

Pollution de l'eau, entre société et milieu naturel

Exemple des métaux lourds

*Michel Meybeck, UMR Sisyphe, CNRS,
Université Pierre et Marie Curie*

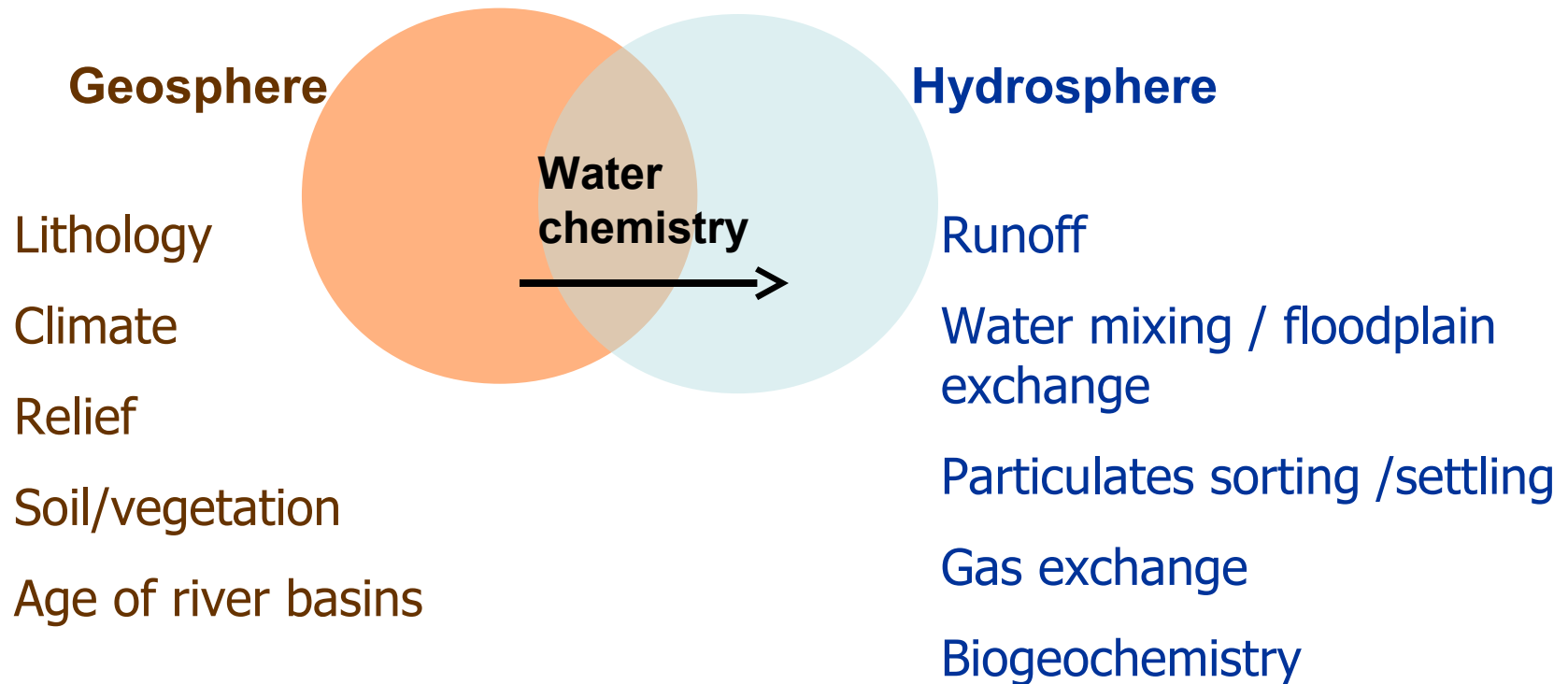
1. *La composition chimique* des eaux naturelles
2. L'impact des activités humaines
3. Complexité croissante de question de *la qualité de l'eau : un problème sociétal*

1. La *composition chimique* des eaux naturelles

2. L'impact des activités humaines

3. Complexité croissante de *la qualité* : un problème sociétal

River chemistry and its natural controls



- Spatial variations of water chemistry and yields may range over 1 to 3 orders of magnitude.
- Biological controls are now being more considered
- Temporal variability can also be marked (SPM, temperature, velocity...)

Un fleuve « pristine » en Alaska



BE1

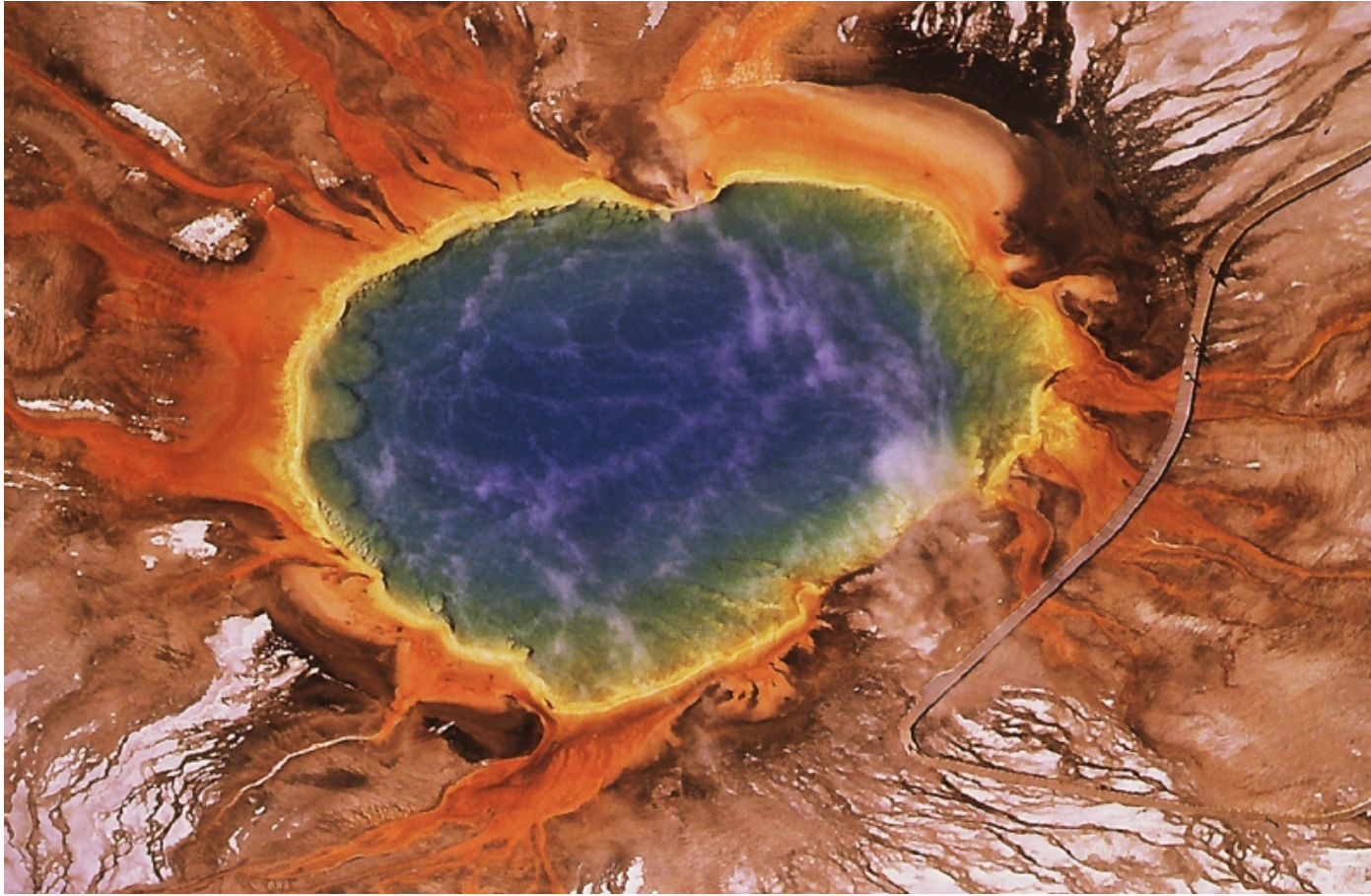
- Ce genre de bassin est sans source de contamination directe, s'il n'y a pas de mines
- Il est soumis aux apports de polluants atmosphériques
- Dans les latitudes tempérées, il faut aller en Patagonie pour trouver de tels bassins (dont nous avons besoin pour comprendre le fonctionnement naturel du Système Terre)

Une rivière en Himalaya



Elle est aussi « pristine » mais sa « qualité », c'est à dire son aptitude à répondre à nos besoins est très différente de celle en Alaska

Les geysers du Yellowstone



- Les conditions naturelles peuvent conduire à des compositions chimiques extrêmes qui peuvent abriter des communautés de vie uniques et précieuses (ex. bactéries pour les tests biologiques)
- Il n'y a pas de « pollution naturelle », mais des conditions particulières (ex. eau de mer)

Les bisons traversent le Missouri en 1830



Dans des conditions naturelles les animaux peuvent aussi influencer la composition de l'eau (ex. mares à hippopotames)

Variation naturelle de la composition chimique des fleuves

Range of concentrations				
	Ca^{2+}	K^{+}	Cl^{-}	HCO_3^{-}
max/min	290	129	4 600	126

Range of ionic ratios				
	Ca/Mg	Na/K	Ca/SO ₄	SiO ₂ /Σ ⁺
max/min	2 000	165	250	> 100

- Les concentrations comme les assemblages ioniques varient sur deux ordres de grandeurs : il n'y a pas de référence universelle, mais des valeurs de bruit de fond propres à chaque fleuve et, même, à chaque station de mesure.

Le zinc (ppm) dans les sédiments des ruisseaux non pollués (France) et les fleuves « pristine »

Monolithologic streams France

Global means

World

150

- On small monolithologic streams, the natural range of elemental contents can be 1 to 5
- At the global scale, differences between mean contents in three major morphoclimatic belts are only 30% to 100%, depending on metals

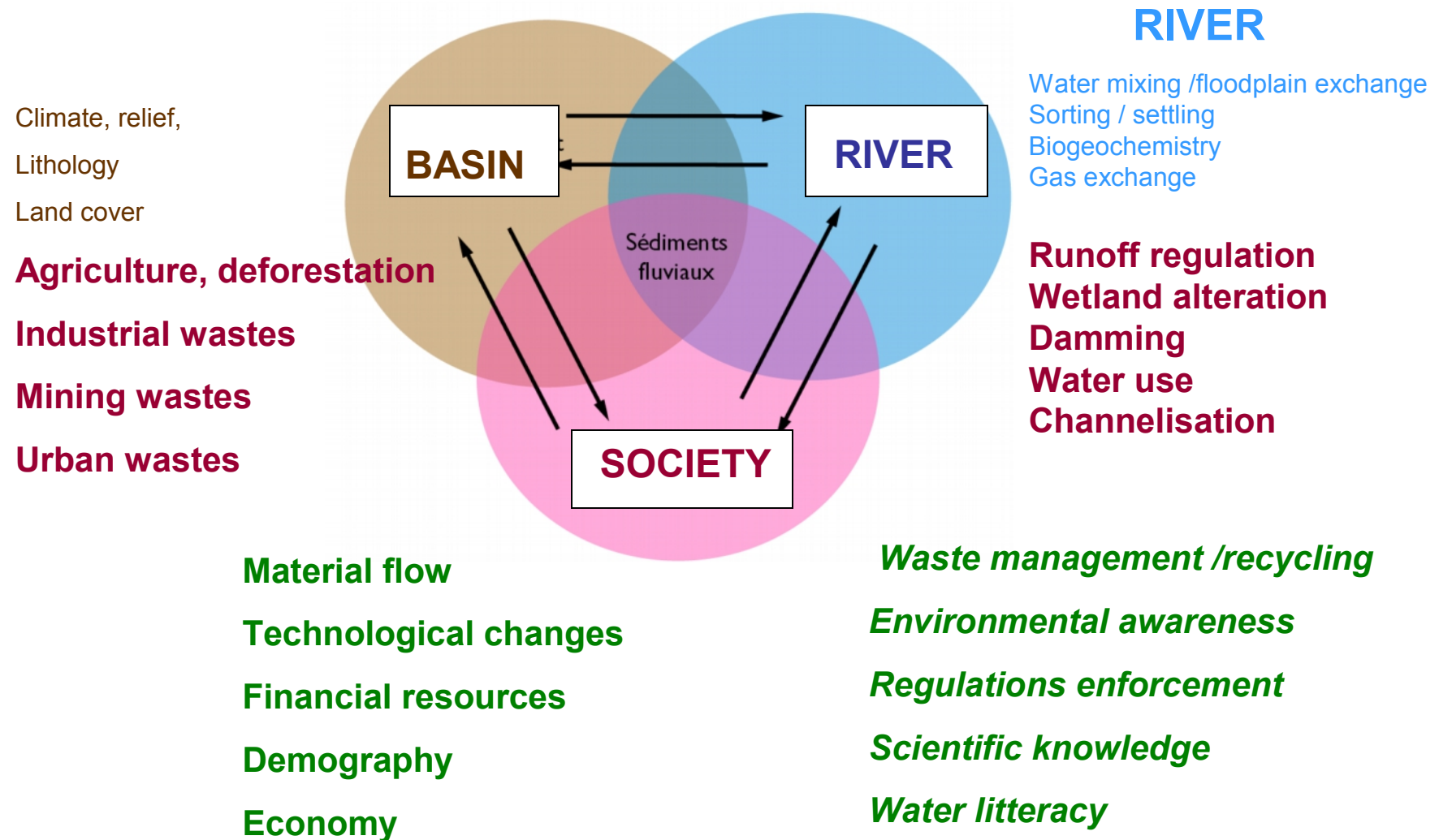
Unpubl.

