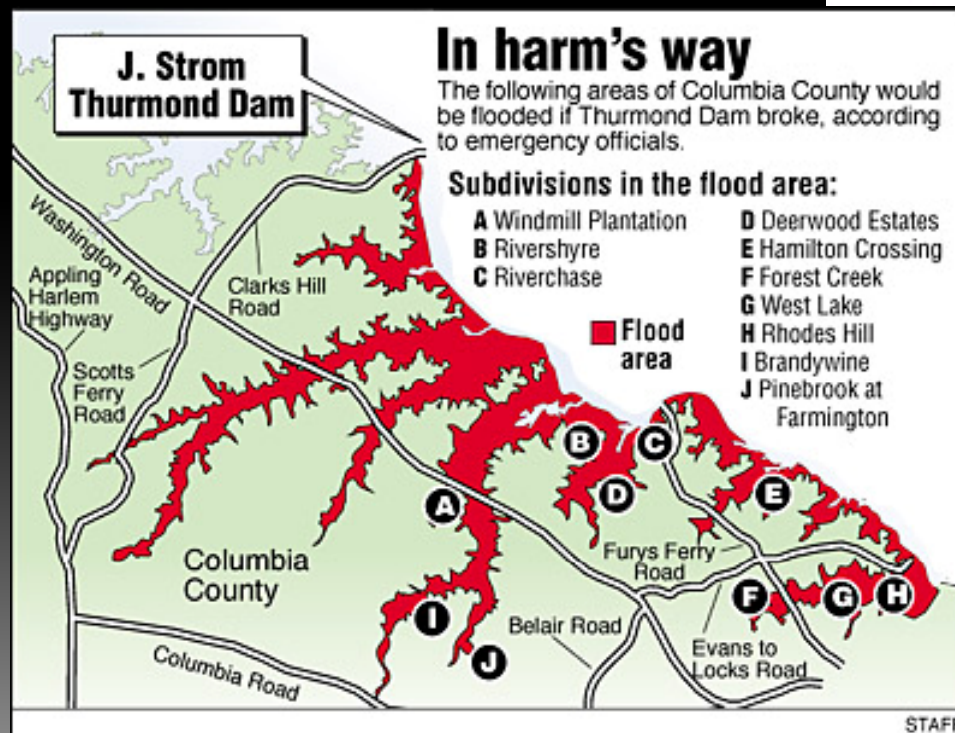
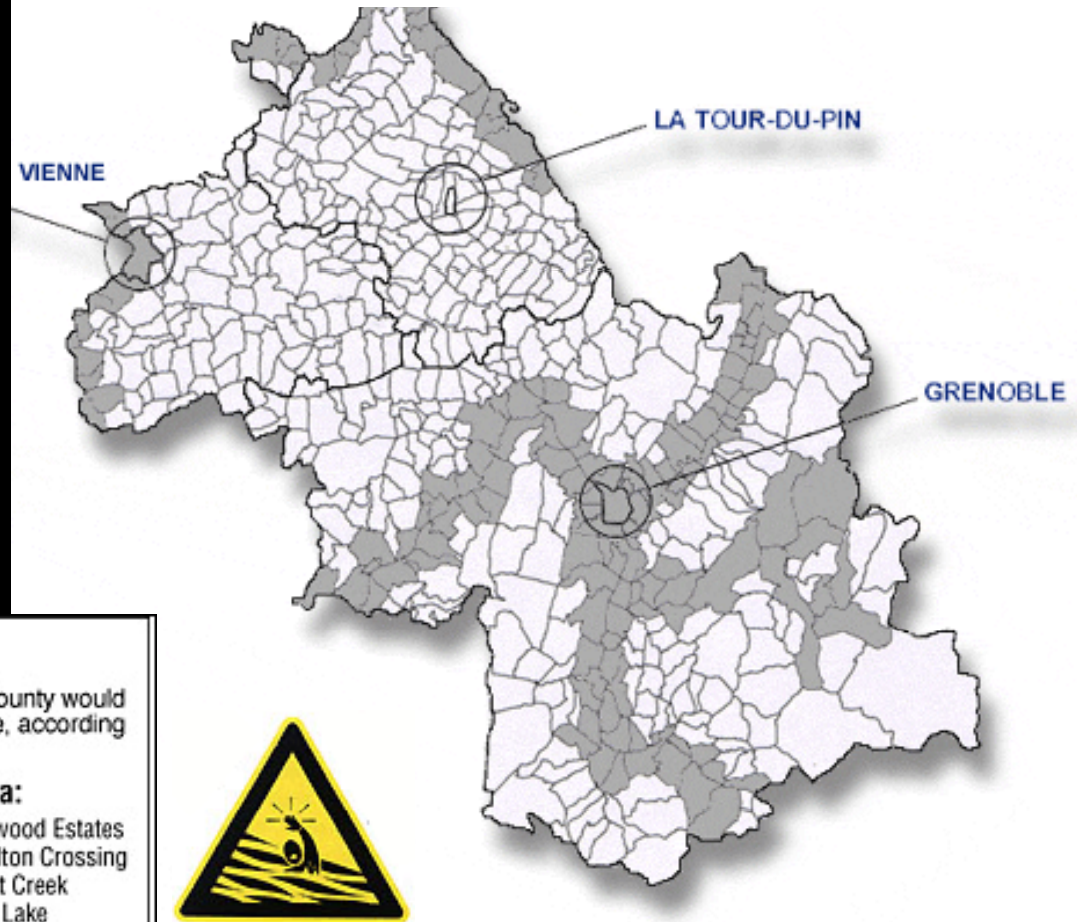


En 1963, pendant le remplissage du barrage, une coulée d'environ **270 millions de m³ de terre** se détacha du flanc de montagne vers le lac à la vitesse approximative de **110 km/h**. L'arrivée de cette masse de terre dans le réservoir causa la formation d'une vague de plus de **250 m** qui passa au-dessus du barrage et se déversa sur la vallée en causant la mort de plus de **2000 personnes**. Le barrage résista remarquablement aux flots et aucune rupture de fut enregistrée.

Cartographie des zones à risque

2.2) La prévention des risques de rupture

- Auscultation, surveillance et entretien des barrages
- Localisation des zones à risques
- Mesures de prévention et d'alerte



Communes sous la menace de ruptures de barrage en Isère

Zones menacées en cas de rupture du barrage Thurmond (USA)



3) Les impacts des barrages et réservoirs

Les **impacts** sont **variés et** s'organisent selon des liens d'interdépendance **complexes** :

- 1) Ils touchent la **composante physique et chimique** de l'environnement
- 2) Ils touchent la **composante biologique** de l'environnement...
- 3) Ils affectent aussi les **populations humaines** qui bordent l'aménagement

Les impacts sont fortement dépendants du type de réservoir, de ses vocations et de son mode de gestion

Les impacts se font sentir à **toutes les étapes de la vie du barrage**



Phase de construction

Période de mise en eau

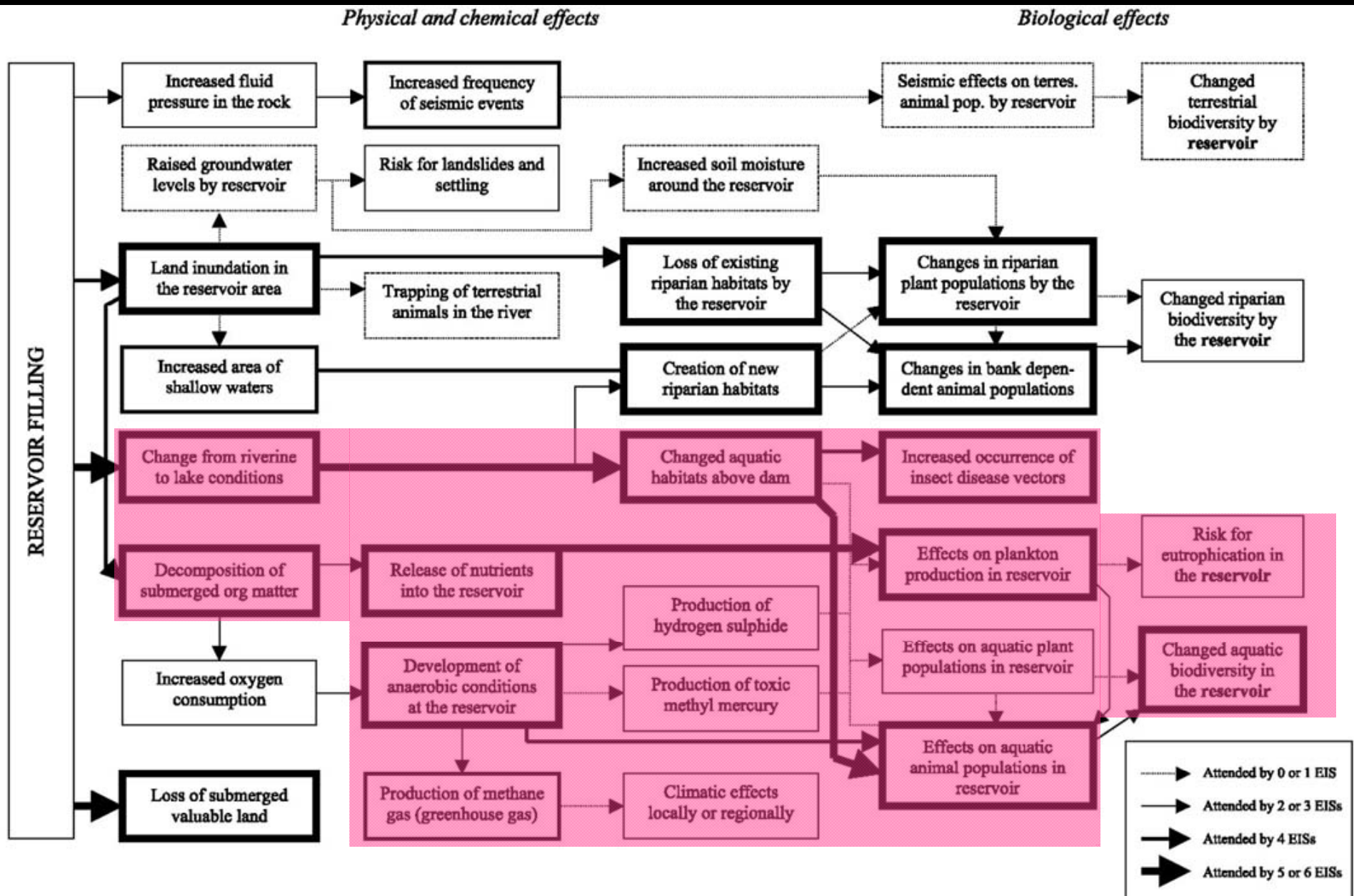
Phase d'exploitation

=> Impacts inhérents au blocage des flux (aval)

