



Association internationale
des hydrogéologues
(SNC-Qc)

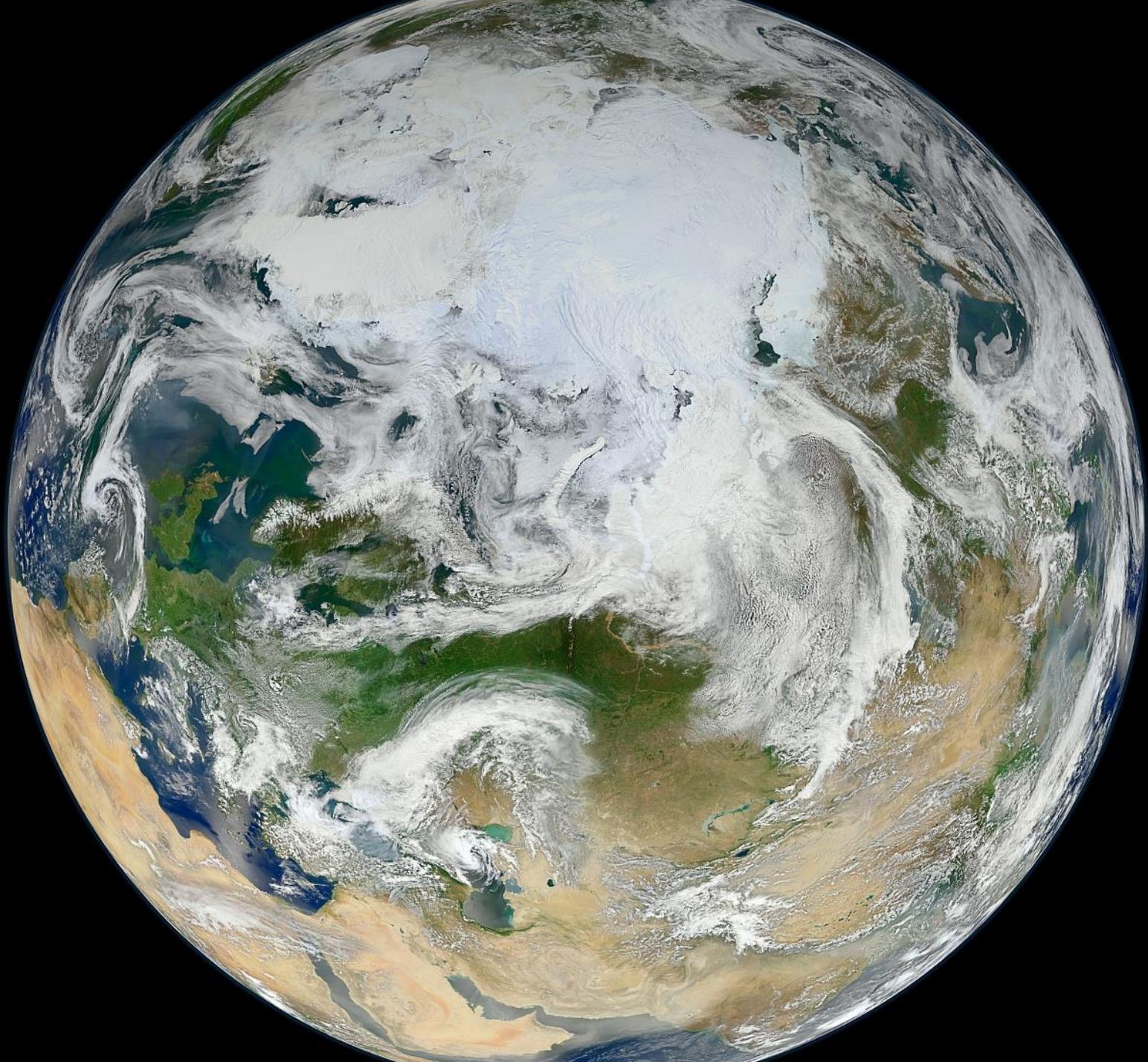
Le cycle de l'eau et l'adéquation besoins-ressources au XXI^osiècle

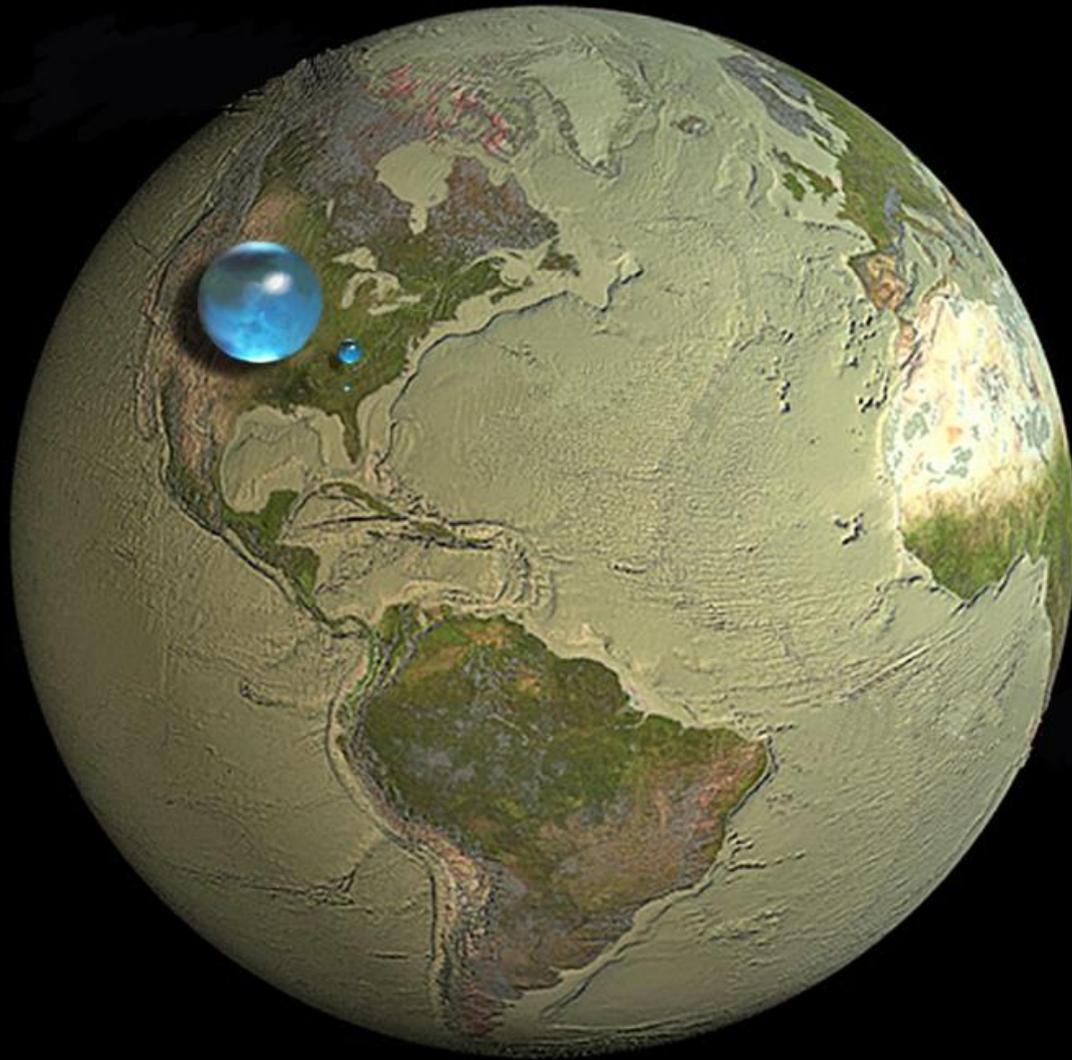
Ghislain de Marsily

**Vendredi 22 Avril 2016
UQAM, Montréal**

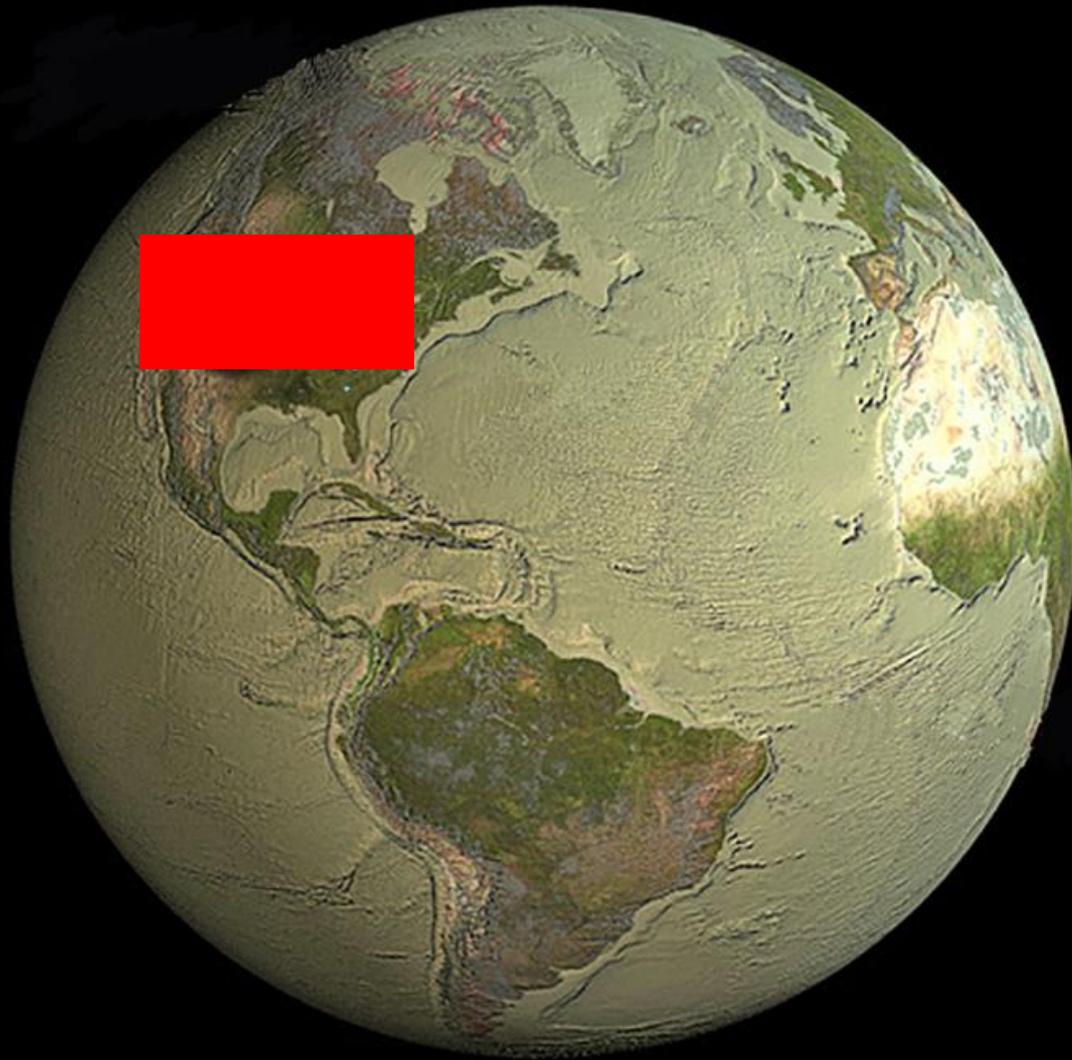


**INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences**





**Volume d'eau sur terre, eau salée, eau douce, eau douce non gelée.
Document US Geological Survey, USA**

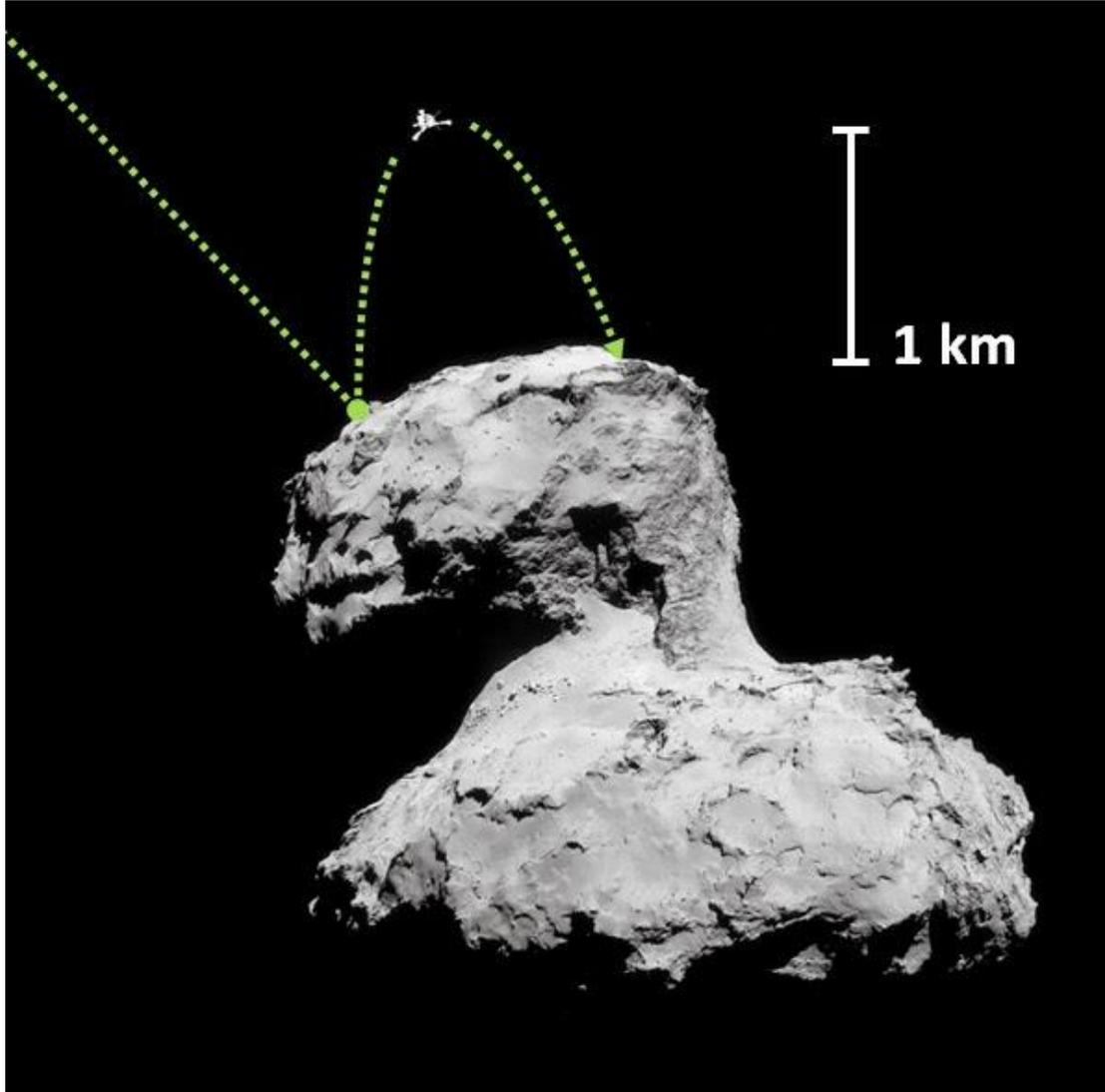


D'où vient l'eau sur Terre ???

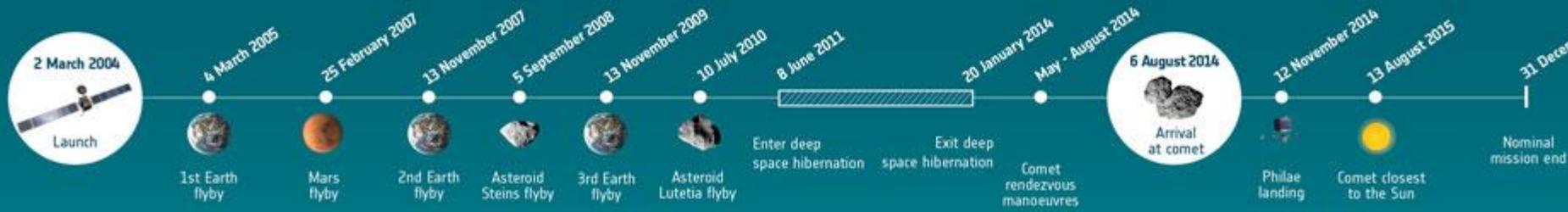
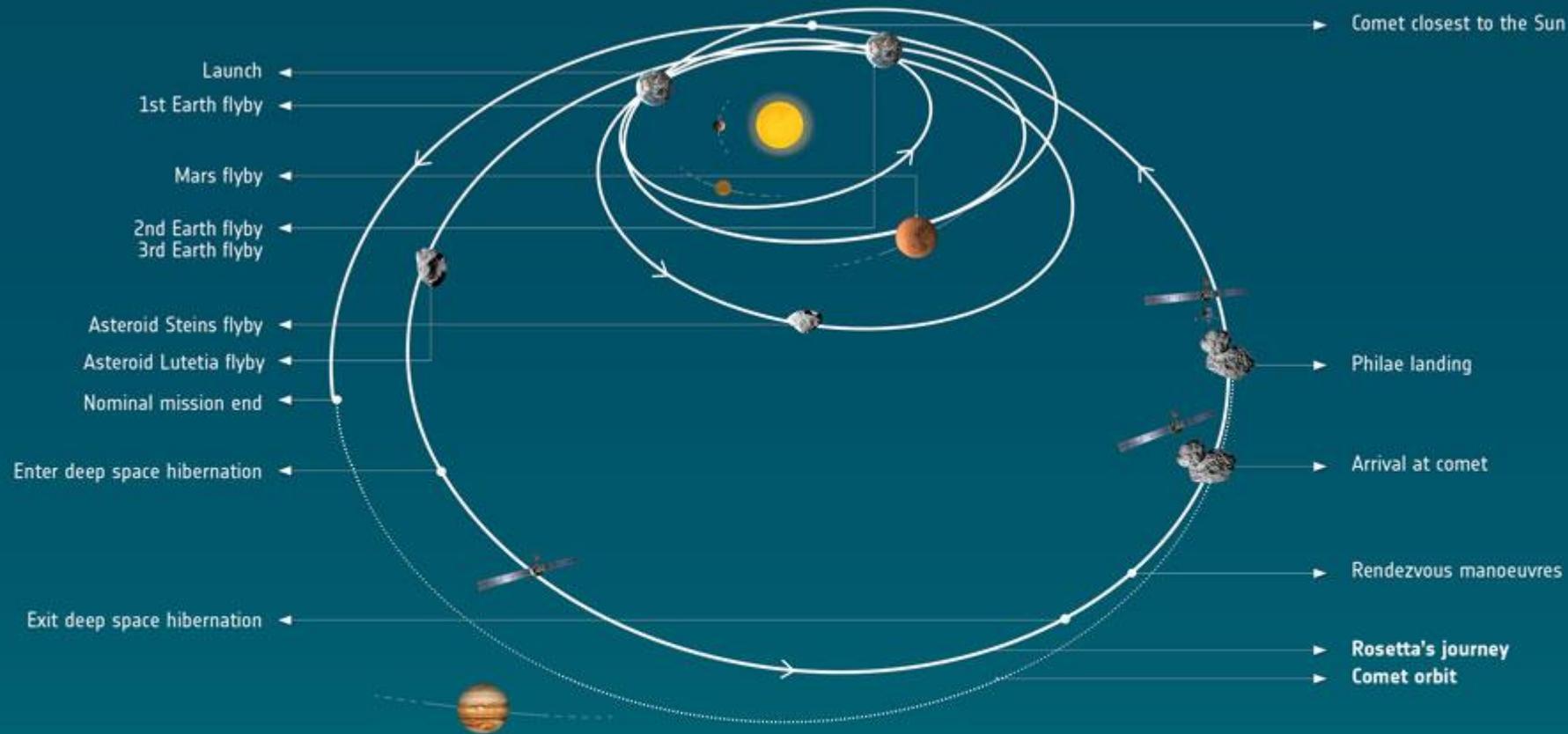
Comète 67P/Churyumov-Gerasimenko