1. *La composition chimique* des eaux naturelles

2. L'impact des activités humaines

3. Complexité croissante de *la qualité : un problème sociétal*

Control factors of river materials at the Anthropocene

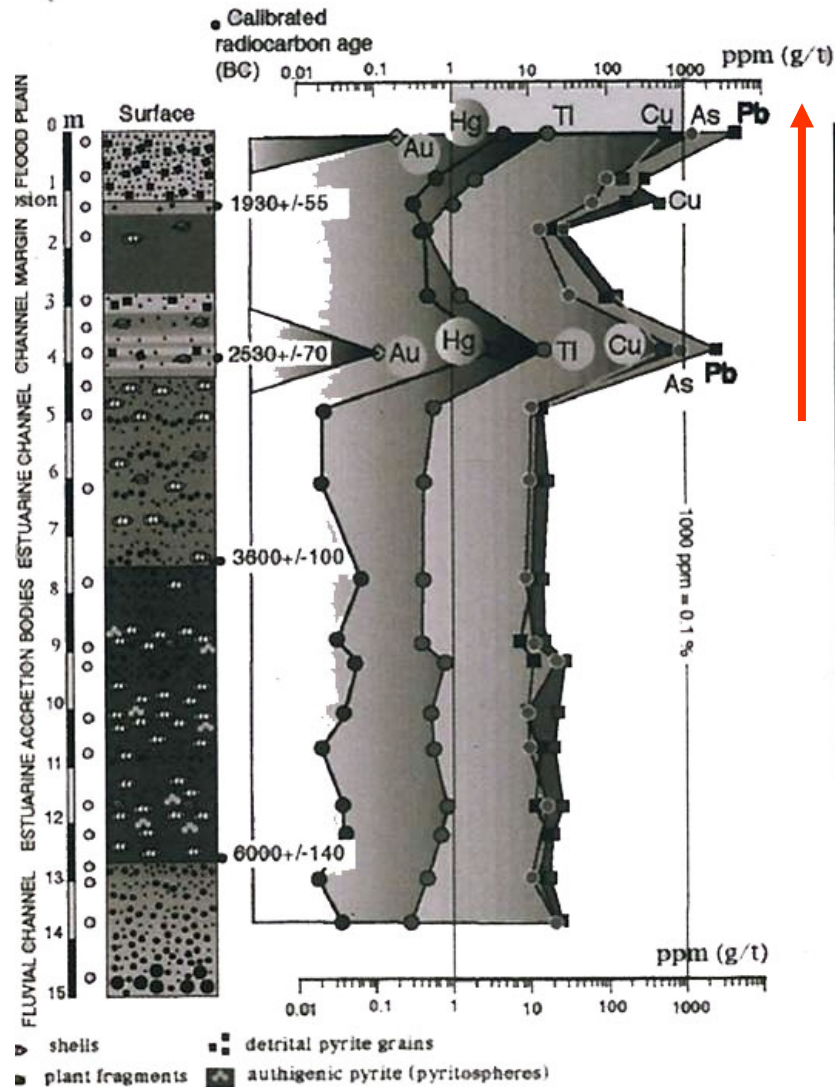


Anthropogenic controls are now dominant on both components of the system

L'impact des activités humaines

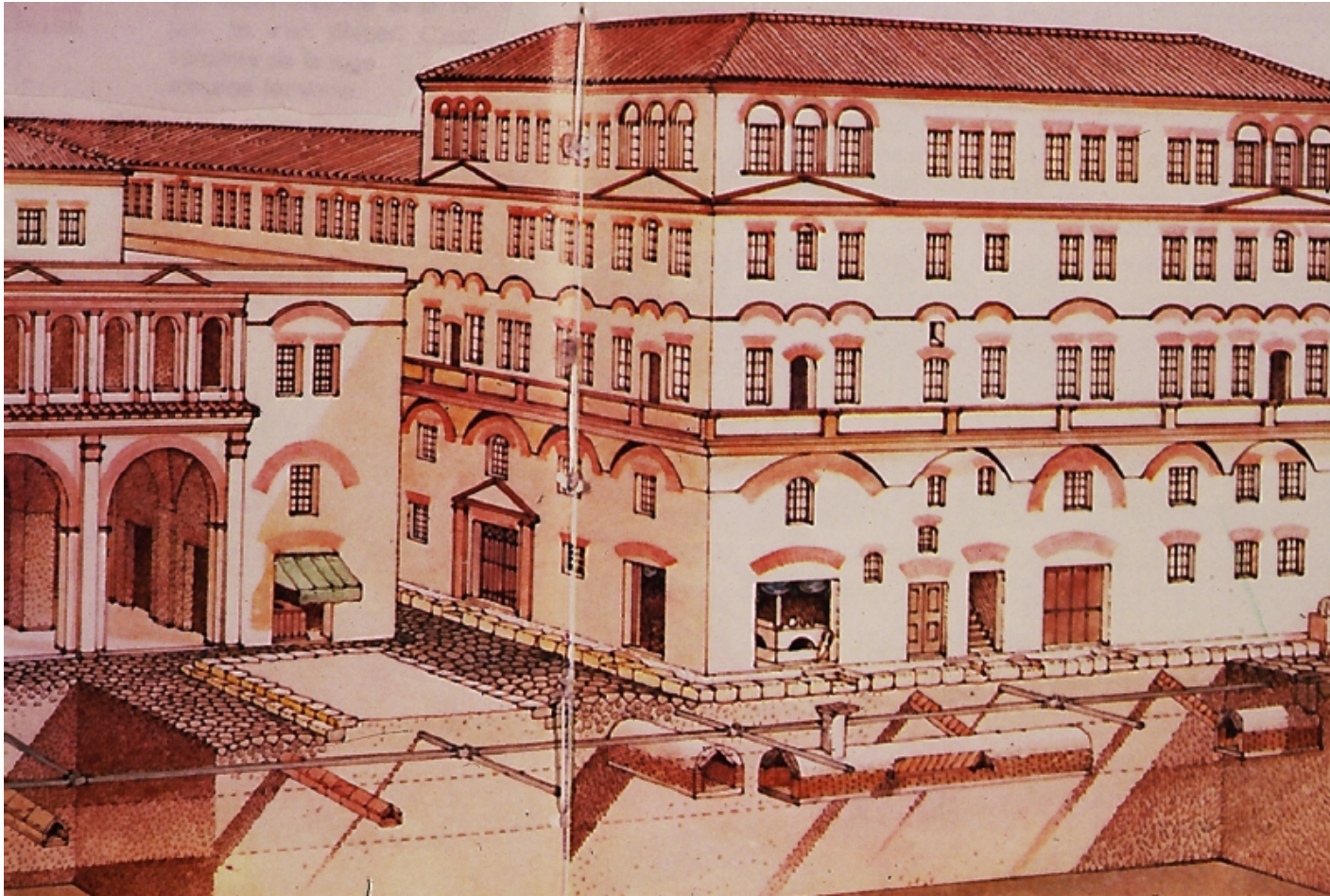
- Ancienneté des impacts
- Les barrages et l'irrigation
- Exemples des fleuves européens (Tamise, Rhin)
- Circulation des métaux dans le bassin de la Seine

LE PLUS ANCIEN IMPACT ANTHROPIQUE ARCHIVE DANS LES SEDIMENTS FLUVIAUX: MINES DE L'AGE DU BRONZE (2500 AV JC) DU RIO TINTO (ESPAGNE)



- Les cycles des activités minières sont inscrites dans les sédiments
- Les teneurs sont déjà multipliées par 50 à 100 il y a 3500 ans
- Les mines d'or ont occasionné une contamination extrême (Hg * 100; Pb * 1500; As * 50)
- Il y a eu ensuite plusieurs phases d'exploitation jusqu'à nos jours
- Le bruit de fond pré-anthropique ne s'est jamais ré-établi

Ostie, la ville moderne romaine (200 AD)



- Aucun traitement des eaux

- Premières « eau courante » à l'étage; toilettes publiques; urine recyclée pour l'industrie des teintures; égouts pluviaux; égouts domestiques

Au temps de la Rome impériale



La consommation d'eau était de 200 L/j/hab, assurée par les aqueducs

Il y avait déjà deux réseaux; dont un pour les jeux nautiques, de moindre qualité, comme à Paris au XXème siècle

Aux temps romains la consommation d'eau était semblable à celle d'aujourd'hui.

Dans certaines régions, la pollution des mines romaines se fait encore sentir aujourd'hui (Pays de Galles : mines d'étain; Rio Tinto : mines d'or)

La *cloaqua maxima* collectait les eaux usées vers le Tibre

TROPICAL FOREST CLEARING



PD9

- Forest clearing is one of the major land use changes of the last 50 years
- Short term impacts on river fluxes include high supply of eroded material and loss of nutrients (although very limited compared to other human impacts)
- Long term impacts are likely to occur for aquatic biota diversity and for the water balance

BLAST FURNACE AT COPCA MICAS (RUMANIA, 1970 's)



Environmental regulations and surveys were abundant in Former socialist countries although barely enforced, thus resulting in pollution hotspots

Nat. Geogr. Mag., June 1976

AGROCHEMICALS, FERTILIZERS AND OLIGO-ELEMENTS (Zn, Cu, Mo, B, ...)

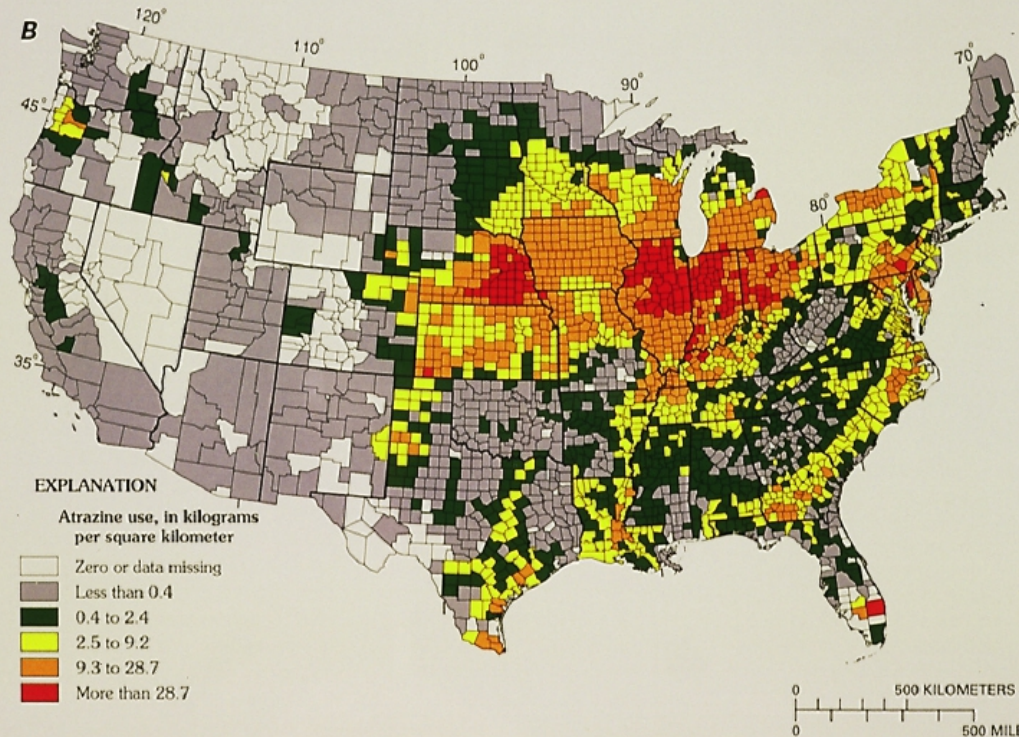


PF34

EMC

Agrochemicals may increase soil metal contents
Fertilizers leaks provide nitrate and total phosphorous

Carte de l'utilisation de l'herbicide atrazine vers 1990, avant son interdiction



La corn belt, qui produit le blé du monde entier, envoie **les résidus de pesticides** à 2000km de là, via le Mississippi, au Golfe du Mexique où ils impactent la faune côtière

De même les nitrates eutrophisent le delta du Mississippi, dont les fonds deviennent plus anoxiques chaque année. Les pêches de crevettes sont menacées .

COLORADO HOOVER DAM (1935)



- The first giant dam ever built
- South California and Arizona economies have greatly depended on Hoover dam

US Geol. Survey (Nat. Water Summary, 1984)

Le Fleuve Colorado à son embouchure



- All river water is used in the basin including the water left at the US/Mexico border and desalinized at Yuma according to the bilateral treaty
- Local indian culture in the Colorado delta does not longer exist

*National Geographic Magazine,
1979*

Impacts de l'usage de l'eau sur les régimes des débits

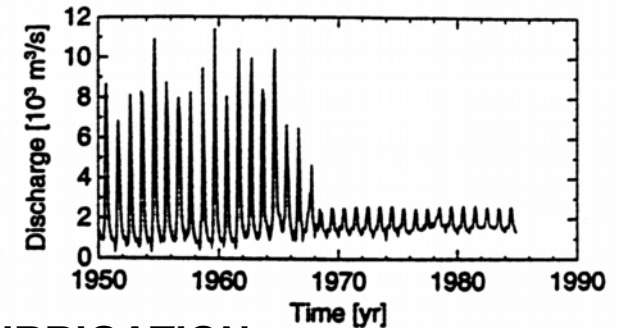
River engineering begun some 4000 y ago in Egypt and China

- **The Hoover Dam** (1935) on the Colorado river **has started a new technologic era**
- **Impacts include**
 - peak flow reduction (Nile)
 - low flow increase (Nile)
 - regulated seasonality (Syr Darya)
 - deregulated seasonality (Burntwood, Canada)
 - decreased long term flow (Syr Darya)
 - increased long term flow (Burntwood)



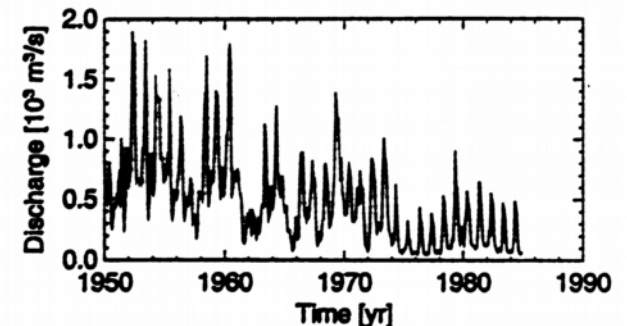
REGULATION

Nile River at the Aswan Dam



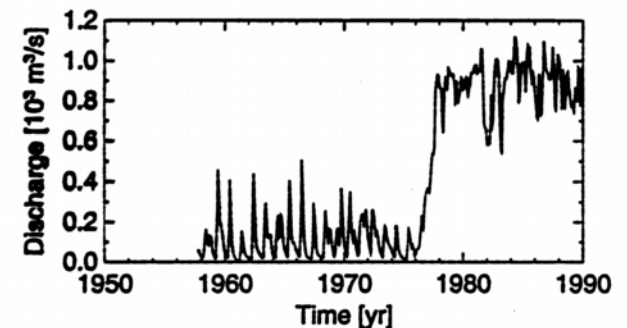
IRRIGATION

Syr-Darya River at Tyumen Aryk

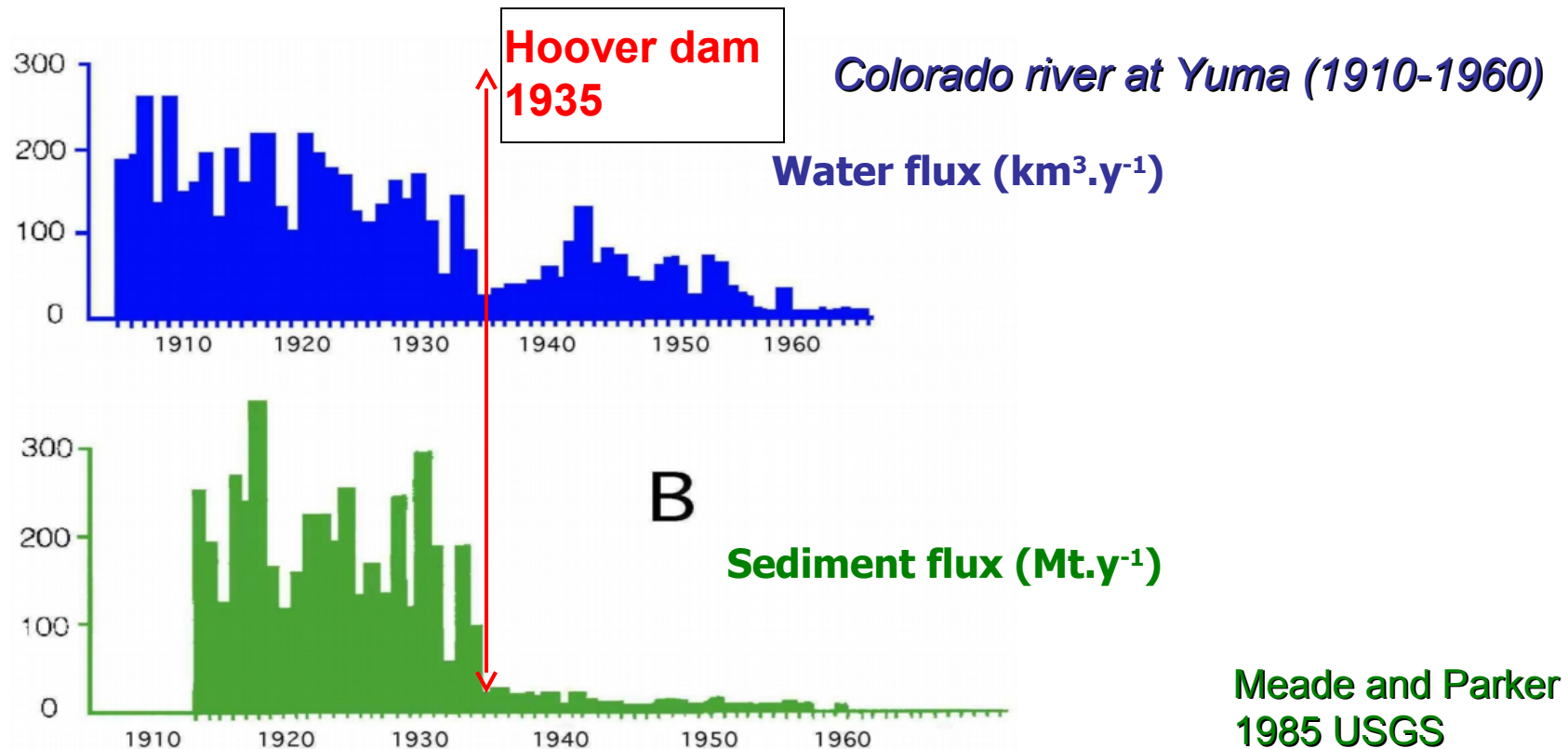


DIVERSION (HYDROPOWER)

