



Les barrages comme outils d'adaptation aux conséquences du changement climatique

CIGB – Commission Internationale des Grands Barrages
Emmanuel Grenier



Plan de la présentation

- Un mot sur la CIGB et sur les barrages en général
- Que dit le GIEC sur l'évolution des précipitations ?
- Changement climatique et approvisionnement en eau:
Mesures d'adaptation possibles
- L'eau et le GIEC -- Recommandations de Rabat



Qui est la CIGB ?

- Organisation de Professionnels
- Fondée en 1928
- 100 Pays Membres



- 10 000 Membres Individuels
Bureaux d' Études, Constructeurs,
Exploitants, Scientifiques, Chercheurs,
Ingénieurs, Universitaires,
Gouvernements, Institutions Financières,
Associations..



La Vision de la CIGB



Faire progresser le **Savoir Mondial** dans la Conception, la Construction, l'Exploitation et la Sécurité des Barrages.

Guider la **Profession** en éditant des **règles et des standards** de construction afin de s'assurer que les barrages sont construits dans le respect durable de la **Sécurité**, de l'**Environnement** ainsi que des **aspects Sociaux** et **Économiques**.



Que fait la CIGB ?

Forum d'échange de savoir et d'expérience

- Congrès tous les 3 ans → NORVEGE Stavanger en juin 2015
- Réunion Annuelle tous les ans dans un pays différent
→ République Tchèque Prague en juillet 2017

Recueil de près d'un siècle de connaissance

- Bulletins, Rapports de congrès, Dictionnaire, Registre des barrages, Guides

Recherche permanente du progrès

- 24 comités techniques, 500 experts / thèmes précis

Promotion des barrages pour les pays en développement

- Recherche financements, sensibilisation des décideurs politiques, des investisseurs...



La CIGB et l'innovation

Depuis un siècle, la CIGB accompagne, valide et diffuse les innovations dans le domaine des barrages.



Les innovations sont présentées dans ses Congrès scientifiques et Réunions Annuelles. Elles sont discutées et validées en s'appuyant sur l'apport des milliers d'experts de la CIGB.



Les enjeux sont importants !

En 2050 :

Population Mondiale atteindra 10 Milliards d'habitants

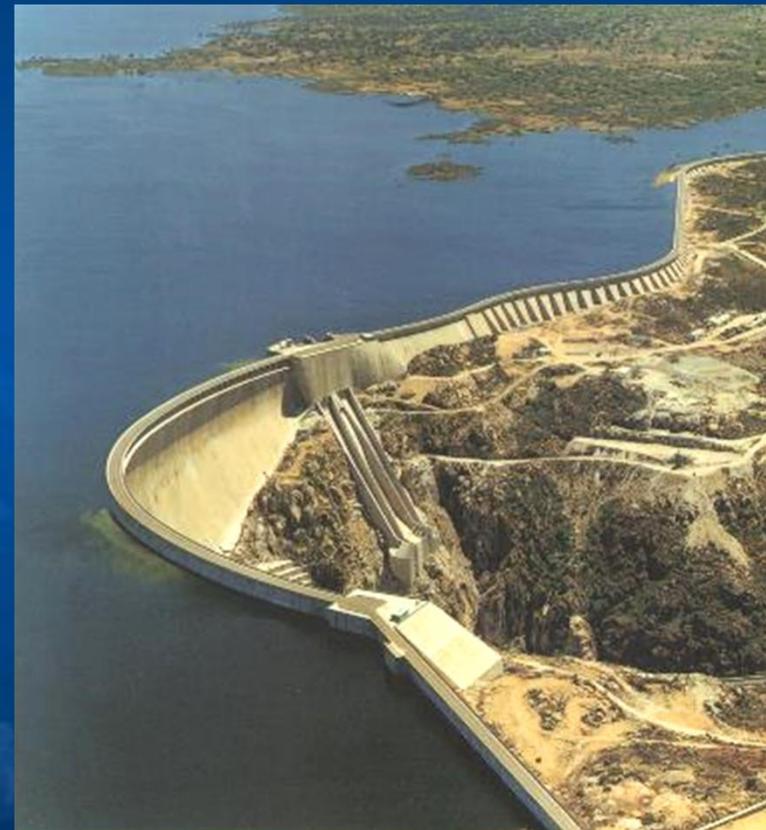
Croissance de 50 % essentiellement dans les villes

- Les besoins en Eau vont doubler
- Les besoins en Energie vont tripler
- Les besoins en Electricité vont quadrupler
- Il va falloir doubler la capacité mondiale de stockage d'eau



Barrages dans le monde

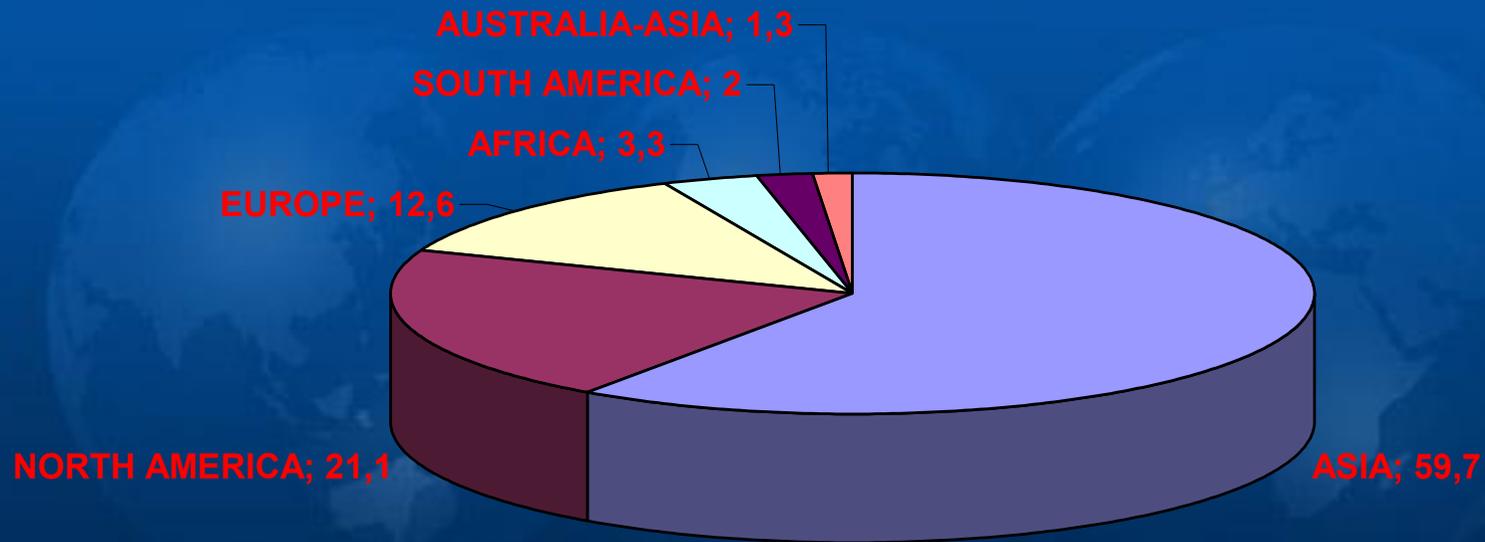
- 60.000 grands barrages
- 1 Million petits barrages
- Capacité totale : 9.000 km³