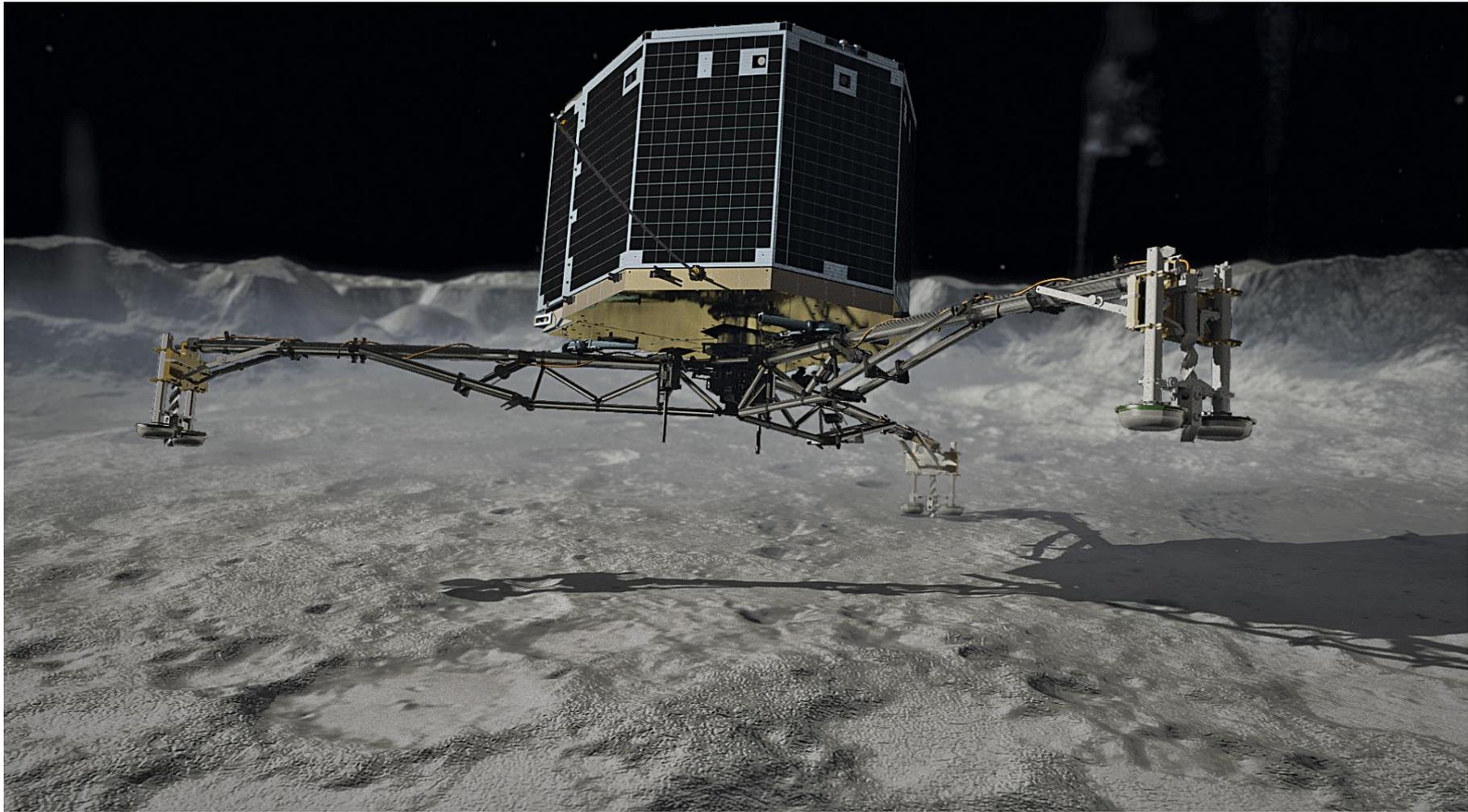
Mission ESA Rosetta-Philae

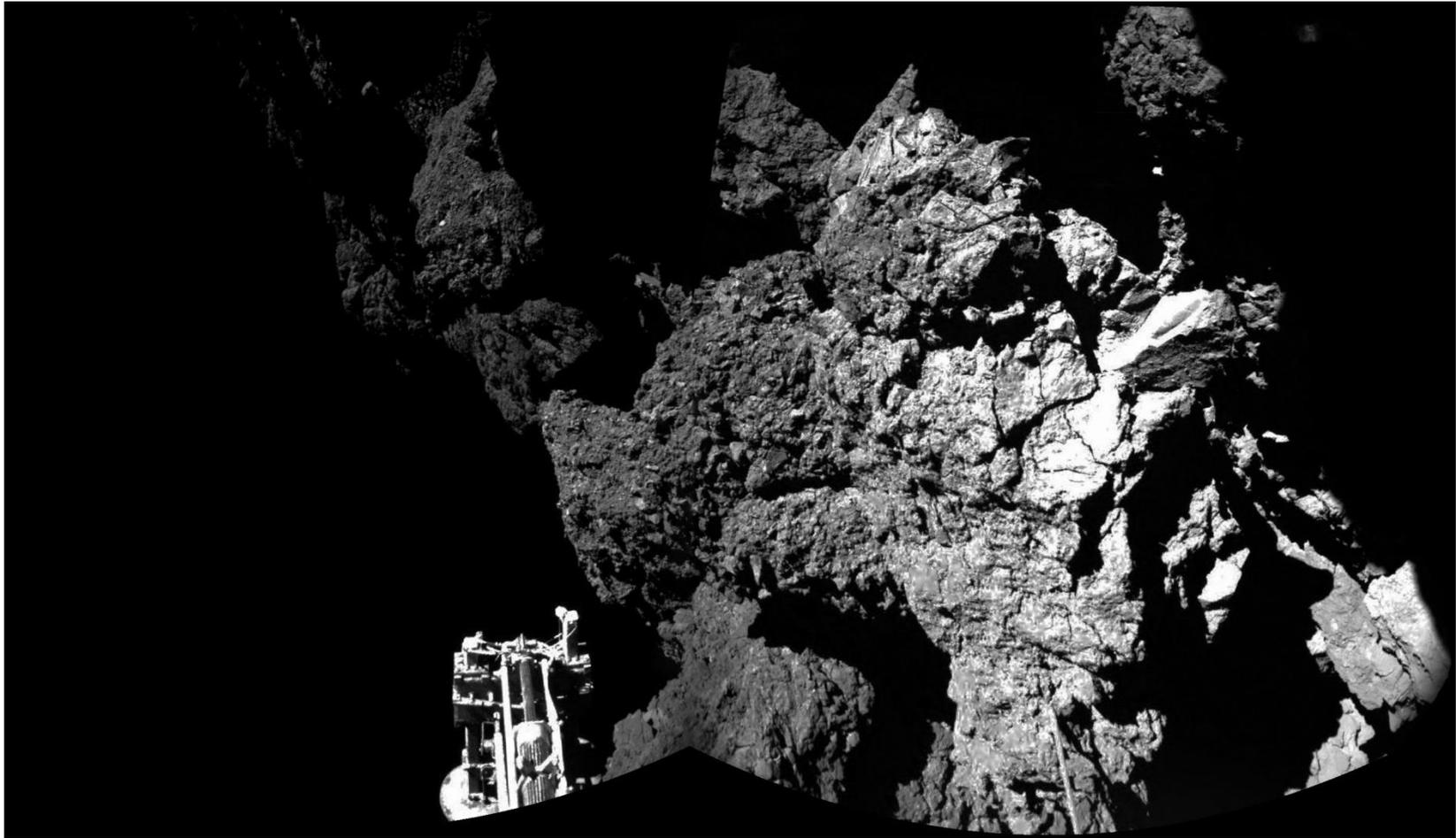
12 Novembre 2014



→ ROSETTA'S JOURNEY







Philae, à 313 millions de km de nous (le 8 Juin 2015)

Bilan en eau de la Planète

1. Flux et Stocks

Rappel...

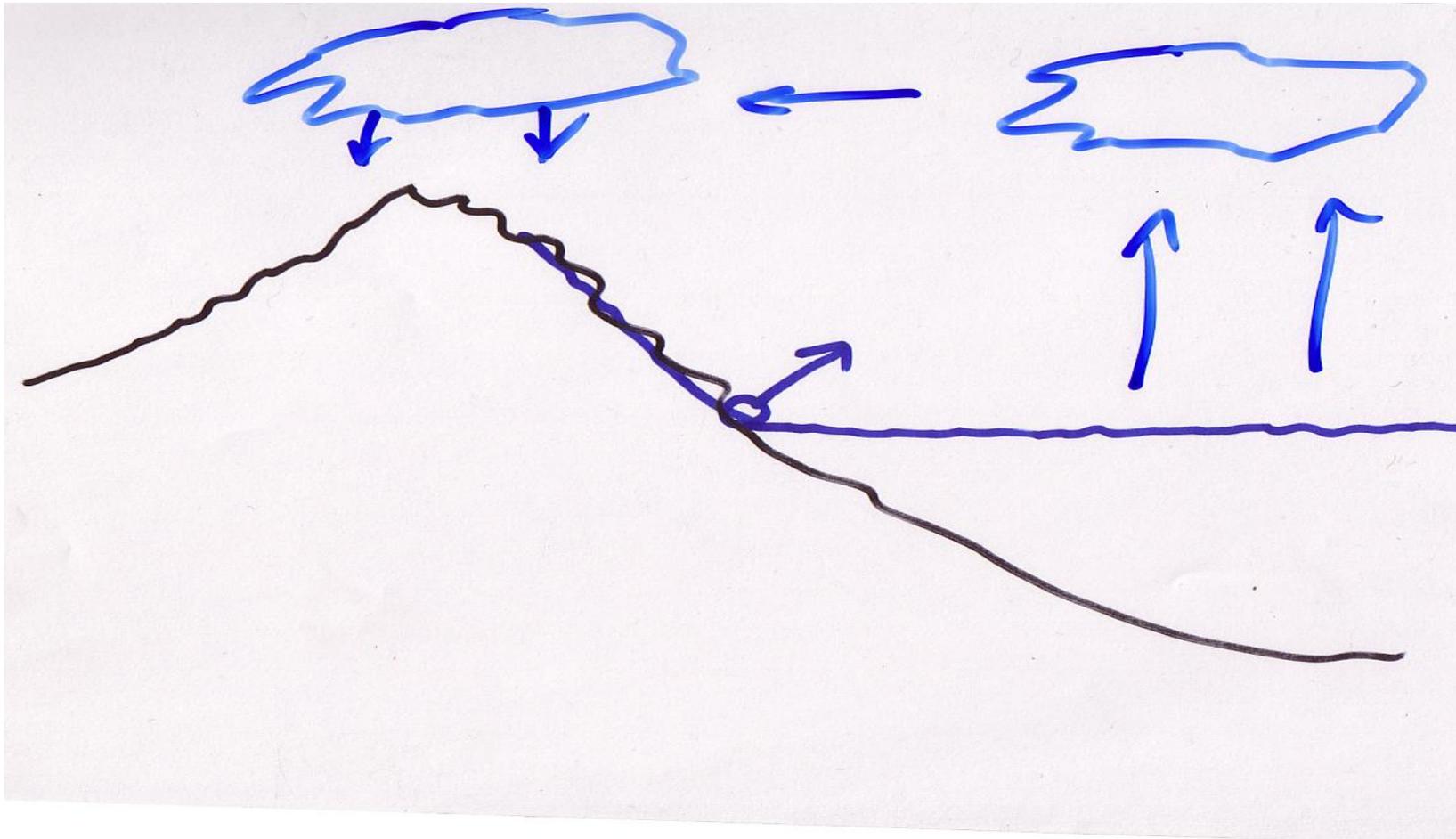
- Le stock total d'eau sur Terre est **à peu près constant...**

-Pertes dans la haute atmosphère :

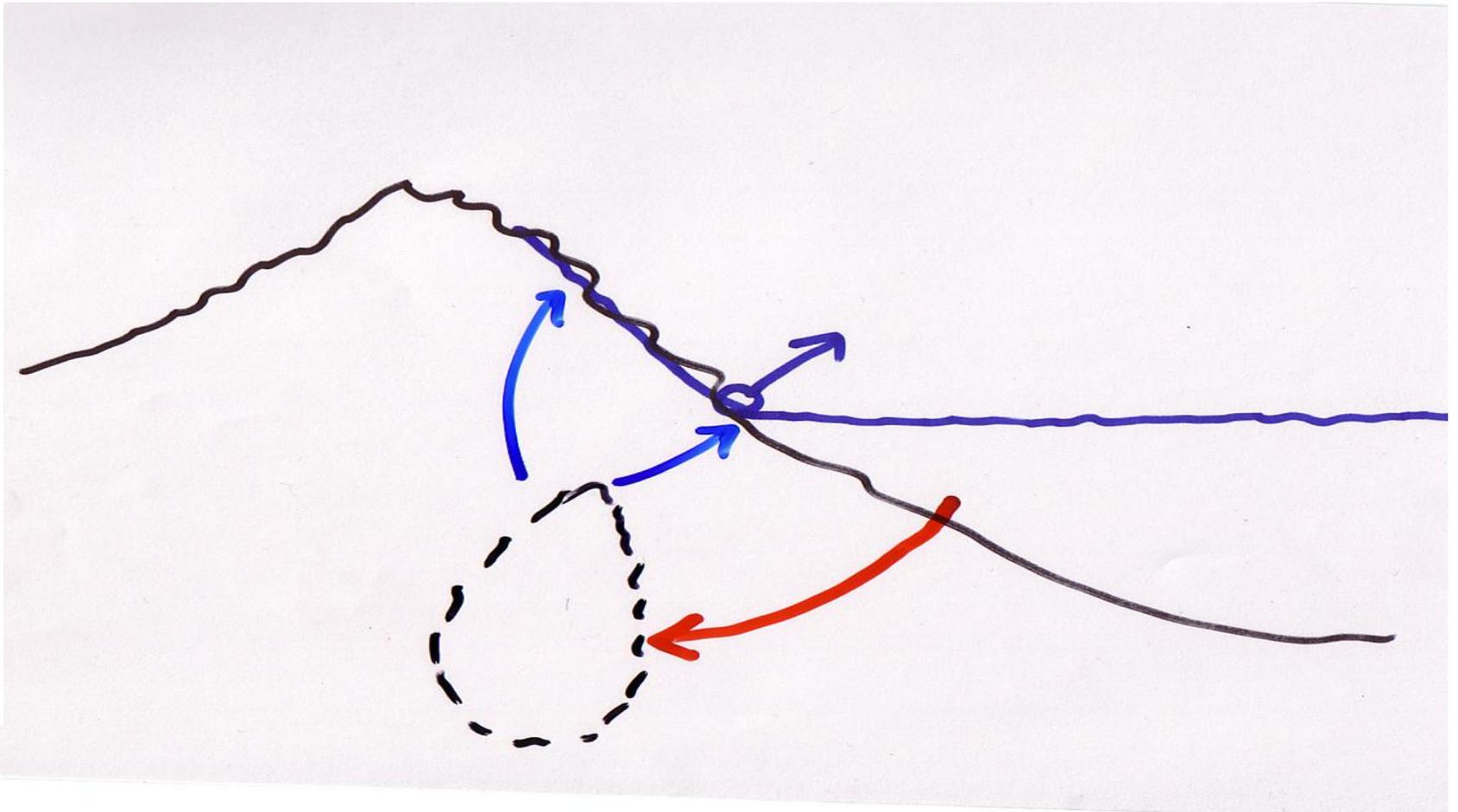


Perte de ~ 3 m d'eau en 4.6 milliards d'années...

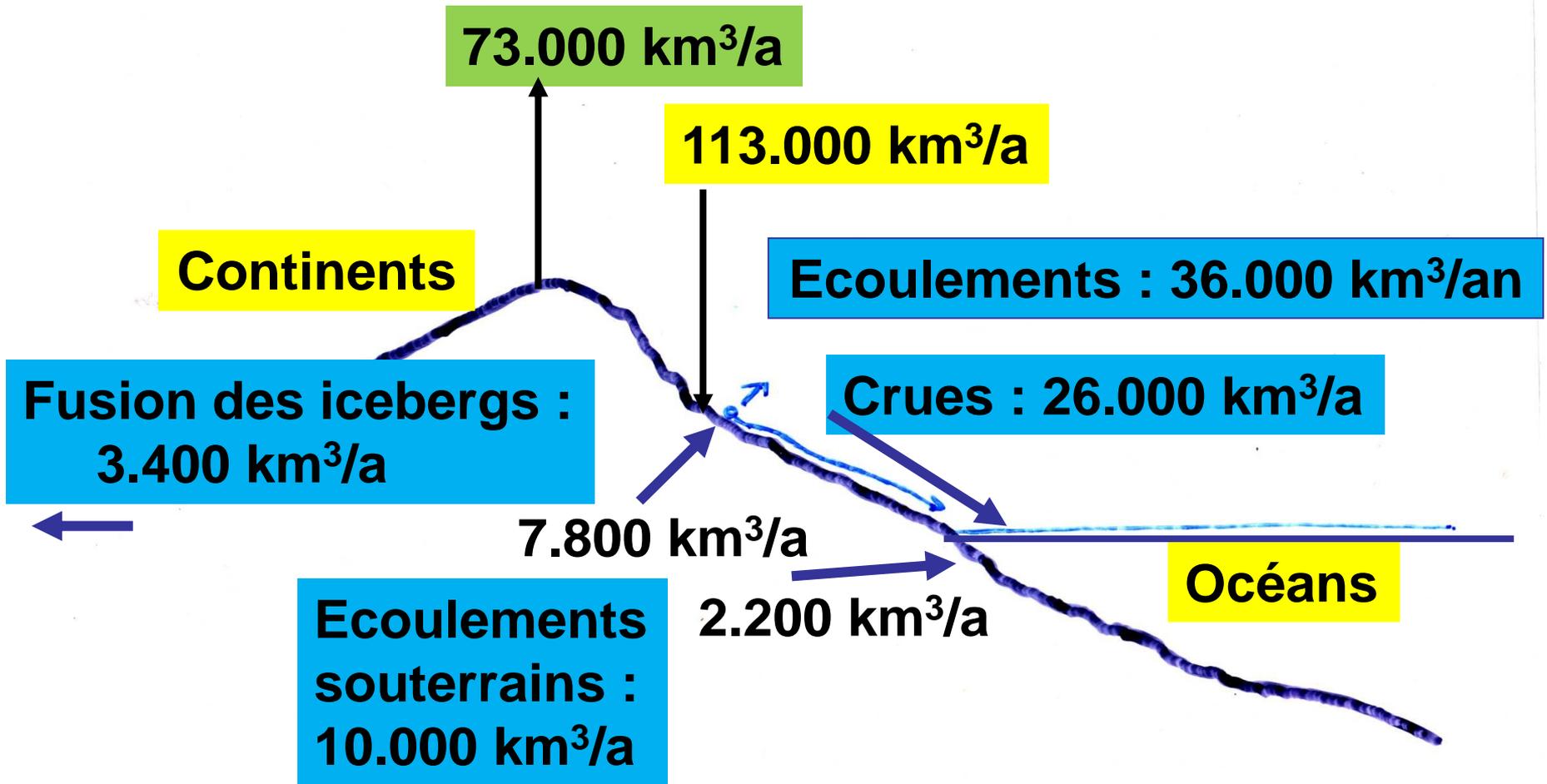
Le Cycle de l'Eau per ascensum



Le Cycle de l'Eau Per descensum



Bilan....