Burntwood River near Thomson

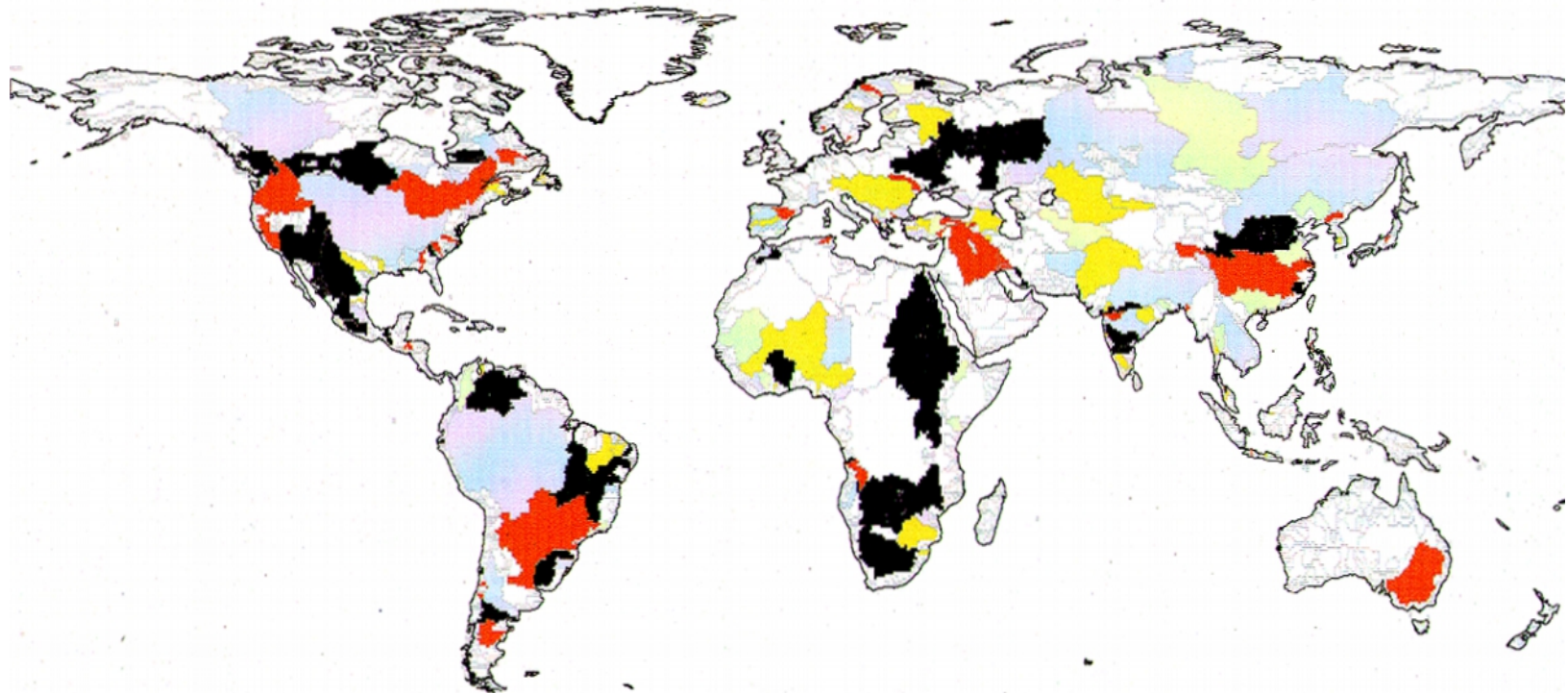


Impact des barrages : le Hoover dam sur le Colorado (1935)

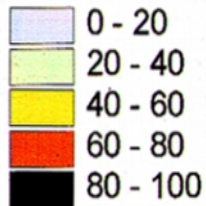


- Water fluxes have been gradually reduced since 1935
- River water left at US border is nearly completely used in Mexico
- Similar trends are observed for the Amu Darya, Syr Daria, Nile, Indus, Orange, Murray, Huang He, Shatt el Arab, Ebro etc.

Impact global des réservoirs sur les fleuves

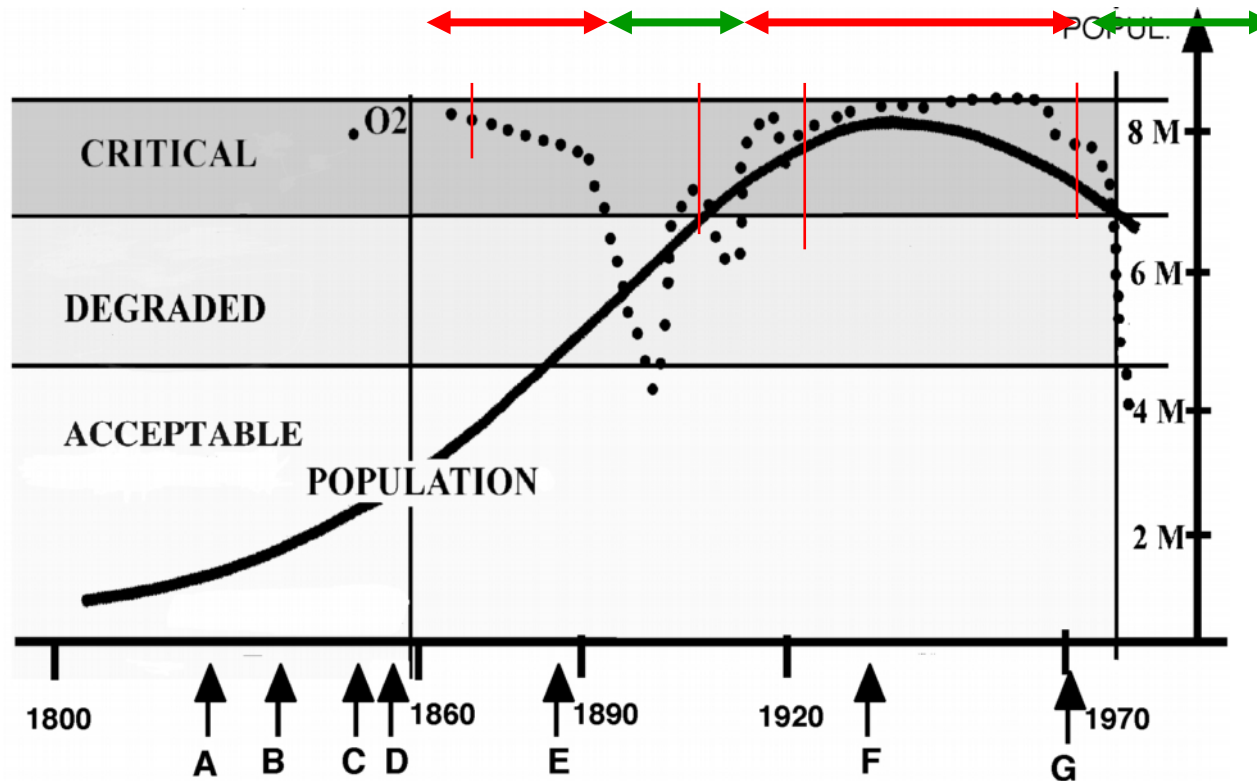


Basinwide Trapping Efficiency (%)



- Les transferts de sédiments à l'échelle globale ont diminué de 30% (7 milliards de tonnes)
- Les transferts d'eau sont ralentis d'un facteur trois
- La zone côtière devient "affamée" de sédiments (subsidence des deltas)

La pollution organique du Grand Londres (1800-1980)



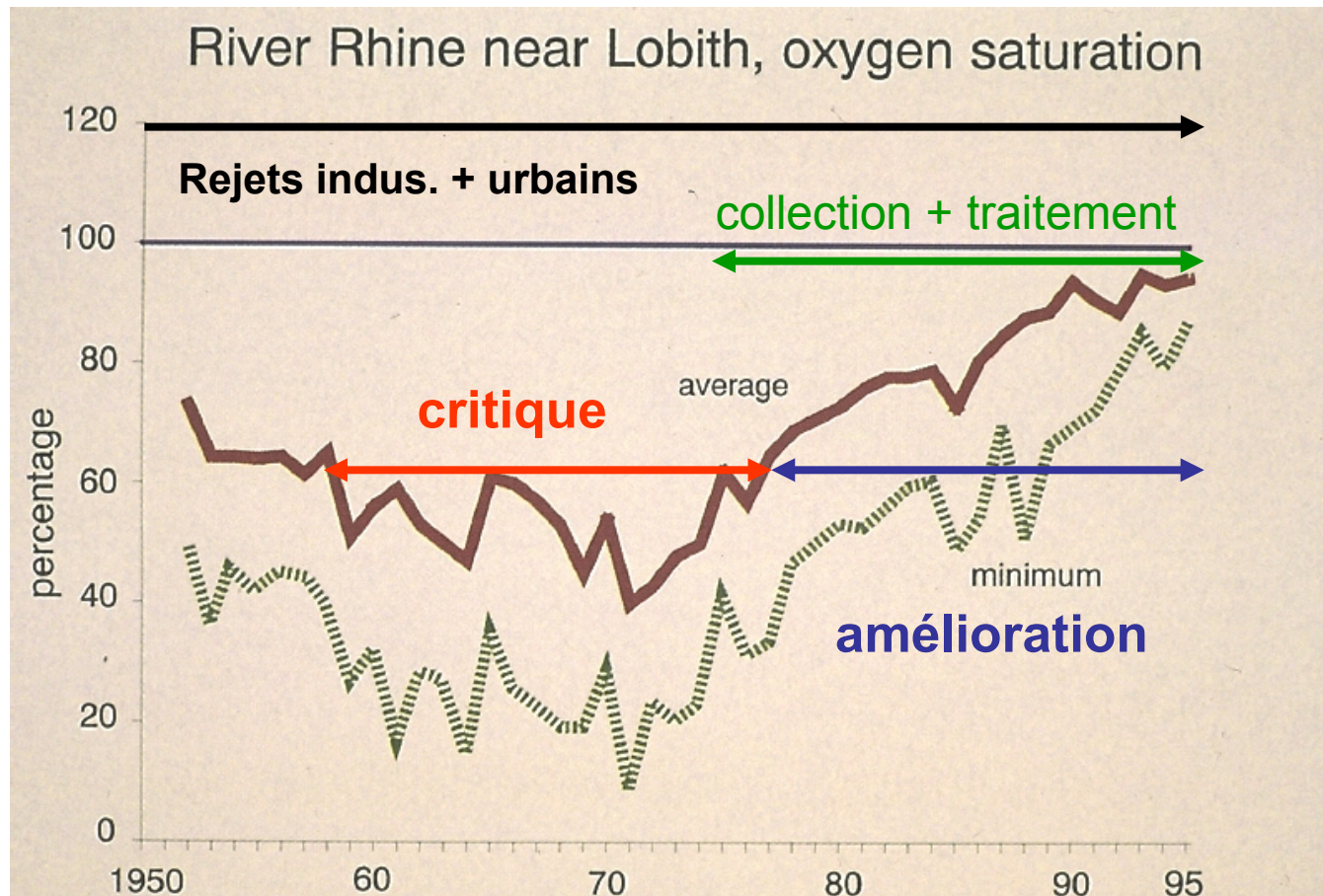
A: cholera epidemics,
 B: last salmon,
 C: " great stink »,
 D: sewer completion,
 E: primary treatment,
 G: full secondary treatment

Les mesures d'oxygène dissous commencent vers 1865

Elles présentent plusieurs cycles de restauration/ pollution

Ils résultent du rapport population / collecte + épuration (Pressures / Responses

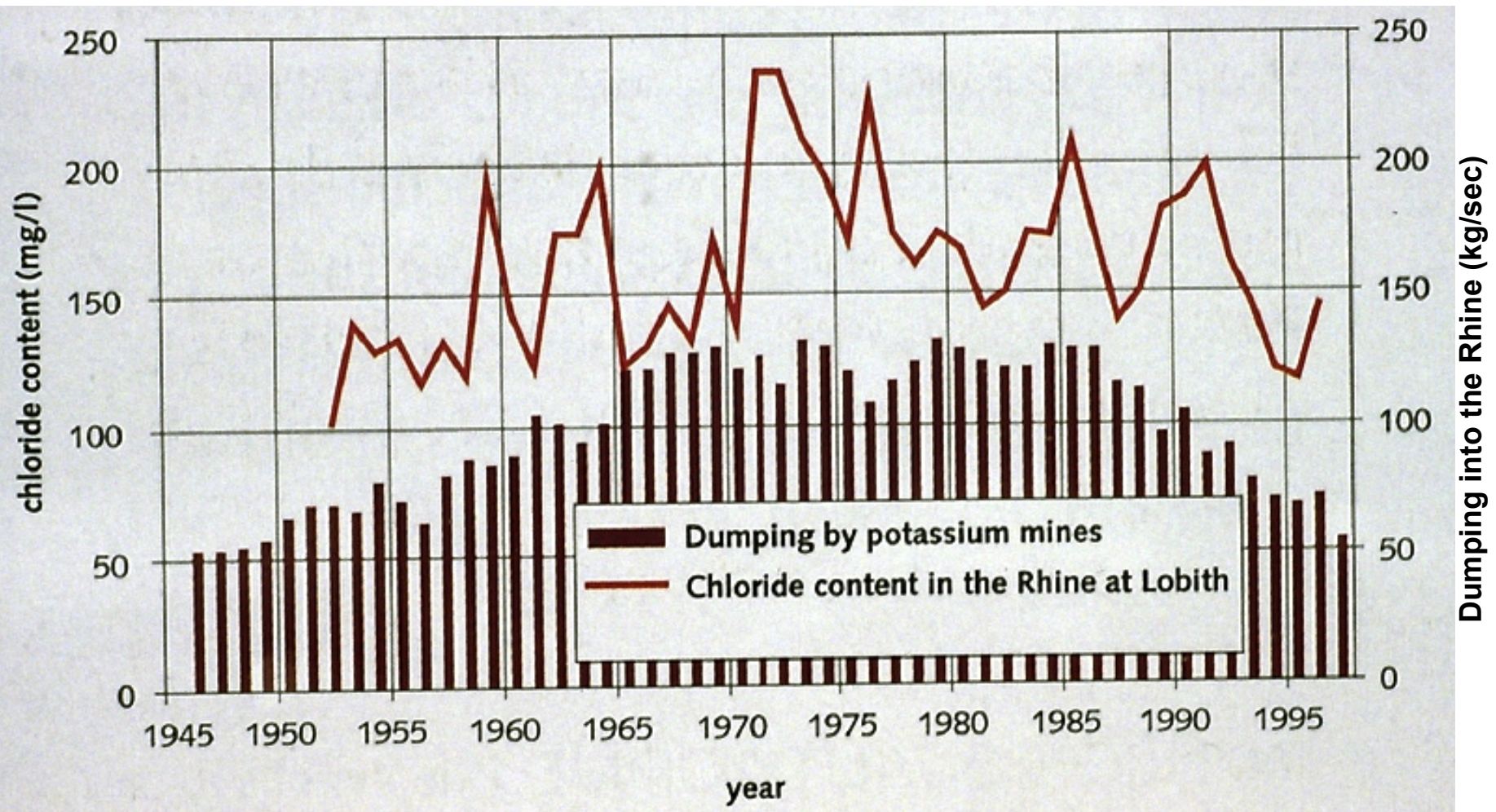
La restauration du Rhin (1950-1995) sur l'oxygène dissous (% sat)