Barrages dans le monde

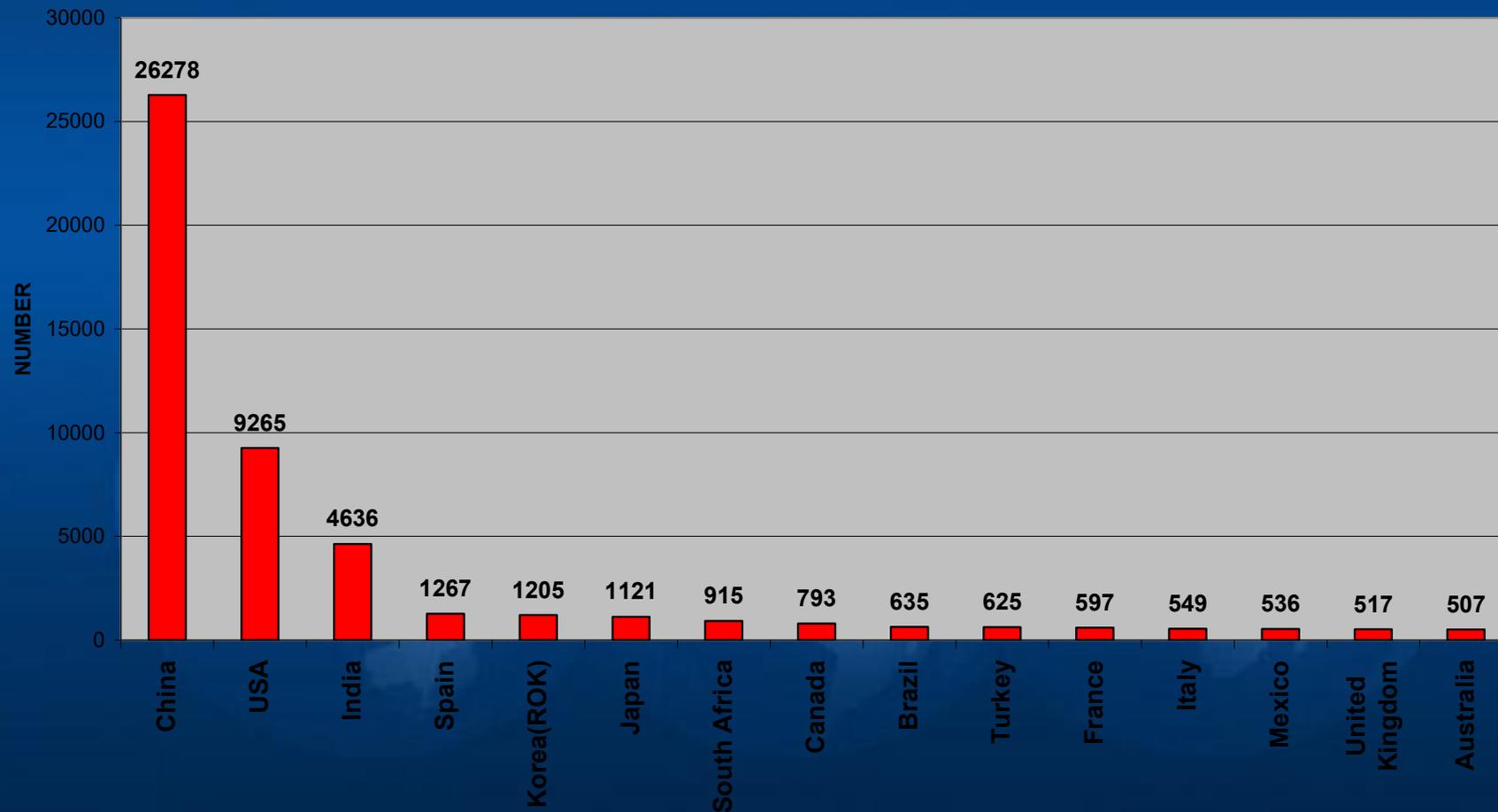
LARGE DAMS % GEOGRAPHICAL REGION





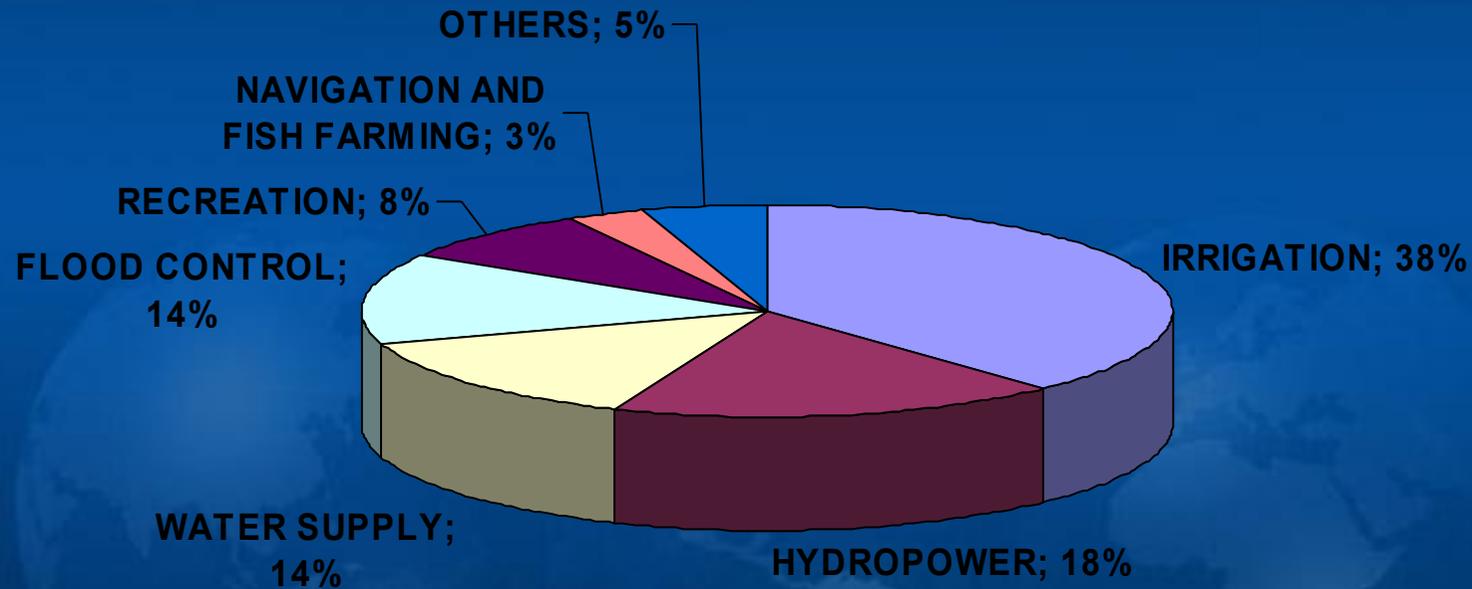
Barrages dans le monde

LEADER'S COUNTRIES IN NUMBER OF LARGE DAMS





Barrages dans le monde





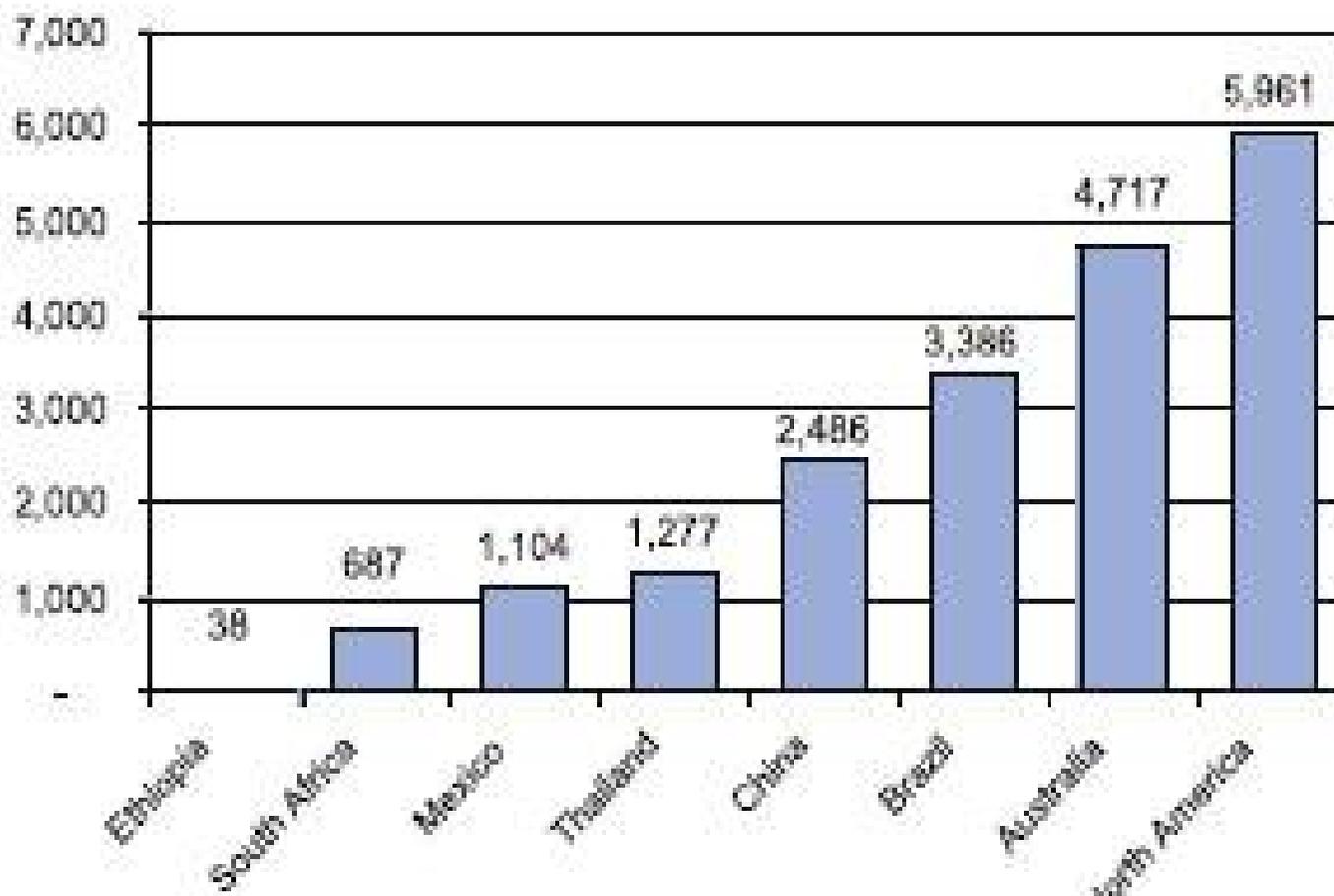
Ressources hydrauliques mondiales

- Renouvelables 40.000 Km³ / an
- Disponibles 13.000 Km³ / an
 - Stockage naturel 9.000 Km³ / year
 - Stokage dans les barrages (31%) 4.000 Km³ / year



Stockage d'eau dans le monde

Reservoir Storage per Capita (m³/cap), 2003



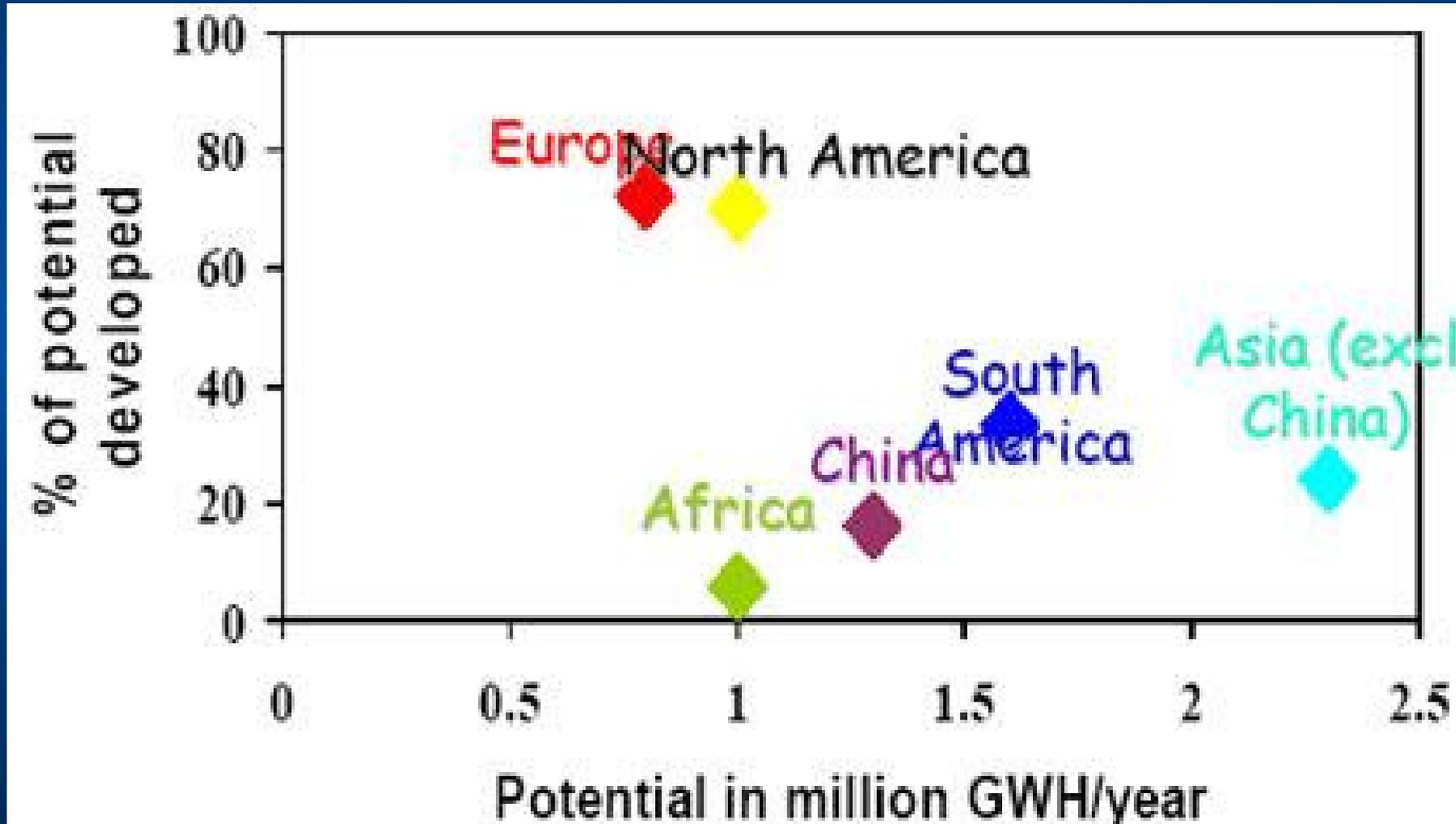


Potentiel hydro dans le monde

Région	Potentiel	Hydroelectricité produite			
	TWh / an		TWh / an	%	
Europe	790		560	71%	
Asie	4 000		950	24%	
Afrique	1 100		85	8%	
Amérique du Nord	1 000		670	67%	
Amérique du Sud	1 600		600	38%	
Océanie	90		55	61%	
Monde	8 580		2 920	34%	