=> Impacts inhérents au remplissage des barrages (amont)



3.1) Impacts liés aux changements des niveaux d'eau lors du remplissage du réservoir (impacts amont)



Effets de la dégradation de la matière organique dans la retenue des barrages tropicaux sur les émissions de gaz à effet de serre : l'exemple de Petit Saut (Guyane française)



Barrage de Petit-Saut (Rivière : SINAMARY, Guyane)



Surface du bassin versant : 5 927,00 km²

Volume de la retenue (à RN) : 3 500,00 hm³

Débit d'évacuation des crues : 3 220 m³/s

Evacuation des crues : seuil déversant avec un coursier en escalier + 3 pertuis de fond + vanne segment de surface

Surface de la retenue (à RN) : 310,00 km²

Débit de prise : 440 m³/s

Débit de vidange : 2 800 m³/s





Pour des raisons d'économie, la forêt primaire n'est pas coupée avant la mise en eau. Toute cette matière organique submergée produit la **désoxygénation de l'eau** du réservoir et le relargage massifs dans l'atmosphère **de gaz à effet de serre (CO₂ et CH₄)**, tant au dessus de la retenue que lors de la phase de turbinage.



Bilan mondial des émissions de gaz à effet de serre :

D'après des recherches canadiennes récentes, les réservoirs mondiaux émettent :

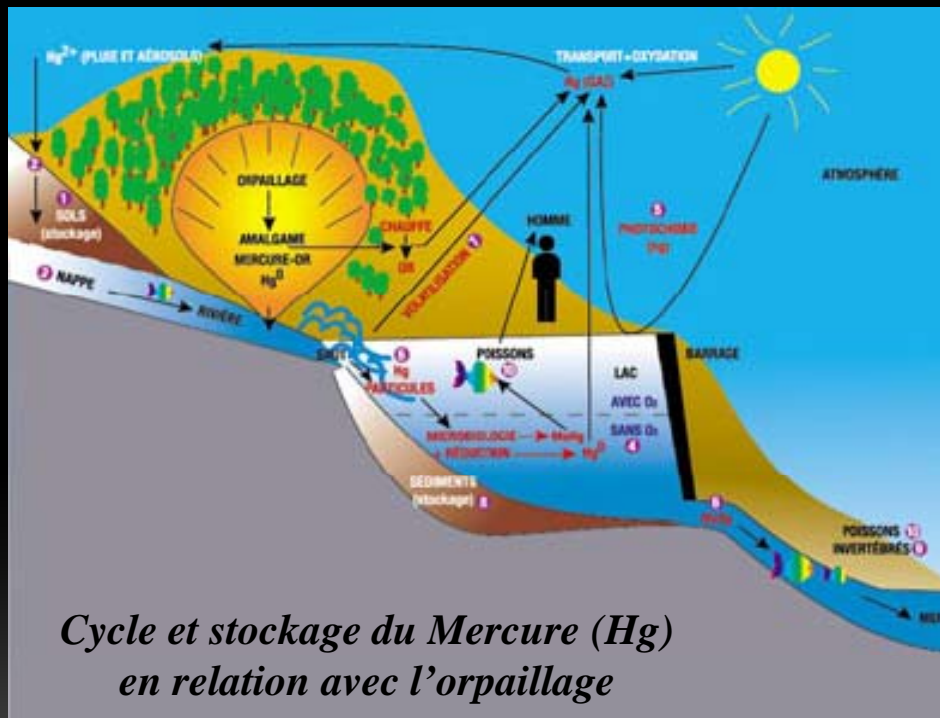
- **70 M tonnes/an** de CH₄ (méthane) ;
- **1000 M tonnes/an** de CO₂ ;

Ces chiffres correspondent à :

- **4%** des émissions totales d'origine humaine ;
- Pour le seul méthane, **20%** des émissions d'origine humaine

Accumulation de polluants (pesticides, métaux lourds...) dans les réservoirs

Ex. Accumulations de mercure (Hg) dans les sédiments des réservoirs situés en aval des zones de production au



Cycle et stockage du Mercure (Hg) en relation avec l'orpillage

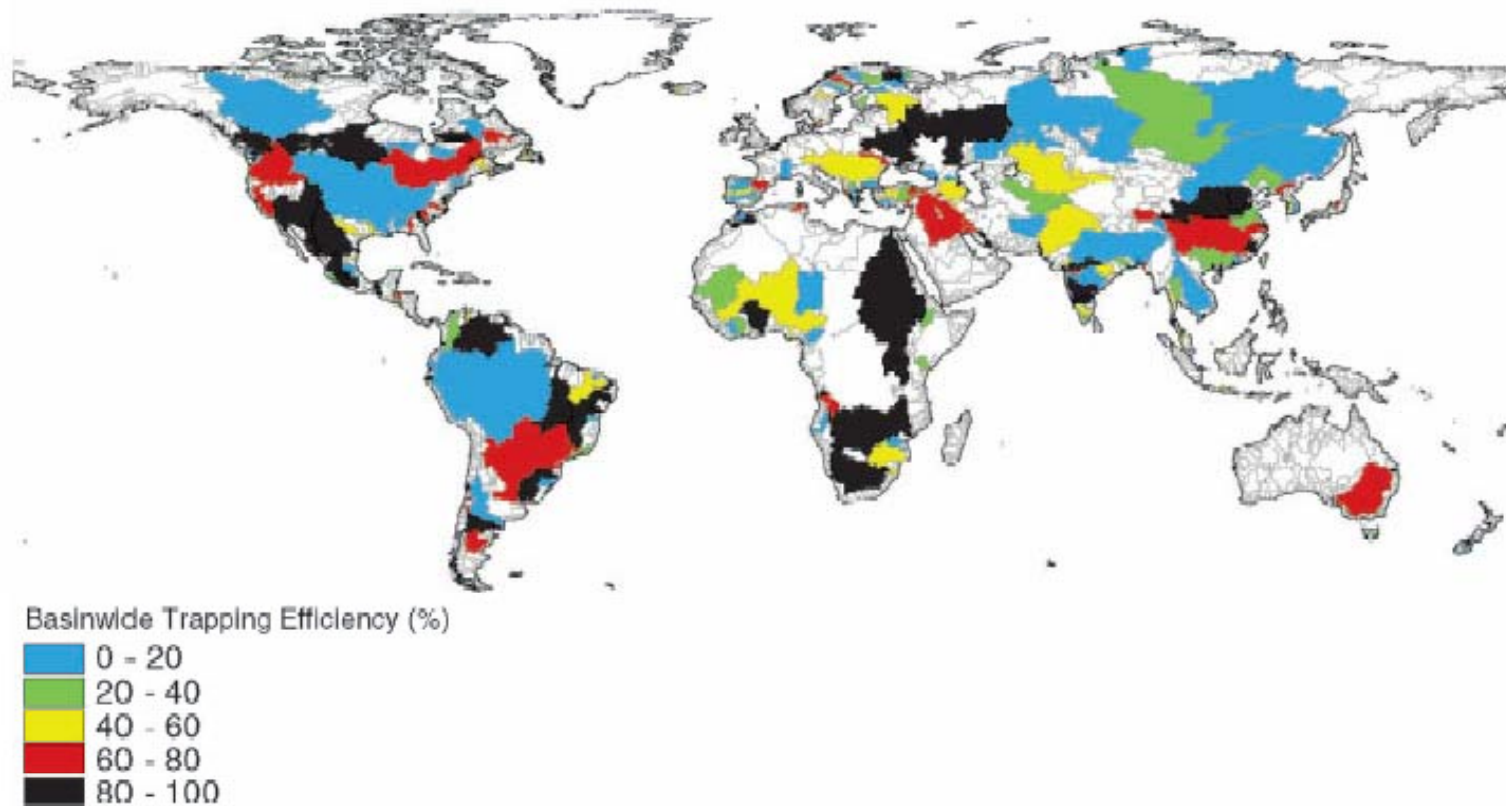


Site d'orpillage

En Guyane française, les chiffres officiels font état du rejet de 230 tonnes entre 1857 et 1992, sur la base de 1,3 kg de Hg pour 1 kg d'or produit ; toutefois, ces données traduisent une forte sous-estimation des rejets, étant donné l'importance des activités clandestines dans ce domaine...