Ecoulement généralement dit "récupérable": 29.000 km^3/a ?
(consommation actuelle : 2.500 km^3/an)

Bilan....

Eau verte

73.000 km³/a

113.000 km³/a

Eau bleue

Continents

Ecoulements : 36.000 km³/an

**Fusion des icebergs :
3.400 km³/a**

Crues : 26.000 km³/a

7.800 km³/a

**Ecoulements
souterrains :
10.000 km³/a**

2.200 km³/a

Océans

**Ecoulement généralement dit "récupérable": 29.000 km³/a ?
(consommation actuelle : 2.500 km³/an)**

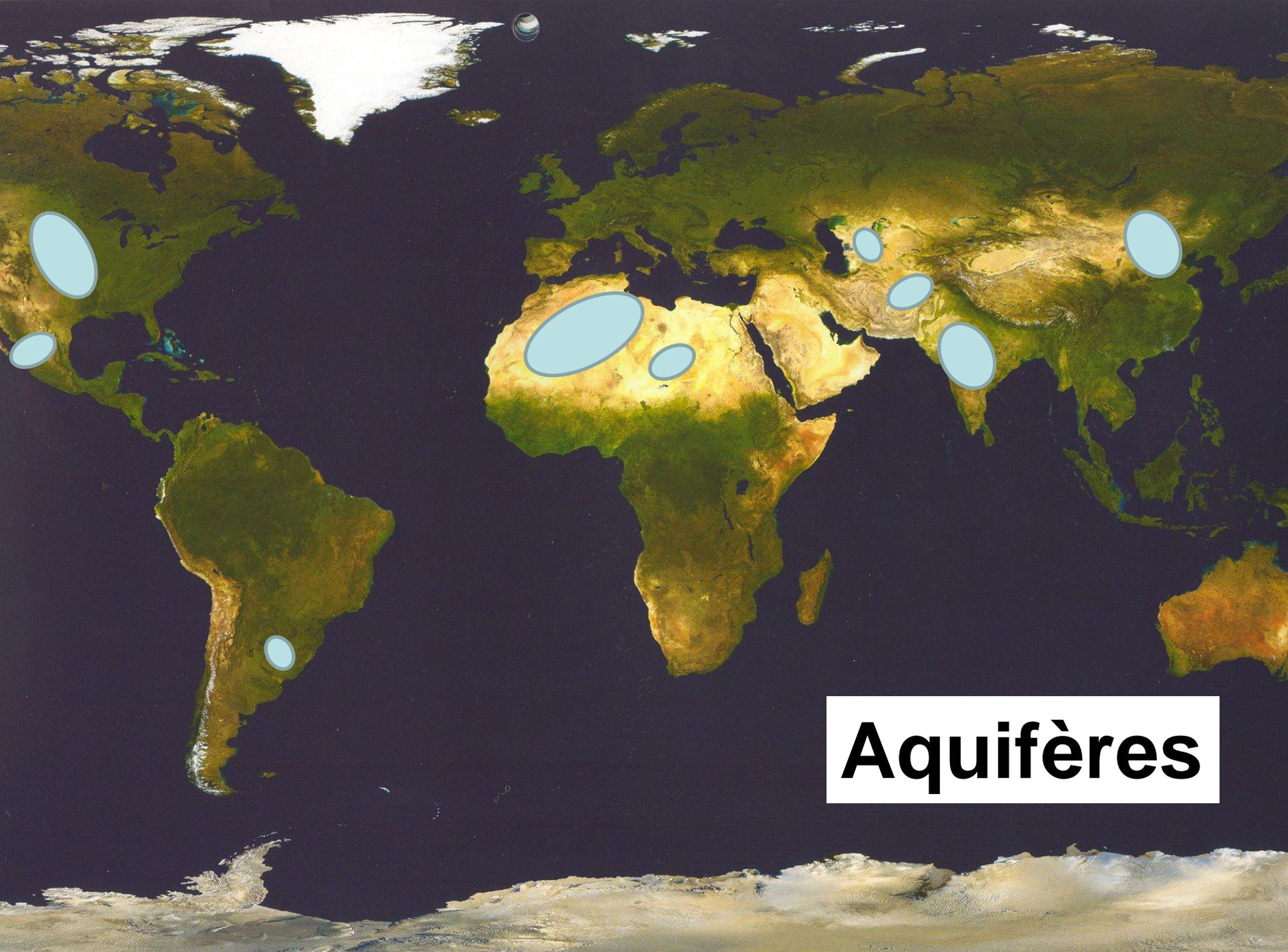
Consommation et prélèvements :

- **Le prélèvement** est le débit d'eau **BLEUE** qui est pris dans l'environnement continental (rivière, lac, nappe souterraine) et utilisé par l'homme.
- **La consommation** est la fraction du prélèvement qui ne retourne pas dans l'environnement, ne peut donc pas être réutilisée, et retourne à **l'atmosphère**.

2. Resources en eau provenant de stocks d'eau (« eau fossile »):

1. Aquifères

2. Glaciers

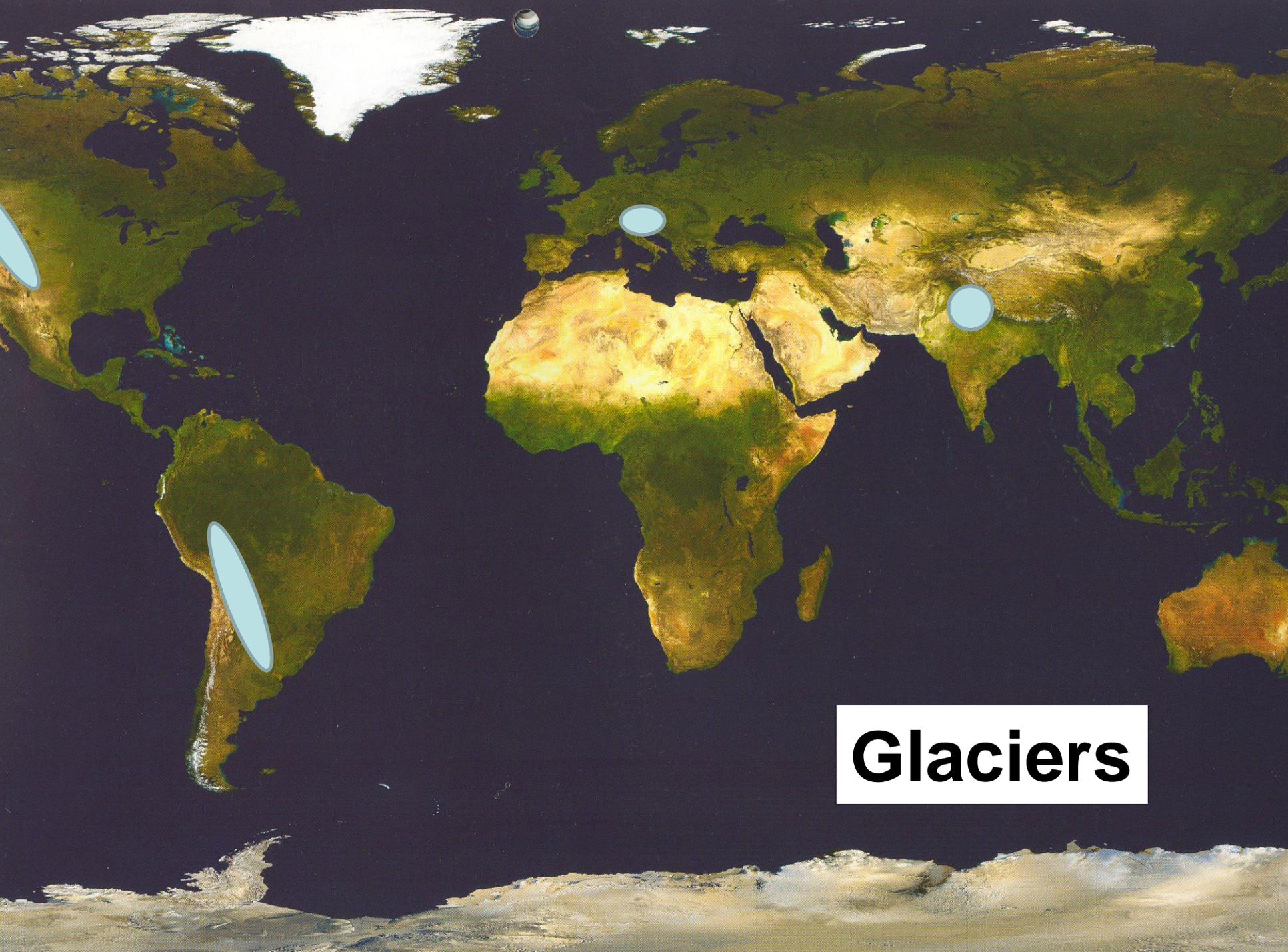


Aquifères

Pompage et sur-pompage dans les nappes, consommation en eau des cultures zones irriguées en 2000, en **km³/an**

| Pays | Quantités d'eau pompées annuellement | Sur-pompage annuel | Consommation totale de l'irrigation |
|----------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| Inde | 190 | 71 | 600 |
| Etats-Unis | 115 | 32 | 204 |
| Chine | 97 | 22 | 403 |
| Pakistan | 55 | 37 | 183 |
| Iran | 53 | 27 | 59 |
| Mexico | 38 | 11 | 71 |
| Planète | 734 | 256 | 2510 |

Les chiffres du sur-pompage sont probablement sur-estimés d'un facteur deux



Glaciers

Nous consommons aujourd'hui, en moyenne:

**~92,5% d'eau renouvelable
(Bleue et Verte) à partir du
cycle de l'eau**

**~7.5% d'eau fossile à partir
des stocks
(Aquifères et Glaciers)**

**L'eau est-elle disponible pour
l'homme ?**



Delta de l'Okavango, Botswana

3. Répartition des précipitations sur Terre



Zones sèches actuelles....

21,5% de l'humanité se concentre dans les steppes et les zones arides avec seulement 2% des ressources en eau de la planète...

Effet de la géographie...

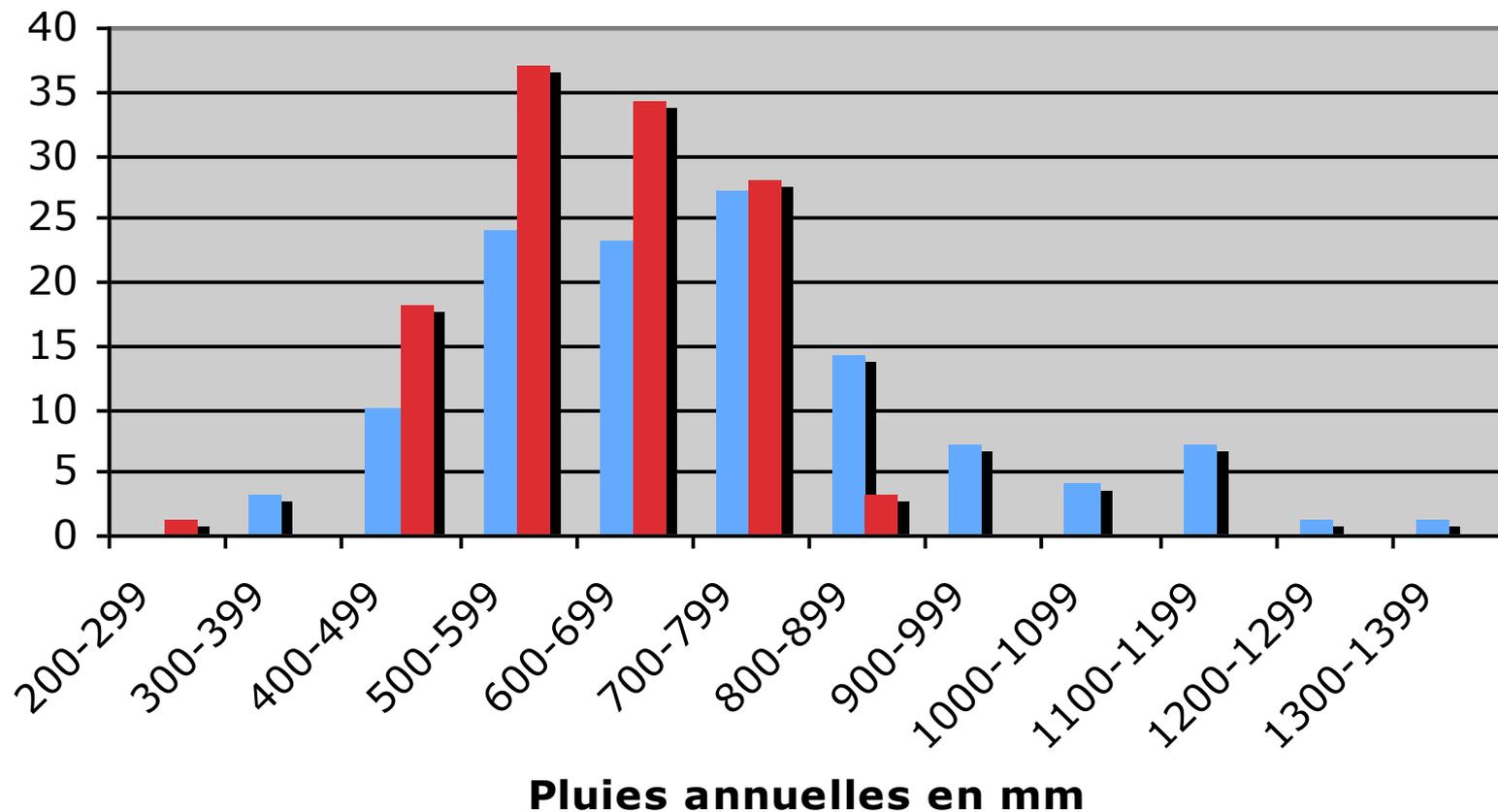
- En montagne, les précipitations doublent environ tous les 2.000 m
 - Les montagnes sont les “châteaux d’eau” des plaines en aval (Himalaya, Alpes, Rocheuses, Cordillère des Andes, Ethiopie...)
- Il pleut plus près des côtes qu’à l’intérieur des continents...

Variabilité inter-annuelle des précipitations

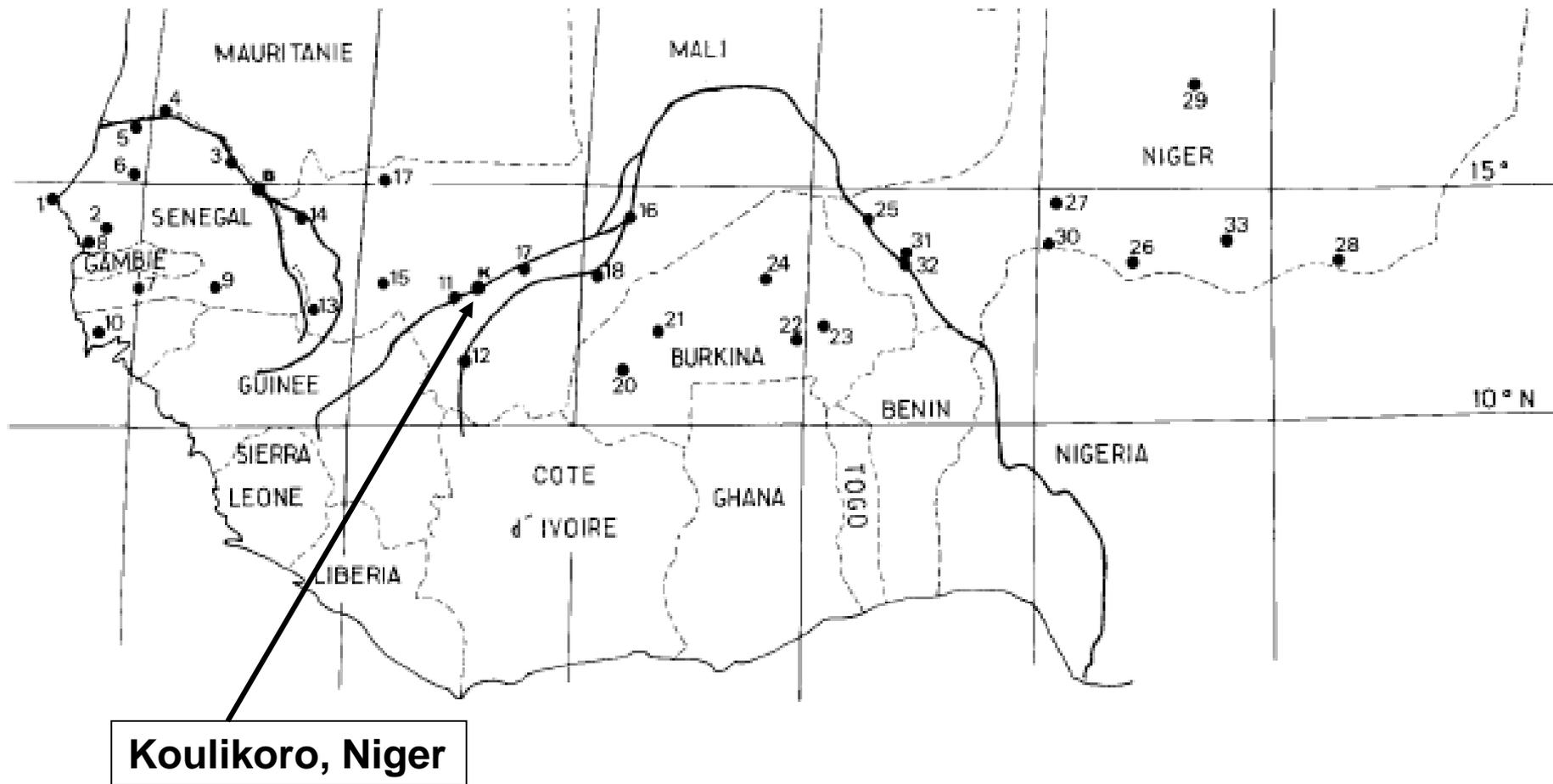
**Histogrammes des pluies annuelles
à Montpellier et à Paris (1873-1993)**

■ Montpellier ■ Paris

Moyennes : Paris : 611 mm, écart-type 108 mm Min-Max :270-880 mm
Montpellier : 722 mm, écart-type 224 mm Min-Max: 311-1352 mm