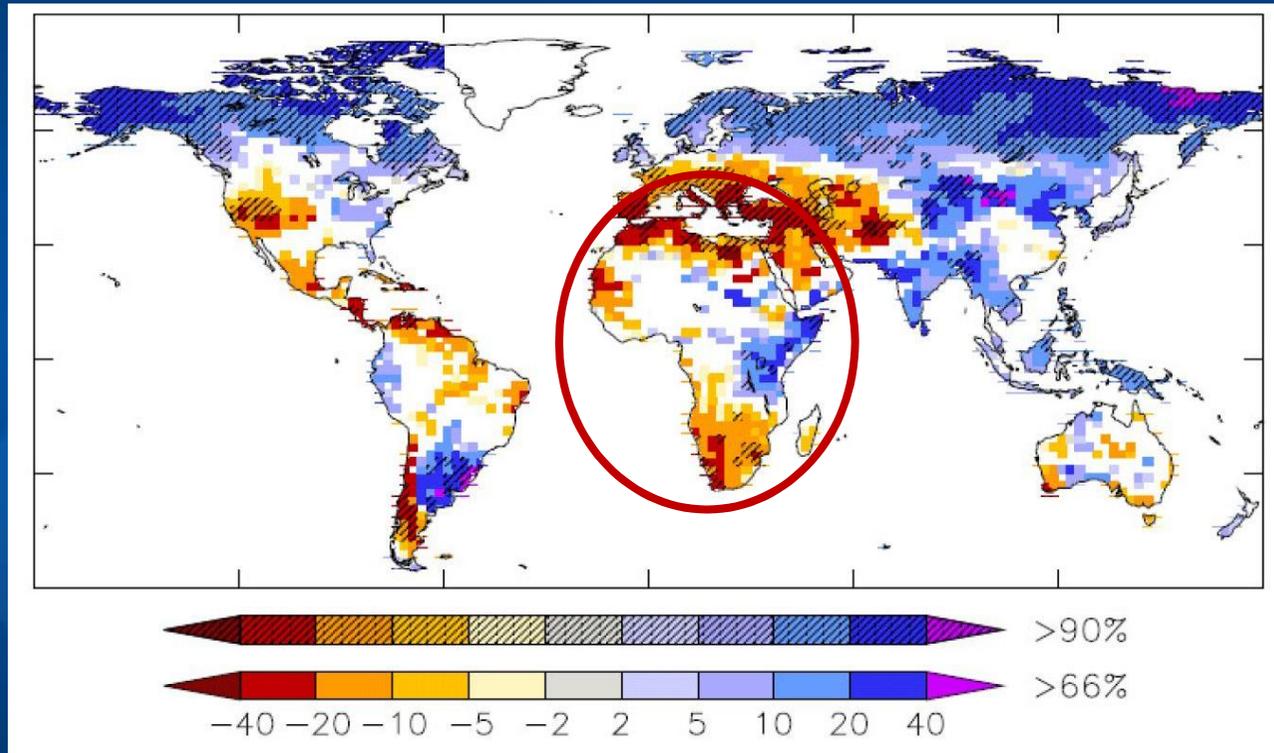


Hydropower Potential in the World





Changement climatique : Que disent les modèles sur les flux hydrologiques futurs ?



Pas grand chose ! Les flux moyens annuels
vont s'accroître **OU** décroître



Changements observés : précipitations

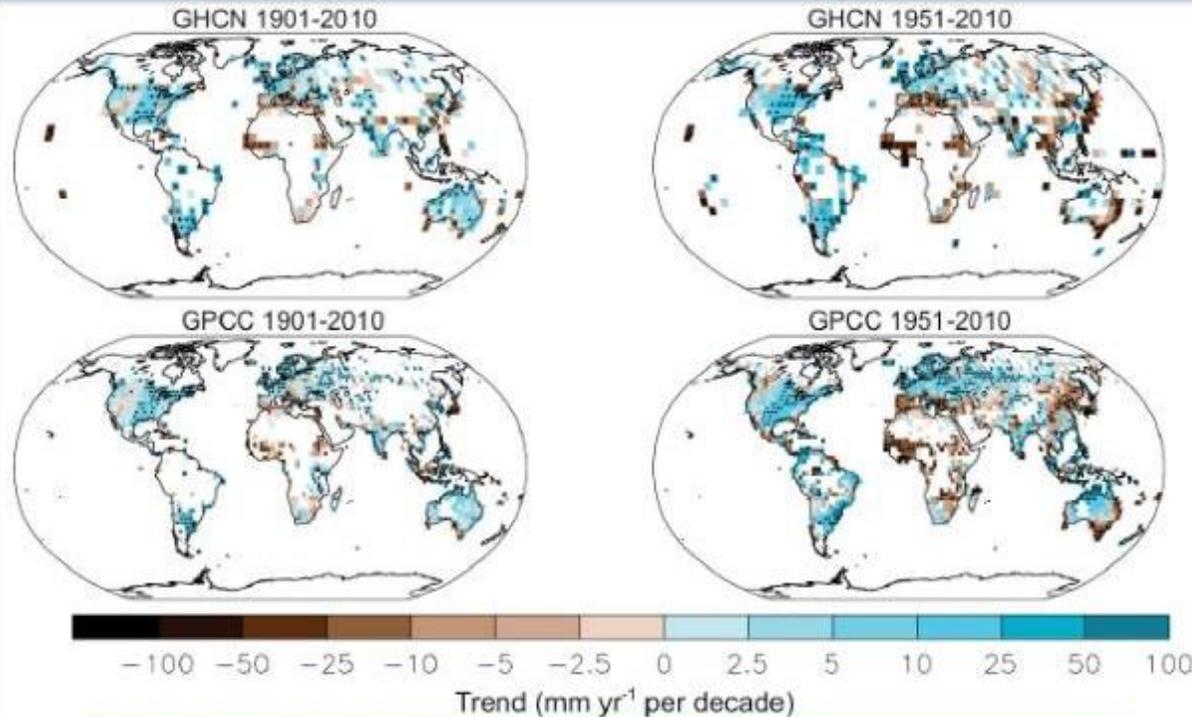


Figure 2.28: WGI AR5

- NH midlatitudes have been getting wetter
- Tropics and Mediterranean area getting drier
- Sahel recovery in recent decades

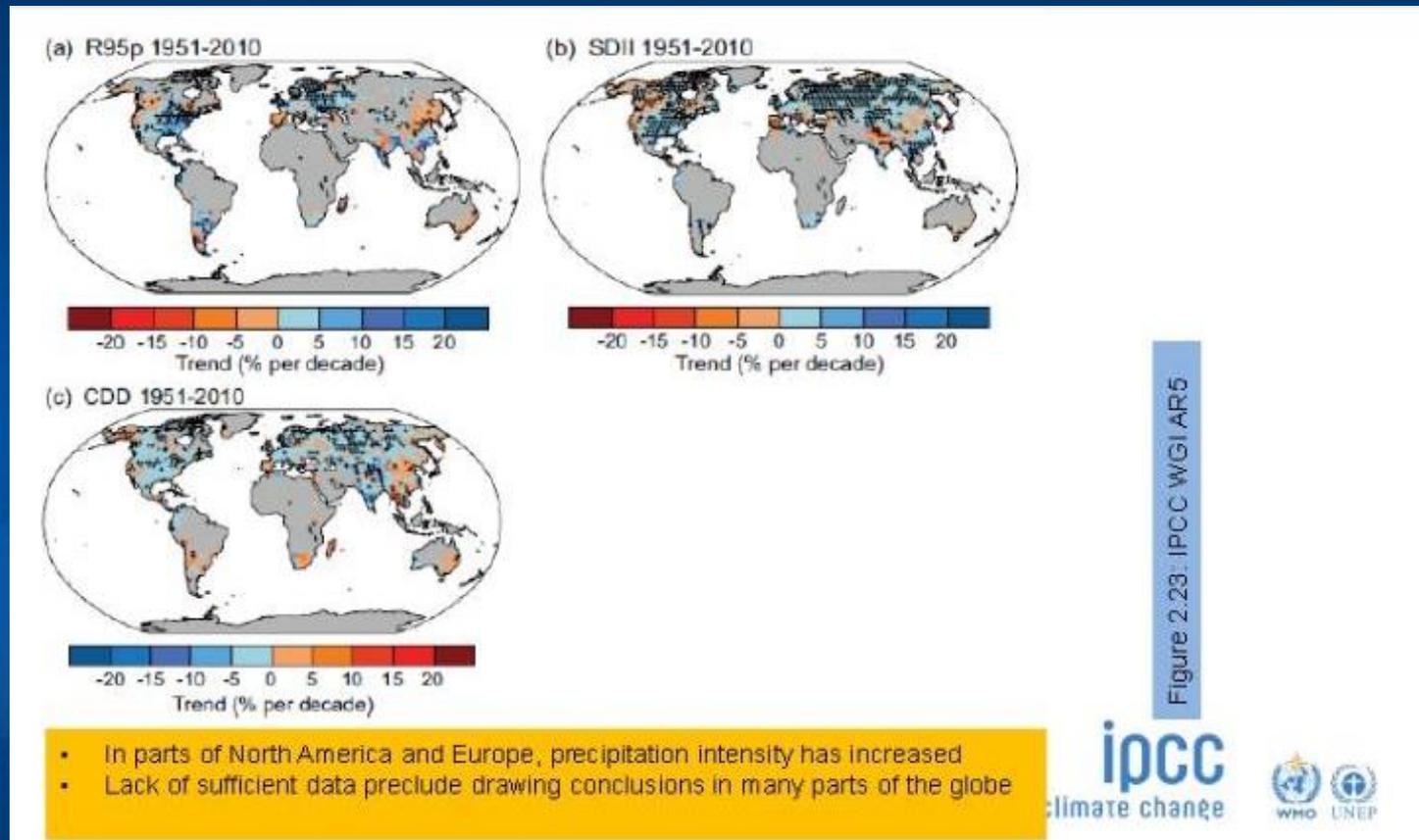
ipcc
ate change



La confiance dépend de la latitude : aux latitudes moyennes, confiance moyenne dans un accroissement
Ailleurs : faible confiance dans des tendances négatives ou positives
Très grande variabilité spatiale.



Changements observés: précipitations extrêmes



Pour les changements dans les événements extrêmes : confiance moyenne pour certains accroissement régionaux (Amérique du Nord et Europe).
Manque de données pour conclure dans la plupart des régions du globe

Projections du GIEC

Projected 21st Century Precipitation Changes (RCP8.5)