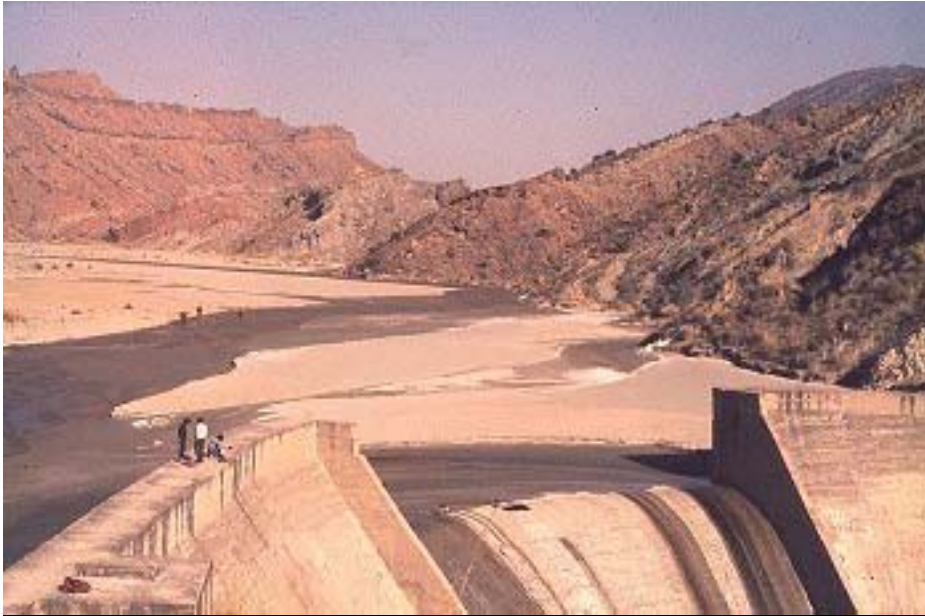
Effet des barrages sur les flux sédimentaires : un piégeage généralisé des matières minérales (MES)

Basinwide Sediment Trapping Efficiency Due to Large Reservoirs



C.J. Vorismarty et al. / Global and Planetary Change 39 (2003) 169-199

Fig. 5. The global geography of basinwide trapping of suspended sediment flux by the large reservoirs analyzed in this study. A total of 236 regulated basins with 633 LRs constitutes our subsample of reservoirs, which collectively represent about 70% of registered impoundment storage volume (i.e., ICOLD, 1984, 1988, 1998). Basin boundaries are at 30' (longitude \times latitude) spatial resolution. For the purposes of display, the basins include both discharging and nondischarging portions of the land mass (Vorismarty et al., 2000b,c), although all numerical calculations represent discharge weighting and corrections for non-flowing areas.



Accumulation sédimentaire dans un réservoir himalayen

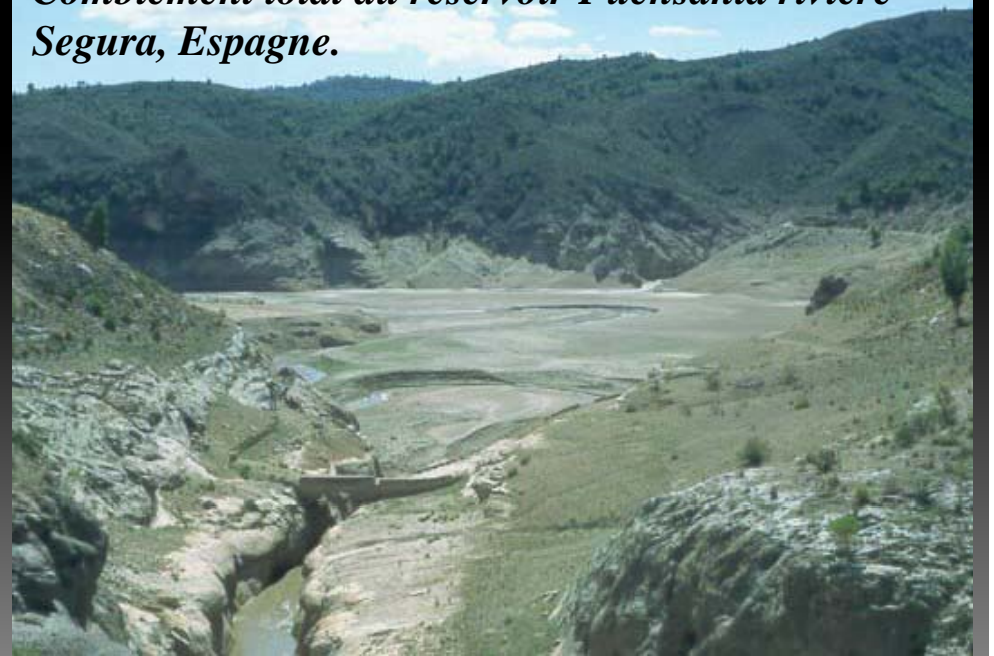


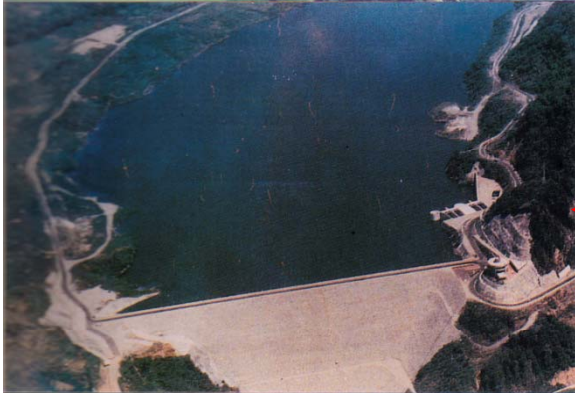
Comblement du barrage de Wingly



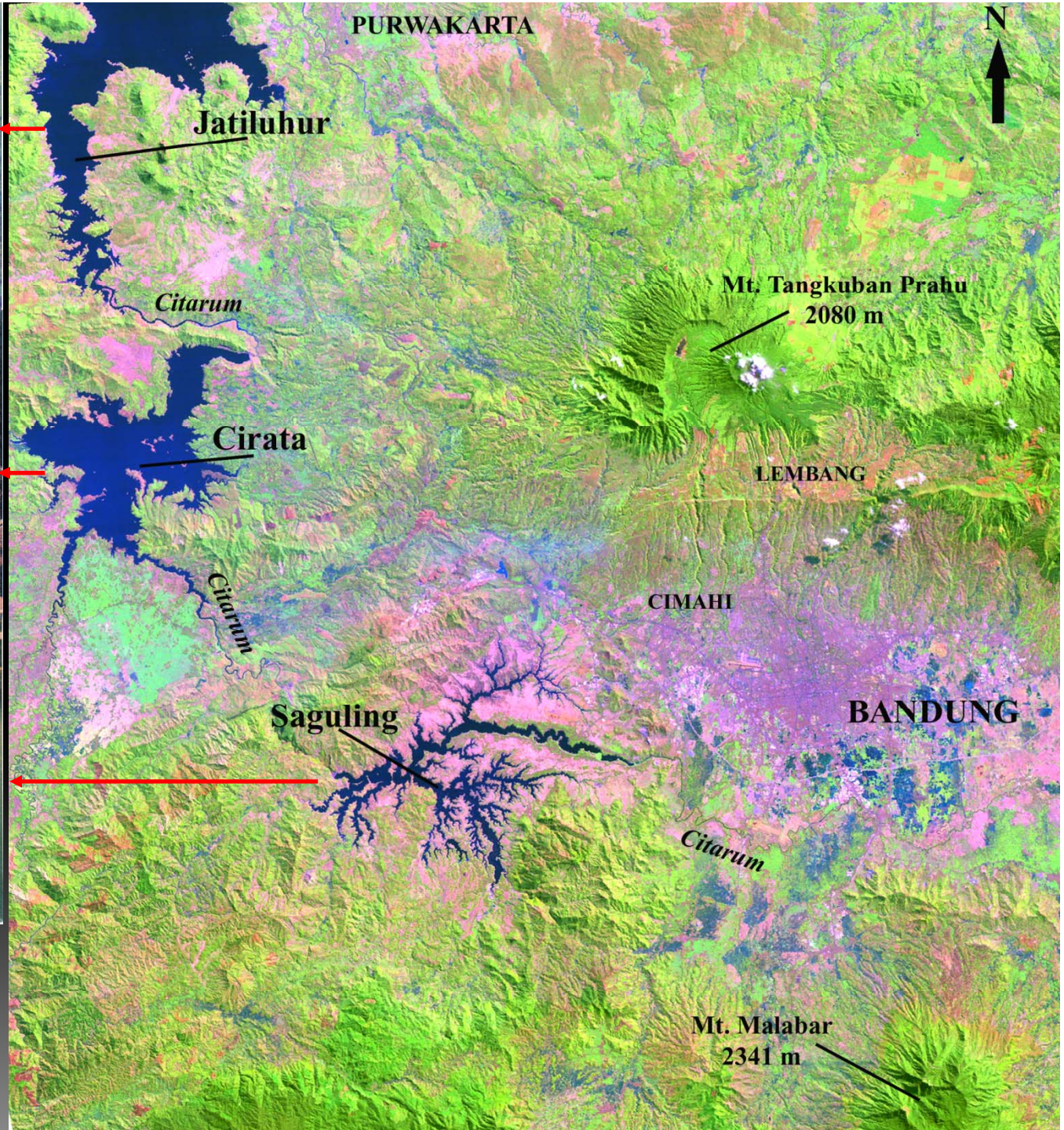
Comblement du barrage de Sengguruh (Java)

Comblement total du réservoir Fuensanta rivière Segura, Espagne.

