



De l'expertise globale sur l'évolution du climat par le GIEC à l'évaluation des impacts sur les cours d'eau en France

Charles Perrin
Irstea – Antony

charles.perrin@irstea.fr – <http://webgr.irstea.fr>

Cycle « Chaud et froid sur le climat »
Espace Vasarely, Antony
12 novembre 2015



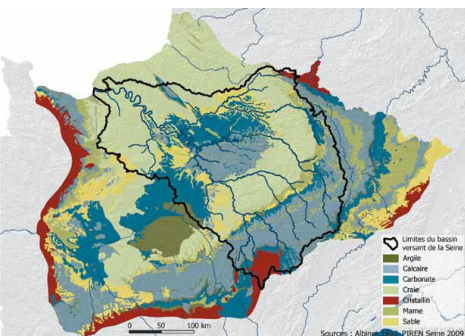
www.irstea.fr



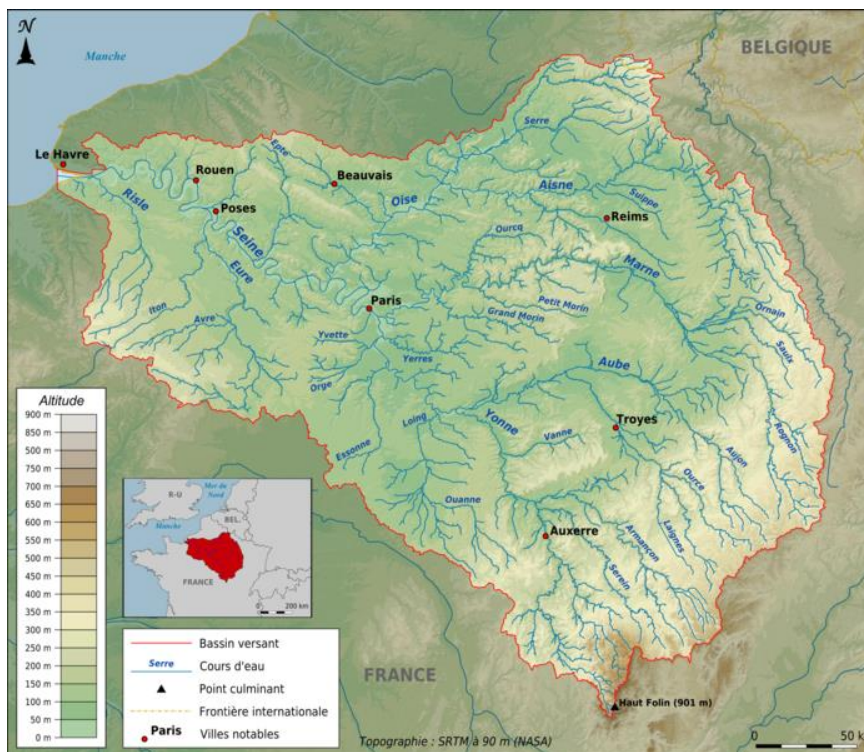
Notre système d'étude hydrologique

Le bassin versant

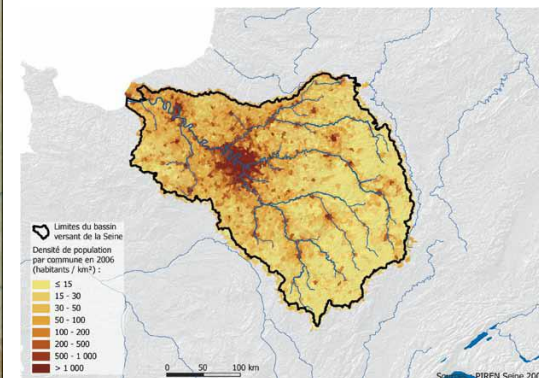
Bassin versant de la Seine (78 650 km²)



Lithologie



Population



- Un système fortement hétérogène, au fonctionnement complexe et aux enjeux variés

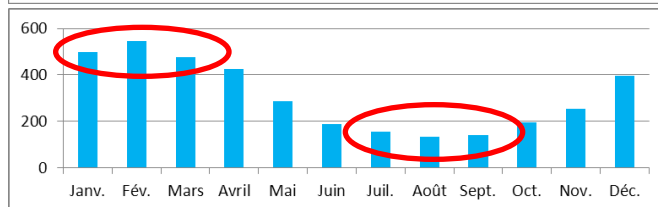
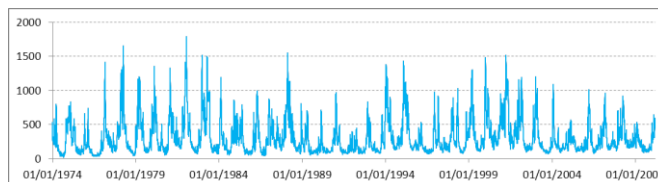
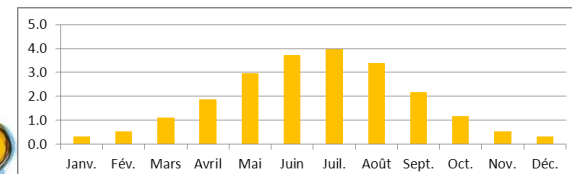
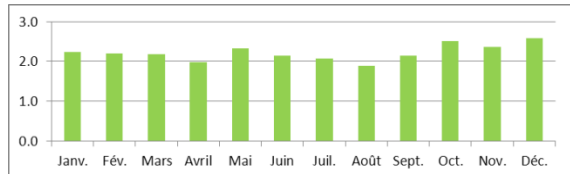
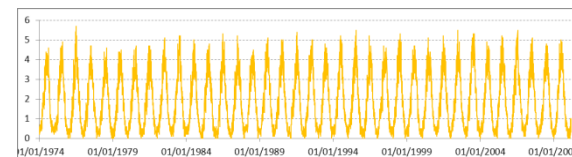
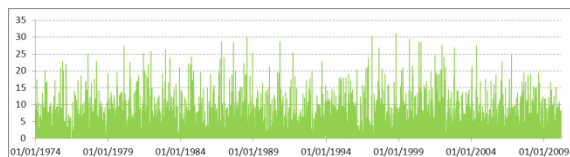
Notre système d'étude hydrologique

Le bassin versant

Précipitations

Energie

Débits



Période de hautes eaux
par ex. risque inondation

Période de basses eaux

par ex. disponibilité de la ressource

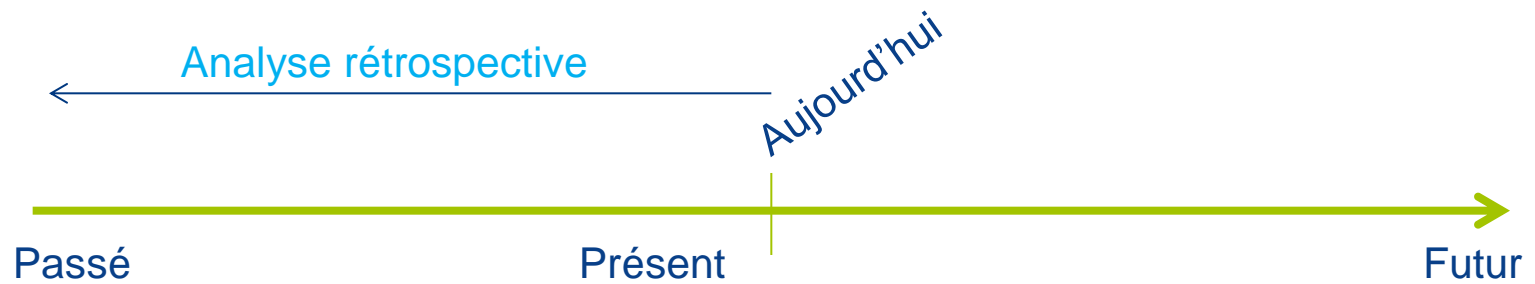


Etudes d'impact sur le changement climatique

Changement = variations au cours du temps

Echelle de temps = plusieurs décennies

Deux types d'études pour analyser les changements climatiques et leurs impacts :



Analyse des évolutions entre passé et présent :

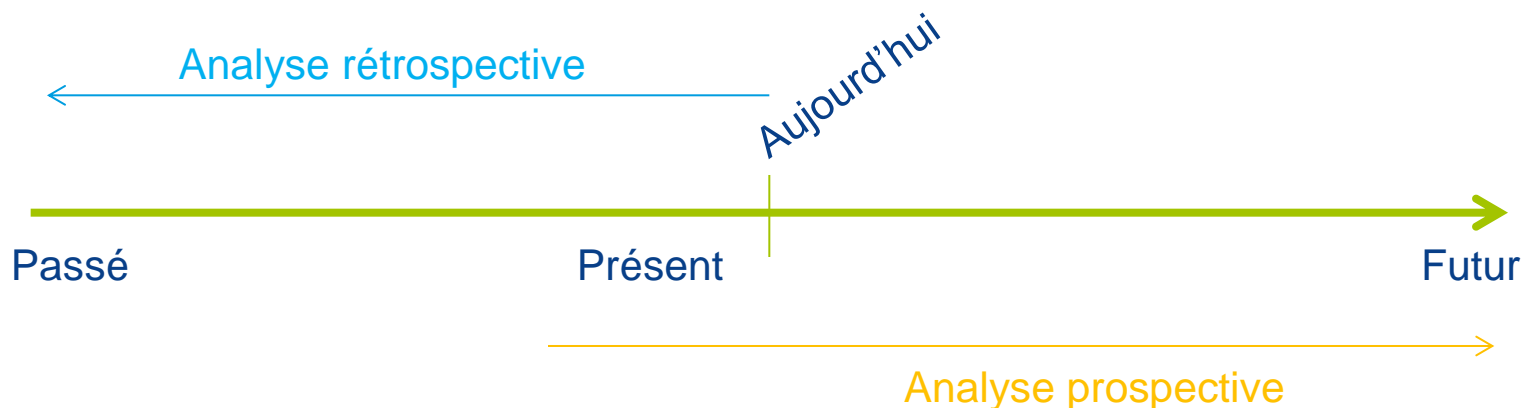
- utilisation d'observations
- détection des changements
- détermination des relations de cause à effet

Etudes d'impact sur le changement climatique

Changement = variations au cours du temps

Echelle de temps = plusieurs décennies

Deux types d'études pour analyser les changements climatiques et leurs impacts :



Analyse des évolutions entre présent et futur :

- pas d'observations disponibles en temps futur
- utilisation de simulations (projections) produites par outils de représentation du système réel (⇒ modèles)
- hypothèses faites sur les évolutions futures (⇒ scénarios)



Ce dont nous parlerons aujourd'hui

- Exemples de résultats d'analyses rétrospectives
- Trois exemples de résultats d'études prospectives
 - Impact des changements climatiques en France à l'horizon 2070
 - Impact des changements climatiques sur le bassin de la Durance
 - Adaptation de la gestion des lacs-réservoirs du bassin de la Seine en contexte de changement climatique

Exemples de résultats d'analyses rétrospectives

(Adapté de travaux de Benjamin Renard, Irstea)

Enjeux de l'étude des périodes passées

- Quelle est la variabilité « naturelle » des systèmes étudiés ?
 - Quantifier les caractéristiques des phénomènes passés, dans l'espace et le temps
- Quelles ont été les causes et conséquences de changements passés ?
 - Mieux comprendre la dynamique des systèmes et les moteurs de changement
- Les changements observés actuellement (ou pressentis dans le futur) sont-ils dans la gamme de la variabilité naturelle des systèmes ?
 - Evaluer la significativité des changements aux échelles considérées

Des conséquences déjà observables ?

⇒ augmentation de la température de surface de la Terre

⇒ augmentation du niveau moyen des océans

⇒ diminution de la couverture neigeuse

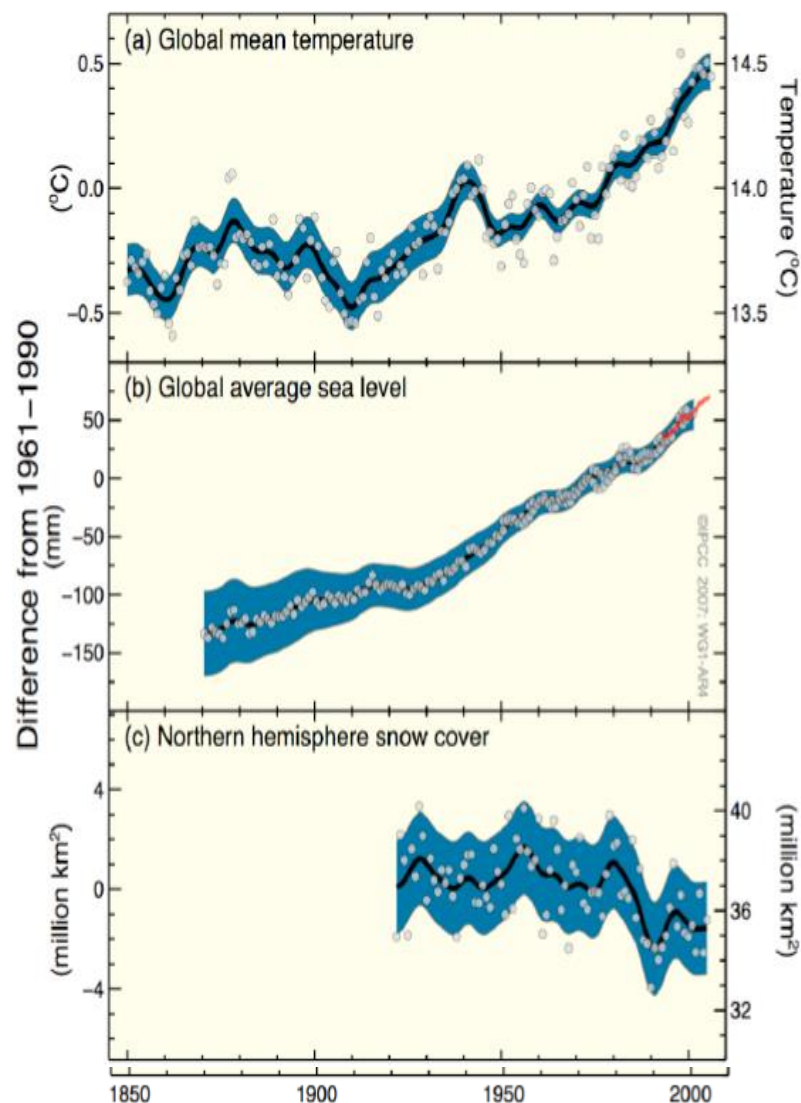
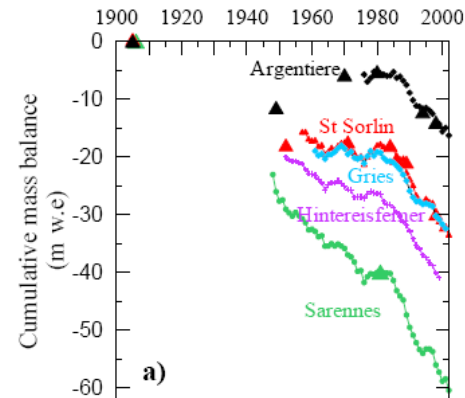


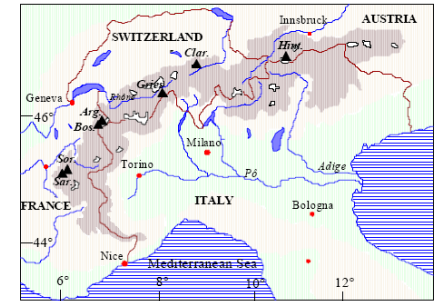
FIGURE SPM-3. Observed changes in (a) global average surface temperature; (b) global average sea level rise from tide gauge (blue) and satellite (red) data and (c) Northern Hemisphere snow cover for March-April. All changes are relative to corresponding averages for the period 1961-1990. Smoothed curves represent decadal averaged values while circles show yearly values. The shaded areas are the uncertainty intervals estimated from a comprehensive analysis of known uncertainties (a and b) and from the time series (c).