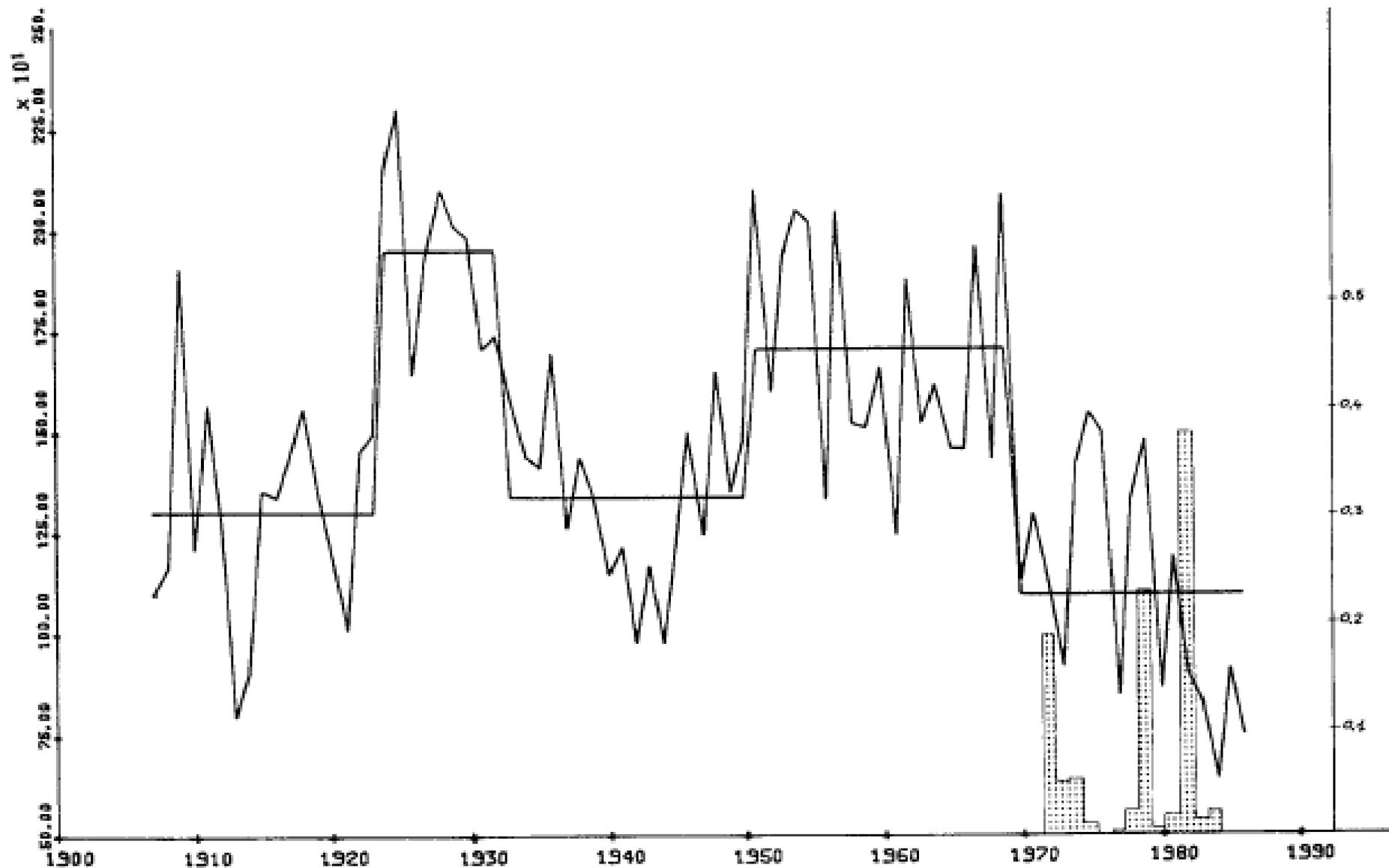


Sécheresse au Sahel...

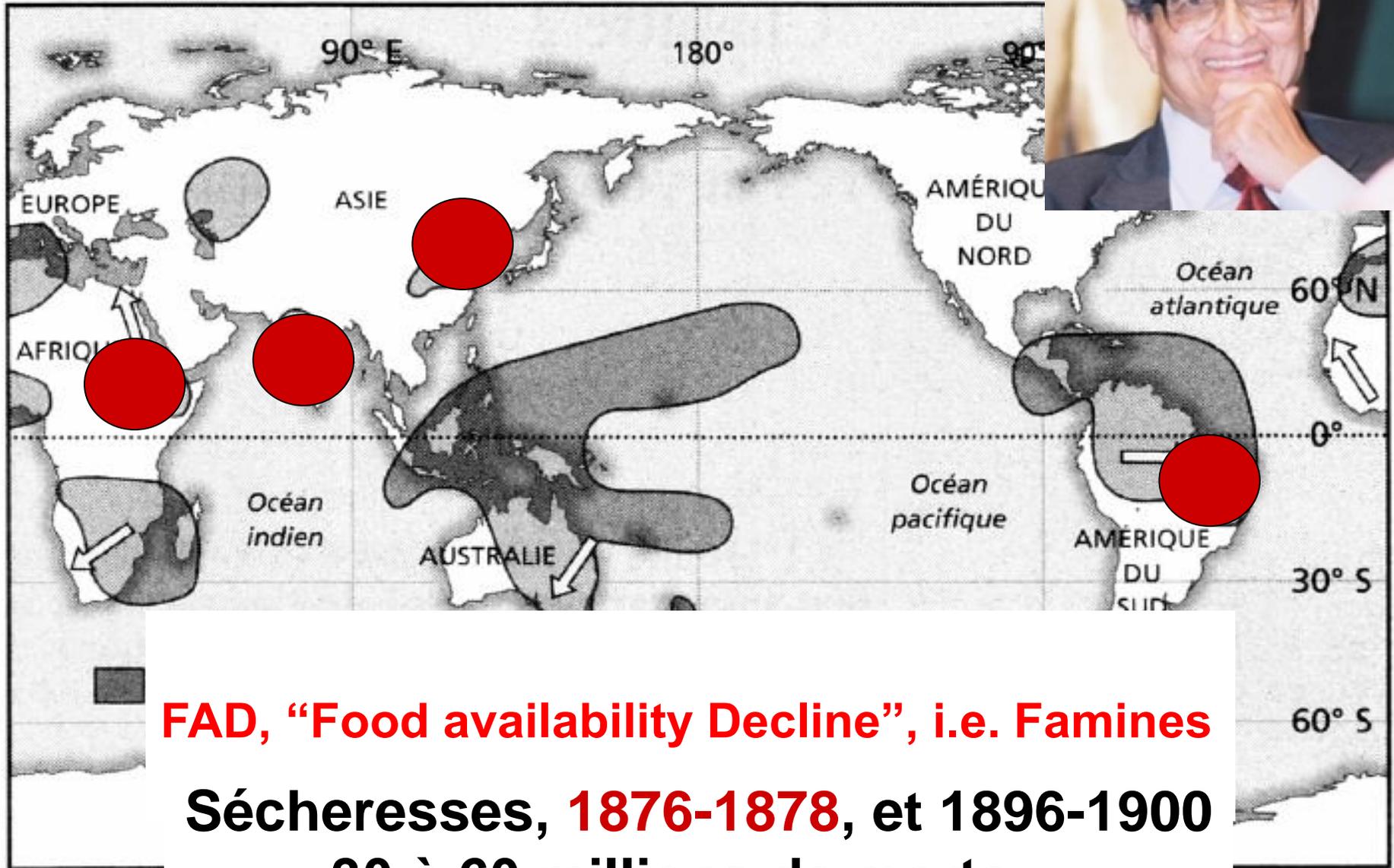


Débit moyen annuel du fleuve Niger à Koulikoro, 1900-1990

Pierre Hubert et al, 1989



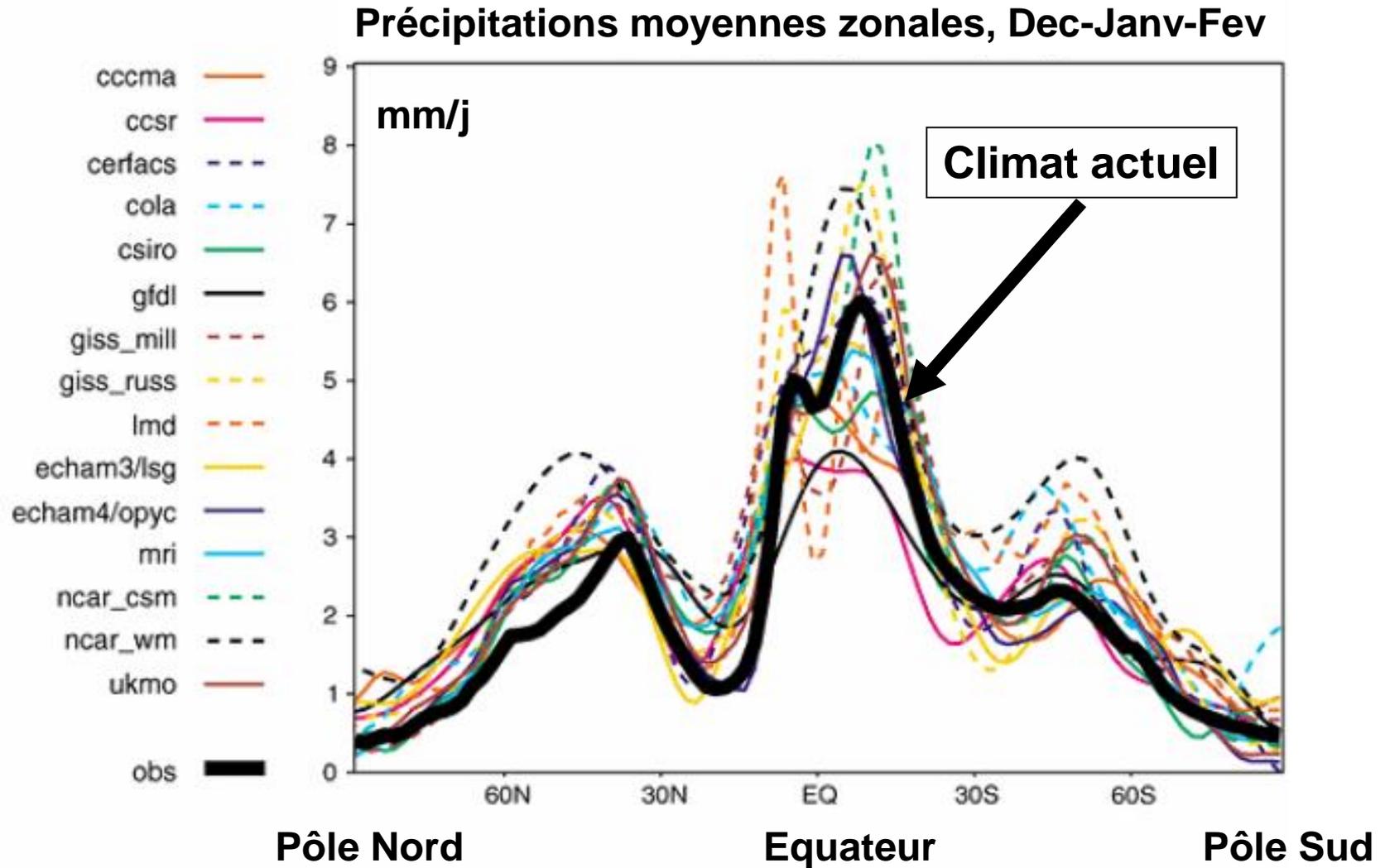
Prof. Amartya SEN, Prix Nobel d'Economie



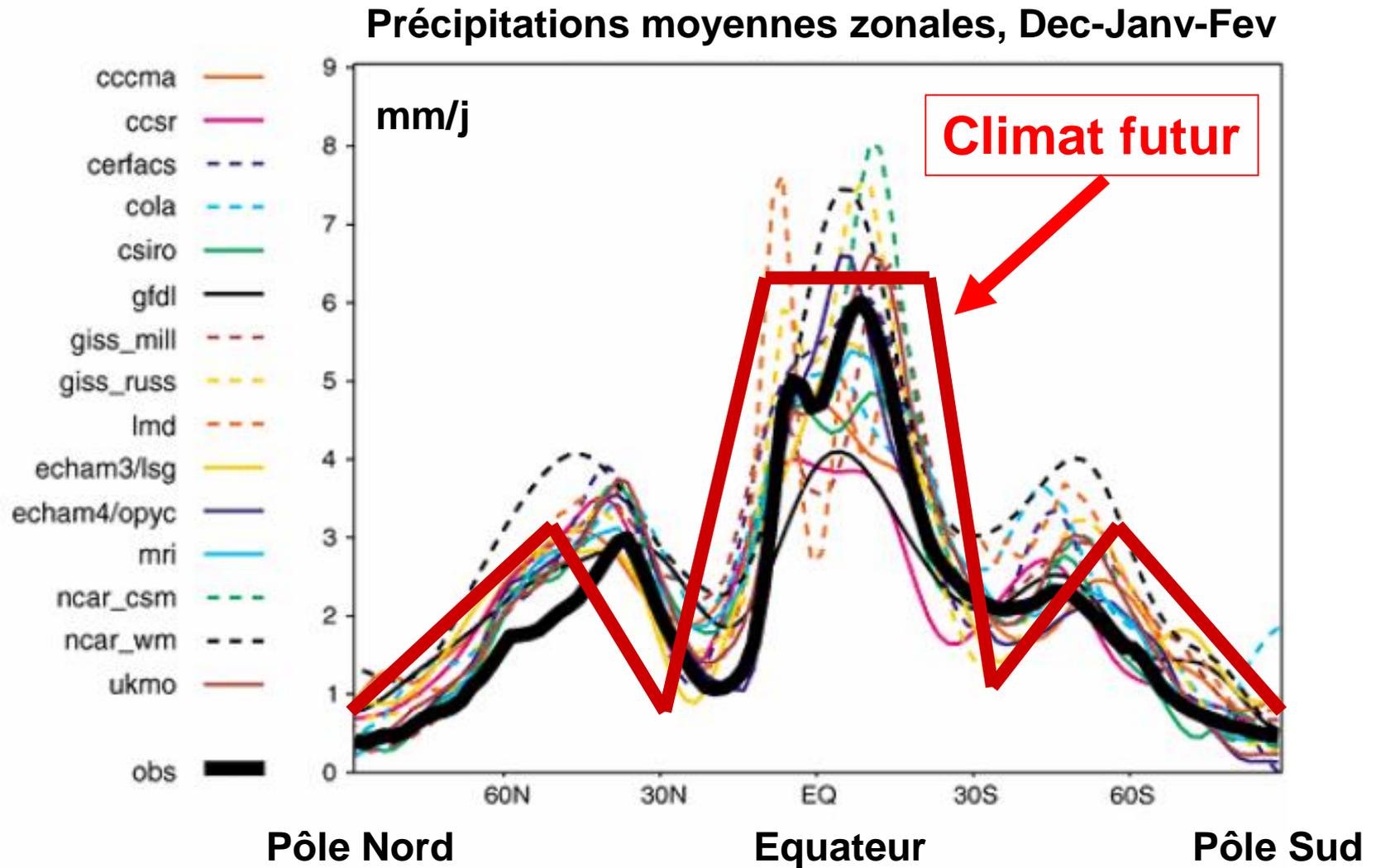
FAD, “Food availability Decline”, i.e. Famines
Sécheresses, 1876-1878, et 1896-1900
30 à 60 millions de morts...

4. Conséquences du réchauffement sur le régime hydrologique : grosses incertitudes...

Variation de la pluie (de pôle à pôle) pour 15 modèles de climat, et observations



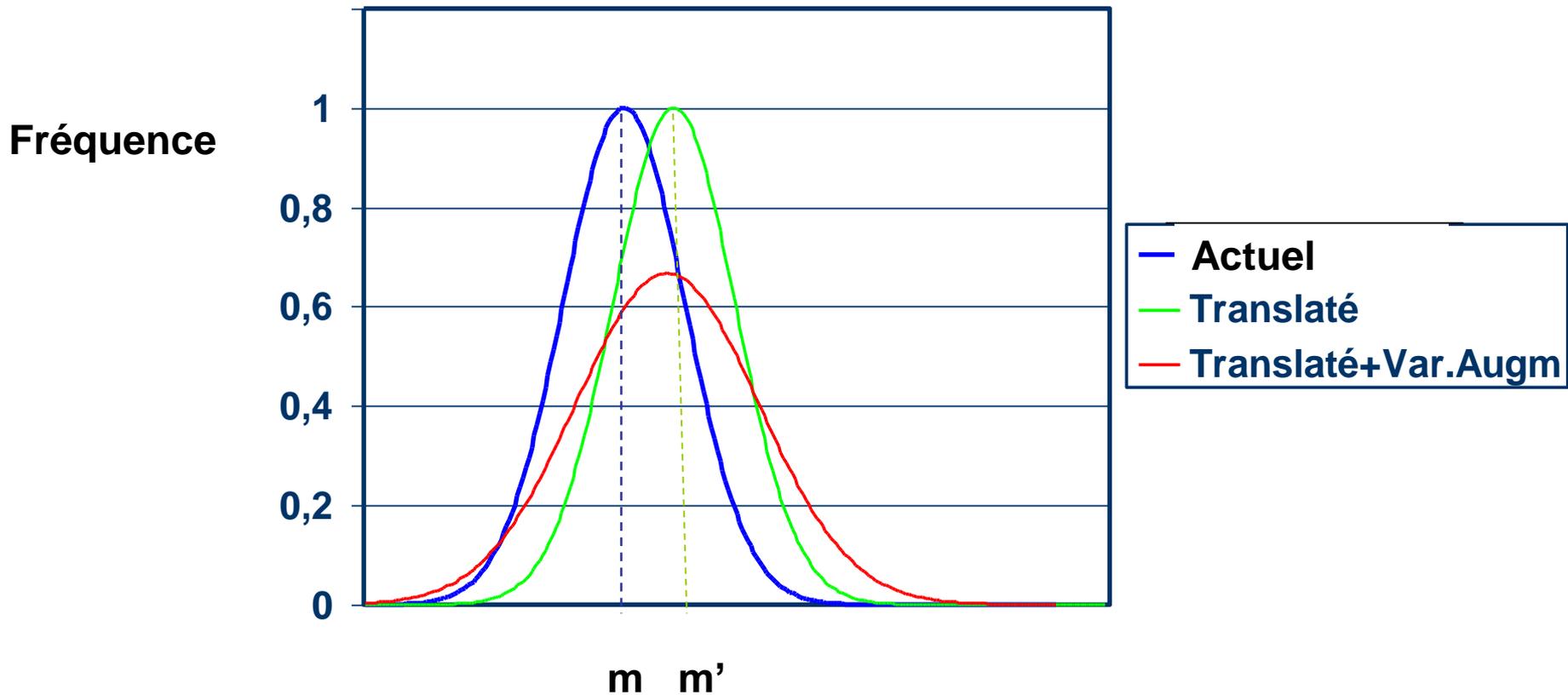
Variation de la pluie (de pôle à pôle) pour 15 modèles de climat, et observations



Eau du sol, Agriculture, Fusion

- Réduction importante de l'humidité du sol dans les zones Méditerranéennes, évapotranspiration plus élevée, pluies plus réduites en été: **sécheresses agricoles** plus qu'**hydrologiques**... Incendies...
- Fusion des glaciers (Cordillères des Andes, Alpes, Himalaya...) et des pôles
- Pour 1 à 3°C et plus de CO₂, légère augmentation des rendements des cultures en Europe du Nord, réduction en Europe du Sud et en milieu tropical
- Pour plus de 3°C, réduction des rendements partout
- Perte de **110 million ha dans la zone Méditerranéenne** et gain de **160 million ha au Nord (Sibérie, Canada)**
- Montée du niveau de la mer, actuellement 3mm/an
- Acidification des océans

Variations des extrêmes



Grandeur hydrologique (p.ex. pluies annuelles,
débit de crue d'une rivière...)

