



# Projet « ClimAware »

## Changement climatique à l'horizon 2046-2065 sur les 4 lacs-réservoirs : impacts et propositions d'adaptation

**David Dorchies**

UMR G-EAU, Irstea Montpellier

SGL, COTECO, 17 octobre 2014



[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)





# Plan de la présentation

- Présentation du projet
- Modélisation du bassin versant
- Impact du changement climatique
- Adaptation de la gestion des lacs
- Comparaison des adaptations
- Conclusion

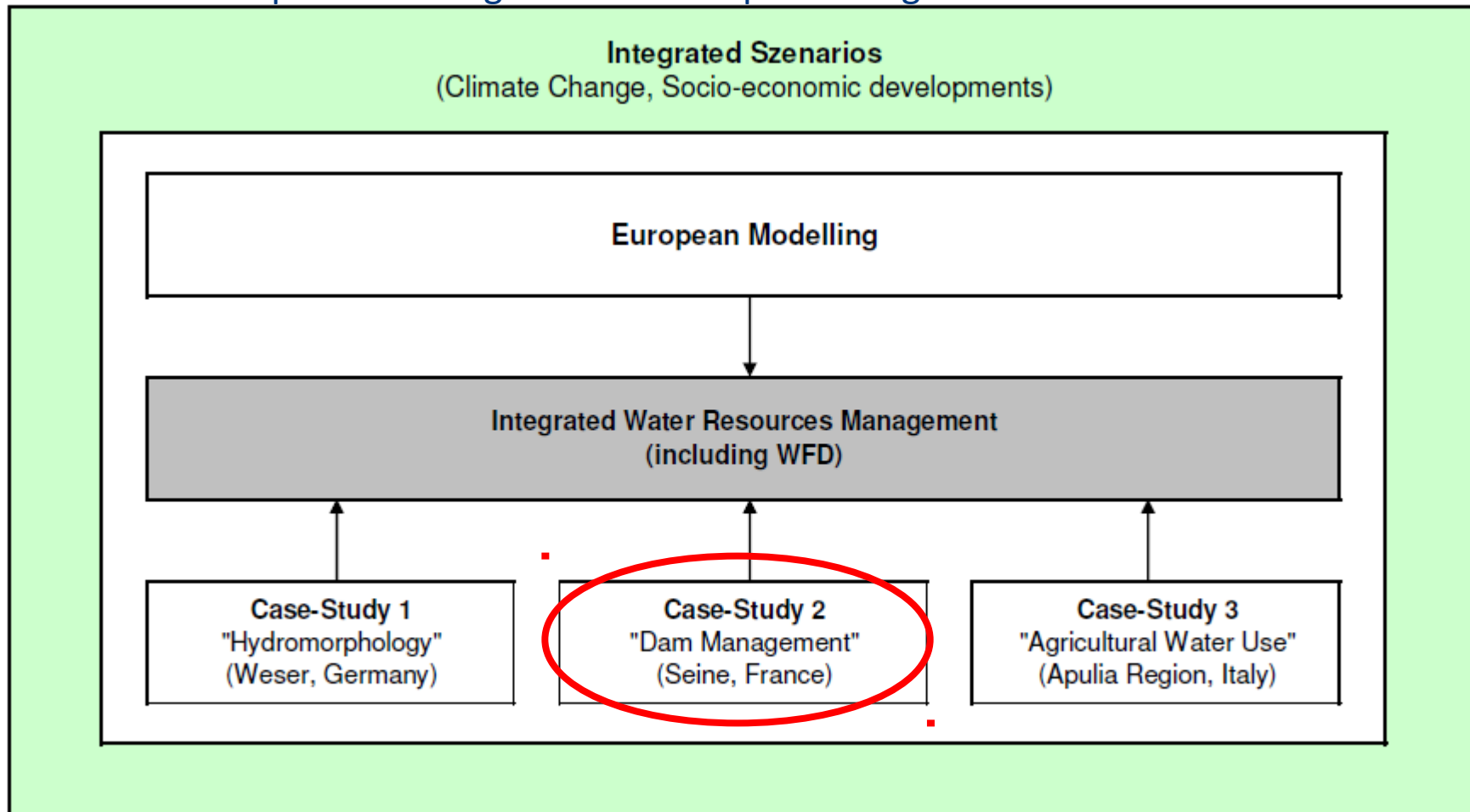


# Plan de la présentation

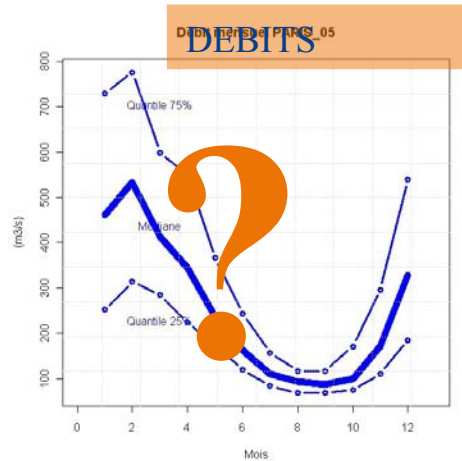
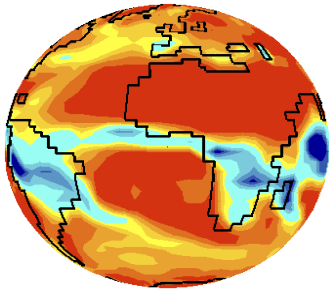
- **Présentation du projet**
- Modélisation du bassin versant
- Impact du changement climatique
- Adaptation de la gestion des lacs
- Comparaison des adaptations
- Conclusion

# •Le projet Climaware

Etude de l'impact du changement climatique sur la gestion de la ressource en eau



# •Objectif de l'étude de cas



- Evaluer l'impact du changement climatique à l'horizon 2060 sur :
  - l'hydrosystème naturel
  - la gestion des barrages
- Définir des stratégies d'adaptation en terme de règles de gestion des barrages

# La bassin de la Seine

Lac-Réservoir AUBE



Lac-Réservoir MARNE



Lac-Réservoir de PANNECIERE



Lac-Réservoir SEINE



Réservoir du Croissant

Réservoir du Bois de Chaumeçon

Le bassin de la Seine à Paris:

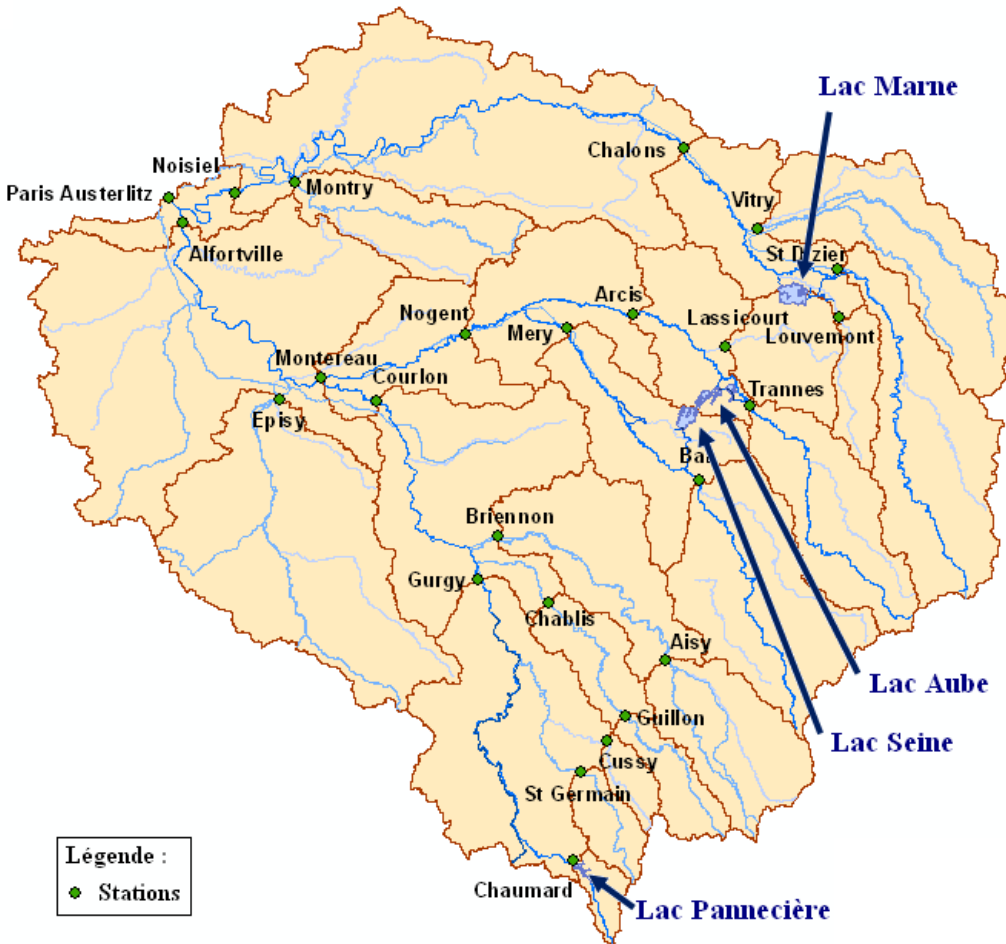
- Surface 43 800 km<sup>2</sup>
- 4 lacs-réservoirs (800 hm<sup>3</sup>) servant à écrêter les crues et soutenir les étiages
- Gestion des lacs par l'EPTB Seine Grands Lacs