- . Pendant la période critique (1960-1975) les populations de poissons ont subi un grand stress, les salmonidés ont disparu
- . La restauration complète a pris plus de 30 ans, grâce aux efforts de 6 pays, réunis dans une des premières organisations de bassin: la Commission du Rhin (CIPR)

R. Breukel

Pollution du Rhin par les chlorures (1945 -2000)



Pendant plus de 50 ans les mines d'Alsace et de Lorraine ont rejeté environ 12 000 t. de sel par jour dans le Rhin; l'accord international demandait de ne pas dépasser 200 mg/L dans le fleuve à l'entrée des Pays -Bas

Héritage séculaire de la contamination minière: salinisation de la nappe du Rhin en Alsace



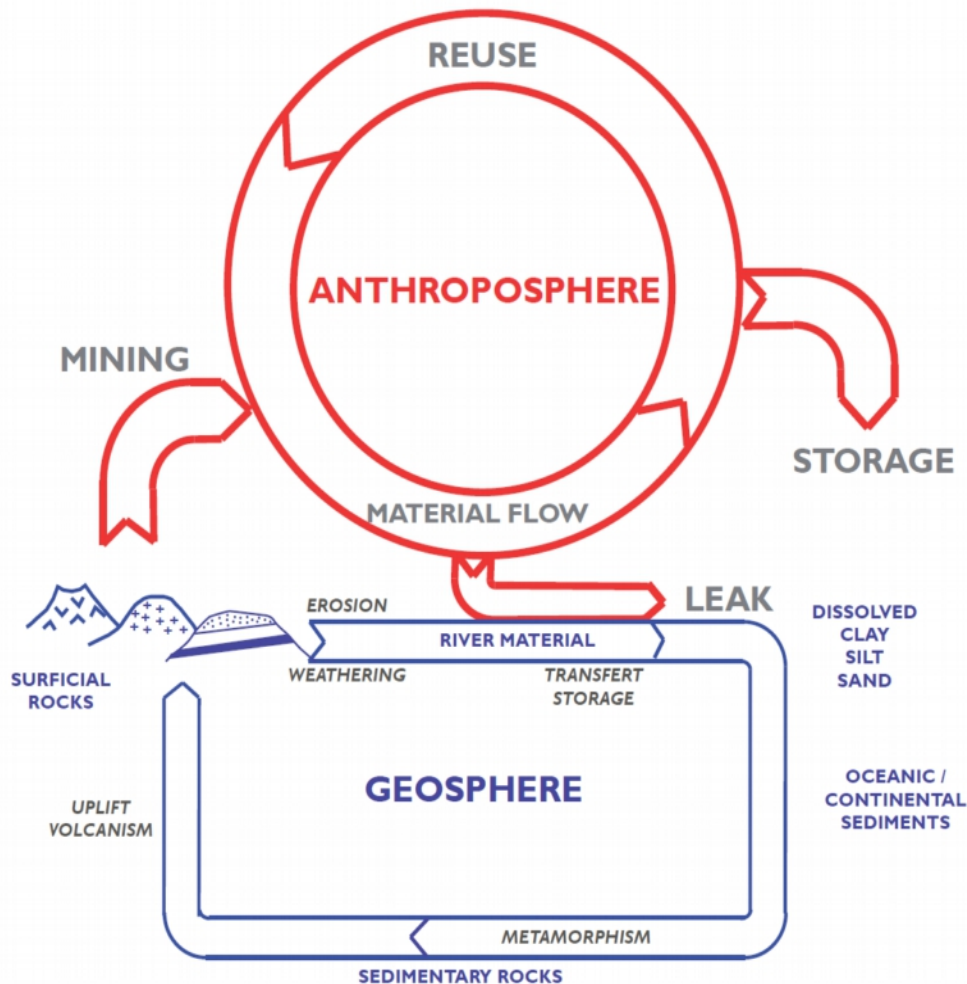
Accelerated dissolution
of salt tailings (Alsace
potash mines, France)

Les mines de potasse (MDPA) ont arrêté en 2002

Leur activité a généré une salinisation progressive de la nappe d'Alsace, une ressource majeure

Les terrils continuent à contaminer : ils sont progressivement dissous

La nappe ne retrouvera sa qualité d'origine qu'au bout d'un siècle



Metal circulation in impacted river basins

Dans le bassin de la
Seine les fuites de
métaux sont de 1 à 0.1%
aujourd'hui

Leaks can exceed the natural fluxes up to 10 or 100 times

At the global scale the natural fluxes have already been doubled or more for N, P, Na, Cl, S and Hg ,Cd, signing the beginning of the Anthropocene era (Crutzen 2002)

D.P.S.I.R. APPROACH (E.E.A.; W.F.D.)

- **D drivers** → economic growth
→ demography
→ industrial growth
→ industrial innovations
- **P pressures** = leaks of material flow to the environment
- **S state** = of contamination, with regard to a given reference)
- **I impacts** = health, economic, ecologic (loss of sustainability)
- **R responses** = regulatory, incertainties, prevention, remediation
from local to European

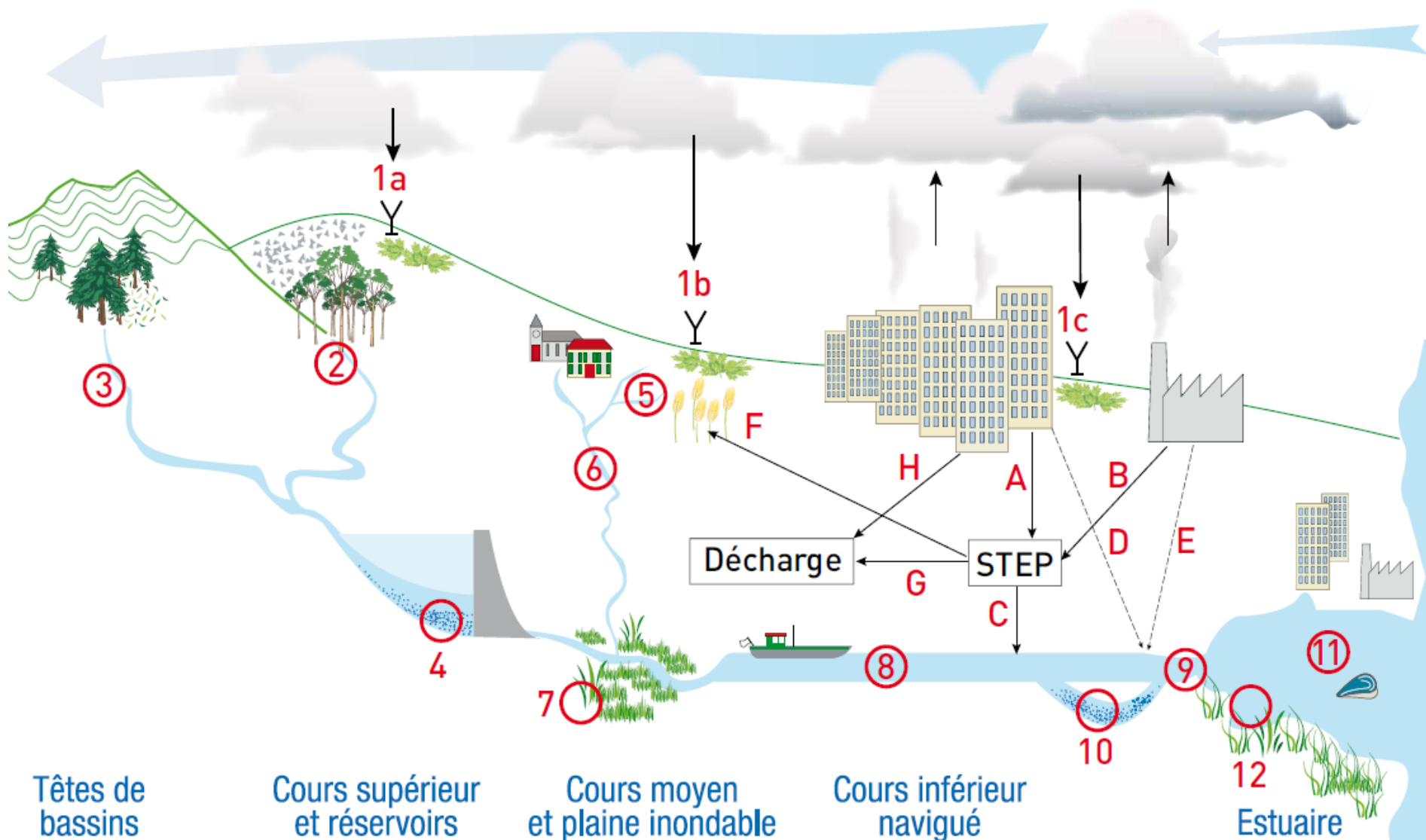
DPSIR Seine : application to metal contamination (1935-2000)

- State flood plain core (Ph. Bonté, LSCE)
- Metal use history (L. Lestel, CDHT)
- Responses history
- Reconstruction of impacts

Survey strategies in the Seine Basin

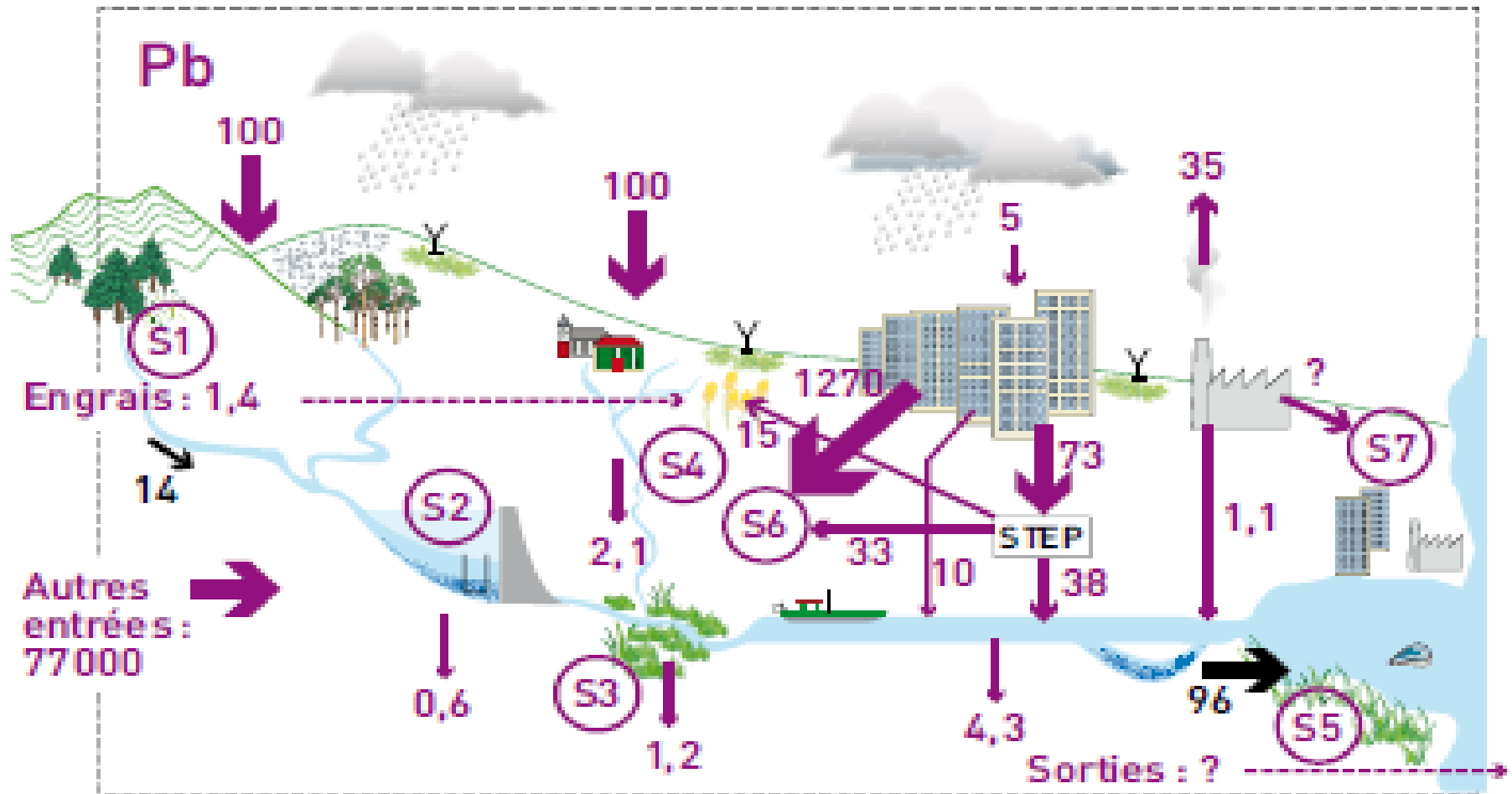
1 to 12 : transfers in the physical environment

A to F : transfers in the Anthroposystem



Lead fluxes in the Seine basin (t. per year)

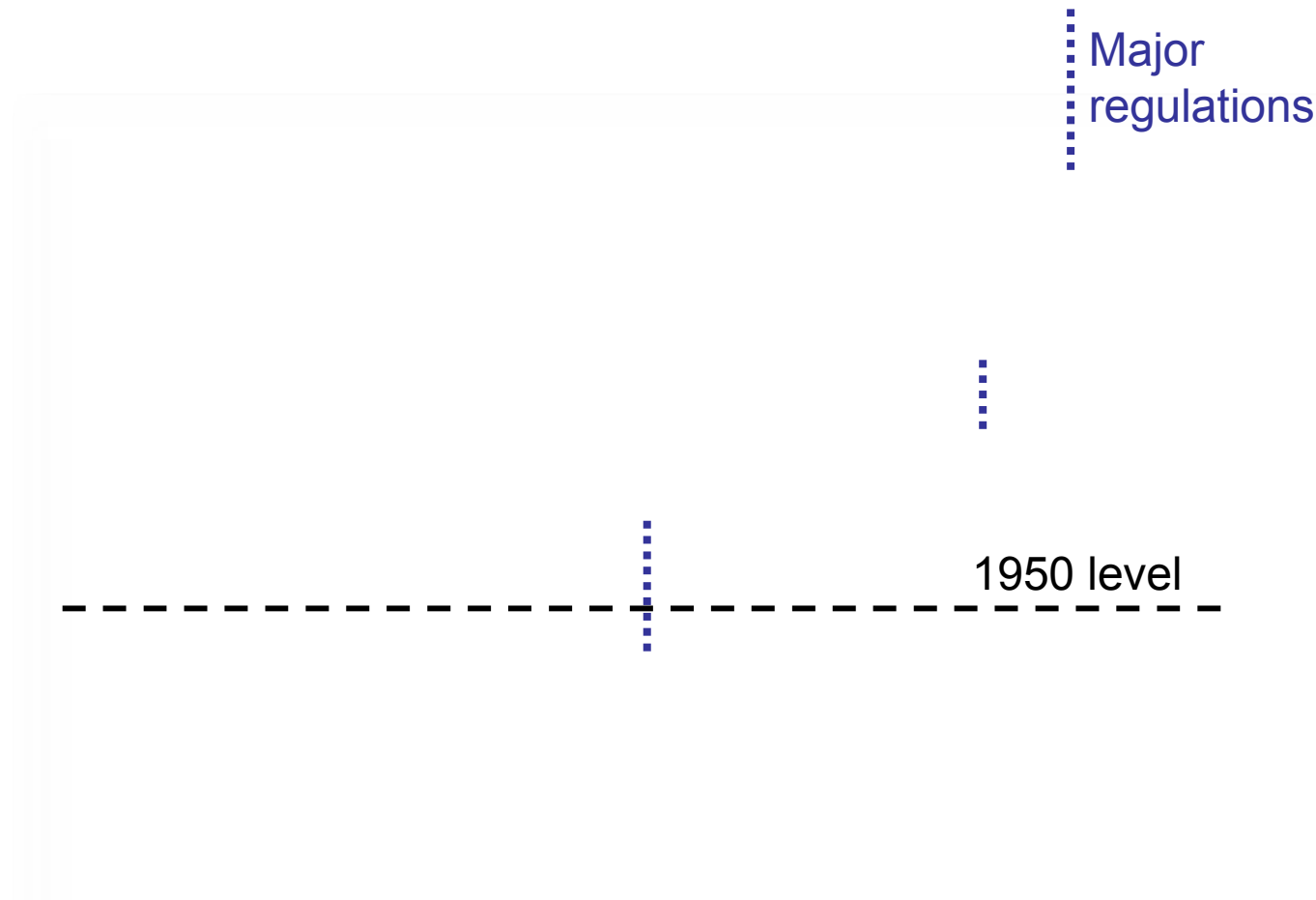
S_1 to S_6 : sinks and storage



Entries (car batteries + pipes) are 800 times the river output.