Consequences pour l'Europe

Changements des précipitations pour 2050 (IPCC) (% changements, scénario SRES-A1B or RCP 6)

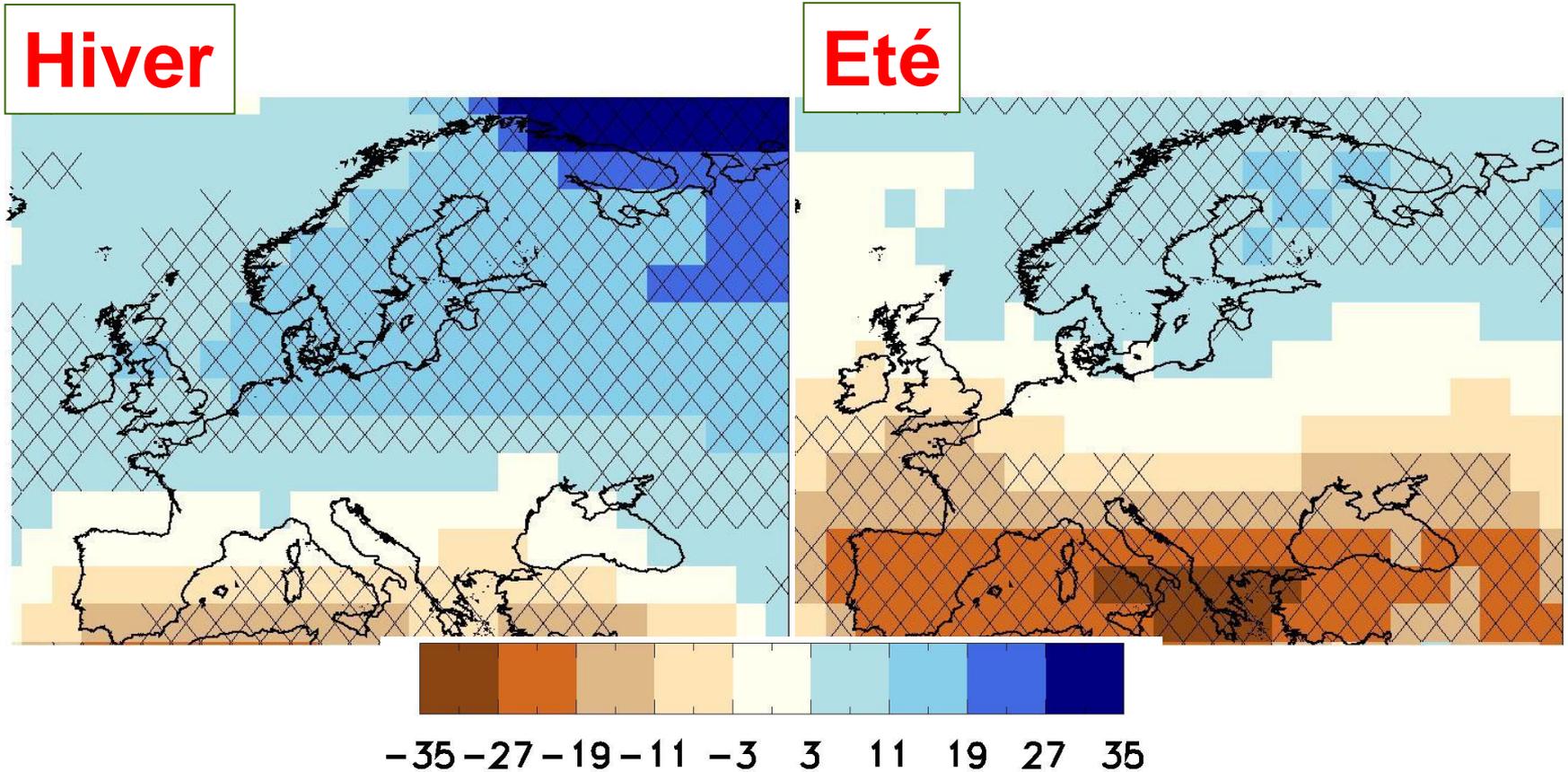


Fig: Julien Boé, CERFACS

X: Cohérence de signe pour au moins 85% des modèles de climat

Débits dans la Seine à Pose, présent, en 2050 et 2100. Résultats dans l'hypothèse qu'il n'y a pas de changements additionnels (usages du sol, prélèvements)

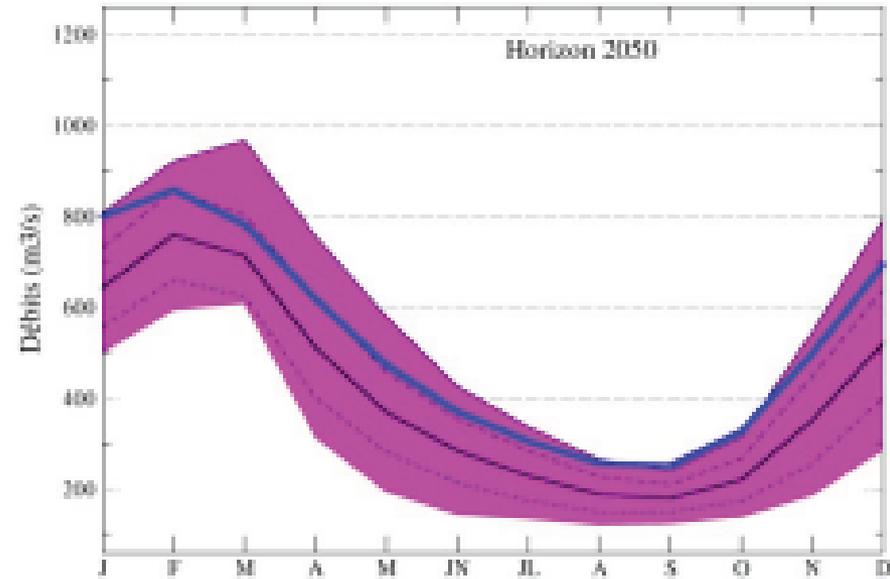
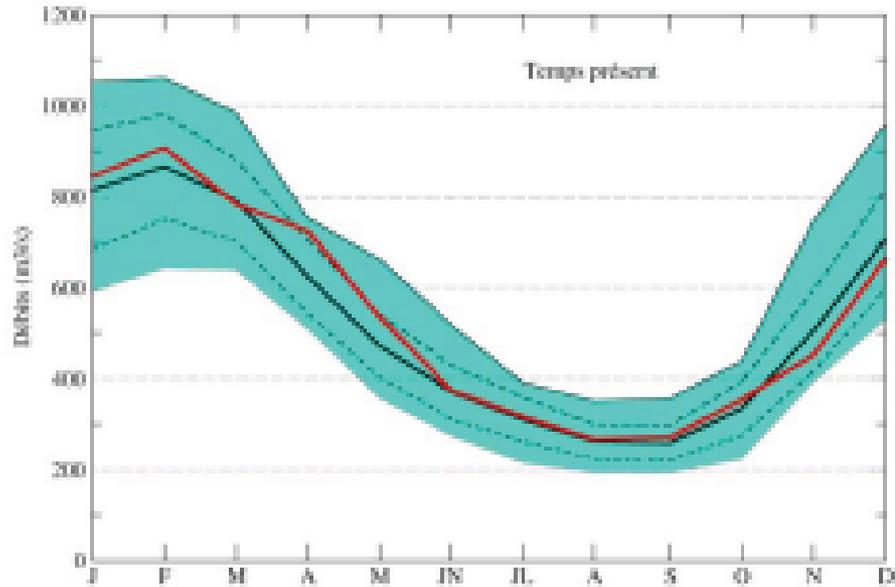
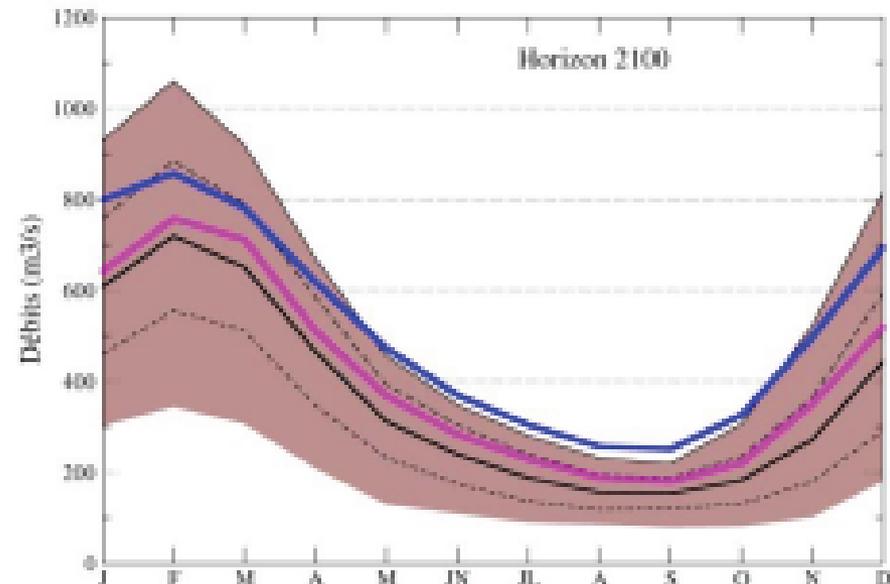


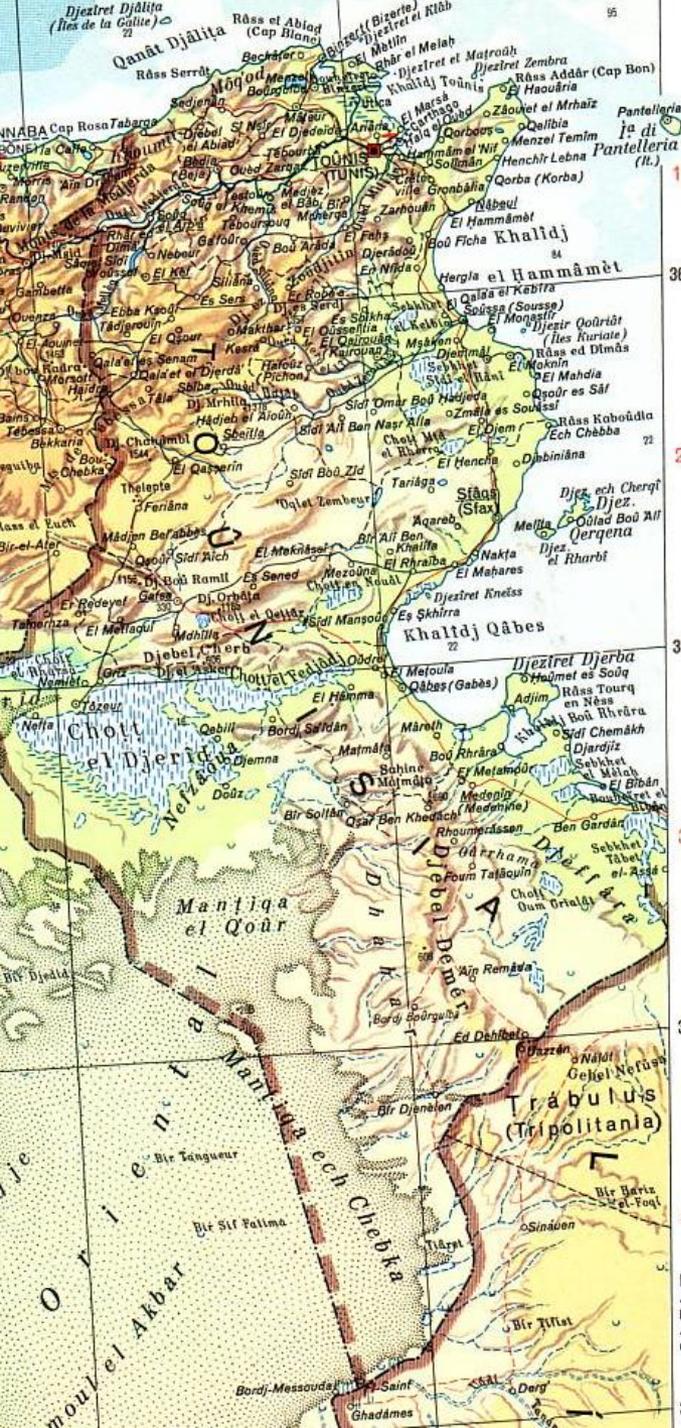
Figure 1 - Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses par l'ensemble des modèles hydrologiques et sur l'ensemble des scénarios. L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais noir la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe pour un écart-type. Temps présent : la courbe rouge représente la moyenne mensuelle observée. Horizon 2050 : la courbe bleue représente la moyenne temps présent. Horizon 2100 : les courbes bleues et roses représentent les moyennes des simulations temps présent et milieu de siècle respectivement.



5. Les besoins en eau actuels:

Exemple Tunisien

La Tunisie



Surface 164.000 km²

Cultivable : 5 millions d'ha

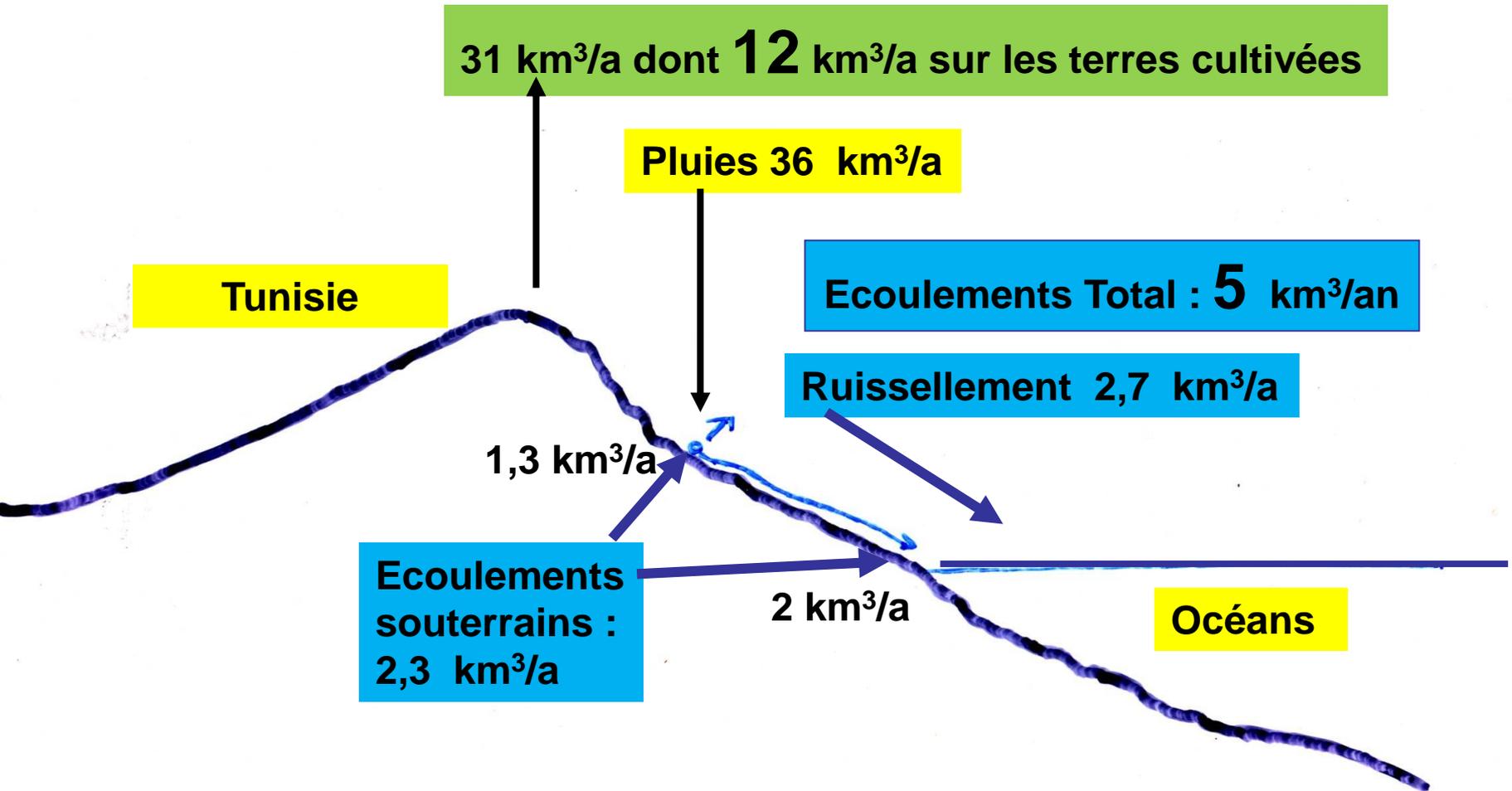
Irrigable : 0,56 million d'ha

10 millions d'habitants

Pluie 220 mm/an

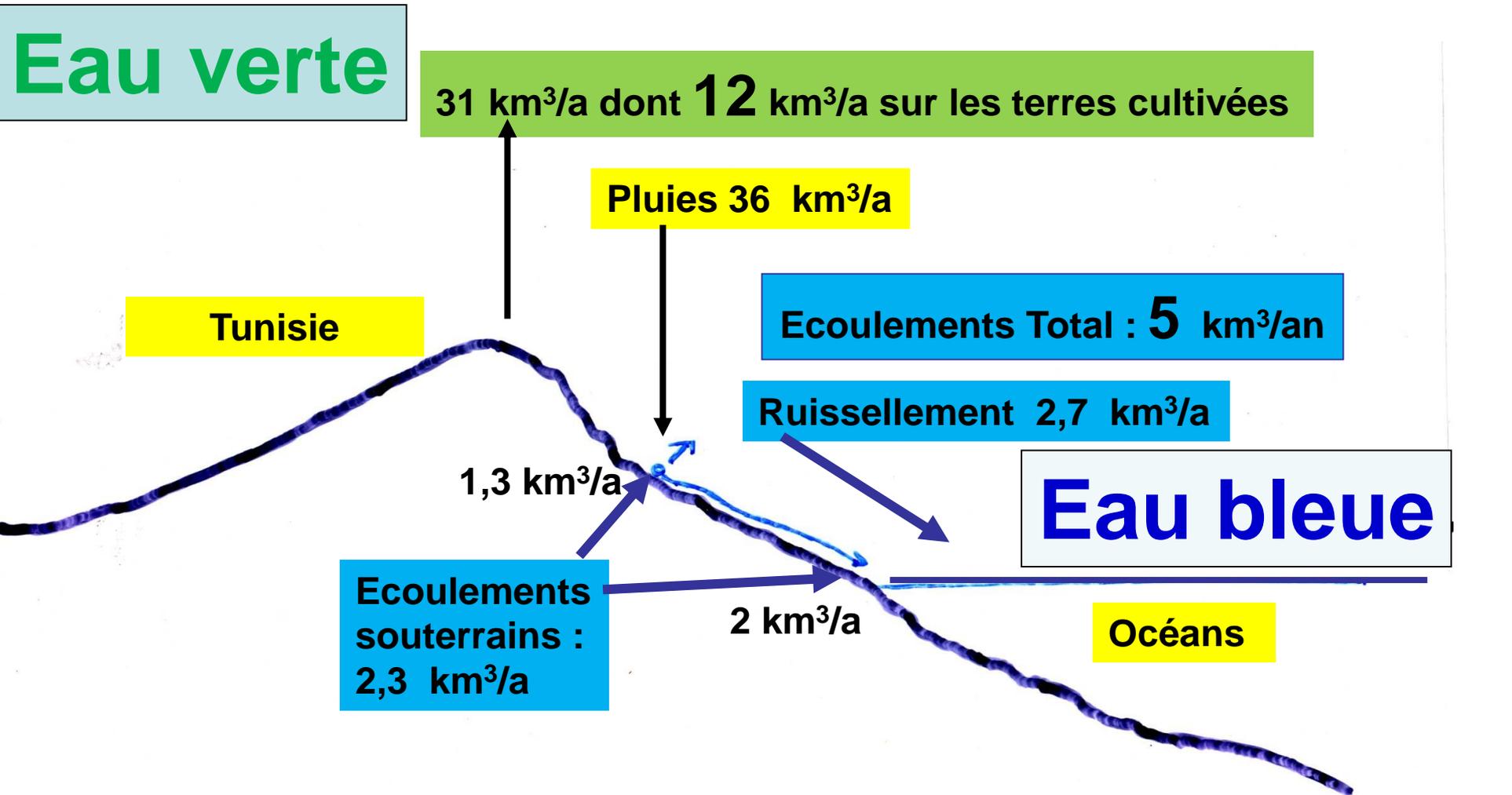
Total eau de pluie 36 km³/an

Bilan en eau de la Tunisie



Consommation actuelle (verte+bleue) de la Tunisie: **15 km³/an**
30% est importée