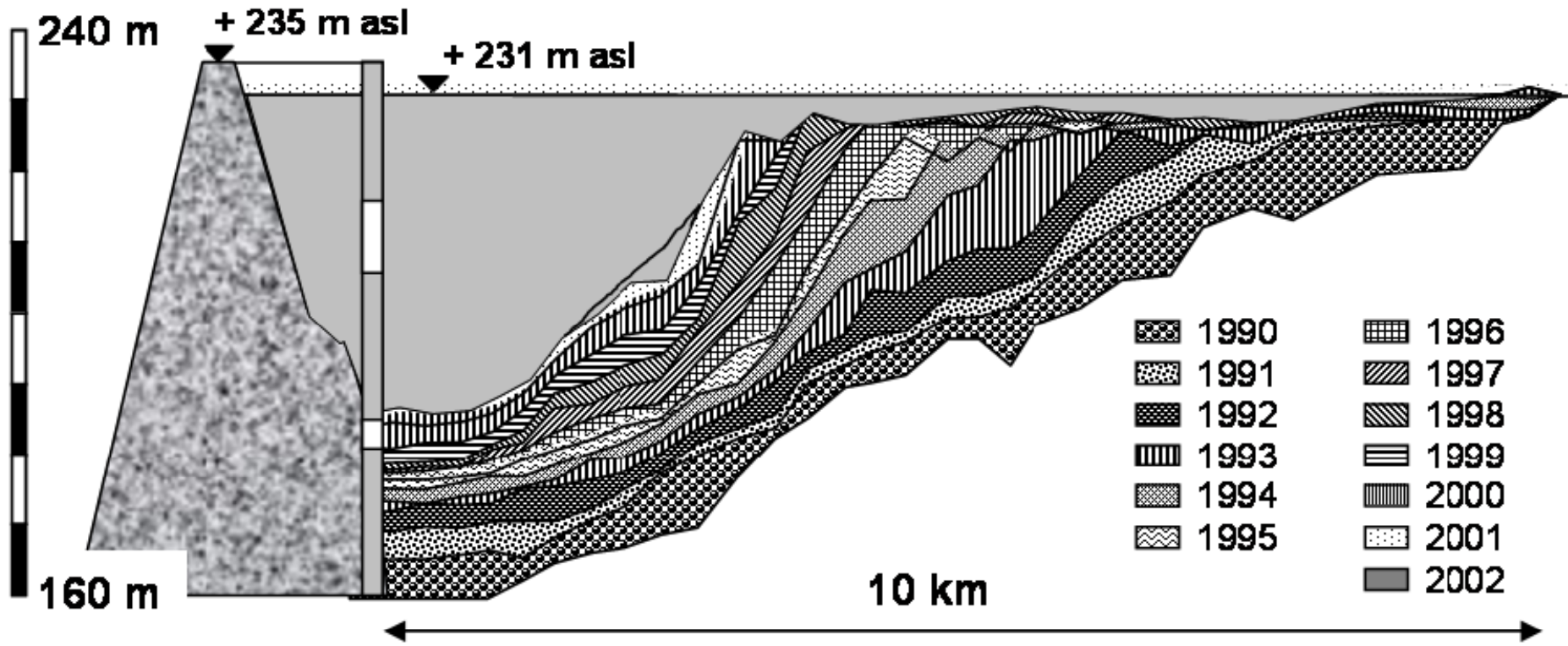




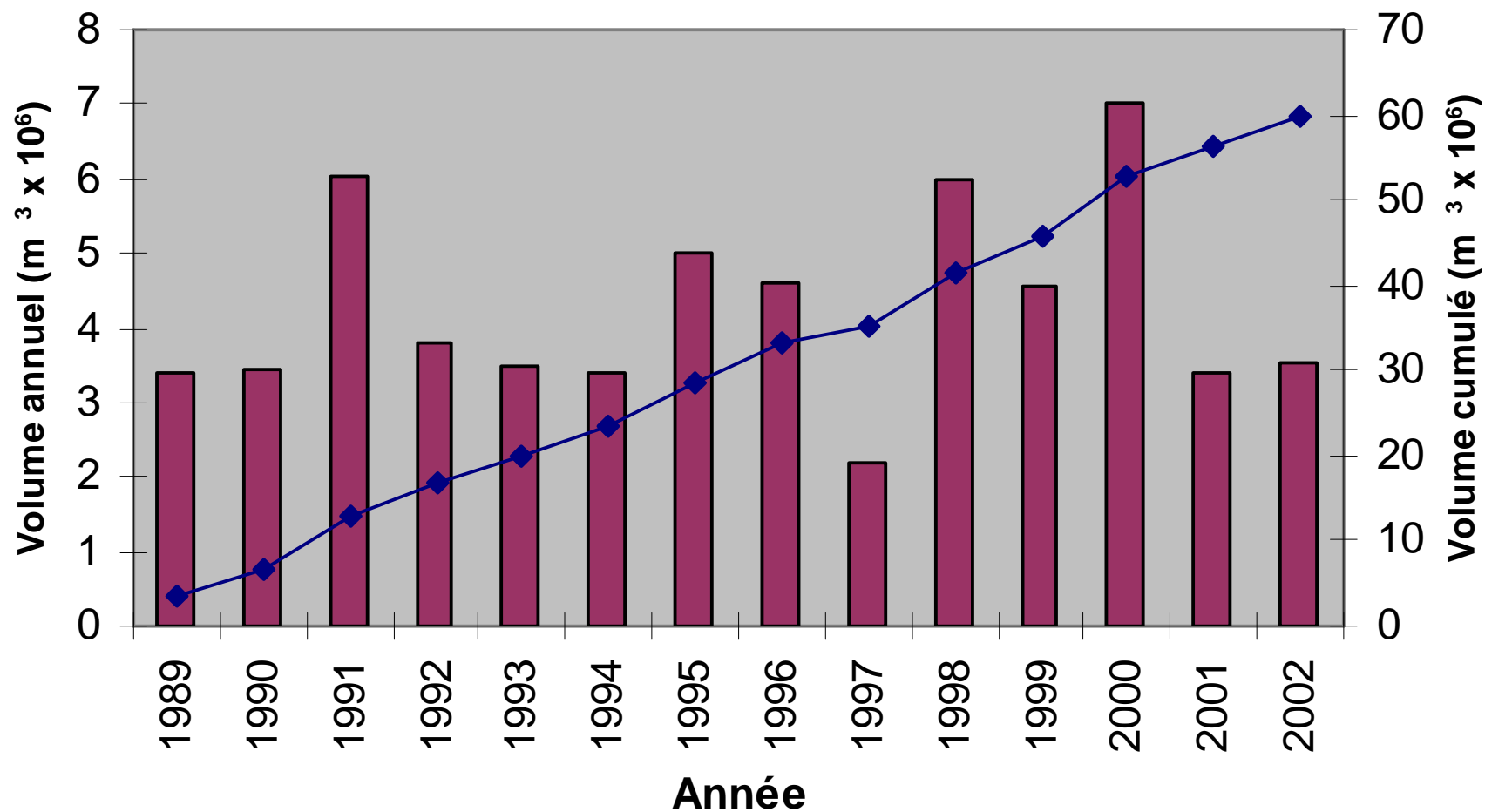
**Bassin du Citarum,
Java ouest**



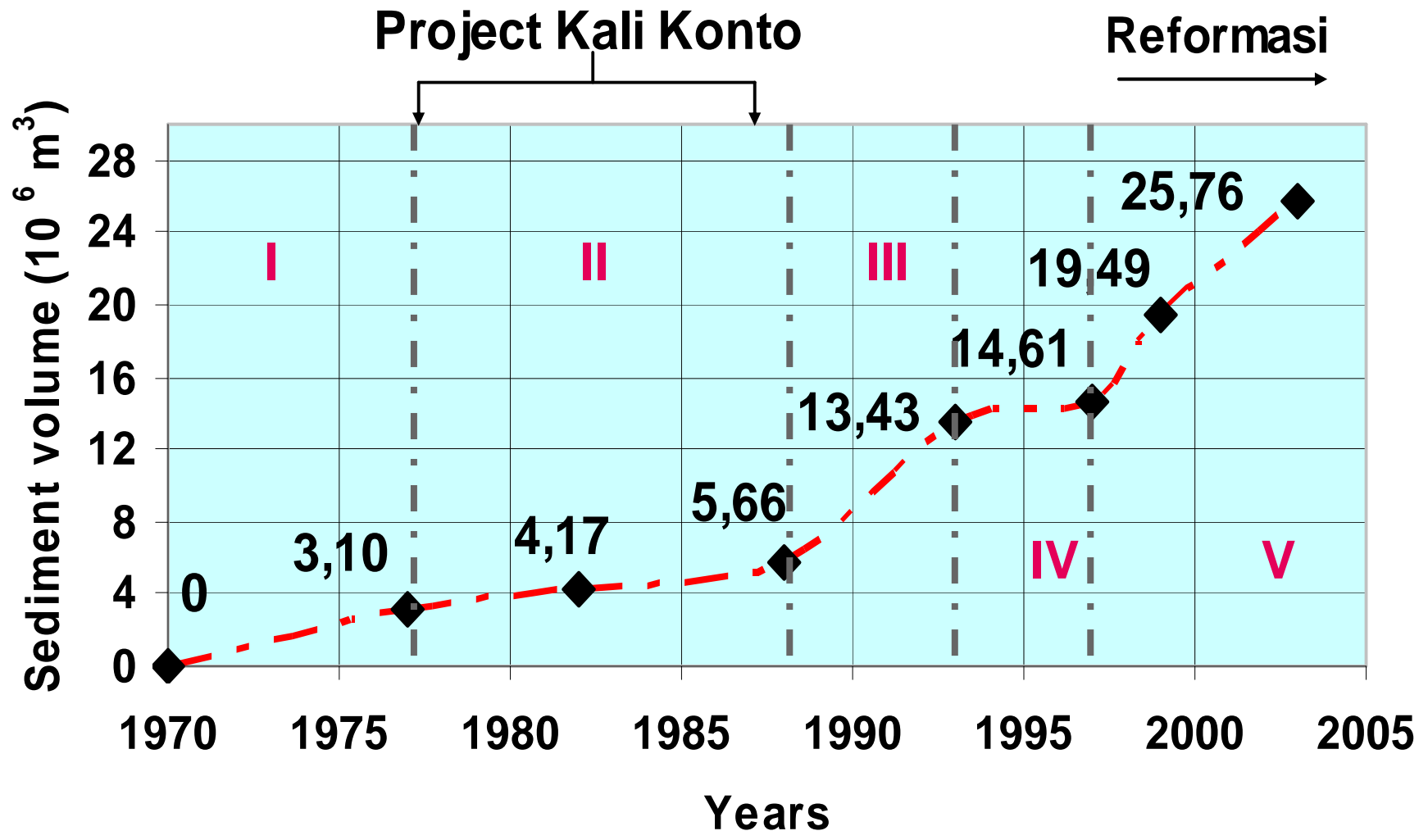
Cours d'eau	Barrage	Capacité initiale (10⁶ m³) (année)	Capacité restante (10⁶ m³) (année)	Taux de sédimentation (10⁶ m³/an)	Source
Kali Konto (Java Est)	Selorejo	62,3 (1970)	42,69 (1999)	0,68	Jasa Tirta
Brantas (Java Est)	Sutami	343 (1972)	176,31 (1999)	9,8	Jasa Tirta
Brantas (Java Est)	Senguruh	21,5 (1989)	3,52 (2001)	1,5	Jasa Tirta
Brantas (Java Est)	Wlingi	24 (1977)	3,97 (2001)	0,83	Jasa Tirta
Serayu (Java Centre)	Mrica	148,3 (1989)	88,5 (2002)	4,6	Indonesia Power
Solo (Java Centre)	Wonogiri	735 (1982)	120 (2004)	27,95	BTP DAS
Citarum (Java Ouest)	Saguling	875 (1986)	615 (2004)	14,44	Jasa Tirta 2
Citarum (Java Ouest)	Cirata	2165 (1988)	1521 (2004)	40,25	Jasa Tirta 2
Citarum (Java Ouest)	Jatiluhur	2556 (1967)	1817 (2004)	19,97	Jasa Tirta 2



