Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE
Société savante fondée le 17 mars 1830
Reconnue d'utilité publique le 3 avril 1832
2016

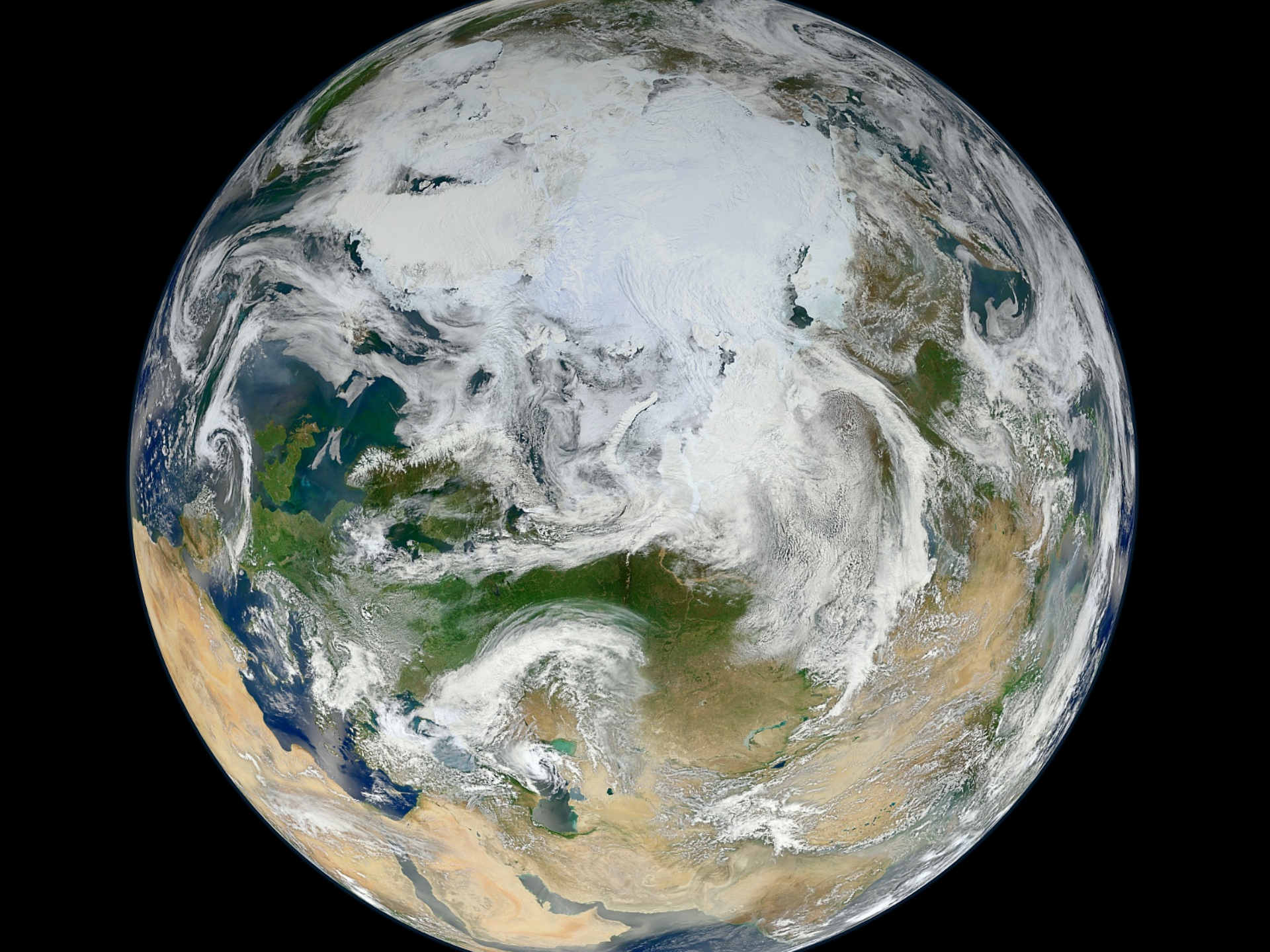
Le cycle de l'eau et l'adéquation ressources-besoin au 21ème siècle

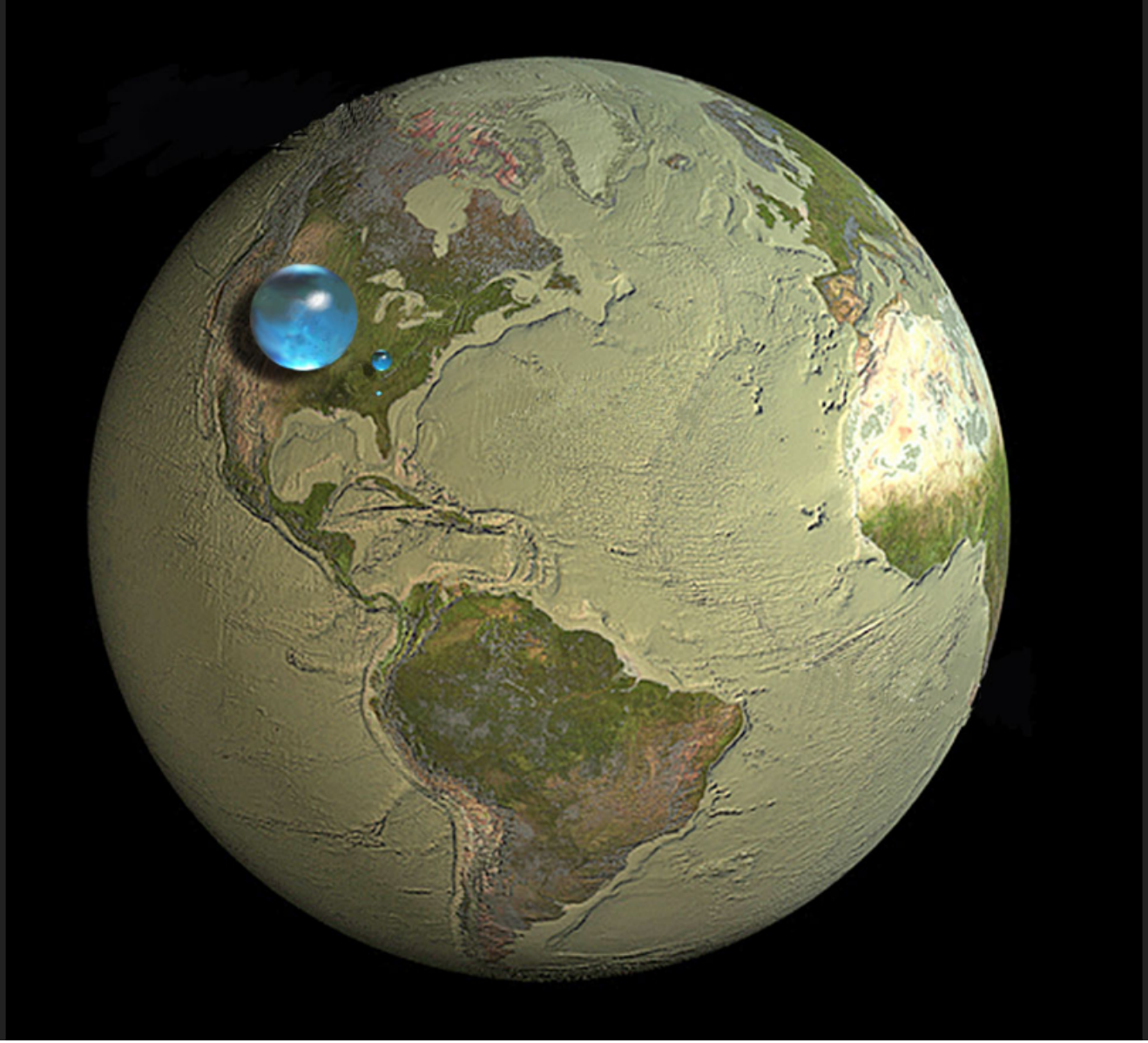
Ghislain de Marsily

Lundi 27 Juin 2016
Aix en Provence

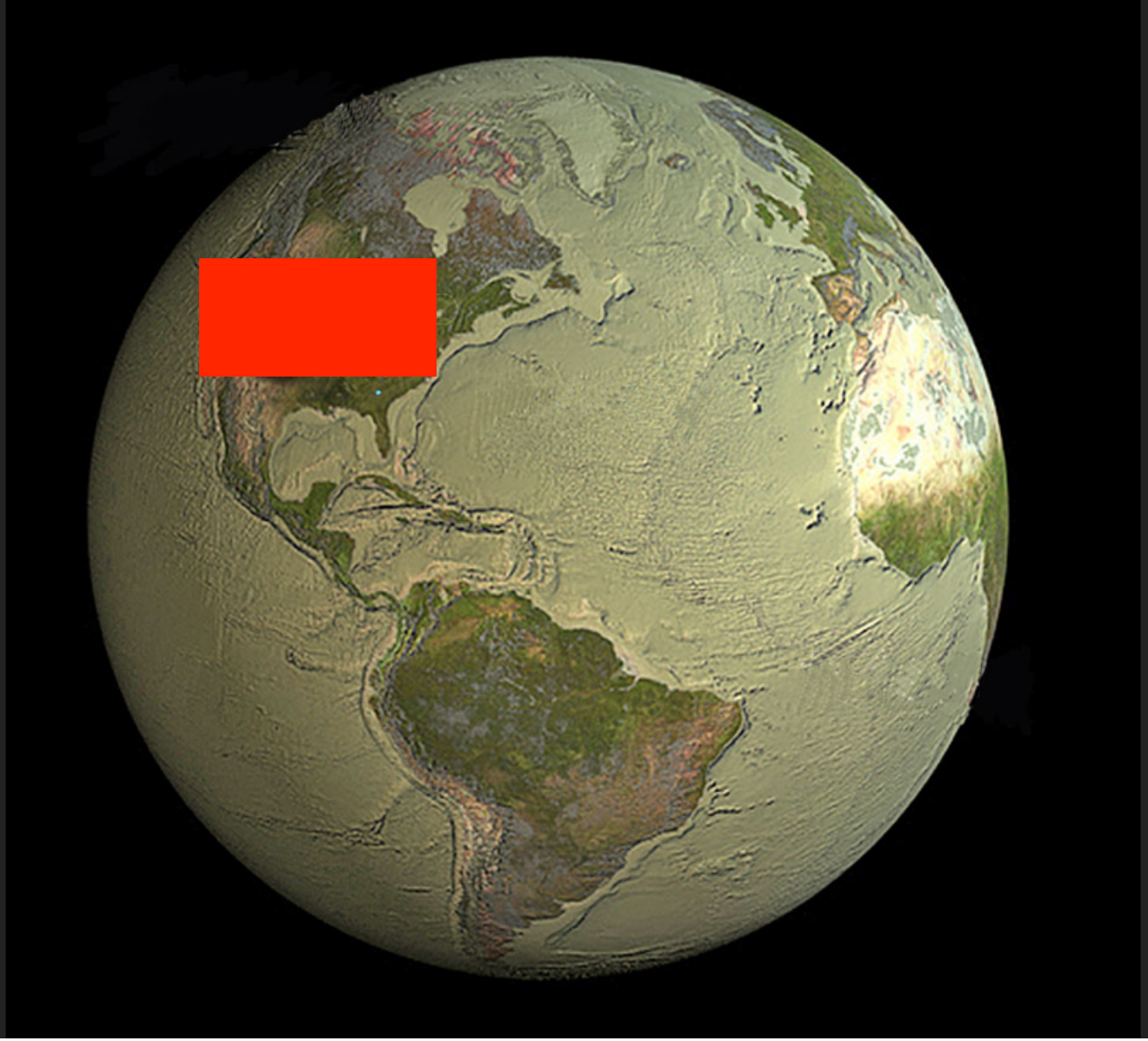
UNIVERSITE PIERRE & MARIE CURIE
LA SCIENCE A PARIS

INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



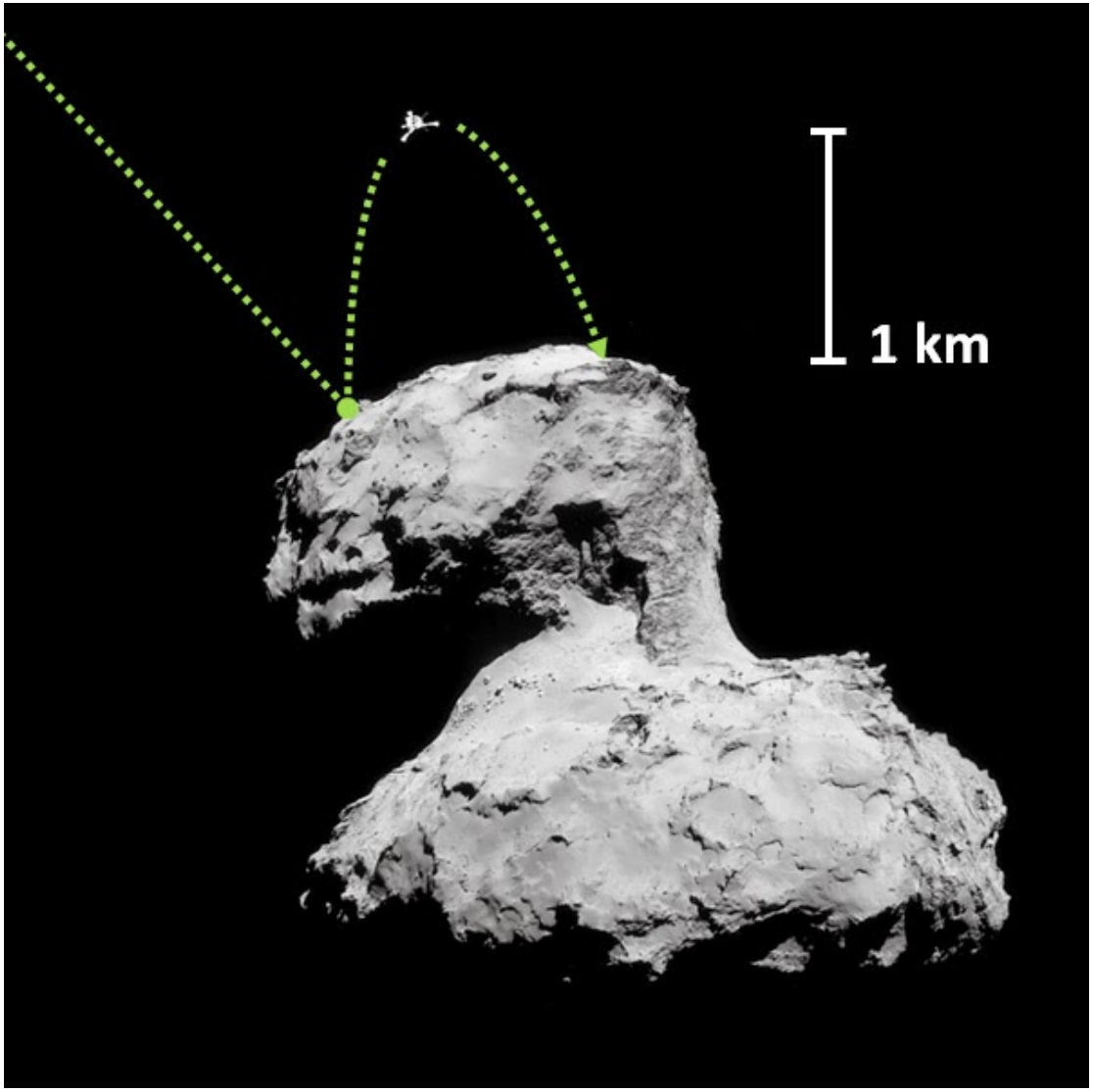


Volume d’eau sur terre, eau salée, eau douce, eau douce non gelée.
Document US Geological Survey, USA

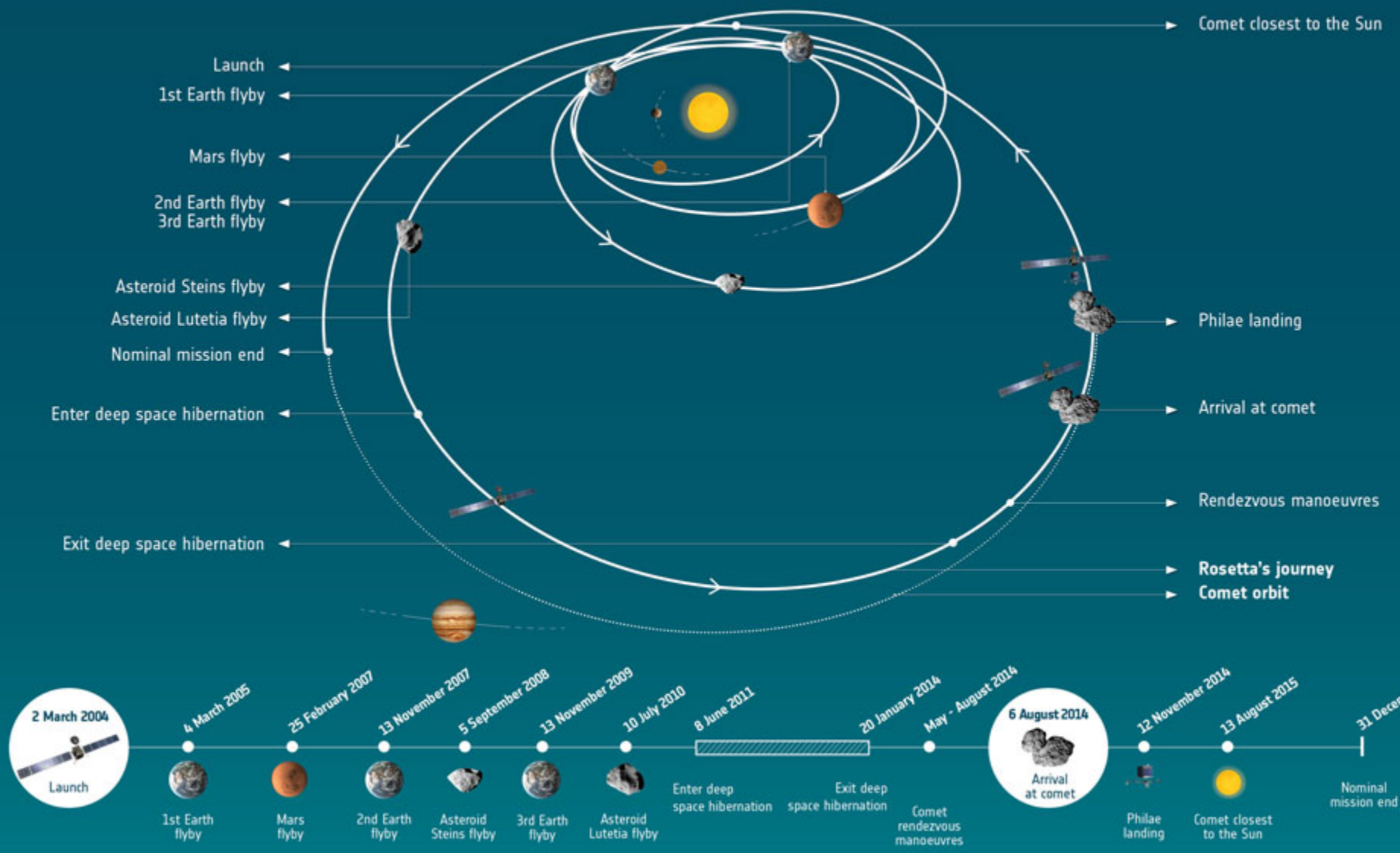


D’où vient l’eau sur Terre ???