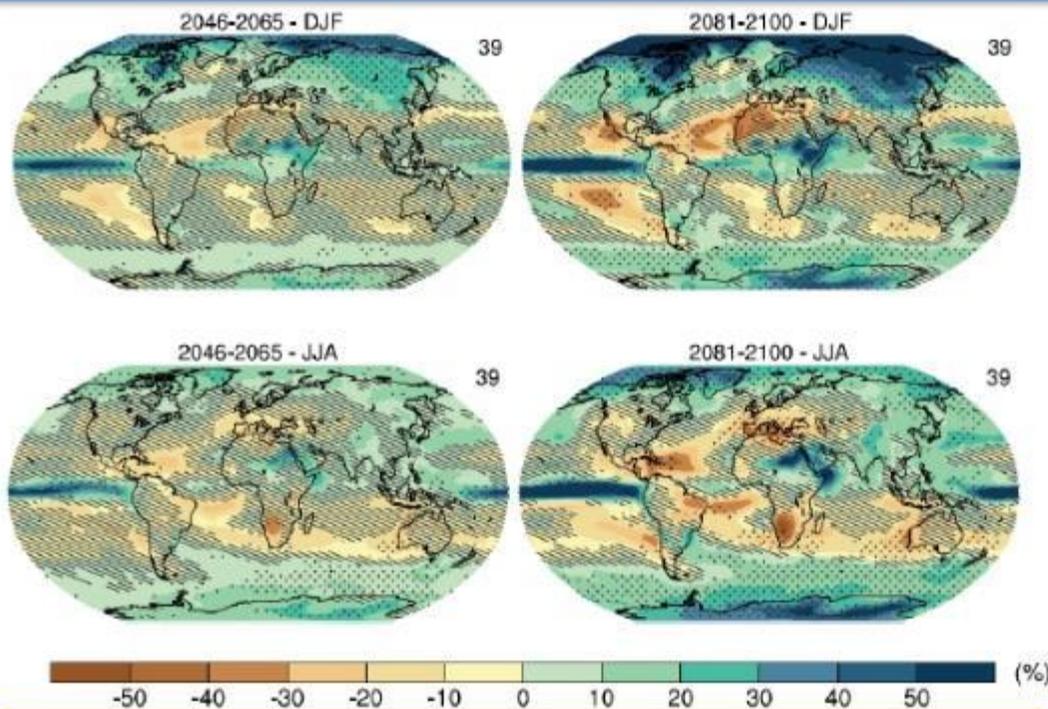


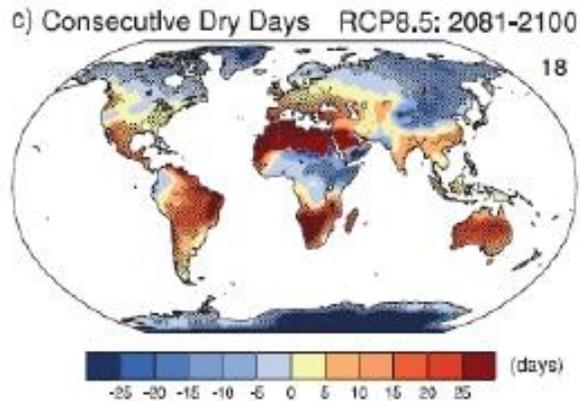
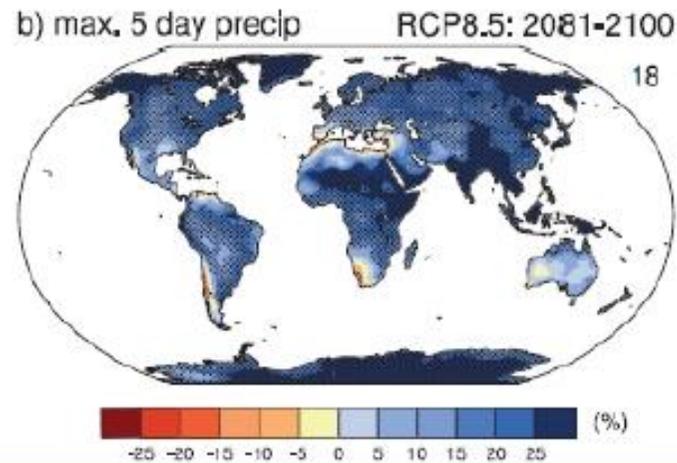
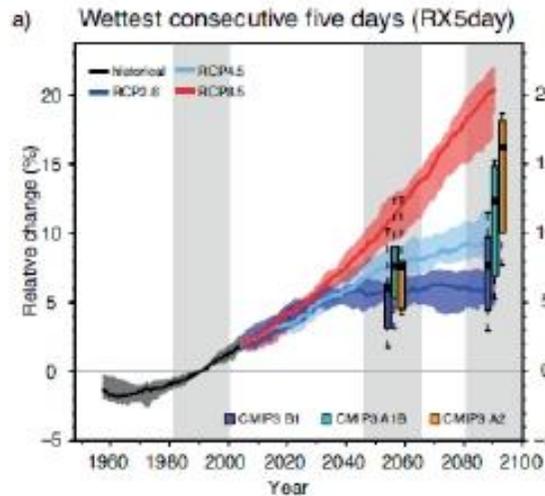
Figure 12.22: IPCC WGI AR5

Accroissement sur les grandes latitudes, décreue sur les basses latitudes et pour les latitudes moyennes, c'est l'inconnu !

- Hatching => mean change $< 1\sigma$
- Stripping => mean change $> 2\sigma$ and at least 90% of the models agree on the sign
- Precipitation increases in some wet regions and decreases over the dry subtropics



Projections du GIEC pour les événements extrêmes



- At daily to weekly time scale, a shift to more intense individual storms is projected
- At seasonal to longer time scales, more frequent and intense periods of agricultural droughts are projected over certain land areas
- 20-year return levels of annual maxima of daily rainfall are projected to occur more frequently (RP < 20 yrs)

Figure 12.26: IPCC WGIAR5



Projections du GIEC pour le flux hydraulique annuel

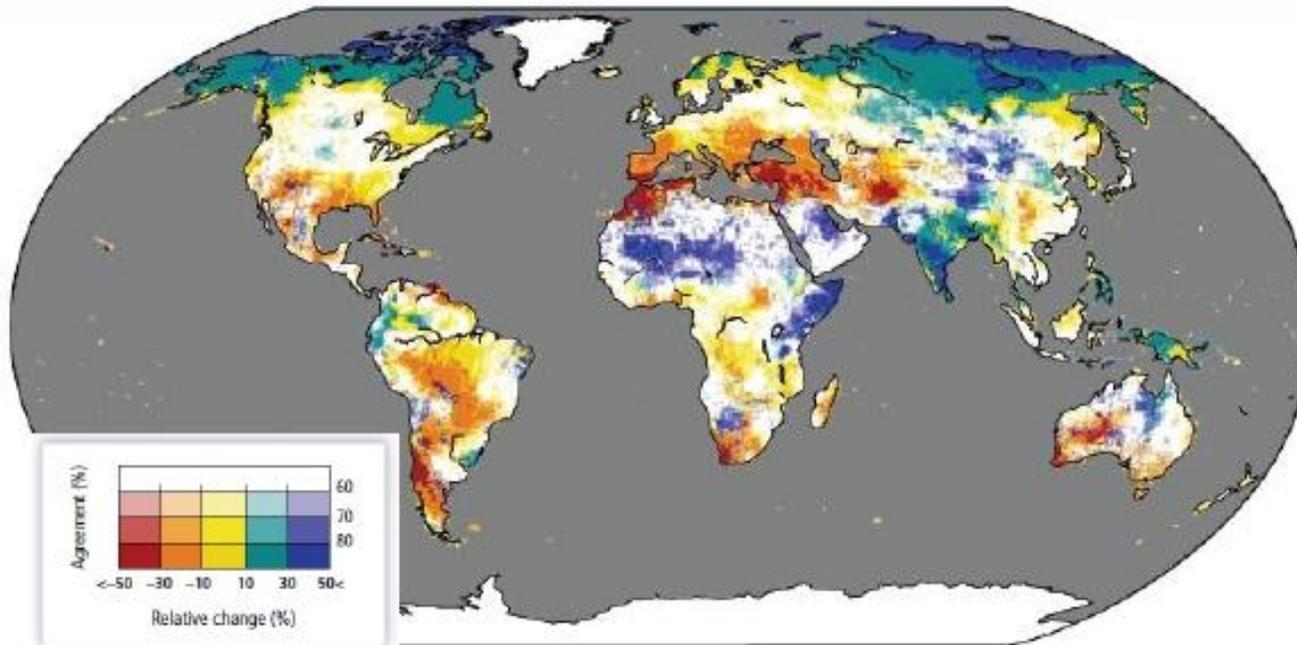
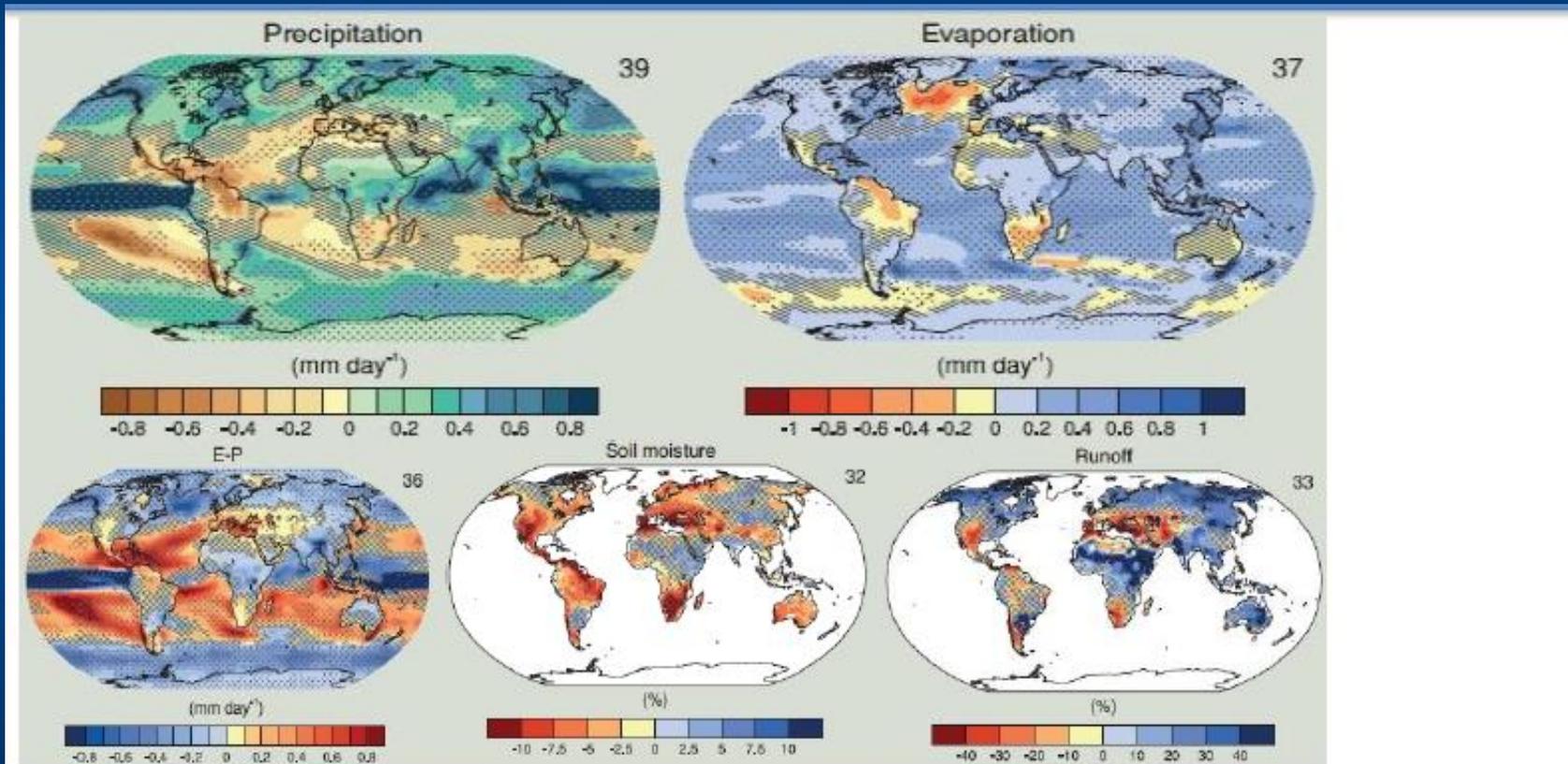


Figure 3.4: IPCC WGII AR5

- Mean percentage changes in annual runoff from a 2° C change in global mean temperature above the 1980-2010 mean (5 CMIP5 GCMs and 11 hydrological models)



Autres changements prévus dans le cycle hydrologique



- In some areas, increased evapotranspiration tends to counteract the effects of increased precipitation on soil moisture