Rythme d'accumulation des sédiments du Serayu dans le barrage réservoir de Mrica depuis sa construction



■ Volume annuel de sédiments —◆— Volume cumulé de sédiments



Pour remédier aux problèmes de l'accumulation sédimentaire, les gestionnaires doivent régulièrement vidanger les retenues et procéder à des chasses... ce qui cause de graves et profonds impacts environnementaux.

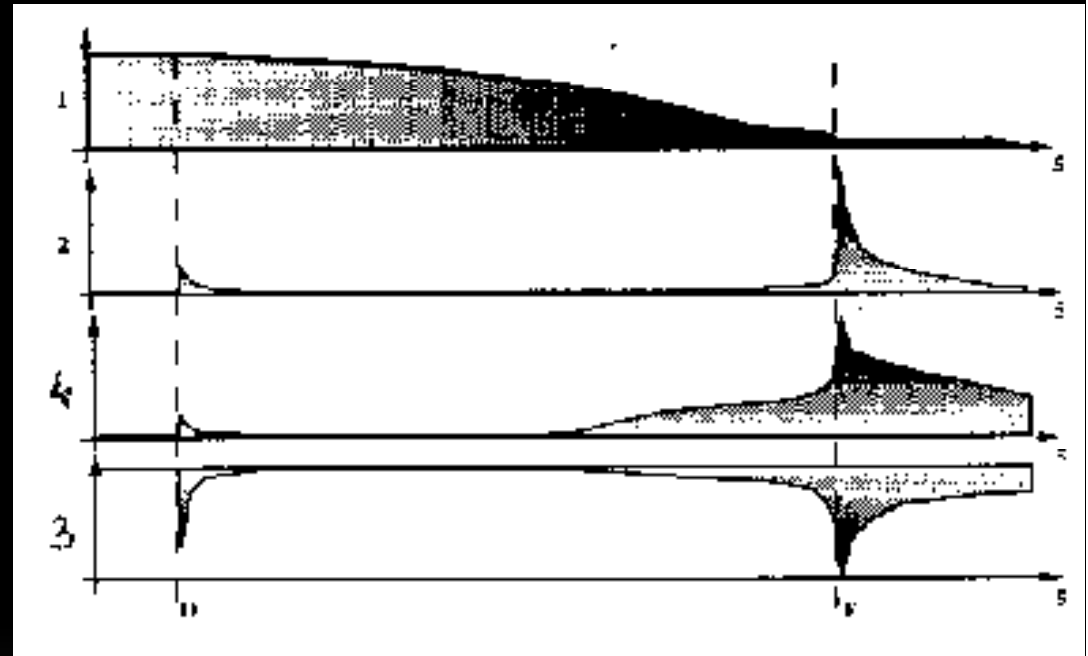


Fig 1

Évolution schématique des trois principaux paramètres de qualité d'eau en aval immédiat du barrage lors des vidanges de retenues

Schematic view of the changes of the three main parameters characterizing water quality at the river downstream of the dam during the emptying of reservoirs

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| (1) Cote de la retenue | (1) Reservoir water level |
| (2) Matière en suspension | (2) Suspended load |
| (3) Oxygène dissous | (3) Dissolved oxygen |
| (4) Azote ammoniacal | (4) Ammonium |
| (5) Temps | (5) Time |
| (D) Ouverture de la vanne de fond | (D) Low level outlet open |
| (F) Retenue vide | (F) Reservoir empty |

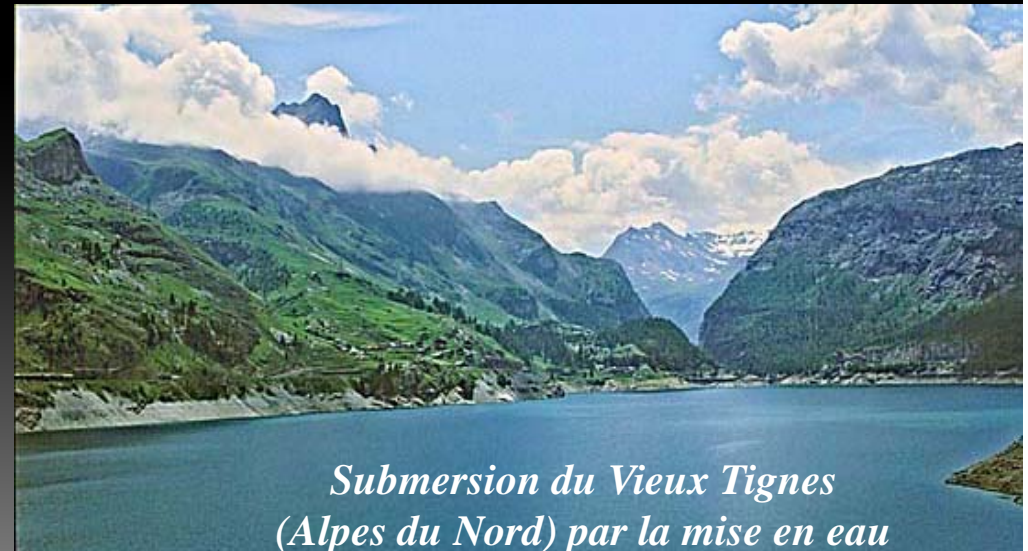
Impact des vidanges des barrages sur la qualité de l'eau des rivières (ex. français)



Impact du remplissage des réservoirs sur les populations humaines riveraines

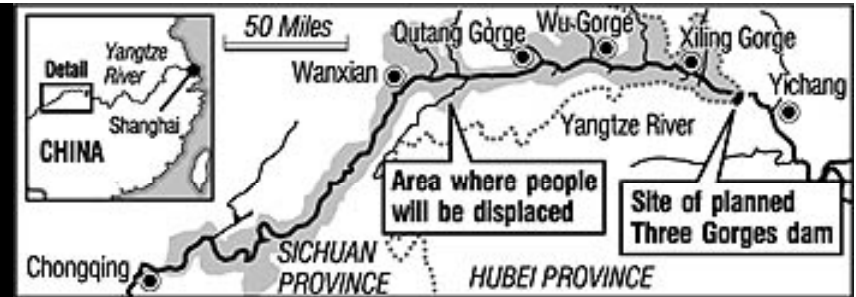


The villagers of Manilebi (India) watch as their land is submerged in water.



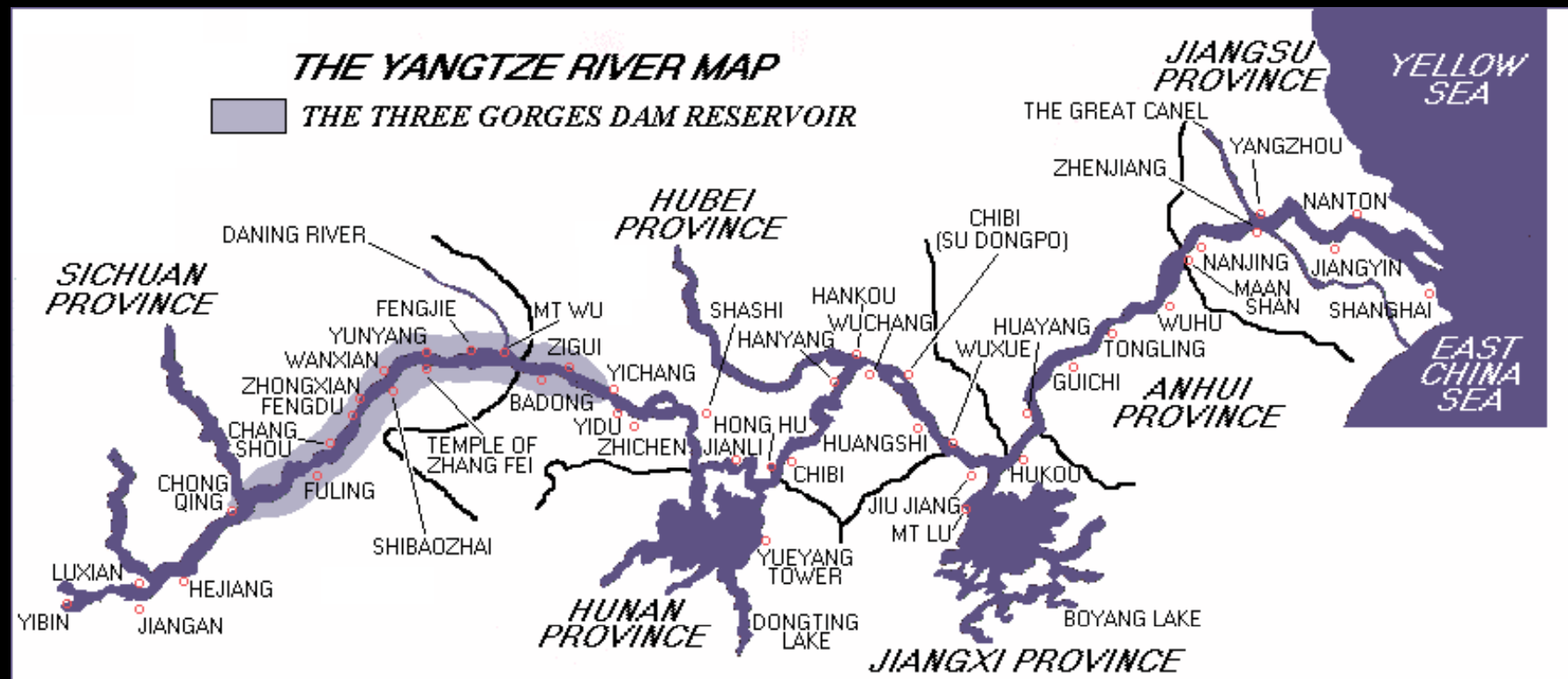
Submersion du Vieux Tignes (Alpes du Nord) par la mise en eau du réservoir du Chevril