Des conséquences déjà observables ?

⇒ glaciers en régression



Le glacier d'Argentière perd 15 cm d'eau par an



<http://www-igge.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/images/bilan-climat.pdf>

Glacier d'Argentière vers 1850



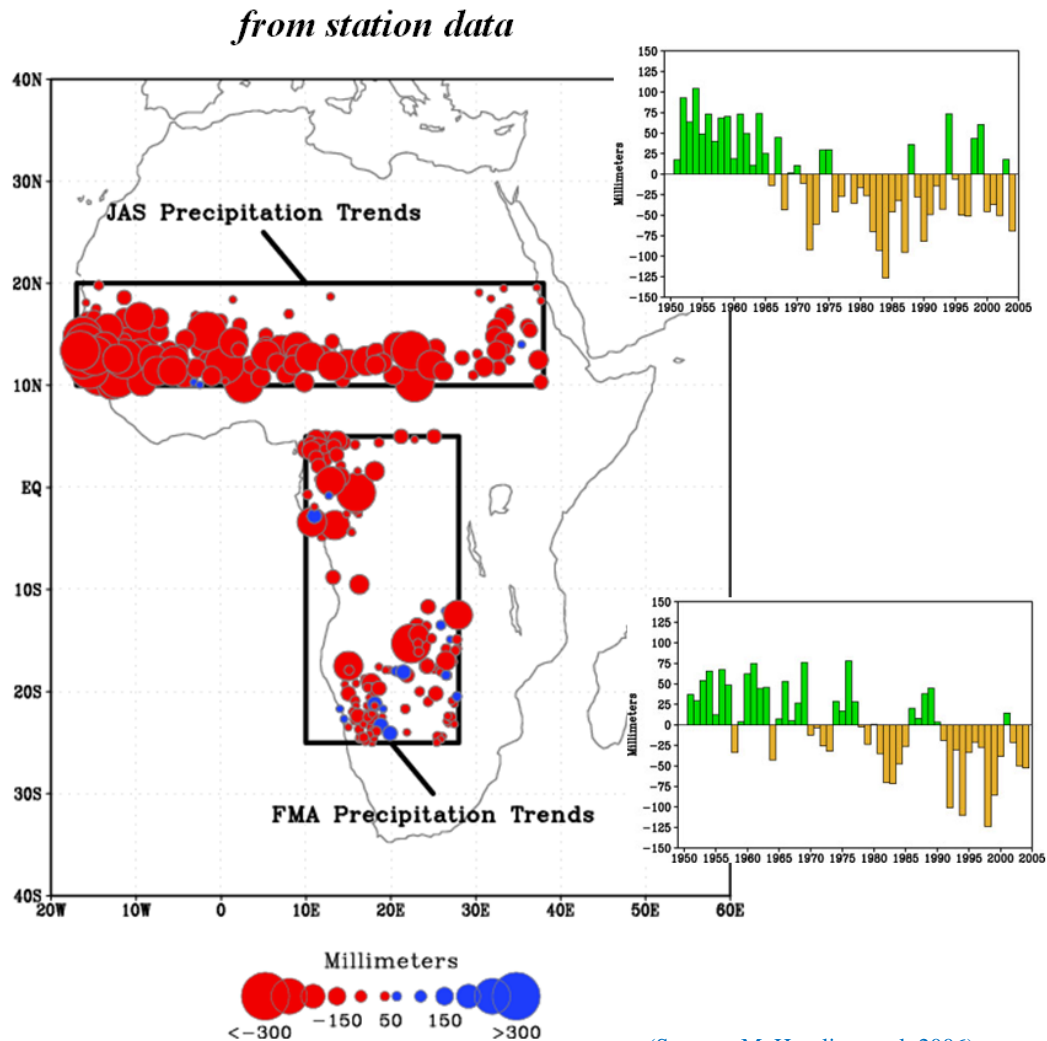
Glacier d'Argentière vers 1960



source: J. Guiscafre, « L'hydrologie urbaine »

Des conséquences déjà observables ?

⇒ Evolution des précipitations de la mousson africaine



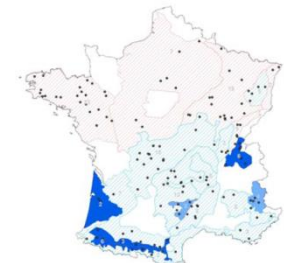
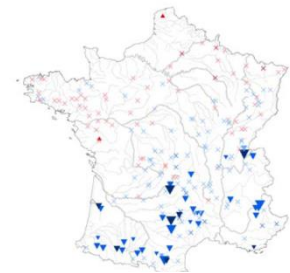
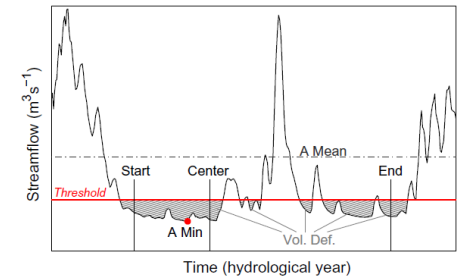
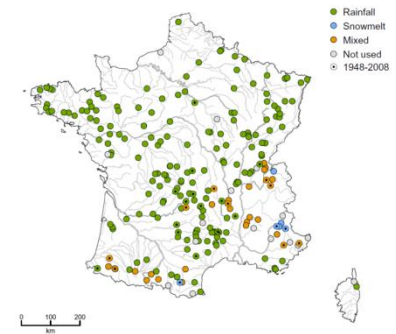
(Source : M. Hoerling et al. 2006)

Comment évaluer les changements passés ?

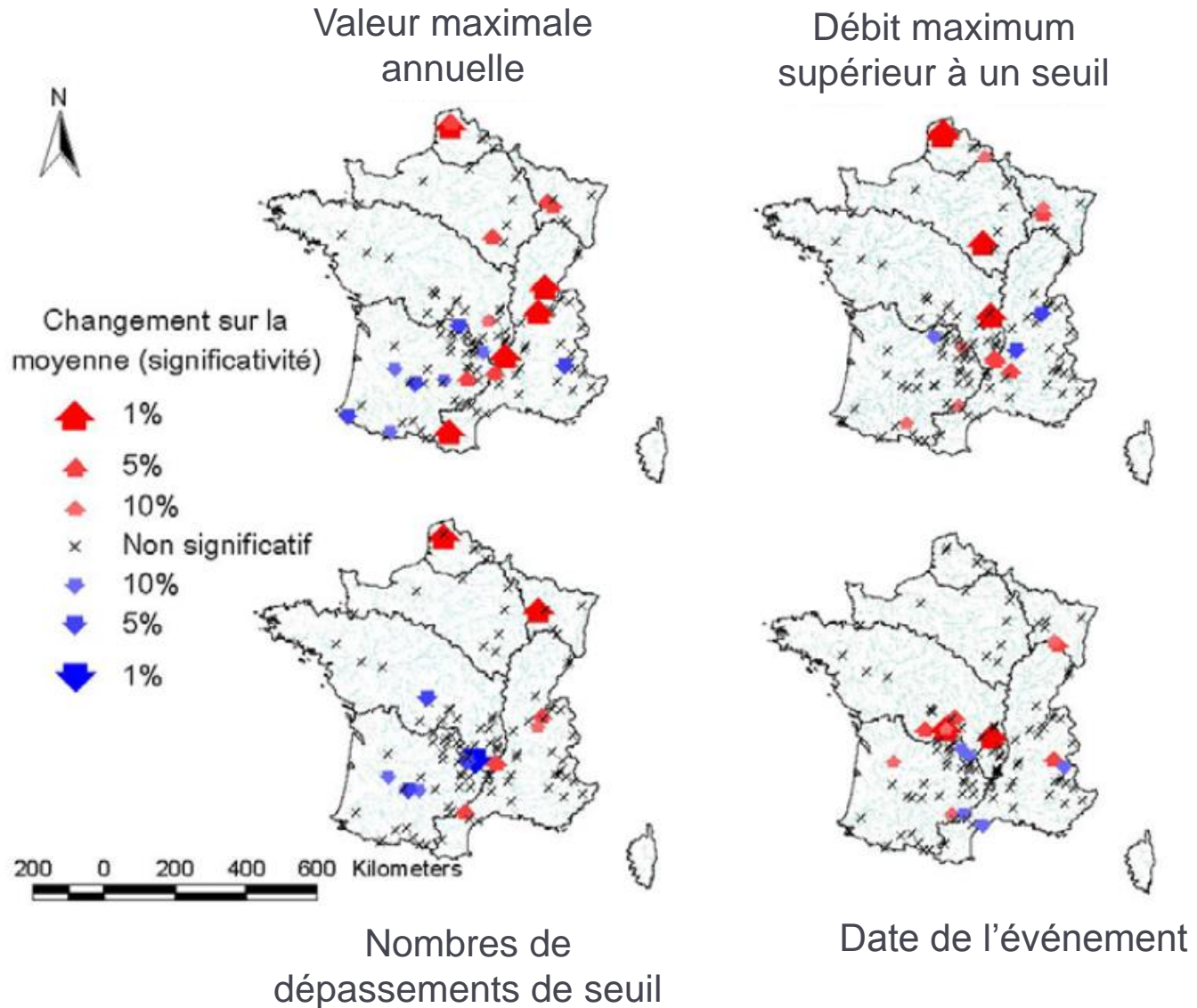
- Analyse de longues séries d'observations

- Extraction de variables décrivant les crues / la ressource/ les étiages / la fonte / etc.

- Détection de tendance et/ou de rupture dans les séries d'observations passées par application de tests statistiques dédiés :
 - À l'échelle locale
 - À l'échelle régionale

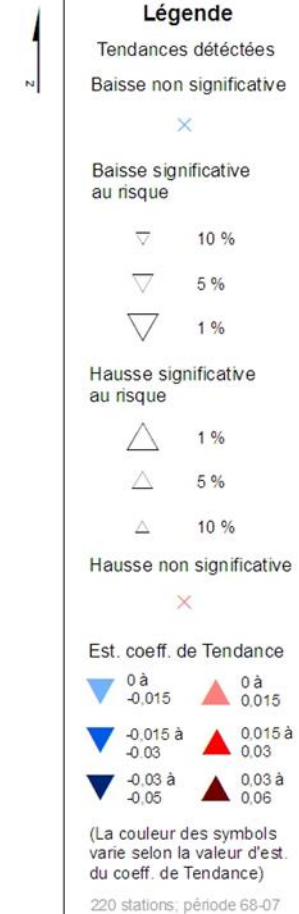
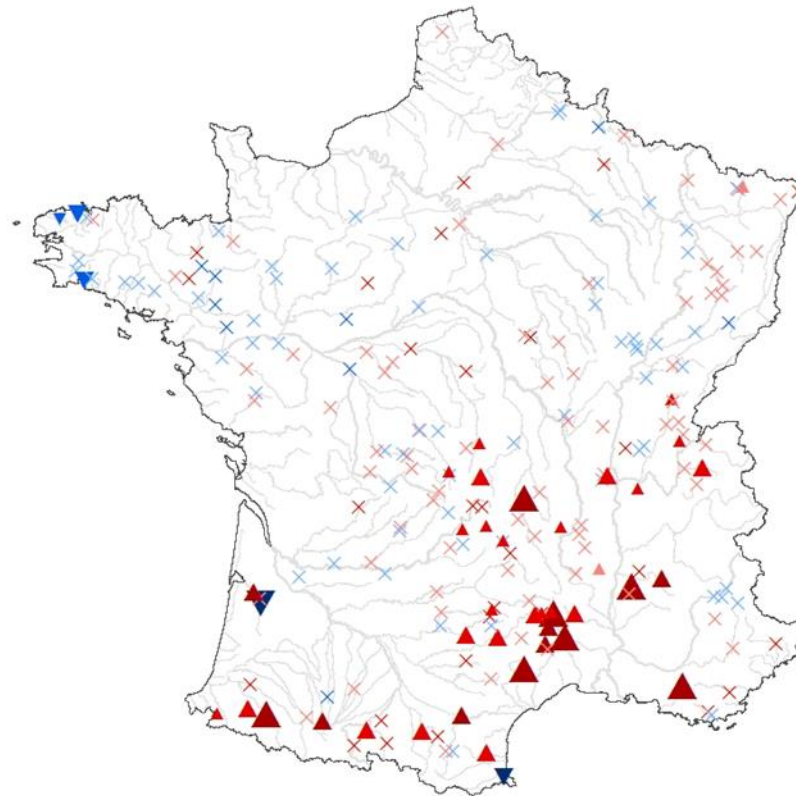