City storages (batteries, pipes, dumps...) is 13 times the river output.

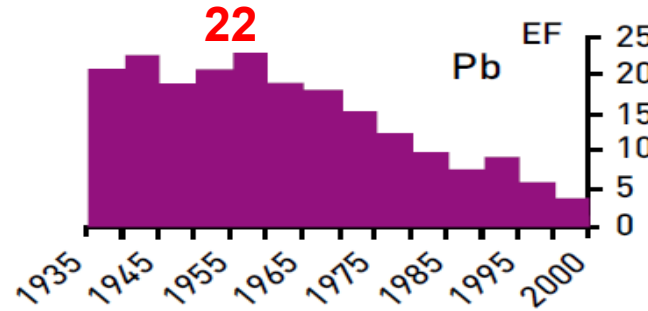
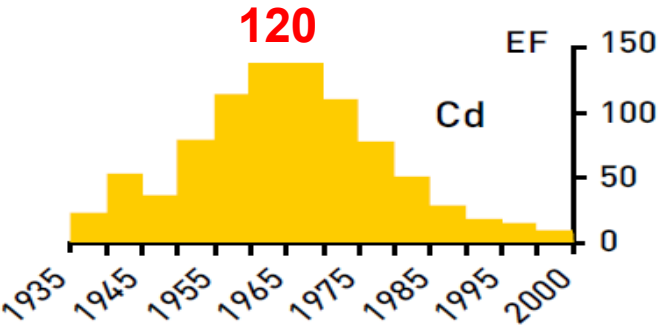
Metal demand in France normalised to 1950



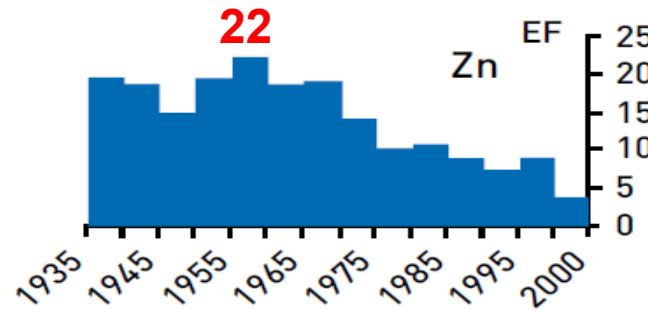
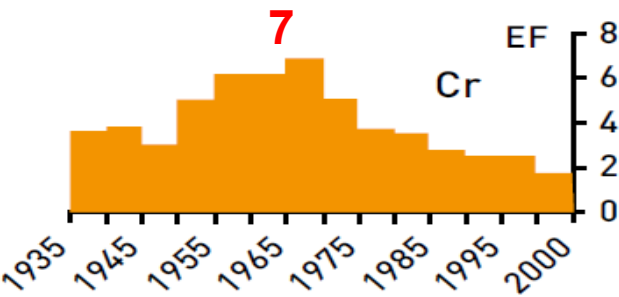
- Cu, Pb and Zn demand has increased faster than population
- **Cd demand increased very fast until strict regulation in 1995**
- Industrial Hg demand started to drop in 1960; regulation started in 1975

Seine sedimentary archives: 1935-2000

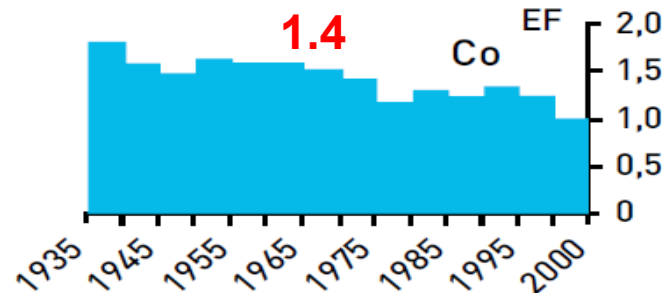
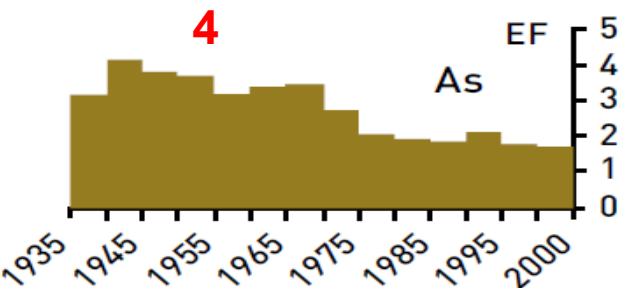
Enrichment factor



$$\text{Enrichment factor} = \frac{(\text{Conc.X} / \text{Conc.Al})_{\text{sample}}}{(\text{Conc.X} / \text{Conc.Al})_{\text{earth crust}}}$$



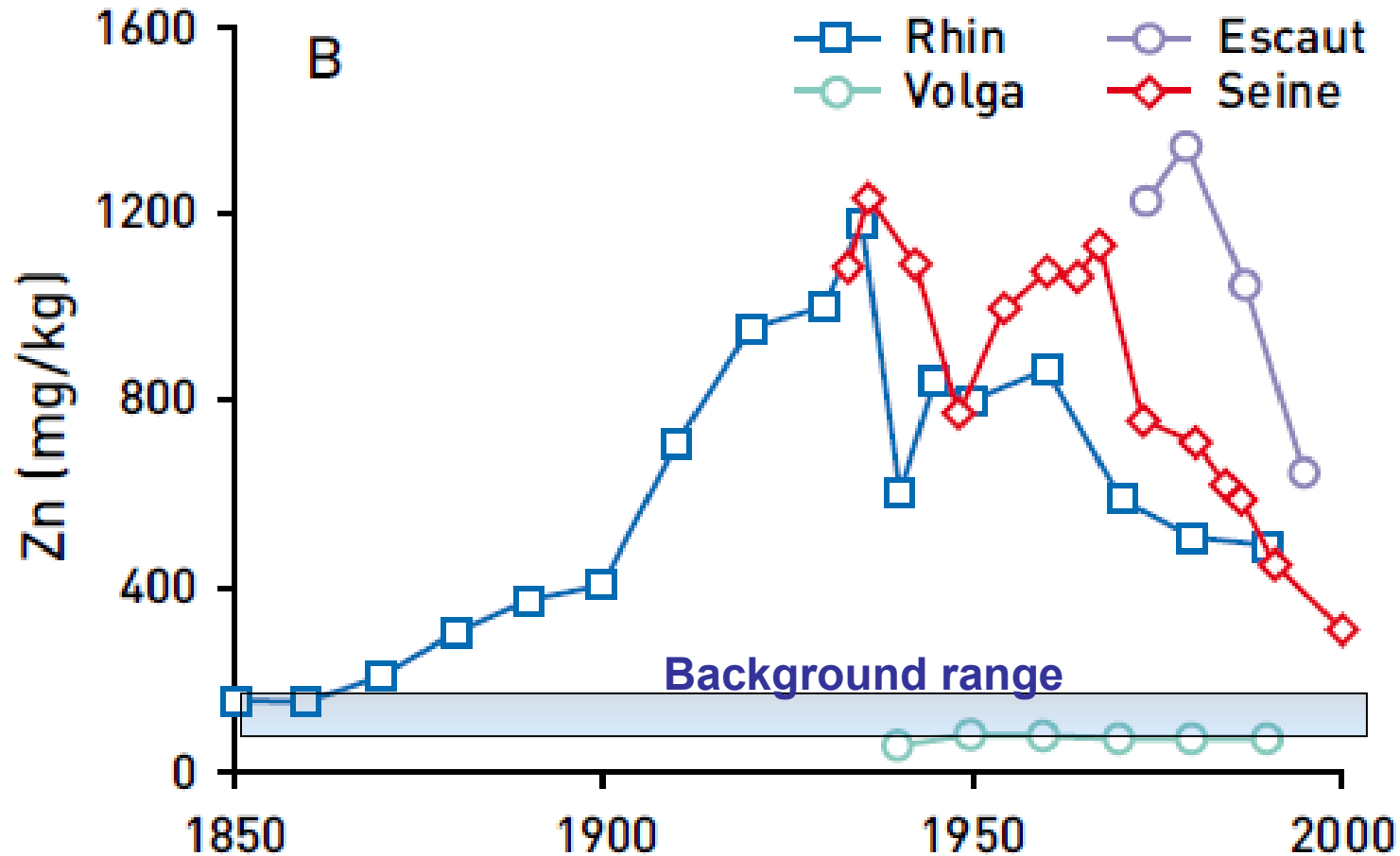
$\text{Cd} = \text{Hg} > \text{Pb} = \text{Zn} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Co}$



Contamination is not synchronous and has different amplitudes

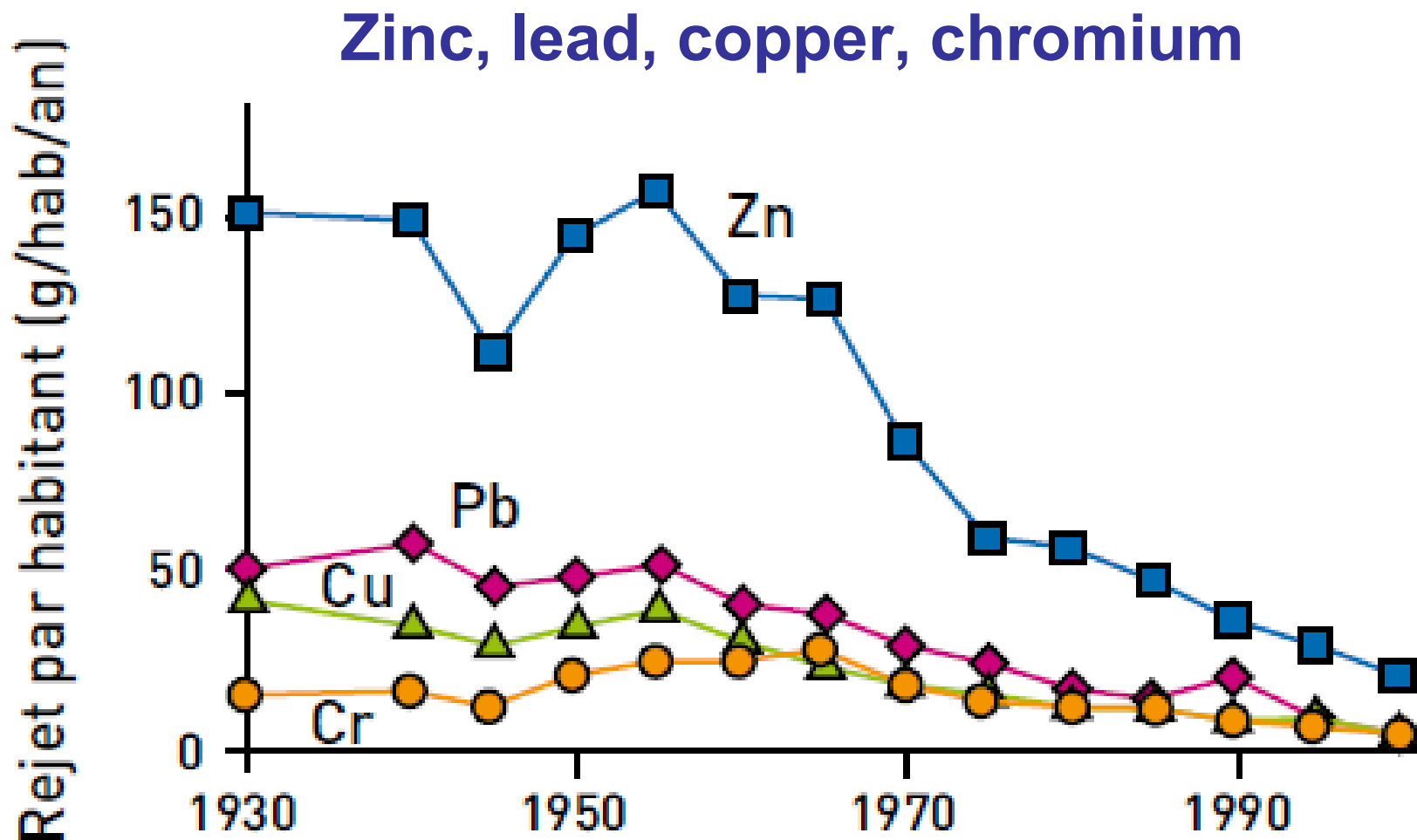
Metal contamination archives : zinc

Rhin, Volga, Escaut, Seine (mg/kg)



In Western Europe, zinc contamination from multiple sources has been generalised since 1850

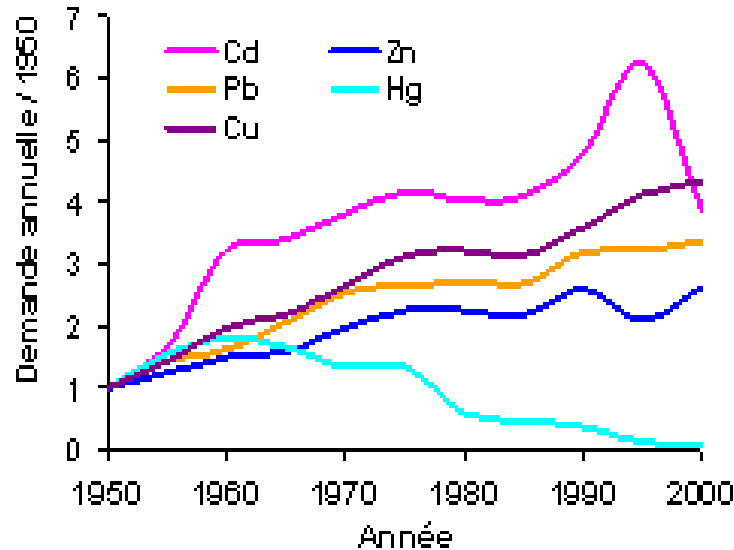
Excès de métaux (fuites) per capita , Seine, 1935-2000



Despite growing use of most metals all per capita leaks have markedly declined over the last 50 y. *i.e.* 15 y. before regulation started

Percent rate of leakage of metals in the Seine basin with regards metal uses (1935-2000)