Ex. du Yangtze Kiang (Barrage des Trois Gorges, Chine)



Modifications du niveau du fleuve Yangtze après la fermeture du barrage (+150 m au barrage)





Impact du TGP sur les surfaces agricoles et urbaines

Surface totale inondée	632 km ²
Pertes en surfaces agricoles	245 km ²
Pertes en surfaces urbaines	34,6 km ²
Relocalisation partielle ou totale	2 grandes cités & 116 villes, soit 1.300.000 personnes.

Source : TPG, 1999

Ex. du Yangtzé Kiang (Barrage des Trois Gorges, Chine)



- Submersion de la zone de culture de décrue dans un milieu de montagne calcaire où le terrain agricole est rare ;
- Interdiction de défrichement forestier et de mise en place de terrasses là où la pente excède 25° pour éviter toute érosion des terres



Construction de ville nouvelle au dessus du niveau de la retenue (état en nov. 1999)



Niveau de la retenue pleine

Ville qui sera noyée par la mise en eau du réservoir



Destruction des bâtiments avant la mise en eau

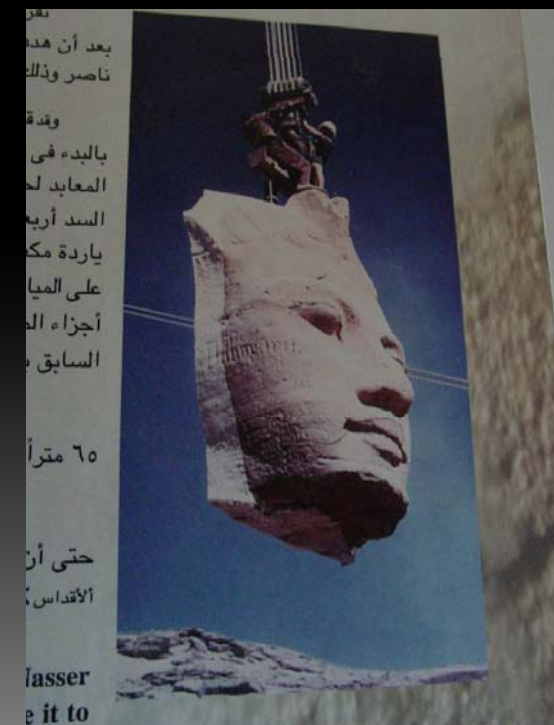
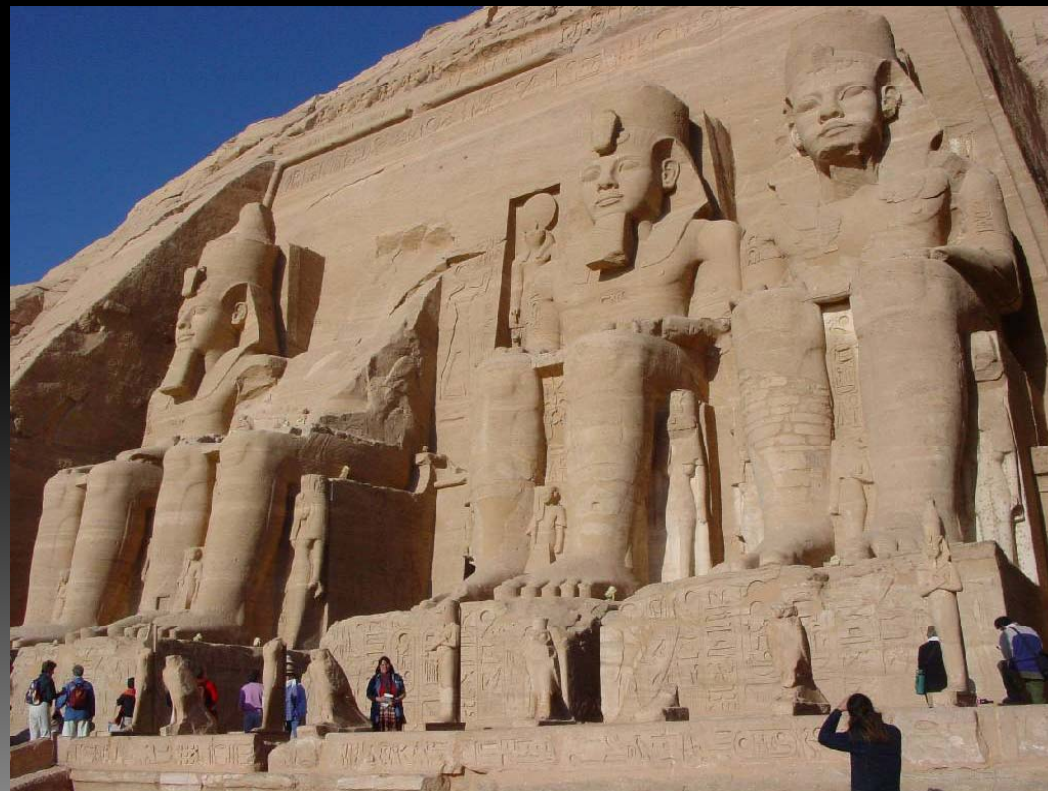


Temple qui sera noyé par la mise en eau du réservoir



Sauvetage des sites archéologiques majeurs

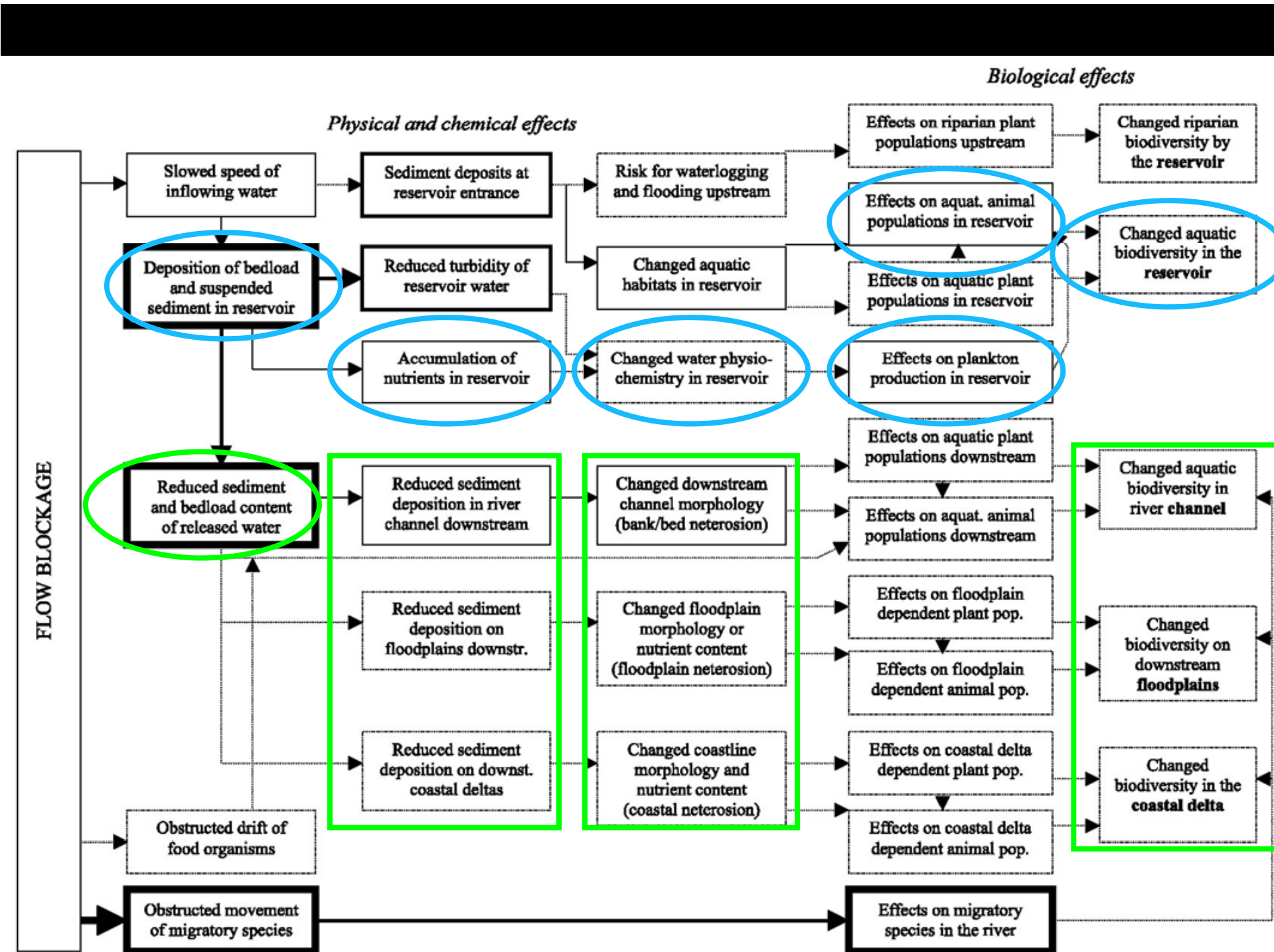
Sauvetage du site archéologique
d'ABOU SIMBEL lors de la
construction du barrage
d'Assouan (Nil)



3.2) Impacts en aval liés à la fragmentation du cours d'eau par les barrages

Les barrages créent des ruptures du continuum fluvial

- modification du rythme des écoulements
- changements géomorphologiques liés au déficit de sédiments piégés dans les retenues
- effets biologiques (poisson, végétation alluviale...)