Exemple d'analyse sur les crues



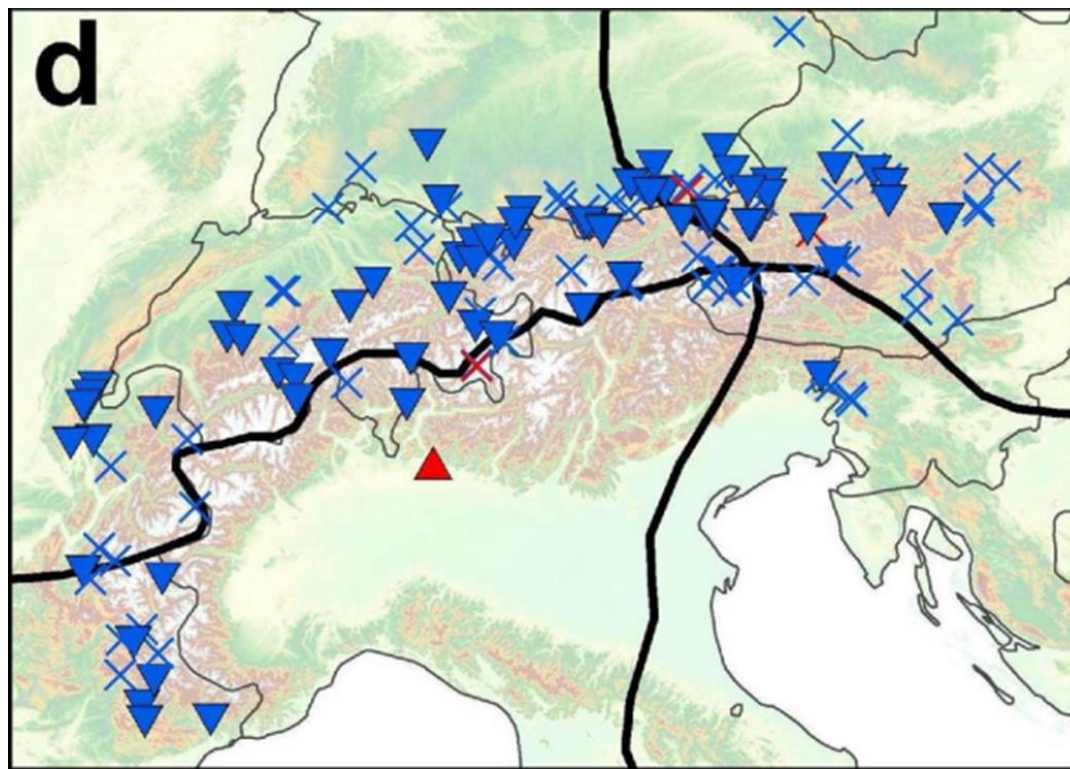
Exemple d'analyse sur les étiages

Durée d'étiage (1968-2008)



Exemple d'analyse sur les bassins influencés par la neige

Début des écoulements de fonte (1961-2005)





Perspectives

- Une tendance est descriptive
- Dépasser les analyses de tendance
- Comprendre le lien entre la variabilité temporelle de l'hydrologie et celle de variables explicatives climatiques (corrélations)
- Mais corrélations \neq causalité
- Attribuer une origine aux tendances mises en évidence
 - Mesure
 - Influences anthropiques
 - Changement climatique

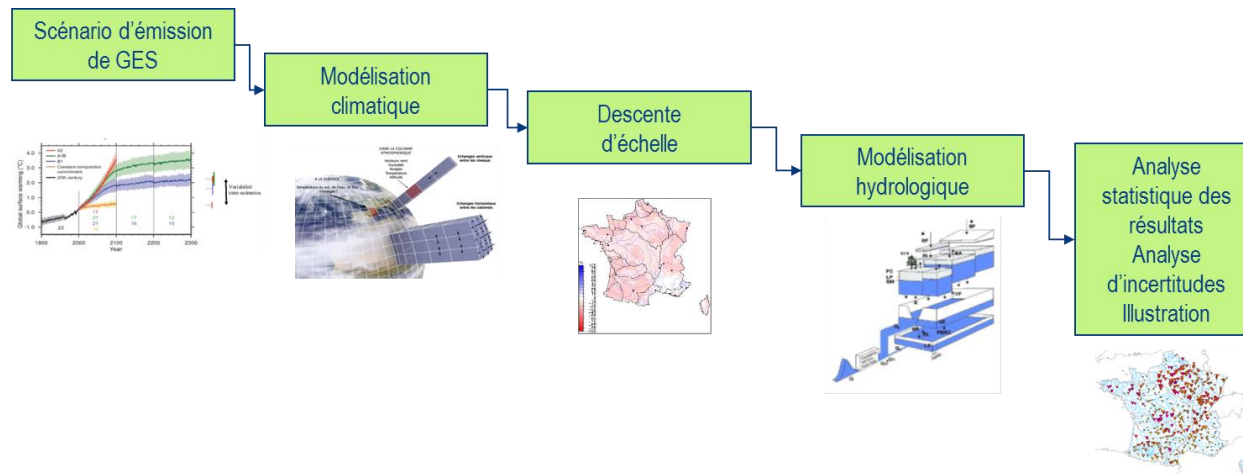
Méthodologie pour des analyses prospectives

Enjeux de l'étude des tendances futures

- Quelles vont être les évolutions des débits dans les rivières ?
 - Quantifier les changements futurs probables
- Quelles vont être les conséquences sur les activités humaines (ressource, risque) ?
 - Quantifier la vulnérabilité future au risque et confronter la ressource aux besoins
- Les évolutions estimées vont-elles nécessiter de définir des stratégies d'adaptation ?
 - Mettre au point des stratégies d'évolution des usages, de la demande, de la gestion ou d'aménagement à long terme

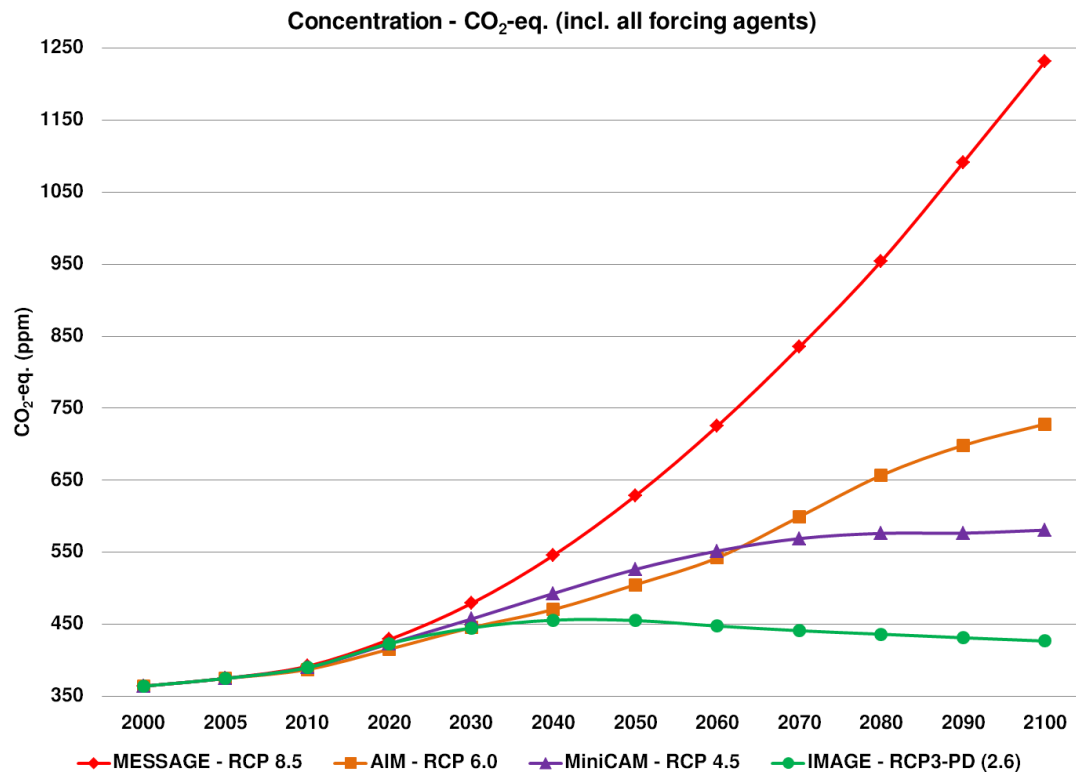
Une approche par modélisation

- Approche basée sur des outils de modélisation du climat et du cycle de l'eau
- Etapes principales des études d'impact :
 1. Définition de scénarios
 2. Modélisation du climat à large échelle
 3. Descente d'échelle
 4. Modélisation hydrologique
 5. Analyse des impacts



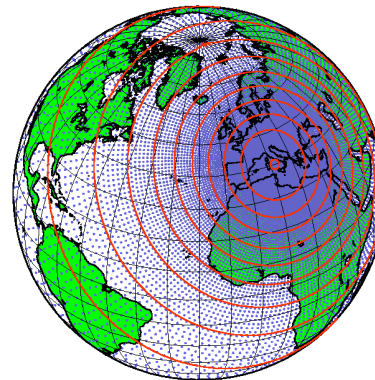
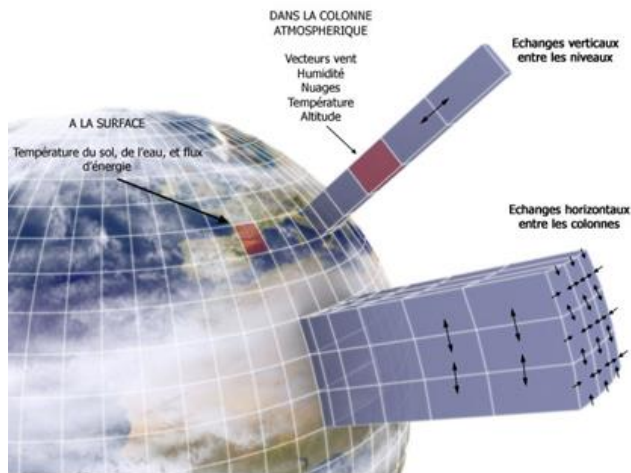
1. Scénarios futurs

- Etablissement de scénarios socio-économiques, fonction des évolutions démographiques, sociales, économiques, technologiques et environnementales

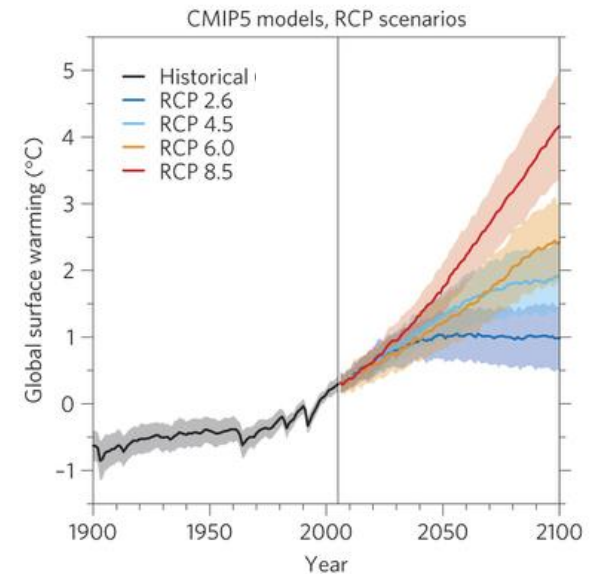


2. Modélisation du climat

- Modèles de circulation générale
 - Modélisation complète de l'atmosphère et de l'océan (transferts de masse et d'énergie) + interfaces continentales + cycle du carbone
 - Résolution de l'ordre de quelques centaines de kilomètres (éventuellement variables)



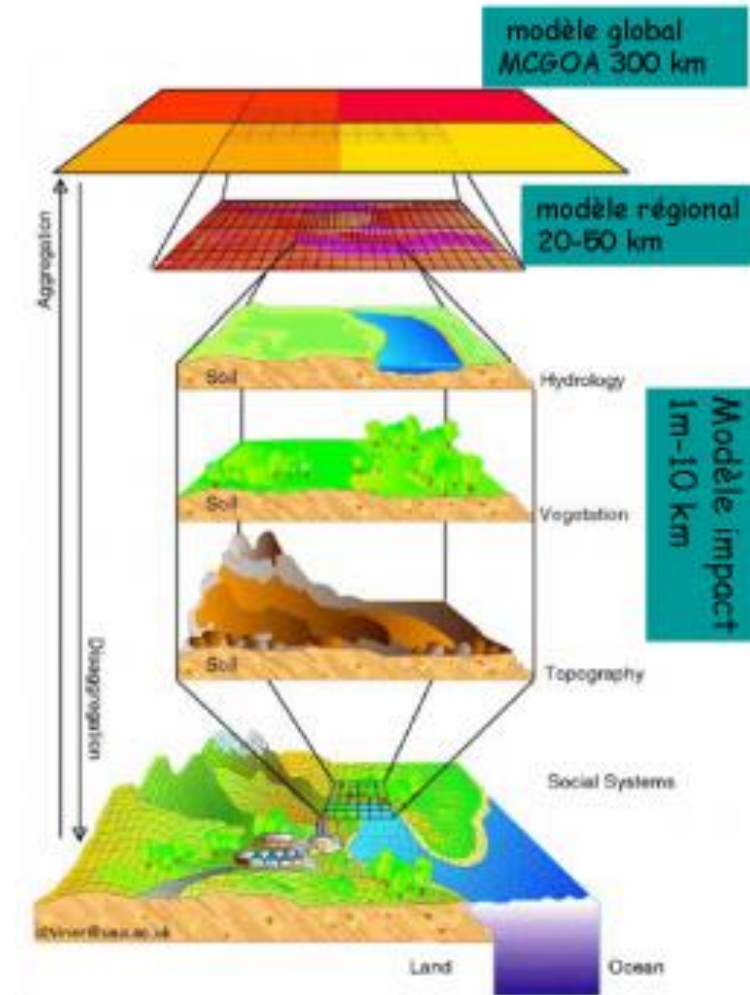
Points de grille ARPEGE climat maillage étirée pôle Méditerranée



(Reto Knutti & Jan Sedláček, 2013)