Changements prévus à l'échelle de bassins versants

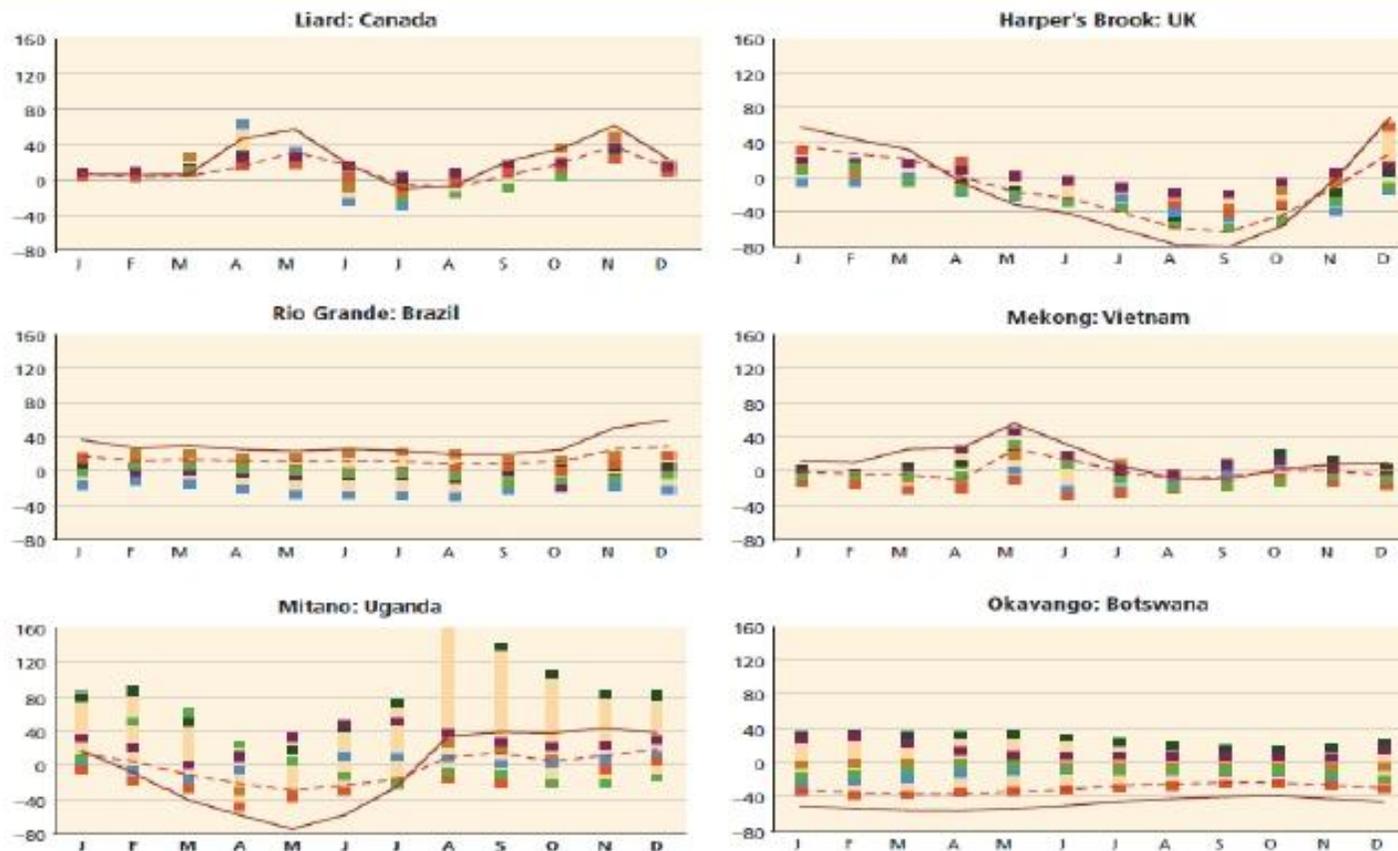


Figure 3.5: IPCC WGII AR5

- Monthly percentage runoff changes corresponding to a 2° C change in global mean temperature [7 models; lines show one model for 2° C (dotted line) and 4° C temperature changes]



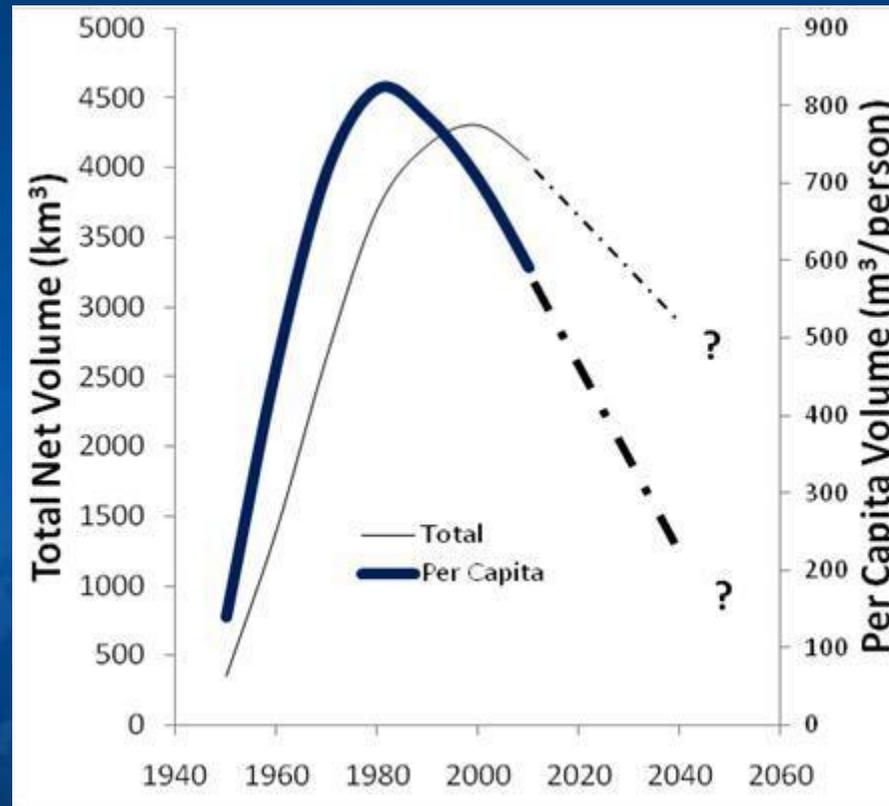


La réponse de la CIGB

- Création en 2008 d'un Comité Technique consacré au changement climatique
- Décision de ne pas s'intéresser aux causes du changement climatique (le GIEC est là pour ça !)
- Le but est de **produire des recommandations pour des réponses locales à un phénomène global**



Evolution du stockage global



G. Annandale, (2013)



Changement climatique et approvisionnement en eau

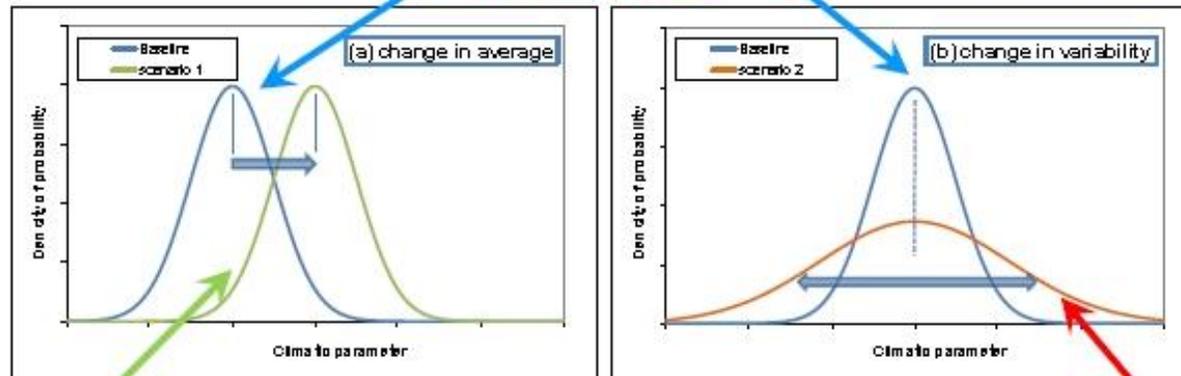
Deux variables importantes :

- Le changement dans le flux annuel moyen dans la rivière
- Le changement dans la variabilité hydrologique



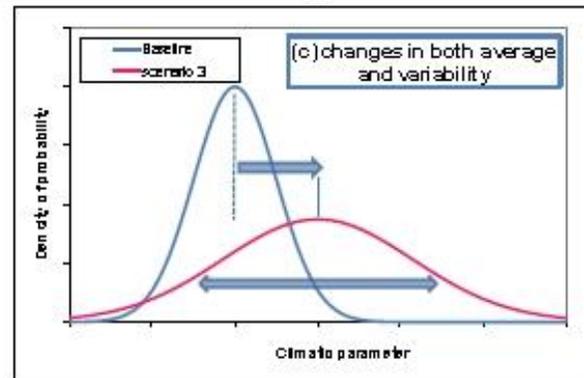
Qu'entend-on par « changement » ?

Baseline
reference



Change in
Average

Change in
variability



or both
changes !



Les risques du changement

Risque = Danger x Exposition x Conséquences



Forçages hydro-météo

- Température moyenne de l'air
- Extrémum de température
- Précipitations moyennes
- Extrémum de précipitations
- Inondations et sécheresses
- Evapotranspiration

Systemes hydrauliques

- Irrigation
- Usines hydroélectriques
- Alimentation en eau
- Contrôle des crues
- Besoins environnementaux
- Navigation intérieure



Changement climatique : une quasi-certitude



La variabilité hydrologique va
augmenter: cela signifie davantage
d'événements extrêmes, comme les
inondations ou les sécheresses