Modification du rythme des écoulements



Le Colorado fournit de l'eau à 18 millions de Californien du Sud

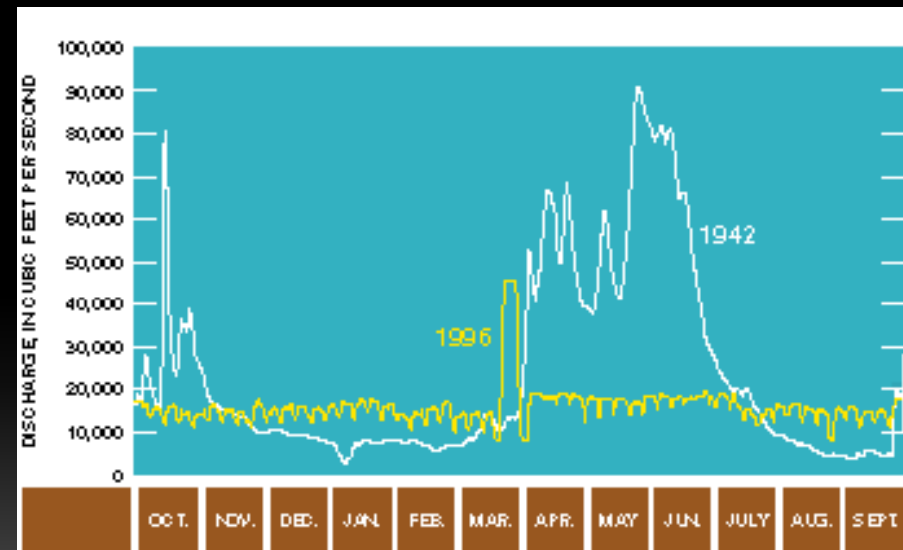
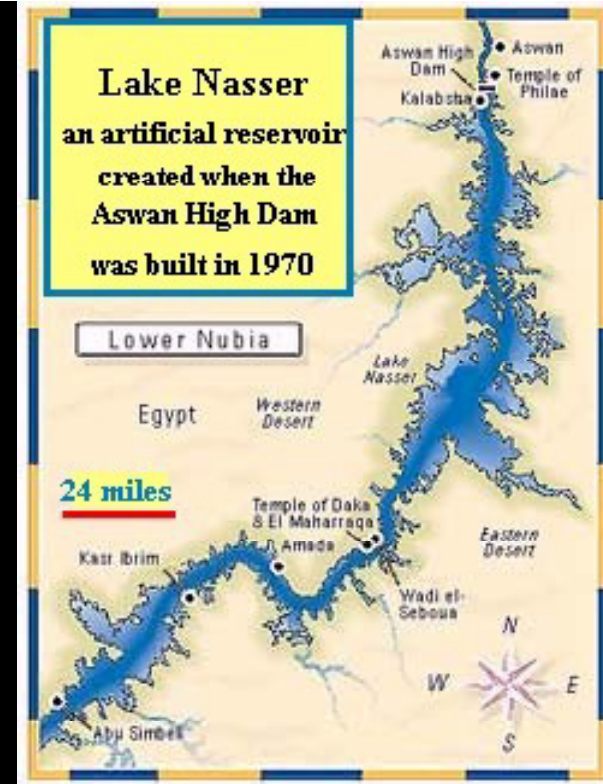


Figure 3. Daily mean discharge at Colorado River at Lees Ferry, Arizona, 1942 and 1996 water years.

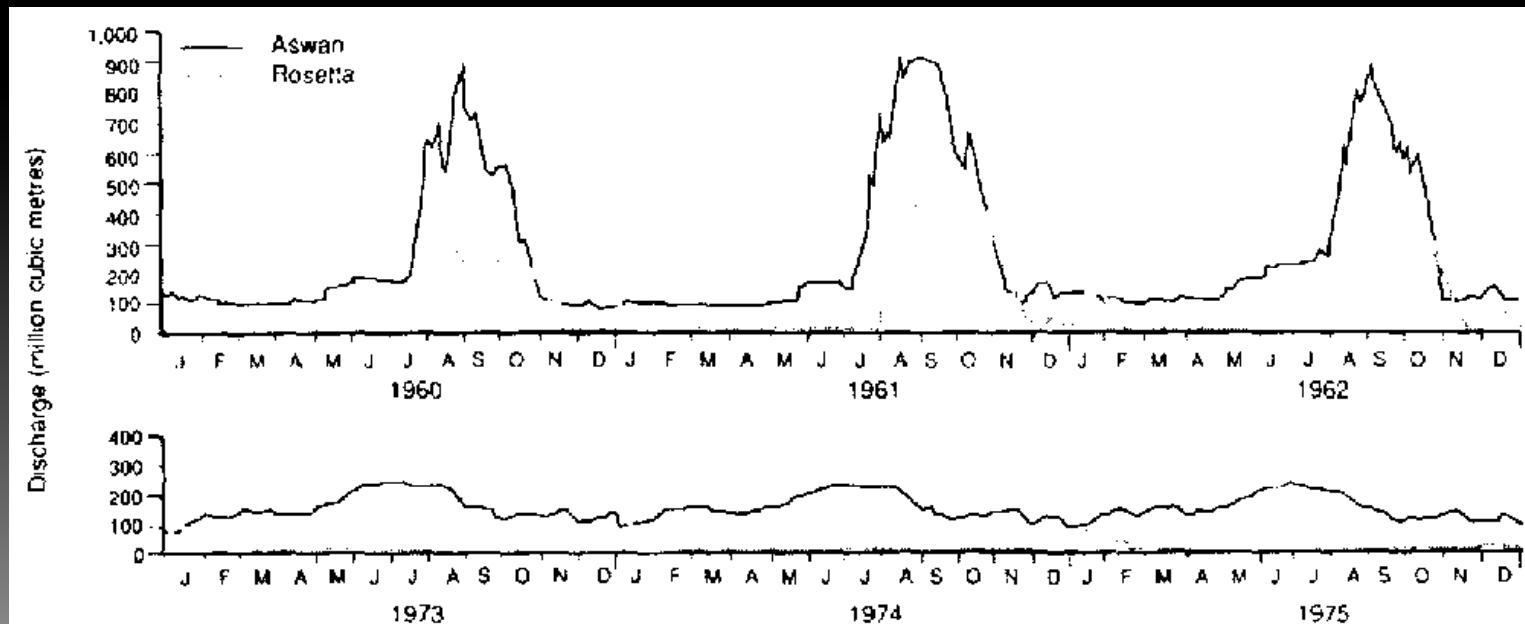
**Impact hydrologique de la
régulation par les barrages sur le
fleuve Colorado (USA)**



Barrage d'Assouan, Nil



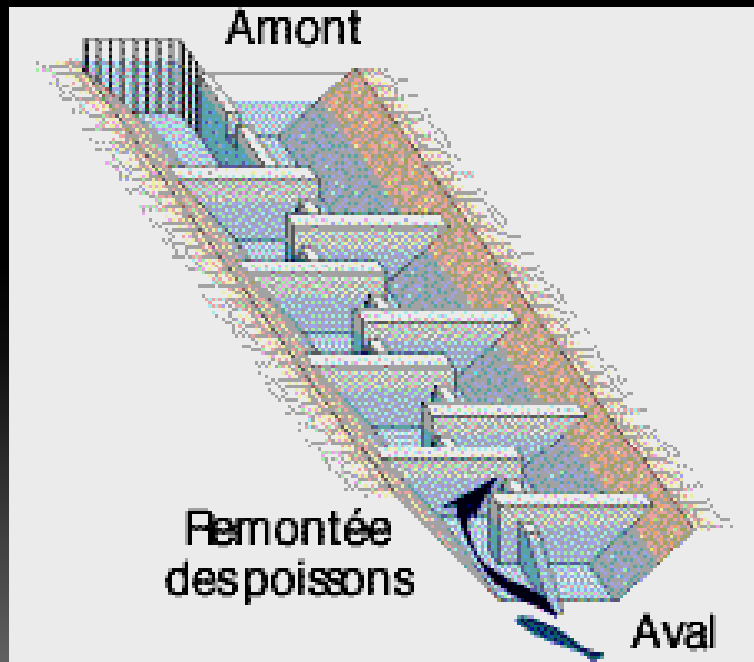
Effet hydrologique du barrage sur l'hydrologie du Nil