3. Descente d'échelle

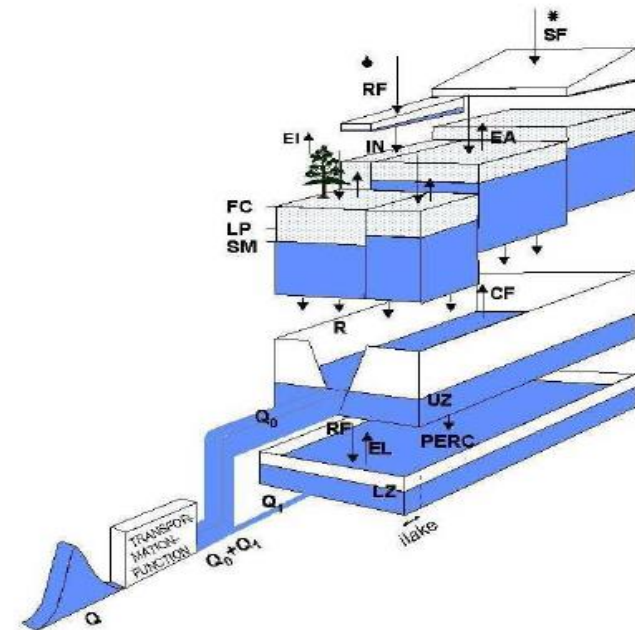
- Maille des modèles climatiques généralement trop large pour des applications hydrologiques
- Nécessité d'appliquer des méthodes de descente d'échelle (statistiques ou dynamiques)



(Source Climate Research Unit, University of East Anglia)

4-5. Modélisation hydrologique des bassins versants et traitement statistique

- Représentations simplifiées du bassin versant, permettant de simuler la réponse hydrologique aux variables climatiques (précipitation, température)
- Processus hydrologiques conditionnés par les simulations du climat
- Evolutions quantifiées par différence entre simulations en temps présent et simulations en temps futur
- Calcul des incertitudes et évaluation de la significativité des tendances



Exemple n°1

Impact des changements climatiques en France à l'horizon 2070

(Résultats du projet Explore 2070)

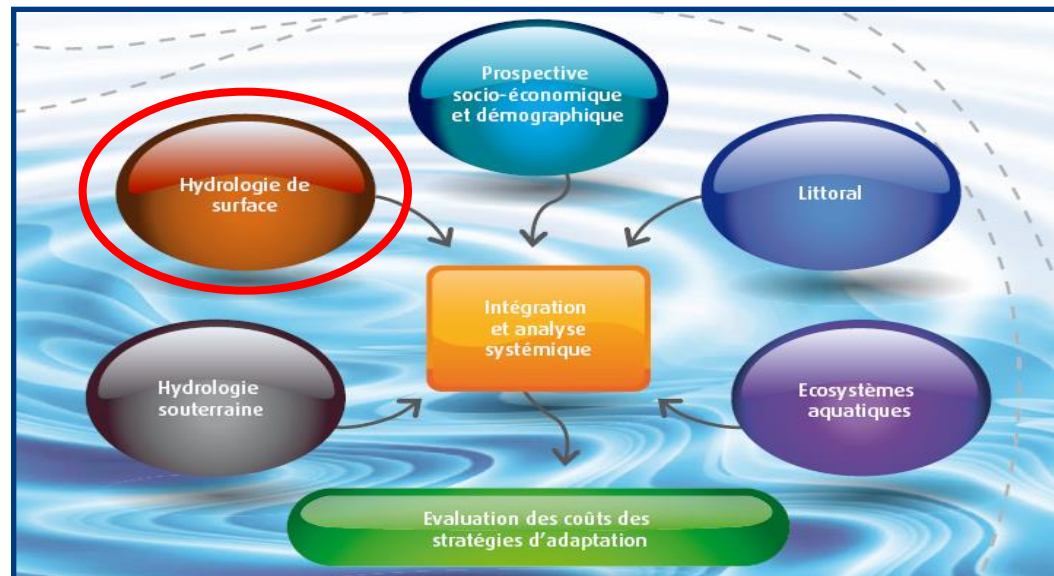
Le projet Explore2070



- Projet piloté par le Ministère de l'Ecologie (2010-2012)

- Objectif :

Analyse globale et transversale des impacts des changements climatiques à l'horizon 2070 pour élaborer puis évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique dans le domaine de l'eau





Chaine de modélisation adoptée

1 scénario : A1B

X

7 GCM

X

1 méthode

X

2 modèles

- Isba-Modcou
- GR4J

14 projections

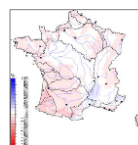
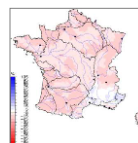
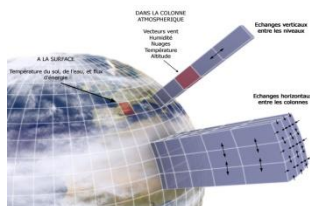
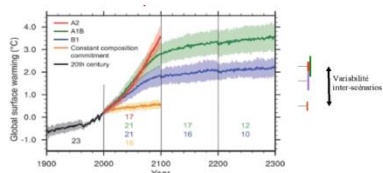
Choix de Scénario d'émission de GES

Modélisation climatique (GCM)

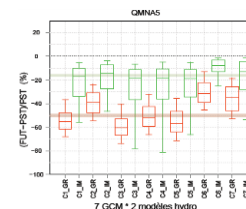
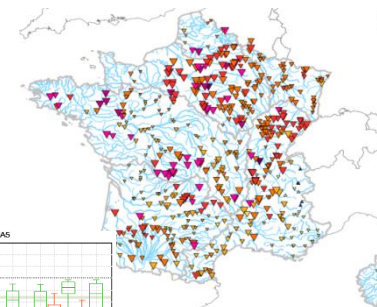
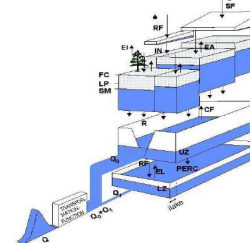
Descente d'échelle (par ex. RCM)

Modélisation hydrologique

Analyse statistique des résultats
Analyse d'incertitudes
Illustration



...



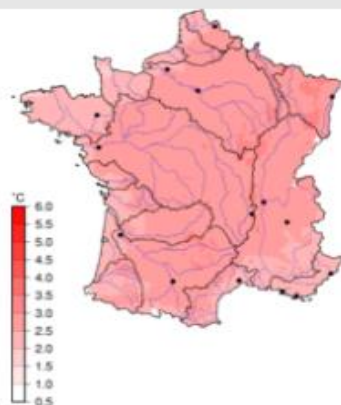
Evolutions climatiques



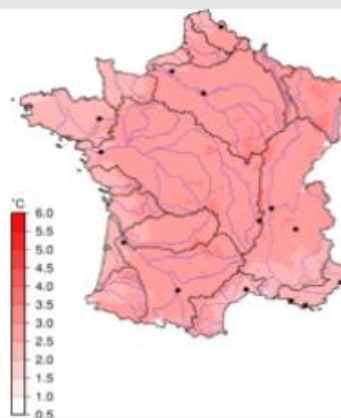
Écarts de température moyennes en été : futur (2046-2065)-référence (1961-1990)

ETE

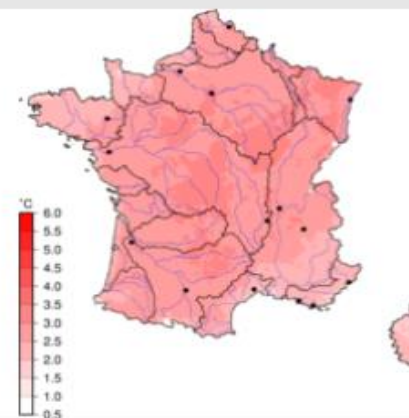
CCCMA-CGCM3



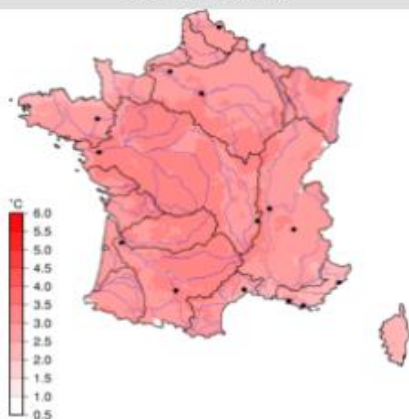
ECHAM5-MPI



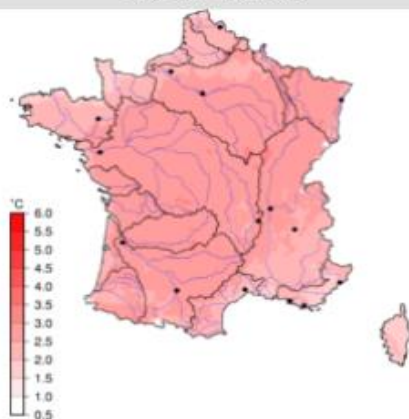
AIB-ARPV3



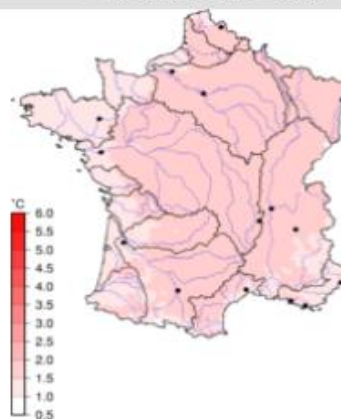
GFDL-CM2.0



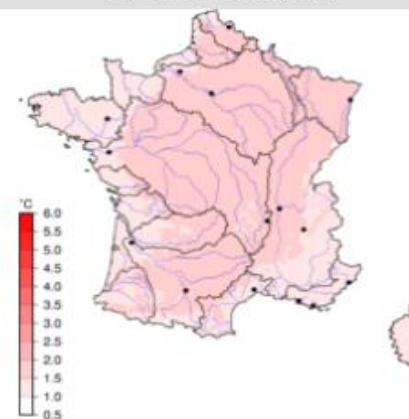
GFDL-CM2.1



GISS-MODEL-ER



MRI-CGCM2.3.2



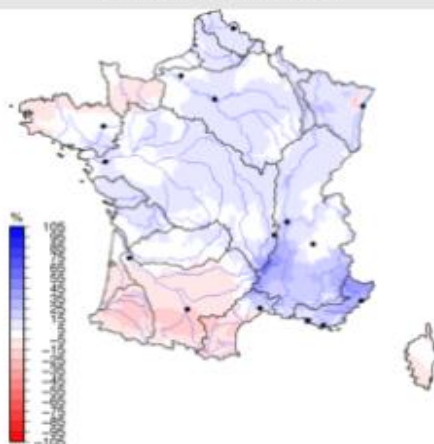
Evolutions climatiques



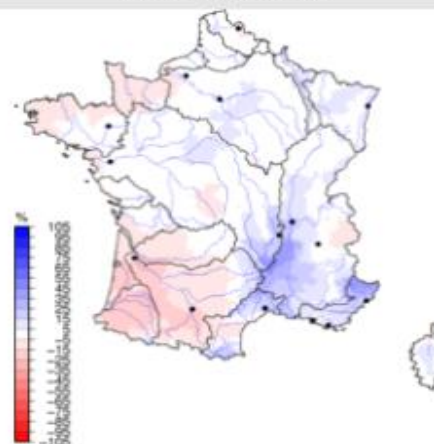
Rapports de cumuls de précipitations hiver
[futur (2046-2065)-référence]/référence (1961-1990)