# Plan de la présentation

- Présentation du projet
- **Modélisation du bassin versant**
- Impact du changement climatique
- Adaptation de la gestion des lacs
- Comparaison des adaptations
- Conclusion

# •Données utilisées



- **Débits journaliers naturalisés (1958-2009)**  
sur 25 stations hydrométriques (étude Hydratec pour Seine Grands Lacs)
- **Données météo**  
(source : Météo-France):
  - Séries observées SAFRAN (1958-2009)
  - Sorties de 7 GCM désagrégées par méthode statistique :
    - Temps présent (1961 – 1991)
    - Temps futur (2046 – 2065)
- **Variables journalières de gestion des barrages** (entrées, sorties, volumes)



# Chaîne de modélisation des débits



Données  
Météorologiques (P,E)

Climat observé (1958-2009)

7 modèles climatiques (GCMs) :

- PST : Temps présent (1961-1991)
- FUT : Temps futur (2045-2065)

Modèle  
hydrologique  
(GR4J)



Modèle de  
prélèvements



Modèle  
hydraulique(LR)



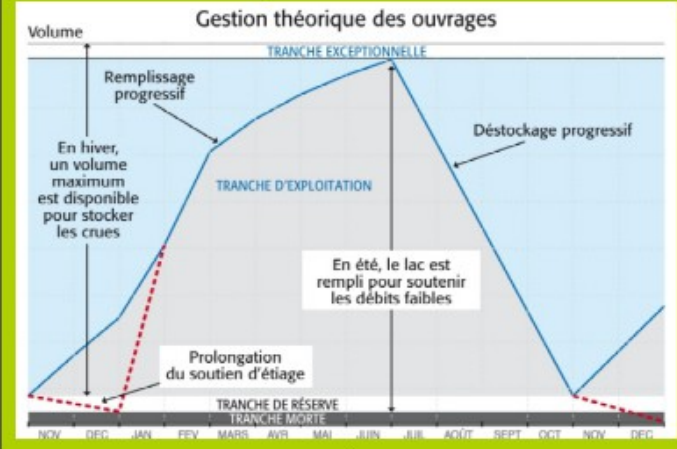
Modèle de réservoir



Débit simulé

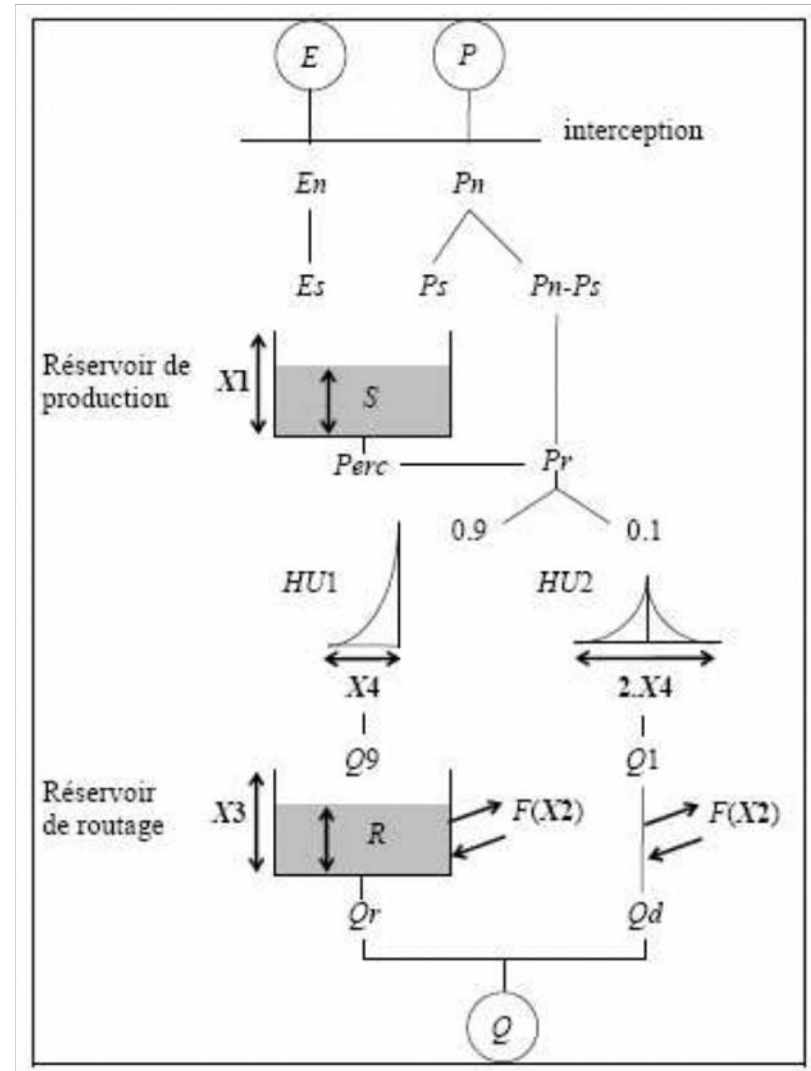


## Modèle de gestion des réservoirs

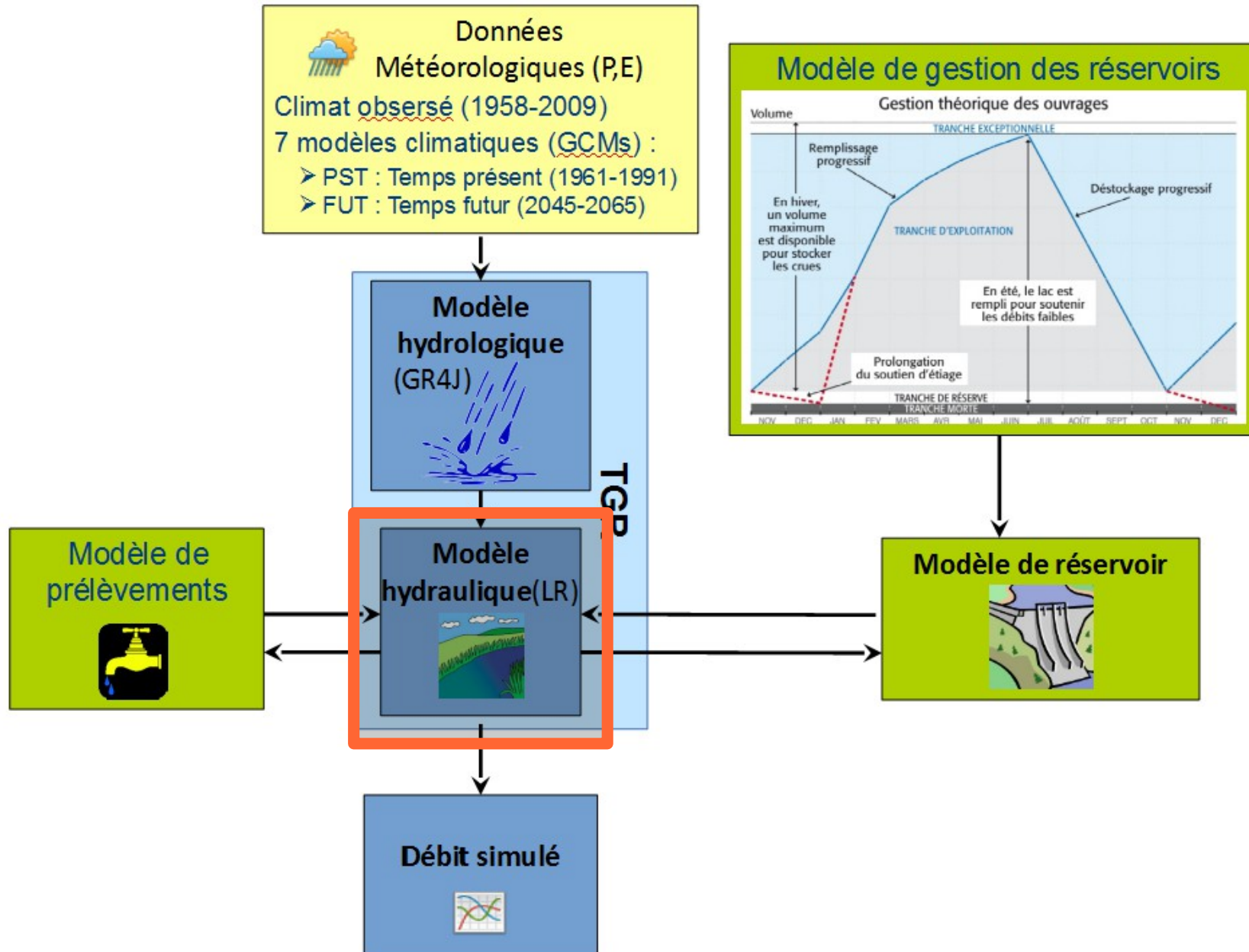


# Modèle hydrologique GR4J

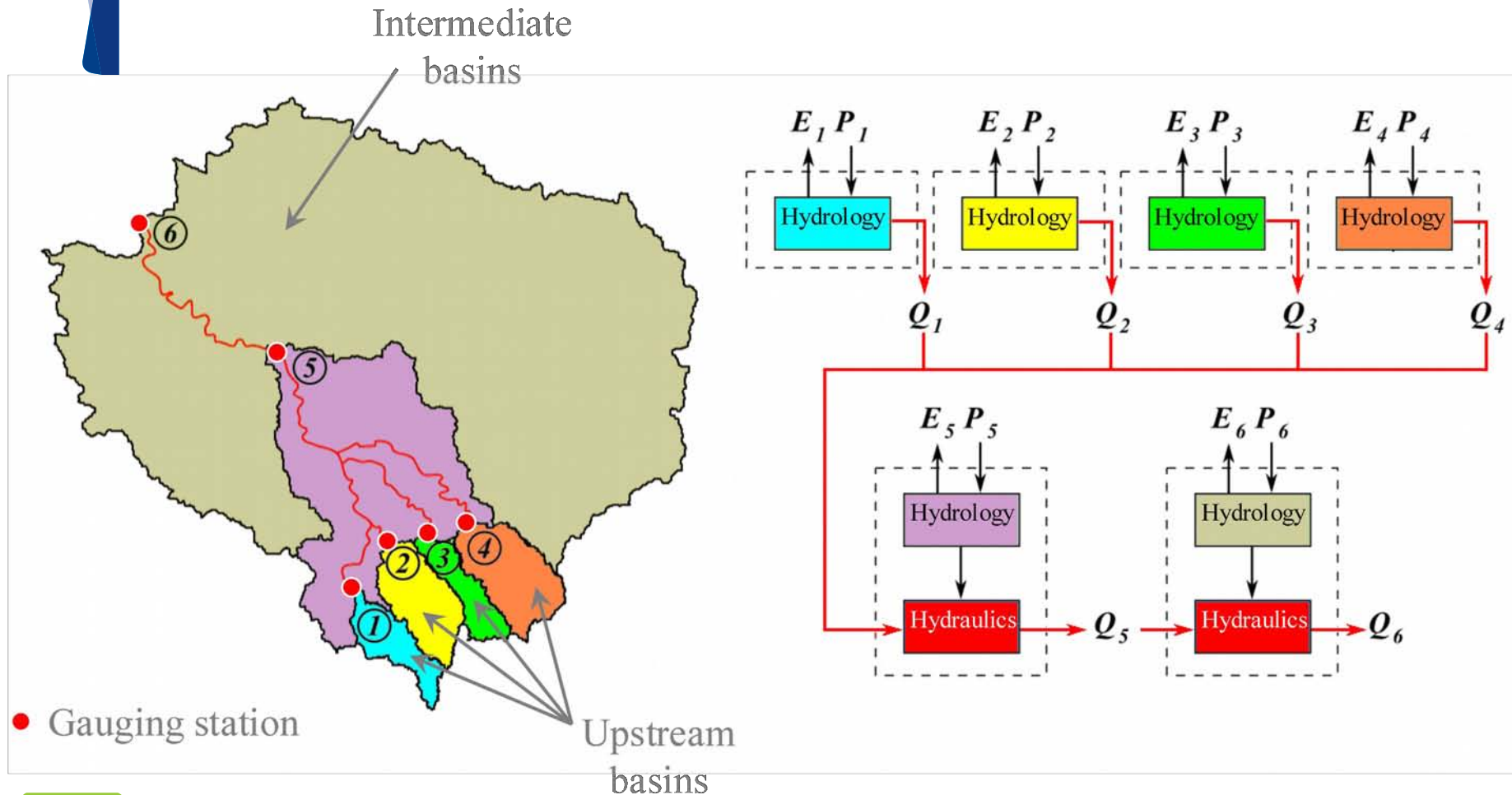
- Modèle conceptuel global pluie-débit au pas de temps journalier



# Chaîne de modélisation des débits

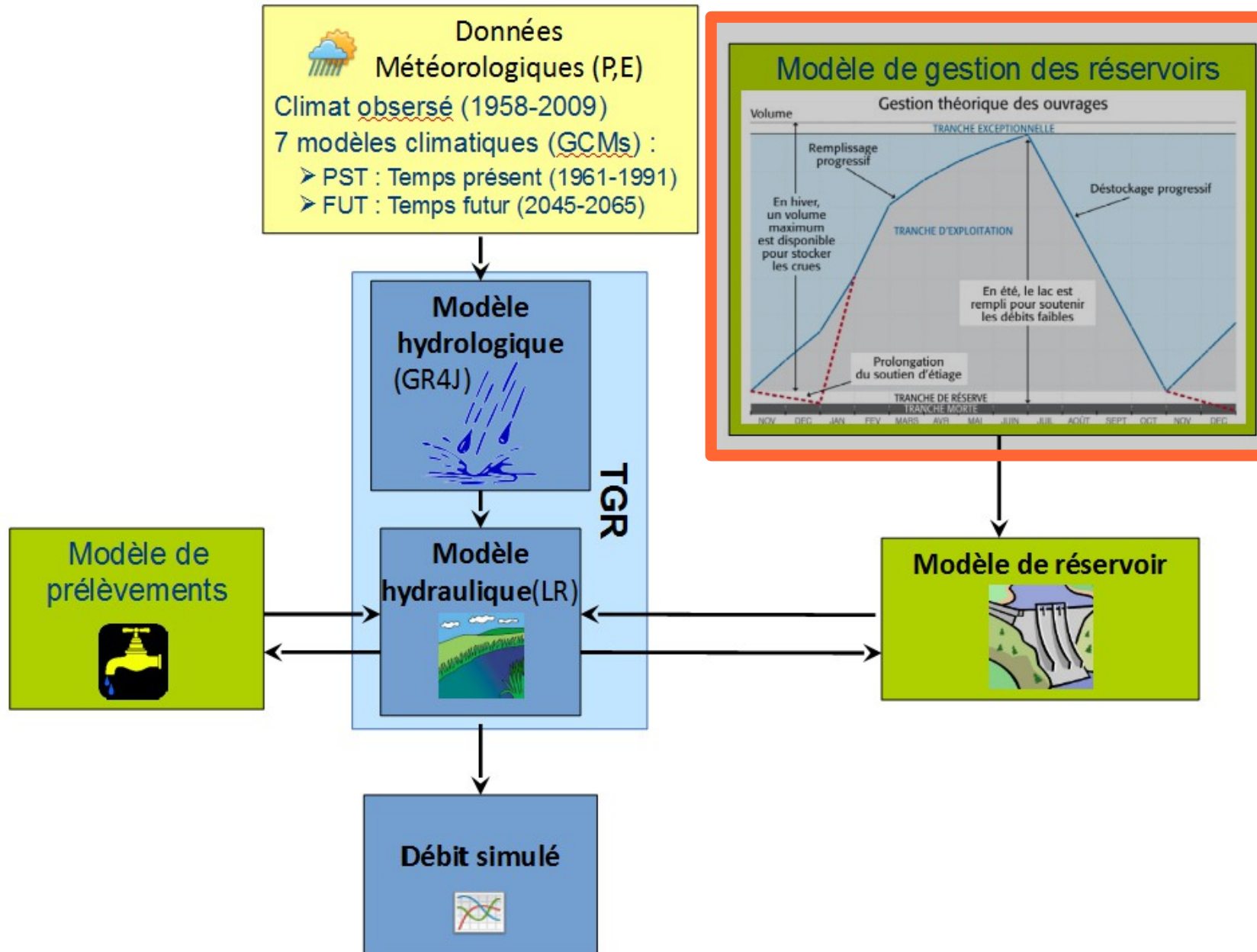


# Modèle semi-distribué TGR



- Simulation des débits sur les 25 stations de jaugeage ainsi qu'aux points de prise et de restitution des lacs-réservoirs.