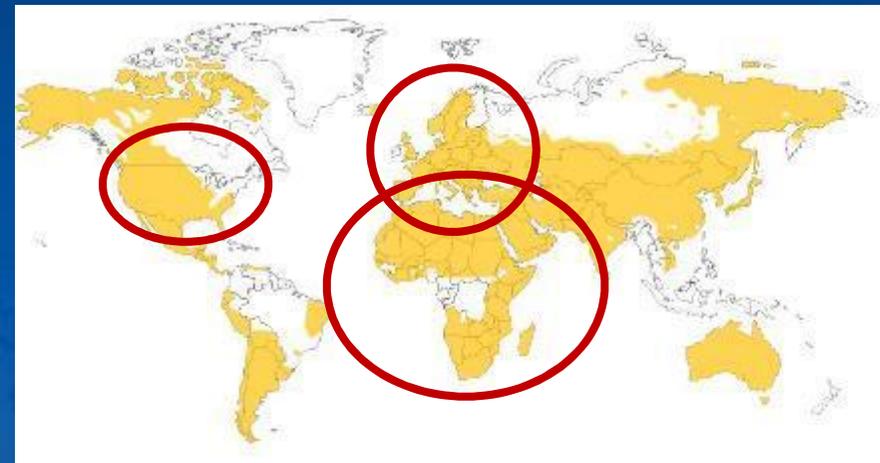
Changement climatique

Effet sur le stress hydrique d'une variabilité hydrologique accrue

**Conditions
actuelles**



**En faisant l'hypothèse
d'une augmentation de
25% de la variabilité**

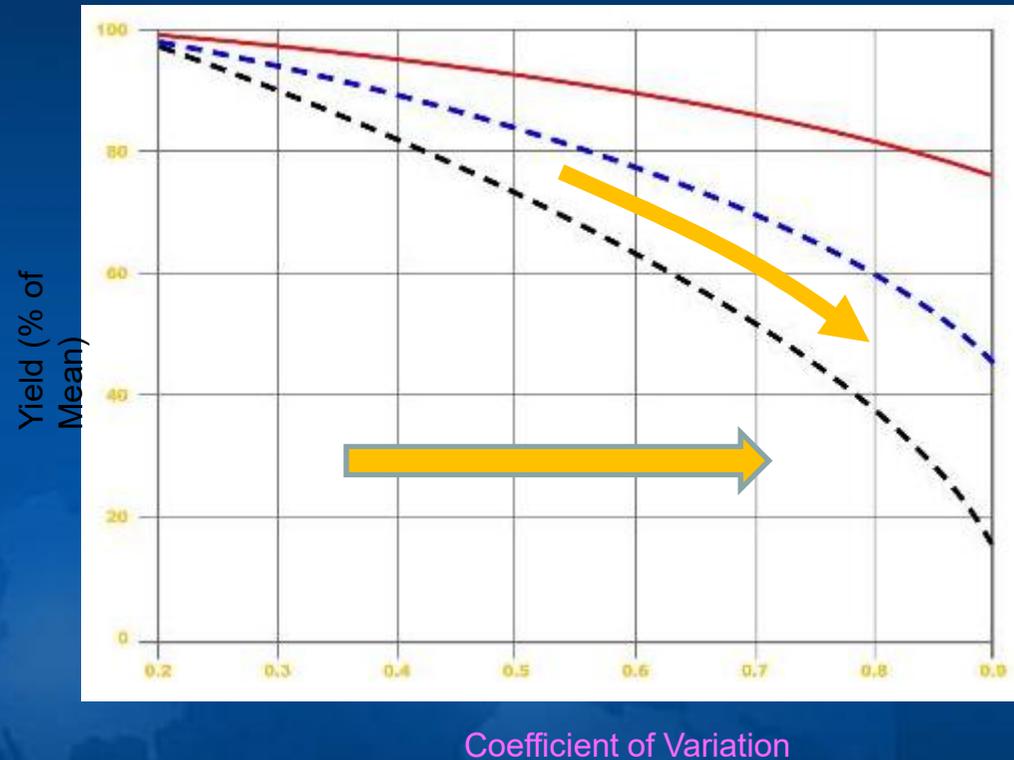


**La plupart des pays du monde vont
connaître une réduction de la fiabilité de leur
approvisionnement en eau**



Comment se préparer au changement climatique :

- Pour maintenir la fiabilité de la ressource en eau malgré l'augmentation de la variabilité, il nous faut :
 - Construire des réservoirs dont les espaces de stockage soient les plus grands possibles
 - Concevoir et construire une infrastructure robuste



- Reservoir Volume = 2 MAF (Mean value of Annual Flow)
- Reservoir Volume = 1 MAF
- Reservoir Volume = 0.6 MAF

Tiré de la présentation de George Annandale à Rabat, July 2016

$$\alpha = 1 - \frac{z^2 \cdot c_v^2}{4 \cdot \tau}$$



Les barrages contribuent à lutter contre les effets du changement climatique

En luttant contre les causes du changement climatique, c'est la mitigation-atténuation

- Production d'électricité bas carbone
- Réduction de la deforestation dans les PVD grâce à la fourniture d'énergie de substitution à la combustion de la biomasse
- Une puissance immédiatement disponible qui permet de remplacer les énergies fossiles pour la consommation de pointe
- Un outil incomparable pour la regulation du réseau, sans lequel on ne pourra guère développer davantage les énergies renouvelables intermittentes comme l'éolien ou le solaire.



Les barrages contribuent à lutter contre les effets du changement climatique

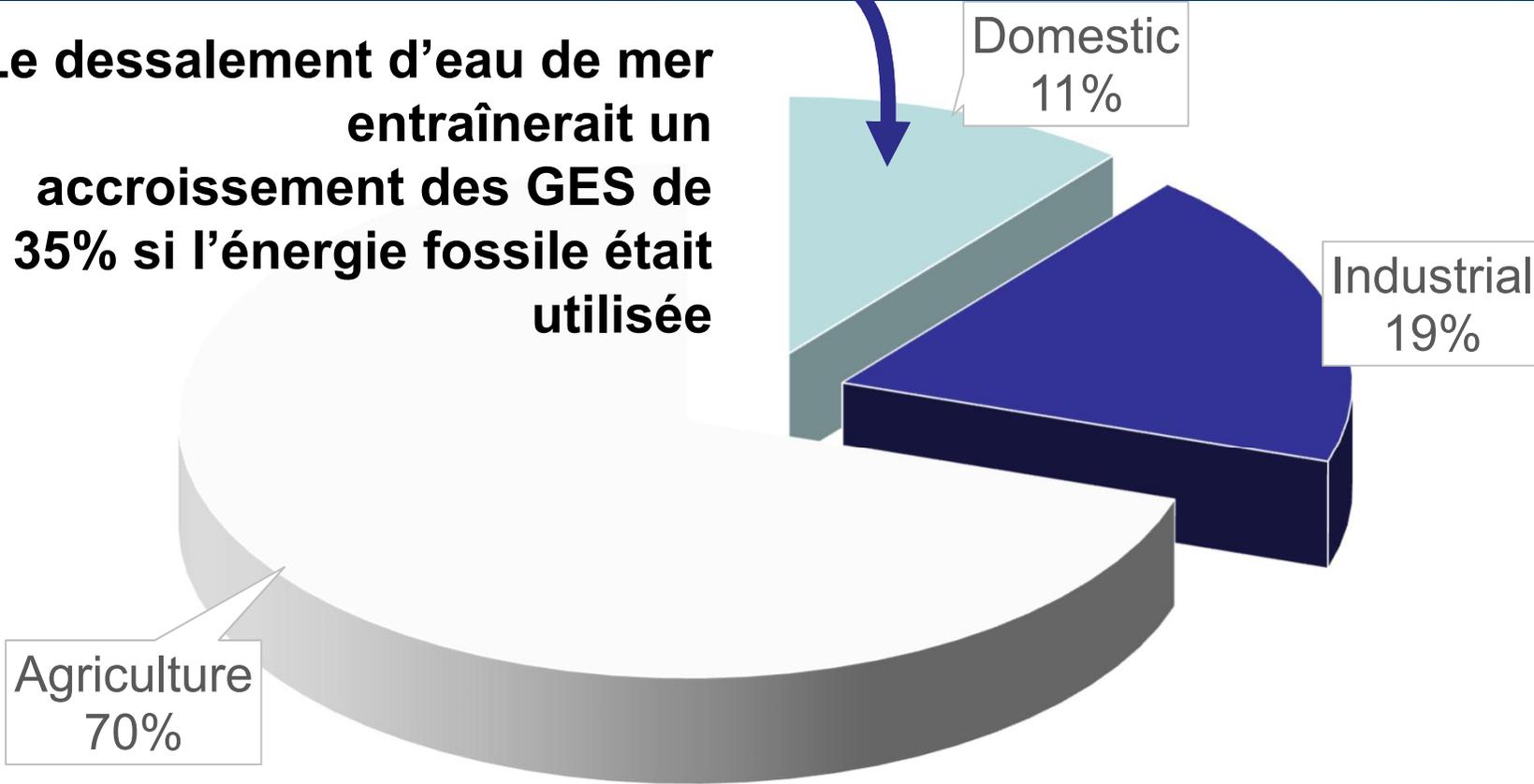
En luttant contre les conséquences du changement climatique, c'est l'adaptation

- Les réservoirs permettent de limiter l'impact des inondations dévastatrices
- Les moyens de stockage d'eau à grande échelle permettent de réduire le stress hydrique



Un mot sur les fournitures alternatives

Le dessalement d'eau de mer entraînerait un accroissement des GES de 35% si l'énergie fossile était utilisée