Comète 67P/Churyumov-Gerasimenko
Mission ESA Rosetta-Philae
12 Novembre 2014

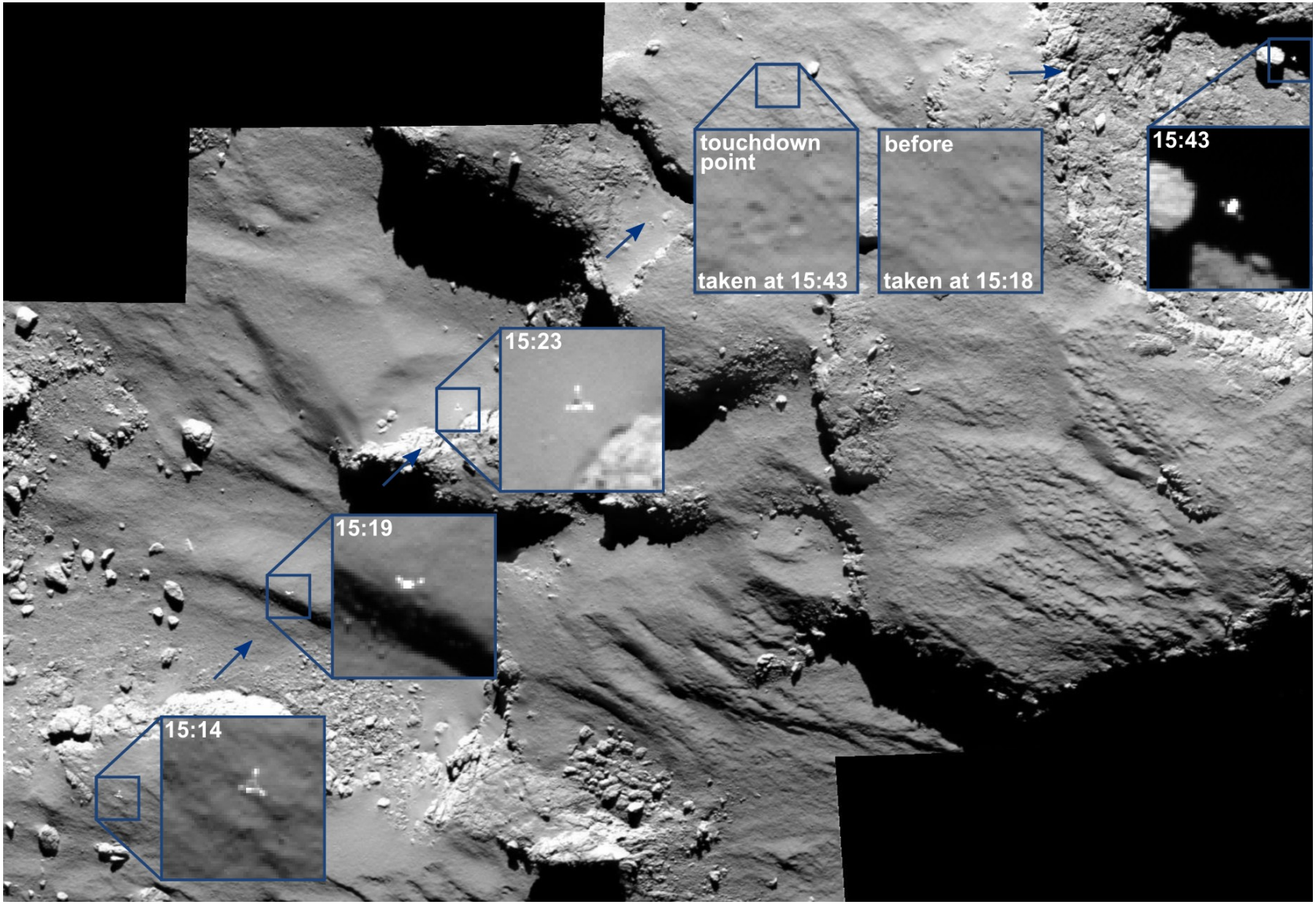


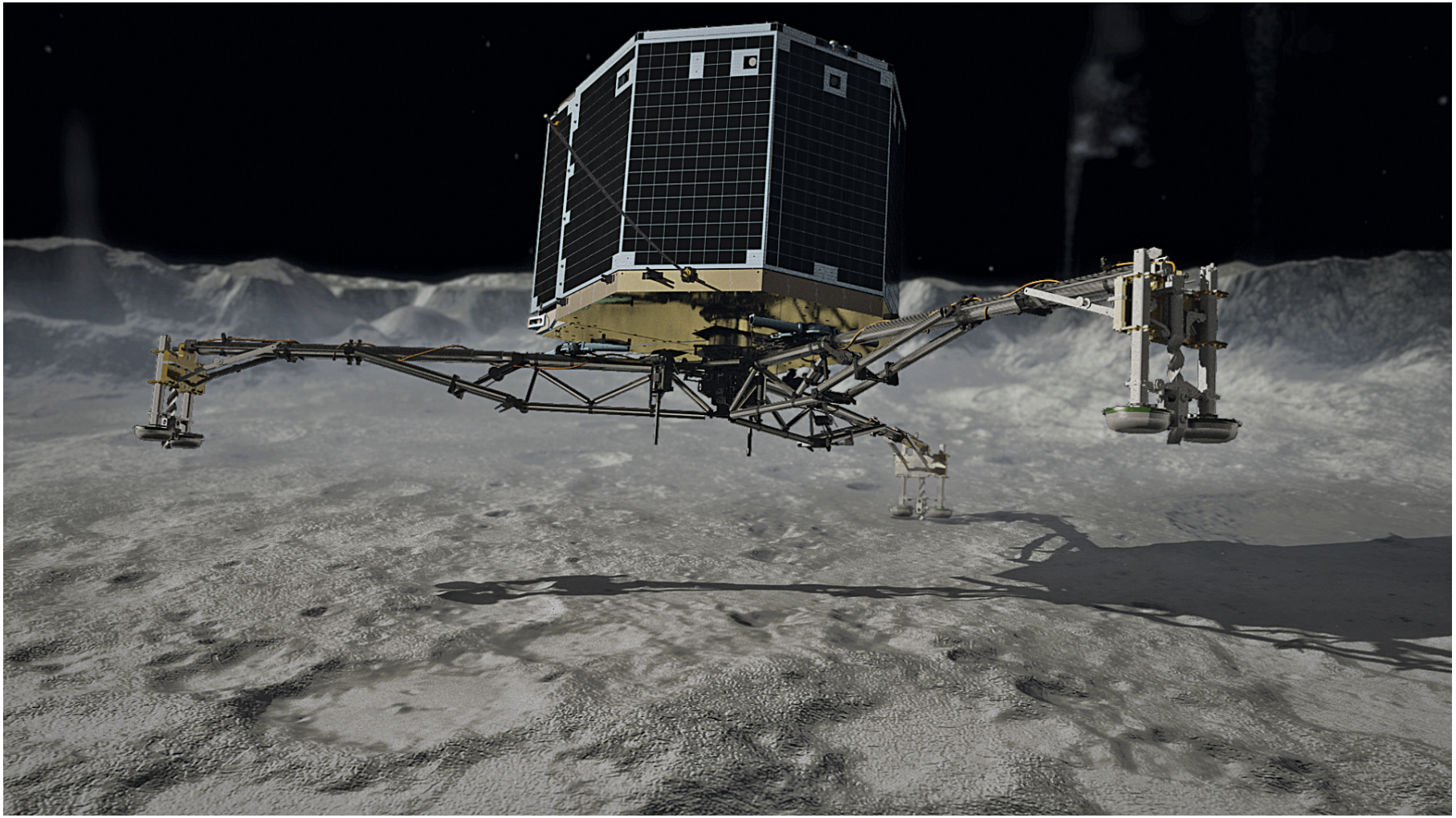
→ ROSETTA'S JOURNEY

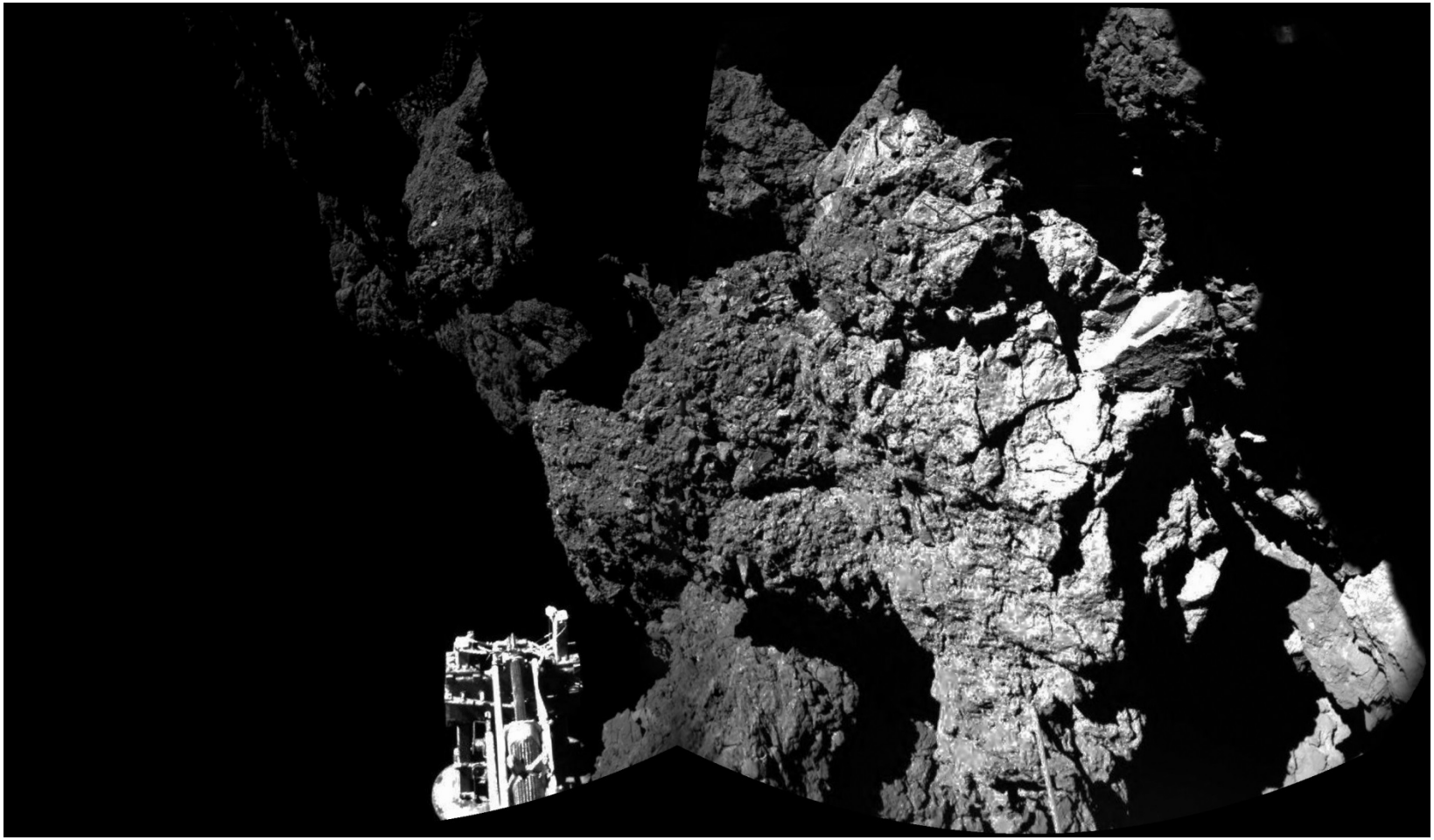


www.esa.int

European Spa


touchdown point
taken at 15:43
before
taken at 15:18
15:43
15:23
15:19
15:14





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

Bilan en eau de la Planète

1. Flux et Stocks

Rappel….

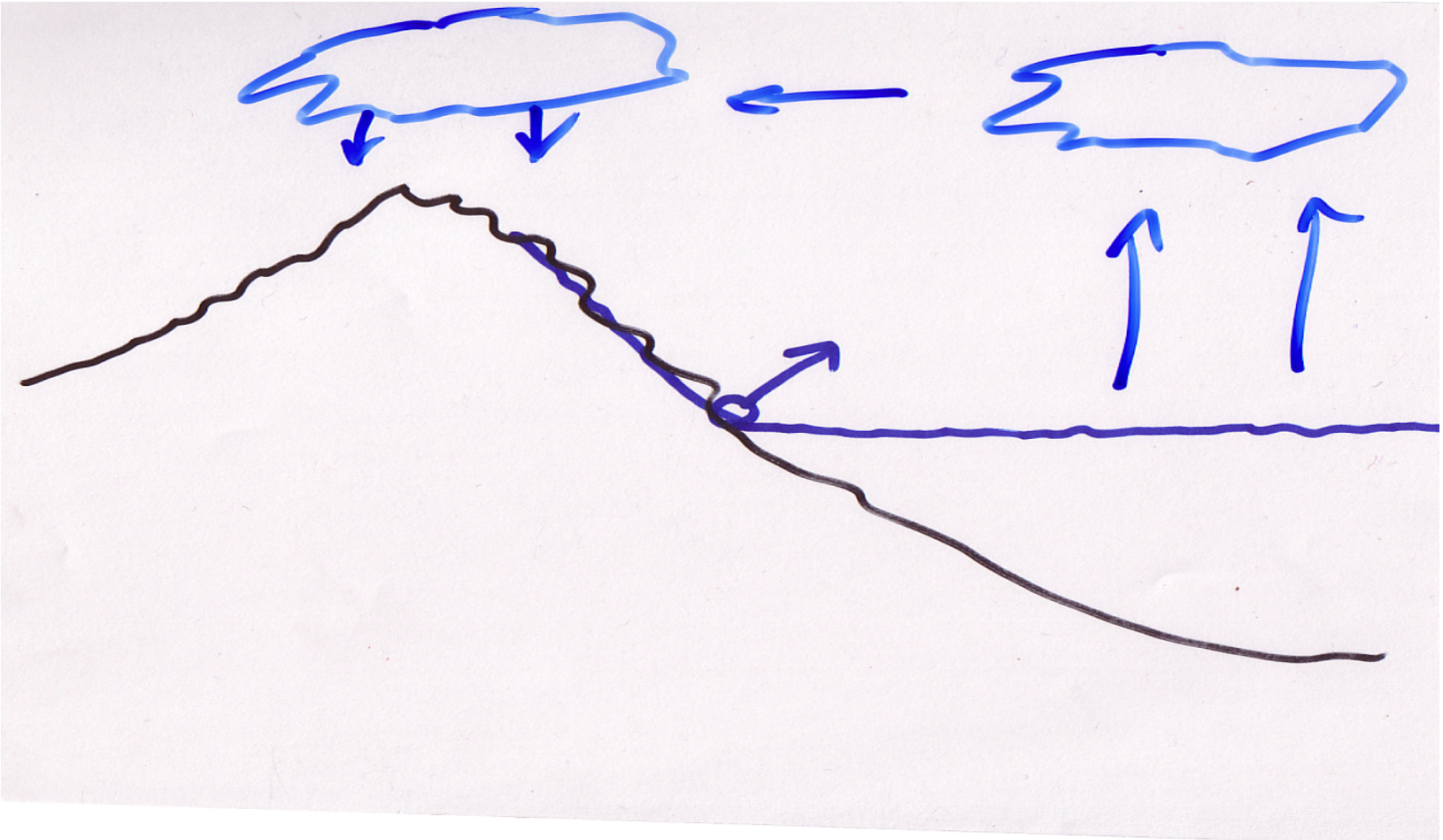
- **Le stock total d'eau sur Terre est à peu près constant…**

  -Pertes dans la haute atmosphère :

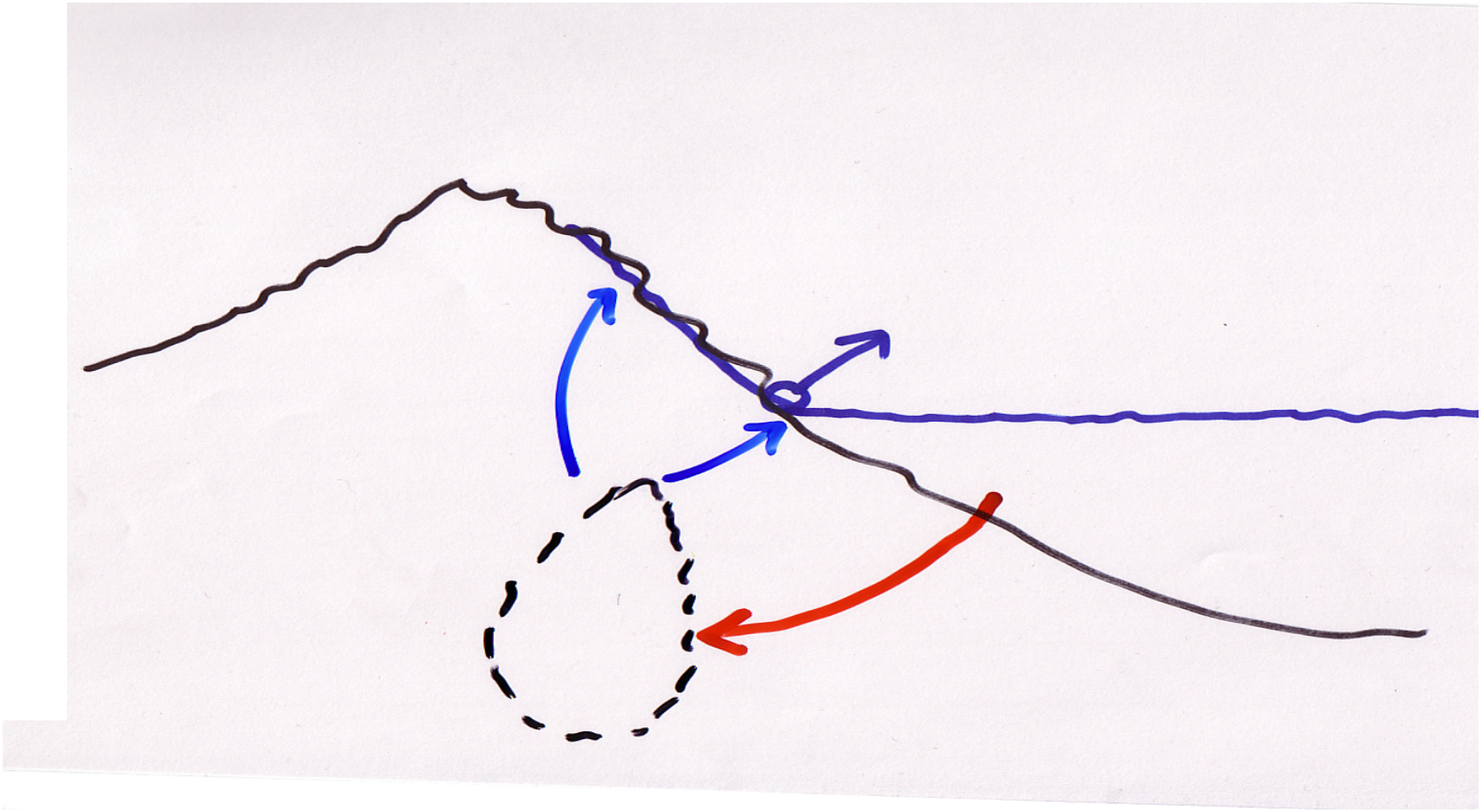
  Radiation solaire sur $H_2O \rightarrow H_2 + ½\ O_2$

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

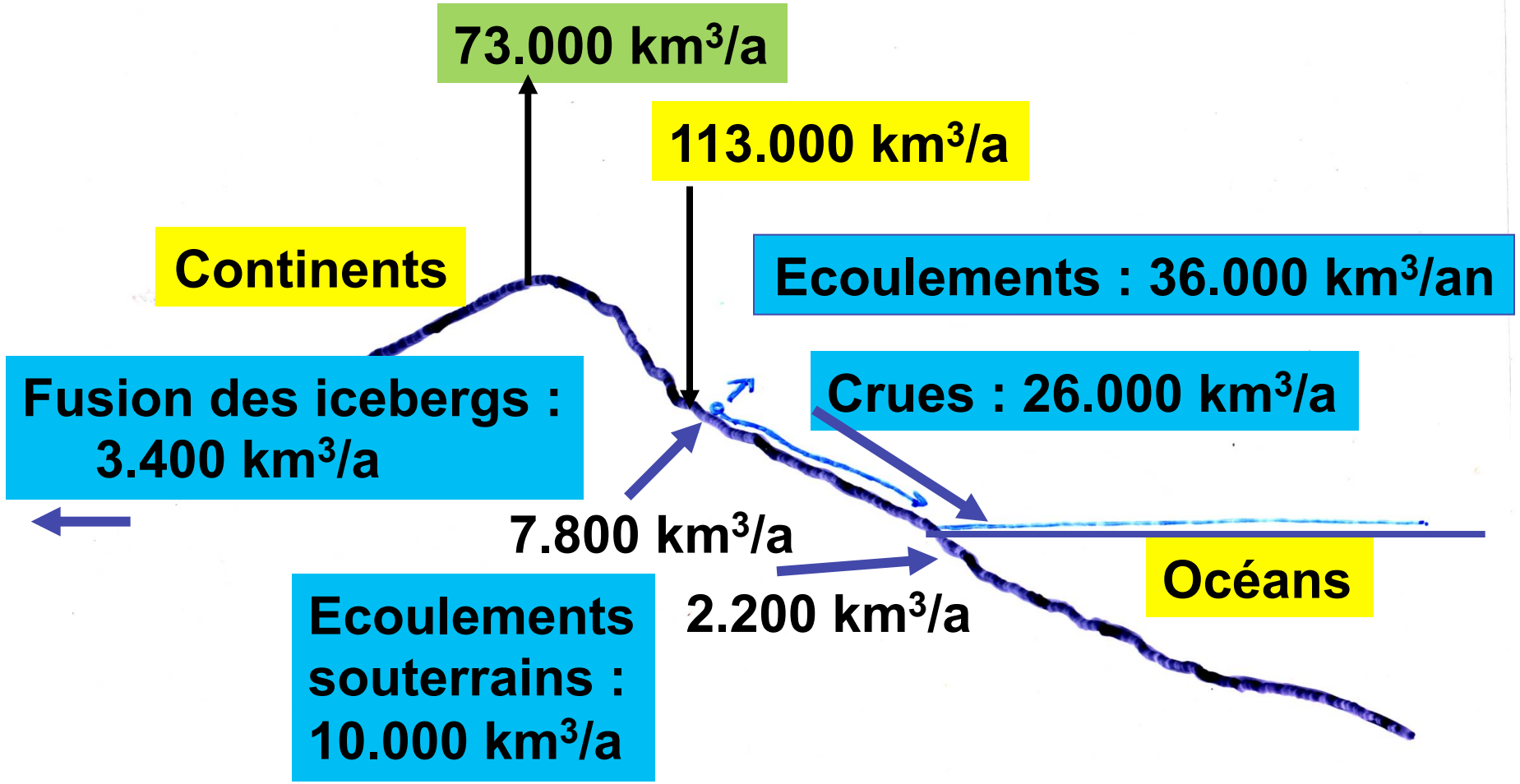
Le Cycle de l'Eau
per ascensum



Le Cycle de l'Eau
Per descensum

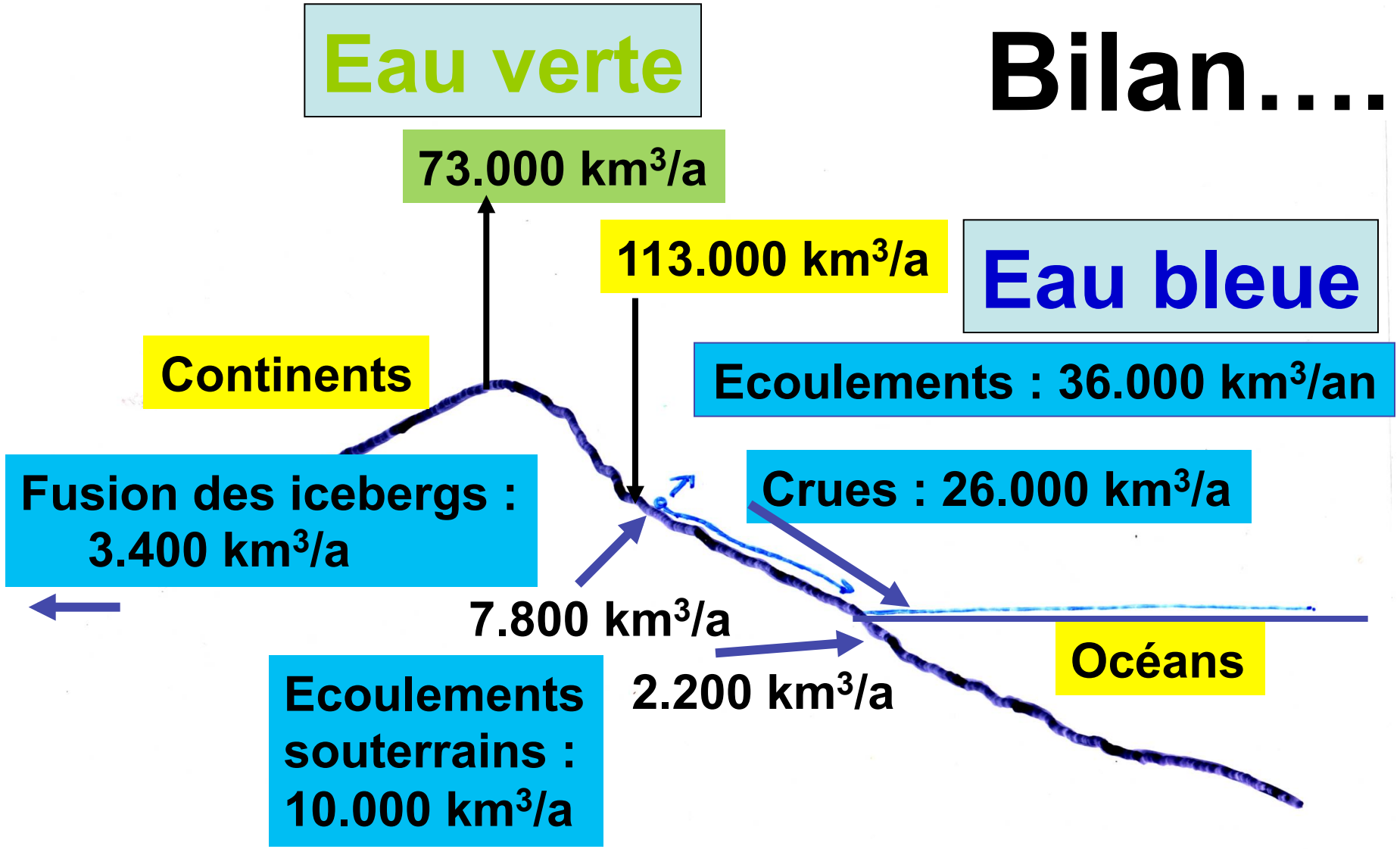


Bilan….



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

Bilan….



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

Consommation et prélèvements :

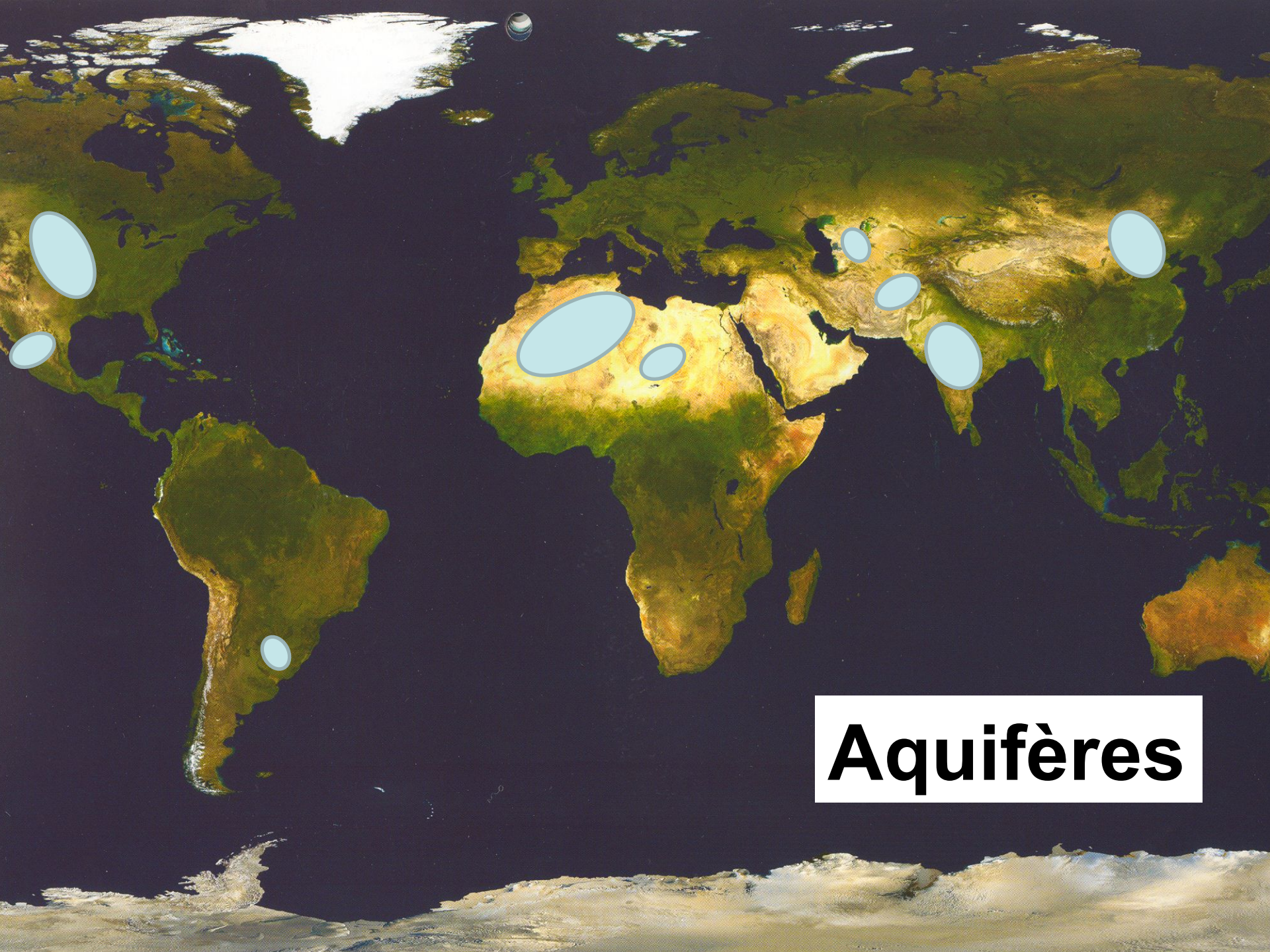
- **Le prélèvement** est le débit d'eau **BLEUE** qui est pris dans l'environnement continental (rivière, lac, nappe souterraine) et utilisé par l'homme.