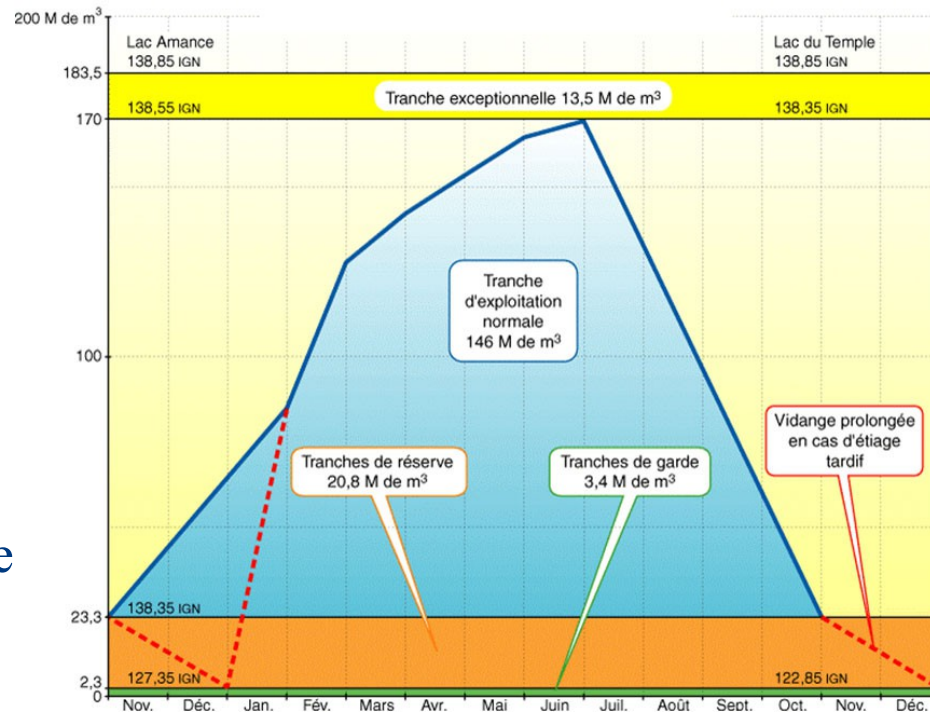
# Chaîne de modélisation des débits





# Modélisation des règles de gestion actuelles des lacs-réservoirs

- Gestion tactique
  - Gestion décentralisée des 4 lacs
  - Suivi d'une courbe objectif annuelle
- Gestion opérationnelle
  - Maintien d'un débit réservé (soutien d'étiage) et d'un débit de référence (crue) au droit de l'ouvrage

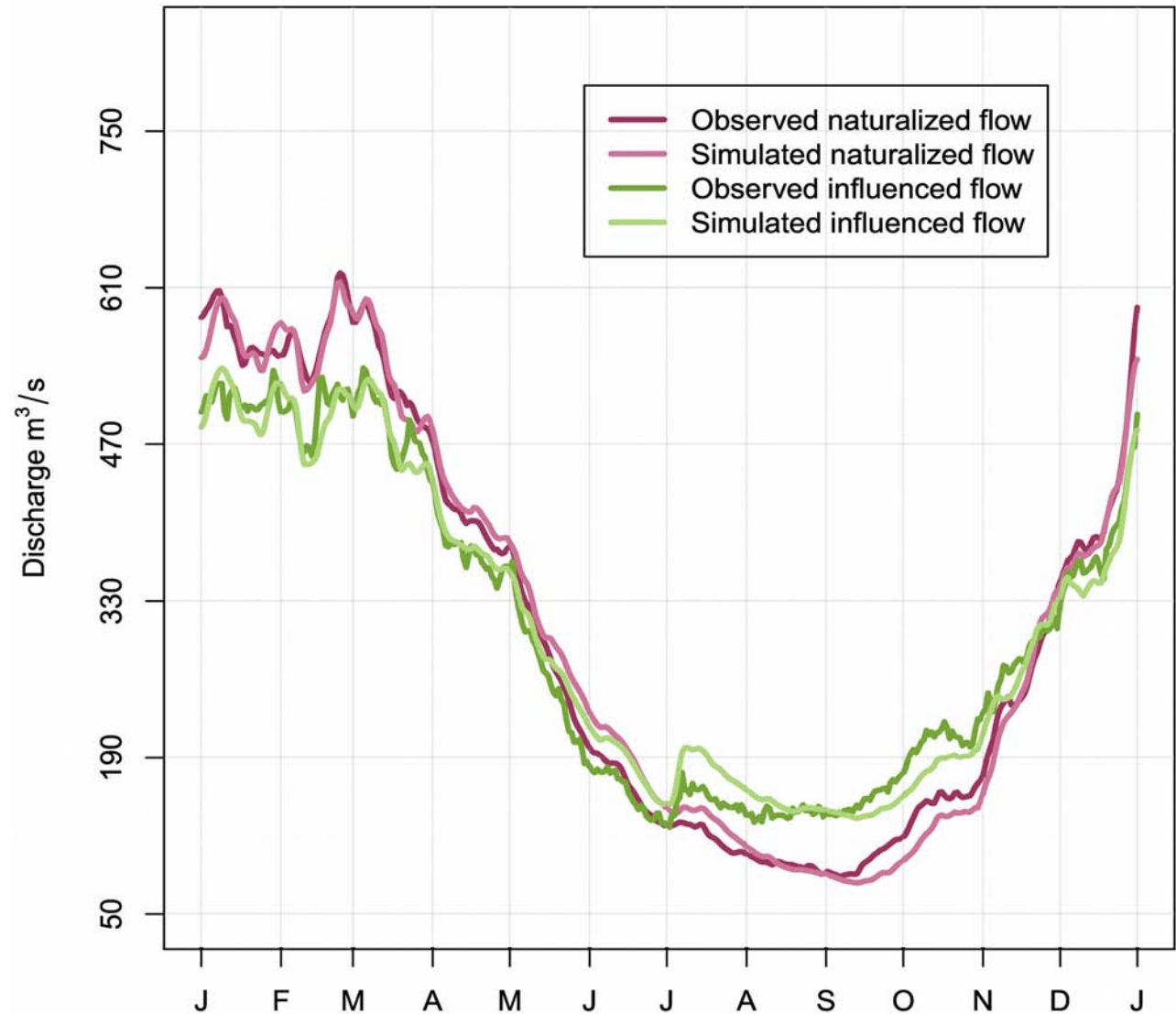


Courbe de gestion du lac Aube

# Débits moyens simulés et observés

Paris

Débits moyens journaliers observés et simulés à Paris pour les débits naturalisés et influencés par les règles actuelles de gestion des lacs (période 1989-2008)





# Plan de la présentation

- Présentation du projet
- Modélisation du bassin versant
- **Impact du changement climatique**
- Adaptation de la gestion des lacs
- Comparaison des adaptations
- Conclusion



# Scénarios climatiques utilisés

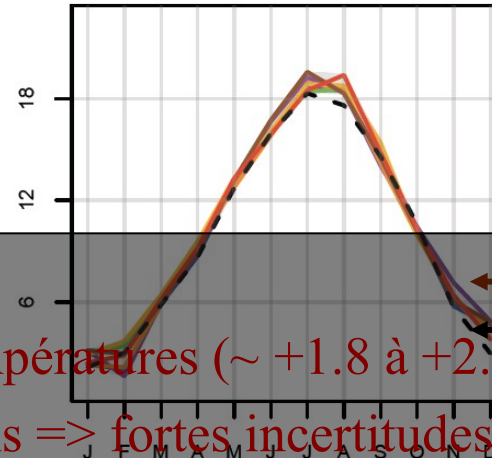
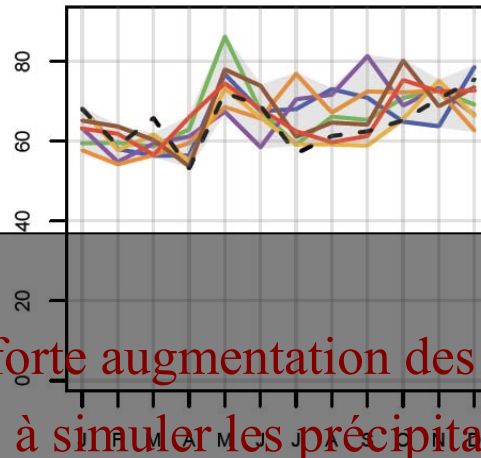
## Quelles évolutions possibles du climat ?