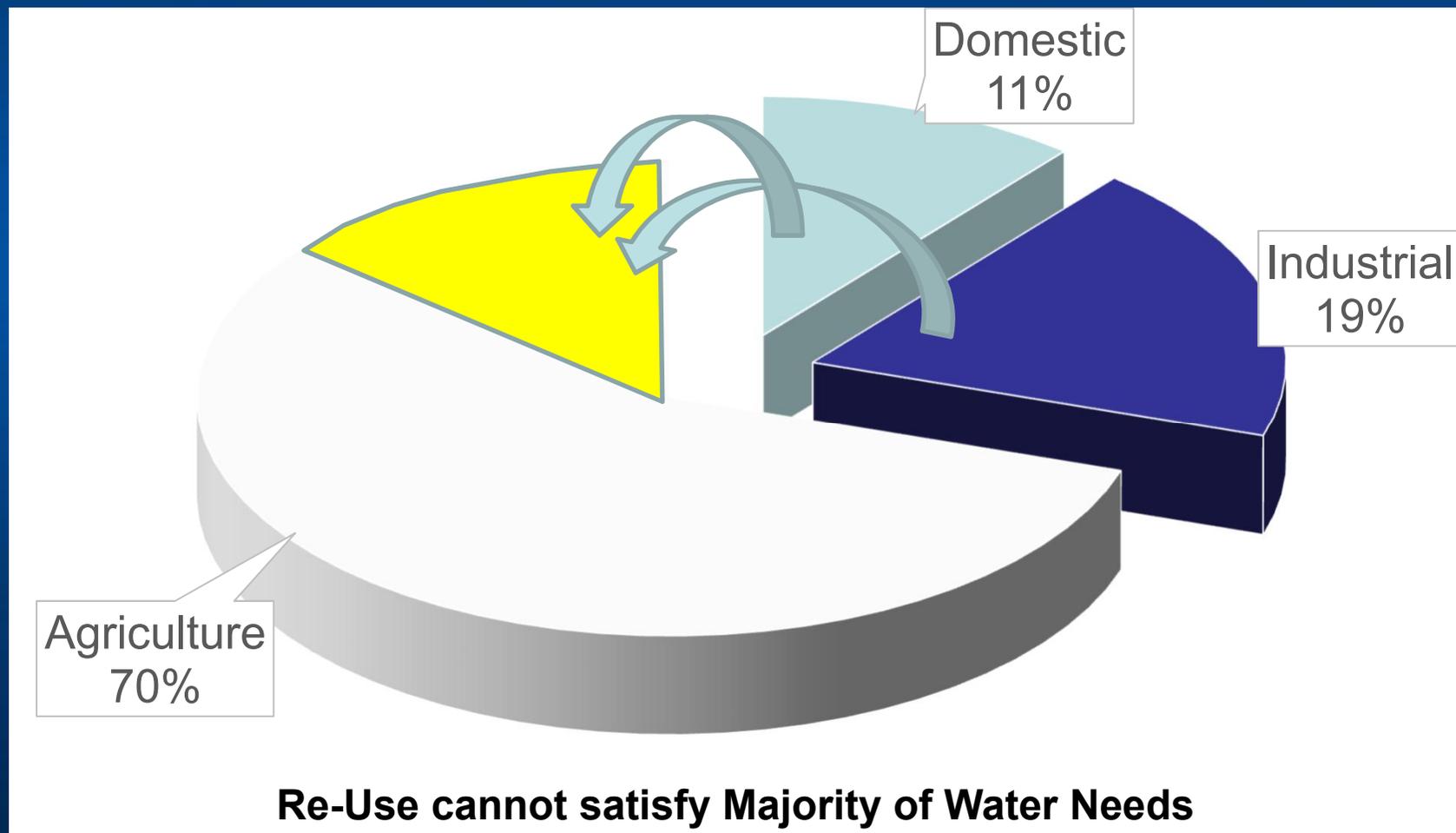


Storage Required to ensure Reliability of Water Supply for Agriculture



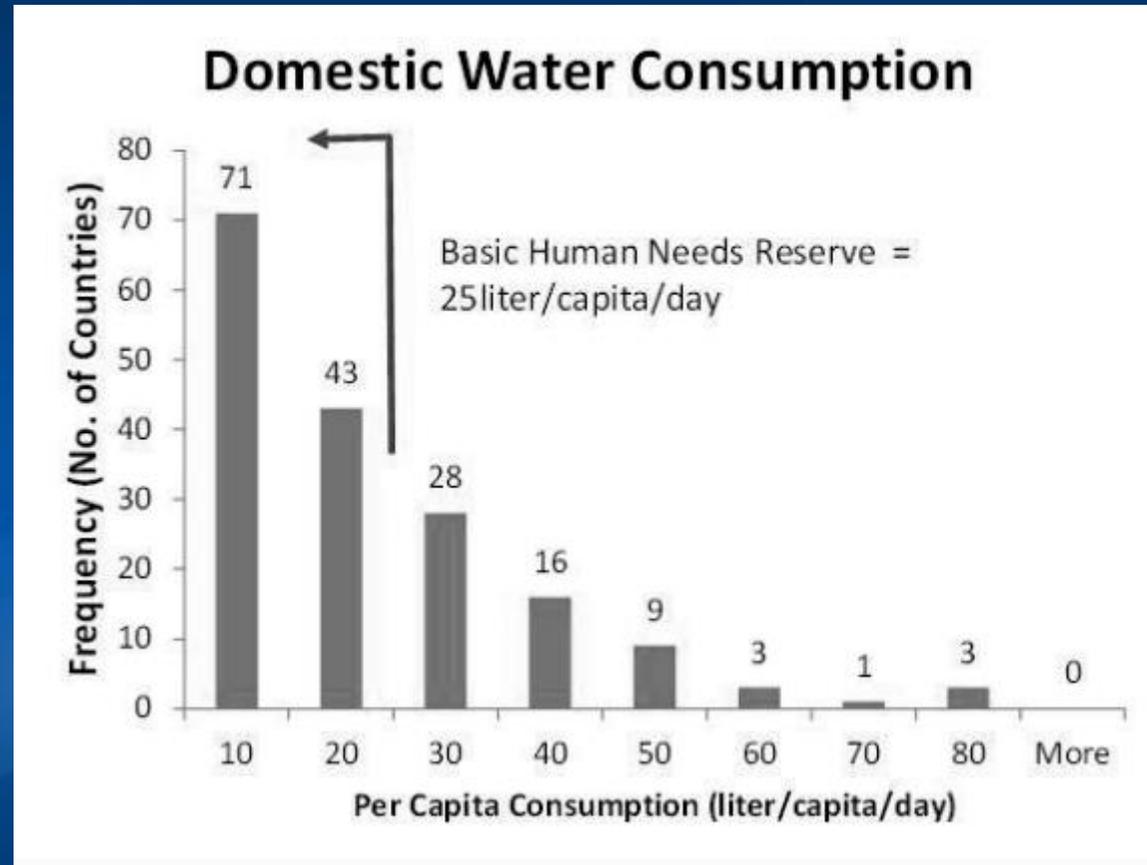
Alimentations alternatives

La réutilisation de l'eau ne peut satisfaire la majorité des besoins





Economies d'eau



**L'économie d'eau n'est PAS une solution générale
Plus de la moitié des pays du monde ont déjà une
alimentation en eau insuffisante !**



Un bémol parmi d'autres

- 1/3 de la nourriture produite dans le monde est perdue : elle va à la poubelle avant d'arriver dans nos estomacs
- 40 à 50% des fruits et légumes
- 35% du poisson et fruits de mer
- 30% de produits céréaliers
- 20% des produits laitiers et carnés

Cette perte, si on la mesure en termes d'émissions de GES est gigantesque : 3^{ème} émetteur mondial derrière les Etat-Unis et la Chine, mais devant l'Europe. 8,2% des émissions presque au niveau du transport routier
30% des terres agricoles



1^{ère} Conférence internationale sur l'eau et le climat, Rabat, 11-12 juillet 2016

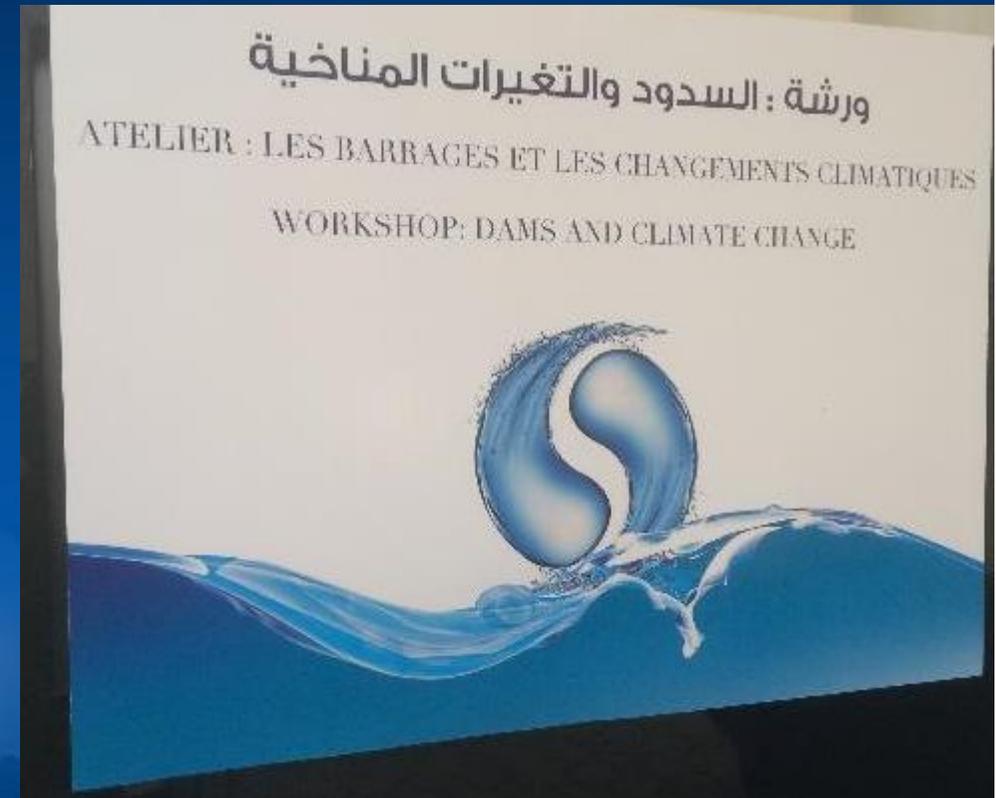
Pendant cette conférence, le gouvernement marocain et la CIGB ont organisé conjointement un atelier “Barrages, Réservoirs et Changement Climatique”, qui s’est conclu sur 5 Recommandations pour Agir





Recommandations de Rabat

1. Impact du changement climatique: déterminer ce qui est en jeu
2. Adopter une approche globale
3. La sédimentation fait partie des défis pour la durabilité des réservoirs
4. Développer et poursuivre des stratégies de gestion adaptative
5. Reconnaître les barrages et les réservoirs comme de réelles opportunités de développement







Recommandations de Rabat – Impact du changement climatique : déterminer ce qui est en jeu

Les impacts du changement climatiques peuvent altérer les fonctions et même les propriétés structurelles des barrages et réservoirs. Les actions entreprises doivent s'appuyer sur une étude de danger complète.

- Les professionnels des barrages et les gestionnaires des ressources en eau doivent travailler avec les professionnels pour identifier comment la variabilité temporelle et spatiale des paramètres sera modifiée par les nouvelles conditions climatiques
- Définir des indicateurs de risque qui reflètent la sensibilité des systèmes de ressources hydrauliques, de façon à détecter l'évolution des risques et à mieux gérer ces risques
- Déterminer comment les besoins en eau sont exposés au changement climatique



Recommandations de Rabat – Impact du changement climatique :

déterminer ce qui est en jeu (cont.)

- Déterminer comment les flux hydrauliques vont changer
- Déterminer comment les rendements hydriques des réservoirs vont changer, en tenant compte des valeurs moyennes comme des valeurs extrêmes.
- Déterminer comment la capacité d'atténuation des crues pourrait évoluer au niveau des réservoirs
- Identifier et distinguer clairement les risques associés aux effets climatiques :
 - *Risques fonctionnels* (perte de fonctions) : du fait de l'intensification des sécheresses et des inondations, de l'accroissement des variations saisonnières, certaines fonctions peuvent être affectées : alimentation en eau, irrigation, production d'électricité, navigation intérieure, contrôle des crues, tourisme, développement des écosystèmes, etc.
 - *et risques structurels* (perte de l'intégrité de la structure): qu'il s'agisse de l'accroissement des risques de crue (en intensité ou en fréquence) ou de comportement structurel induit par les températures extrêmes



Recommandations de Rabat: Adopter une approche globale

- Un projet de barrage n'est pas une question purement technique réservée aux ingénieurs. Il doit inclure une large gamme d'intérêts et de compétences. Cela comprend les besoins environnementaux et le contact précoce avec les communautés locales.
- Adopter une approche IWRM2 : une approche multi-sectorielle; multi-usages; multi-échelles, pour faire des projets de barrages des illustrations exemplaires de l'alliance eau-énergie-nourriture-santé.
- Les projets de transfert d'eau : Ils ne doivent pas aboutir à créer des gagnants et des perdants, mais doivent être développés sur la base d'une solidarité inter-bassins dans une perspective gagnant-gagnant : trouver l'équilibre approprié entre les pénuries d'eau en un endroit et les excès d'eau ailleurs.
- Vérifier l'influence des réservoirs sur les émissions de méthane, particulièrement en zone tropicale (protocoles de mesure et outils de modélisation)
- Développer le partage d'expérience entre pays et continents



Recommandations de Rabat :

Sédimentation

- Pour le développement durable, nous devons créer des infrastructures de stockage qui serviront à répondre aux besoins des générations actuelles comme des générations futures.
- La sédimentation réduit les volumes de stockage des réservoirs mondiaux, ce qui entraîne une réduction du volume total d'eau stockée. On perd chaque année plus de volume de stockage que ce que l'on ajoute par la construction de nouveaux barrages.
- Pour répondre à ce défi, il faut :
 - Changer le paradigme de développement en passant d'une approche de conception à une approche en termes de gestion du cycle de vie
 - Concevoir les barrages et les réservoirs sur le très long terme (siècles) pour satisfaire la nécessité de créer une équité intergénérationnelle.
 - Développer et mettre en œuvre une gestion de la sédimentation des réservoirs, ce qui comprend: (1) la gestion des bassins versants, (2) l'expédition des sédiments à travers le barrage et (3) les technologies d'enlèvement des sédiments.
 - Développer des outils d'aide à la décision pour aider les exploitants de réservoirs à prendre des décisions équilibrées entre l'éclusement et la mise en réserve, dans les régions où la majorité des flux arrivent pendant les crues, entraînant avec eux de grosses quantités de sédiments t