Bilan en eau de la Tunisie



Consommation actuelle (verte+bleue) de la Tunisie: 15 km³/an
30% est importée

Bilan en eau de la Tunisie

| | Unité | 2004 | 2025 Idem + Chgt Clim |
|---------------------------------------|--------------------|------|-----------------------------|
| Population | Millions | | |
| Demande alimentaire, équival eau/hab | m ³ /a | | |
| Demande alimentaire, volume total | km ³ /a | | |
| Demande directe, AEP et industrie/hab | m ³ /a | | |
| Demande directe, total | km ³ /a | | |
| Volume d'eau d'irrigation | km ³ /a | | |
| Agriculture pluviale, eau verte | km ³ /a | | |
| Eau virtuelle importée (blé, orge) | km ³ /a | | |
| Besoins en eau totaux | km ³ /a | | |
| Taux de dépendance en eau importée | - | | |

Contenu en eau des aliments

| Produits végétaux | Eau consommée | Produits Animaux | Eau consommée |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| Huile végétale | 5000 | Boeuf | 13,000 |
| Riz | 1500-2000 | Vollailes | 4,000 |
| Blé, céréales en C3 | 1000 | Oeufs | 2,700 |
| Maïs, céréales en C4 | 700 | Lait | 800 |
| Agrumes | 400 | | |
| Légumes | 200-400 | | |
| Pommes de terre | 100 | | |

**Eau nécessaire (litre par kilo) pour produire les aliments
(fraction consommée, pas en matière sèche)**

Bilan en eau de la Tunisie

| | Unité | 2004 | 2025 Idem + Chgt Clim |
|---------------------------------------|--------------------|---------------|-----------------------------|
| Population | Millions | 10 | |
| Demande alimentaire, équival eau/hab | m ³ /a | 1450 | |
| Demande alimentaire, volume total | km ³ /a | 14,399 | |
| Demande directe, AEP et industrie/hab | m ³ /a | 55 | |
| Demande directe, total | km ³ /a | 0,546 | |
| Volume d'eau d'irrigation | km ³ /a | 2,008 | |
| Agriculture pluviale, eau verte | km ³ /a | 8,000 | |
| Eau virtuelle importée (blé, orge) | km ³ /a | 4,591 | |
| Besoins en eau totaux | km ³ /a | 14,945 | |
| Taux de dépendance en eau importée | - | 31% | |

Bilan en eau de la Tunisie

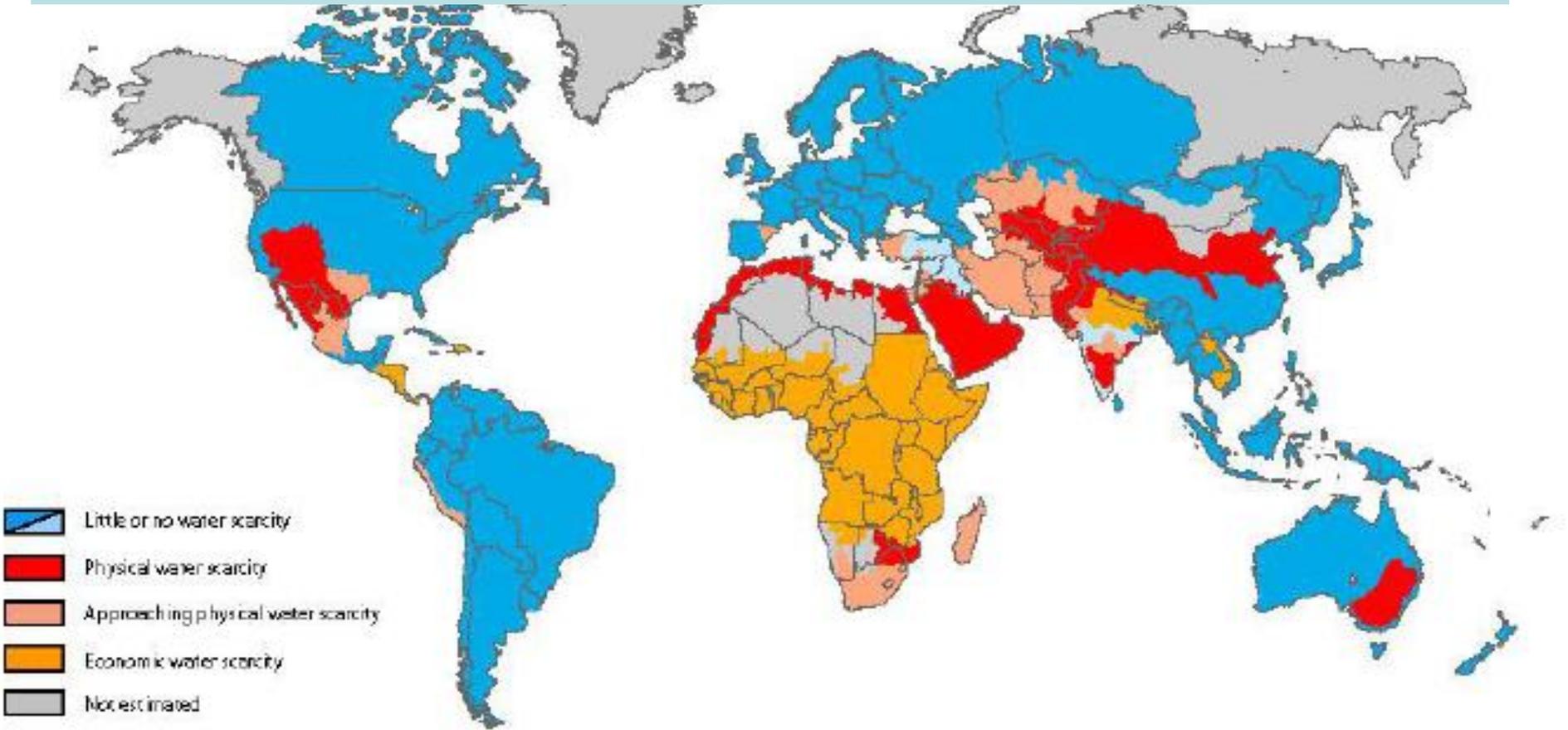
| | Unité | 2004 | 2025 Idem + Chgt Clim |
|---|--------------------|---------------|-----------------------------|
| Population | Millions | 10 | 12,15 |
| Demande alimentaire, équival eau/hab | m ³ /a | 1450 | 1700 |
| Demande alimentaire, volume total | km ³ /a | 14,399 | 20,655 |
| Demande directe, AEP et industrie/hab | m ³ /a | 55 | 70 |
| Demande directe, total | km ³ /a | 0,546 | 0,851 |
| Volume d'eau d'irrigation | km ³ /a | 2,008 | 2,004 |
| Agriculture pluviale, eau verte | km ³ /a | 8,000 | 9,000 |
| Eau virtuelle importée (blé, orge), bilan net | km ³ /a | 4,591 | 9,900 |
| Besoins en eau totaux | km ³ /a | 14,945 | 21,506 |
| Taux de dépendance en eau importée | - | 31% | 46% |

**En 2006-2010, la Tunisie a exporté 2,5 km³/an et importé 7,1 km³/an
Importation nette 4,6 km³/an**

Importation d'eau virtuelle :

- **La Tunisie était autonome** en ~1980 pour son bilan en eau, avec 6.4 Millions d'habitants, et une consommation de 1.150 m³/an par personne (600 m³/an en 1960)
- **La croissance de la population et les changements de régime alimentaire** ont rendu la Tunisie dépendante à 30% d'eau virtuelle aujourd'hui pour son bilan en eau...
- **Mais la Tunisie vit bien !**

Vision mondiale de l'eau, Forum de La Haye, 2000, et Objectifs du Millénaire



Zones avec manque chronique d'eau en 2000, d'après IWMI [2007].

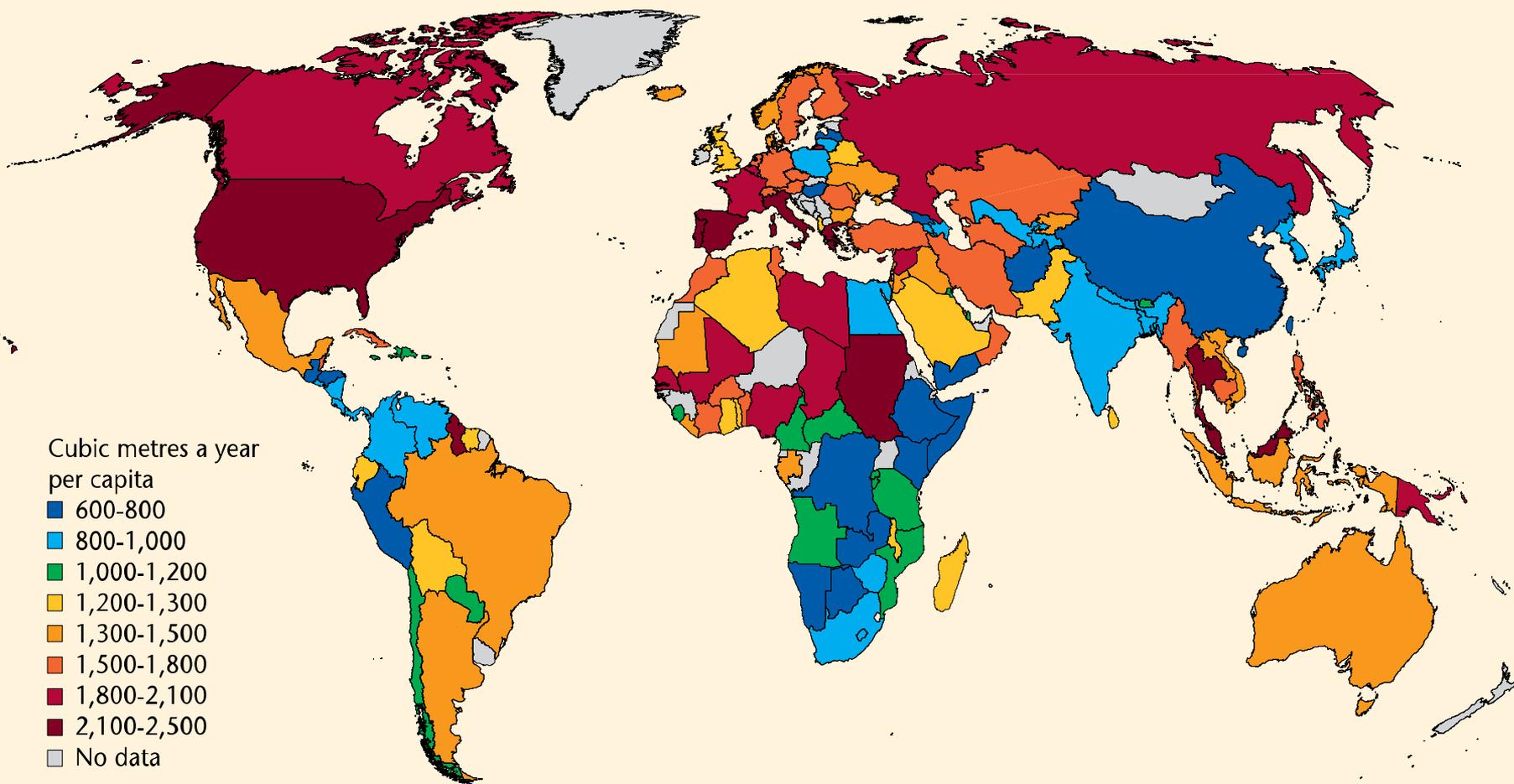
Rouge : Déficit physique ; plus de 75% du débit des rivières est prélevé pour les besoins de l'homme, en tenant compte des recyclages.

Rose : Plus de 60% du débit des rivières est prélevé. Ces bassins vont bientôt devenir rouge

Orange : Déficit économique en eau. Les ressources sont abondantes par rapport aux usages, avec moins de 25% de prélèvements du débit des rivières, mais la sous-alimentation sévit. La capacité financière en moyens d'équipement fait défaut.

Bleu : Ressources en eau abondantes. Prélèvements inférieurs à 25% du débit des rivières.

Carte de consommation alimentaire en eau, m³/an par habitant



Consommation Alimentaire actuelle

kCal/j par personne

(Moyenne Mondiale 3 000 kCal/j)

| Produits | Vegetaux | Animaux | Total |
|------------------------------|-----------------|----------------|--------------|
| Pays en Développement | 2 344 | 337 | 2 681 |
| Pays en Transition | 2 235 | 671 | 2 906 |
| Pays Développés | 2 437 | 943 | 3 380 |

Empreinte eau...

Exemple d'empreinte eau



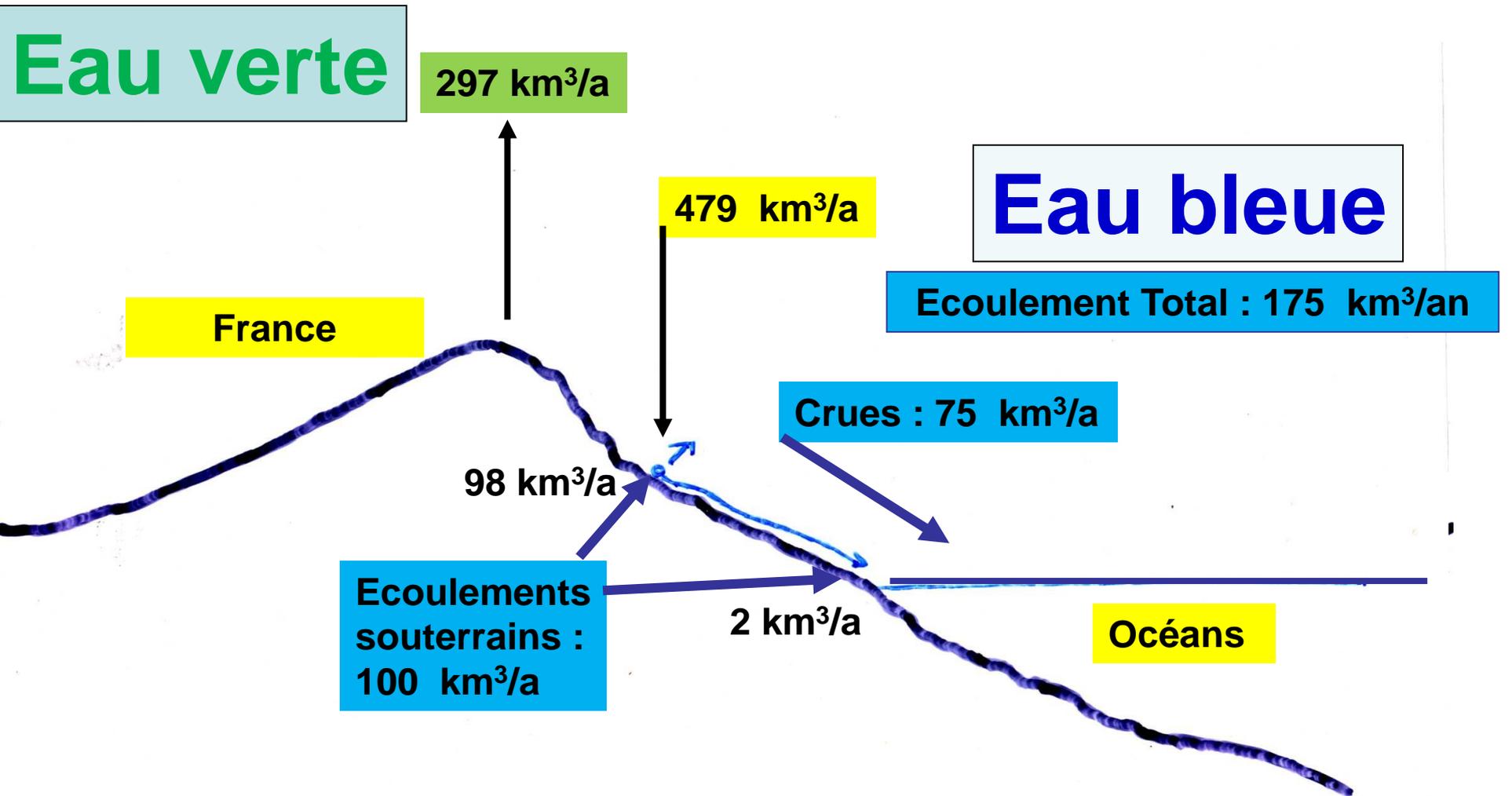
L'empreinte eau, suite

(Consommation Mondiale)

(A. Hoechestra et al. for ~2009)

- **l'empreinte eau verte** : c'est la consommation des eaux de pluie, par évapotranspiration dans les cultures agricoles ; pour la nourriture **~6.300 km³/an**
- **l'empreinte eau bleue** : c'est la consommation des eaux de surface et des eaux souterraines pour l'irrigation : **~1,800 km³/an**
- **l'empreinte eau grise** : c'est le volume d'eau douce requis pour diluer les polluants dans des proportions suffisantes pour que la qualité de l'eau corresponde aux normes en vigueur (**~150 km³/an**)
- **Eau virtuelle** : eau utilisée pour produire des biens, qui sont exportés ou transférés. Nourriture: **~600 km³/y**