- Scénario d'émission de gaz à effet de serre : **A1B**
- Simulations climatiques issues des travaux du GIECs : **7 scénarios (7 modèles) testés**

### Précipitations (mm)

### Températures (°C)

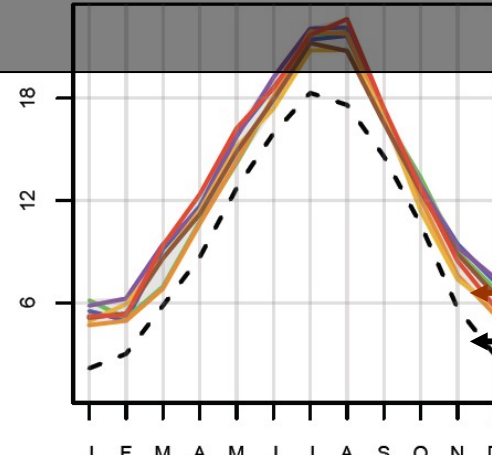
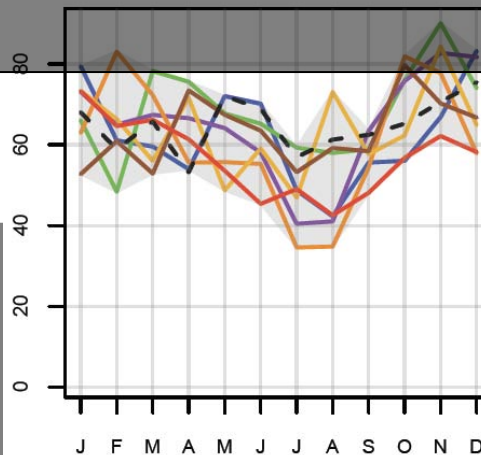
PASSE  
1961-1991



simulations climatiques  
observations météo  
(1961-1991)

- Possible forte augmentation des températures ( $\sim +1.8$  à  $+2.9$  °C)
- Difficulté à simuler les précipitations  $\Rightarrow$  fortes incertitudes

FUTUR  
2046-2065

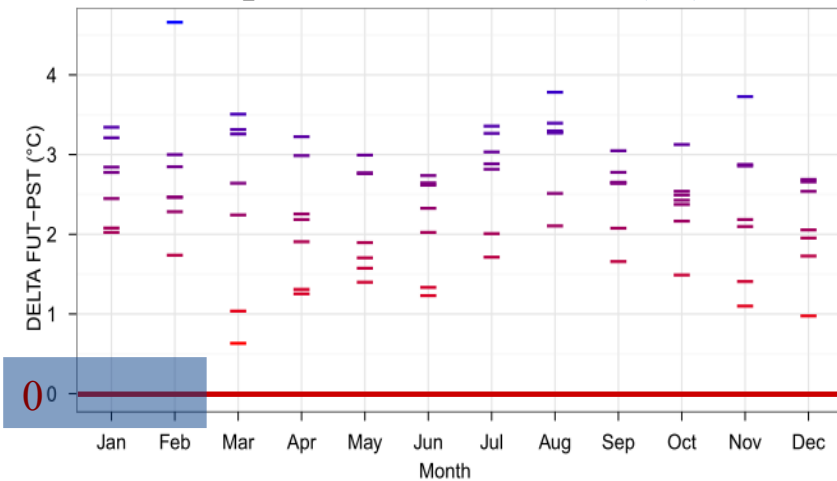


simulations climatiques  
observations météo  
(1961-1991)

# Scénarios climatiques utilisés

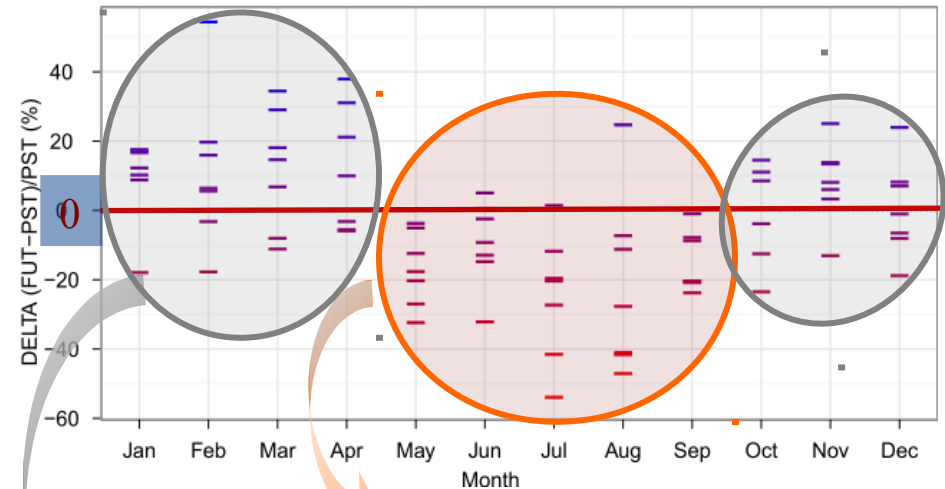
## Quelles évolutions possibles du climat ?