Metal demand normalised to 1950

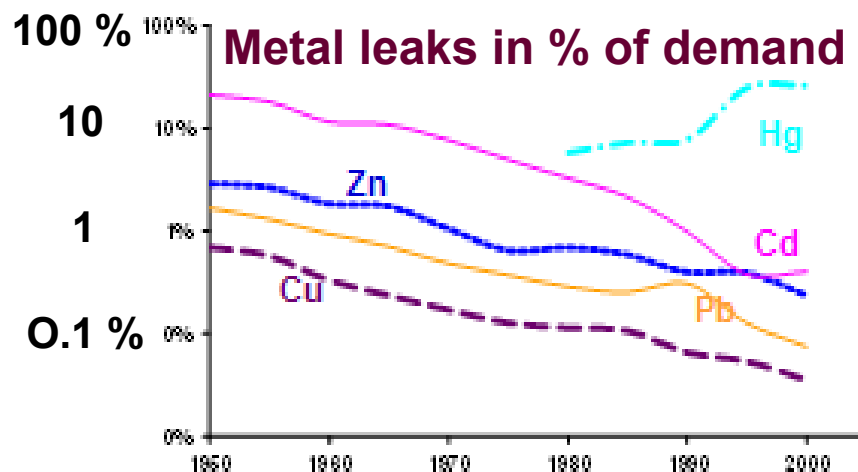


- Although the demand has increased from 1950 to 2000, leakage is exponentially decreasing for all metals, excepted Hg

- Copper leaks decreased 10 times, from 0.8 % to 0.5 %

- Hg leakage remains very high, although its demand dropped 40 times from 1960 to 2000

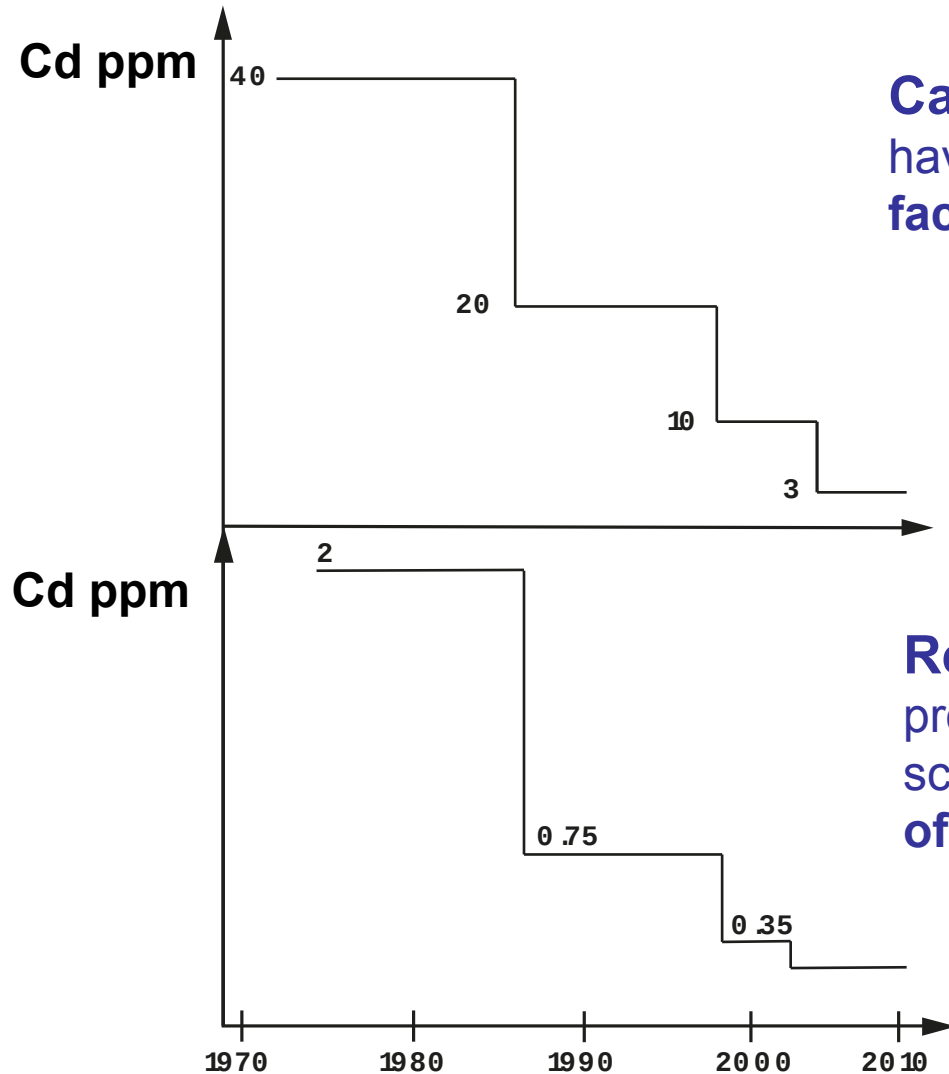
- Cadmium leakage has dropped 50 times since 1960, due to reuse and regulations



1. La *composition chimique* des eaux naturelles
2. L'impact des activités humaines

3. Complexité croissante de *la qualité : un problème sociétal*

Societal evolution : examples of policy makers (standards) and scientists (background) . Seine basin

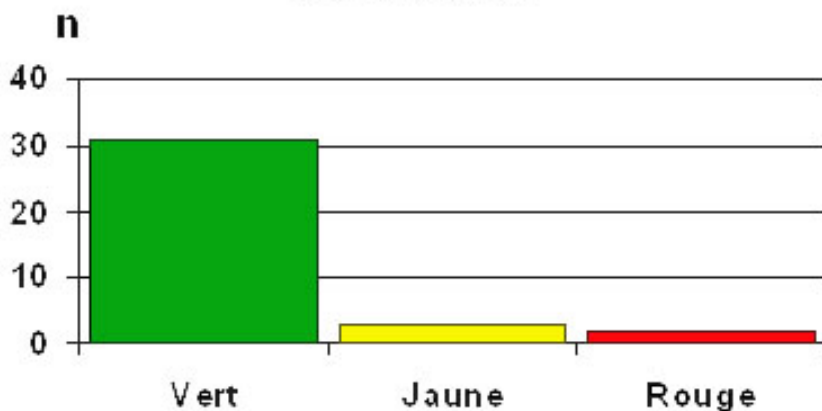


Cadmium standards for urban sludges have been decreased by policy makers by a **factor of 13 in 30 y.**

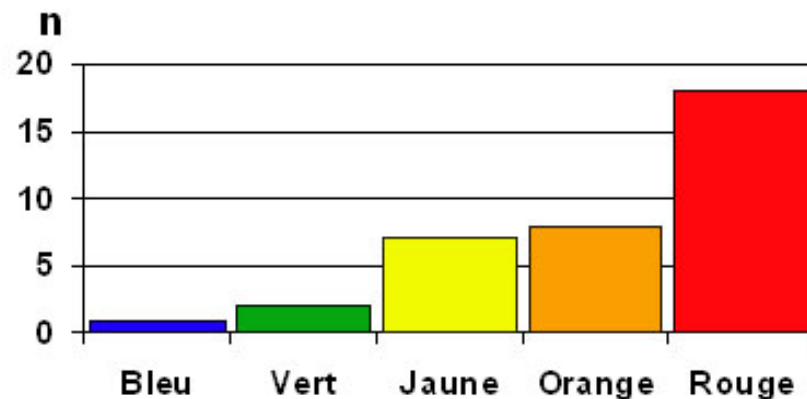
Reference background for cadmium provided by Basin authorities then by scientists has been decreased by a **factor of 10 in 30 y.**

Appréciation de la qualité des sédiments d'Artois-Picardie par trois échelles de qualité

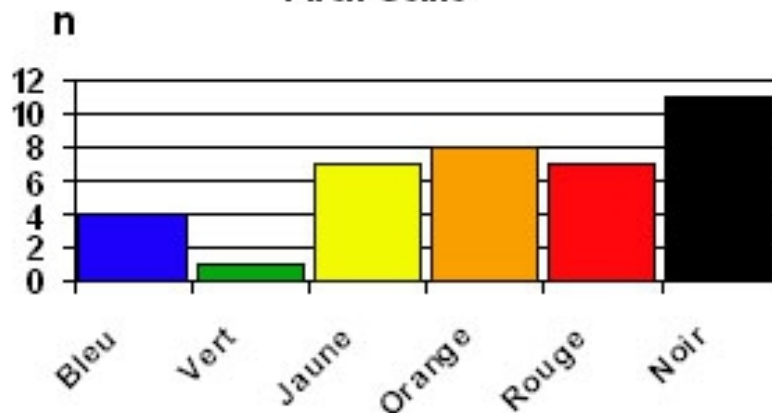
ECHELLE AEAP



SEQ-Eau VERSION 1



Piren-Seine

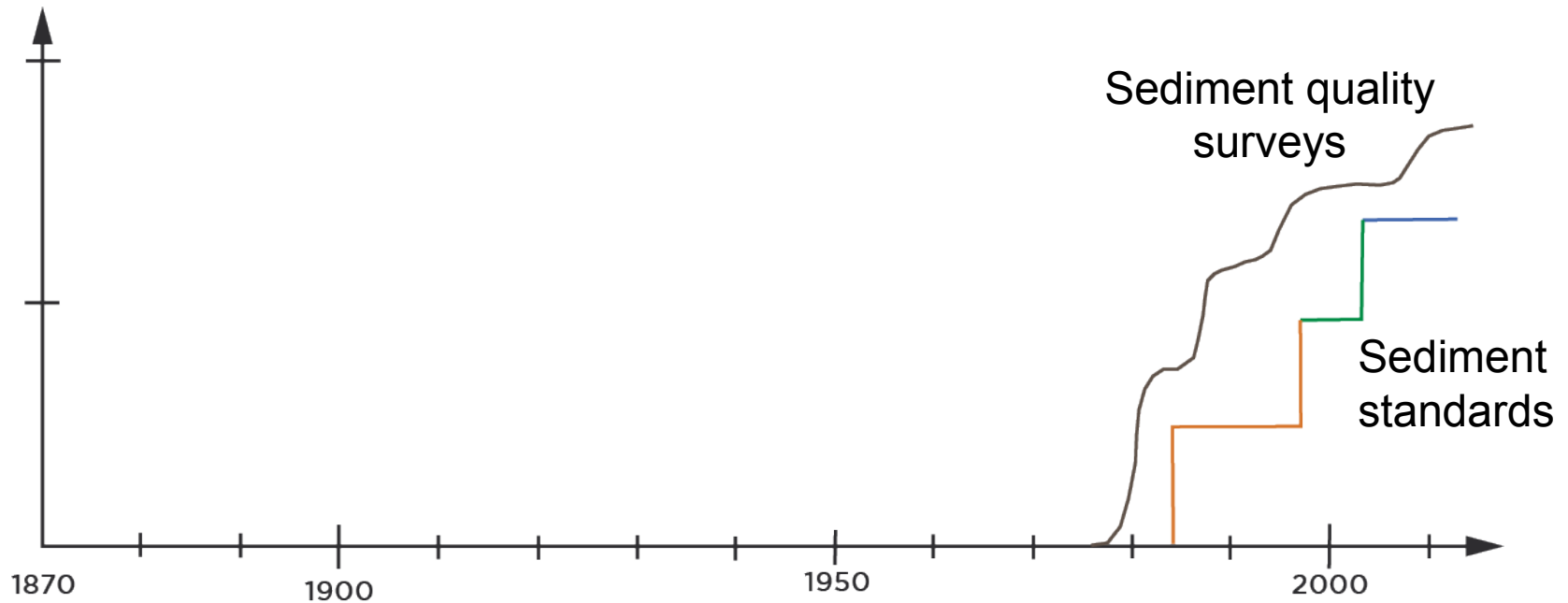


Noppe, 1996 (Données Artois-Picardie)

Pour un même jeu d'analyse, l'appréciation communiquée au public, au gestionnaire, au décideur, au Ministère, à l'IFEN et à l'Agence Européenne de l'Environnement **peut être très variable**

Evolution of metal contamination in river basins

The Seine example 1975-2010 : surveys and standards



La Seine va beaucoup mieux mais...

- **La Seine a été parmi les fleuves les plus contaminés du monde** avec des valeurs parfois multipliées de 100 à 500 par rapport aux teneurs naturelles, particulièrement de 1950 à 1970.
- **Elle reste encore très contaminée en Cd et en Hg** par rapport au bruit de fond naturel très bas
- **La Seine ne dispose pas de stock sédimentaire fluvial naturel permettant la dilution des polluants particuliers (métaux, POPs) à l'inverse du Rhône. Il en résulte une fragilité structurelle**
- **La décontamination fluviale, en dehors des héritages (mines/fonderies) s'opère depuis 1960 pour les métaux**

La prise de conscience des problèmes montre des décalages multiples:

- **Les analystes n'ont pu déceler la contamination qu'en 1971, soit 20 ans après son maximum. Puis il a fallu attendre 1980 pour que la surveillance opérationnelle du milieu et la mise en place systématique des mesures de contrôle (usages, rejets, traitements) soient mis en place**
- **Les scientifiques ont encore attendu 10 ans (1990) pour s'intéresser au problème**
- **Ces 15 dernières années voient un changement radical dans les critères d'appréciation de la contamination avec la prise en compte de la valeur écologique (patrimoniale) du milieu aquatique par le SEQ-Eau qui a précédé de quelques années la Directive Cadre Européenne**

HERITAGES – GESTION DES POLLUTIONS HERITEES

- Dans l'état actuel de la réglementation, les sédiments fluviaux contaminés correspondent à une pollution orpheline
- Si ces sédiments sont retirés au milieu par l'institution gestionnaire (ex: EDF pour les réservoirs, VNF pour les dragages), leur devenir leur incombe, alors qu'ils peuvent être considérés comme des déchets.
- Un problème semblable est posé aux gestionnaires des stations de traitement d'eaux usées qui ne maîtrisent pas les sources polluantes (industries, hôpitaux) qui leur sont raccordées

Exemple du cadmium dans le Lot

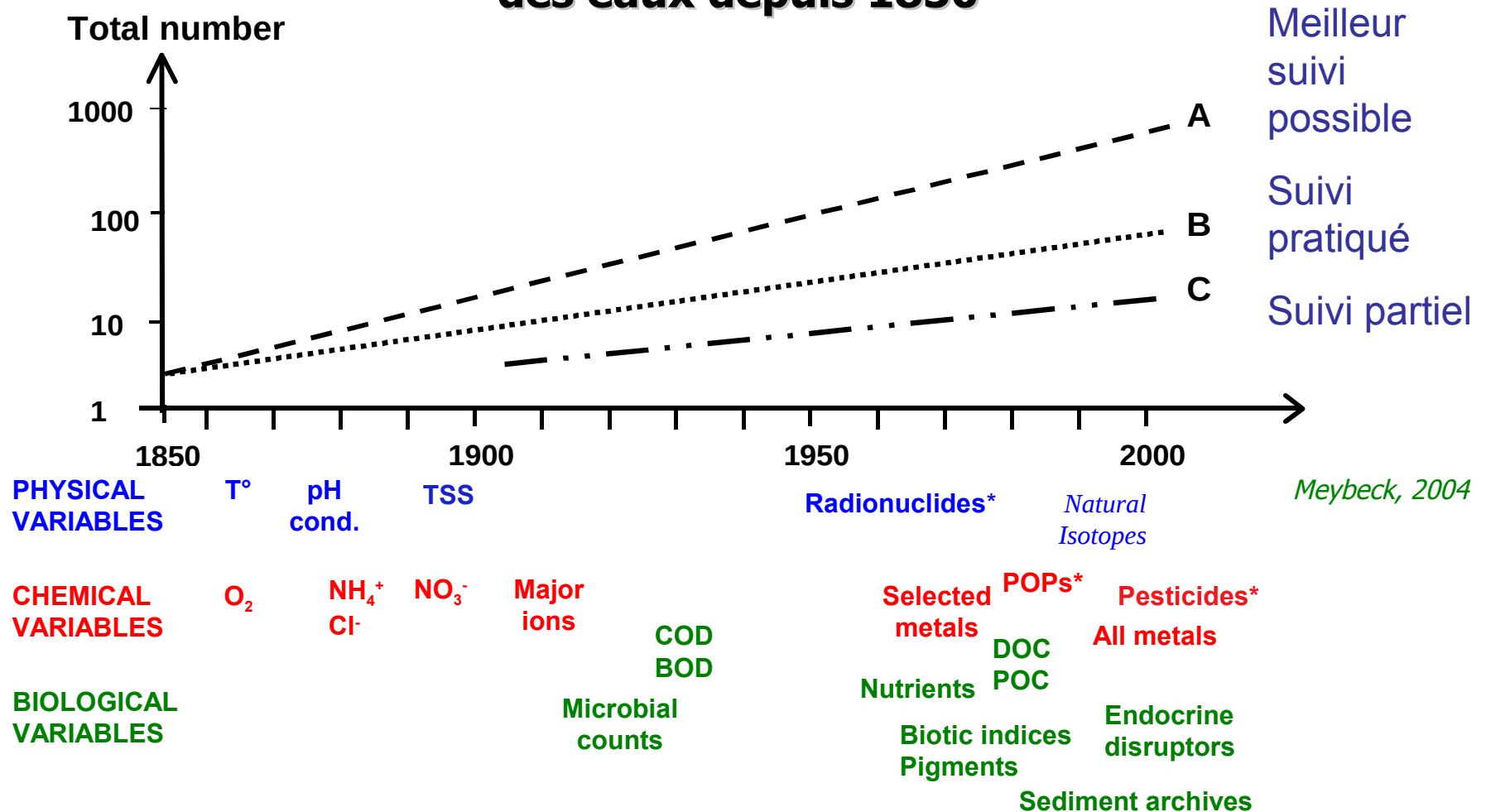
En décembre 2002, l'ouverture des barrages sur le Lot lors d'une très forte crue a **déstocké 10 000 t. de sédiments anciens très contaminés** (32 mg.kg⁻¹ de Cd, 1500 de Zn) en 3 jours, soit 6.5 t. de Cd, 21.5 t. de Pb, 270 t. de Zn (l'équivalent de 5 années de flux actuels de la Seine en cadmium).