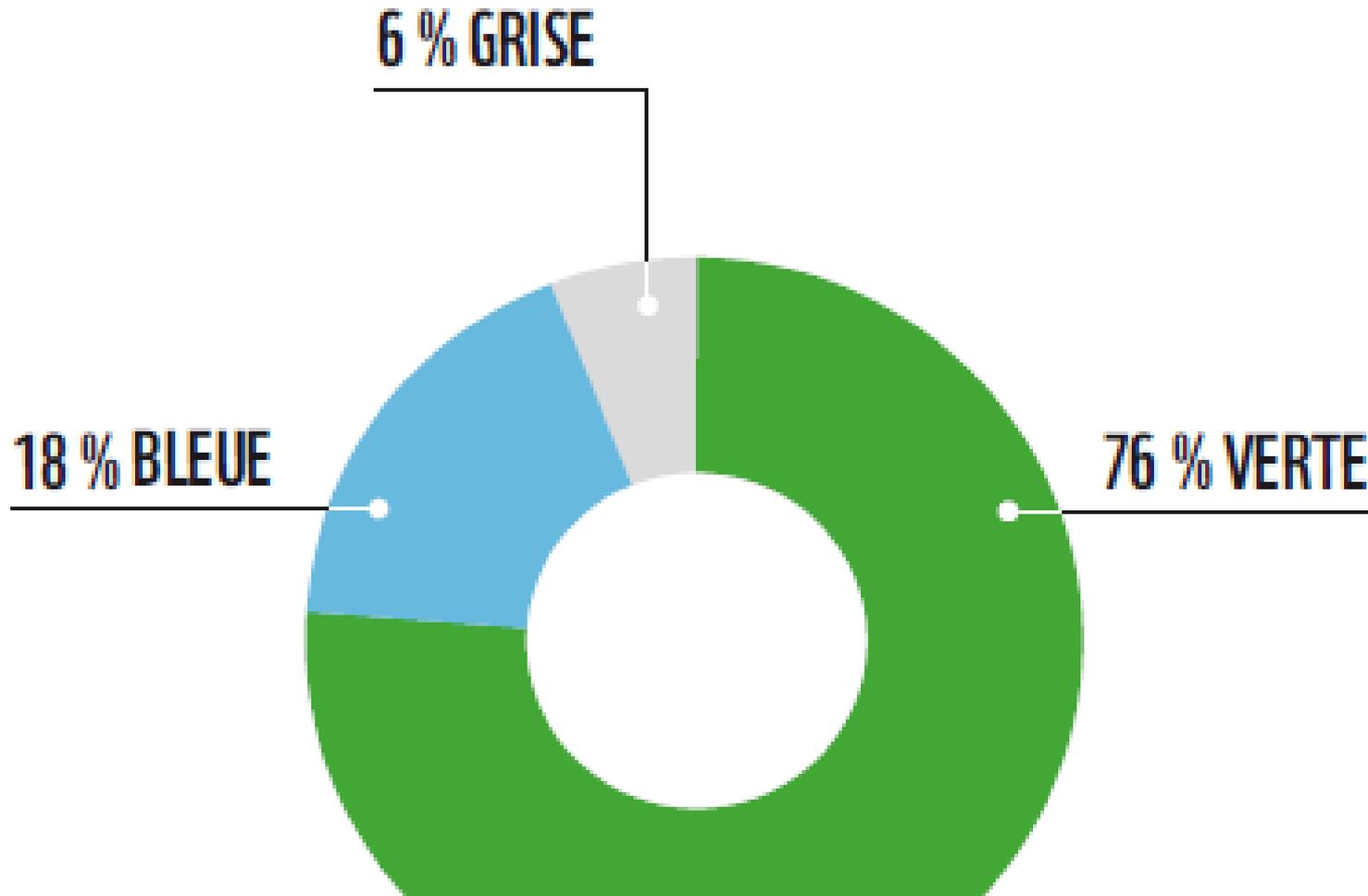
6. Bilan en eau de la France



Consommation actuelle (verte+bleue) de la France: 106 km³/an
47% est importée

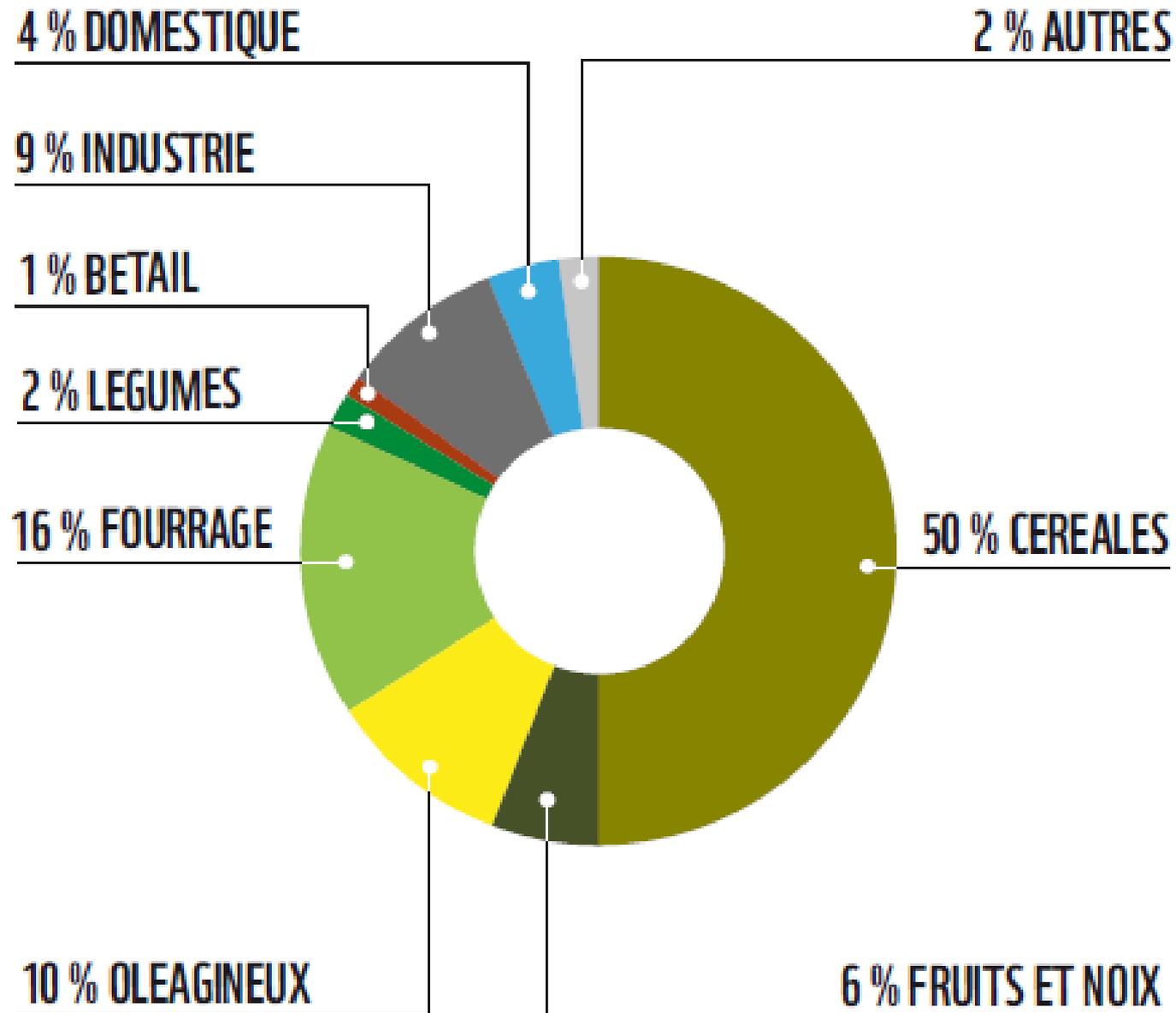
L'empreinte eau de production

(1996-2005) France, d'après WWF, 2012 & Hoekstra et al.



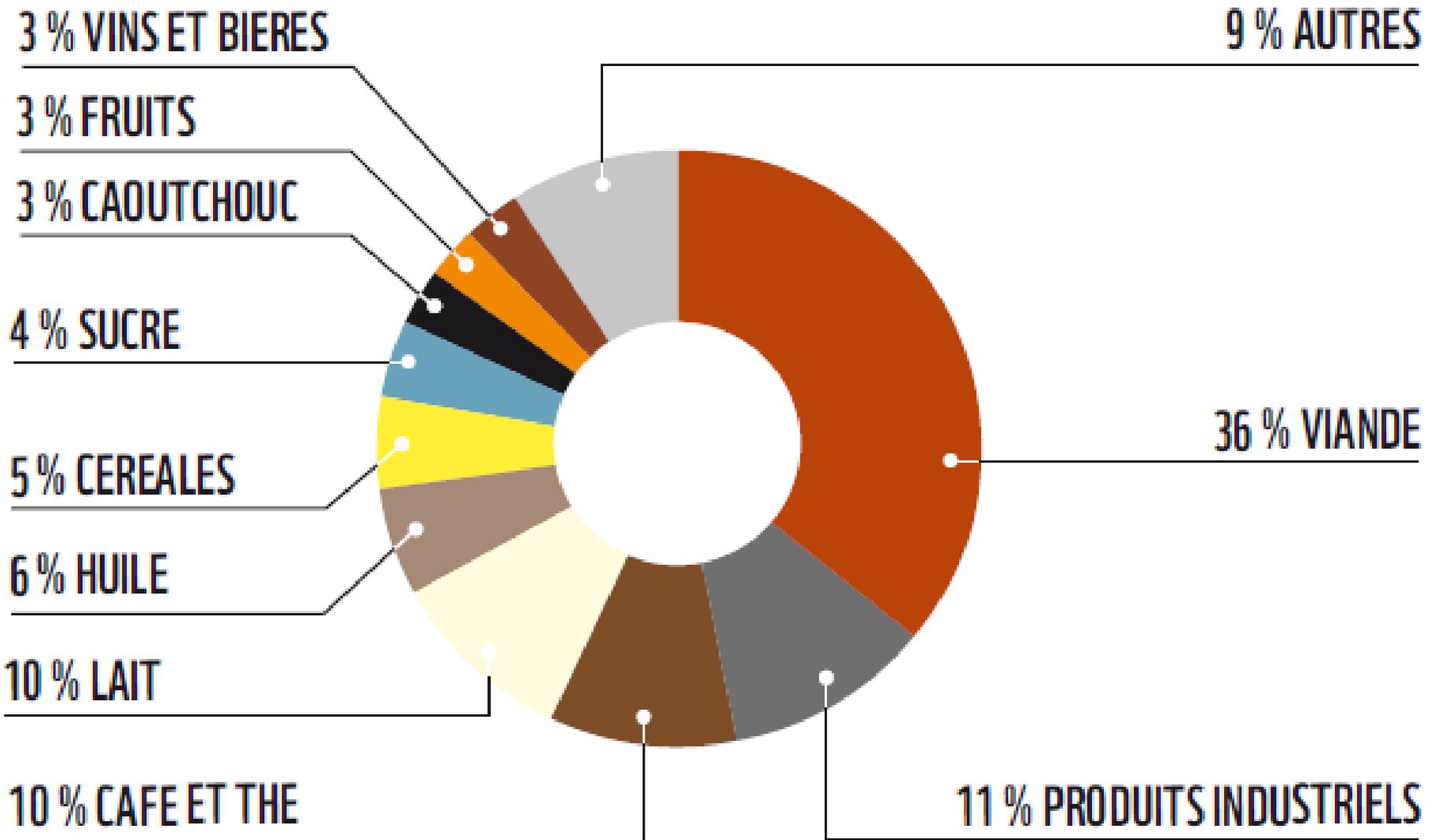
**Total 90 km³/an, 86% pour l'agriculture
34 km³ sont exportés (38%)**

L'empreinte eau de production



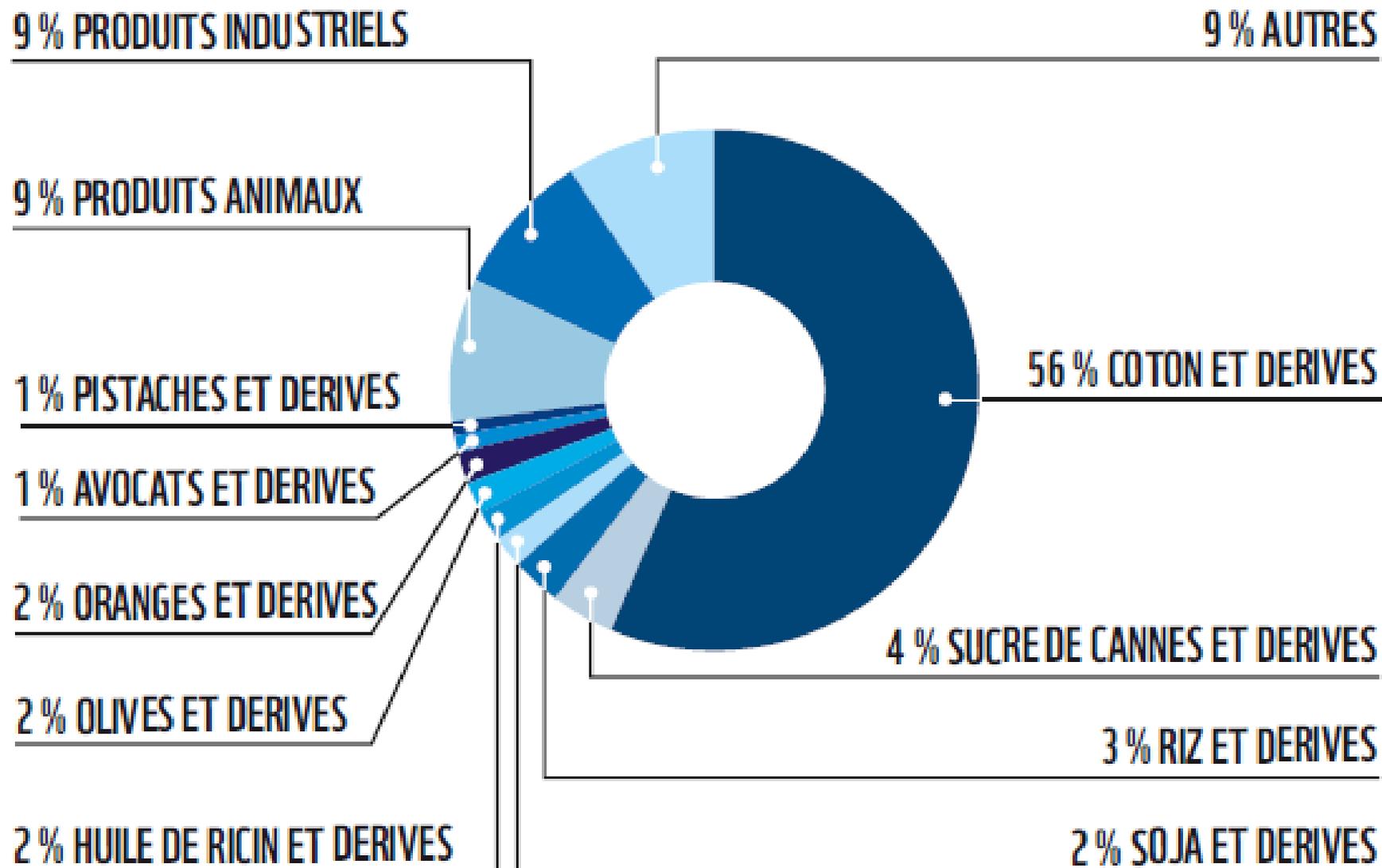
Empreinte eau de consommation

L'empreinte eau de consommation



| Type d'eau | | Verte, km ³ /an | Bleue, km ³ /an | Grise, km ³ /an |
|---------------------------------------|--|---|-------------------------------|-------------------------------|
| Produits agricoles nationaux | | 43,7 | 1,4 | 3,8 |
| Produits agricoles importés | | 36,7 | 4,6 | 2,1 |
| Produits industriels nationaux | | | 0,9 | 3,3 |
| Produits industriels importé | | | 0,6 | 6,3 |
| Eau domestique | | | 0,6 | 2,2 |
| Total | | 80,4 | 8,1 | 17,7 |
| Total Général | | 106,2 km ³ /an 47 % d'eau importée 76 % d'eau verte 87 % d'eau agricole | | |

Importation d'eau bleue virtuelle



La France, un pays plutôt humide, importe environ 50% de ses besoins en eau, plus que la Tunisie !