### Augmentations possibles des températures mensuelles (°C)



+1.5 à +3.5°C pour la plupart des scénarios testés

### Évolutions possibles des précipitations mensuelles (%)

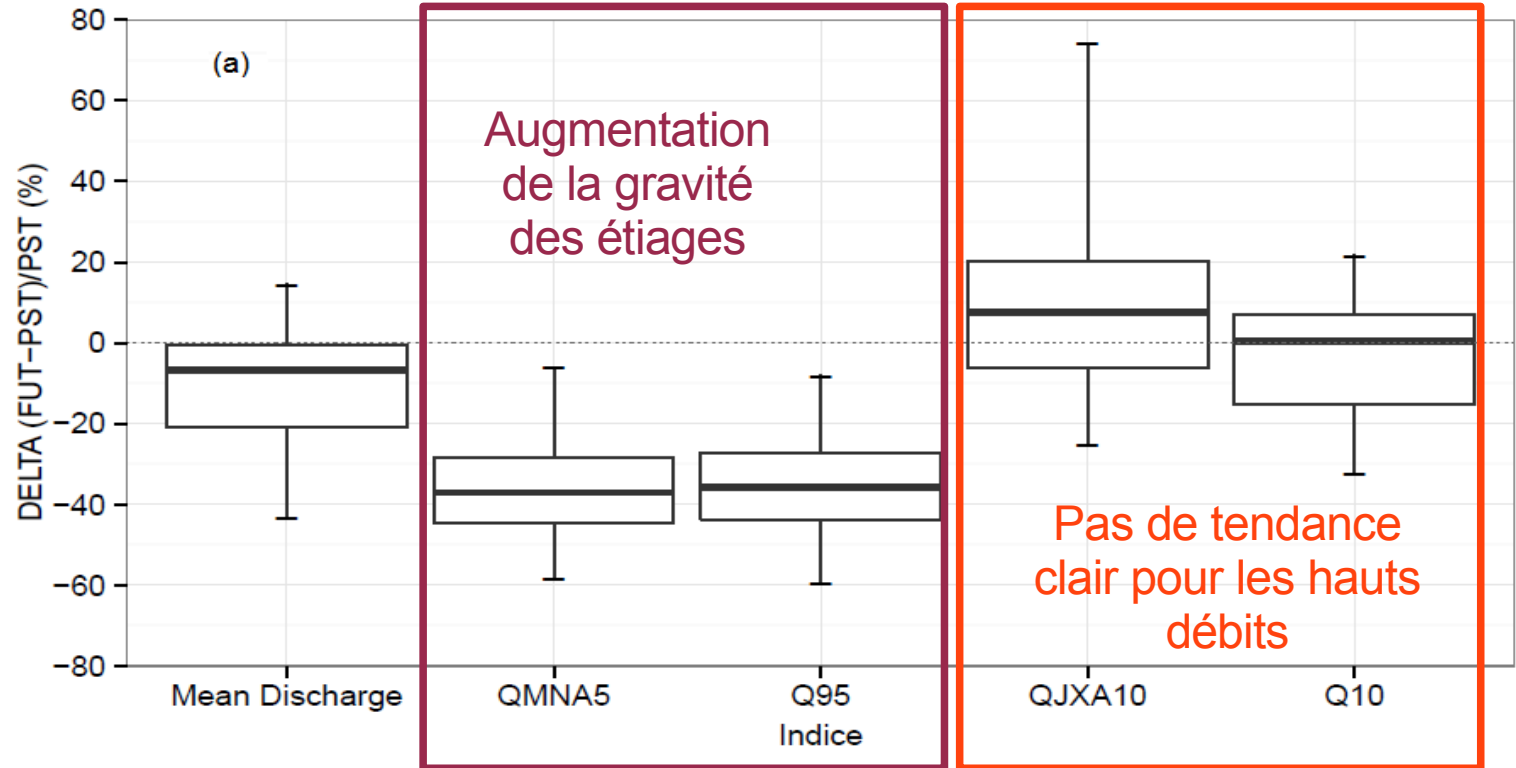


Baisse des précipitations moyennes de Mai à Septembre

Résultats divergents pour l'automne et l'hiver

# Evolution des débits naturalisés

Distribution de l'évolution relative des indicateurs statistiques pour les deux modèles hydrologiques, les 7 scénarios climatiques et les 25 stations de jaugeage

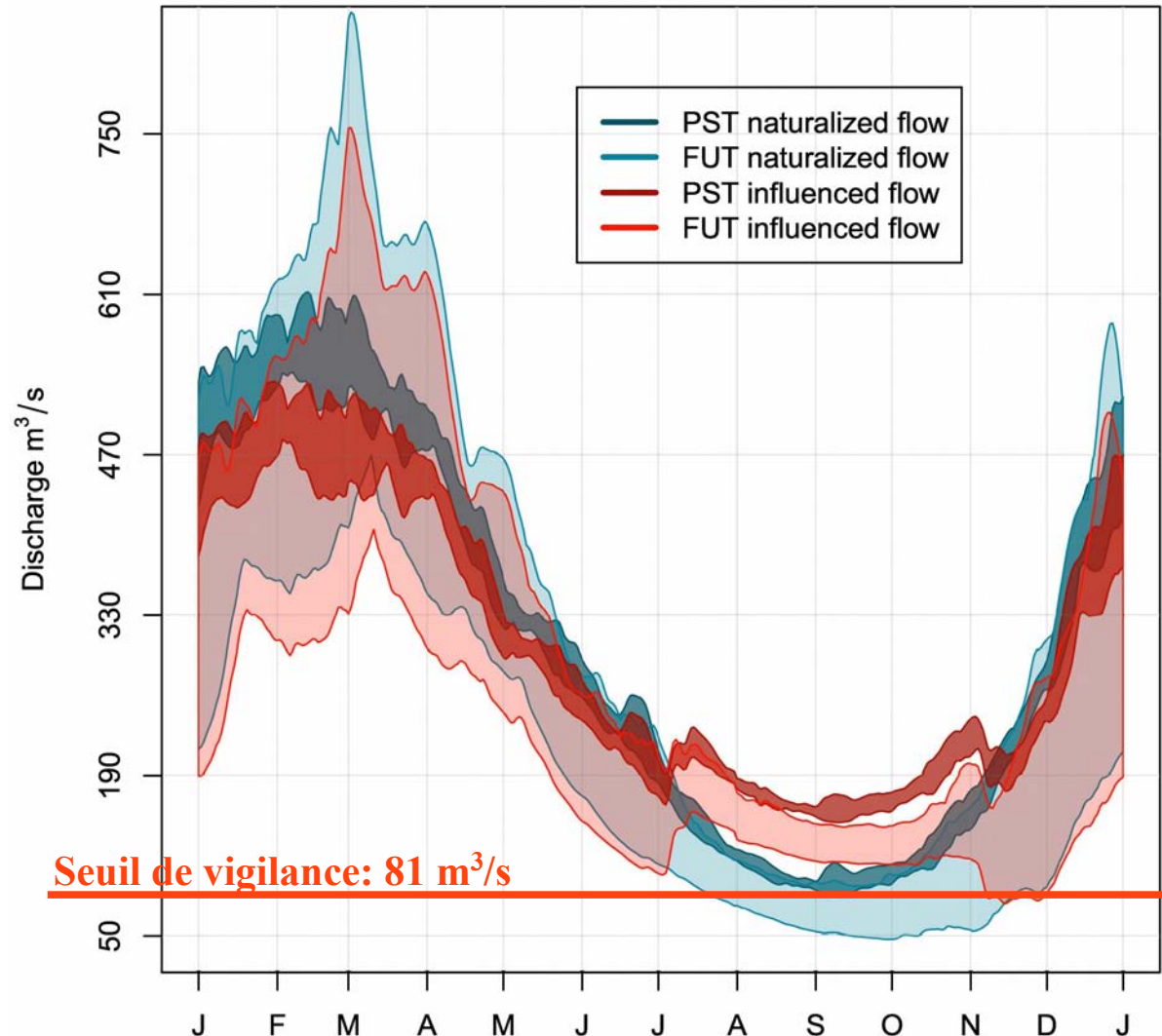


Impact fort attendu sur la gestion des lacs en été

# Simulations avec les forçages climatiques : Impact du changement climatique à Paris

Débits moyens  
journaliers en temps  
présent (1961-1991) et  
futur (2046-2061) pour  
les 7 scénarios  
climatiques à Paris.

Débits **naturalisés** et  
**influencés** par les règles  
actuelles de gestion des  
lacs





# Plan de la présentation

- Présentation du projet
- Modélisation du bassin versant
- Impact du changement climatique
- **Adaptation de la gestion des lacs**
- Comparaison des adaptations
- Conclusion



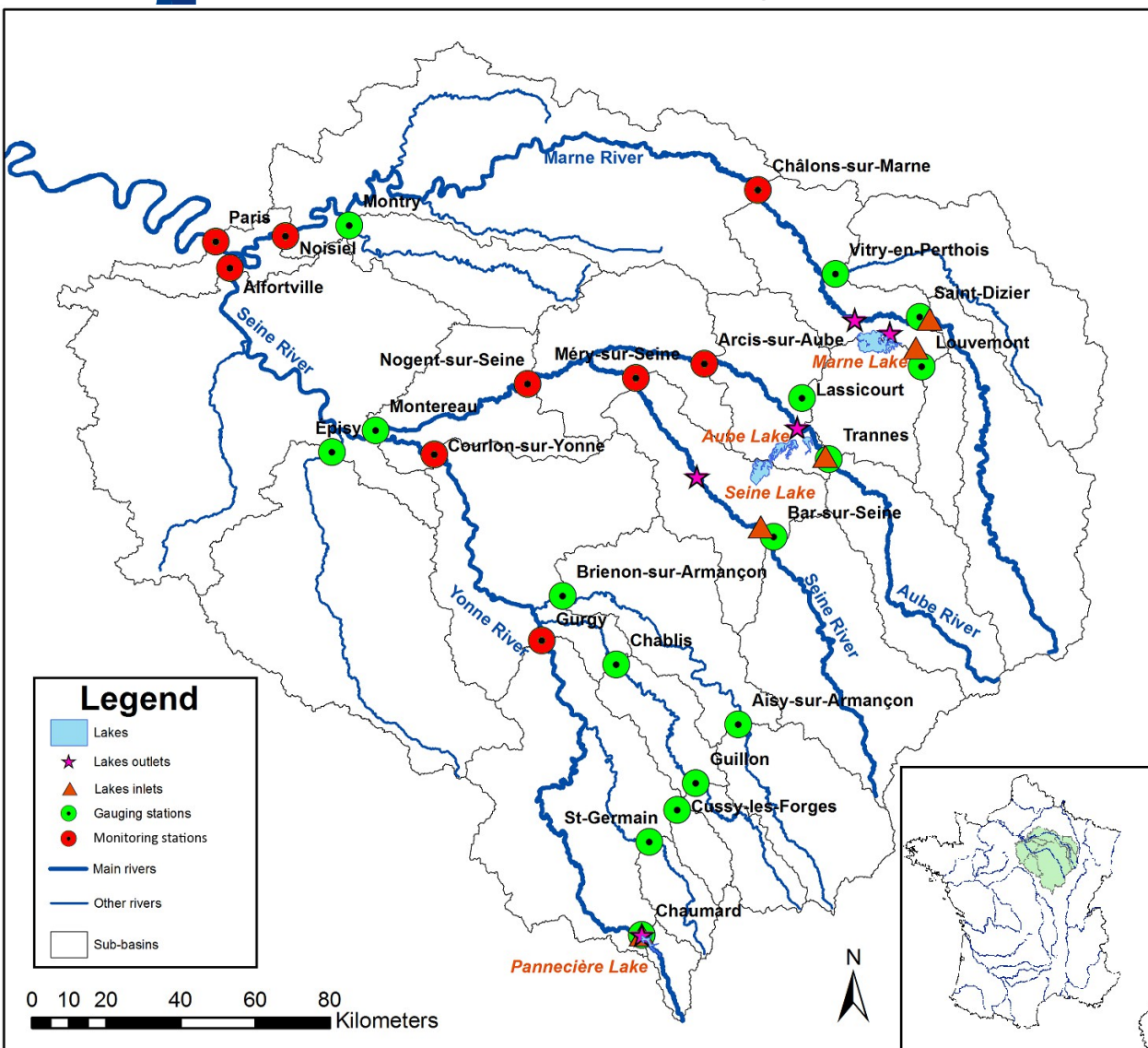
# Stratégies d'adaptation au changement climatique