- **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**.

Brousse tigrée du plateau de Sofia Bangou près de Banizoumbou, Niger (60 km à l'est de Niamey). Celle-ci est essentiellement composée d'une espèce pionnière, Guiera senegalensis (vert clair) ©IRD, Jean Asseline, 2005

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

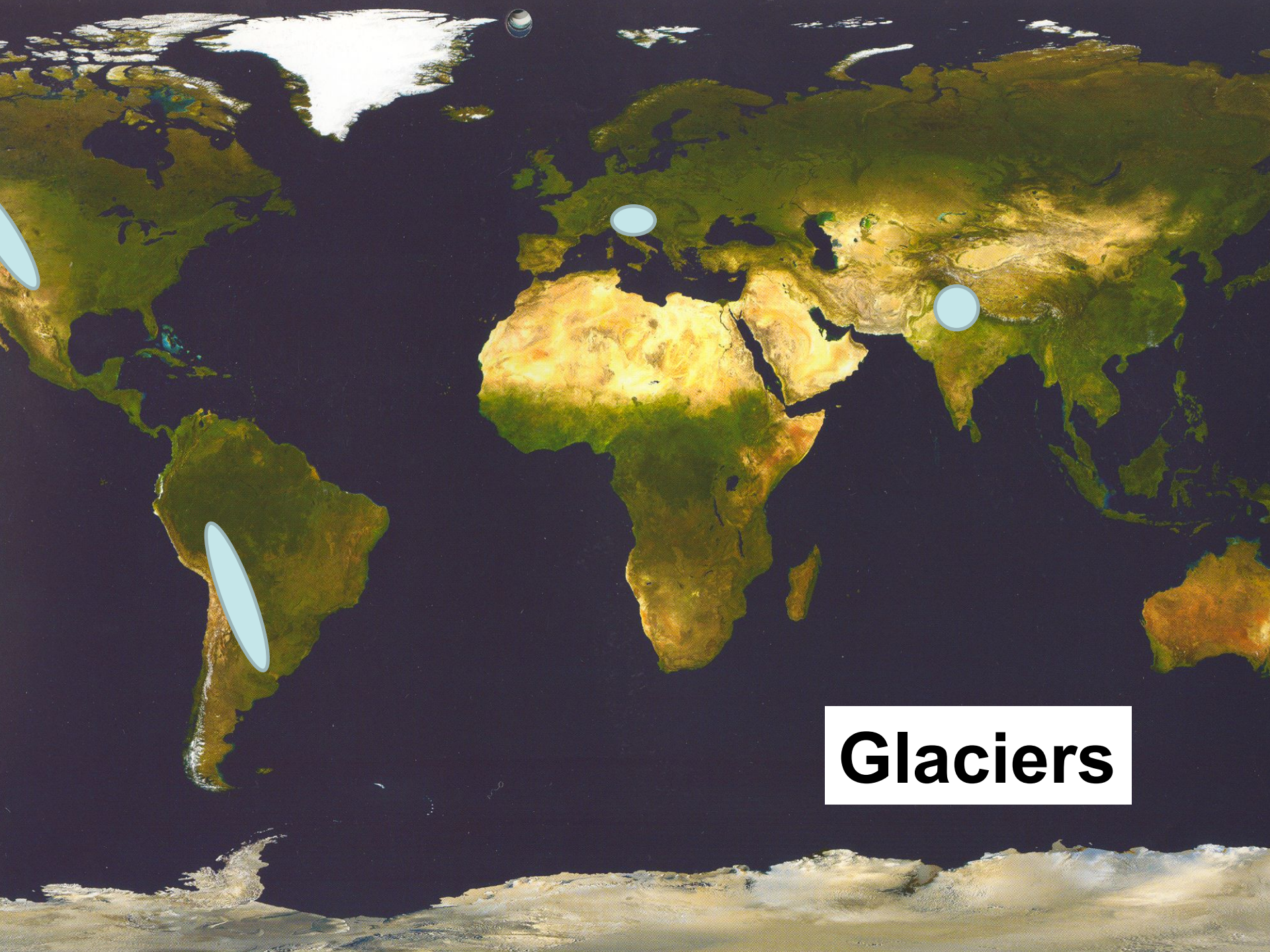
1. Aquifères
2. Glaciers


Aquifères

Pompage et sur-pompage dans les nappes, consommation en eau des cultures zones irriguées en 2000, en km^3/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

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…

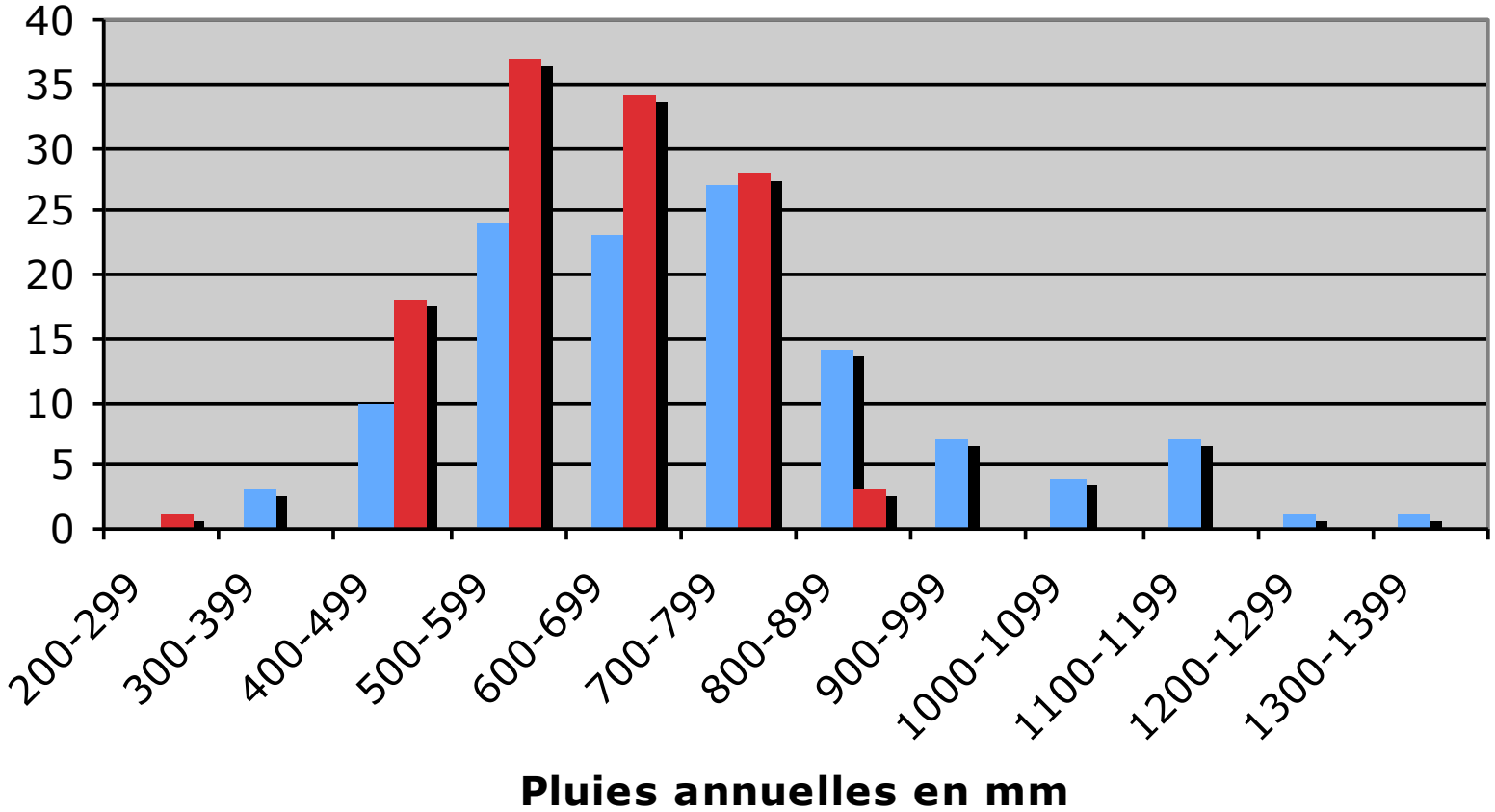
- En montagne, les précipitations doublent environ tous les 2.000 m
  - Les montagnes sont les “chateaux d’eau” des plaines en aval (Himalaya, Alpes, Rocheuses, Cordillère des Andes, Ethiopie…)
- Il pleut plus près des côtes qu’à l’intérieur des continents…

Variabilité inter-annuelle des précipitations

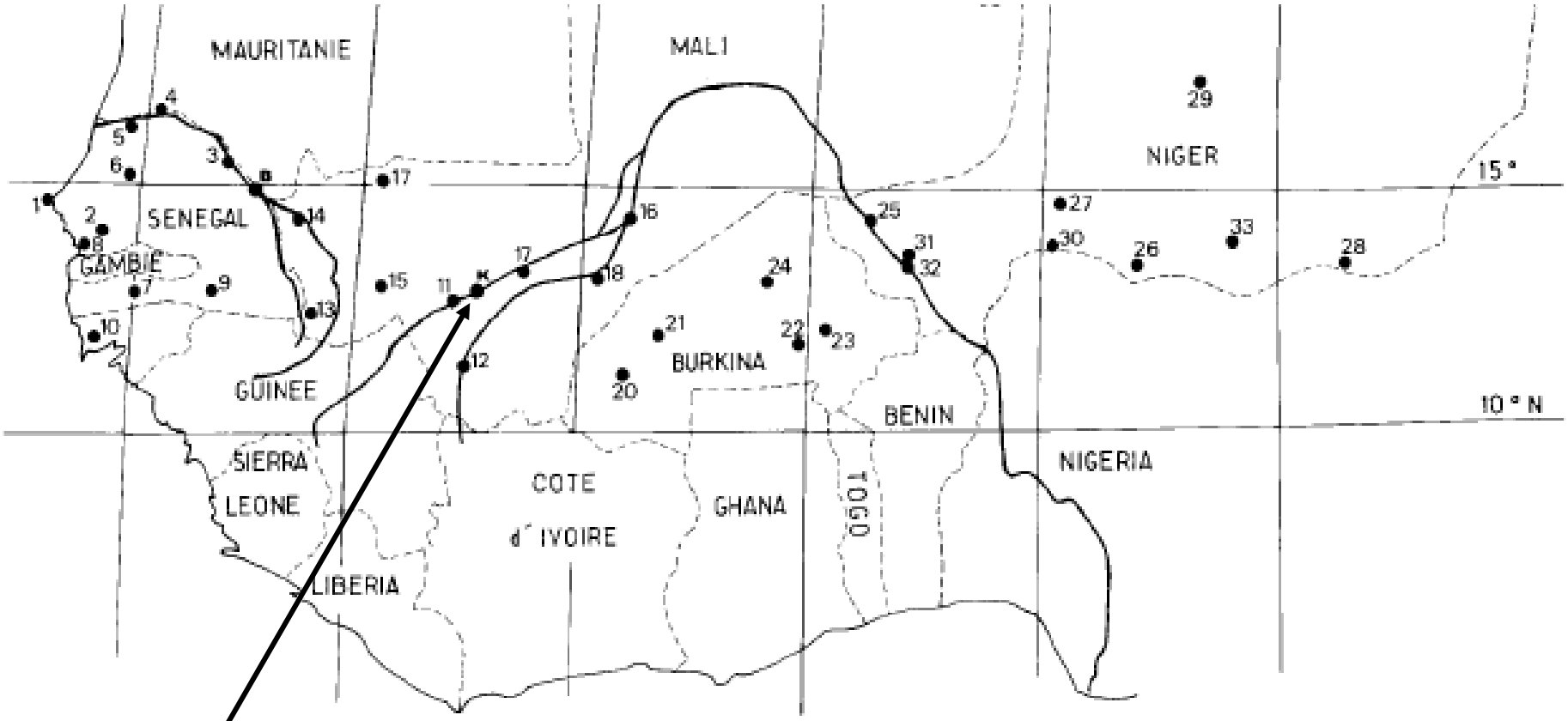
Histogrammes des pluies annuelles à Montpellier et à Paris (1873-1993)

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

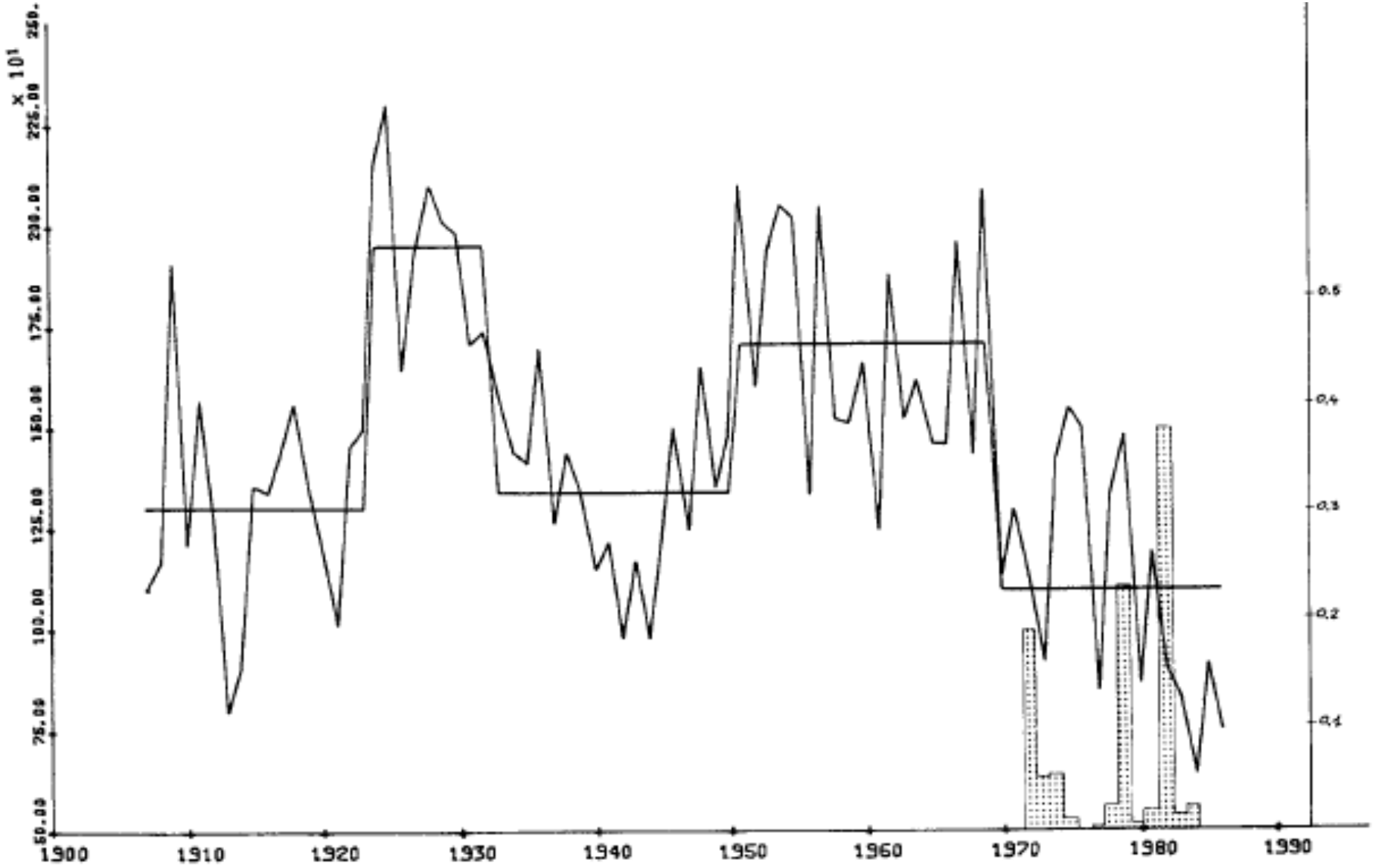


Sécheresse au Sahel…

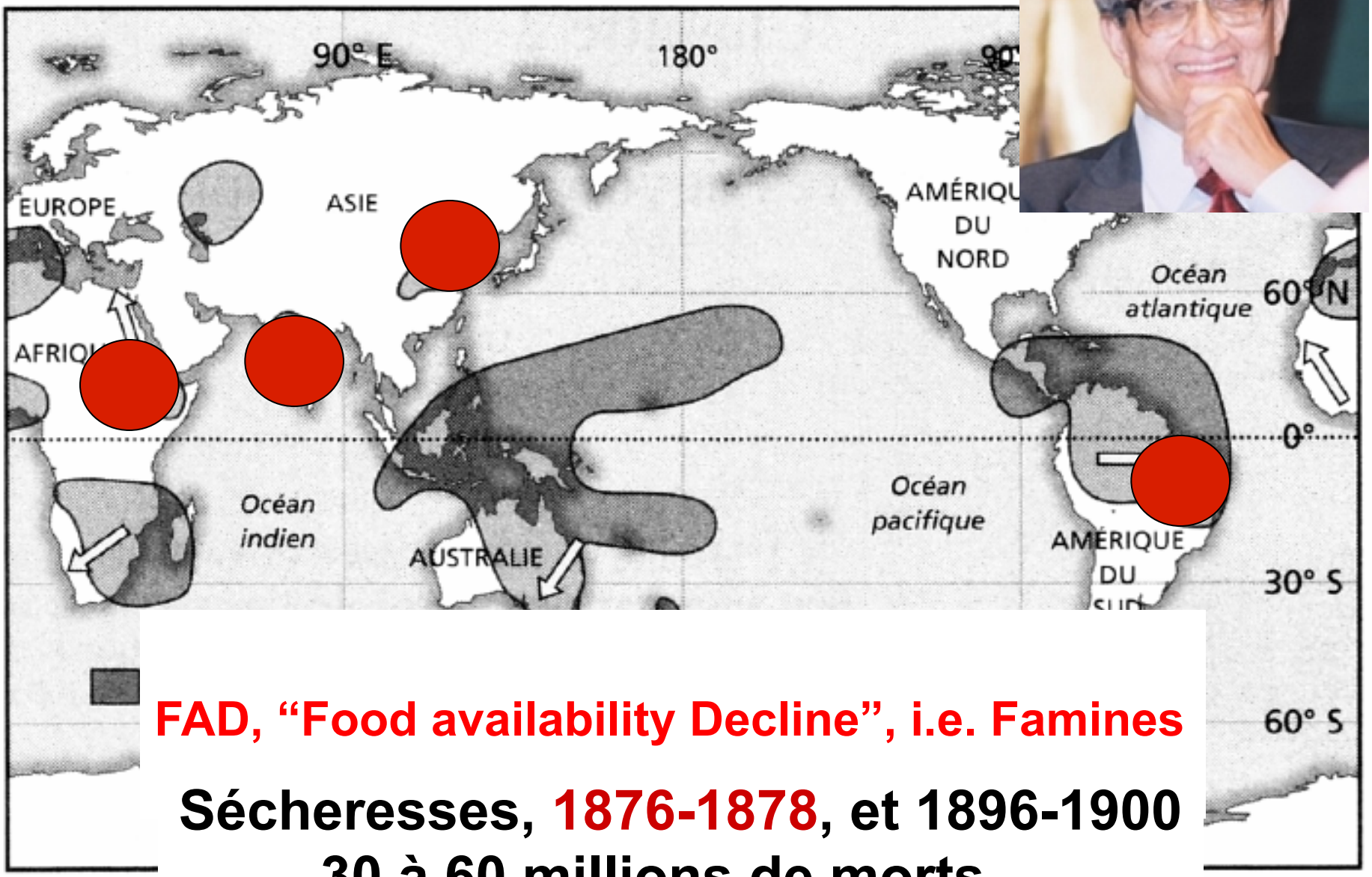


Koulikoro, Niger

Débit moyen annuel du fleuve Niger à Koulikoro, 1900-1990
Pierre Hubert et al, 1989



Prof. Amartya SEN, Prix Nobel d'Economie



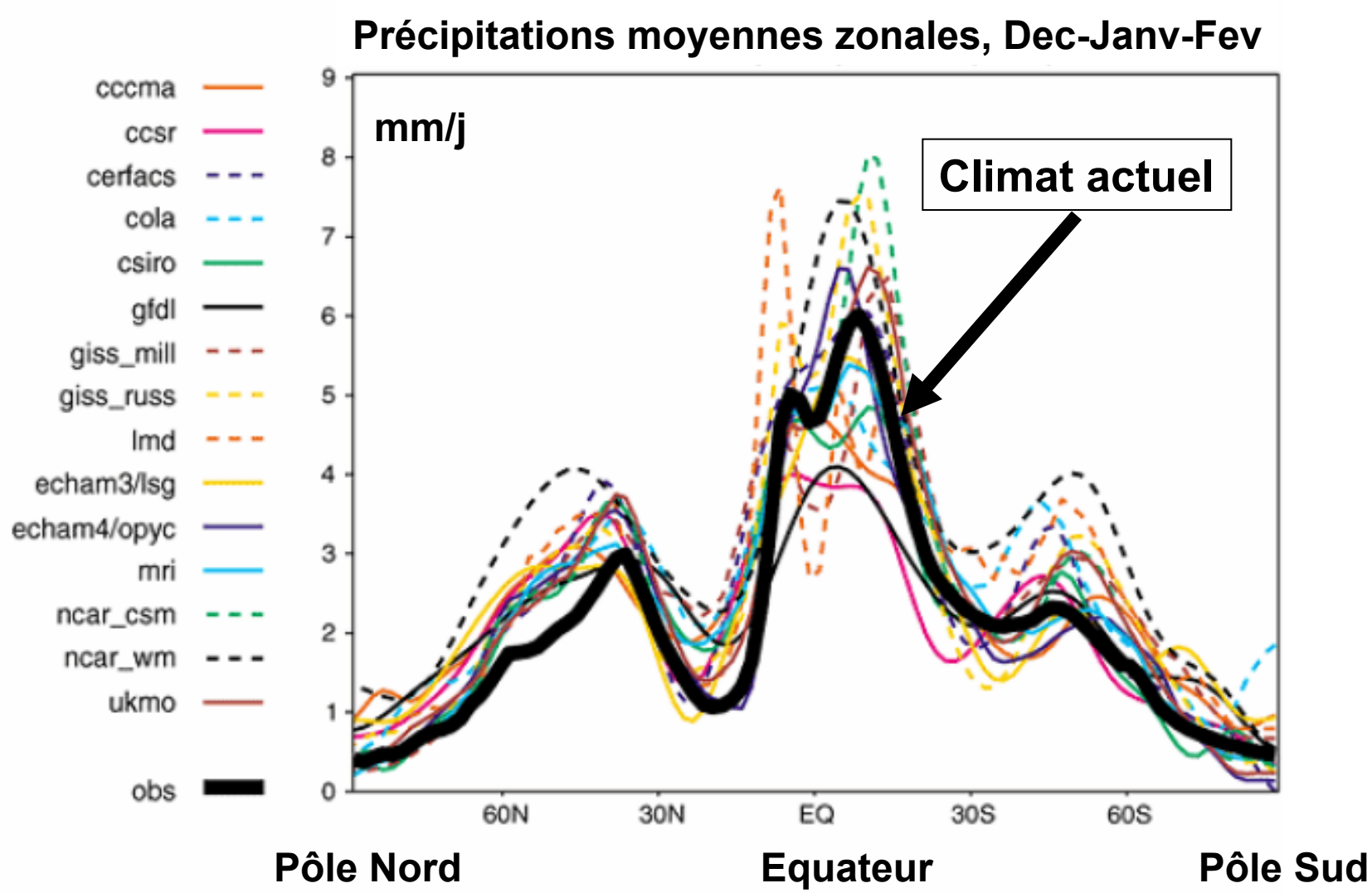
FAD, "Food availability Decline", i.e. Famines