HIVER

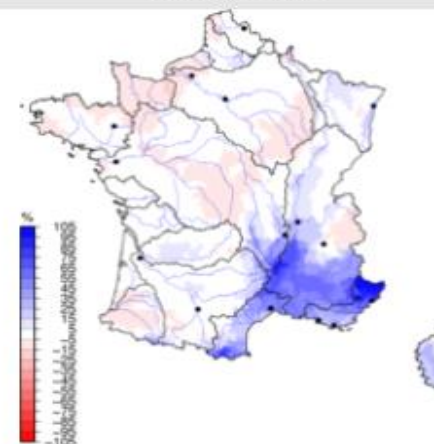
CCMA-CGCM3



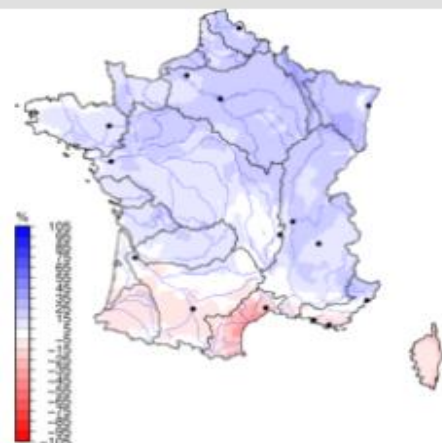
ECHAM5-MPI



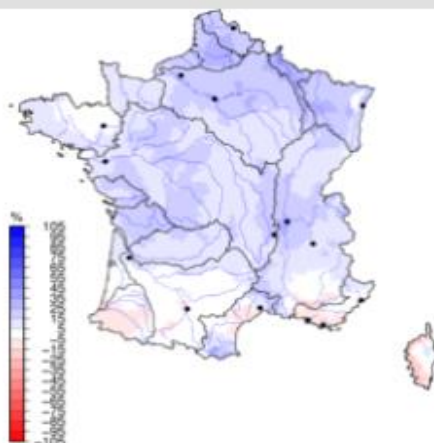
AIB-ARPV3



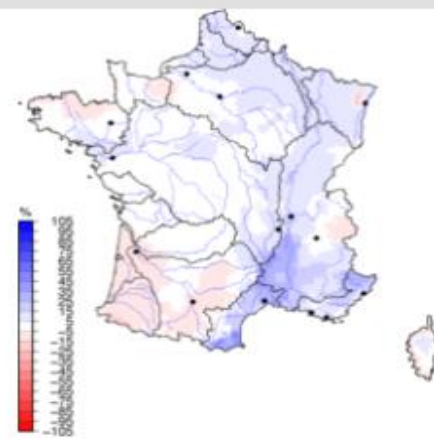
GFDL-CM2.0



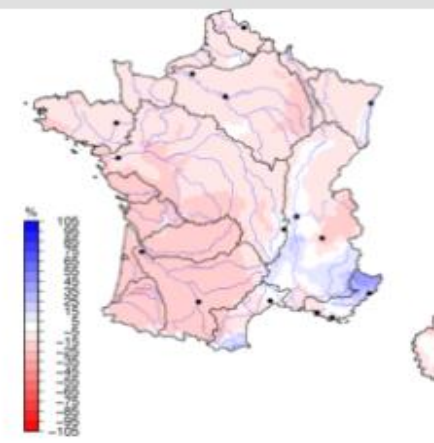
GFDL-CM2.1



GISS-MODEL-ER



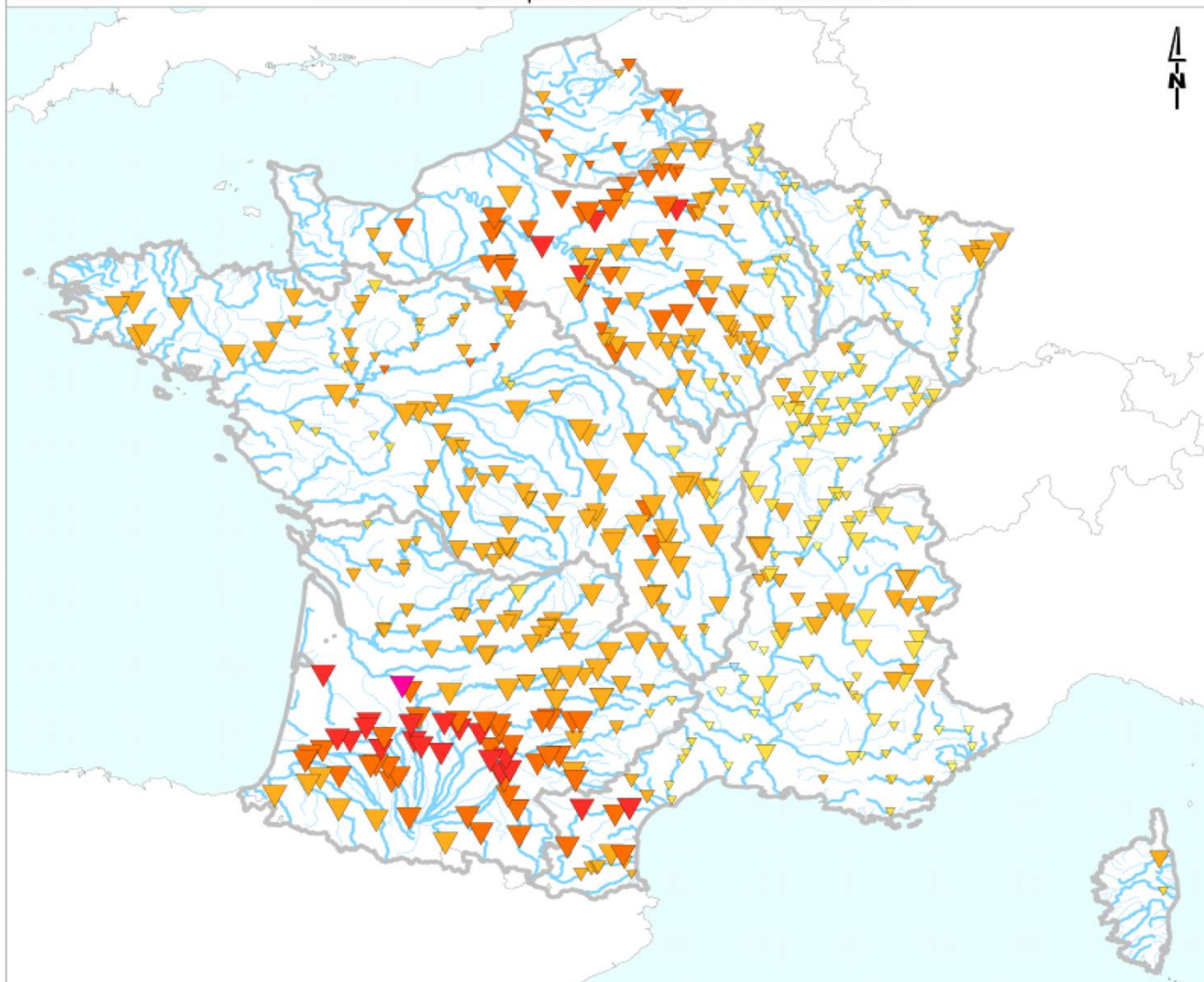
MRI-CGCM2.3.2



Evolution du débit moyen annuel



Module : Evolution possible entre 1961-90 et 2046-65



Module
Moyenne des 14 résultats

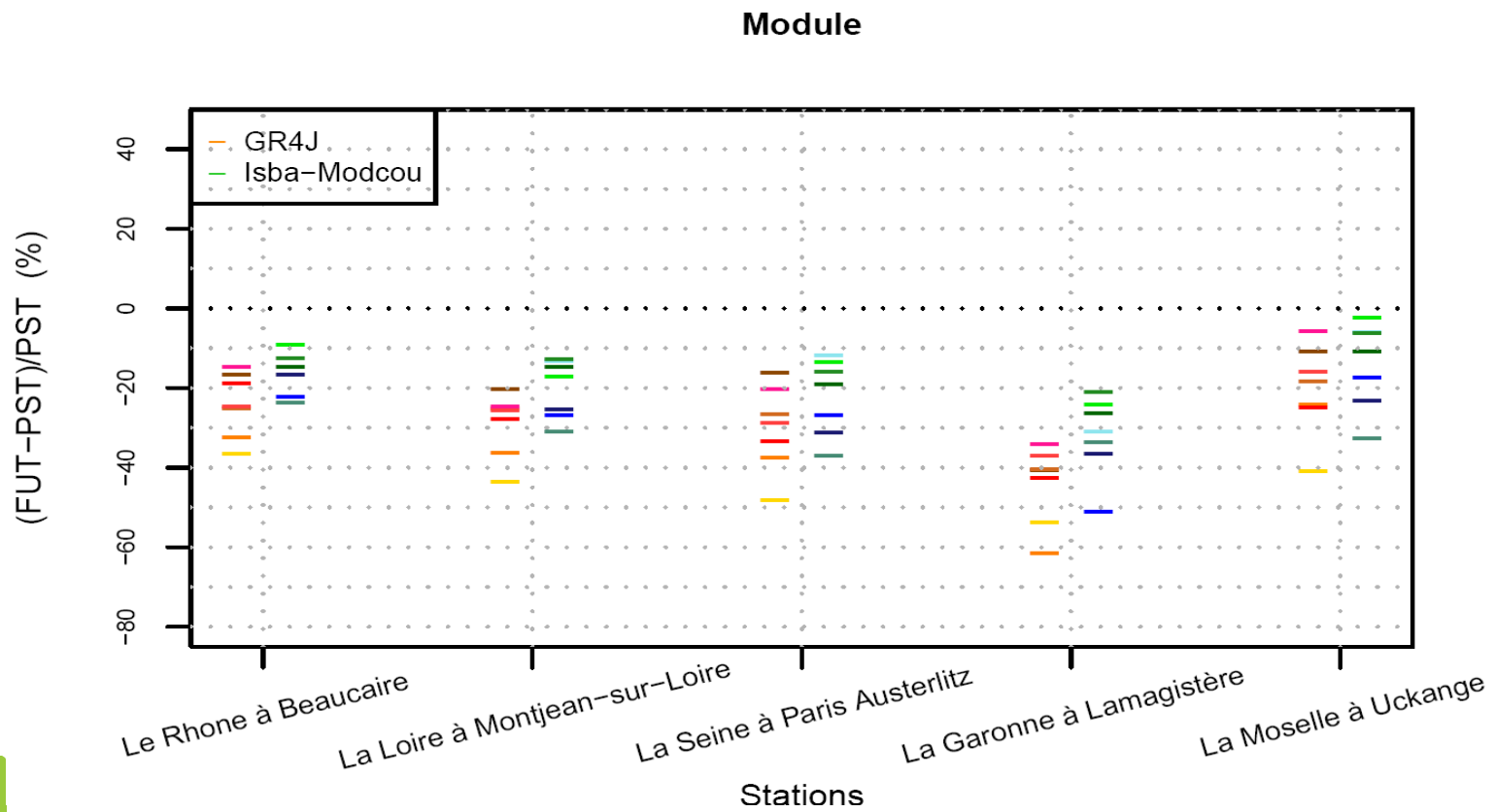


Indice de significativité :
taille inversement proportionnelle
à l'écart-type des 14 résultats



Evolution du débit moyen annuel

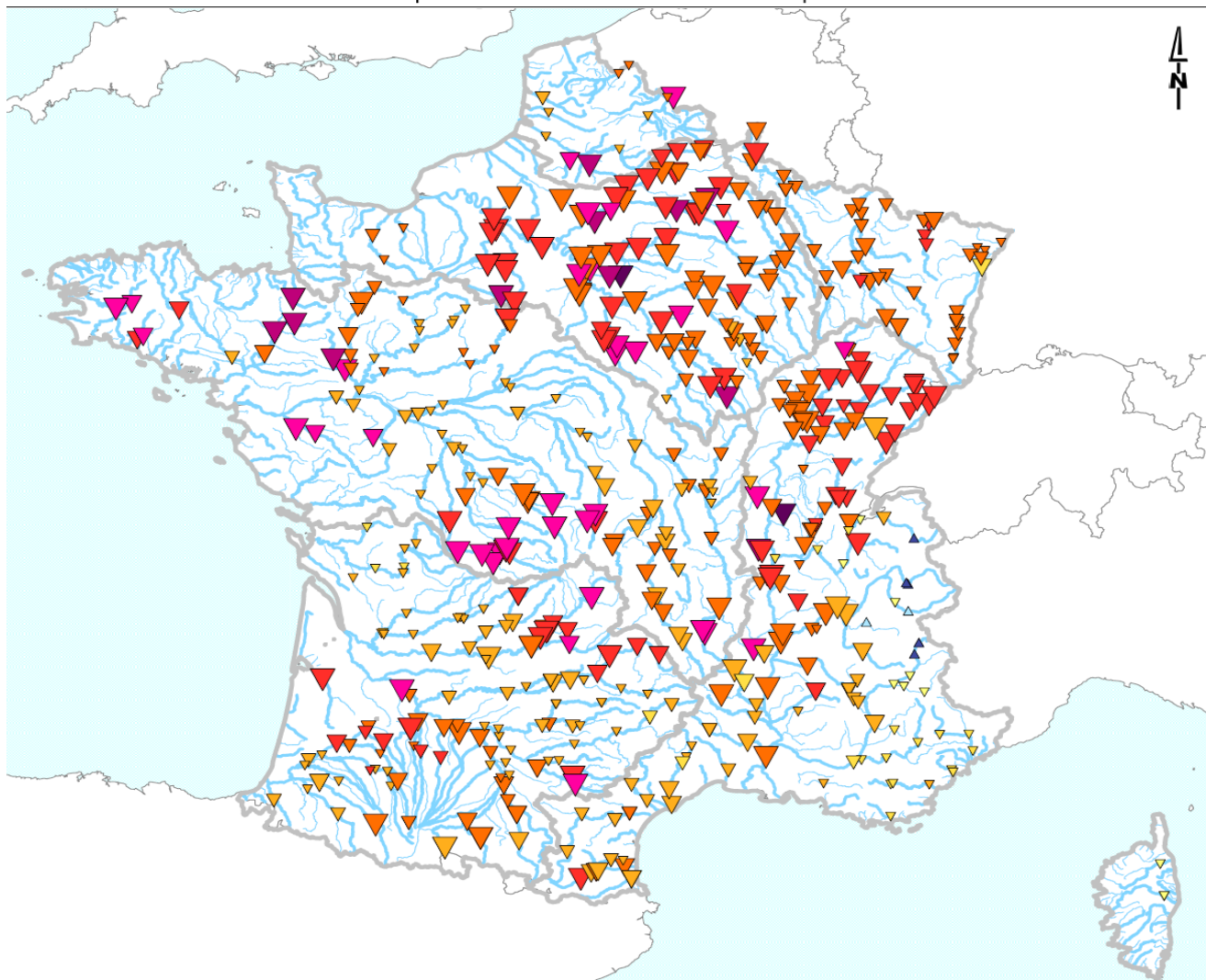
Aperçu des résultats pour cinq grands bassins



Evolution des étiages



Débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans : Evolution possible entre 1961-90 et 2046-65



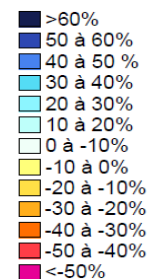
Evolution des crues



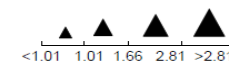
Débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans : Evolution possible entre 1961-90 et 2046-65



Qjxa10
Moyenne des 14 résultats



Indice de significativité :
taille inversement proportionnelle
à l'écart-type des 14 résultats
(moyenne/écart-type)





Conclusion

- Des baisses importants sur les débits moyens
- Des baisses plus marquées sur les étiages
- Des tendances incertaines et variables sur les crues
- Des disparités régionales
- Des conséquences prévisibles fortes en termes d'usages de l'eau à l'échelle du territoire

Exemple n°2

Impact des changements climatiques sur le bassin de la Durance

(Résultats du projet R²D² 2050)

(Source : Eric Sauquet, Irstea (coord.))