## 3 niveaux de gestion :

- Stratégique : Adaptation des infrastructures
  - ➔ Non exploré dans ce projet
- Tactique : Adaptation des courbes objectifs de remplissage
  - ➔ Test de nouvelles courbes de remplissages calculées à partir des objectifs fixés à l'aval des lacs
- Operationnel : Contrôle en temps réel
  - ➔ Test d'une commande prédictive (Tree-Based Model Predictive Control "TB-MPC")

# Les objectifs à l'aval des lacs

Basés sur les seuils de crue et d'étiage sur 9 stations de contrôle à l'aval des lacs



Seuils d'étiage (basés sur les seuils de l'arrêtée sècheresse) :

- 1<sup>st</sup>: vigilance
- 2<sup>nd</sup>: alerte
- 3<sup>rd</sup>: alerte renforcée
- 4<sup>th</sup>: crise

Seuils de crue :

- 1<sup>st</sup>: jaune
- 2<sup>nd</sup>: orange
- 3<sup>rd</sup>: rouge



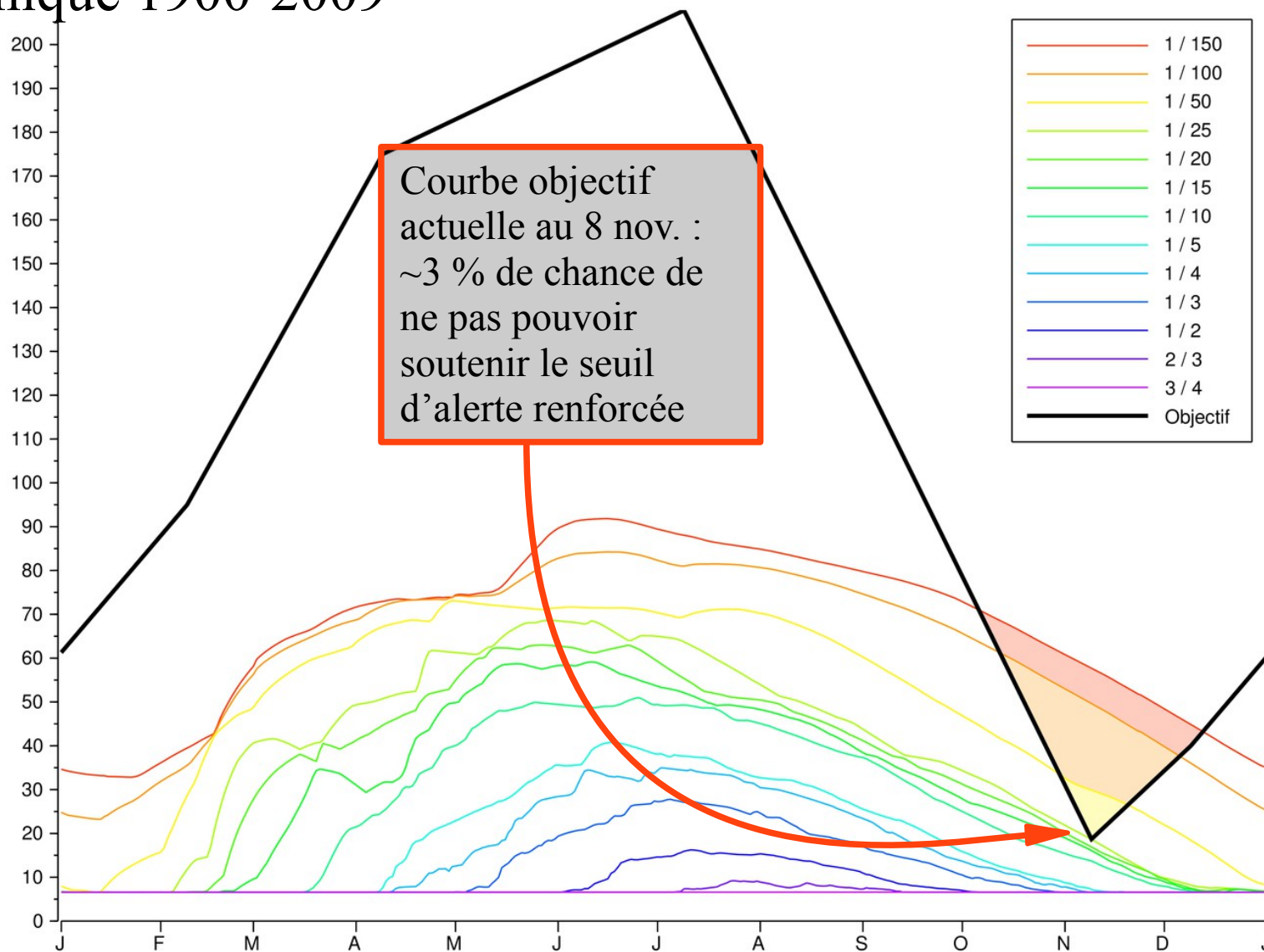
# Construction de courbes de risque de non atteinte d'un objectif

- A partir des débits journaliers naturalisés
- Construction d'une Chronique de volume stocké idéal permettant de réaliser du mieux possible, par la contribution de tous les réservoirs, un objectif de gestion défini à l'aval
- Définition de chroniques annuelles iso-fréquence de volume par analyse statistique