Sécheresses, 1876-1878, et 1896-1900

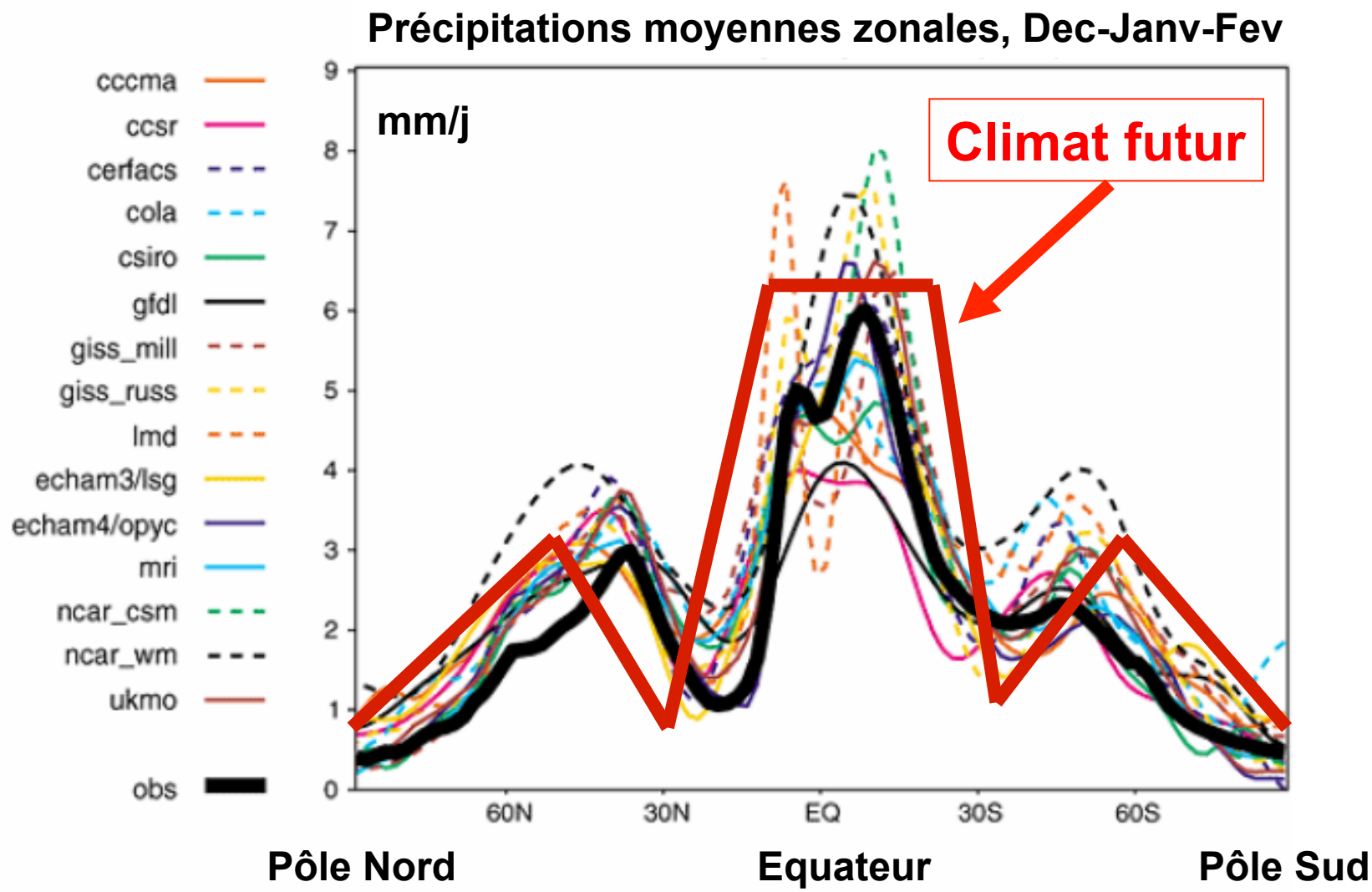
30 à 60 millions de morts…

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



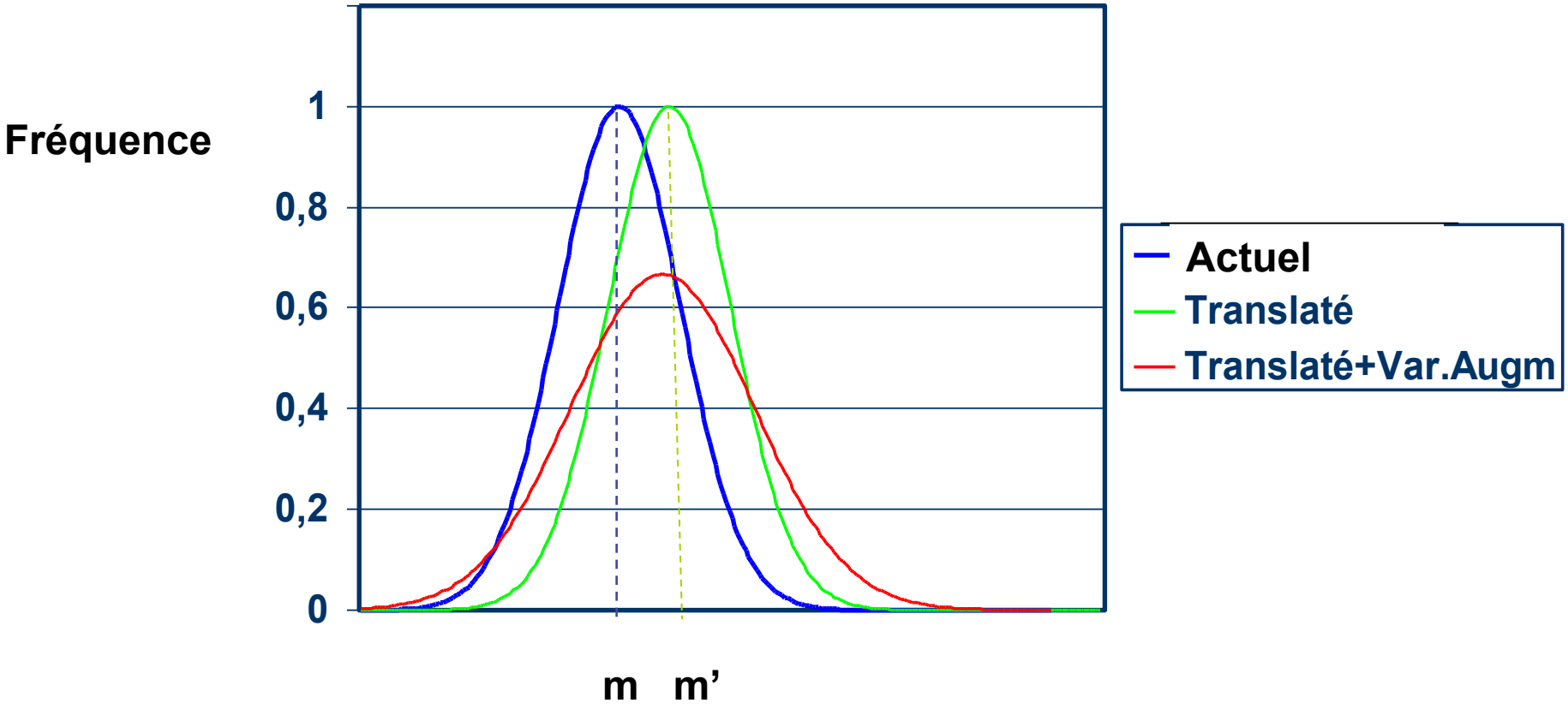
Variation de la pluie (de pôle à pôle) pour 15 modèles de climat, et observations



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 1à 3°C et plus de CO_2, 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 Mediterranéenne et** gain de **160 million ha au Nord (Siberie, 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

Programme RExHySS, (2009, 2013), F. Habet, A. Ducharne et al.

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

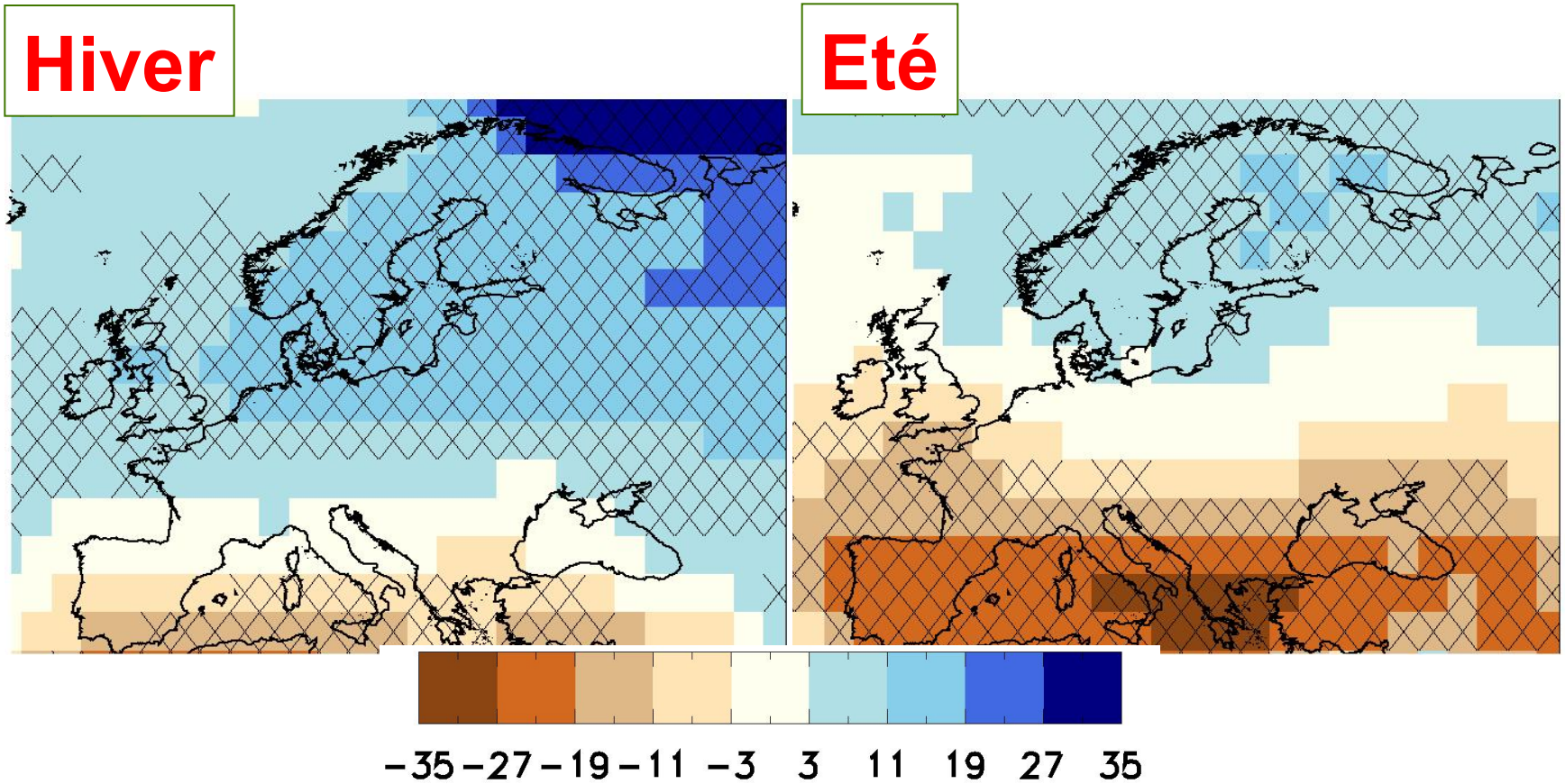
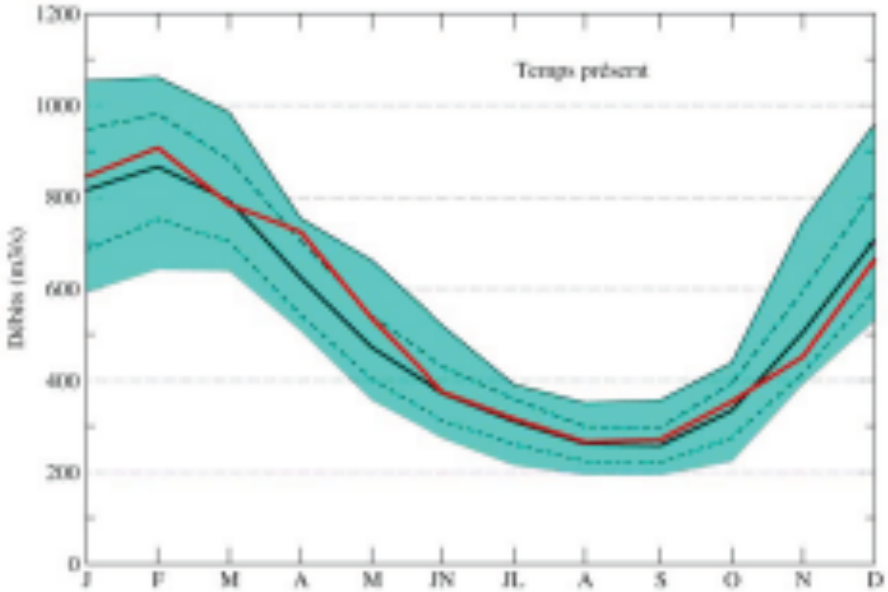


Fig: Julien Boé, CERFACS

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)



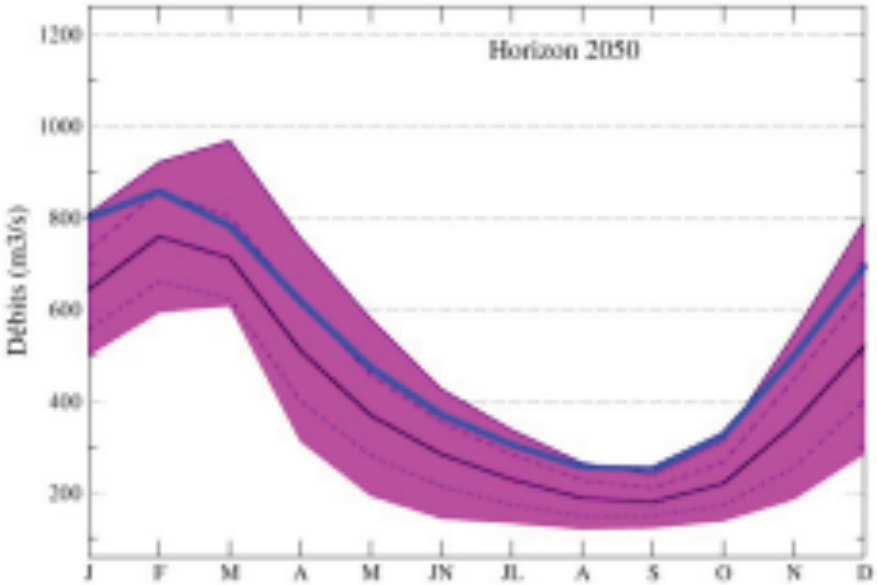
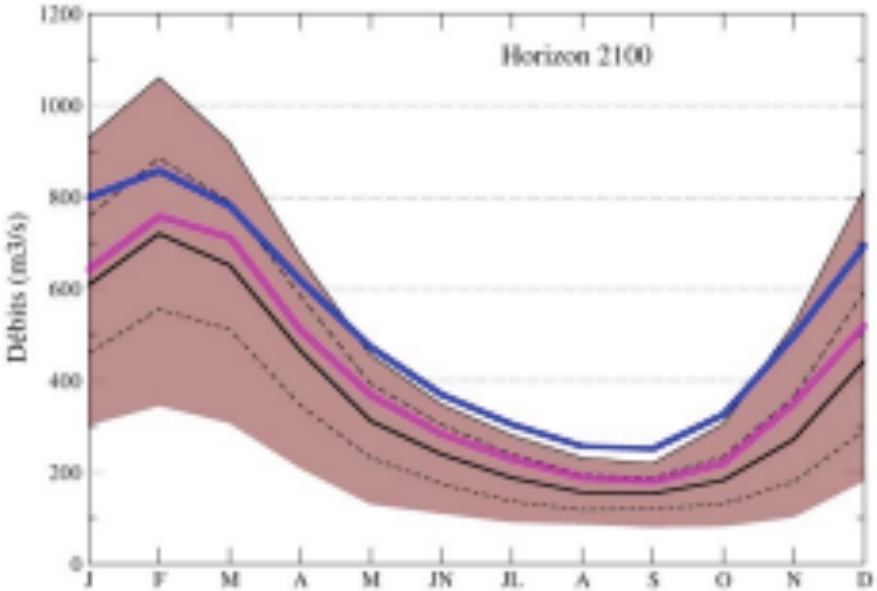


Figure 1 - Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses par l'ensemble des modèles hydrologiques et sur l'ensemble des scénarios. L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais noir la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe pour un écart-type. Temps présent : 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.



Evolution des fréquences des événements extrêmes en 2100

Pluies journalières temps présent, mm
Période de retour 10 ans

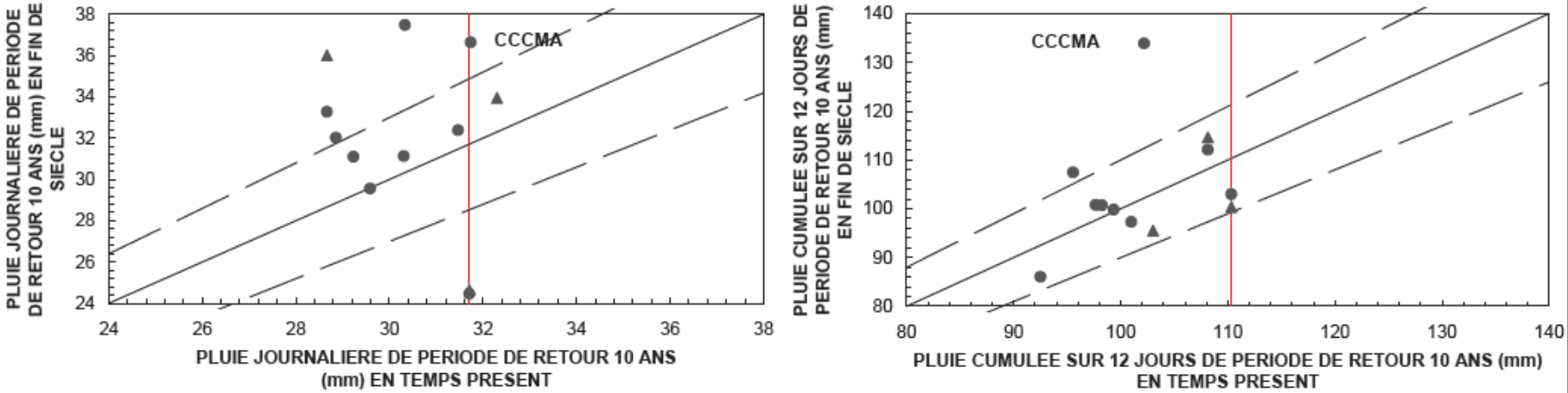
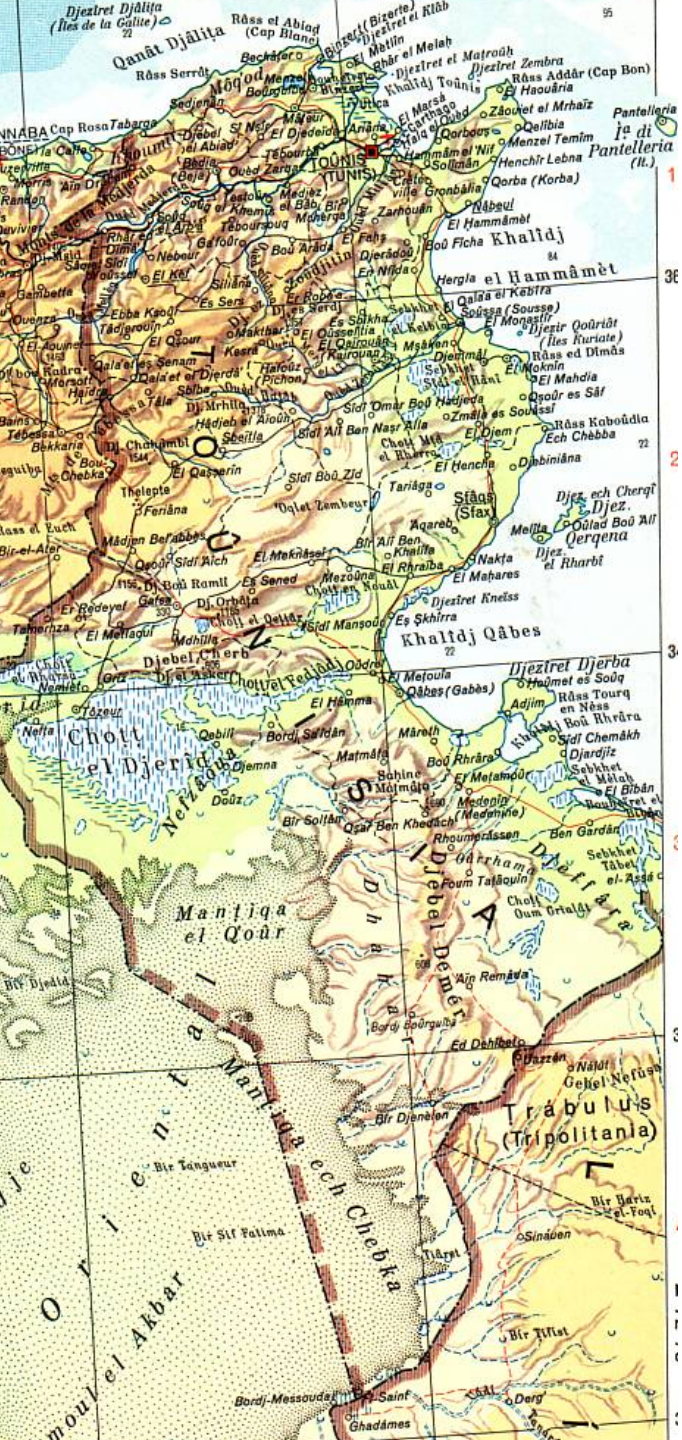


Figure 4 - Evolution des quantiles décennaux de la précipitation moyenne à l'amont de Paris entre le climat présent (PST) et la fin du siècle (FS) : maximum journalier annuel *PJXA*10 et maximum annuel du cumul sur 12 jours *P*12*JXA*(*T*= 10 ans). Un point par scénario climatique régionalisé (● : scénarios régionalisés A1B ; ▲ : scénarios régionalisés A2 – issus du modèle climatique ARPEGE). La droite oblique est la première bissectrice et celles en tireté définissent les enveloppes à ± 10 % des valeurs PST. La droite verticale rouge donne les quantiles décennaux déduits des précipitations SAFRAN pour la période PST.