Comment prévenir une telle catastrophe? À qui l'imputer?

(Coynel et al., 2005 - Univ. Bordeaux

Où va-t-on?

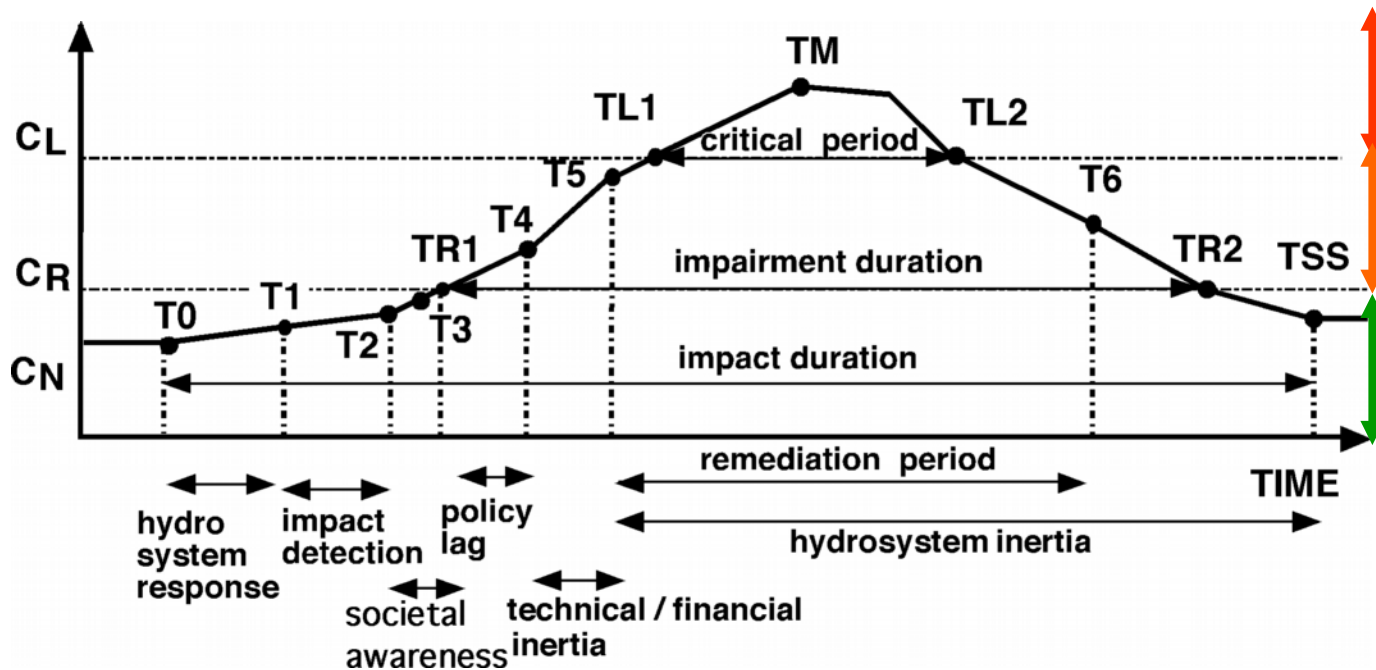
Croissance exponentielle des variables de la qualité des eaux depuis 1850



* : non natural products

Le développement analytique contrôle l'émergence de la perception des problèmes

Schéma d'une restauration de fleuve réussie

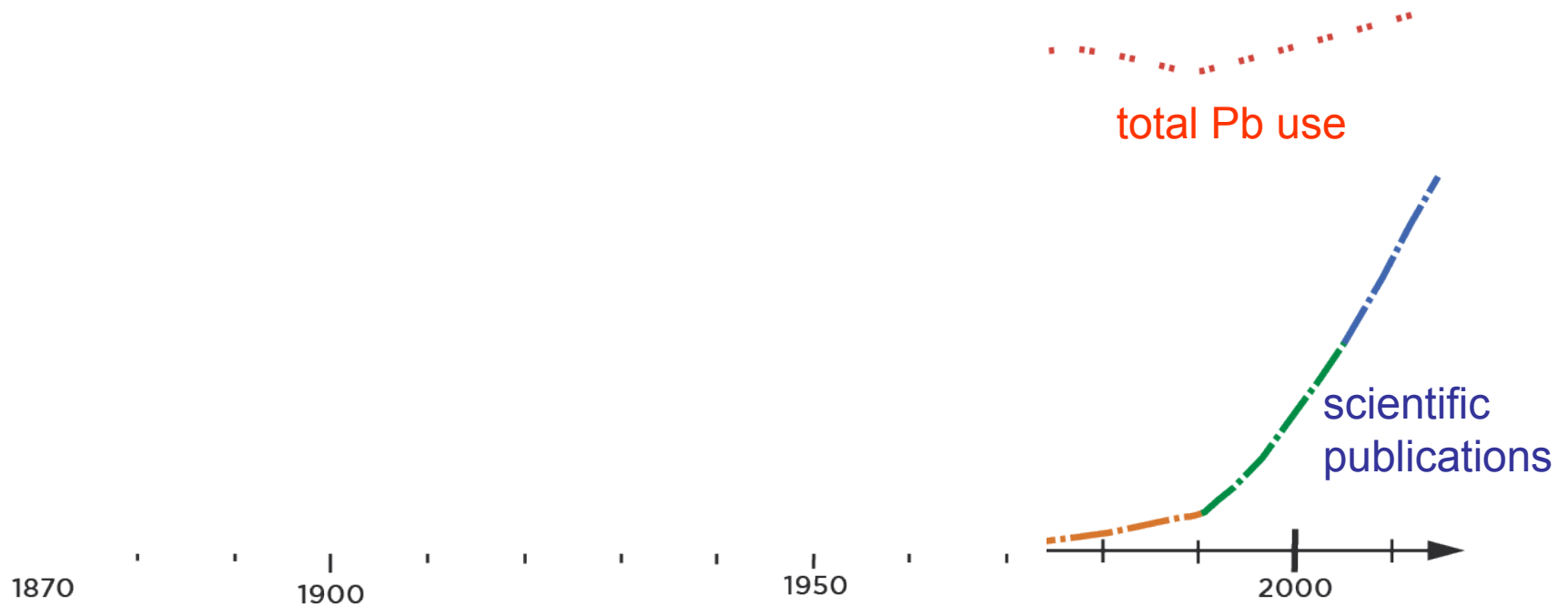


La résolution des problèmes de qualité des bassins fluviaux prend 1 à 2 générations

- Les inerties sociales peuvent s'additionner aux inerties des milieux aquatiques, entraînant des décalages entre les réponses et les changements d'états des milieux.
- Dans certains cas les contaminations perdurent sur des siècles.
- Les changements de structure des bassins (réservoirs, réseaux d'égouts etc.) produisent des effets sur des siècles.
- La restauration de la morphologie fluviale prend des siècles, celle de la contamination bactérienne est très courte.

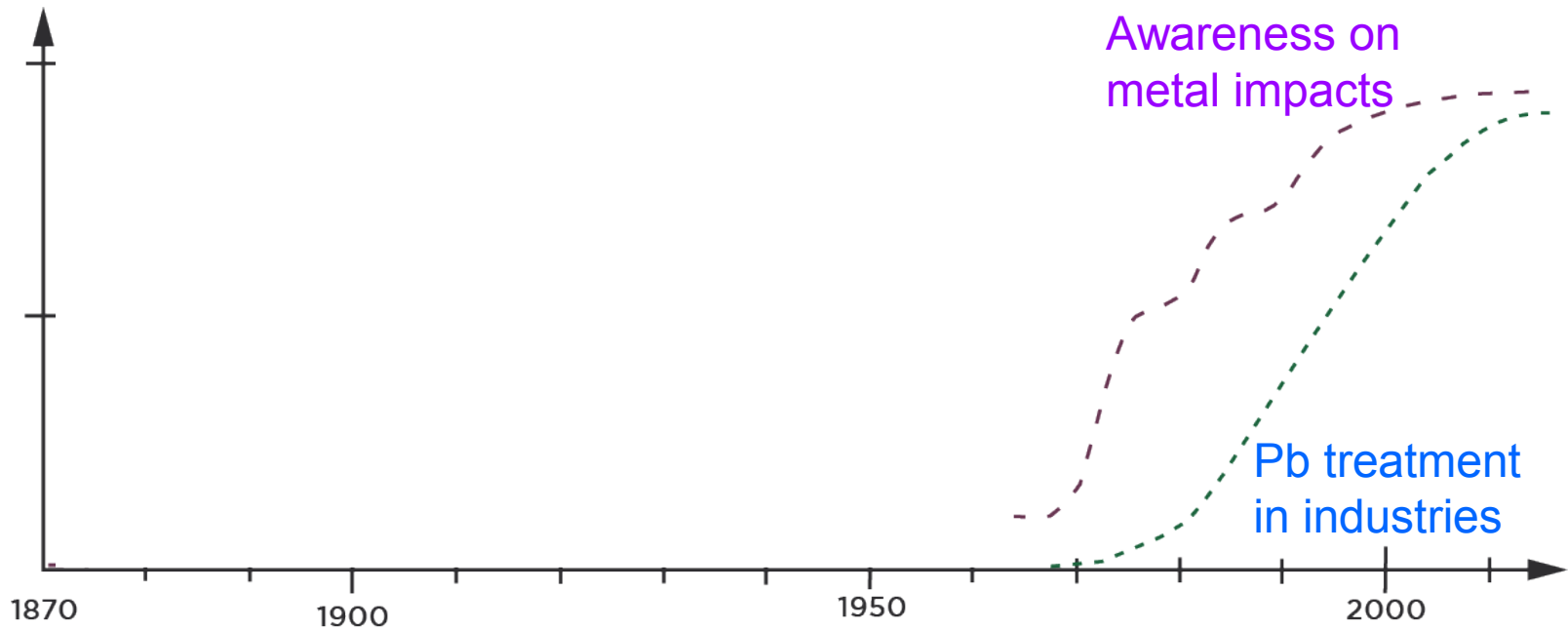
Evolution of metal contamination in river basins