Bilan net :

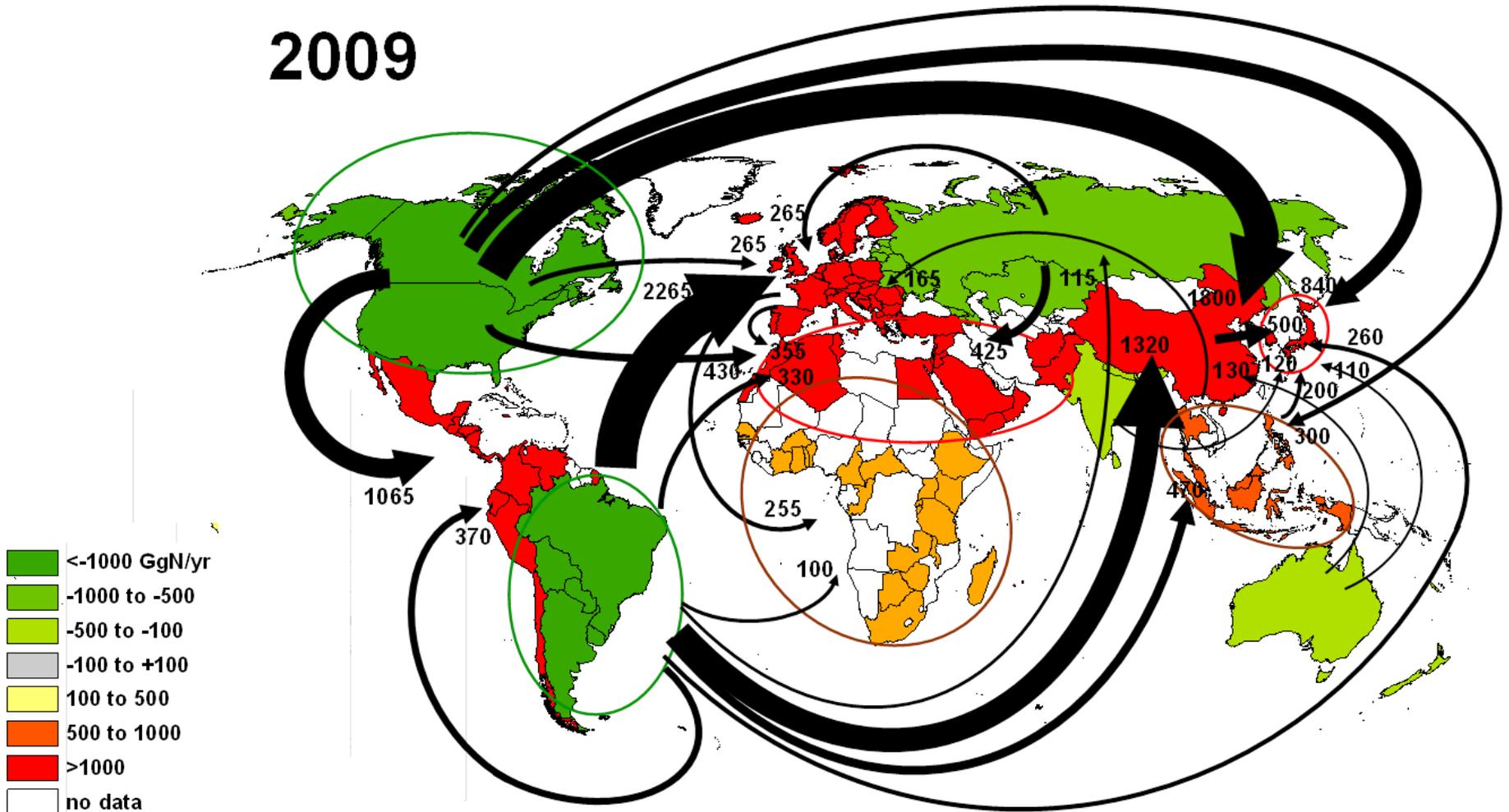
**Eau consommée : 106 km³/an
(47% importé)**

**Eau utilisée pour produire : 90 km³/an
(38% exporté)**

Transferts d'eau virtuelle en 2009 :

environ 600 km³/an

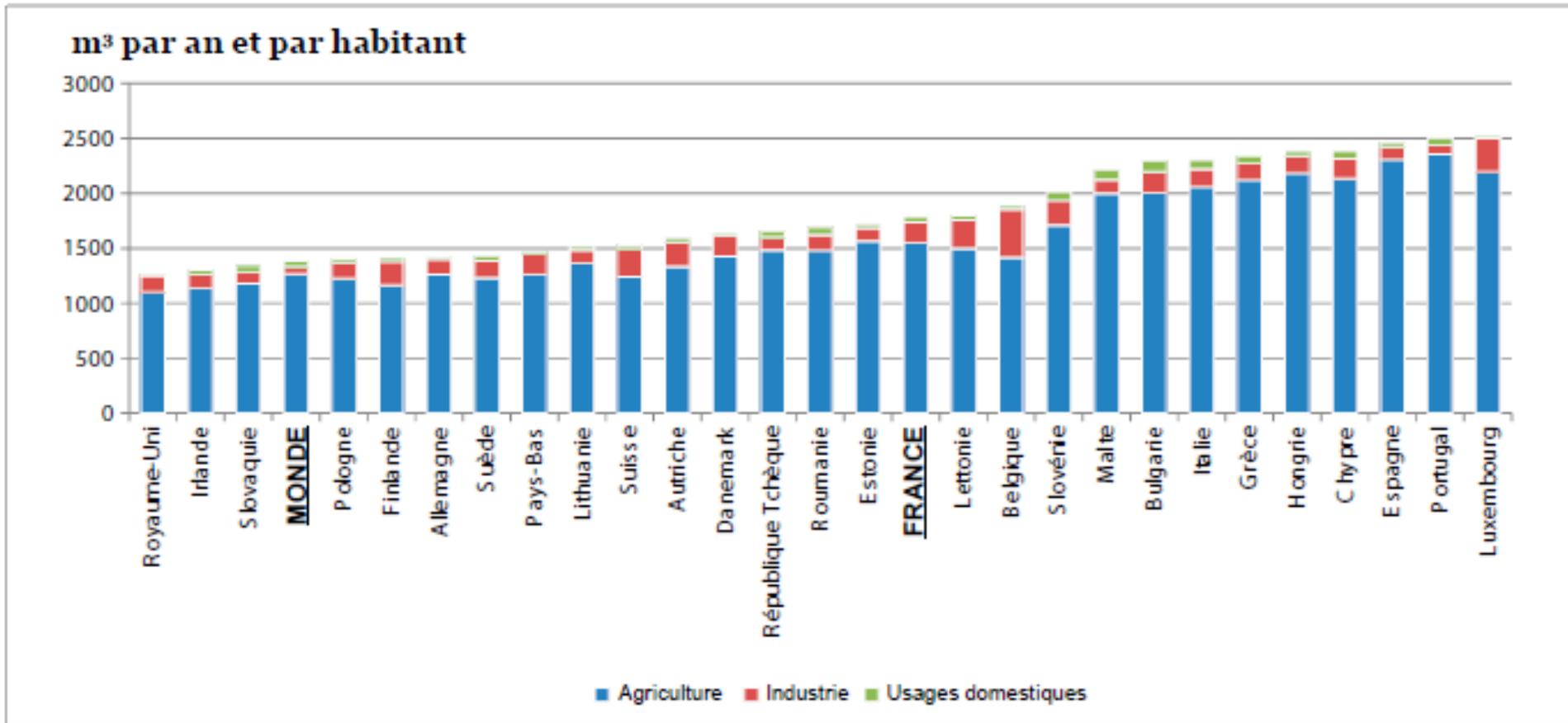
2009



Les échanges internationaux représentent 30% de la production agricole totale

Lassaletta L, Billen G, Grizzetti B, Garnier J, et al. (2014)
In : *Biogeochemistry*

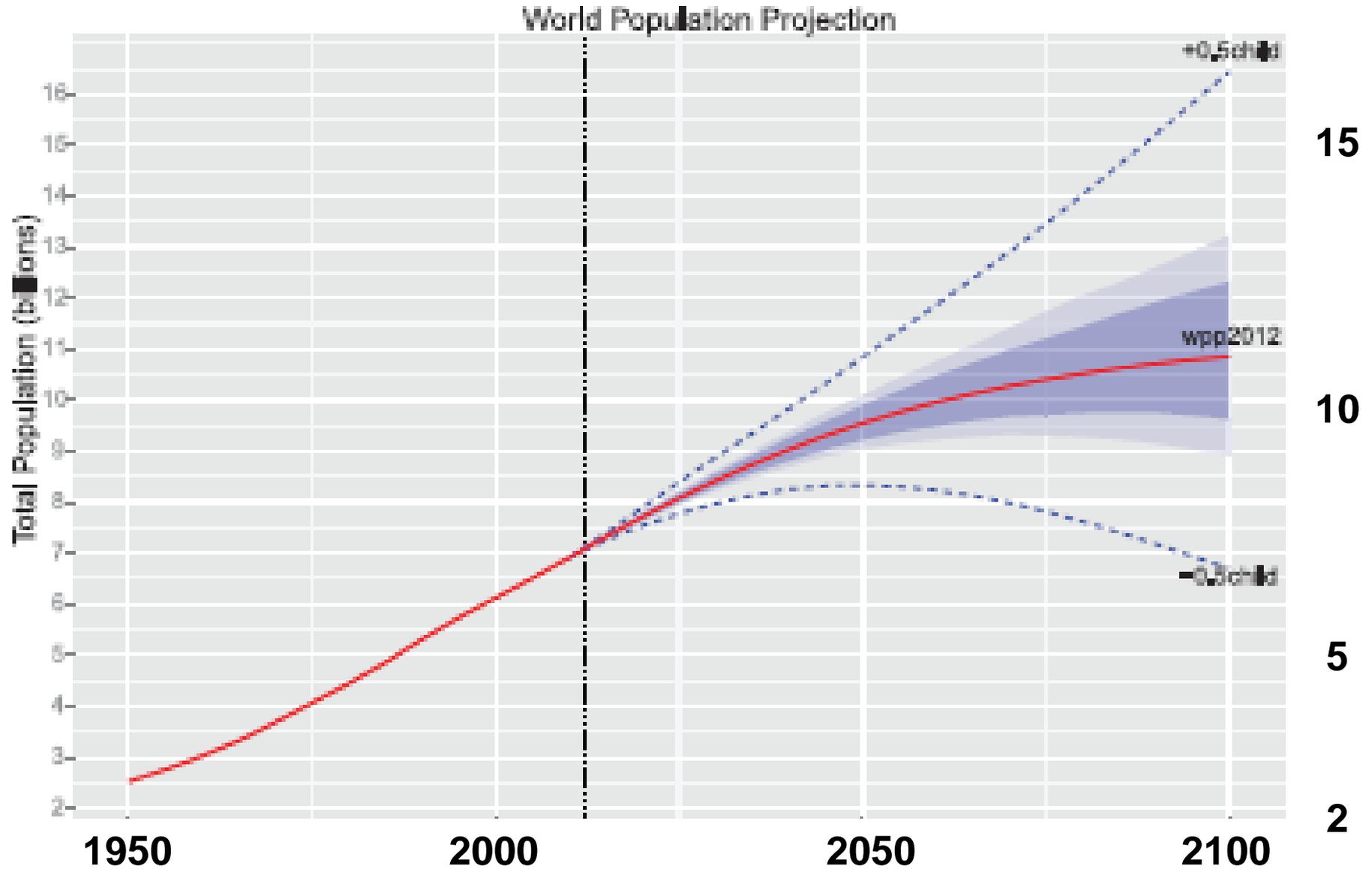
Empreinte eau de consommation, Europe et Monde



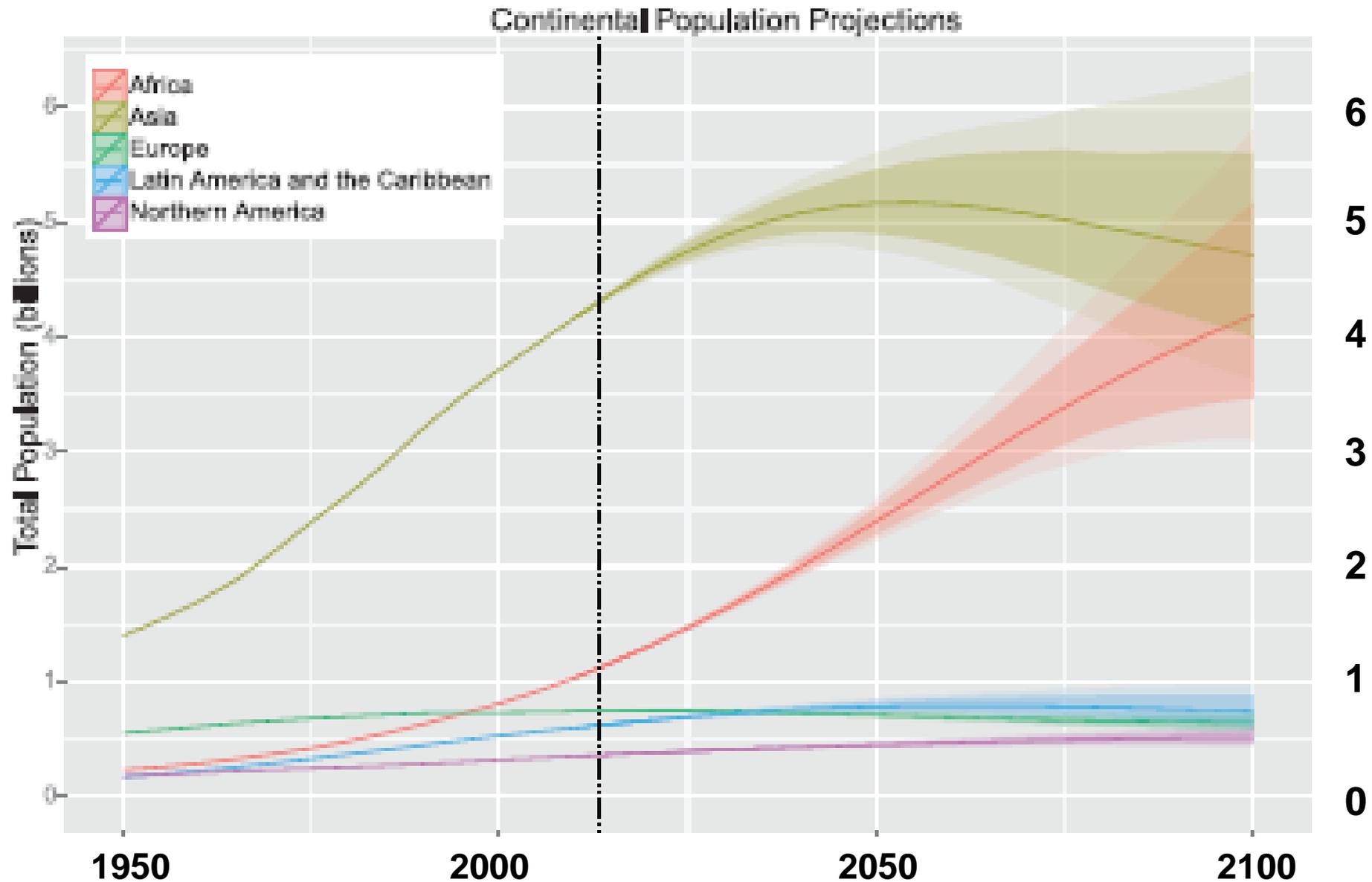
D'après Hoekstra & Mekonnen (2012)
The Water Footprint of Hummanity, PNAS

7. Demande mondiale en eau en 2050...

Projections démographiques 1950-2100 (Nations-Unies, 2014), Milliards



Populations des grandes régions du monde, 1950-2100 (Nations Unies 2014), Milliards



Besoins en eau en 2050-2100

- Avec une consommation moyenne pour se nourrir de 1.300 m³/an per capita en 2000,
1.400 m³/an en 2050
1.500 m³/an en 2100:
- ~**8.100** km³/an étaient nécessaires en 2000,
~**13.000** km³/an seront nécessaires en 2050
~**16.500** km³/an en 2100

Est-il possible de trouver tant d'eau ?

- Déficit dans l'espace:
 - **Déplacer l'eau**, transferts majeurs d'eau



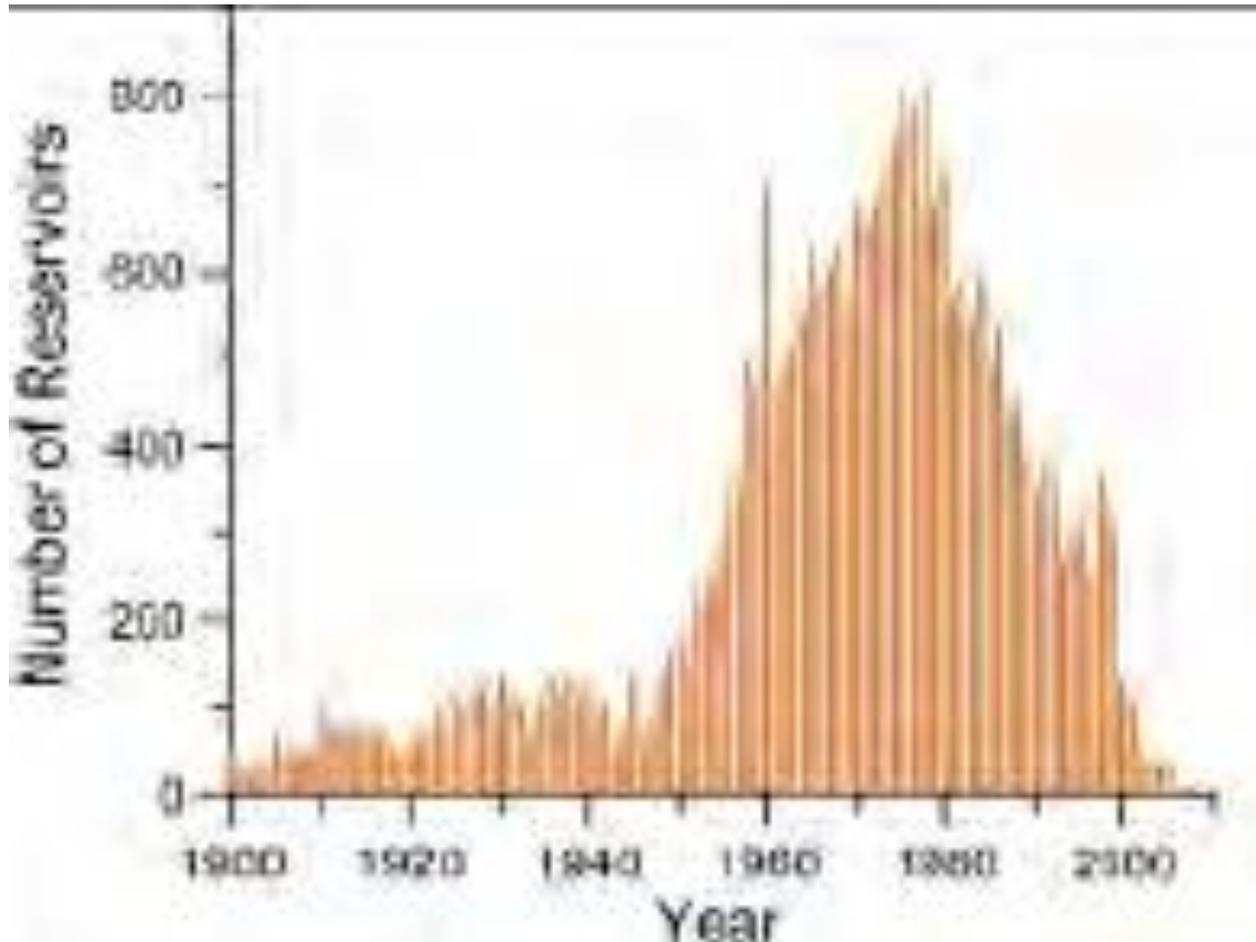
Est-il possible de trouver tant d'eau ?

- Déficit dans l'espace:
 - **Déplacer l'eau**, transferts majeurs d'eau...
 - **Déplacer de l'eau virtuelle**, si de la terre est disponible ailleurs pour produire la nourriture...
 - **Déplacer les populations** : migrations à grande échelle... ?

Est-il possible de trouver tant d'eau ?

- Déficits dans le temps :
 - Stocker de l'eau (barrages, **aquifères...**)
 - Stocker de la nourriture... (Chine...)

Construction de barrages dans le Monde : (Chao et al., 2008)



Eau stockée dans des barrages en m³ par habitant

- US : ~5.000 m³
- France : ~900 m³
- Afrique : ~3 m³

Eau stockée dans des barrages en % du débit annuel des rivières :

- France : 3%
- Espagne : 50%
- Maroc : 200%
- Colorado, US : 400%

Stockage en Aquifères

- Les Hydrogéologues devraient faire des efforts d'ingénierie de stockage de l'eau en aquifères...
- Ils ont un rôle à jouer vis-à-vis de la construction de barrages;
- Les barrages sont très chers et engendrent beaucoup d'opposition;
- Le stockage en aquifères demande des solutions innovantes, même chère...!
- Barrages souterrains ???? En Karst ????

Autres solutions :

- Réduire les pertes alimentaires
- Améliorer les rendements des cultures
- Augmenter les superficies irriguées
- Favoriser la culture de variétés plus économes en eau, en développer de nouvelles adaptées aux conditions semi-arides ou même aux sols légèrement salés
- Sélection génomique ou OGM ?
- Mais les moyens génétiques ne semblent pas pour l'instant capables de beaucoup modifier l'échange "eau contre CO₂"

Pertes alimentaires