5. Les besoins en eau actuels:

Exemple Tunisien

La Tunisie



Surface 164.000 km²

Cultivable : 5 millions d'ha

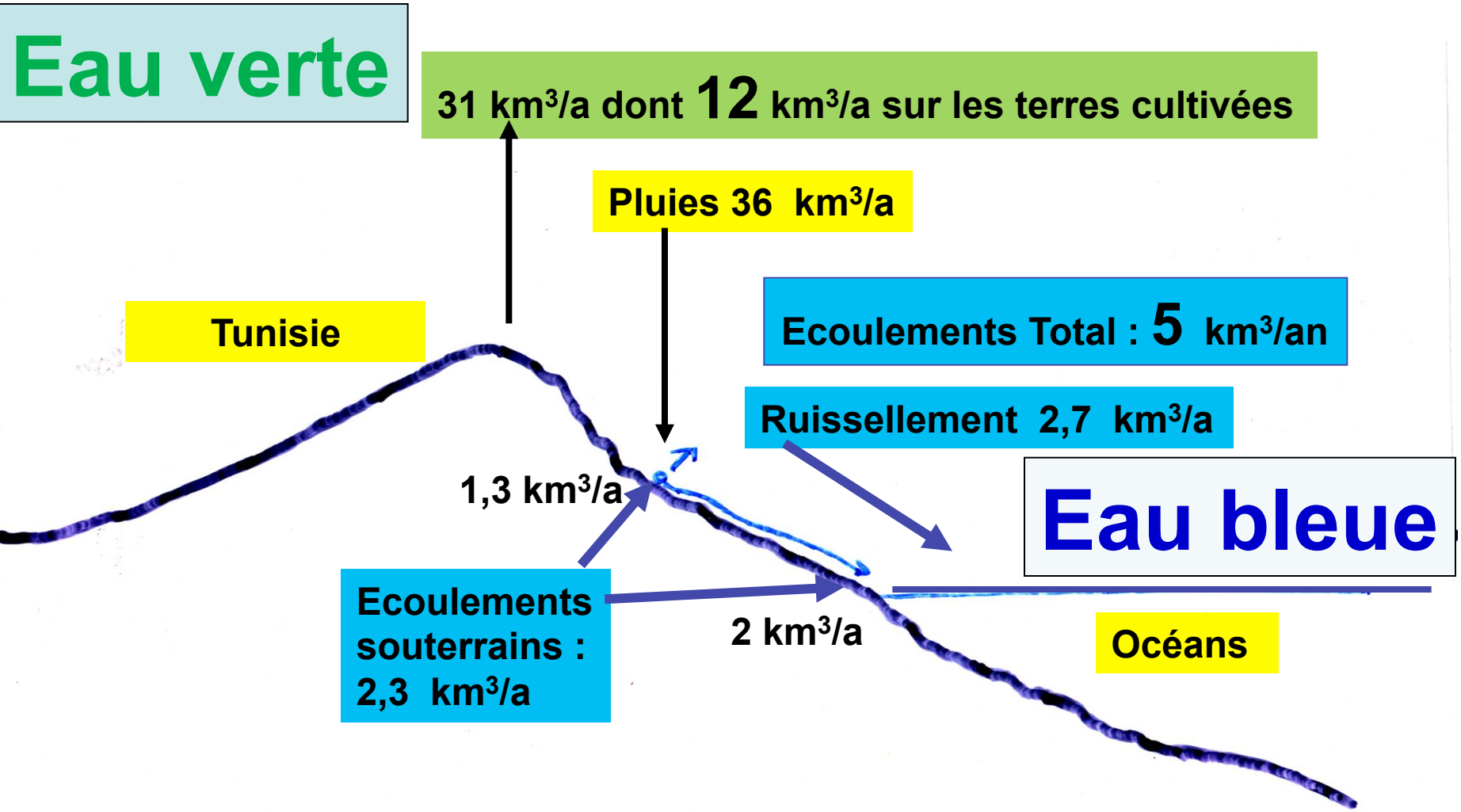
Irrigable : 0,56 million d'ha

10 millions d'habitants

Pluie 220 mm/an

Total eau de pluie 36 km³/an

5. 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'rrigation	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'rrigation	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

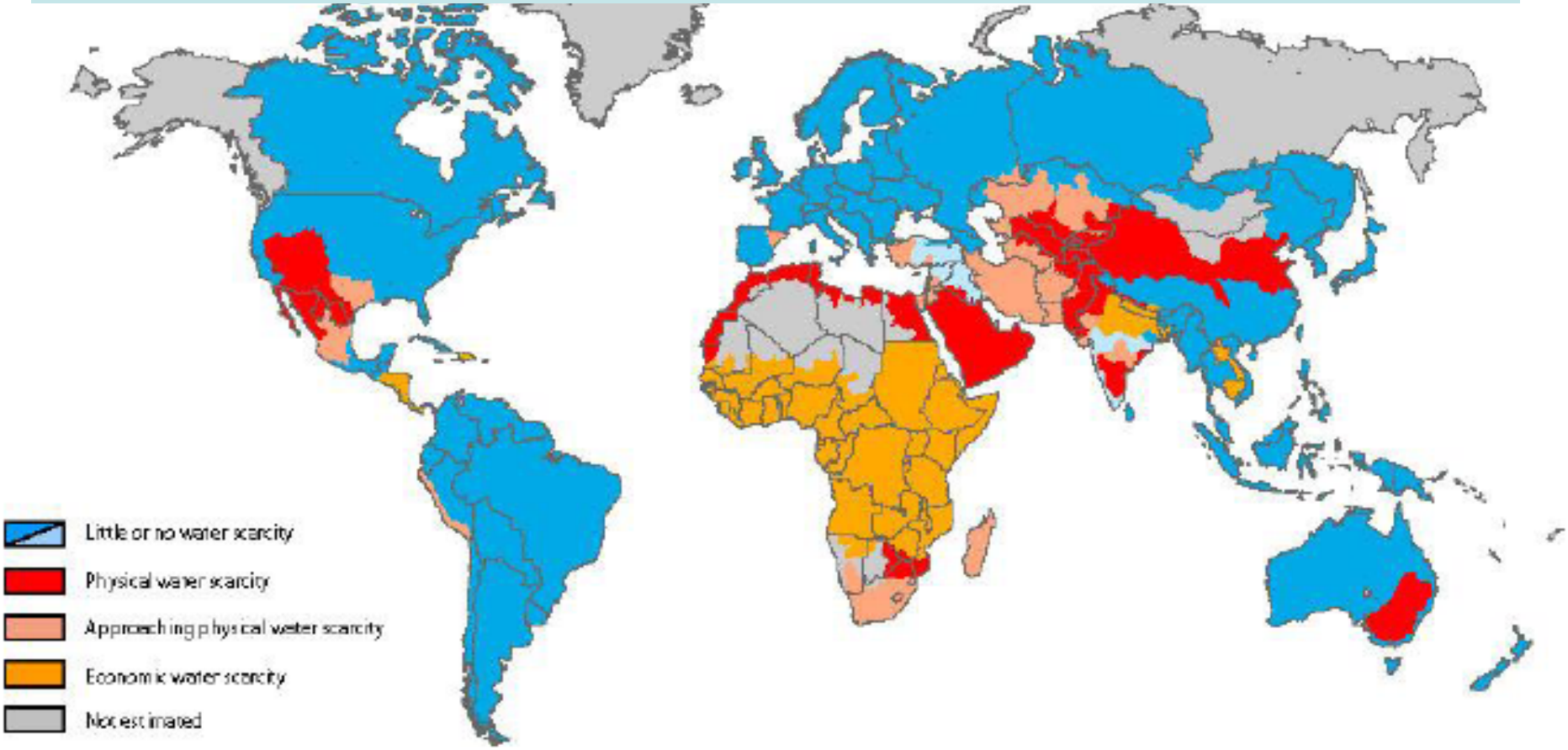
	Unité	**2004**	**2025 Idem + Chgt Clim**
Population	Millions	10	12,15
Demande alimentaire, équival eau/hab	m^3/a	1450	1700
Demande alimentaire, volume total	km^3/a	**14,399**	**20,655**
Demande directe, AEP et industrie/hab	m^3/a	55	70
Demande directe, total	km^3/a	0,546	0,851
Volume d'eau d'rrigation	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 km^3/an et importé 7,1 km^3/an
Importation nette 4,6 km^3/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 m^3/an par personne (600 m^3/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].

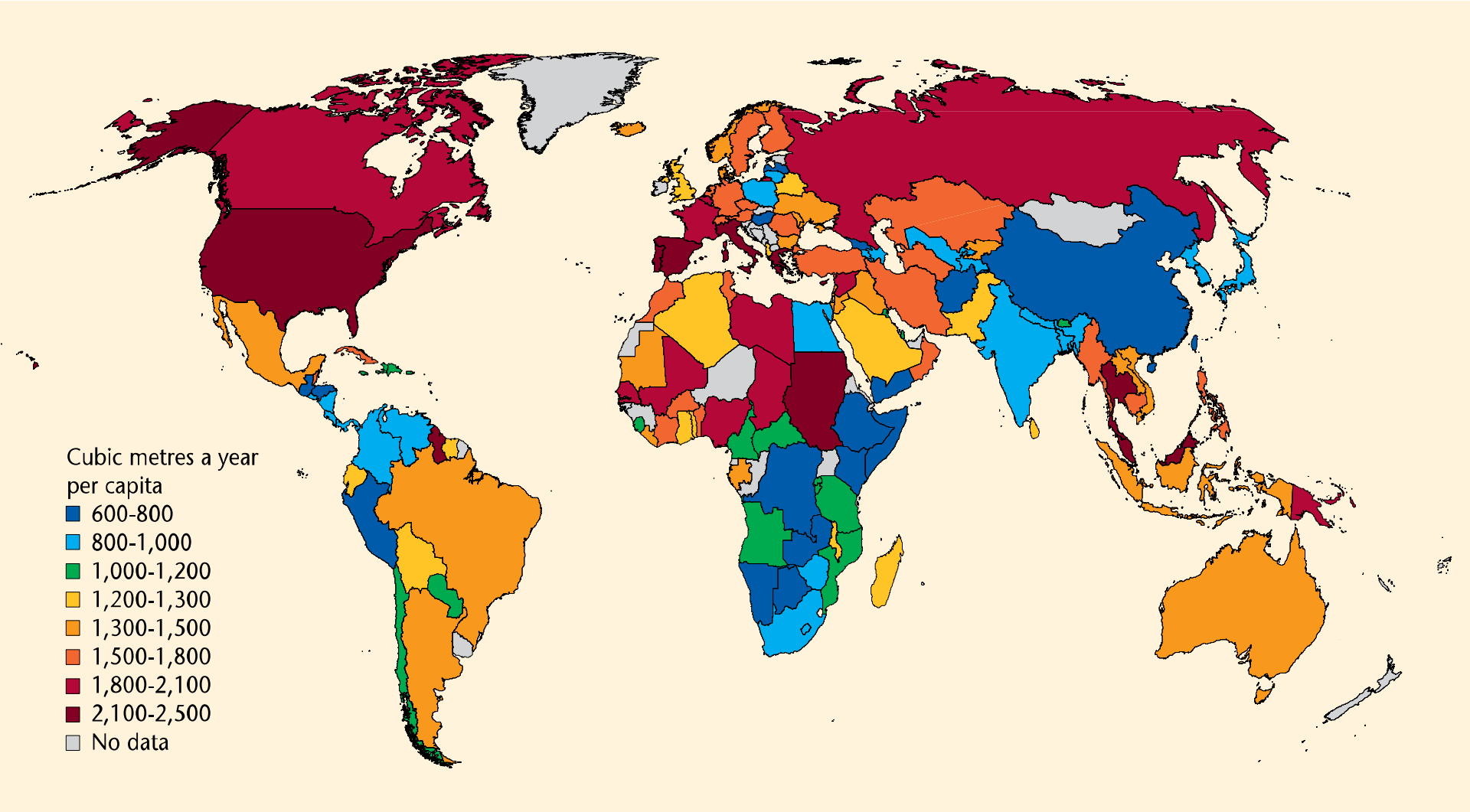
Rouge : Déficit physique ; plus de 75% du débit des rivières est prélevé pour les besoins de l'homme, en tenant compte des recyclages.

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, m^3/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 Dévelopés	2 437	943	3 380

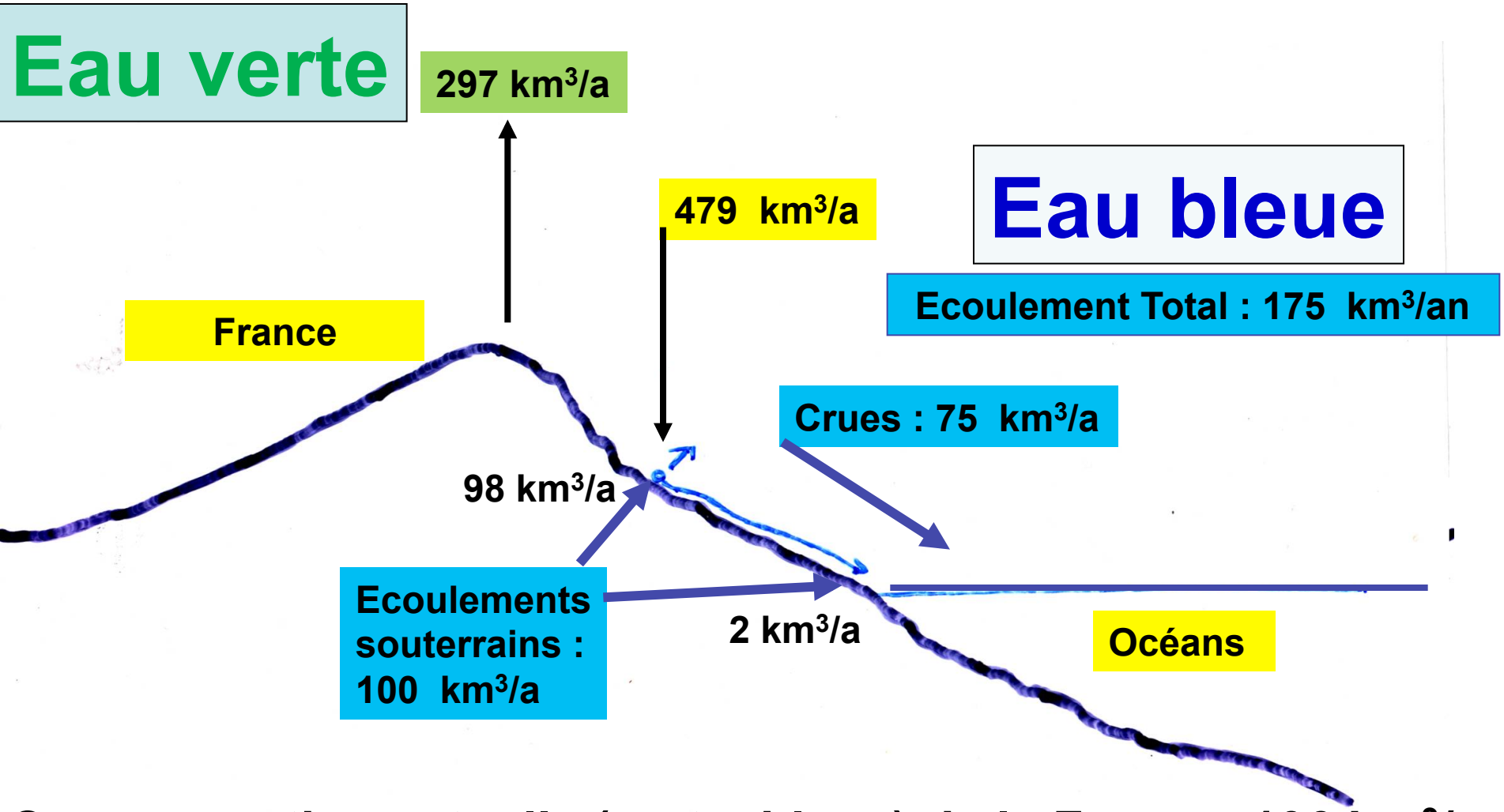
Empreinte eau…

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 km^3/an**
- **l'empreinte eau bleue :** c'est la consommation des eaux de surface et des eaux souterraines pour l'irrigation : **~1,800 km^3/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 km^3/an)**
- **Eau virtuelle :** eau utilisée pour produire des biens, qui sont exportés ou transférés. Nourriture:**~600 km^3/y**

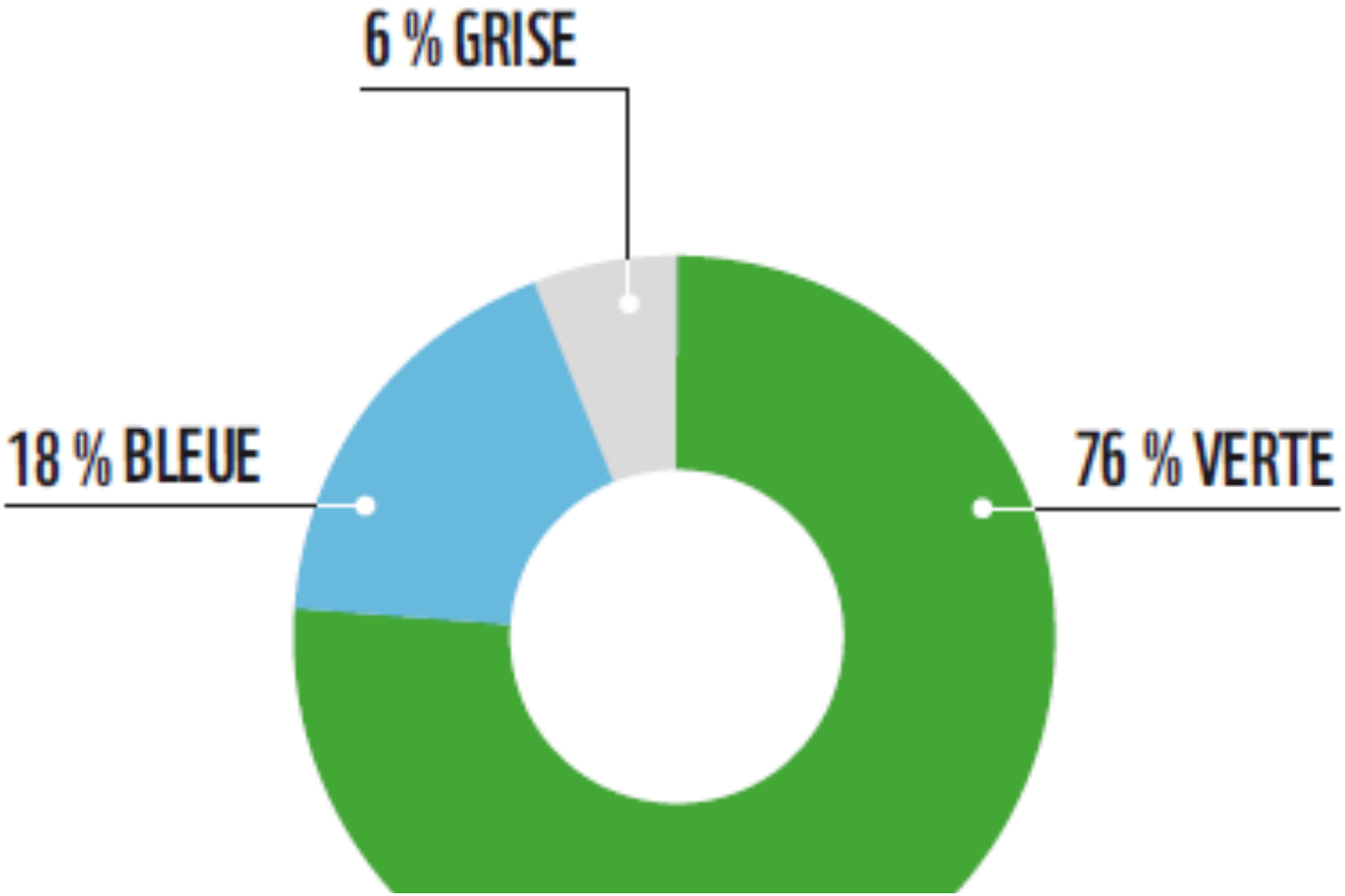
6. Bilan en eau de la France



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

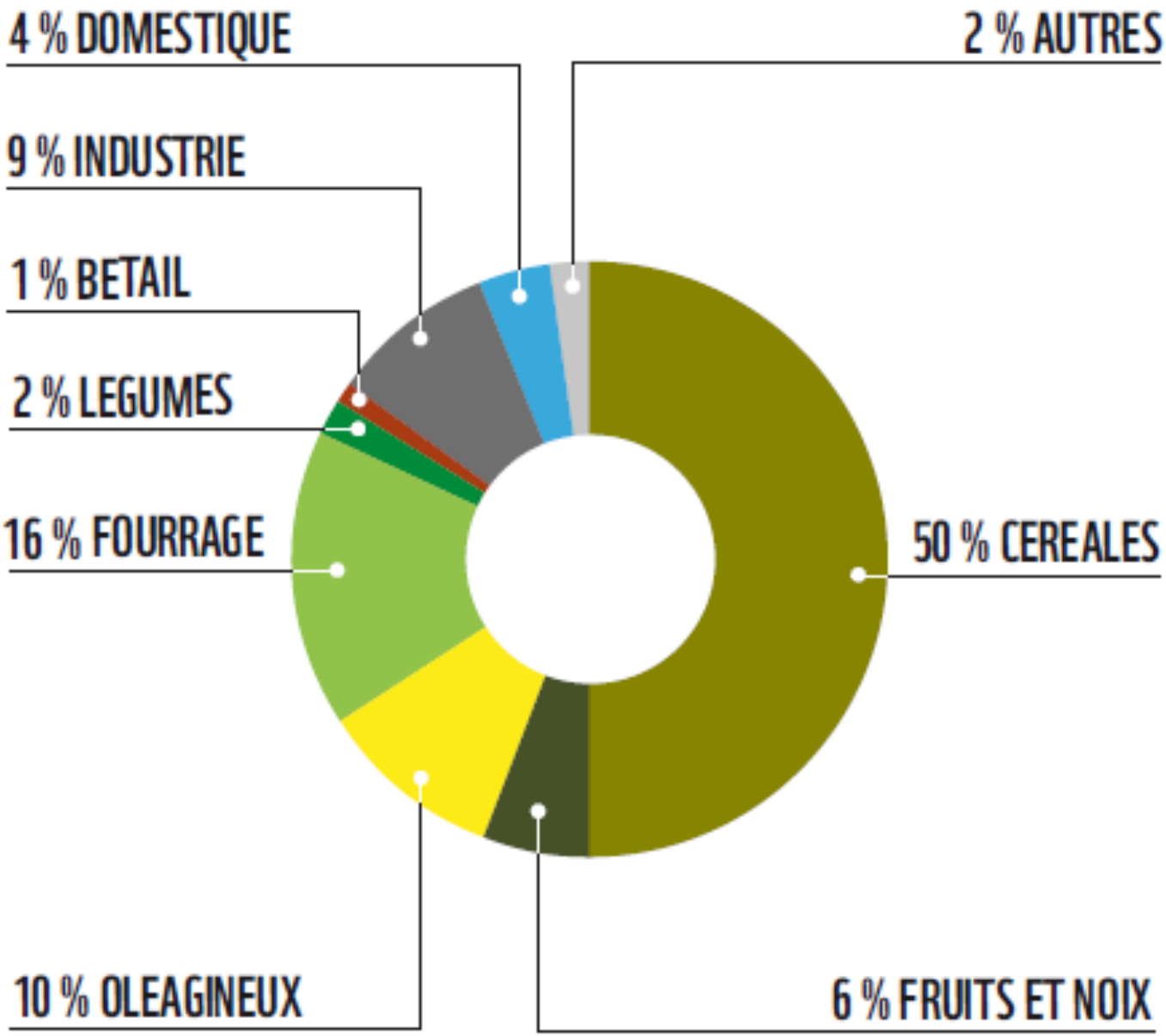
L'empreinte eau de production

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



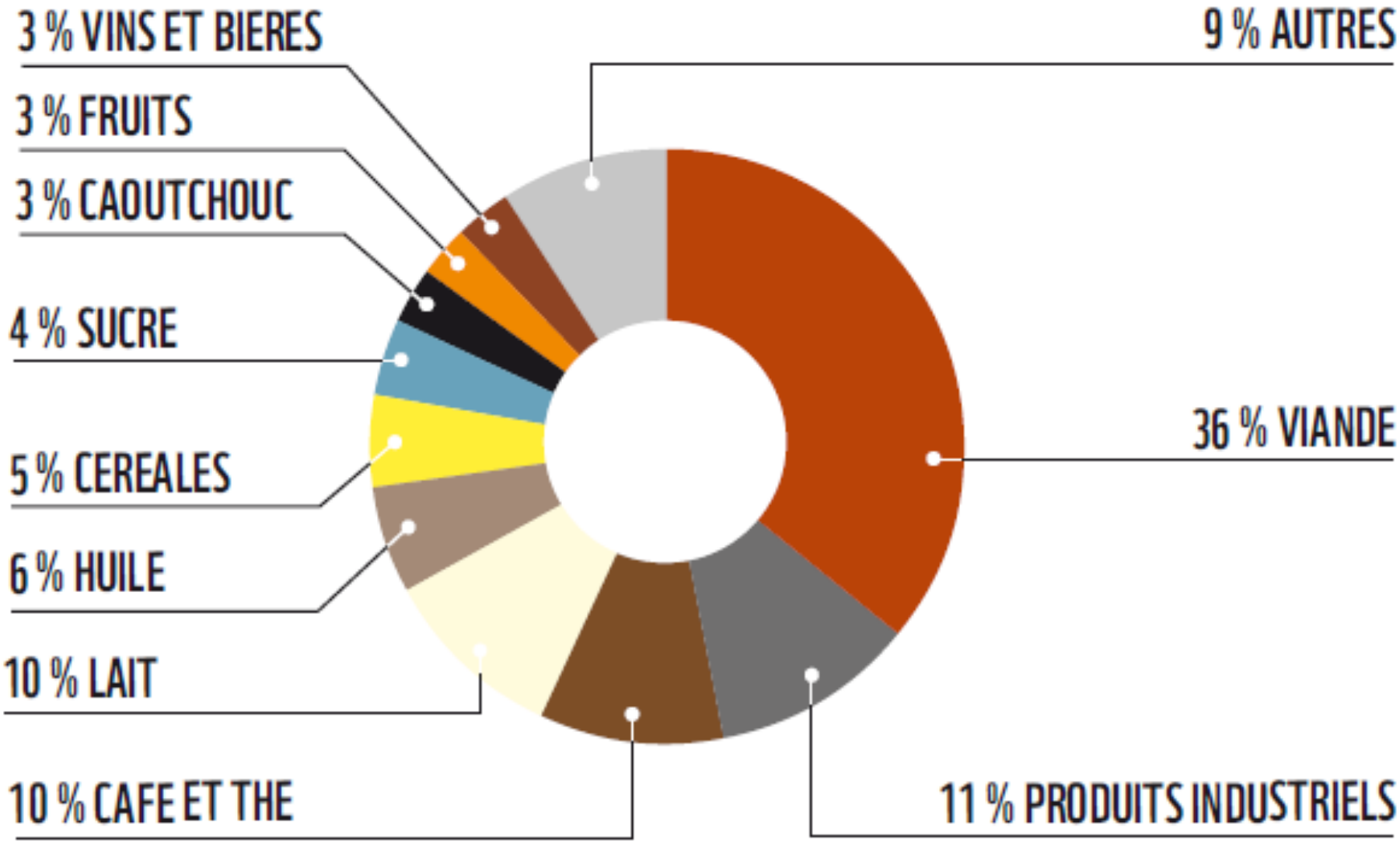
Total 90 km^3/an, 86% pour l'agriculture
34 km^3 sont exportés (38%)