Le projet R²D² 2050

- Financé par le Ministère de l'écologie et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse
- Objectif :
Analyse de l'impact hydrologique et socio-économique du changement climatique et l'effet de stratégies d'adaptation dans le bassin de la Durance à l'horizon 2050

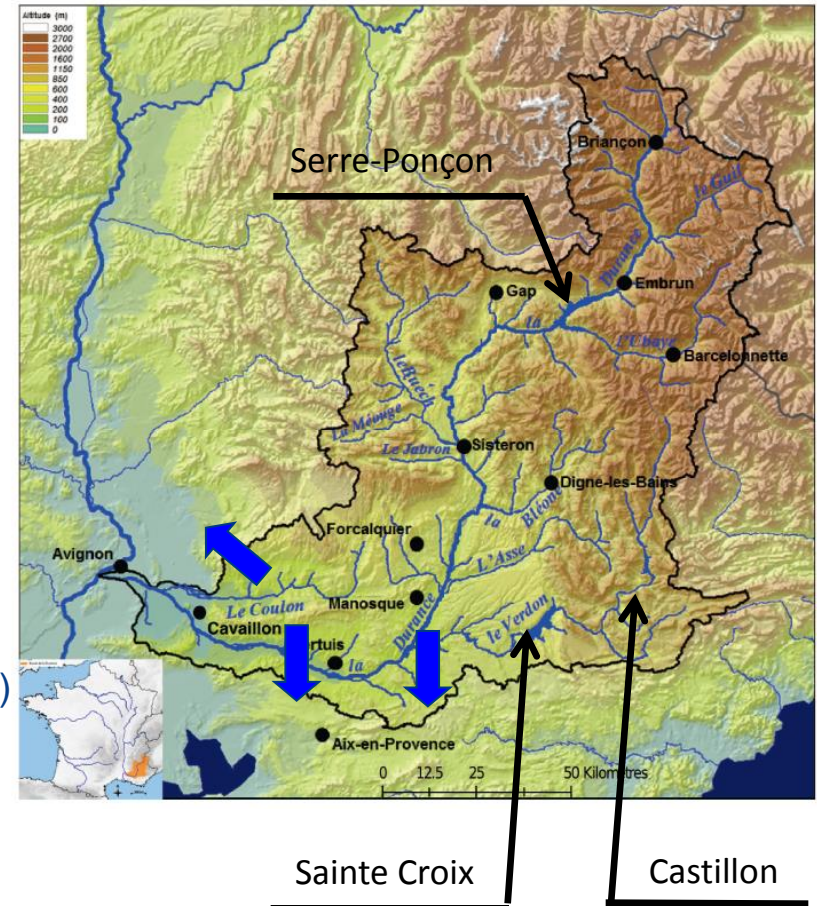


Site : <https://r2d2-2050.cemagref.fr/>



Le secteur d'étude

- Un grand bassin de montagne (14 000 km²) soumis à des influences climatiques contrastées
- Un bassin fortement anthropisé depuis le XIIe siècle (canal St-Julien)
- Une ressource très sollicitée par différents usages, à l'intérieur du bassin et à l'extérieur via des transferts
- Une gestion dynamique optimisée de la ressource grâce à de grands ouvrages hydrauliques, avec un contexte multi-usages (énergie, irrigation, AEP, tourisme sur les retenue)

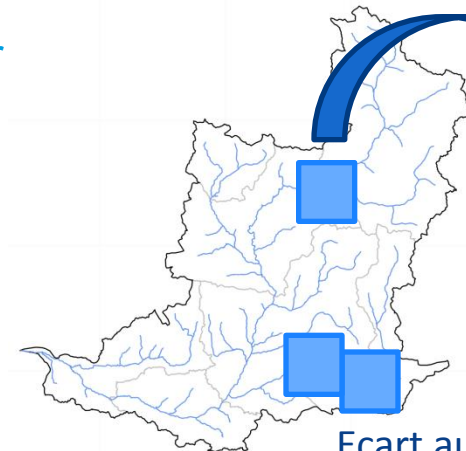




Evolution climat et hydrologie

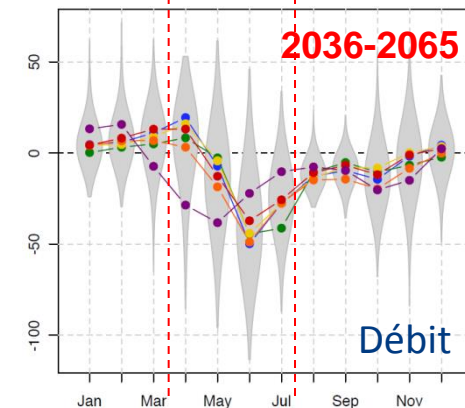
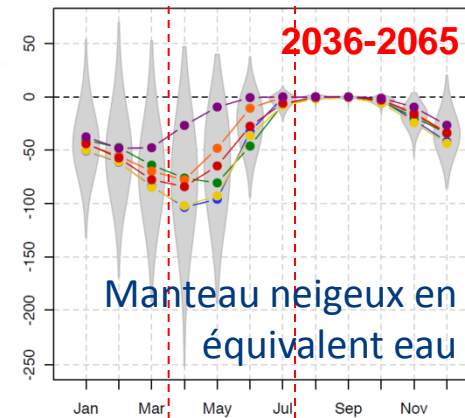
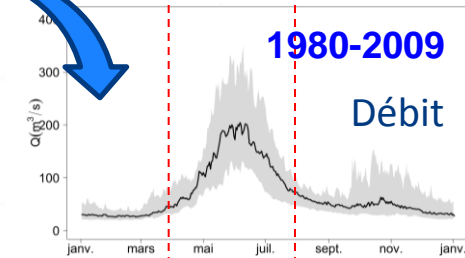
La Durance @ Serre-Ponçon

- Augmentation de l'ordre de 1.5°C sur l'ensemble du bassin, plus importante en été qu'en hiver
- Evolution incertaine des précipitations
- Modifications de la constitution du stock de neige et de sa fonte
- Changements de débits les plus importants pendant le printemps (saison de fonte actuelle)
- Réduction des débits d'étiage estivaux, de l'ordre de $-20\text{ m}^3/\text{s}$ sur le débit moyen d'août à Cadarache
- Evolution incertaine des crues, mais une dynamique vraisemblablement modifiée sur les bassins à dominante nivale



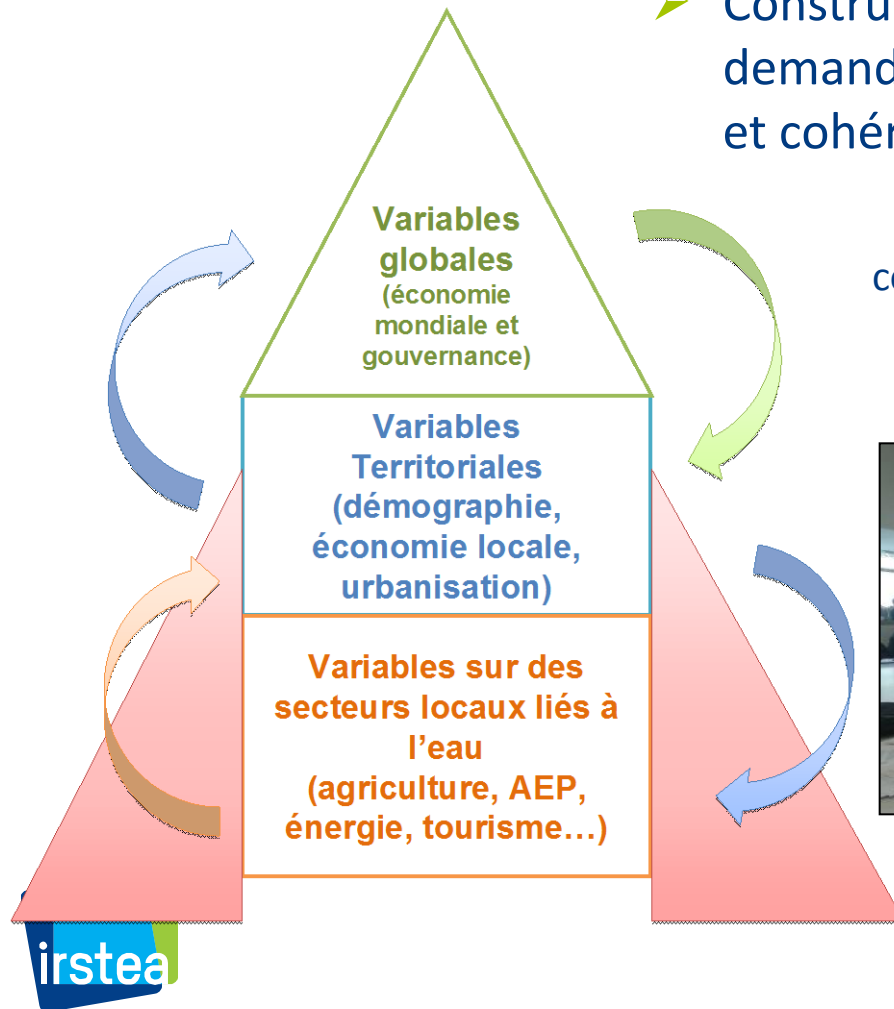
Ecart au temps présent

Période de fonte



Des interactions avec les acteurs pour préparer l'adaptation

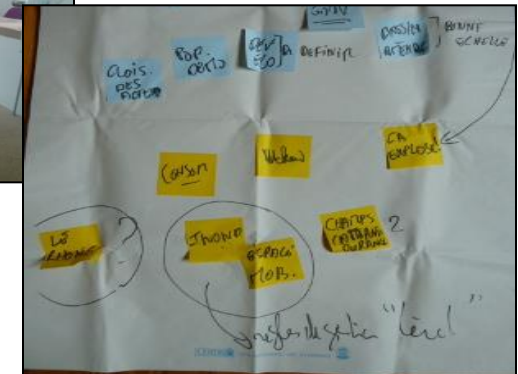
- Construire des scénarios d'évolution de la demande en eau intégrant « tendance, contraste et cohérence »



Analyse des facteurs conditionnant les tendances récentes



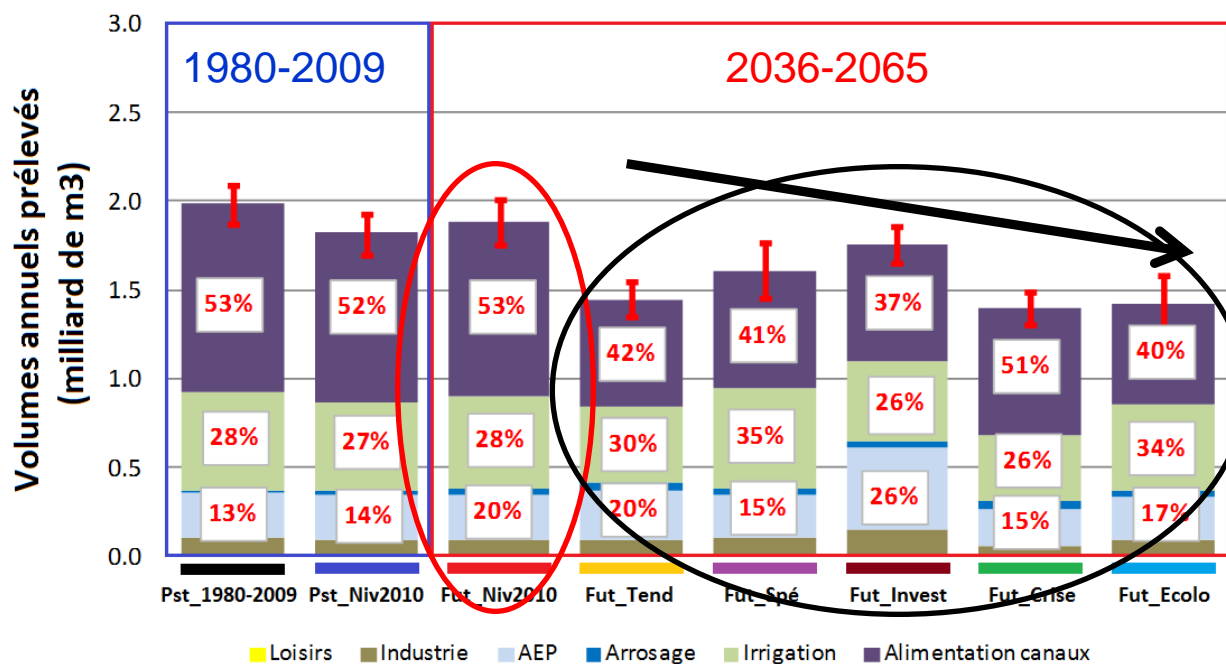
Groupes Techniques Locaux « *Imaginer et quantifier le futur du bassin Durance-Verdon pour s'adapter collectivement* » (octobre 2012)



Scénarios retenus

	Tendanciel	« Dérive des continents »	« Investissement & divertissement »	« C'est la crise »	« Ecolo »
Scénarios globaux et territoriaux	Tendances : héliotropisme, économie résidentielle, Littoral	Renforcement des hétérogénéités Indépendance régionale	Politique de développement maximal Explosion démographique et périurbaine	Crise économique Diminution de la population	Politique de maîtrise du territoire Densification
Scénarios sectoriels	Évolution tendancielle de chacun des secteurs	Littoral riche, touristique Agriculture spécialisée en Durance	Relance de l'industrie Territoire du divertissement Agriculture en déclin	Diminution du tourisme international et national Agriculture ?	Agriculture durable, efficacité énergétique

Evolution des prélèvements



Un territoire
« figé » au
niveau de
2010

Des scénarios intégrant
la poursuite de la
politique d'économie
d'eau

Principales conclusions

- Diminution de la demande globale en eau à l'échelle du territoire, cette demande étant **fortement conditionnée** par les scénarios territoriaux élaborés ici
- Satisfaction des **demandes** en eau en aval des ouvrages considérées comme **prioritaires**, au détriment de la production d'énergie en hiver (flexibilité moindre de l'hydro-électricité en période de pointe) et du maintien de cotes touristiques en été
- Diminution de la production d'énergie due notamment à la réduction des apports en amont des ouvrages hydroélectriques
- Diminution de la capacité à satisfaire les différents usages, sur la Durance comme sur le Verdon
- Des tendances fortes qui doivent permettre de mettre en œuvre des mesures sans regret dès maintenant
- **Des résultats obtenus avec les modalités de gestion actuelle**

Exemple n°3

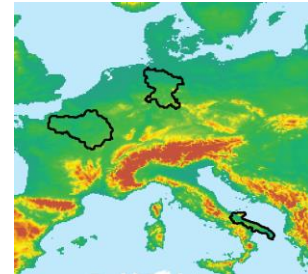
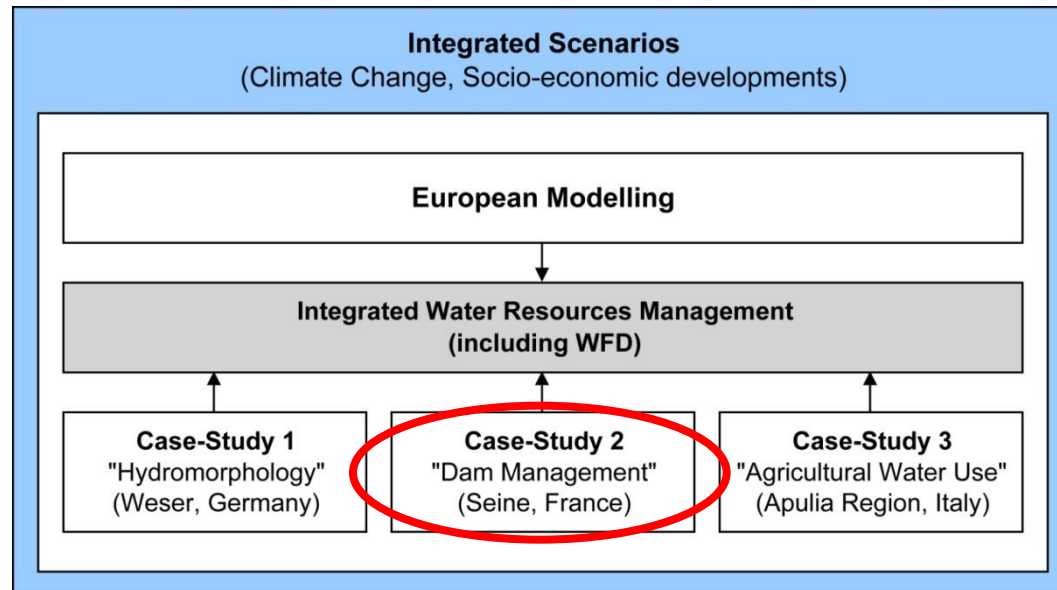
Adaptation de la gestion des lacs-réservoirs du bassin de la Seine en contexte de changement climatique