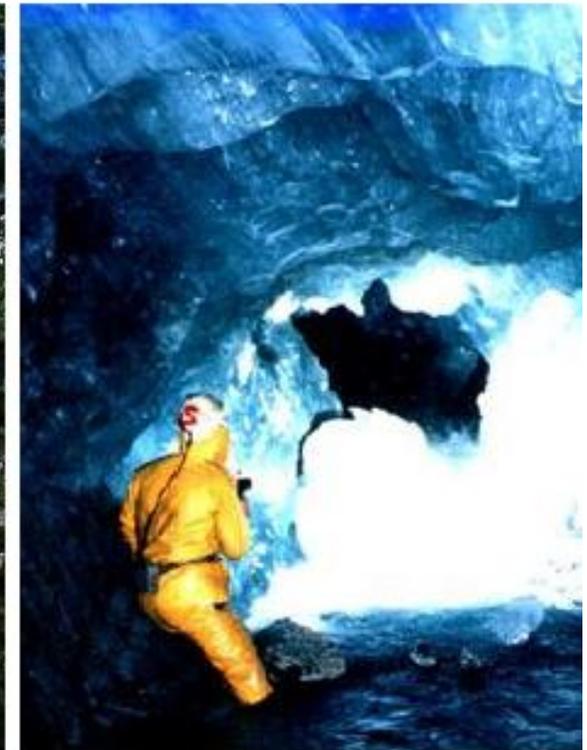
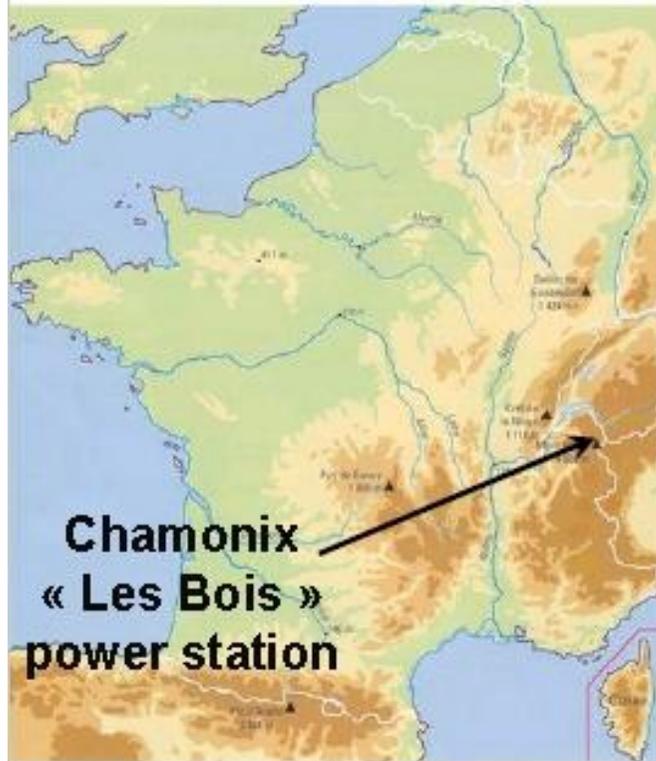
Recommandations de Rabat : strategies de gestion adaptative

- Le changement climatique exacerbe les incertitudes préexistantes auxquelles les décideurs sont confrontés. L'incertitude ne doit pas donner lieu à la procrastination, car l'inaction peut mener à des conséquences terribles
 - Considérer que les différents scénarios climatiques “sérieux” ont une égale probabilité d'occurrence et établir toute la gamme des futurs possibles.
 - Ne pas considérer un seul scénario il pourrait donner une vision trop alarmiste ou au contraire trop optimiste de l'avenir.
 - Adopter une approche “sans-regrets” : first decisions must be phased in such a way to let relevant options still open when knowledge becomes available for supporting the next decisions



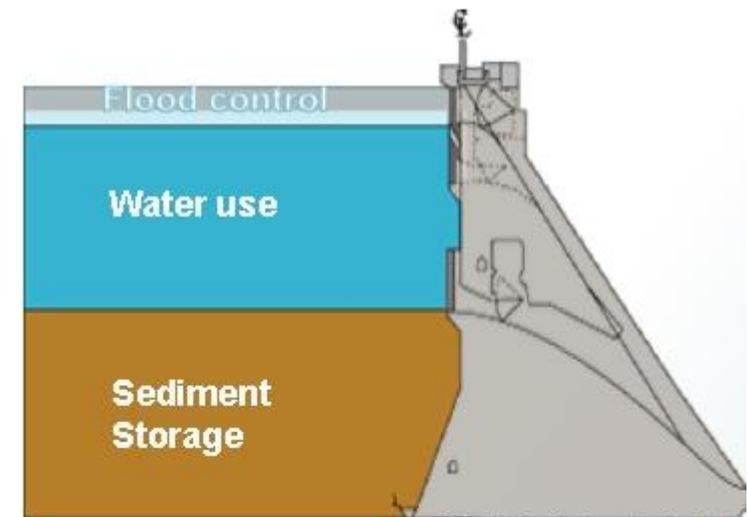
ADAPTING TO WARMER CONDITIONS

Adaptation of a hydropower station glacier water intake structure to Glacier retreat in France



ADAPTING TO WETTER CONDITIONS

- ⦿ Increasing dam height
- ⦿ Spillway upgrades
- ⦿ Improve flow forecasting and storage management
- ⦿ Coordinated flood management
- ⦿ Updating flood criteria then developing operations models that provide flexibility





Mesures d'adaptation pour les périodes plus sèches

- Economiser l'eau et sécuriser la ressource
- •Projets de transfert d'eau et/ou de dessalement.
- Restrictions temporaires ou permanentes de l'utilisation de l'eau
- Trouver des façon plus efficaces de gérer l'eau
- Meilleure coordination de la gestion aux différentes échelles



Recommandations de Rabat : les réservoirs offrent des opportunités

- Les barrages et réservoirs font partie de la solution. A condition que leur conception prenne en compte l'ensemble des facteurs de risque, ils peuvent jouer un rôle essentiel pour atténuer les situations critiques, ou s'y adapter lorsque la sécurité hydrique est en jeu.
 - Les barrages et réservoirs peuvent aider à l'accomplissement du 4^{ème} SDG
 - Les barrages et réservoirs peuvent servir d'outils d'atténuation pour assurer certains besoins essentiels, notamment le contrôle des crues.
 - L'hydroélectricité et le pompage turbinage peuvent accompagner le développement des énergies renouvelables intermittentes pour limiter les émissions de GES.
 - Il faut parler davantage des réservoirs que des barrages : la structure n'a pas de sens sans sa fonction, qui est de créer un réservoir
 - Les barrages et réservoirs peuvent être alliés aux projets de dessalement pour assurer l'alimentation en eau; et inversement, selon les conditions géographiques. Le dessalement et les barrages ne sont pas des concurrents, mais il faut les voir comme des partenaires.



Répondre aux défis

Pendant tout le XX^e siècle, les barrages et l'hydroélectricité se sont révélés être des outils de développement durable

Ils seront l'une des principales réponses aux défis du XXI^e siècle





Merci !

**Nous vous invitons à nous rejoindre en Autriche, pour notre
26^{ème} Congrès et 86^{ème} Réunion Annuelle**

À Vienne, du 1^{er} au 7 juillet 2018

Q100 - Sédimentation dans les reservoirs et développement durable

Q101 - Sûreté et analyse des risques

Q102 - Géologie et barrages

Q103 - Petits barrages et digues

<http://www.icold2017.cz/>

www.icold-cigb.org

Chapter 8: GHG emissions associated to reservoirs

Figure 8.3. Main processes leading to GHG emissions from reservoirs (from Demarty and Bastien, 2011)

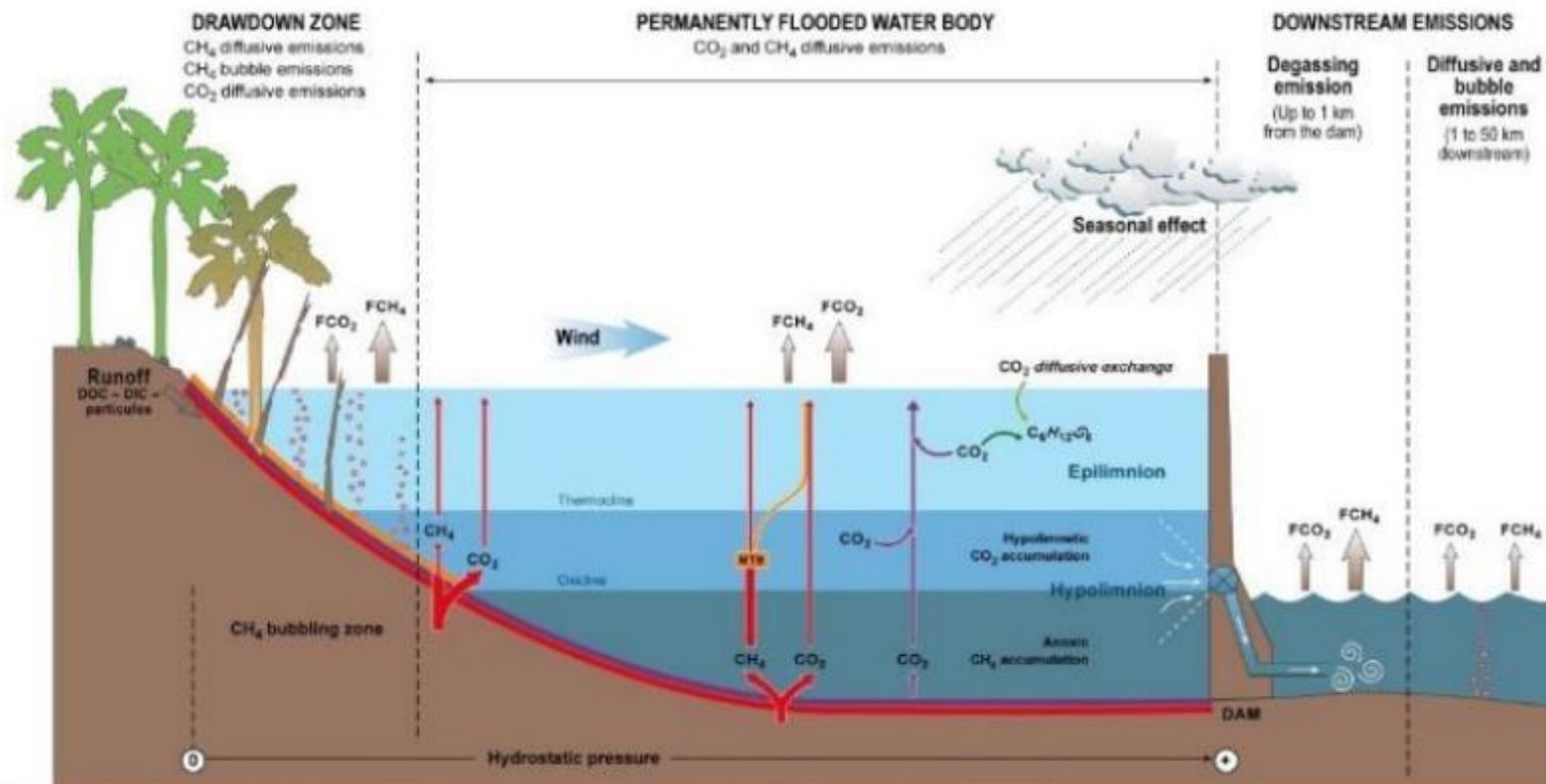


Figure 8.4 (A) summer CO_2 emission rates for Quebec reservoirs
(B) annual CH_4 emission rates for tropical reservoirs