L’empreinte eau de production



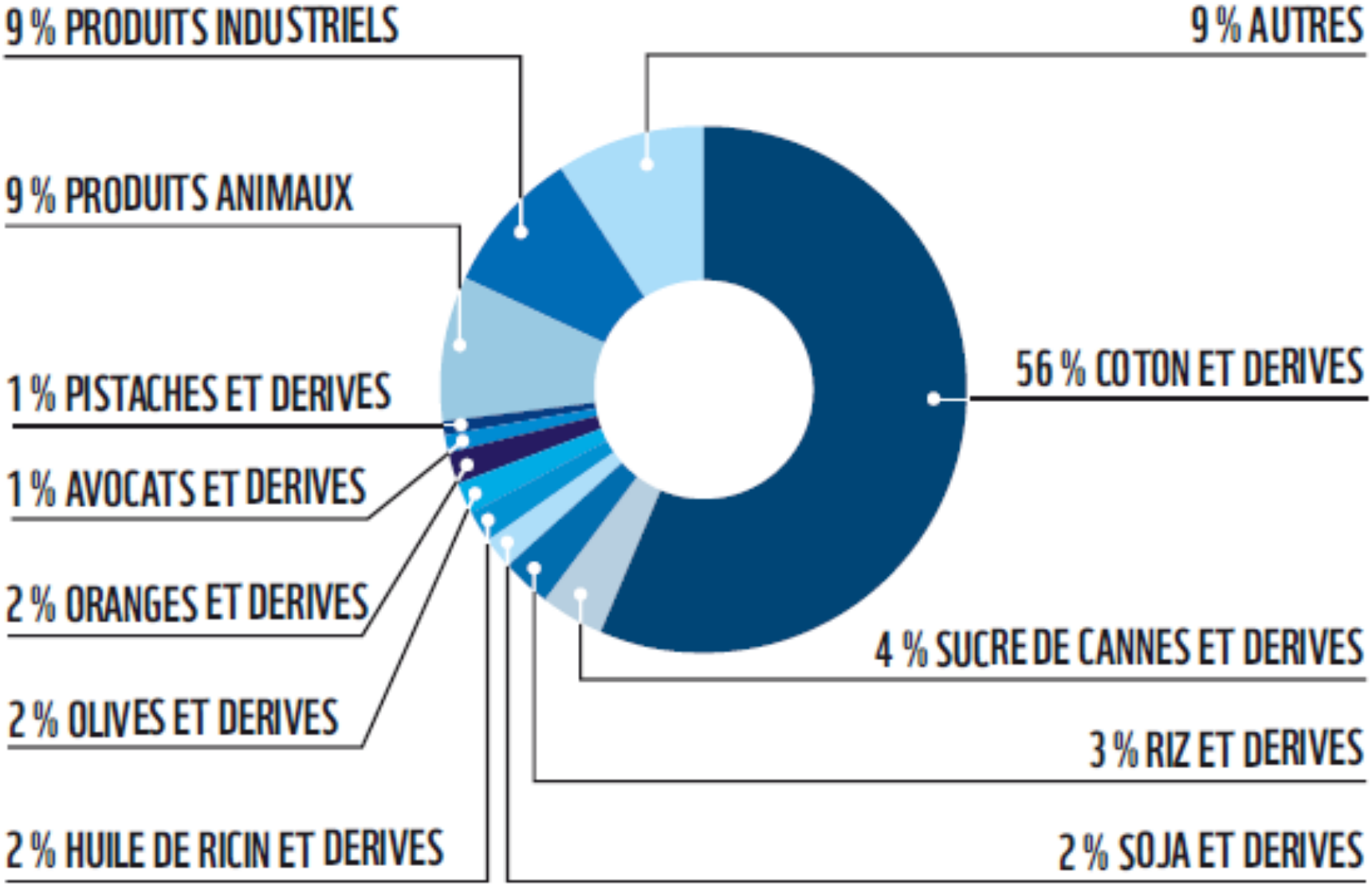
Empreinte eau de consommation

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 !

<u>Bilan net</u> :

Eau consommée : 106 km^3/an

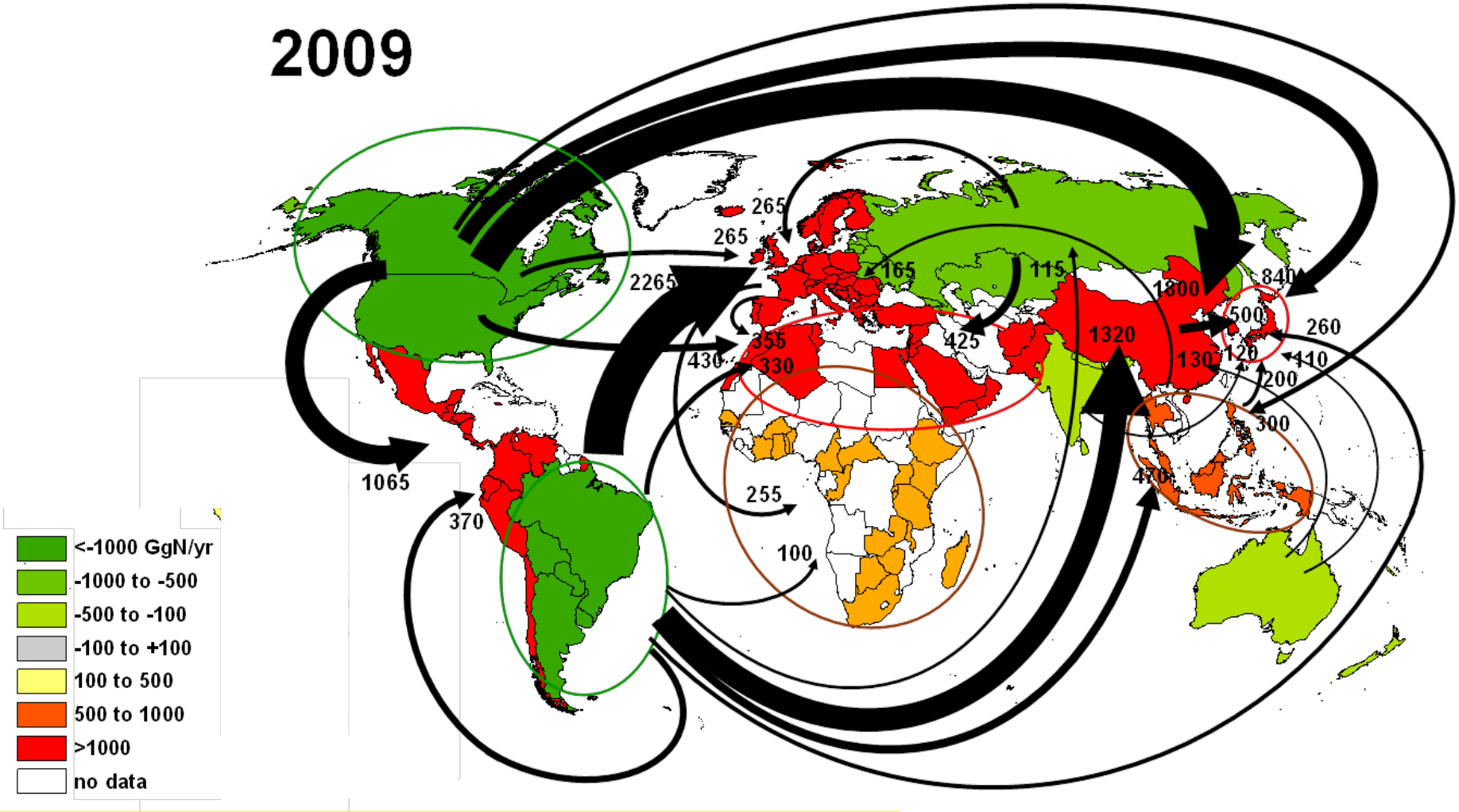
(47% importé)

Eau utilisée pour produire : 90 km^3/an

(38% exporté)

Transferts d'eau virtuelle en 2009 :

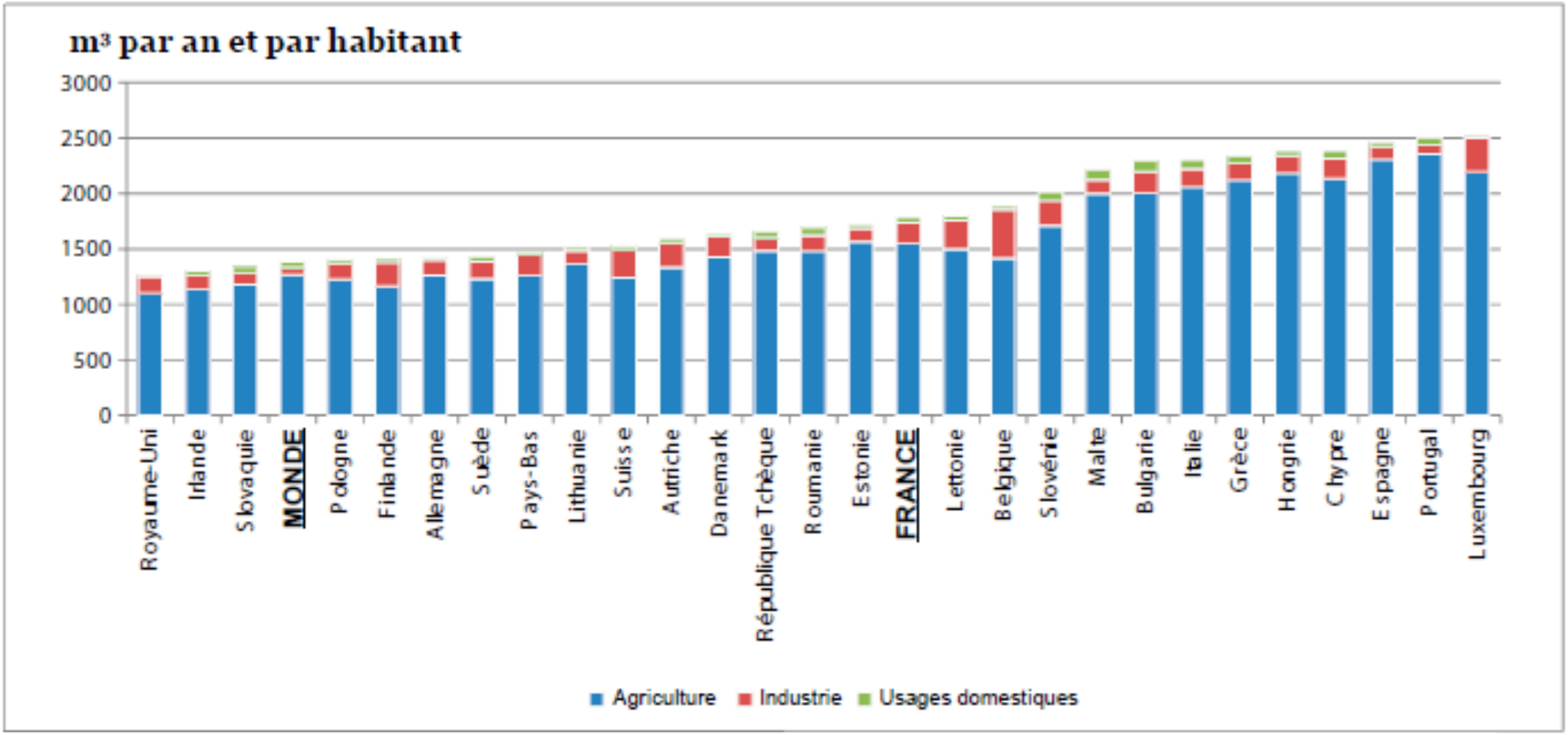
environ 600 km^3/an



Les échanges internationaux représentent 30% de la production agricole totale

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

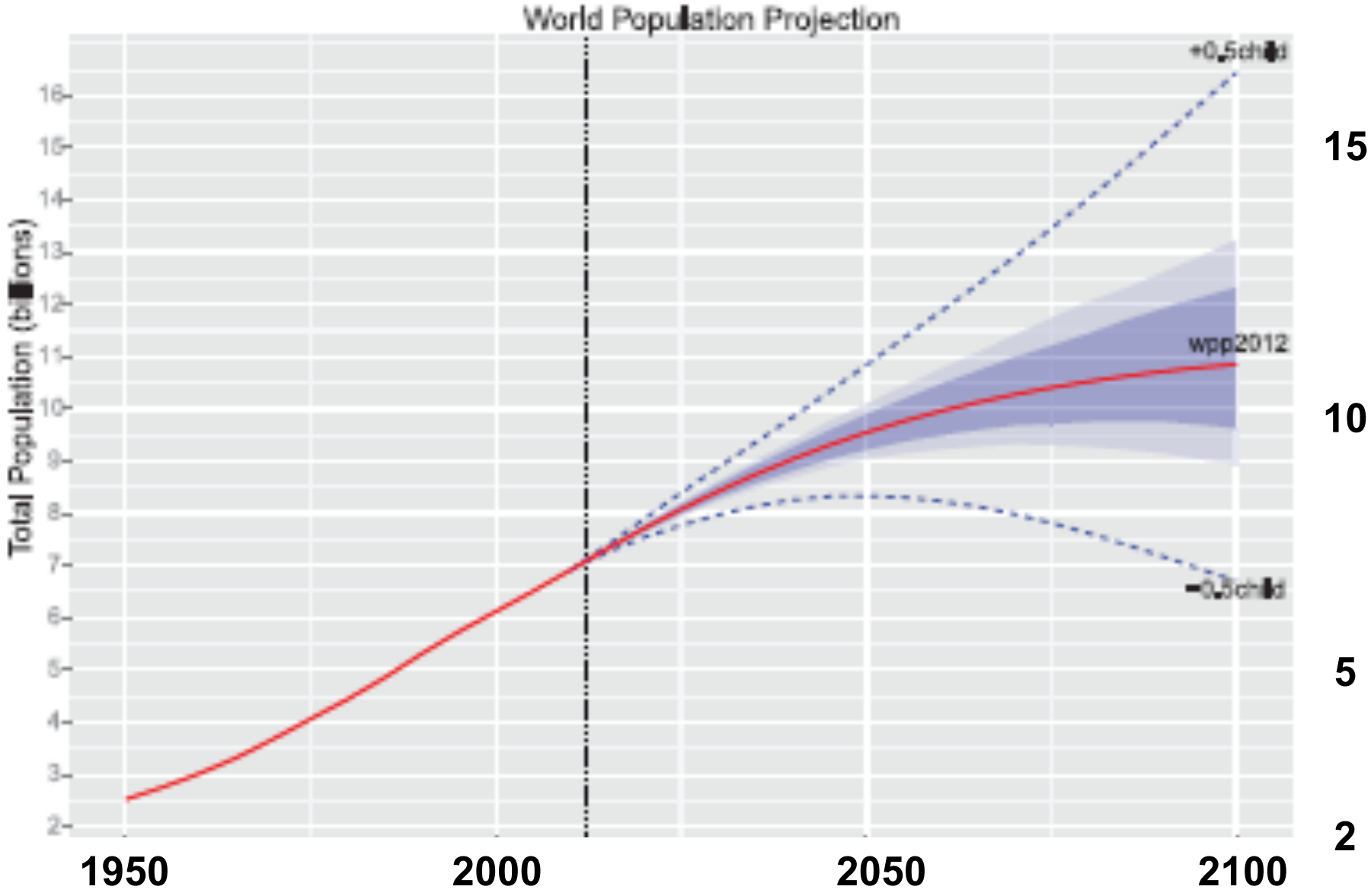
Empreinte eau de consommation, Europe et Monde



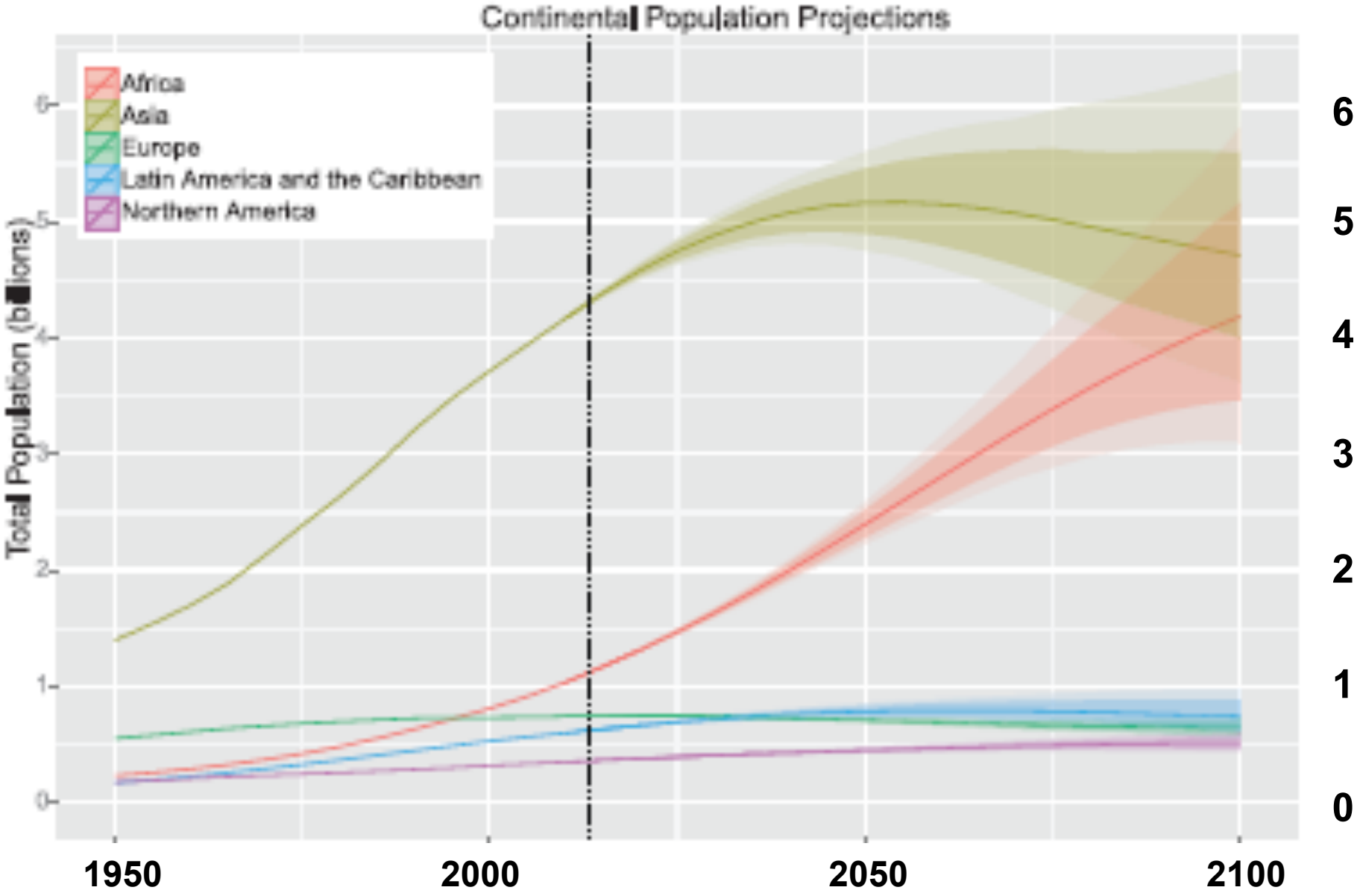
D'après Hoekstra & Mekonnen (2012)
The Water Footprint of Hummanity, PNAS

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 m^3/an per capita en 2000,
  1.400 m^3/an en 2050
  1.500 m^3/an en 2100:
- **~8.100** km^3/an étaient nécessaires en 2000,
  ~**13.000** km^3/an seront nécessaires en 2050
  ~**16.500** km^3/an en 2100

Est-il possible de trouver tant d’eau ?

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

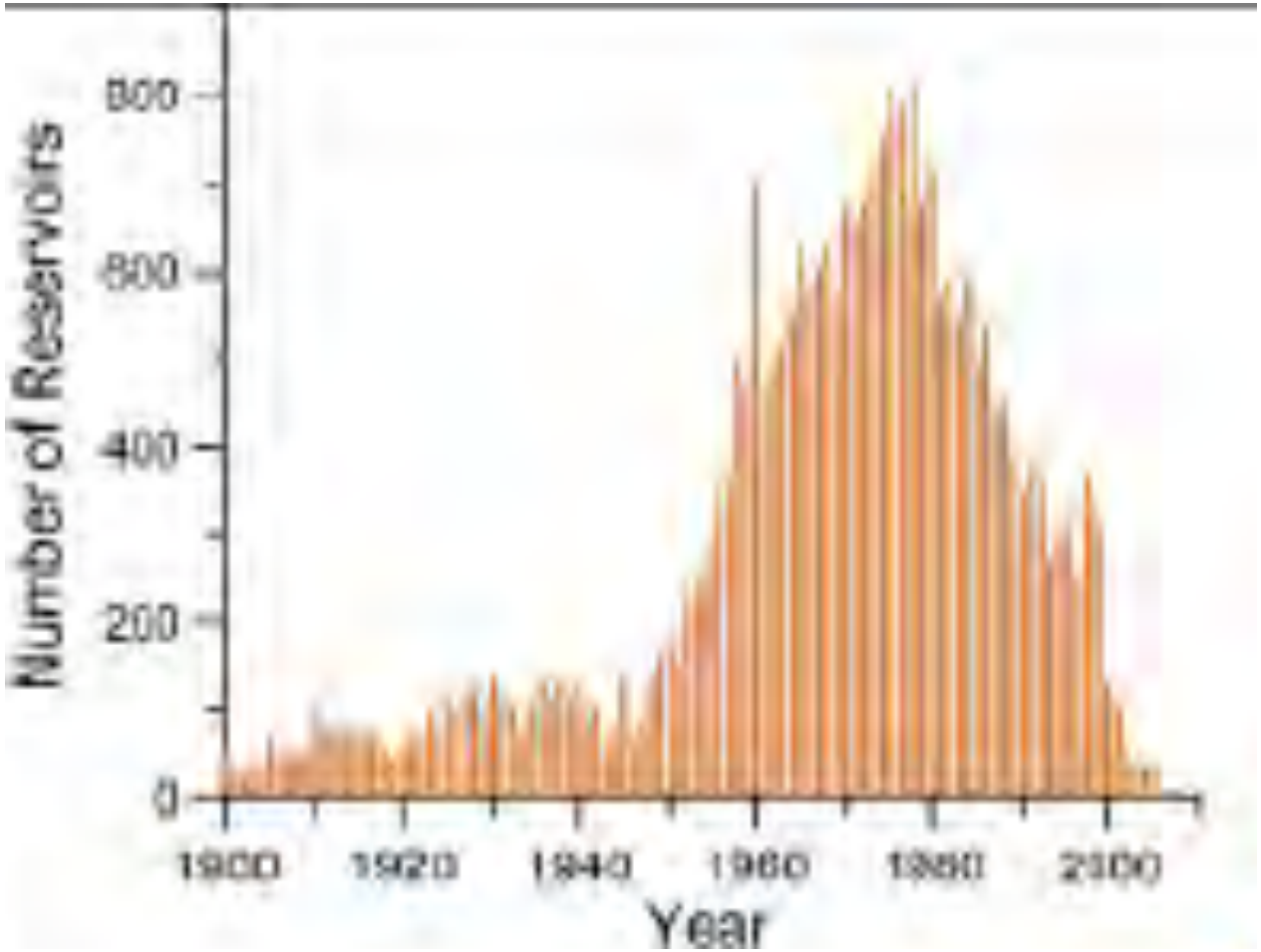
Est-il possible de trouver tant d'eau ?