(Résultats du projet Climaware)

(Source : David Dorchies, Irstea)

Le projet Climaware

- Projet européen piloté par l'Université de Kassel (Allemagne)
- Objectifs :
Définir des stratégies d'adaptation pour différents cas d'usage de l'eau
Evaluer leur transposabilité à l'échelle européenne



Le projet Climaware

Le cas d'étude Seine :

➤ Contexte

- Quatre grands lacs-réservoirs (~800 Mm³) gérés pour le soutien d'étiage et l'écroulement de crue
- Très forts enjeux socio-économiques sur le bassin, en particulier en Ile-de-France



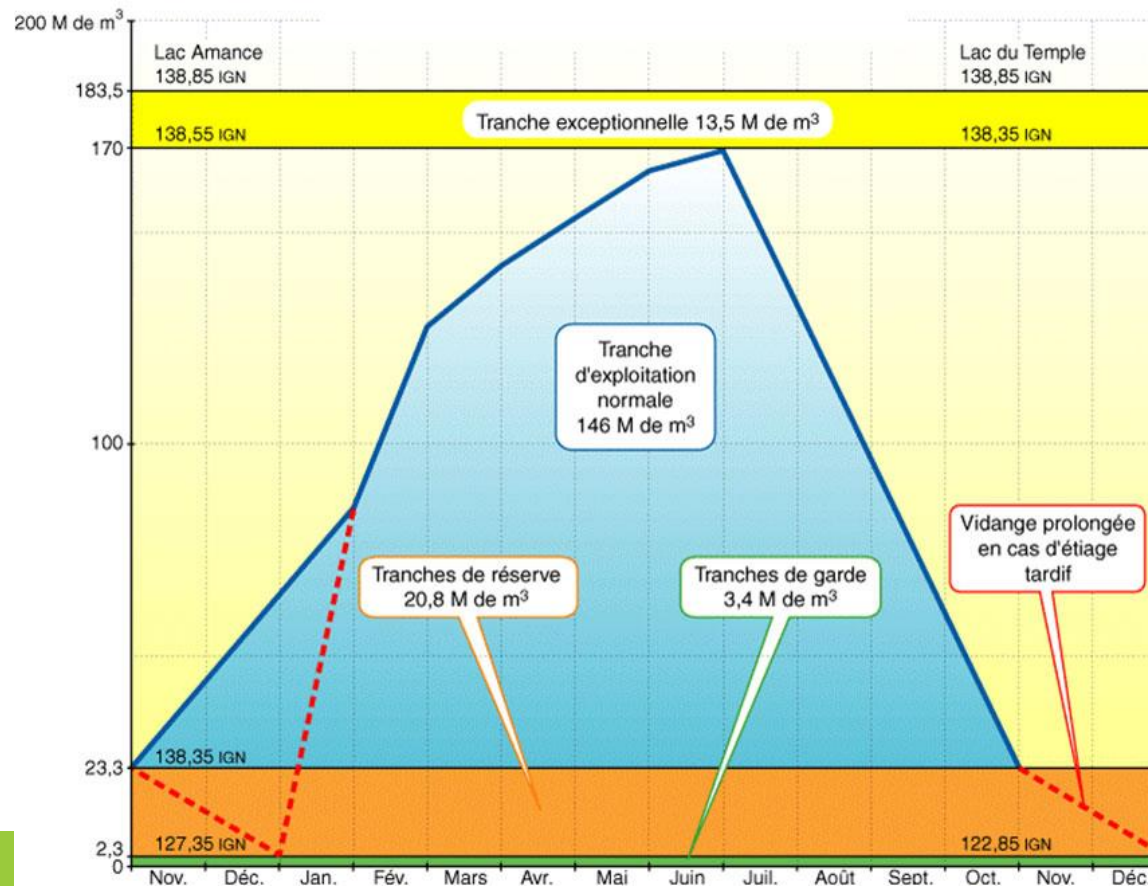
Crue de 1910



Etiage de 1943

Cas d'étude Seine

➤ La gestion des ouvrages

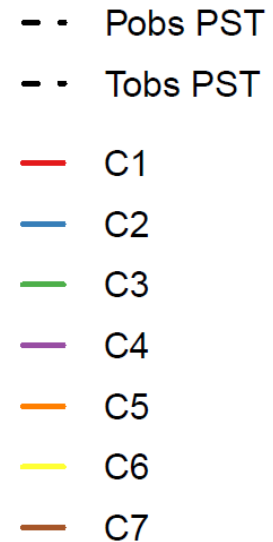
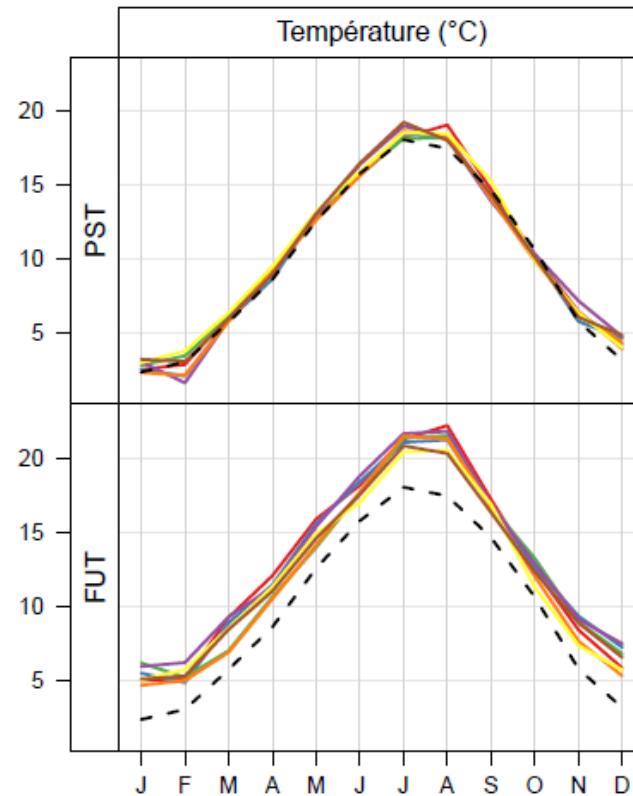
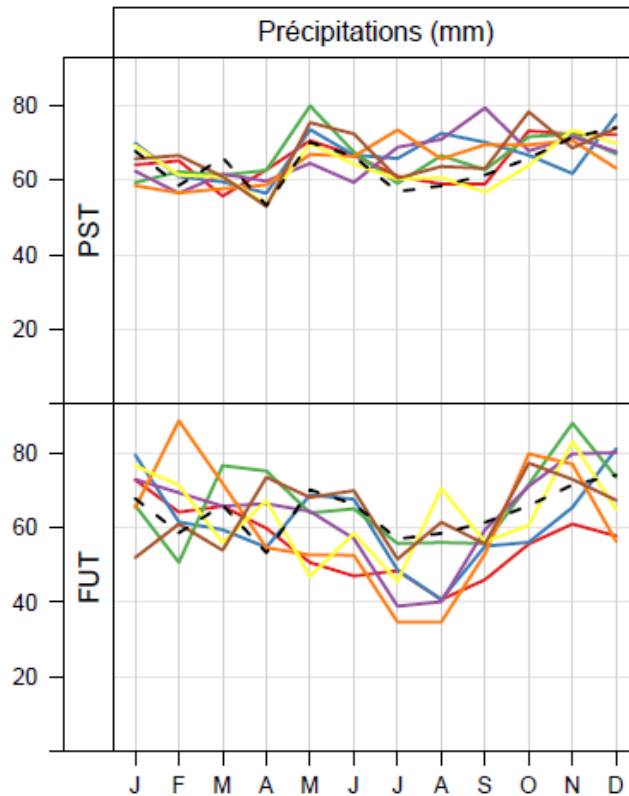


Questions clé :

- Les règles de gestion actuelles sont-elles pérennes en climat futur ?
- Quelles sont les stratégies d'adaptation possible de cette gestion ?

Cas d'étude Seine

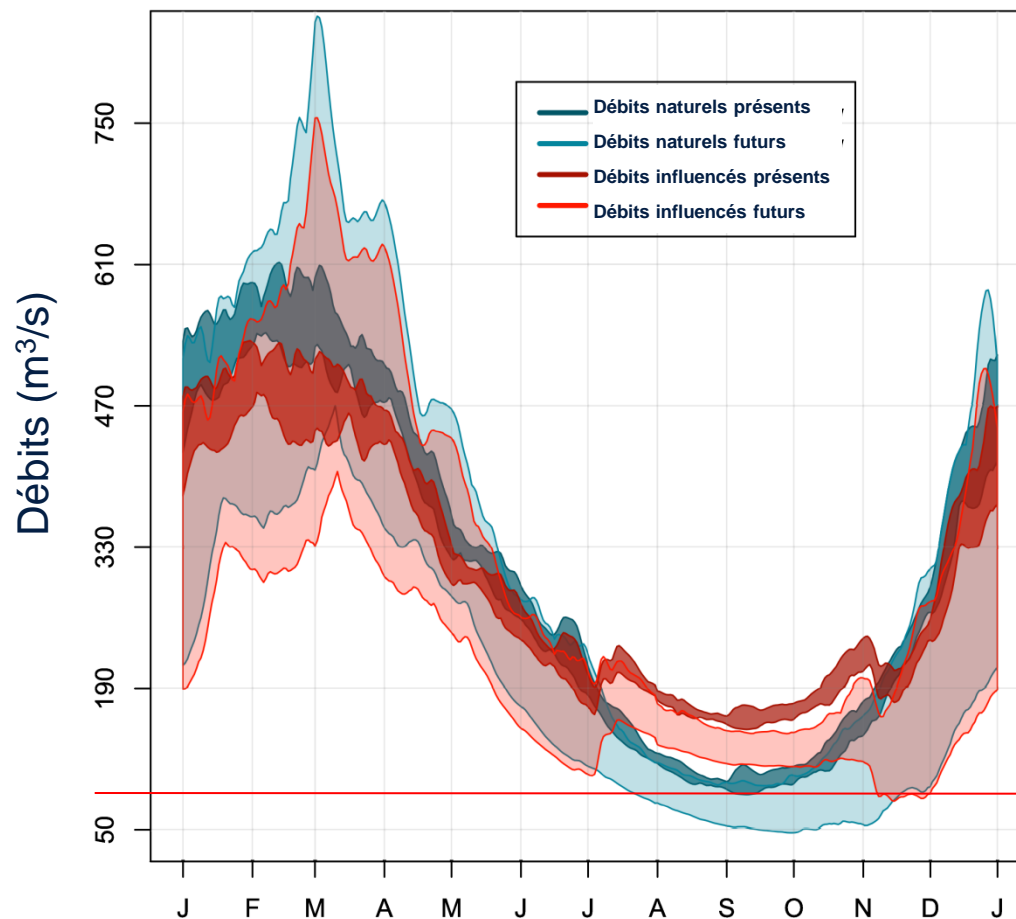
➤ Evolution du régime climatique sur la Seine

Présent
1961-1990Futur
2046-2065

- Evolution incertaine des précipitations moyennes mais évolution à la baisse des précipitations estivales
- Hausse généralisée des températures, plus forte en été

Cas d'étude Seine

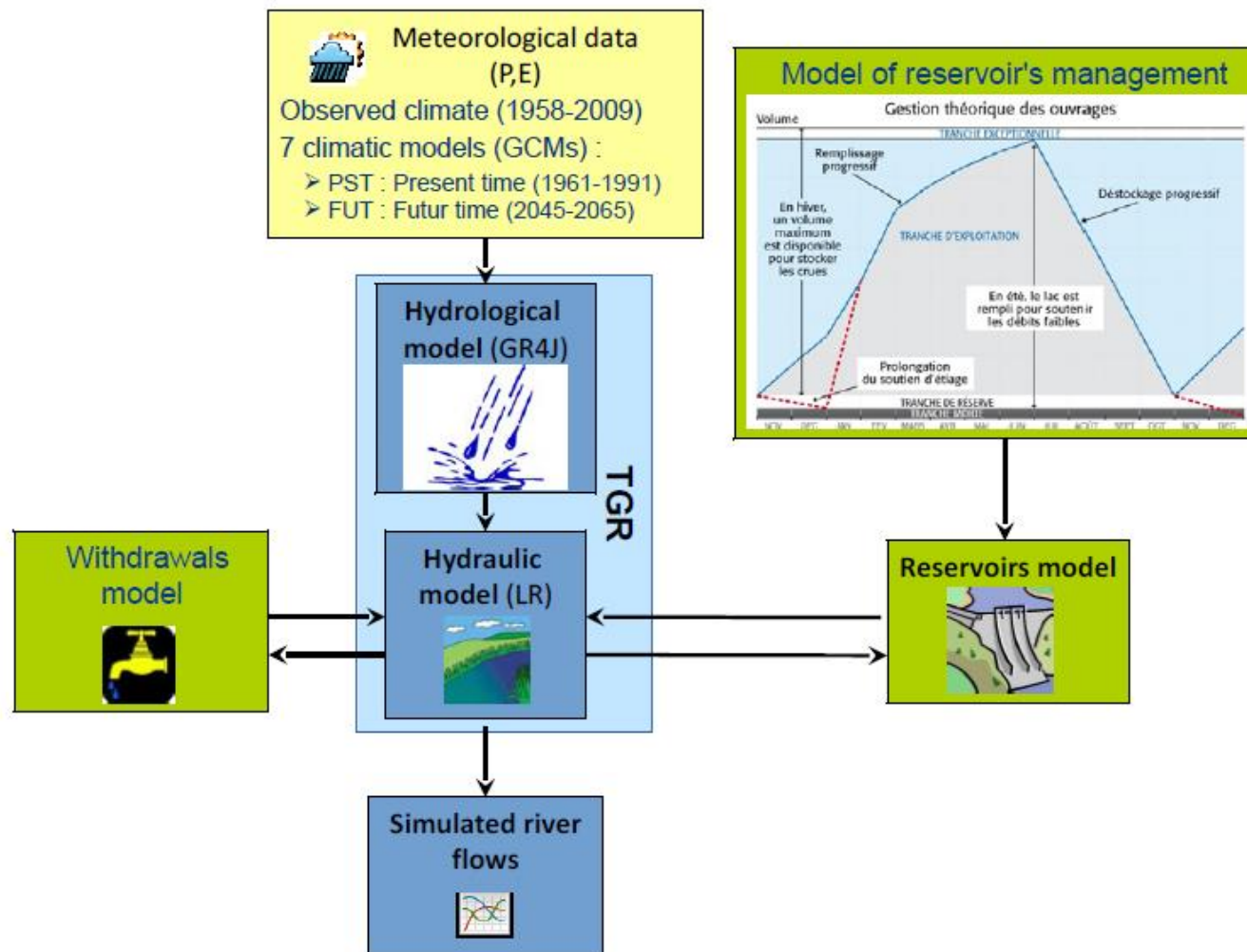
- Les débits futurs sur le bassin. Exemple à Paris