The Seine example 1975-2010: Pb use, scientific publications



Evolution of metal contamination in river basins

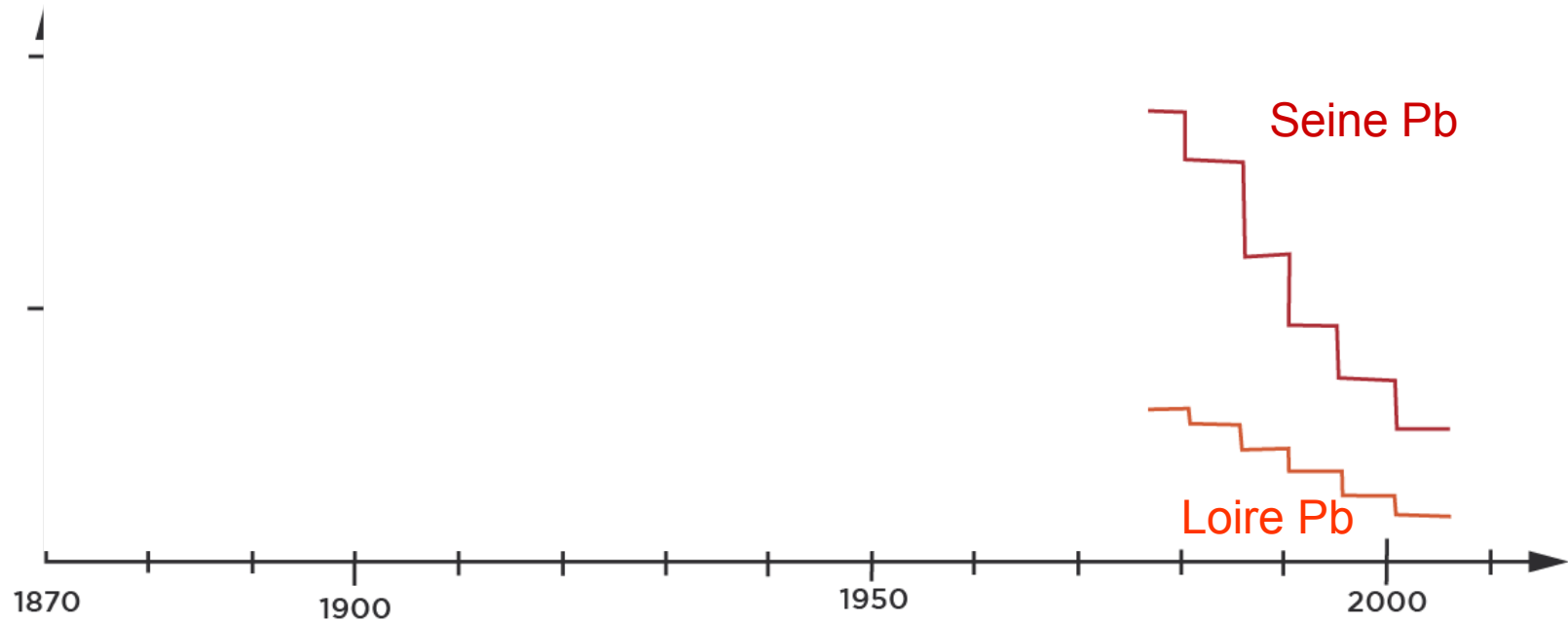
The Seine example 1965-2010



Evolution of metal contamination in river basins

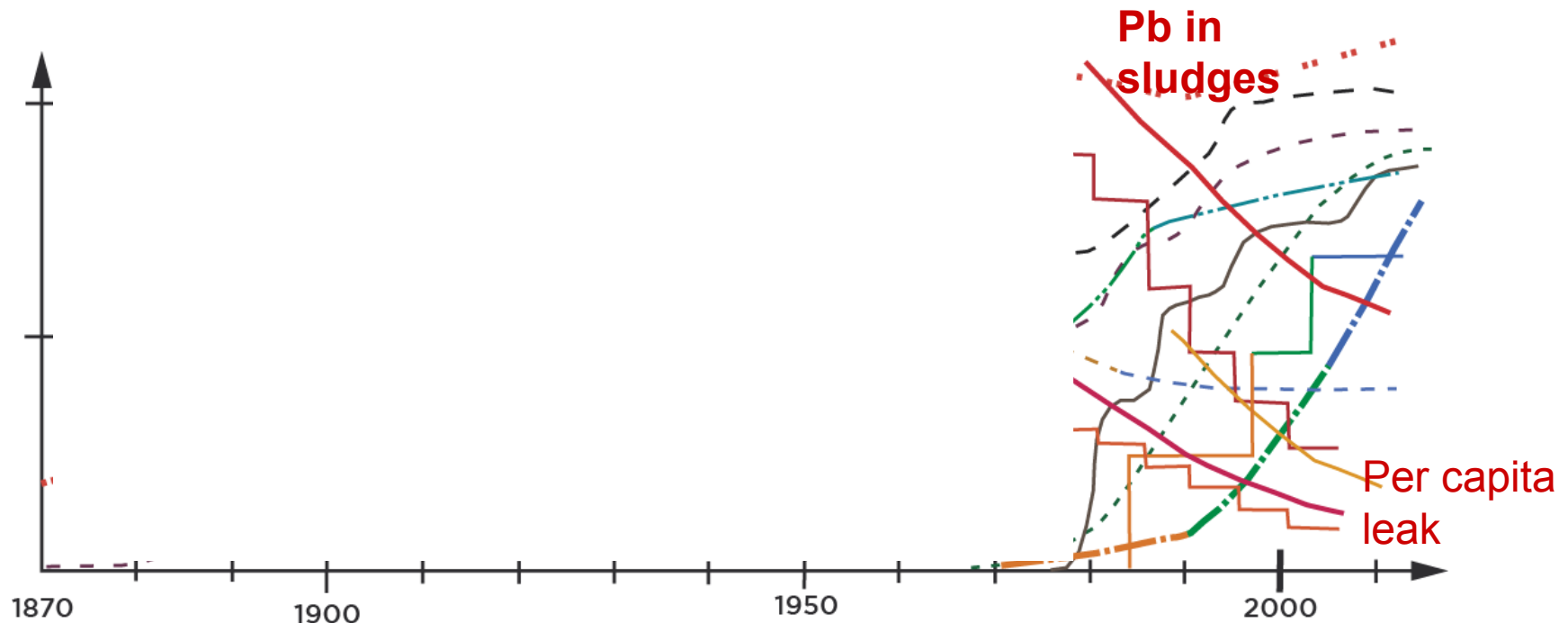
The Seine and Loire examples 1975-2010

trends of Pb contamination



Evolution of metal contamination in river basins

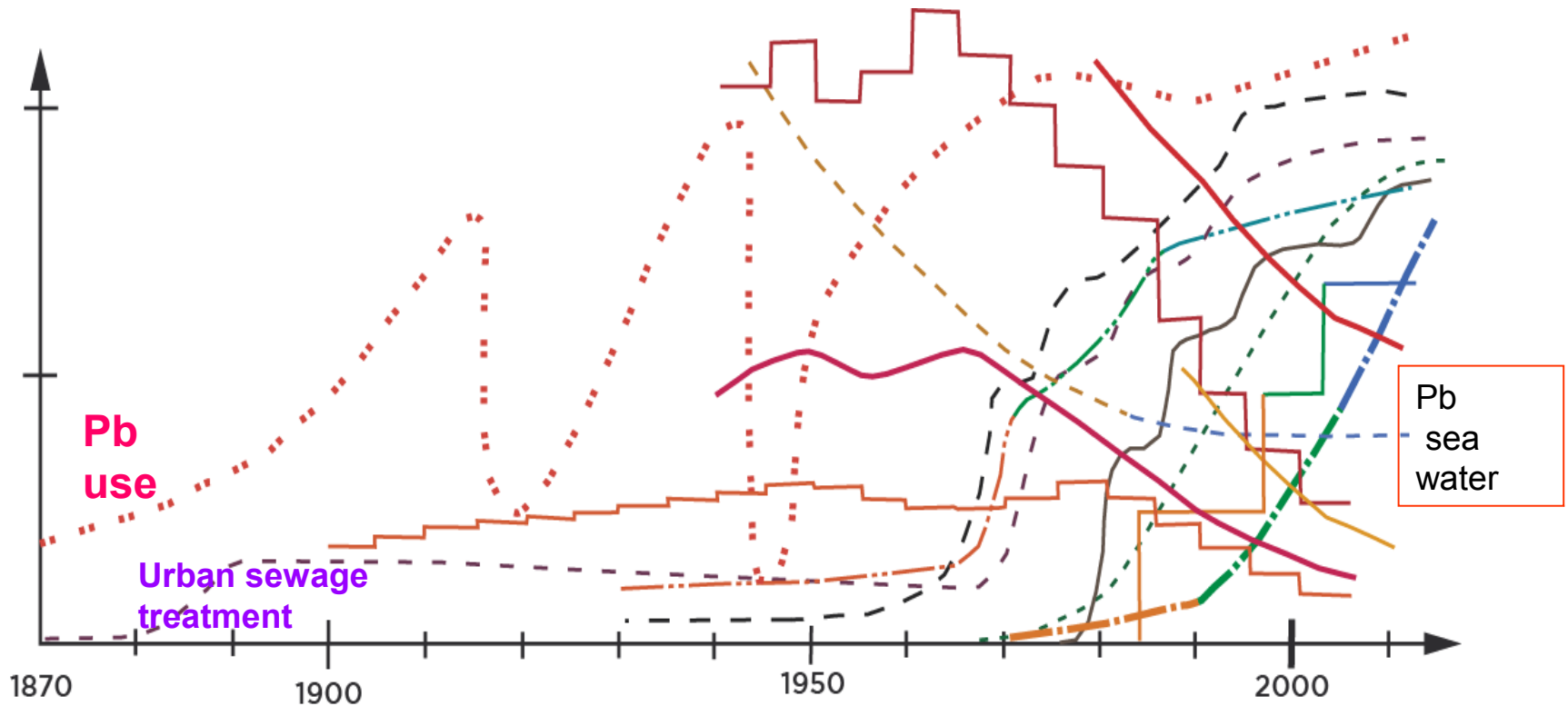
The Seine example 1975-2010



Many societal interactions between actors (decision makers, river managers, scientists, citizen groups, economic actors...) should be analysed to understand the evolution of contamination and forecast its future under different scenarios

Long term evolution of metal contamination in river basins

The Seine example 1870-2010

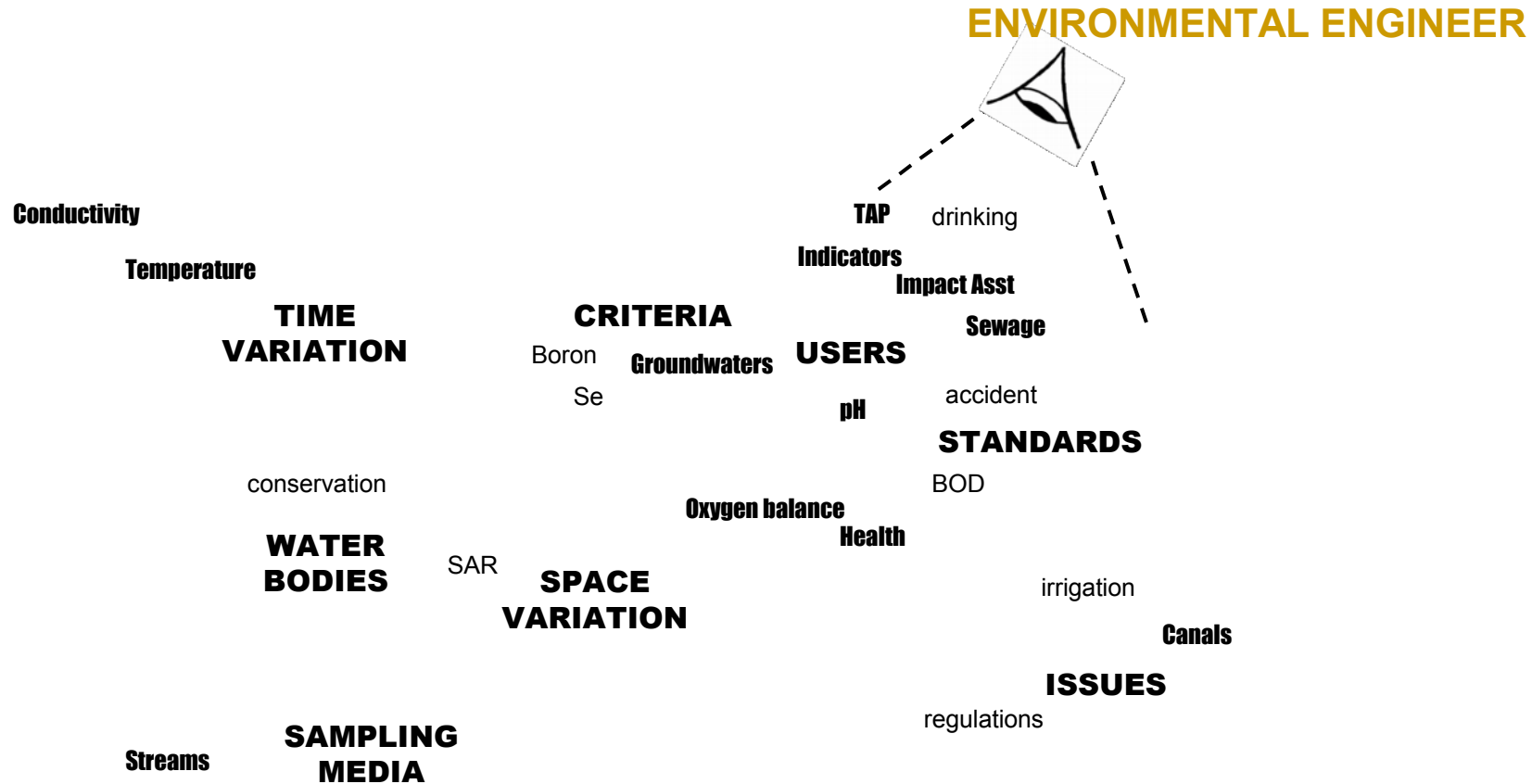


La complexité est propre à chaque pays, à chaque bassin, et même à chaque station

Elle ne peut être approchée qu'en combinant des sciences « dures » et des sciences humaines

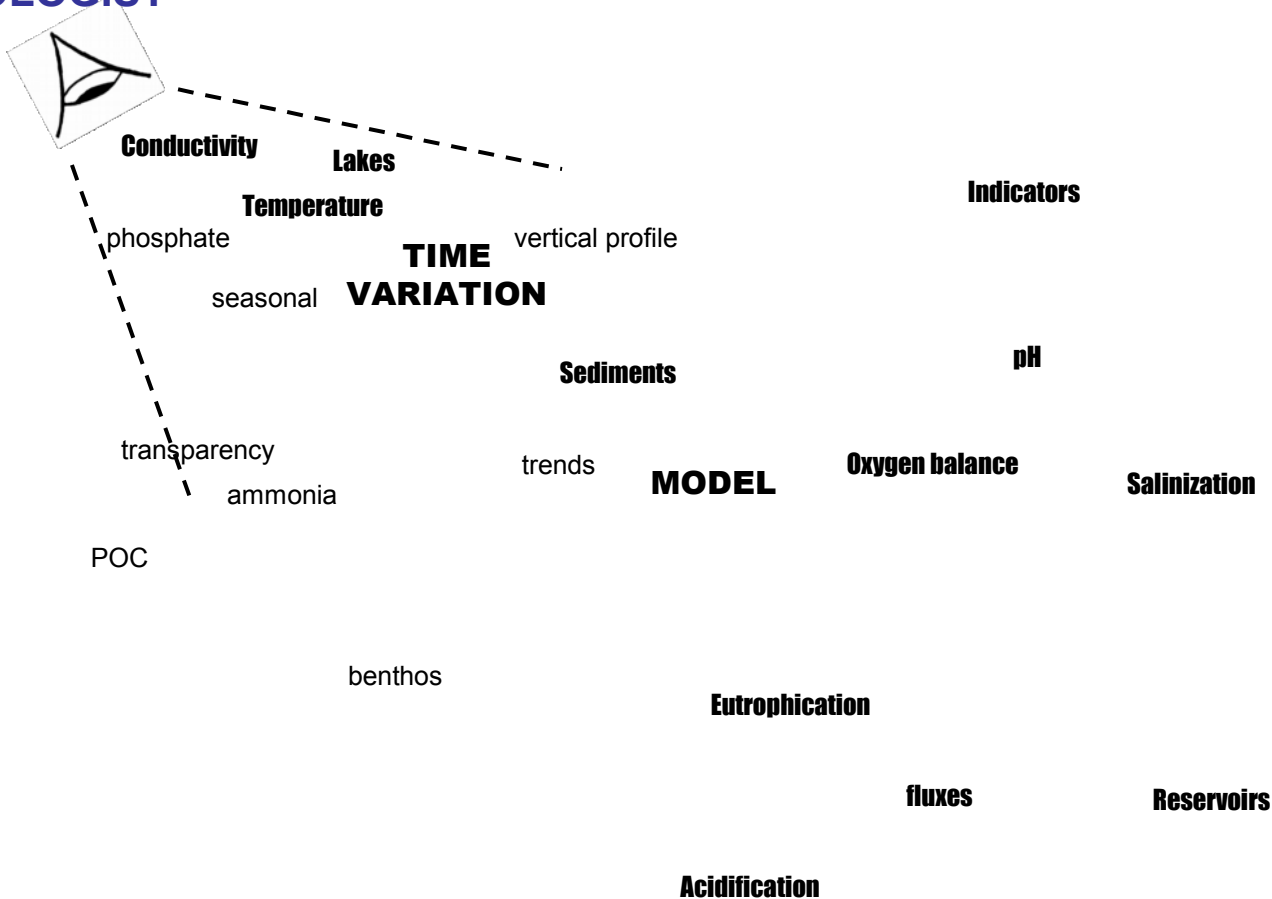
Le facteur historique est essentiel

Les points de vue biaisés



Les points de vue biaisés

LIMNOLOGIST



A stick figure is holding a magnifying glass. The lens of the magnifying glass is focused on the word 'QUALITY'. The word is written in a circular arrangement, with 'QUAL' on the left and 'ITY' on the right. The stick figure is smiling and has radiating lines above its head, suggesting it is happy or enlightened.



1. Dans une société, la qualité de l'eau est perçue très différemment suivant les individus et les groupes sociaux
- 2 . La qualité des eaux (définition, appréciation, protection) est une construction des sociétés
- 3 . Notre appréciation de la qualité de l'eau a beaucoup évolué avec
 - . les techniques d'analyse
 - . la nature et l'ampleur des pressions anthropiques
 - . les moyens attribués à la surveillance du milieu aquatique

Le futur

- Comprendre les **interactions Homme - Eau** est essentiel pour établir les scénarios du futur.
- **Elles dépendent** des conditions naturelles locales, des besoins en eau, du développement économique, politique et social (« water literacy »).
- **Mais aussi** des héritages passés : structures (barrages), pollutions héritées (mines), culture (tout à l'égout), politique (réglementation, police des eaux).
- Le Système Terre doit être considéré dans son ensemble (ex: dénitrification, eutrophisation côtière, transferts de sédiments)