- 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 m^3 par habitant

- US : ~5.000 m^3
- France : ~900 m^3
- Afrique : ~3 m^3

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

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

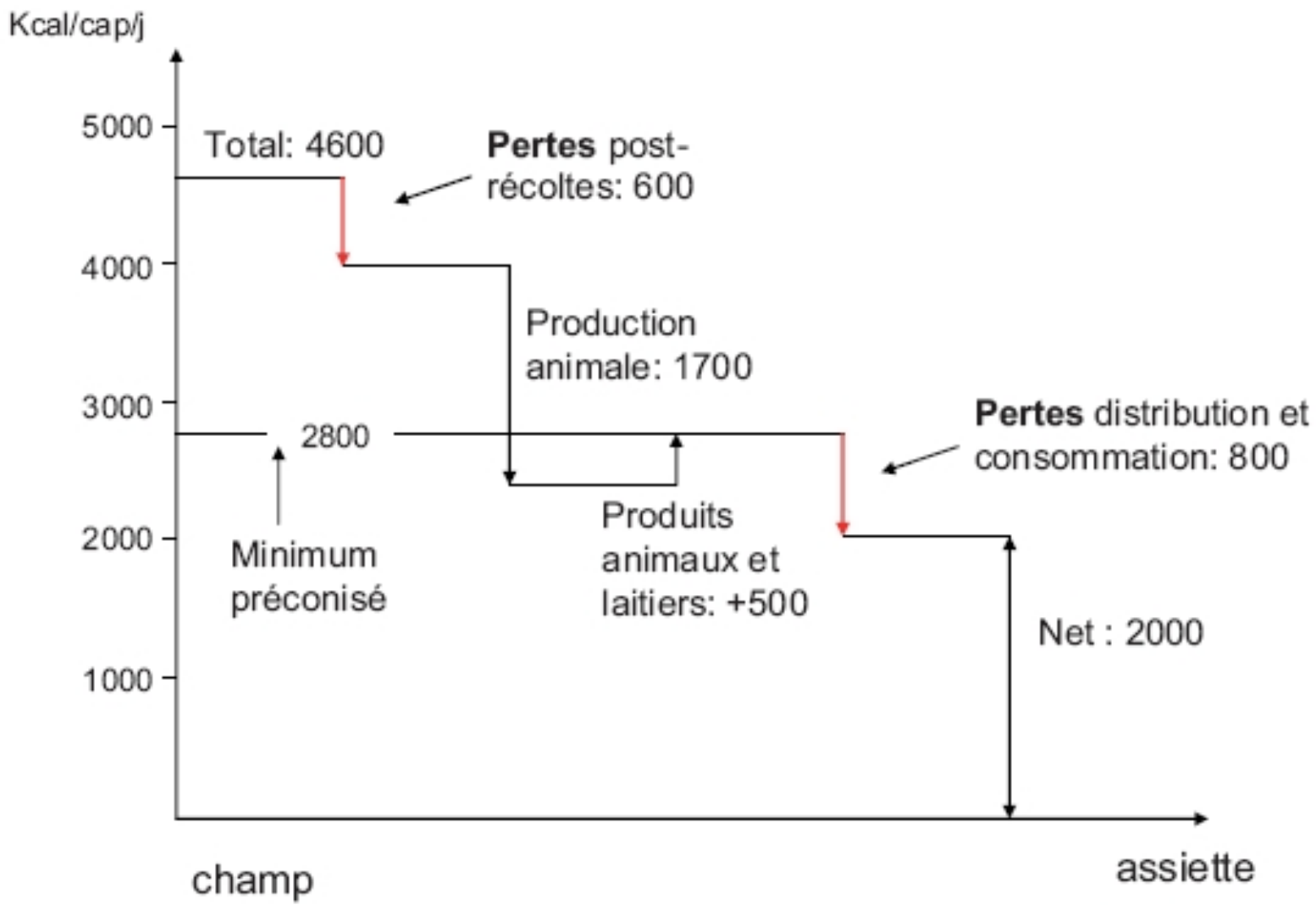
Stockage en Aquifères

- 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 stockahe en aquifères demande des solutions innovantes, même chère…!
- Barrages souterrains ???? En Karst ???

Autres solutions :

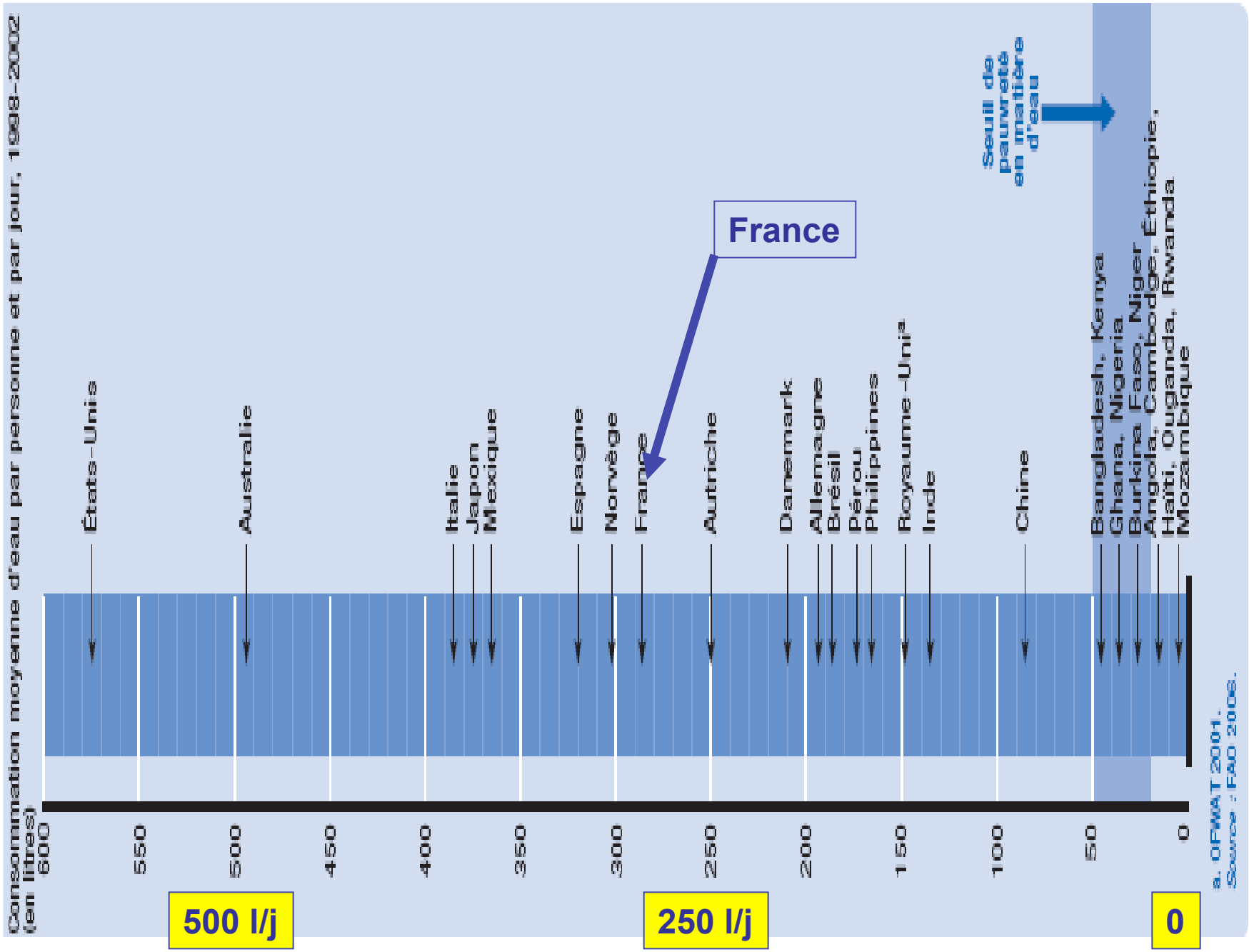
- **Réduire les pertes alimentaires**
- **Améliorer les rendements des cultures**
- **Augmenter les superficies irriguées**
- **Favoriser la culture de variétés plus économes en eau, en développer de nouvelles adaptées aux conditions semi-arides ou même aux sols légèrements salés**
- **Sélectiongenomique ou OGM ?**
- **Mais les moyens génétiques ne semblent pas pour l'instant capables de beaucoup modifier l'échange "eau contre CO_2"**

Pertes alimentaires



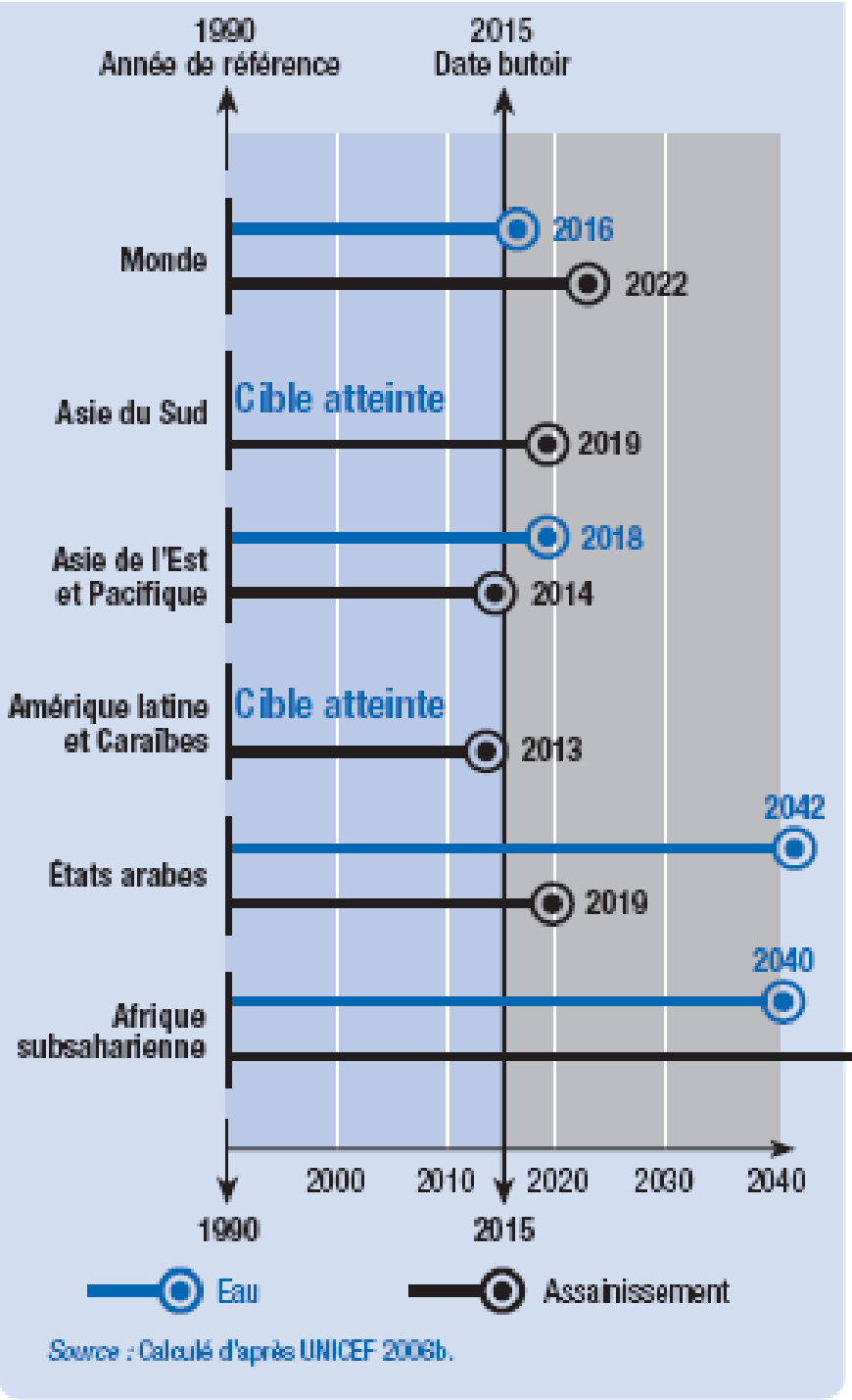
Source SIWI, 2008

8. L’eau domestique



Consommation quotidienne d'eau domestique, 2006

Objectifs du Millénaire :



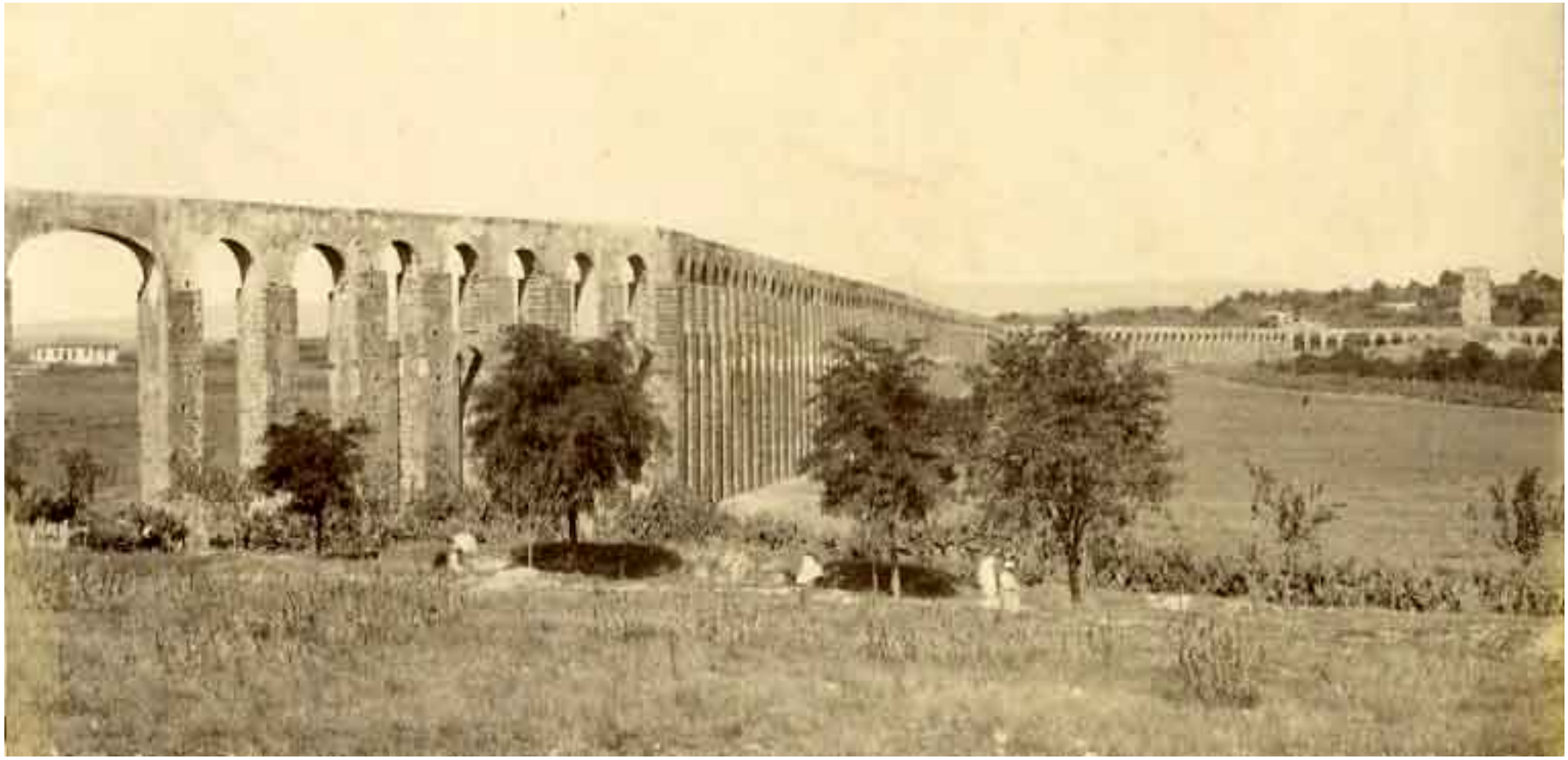
Réduction par deux en 2015 de la non accessibilité à l'eau potable (1 milliard d'habitants en 2000)

Réduction par deux en 2015 de la non accessibilité à l'assainissement (2,6 milliards d'habitants en 2000)

(Nations Unies, 2006)

Eau et Assainissement

Eau potable



Assainissement…

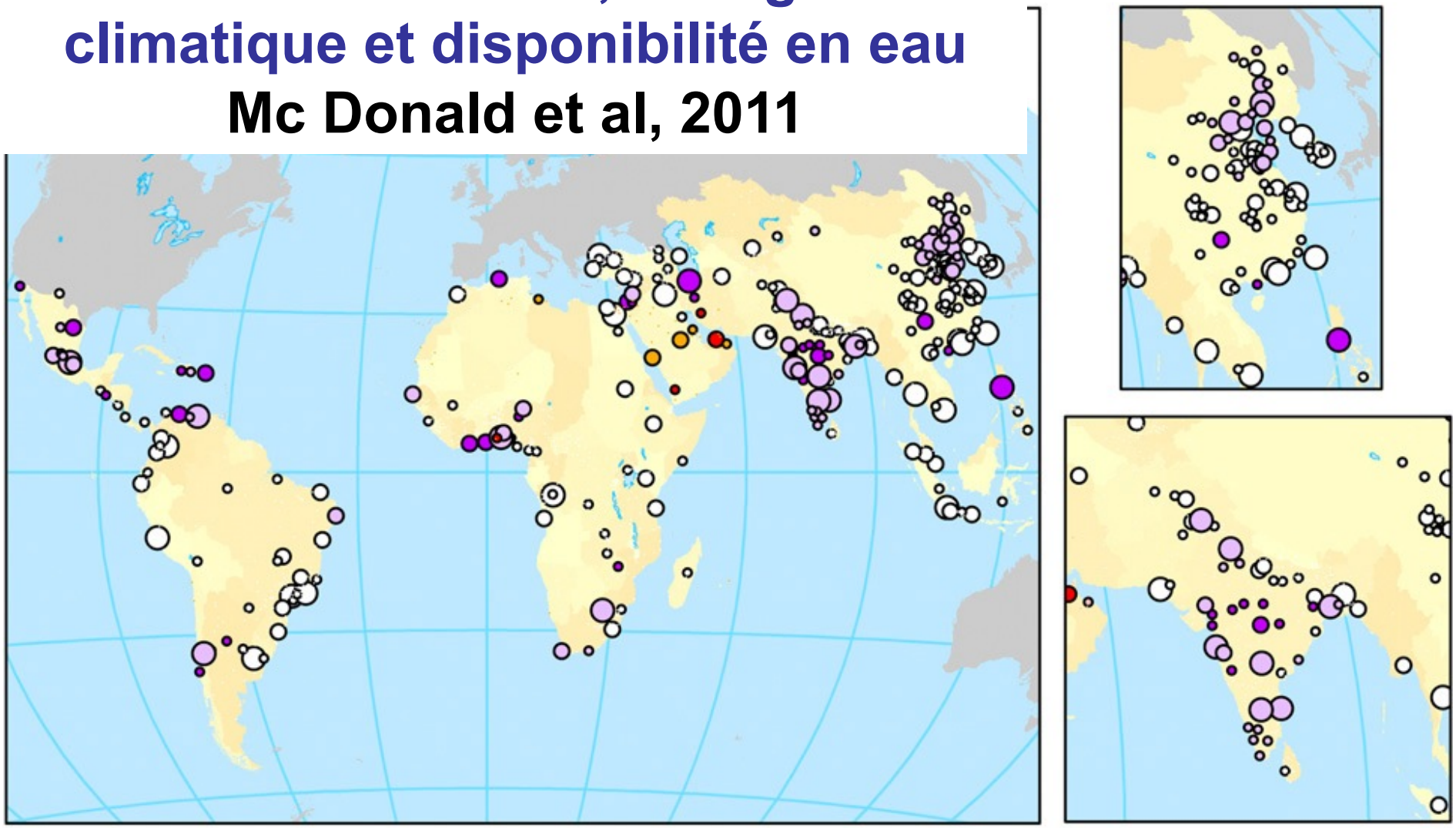
Croissance Urbaine

- Aujourd’hui 50% d’urbains, 50% de ruraux
- En 2050, 75% d’urbains, 25% de ruraux

- Mais la population rurale ne décroitra pas, c’est la croissance de la population qui fera croître les villes…

Croissance urbaine, changement climatique et disponibilité en eau

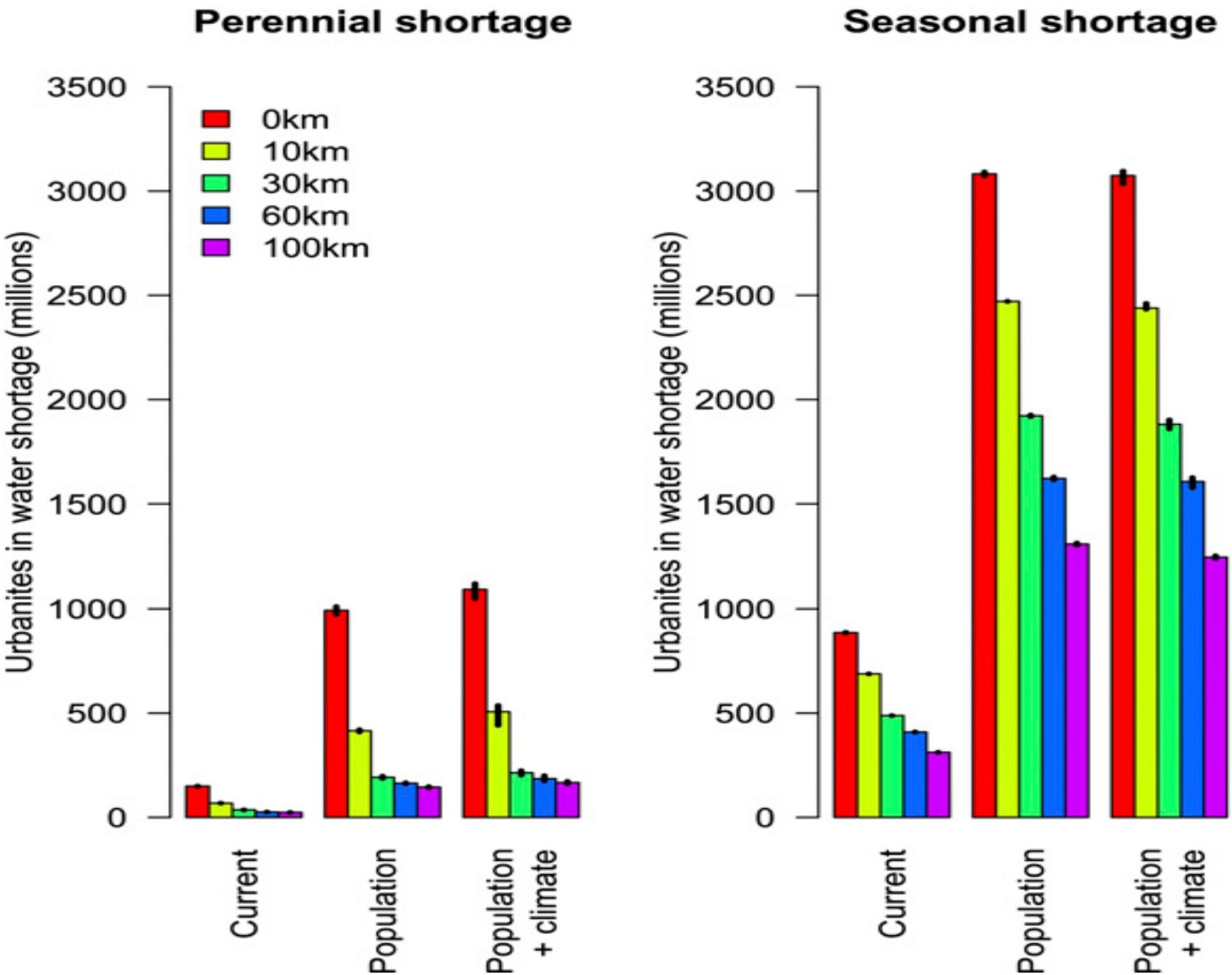
Mc Donald et al, 2011



Population (2000)

- 1 - 2 million
- 2 - 5 million
- > 5 million

- Perennial water shortage, 2000
- New perennial water shortage, 2050 (OS)
- Seasonal water shortage, 2000
- New seasonal water shortage, 2050 (OS)


Perennial shortage
Seasonal shortage
0km
10km
30km
60km
100km
Urbanites in water shortage (millions)
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Current
Population
Population + climate

Que faut-il faire ?