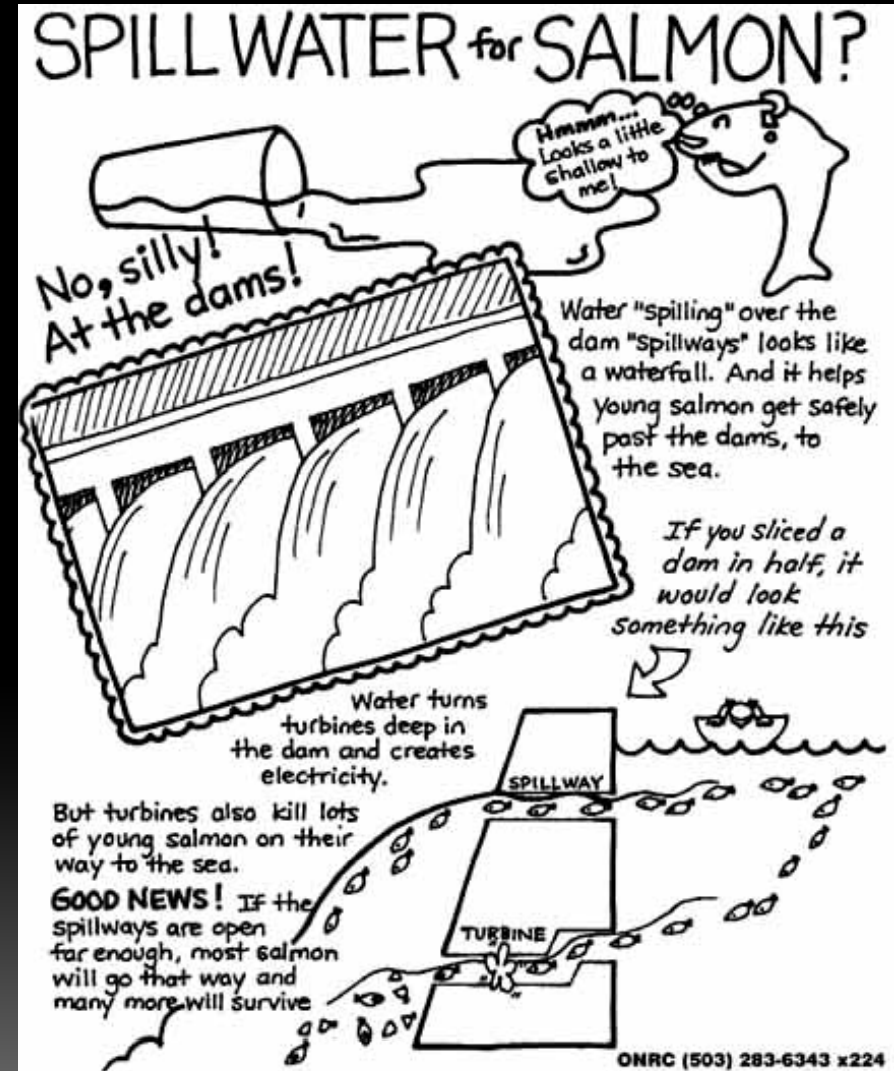
Interruption de la migration du poisson

- A la descente, forte mortalité lié au passage des poissons dans les turbines
- A la remontée, barrière physique infranchissable pour le poisson

➔ Nécessité de gérer la migration



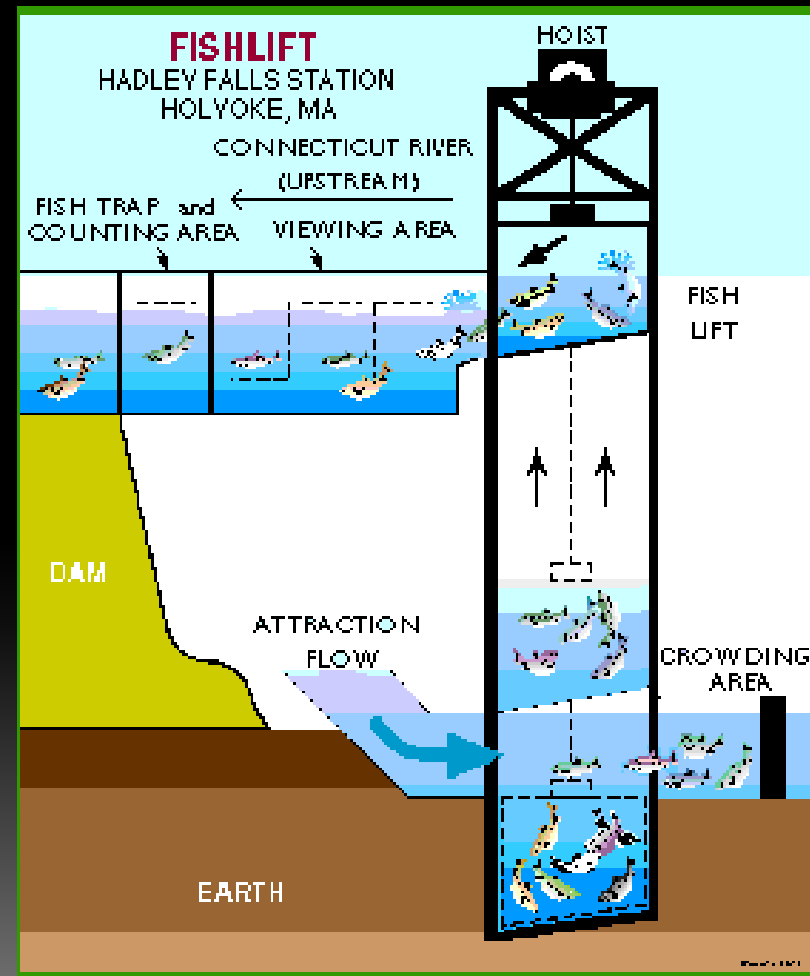
Mise en place « d'échelles à poisson » pour faciliter la remontée



Recommandation de gestion des retenues pendant l'avalaison du saumon

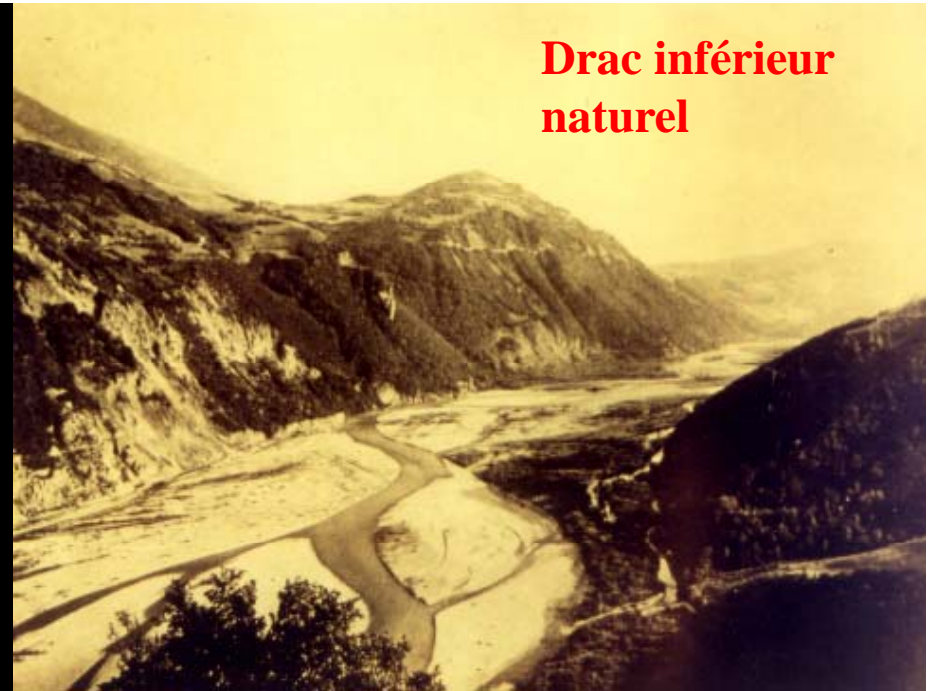
B) Interruption de la migration du poisson (suite)

Construction « d'ascenseurs à poisson » pour franchir les fortes dénivellations



Changements géomorphologiques et phyto-écologiques

Début 20^{ème} siècle :
Chenal tressé dont l'instabilité empêche l'installation de la végétation



Drac inférieur naturel



Été 1993 :
Végétation ayant envahi le chenal du fait de l'absence de contraintes hydrologiques depuis 1964



Crue de septembre 1993 : 550 m³/s



**Drac court-circuité de
Notre-Dame-de-Commiers**



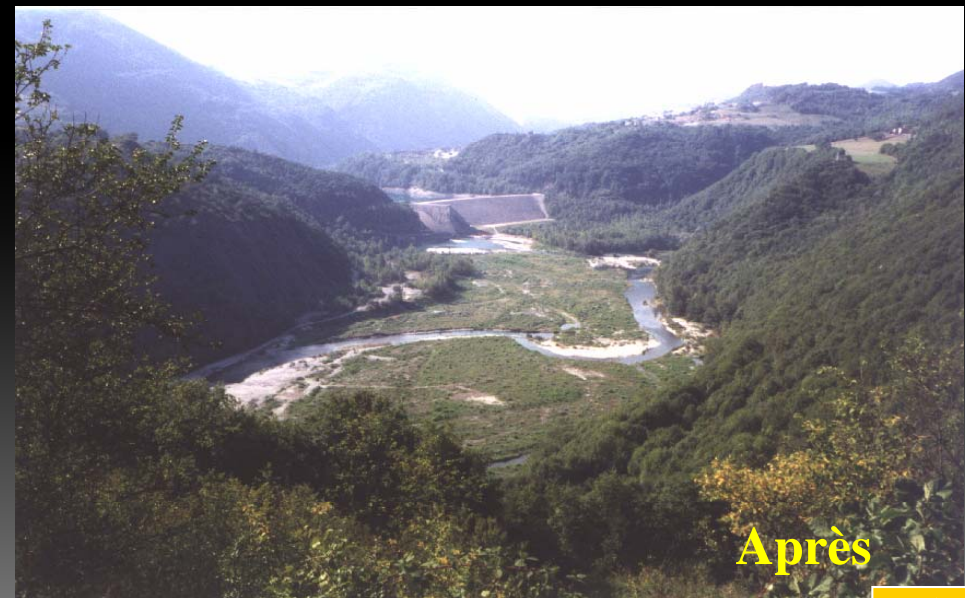
Avant

**Nécessité de gérer la zone
située en aval du réservoir**

**Fermeture du chenal
par la végétation dans
certains lits court-circuités
de barrages hydroélectriques**

1997 :

**Coupe de la végétation dans
les tronçons court-circuités
des barrages hydroélectriques**



Après