Seuil de vigilance

Cas d'étude Seine

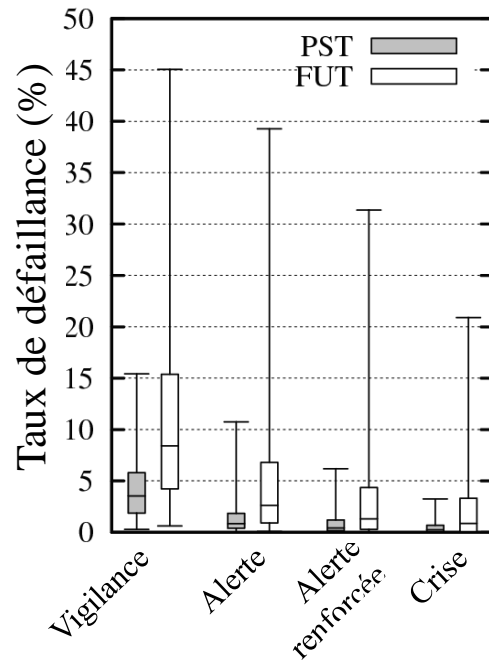
➤ Les outils utilisés



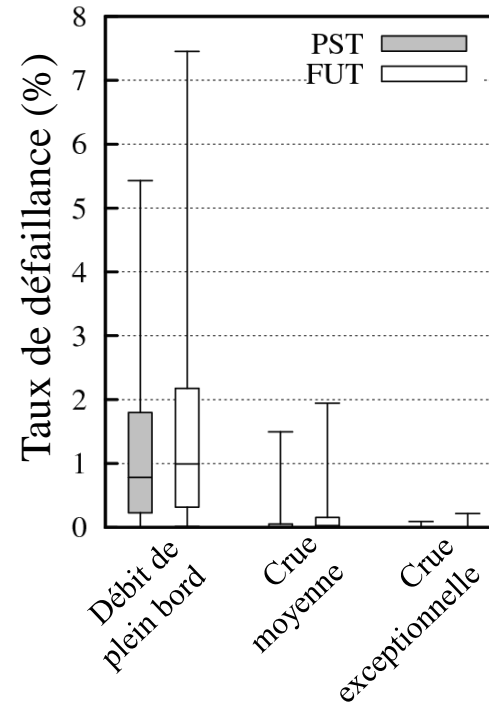
Cas d'étude Seine

- Impacts sur l'efficacité des lacs-réservoirs
 - Règles actuelles de gestion en contexte futur (2046-2065)

Etiages



Crues



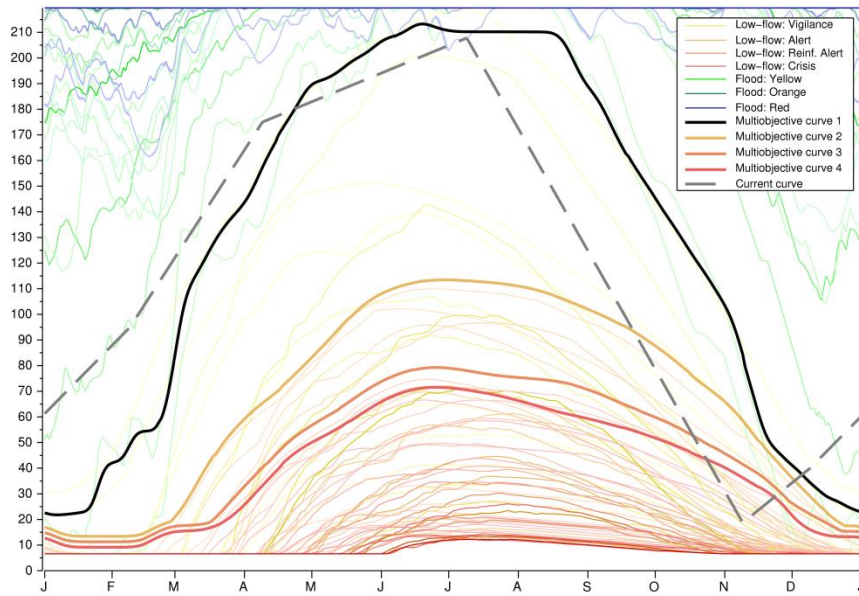
- Augmentation significative des taux d'échec pour tous les seuils de gestion sur les étiages

- Pas de tendance significative sur les seuils de crue

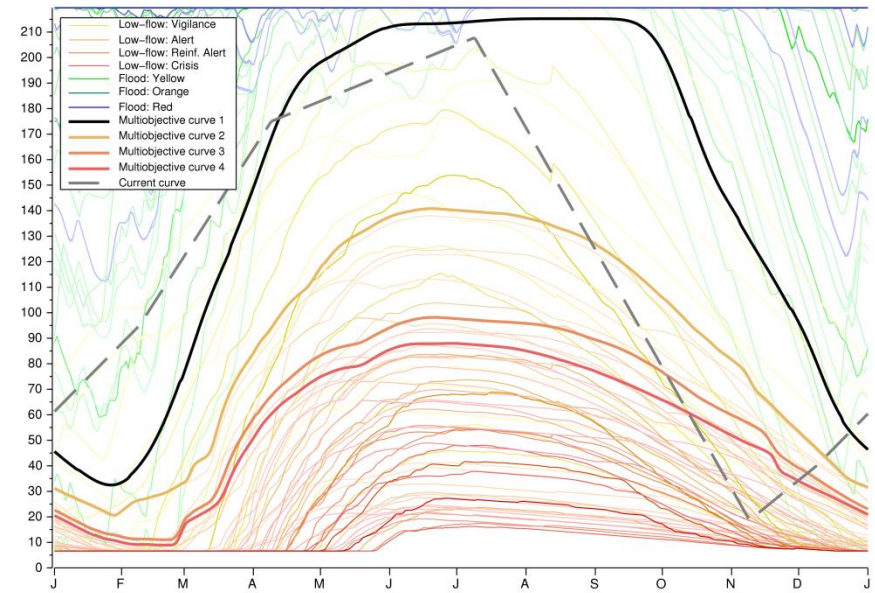
Cas d'étude Seine

- Construction de nouvelles courbes de remplissage (lac Seine)

Période de référence (1961-1991)



Période future (2046-2065)

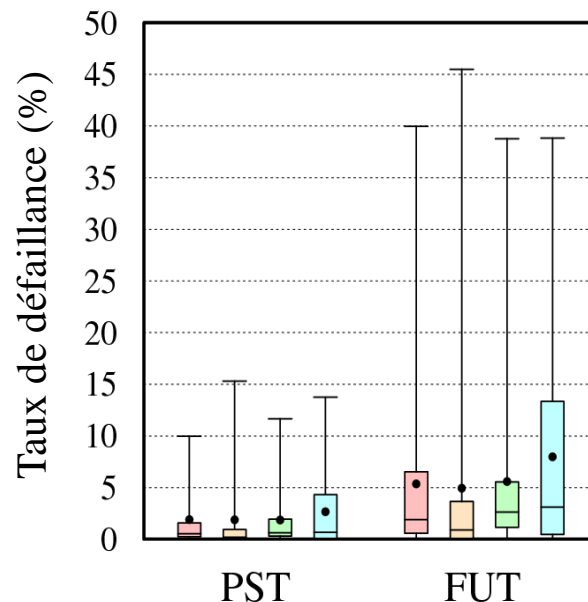


Cas d'étude Seine

Le cas d'étude Seine :

- Impact de stratégies d'adaptation
 - Option 1 : Changement de la courbe objectif de remplissage
 - Option 2 : Optimisation des règles de gestion en temps réel

Seuil d'alerte
sur les
étiages



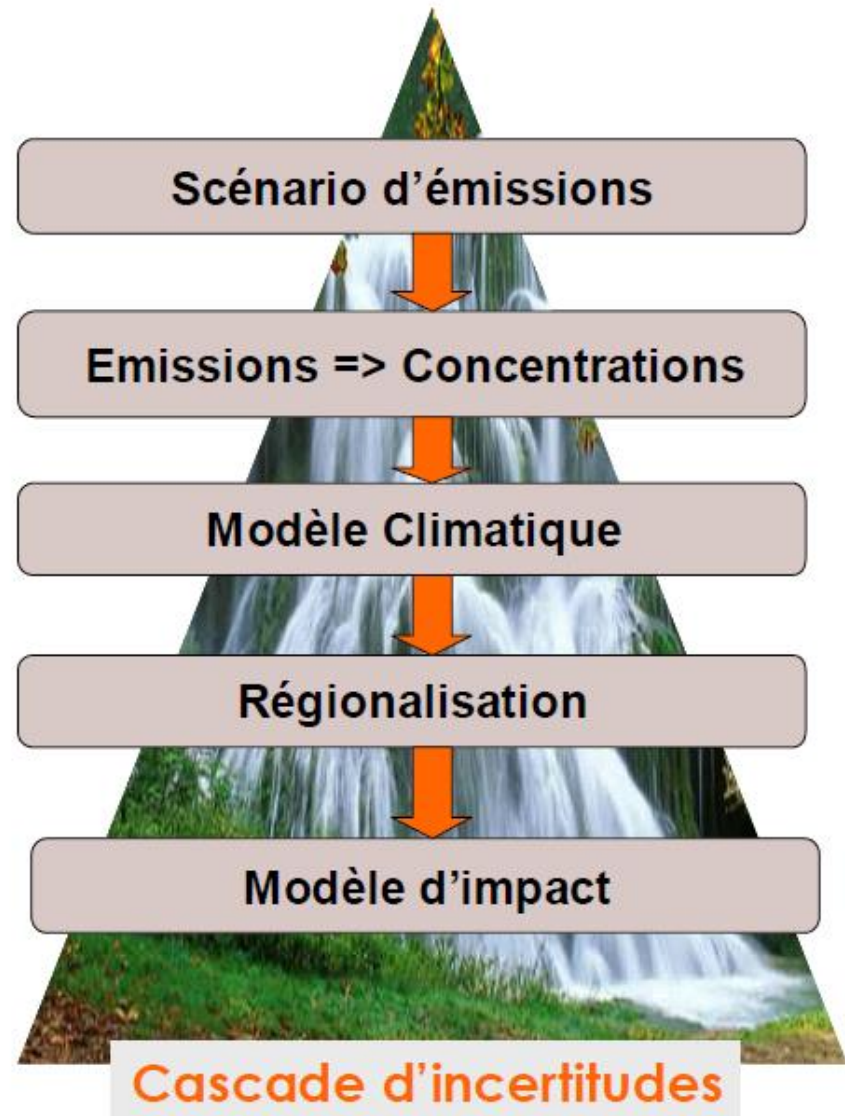
- Courbes actuelles x Règles actuelles
- Nouvelles courbes x Règles actuelles
- Courbes actuelles x Règles optimisées
- Nouvelles courbes x Règles optimisées

- Amélioration des résultats en conditions futures grâce aux nouvelles courbes
- Dégradation dans tous les cas par rapport à la situation actuelle

Conclusions et perspectives

De nombreuses sources d'incertitudes

- Résultats d'études d'impact inutiles sans quantification des incertitudes associées
- Importance de bien préciser les scénarios choisis
- Erreurs liées aux modélisations parfois de l'ordre de grandeur des tendances mises en évidences dans les projections
- Prudence sur l'interprétation des résultats



(Source DRIAS)

Vers des stratégies d'adaptation

- Les incertitudes ne doivent pas empêcher l'action

- Nombreuses conséquences potentielles en termes de risques et d'accès à la ressource :

- Inondations
- Eau potable
- Agriculture
- Production énergétique
- Etc.

Les données ne prédisent pas un tsunami avec une certitude absolue : je suggère d'attendre !

Source : Union of Concerned Scientists

- Possibilité de tester des stratégies d'adaptation, même si la démarche est souvent très complexe



Conclusion et perspectives

- Forts enjeux environnementaux et sociétaux des changements climatiques
- Dimension humaine, stratégique et géopolitique
- Echelle régionale indispensable pour le développement de stratégies d'adaptation
- Nombreuses incertitudes sur la quantification économique
- Grandes différences entre les pays dans leur résilience face aux changements climatiques et leur capacité à mettre en place des stratégies d'adaptation

Contacts à Irstea sur hydrologie et changement climatique

Guillaume Thirel (guillaume.thirel@irstea.fr)

Charles Perrin (charles.perrin@irstea.fr)

Vazken Andréassian (vazken.andreassian@irstea.fr)

Maria-Helena ramos (maria-helena.amos@irstea.fr)

- Modélisation hydrologique
- Etudes d'impacts
- Gestion et gouvernance



Éric Sauquet (eric.sauquet@irstea.fr)

Benjamin Renard (benjamin.renard@irstea.fr)

Jean-Philippe Vidal (jean-philippe.vidal@irstea.fr)

Michel Lang (michel.lang@irstea.fr)

- Etudes d'impacts
- Confrontation ressources-besoins
- Analyse de tendances passées
- Méthodes de descente d'échelle
- Analyse de données historiques

Patrick Arnaud (patrick.arnaud@irstea.fr)

Philippe Cantet (philippe.cantet@irstea.fr)

- Evolution des extrêmes de crues

David Dorchies (david.dorchies@irstea.fr)

- Méthodes de gestion

Collectif de recherche ARCEAU (Aléas et risques liés au cycle de l'eau)

Coord. Vazken Andréassian (vazken.andreassian@irstea.fr)

<http://arceau.irstea.fr/>