- Economies d'eau, réparation des fuites…
- Nouveaux barrages … Forages plus profonds
- Transfert à longue distance …
- Dessalement de l'eau de mer ….
- Retraitement et ré-emploi des eaux usées…
- Ré-allocation des ressources en eau entre usages Domestiques, Agricoles, Industriels et pour les écosystèmes…

Pas de solution unique s'appliquant à tous les cas…

Que faut-il faire ?

- **Ré-emploi des eaux usées**… e.g. **Windhoek**, capitale de la Namibie. Desert. Très petit aquifère. Barrage à 800 km, conduite. Mer à 400 km. 25% de l'eau domestique provient de l'eau usée traitée, depuis 1970s. L'eau est réinjectée dans l'aquifère avant emploi; 3€/m^3.
- **Singapour** aussi très avancé en recyclage des eaux usées. Conduite depuis la Malaysie, beaucoup d'eau disponible, mais décision politique d'autonomie en eau. Cher (4€/m^3) et énergivore.

Que faire ?

- **Dessalement de l'eau saumâtre par osmose inverse.** Coût envron 0,7 €/m^3, en continuelle réduction. Energie utilisée 2–6 kWh/m^3 pour l'**eau de mer,** moins pour l'eau saumâtre. Minimum thermodynamique 0,71 kWh/m^3. En Australie, énergie produite par des éoliennes (Perth, Melbourne). Environ 8% de l'eau domestique est produite par dessalement, en croissance au taux de 17% par an. Rejet des eaux sur-salées ?
- **Israel, Arabie Saoudite, Barcelone, US…**

Que faire

- Transferts d'eau à longue-distance
  - Chine, US, Espagne… Paris au XIX° siècle…
  - Aqueducs sous-marins… Aquamarina…

Projets Turquie-Israel…

- Lourds investissements…
- Transferts des population (migrants…) ?
- Bonne gestion des Services, ex. :

•Buenos Aires…

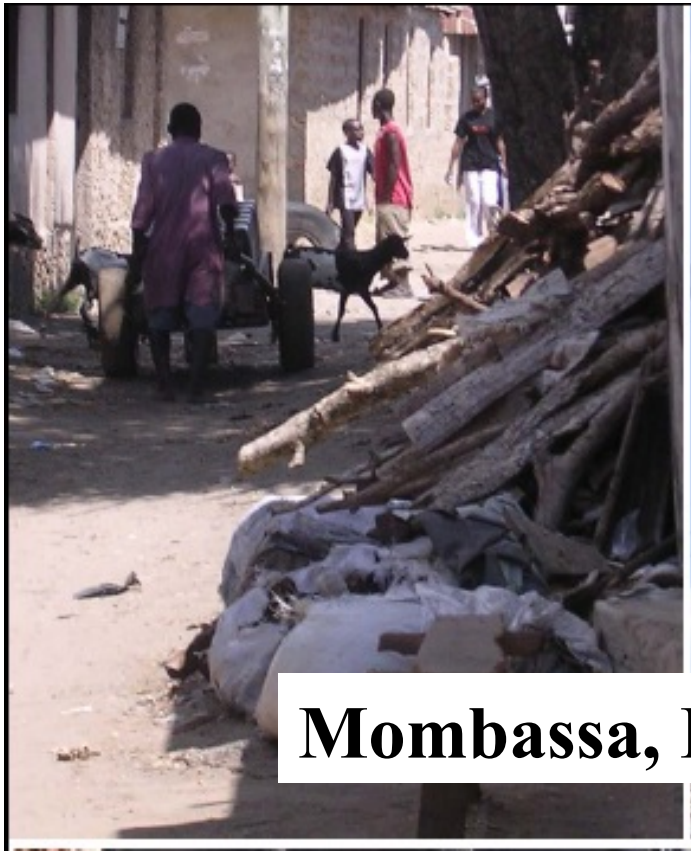
•Cochabamba…

•Alger…

Barcelone

Chine, US…

Exemples…



Mombassa, Kenya, Decembre 2009….

Prix de l'eau : 0.40 € pour 20 litres "eau potable" (20 €/m^3)

0.03 € pour 20 litres "eau de lavage" (1,5 €/m^3)

A l'échelle mondiale : 5 milliards/an de cas de diarrhée
400 million de personnes affectées en permanence

Maladies Hydriques

- Diarrées : 1.8 million morts/an, principalement des enfants de moins de 7 ans, 45% Afrique Sub-Saharienne, 40% Asie du Sud, 15% reste du monde
- 2ème cause de décès après les maladies respiratoires diseases (2 million), et avant la Malaria (0.9 million), la Rougeole (0.4 million) et le SIDA (0.35 million)

idées Innovantes en milieu rural…

- **Mille et une Fontaine, Lyon**
  - **Cambodge**
  - **Madagascar**

AM-2002

Rôle des ONG…

- Construction de puits ou forages
- Collecte d’eau de pluie, citernes
- Fourniture de petites unités de traitement
- Cas d’Haiti…
- Cas du Maroc…
- Le Sceau Camerounais
- Etc…

Alimentation Mondiale…

Démographie

- Aujourd'hui, 7,2 milliards d'habitants
- Dont 856 millions sous-alimentés en 2003, ce chiffre diminuait depuis 50 ans, car la production montait plus vite que la consommation, mais s'est mis à remonter depuis 2008, 1 milliard en 2010, 800 millions en 2014
- Nourris par :
  - **265 millions d'ha irrigués, (consommant 1 800 km^3/an)**
  - **1 300 millions d'ha d'agriculture pluviale et des surfaces prairies-arbustes en pâture, 3 200 millions ha (consommant 6 330km^3/an**)
  - **17% de surfaces irriguées produisent 40% de la nourriture**
- Le riz, le maïs et le blé produisent, à part égale, 60% de la production alimentaire (environ 700 million t/an chacun).
- Le riz et le maïs dépendent fortement de l'eau d'irrigation.

En 2050

- Environ 9 milliards d' habitants, cad ~ 70 millions de plus par an
- Il faut plus de production alimentaire pour les nourrir, et pour éradiquer la malnutrition actuelle (1 milliard de personnes); les changements d'habitudes alimentaires doivent aussi être pris :

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 (l/kg) pour produire les aliments (fraction consommée, pas en matière sèche)

Nutrition…

- En 2005, il y avait 1,3 milliards de personnes en surpoids, dont 400 millions d'obèse; 800 millions vivent dans les PED…
- Si les tendances actuelles se poursuivent, il y aurait en 2030 : 3,3 milliards de personnes en surpoids ou obèse, 80% dans les PED…
- Conséquences sur la santé: maladies cardiovasculaires, cancer colorectal…
- Cause : excès d'huiles végétales, de sucres simples, de produits carnés et de confiseries…

Facteur d'augmentation de la consommation d'équivalents-céréales, 2050/2000 (avec changement des habitudes alimentaires)

Millions de tonnes d'équivalents céréales par an

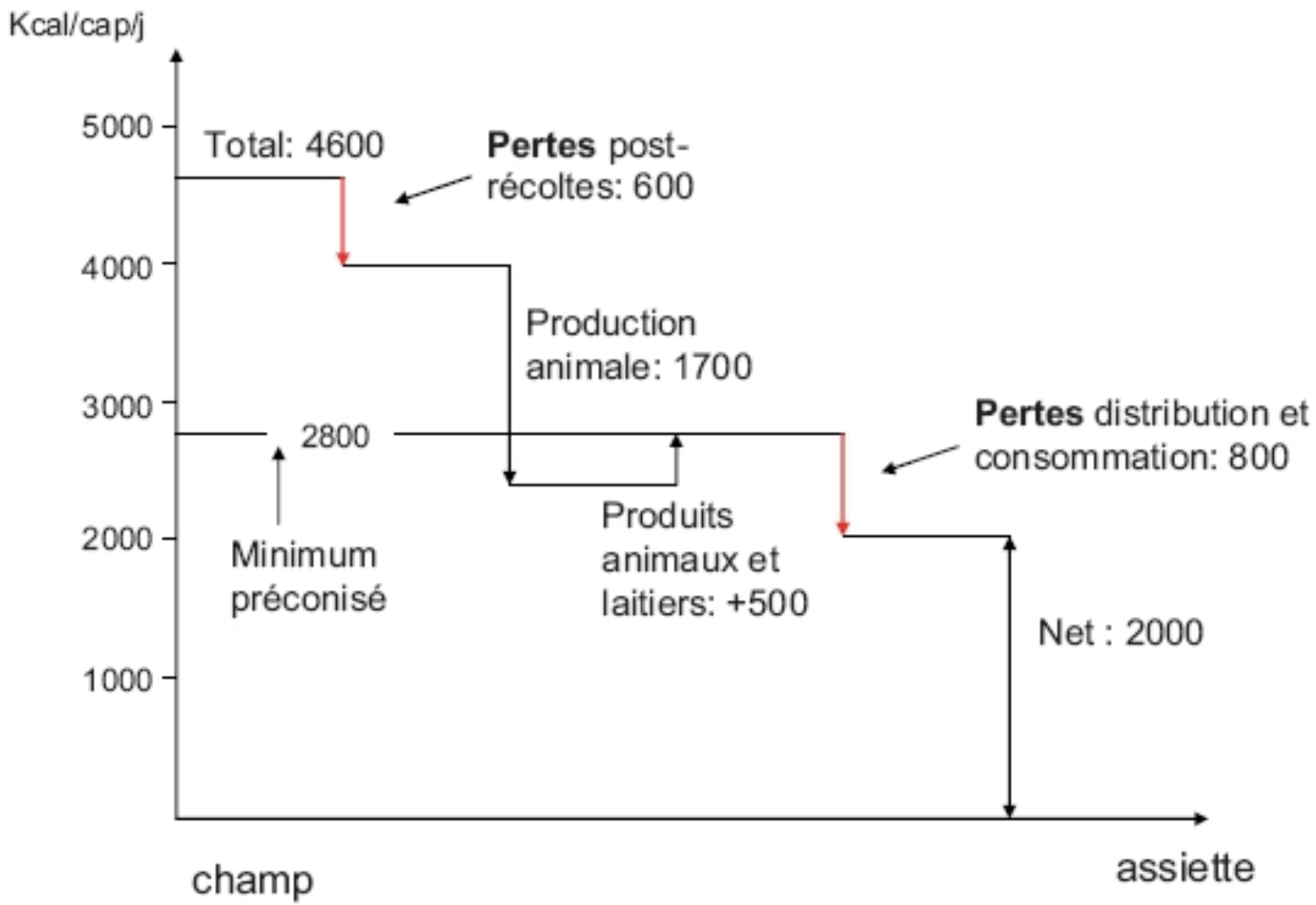
Regions	Asie	Amérique Latine	Moyen Orient, Afr.du Nord	Afrique Sub-Saharienne	OECD	Russie Et CEI	Total
Multiplicateur des besoins 2050/2000	2.1	1.9	2.1	3,2	1,27	1,26	1,85
Production 2000, Mt	1310	350	220	250	1020	190	3340
Production nécessaire en 2050, Mt	2720	665	455	800	1300	240	6180

D'après P. Collomb (1999), M. Griffon (2006) et Agrimonde (2009)

Que peut-on faire ?

- **Réduire les pertes et le gaspillage (~30% de la production)…**
- **Réduire la consommation de produits d'origine animale…**
- **Augmenter la productivité, les rendements agricoles…**
- **Augmenter les surfaces irriguées…**
- **Augmenter les surfaces d'agriculture pluviale…**

Pertes alimentaires



Source SIWI, 2008

Augmenter la productivité…

- **Efficacité d'utilisation de l'eau…**
- **Développement de nouvelles variétés (sélection génomique, OGM ?), par exemple pour des conditions semi-arides et des sols salés**
- **Augmenter l'emploi de fertilisants et phytosanitaires dans les PED…**
- **Nourrir la planète avec du pur « bio » est hélas impossible; il faut faire de « l'écologiquement intensif »..**
- **Traction animale, mécanisation…**
- **La production d'eau par dessalement n'est pas une options significative pour la production vivrière … trop chère et énergétivore**
- **+ 30% ????**

Agriculture irriguée…

- Aujourd'hui 265 million ha
- Rythme actuel d'augmentation: 1,34 million ha/a
- En 2050, à ce rythme, il y aura 331 millions ha
- Consommation d'eau en plus 500 km^3/a

- **Très insuffisant…comparé aux besoins nécessaires ….**

⟶ L'augmentation de l'agriculture pluviale semble être la seule solution

Agriculture pluviale….

Surface disponible pour l'agriculture en 2000 (10^6ha)

	Monde	Asie	Améri -que Latine	Moyen Orient Afr. Nord	Afrique Sub-Sahari enne	OCDE	Russie + CEI
Surface cultivée 2000 (a)	1600	439	203	86	228	387	265
Surface Cultivable (b)	4400 (IIASA) 4152 (FAO)	586	1066	99	1031	874	497
a/b	39%	75%	19%	87%	22%	44%	53%

NB : surfaces des continents : 13,1 Milliards d'ha hors glaces

Scenario 1: Tendanciel; peu de changements technologiques. Augmentation de l'agriculture pluviale (Griffon, 2006)

	Asie	Am. Latine	M.O, Af.N	Afr.sub-sah
A: augmentation (10^6ha) de l'agr. Pour les aliments en 2050	+50 (100 pour les aires protégées)	+185	0 Tout l'espace utilisé	+600 (200 pour les aires réservées)
B: rendements supposés	+50% (possible mais difficile) **4t/ha=>6t/ha**	Sans changements **1.35t/ha**	Difficile d'augmenter les rendements	+40% les bas rendements actuels (1.15t/ha) pourraient atteindre **1.60t/ha**
C: augmentation de la production (Mt)	≈+1200	+250	0	+550
D: Production totale attendue en 2050 (prod 2000+C)	1960	665	155	800
E: Besoins en 2050	2720	665	455	800
F:Deficit en 2050 (D-E)	**-760**	**0**	**-300**	**0**
Surface totale disponible avec aires protégées	**65**	**480**	**0**	**293**

Scenario 3
(Griffon, 2006, Agrimonde, 2009)

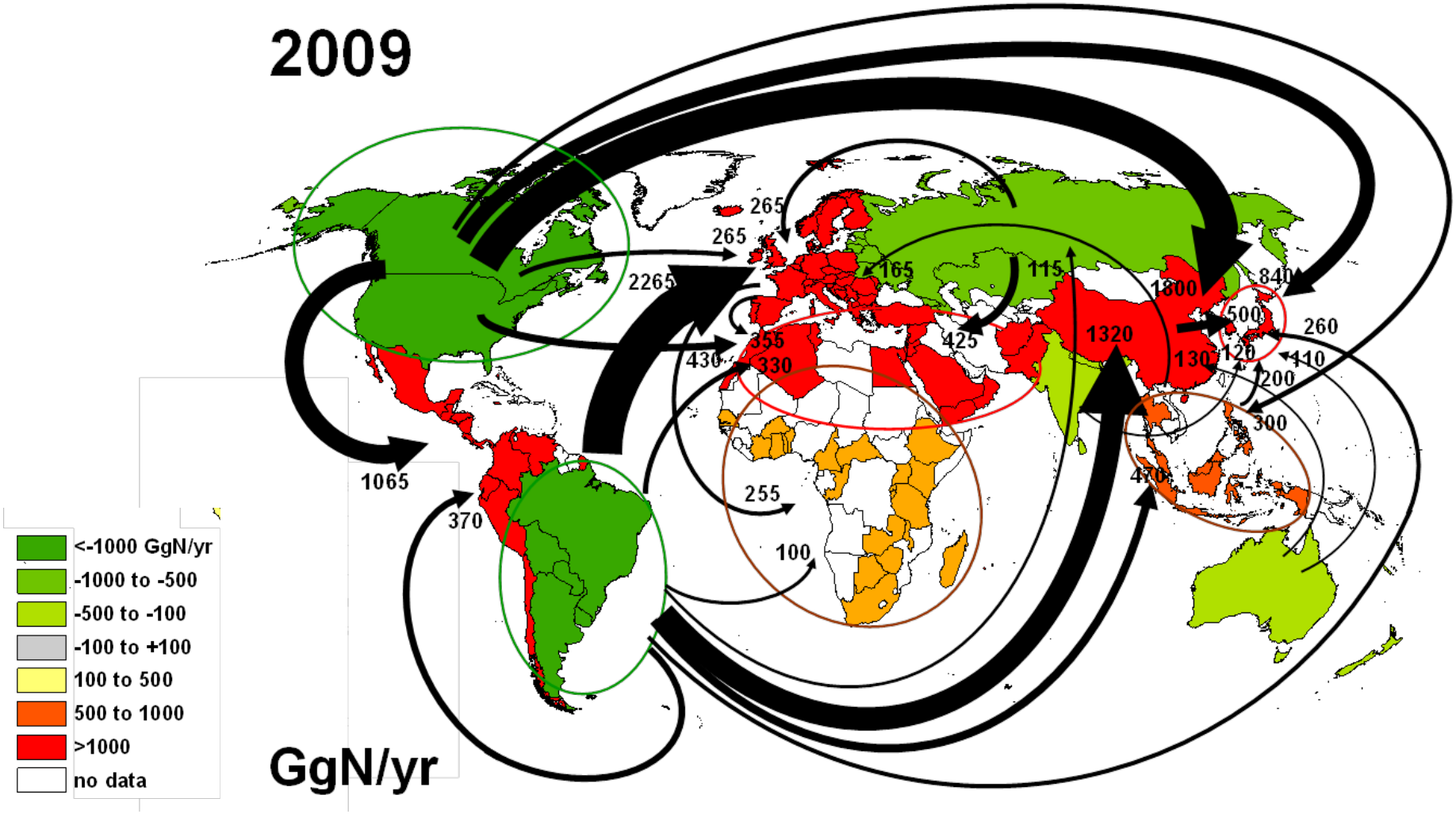
	Asie	Améri. Latine	Moyen Or. Afr. Nord	Afrique Sub-Sahar.	OCDE	Rus. et CEI	Total
Besoin	2720	665	455	800	1300	240	6180
Production locale	2060	1270	170	800	1545	335	6180
Déficit / excédents	-660	**+605**	-285	0	+245	+95	0

Scenario 3
(Griffon, 2006, Agrimonde, 2009)

	Asie	Améri. Latine	Moyen Or. Afr. Nord	Afrique Sub-Sahar.	OCDE	Rus. et CEI	Total
Besoin	2720	665	455	800	1300	240	6180
Production locale	2060	1270	170	800	1545	335	6180
Déficit / excédents	-660	**+605**	-285	0	+245	+95	0

Commerce intensif “d’eau virtuelle”

Le système agro-alimentaire est extraordinairement ouvert à l'échelle mondiale…



Les échanges internationaux représentent 30% de la production agricole totale

Lassaletta L, Billen G, Grizzetti B, Garnier J, Leach AM, Galloway JN (2014), *Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends.* Biogeochemistry 118:225–241.

Déficits/excédents de la production alimentaire en 2003 et 2050

Régions	Agrimonde 2003	Agrimonde GO	Agrimonde 1
Afrique du Nord – Moyen Orient	- 32 %	- 52 %	- 63 %
Afrique subsaharienne	- 12 %	- 18 %	- 53 %
Amérique Latine	+ 11 %	+ 26 %	+32 %
Asie	- 2 %	- 4 %	- 19 %
Ex-URSS	- 2 %	+ 10 %	+ 77%
OCDE-1990	+ 6 %	+ 19 %	+ 46 %

Que se passe-t-il si les sols arables sont aussi utilisés pour la production de biomasse énergétique ?

Scenario 5: Combinaison nourriture et énergie pour 2050 (Griffon, 2006)

	Asie	Amérique Latine	Moy. Ori. Afr. Nord	Afrique Sub-Sahar.	OCDE	Russie et ass.	Total
Surface Cultivable	545	1026	89	1011	954	5777	4202
Zones Protégées	40	260	0	173	347	172	992
Cultures Vivrières	480	546	89	718	457	335	2625
Cultures irrigués	*250*	*25*	*49*	*17*	*24*	*45*	*410*
Agriculture pluviale	*215*	*630*	*50*	*710*	*410*	*200*	*2215*
Cultures Énergétiques	25	220	0	120	150	70	585

Scenario 5: Combinaison nourriture et énergie pour 2050 (Griffon, 2006)

	Asie	Amérique Latine	Moy. Ori. Afr. Nord	Afrique Sub-Sahar.	OCDE	Russie et ass.	Total
Surface Cultivable	545	1026	89	1011	954	5777	4202
Zones Protégées	40	260	0	173	347	172	992
Cultures Vivrières	480	546	89	718	457	335	2625
Cultures irrigués	*250*	*25*	*49*	*17*	*24*	*45*	*410*
Agriculture pluviale	*215*	*630*	*50*	*710*	*410*	*200*	*2215*
Cultures Énergétiques	25	220	0	120	150	70	585

<u>Production d'énergie</u>, à 3,2 tep/ha.an (2 à 5) : 1,85 milliard de tep/an (54% production actuelle d'hydrocarbures, mais 8% des besoins d'énergie de 2050, 22 milliards de tep/an

Tendances actuelles…

- Achats massifs de terres arables (en

Afrique, Madagascar, Amérique du Sud…) par des investisseurs étrangers,

par exemple les Banques Arabes du Golfe

au Mozambique….le Japon… la Corée…

- En Ukraine, en 2010, les terres arables sont cotées en bourse…

8. Conclusions :

- Il faudrait défricher 0,3 à 1 milliard d'ha supplémentaires pour l'agriculture pluviale d'ici 2050, surtout en Amérique du Sud et en Afrique, aux dépens de la biodiversité et de l'environnement…. Gains de terre possible au Nord par dégel des sols gelés (160 millions d'ha)…
- Plus avec la bioénergie…
- L'Asie et le Moyen-Orient – Afrique du Nord vont dépendre fortement de "l'eau virtuelle", perte de 110 millions d'ha de terres cultivables… L'Afrique Sub-Saharienne pourrait être autosuffisante… ???
- La gestion des ressources en eau et en sol devrait se faire à l'échelle mondiale :

  -allocation des ressources hydriques entre pays dépendants,

  -allocation optimale des cultures entre agriculture pluviale et irriguée,

  -amélioration des rendements des cultures,

  -gestion des crises en cas de sécheresse…

Considérations économiques…

- Importance considérable du commerce international de nourriture, qu'il faudrait pouvoir réguler (empêcher la spéculation); mais il faut à la fois le libéraliser…
- Empêcher les mesures de restriction de l'exportation des denrées alimentaires…
- Gravité de la "volatilité" des prix agricoles, émeutes de la faim, révoltes…
- Nécessité de protéger l'agriculture paysanne des PED, qui ne peut être mise en concurrence avec l'agriculture mécanisée
- Perspectives inquiétantes…

9.
Et les sols ?

Les sols sont le facteur limitant de la production alimentaire, pas l'eau…

Il n'y a pas globalement de crise de l'eau sur Terre, mais une forte tension sur les sols…

Les Sols…

- Dans les sociétés industrielles, **urbanisation à un rythme de un département français par an au niveau de l'union européenne** (constructions de maisons, d'usines, de routes, d'infrastructures).
- Dans les **pays en développement**, l'augmentation de la **production agricole** par **intensification de l'agriculture pluviale** menace des zones encore peu anthropisées (**bassin amazonien, cuvette du Congo**) qui sont des **réserves de biodiversité** et qui jouent un rôle important dans le climat de la planète. Les **sols des régions tropicales étant très pauvres chimiquement et fragiles physiquement,** l'intensification risque de les dégrader de manière irréversible. *
- Salinisation : 50 millions d'ha seraient déjà perdus à ce jour…

Roland Poss, Président Ass. Fr. Etude du Sol

10. Et les écosystèmes ?

To make way for an oil palm plan
tion, land in Sarawak, in Malaysia
Borneo, is stripped of trees, then
burned. Palm oil is a prime expor
Malaysia and Indonesia, and glob
demand is growing.

Autant en emporte le vent

Gone with the wind...

Delta de l'Okavango (Namibie)
Kinzelbach, 2006

Merci beaucoup… !