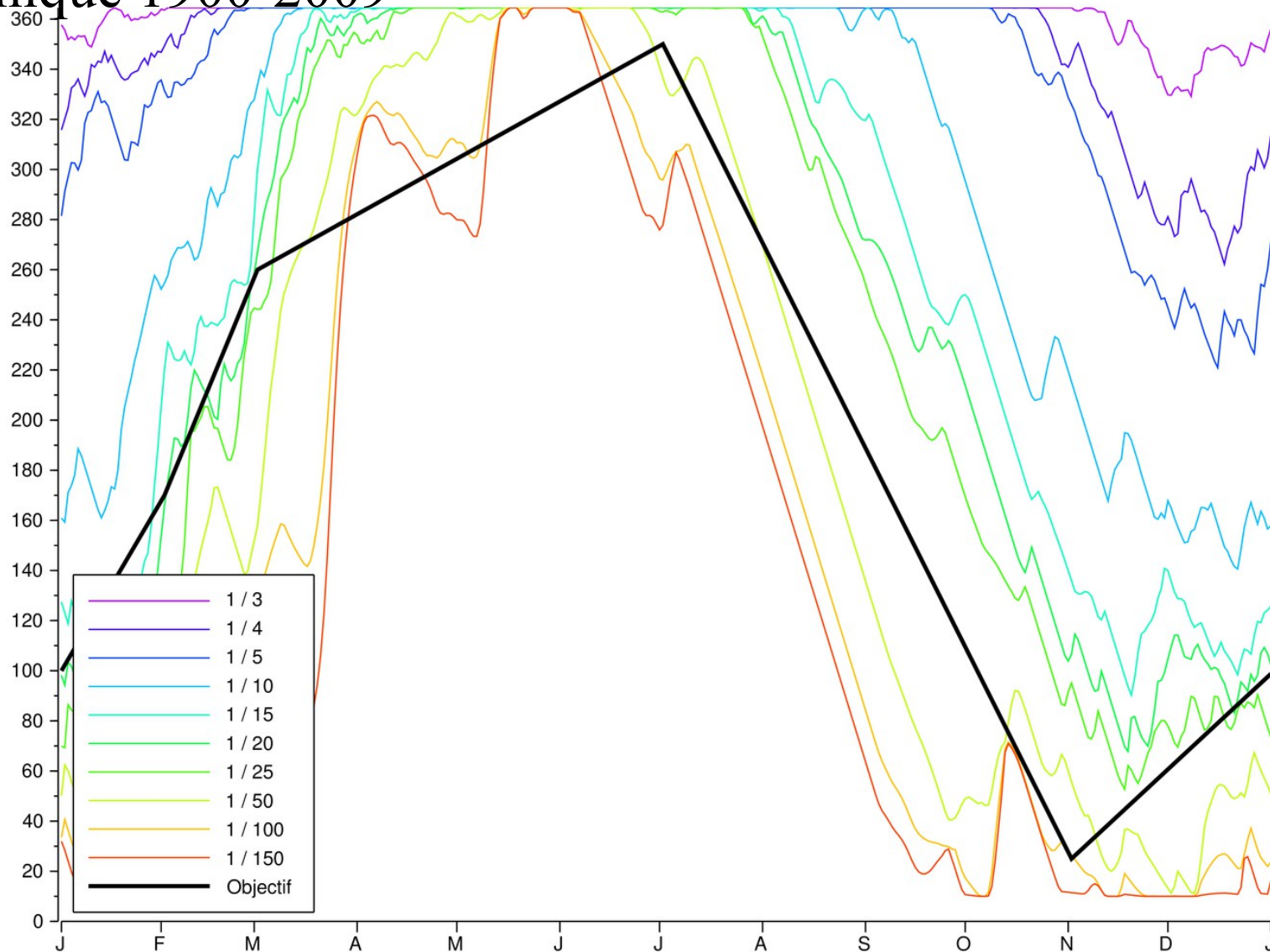
# Exemple de courbes iso-fréquence calculées sur la chronique 1900-2009

- Lac : Seine
- Station aval : Nogent-sur-Seine
- Objectif : étiage seuil alerte renforcée ( $17 \text{ m}^3/\text{s}$ )



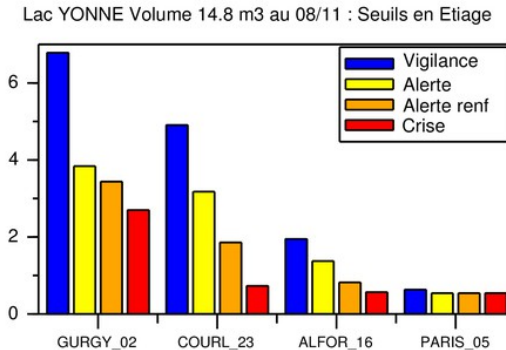
# Exemple de courbes iso-fréquence calculées sur la chronique 1900-2009

- Lac : Marne
- Station aval : Paris
- Objectif : crue seuil jaune ( $950 \text{ m}^3/\text{s}$ )

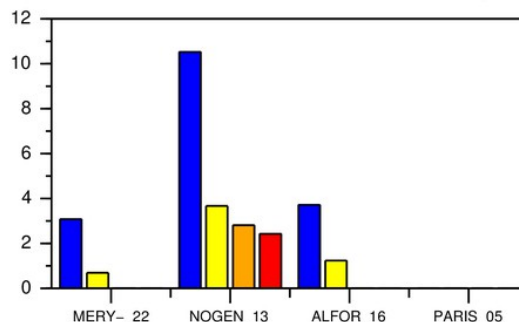


# Evaluation du risque de non satisfaction des objectifs

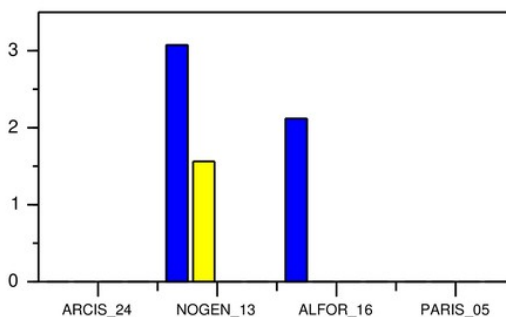
Pour le volume objectif  
des 4 lacs-réservoirs au  
8 novembre calculé à  
partir des débits  
naturalisés (1900-2009)



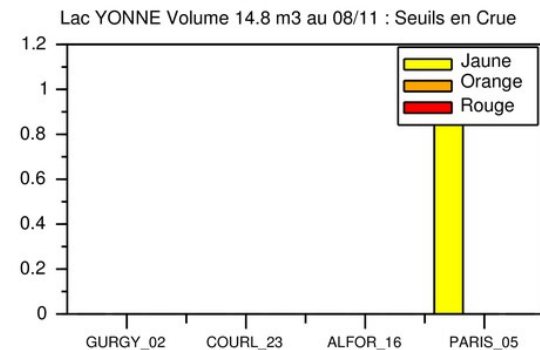
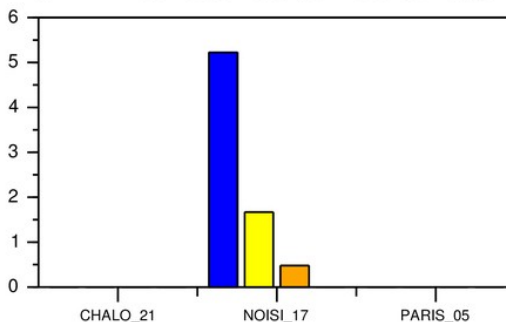
Lac SEINE Volume 18.7 m3 au 08/11 : Seuils en Etiage



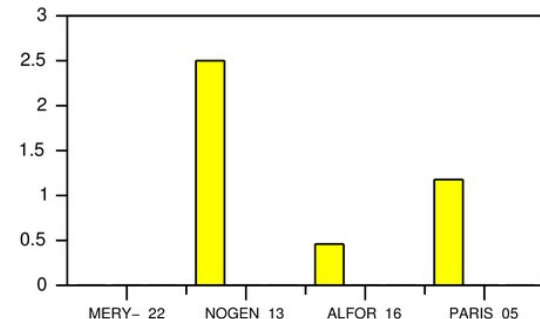
Lac AUBE Volume 29.0 m3 au 08/11 : Seuils en Etiage



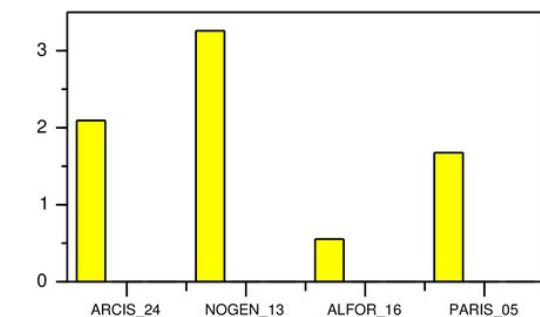
Lac MARNE Volume 33.6 m3 au 08/11 : Seuils en Etiage



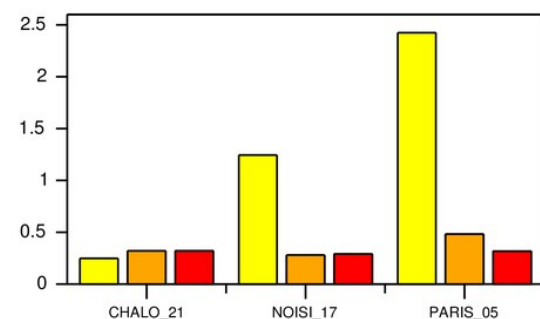
Lac SEINE Volume 18.7 m3 au 08/11 : Seuils en Crue



Lac AUBE Volume 29.0 m3 au 08/11 : Seuils en Crue



Lac MARNE Volume 33.6 m3 au 08/11 : Seuils en Crue





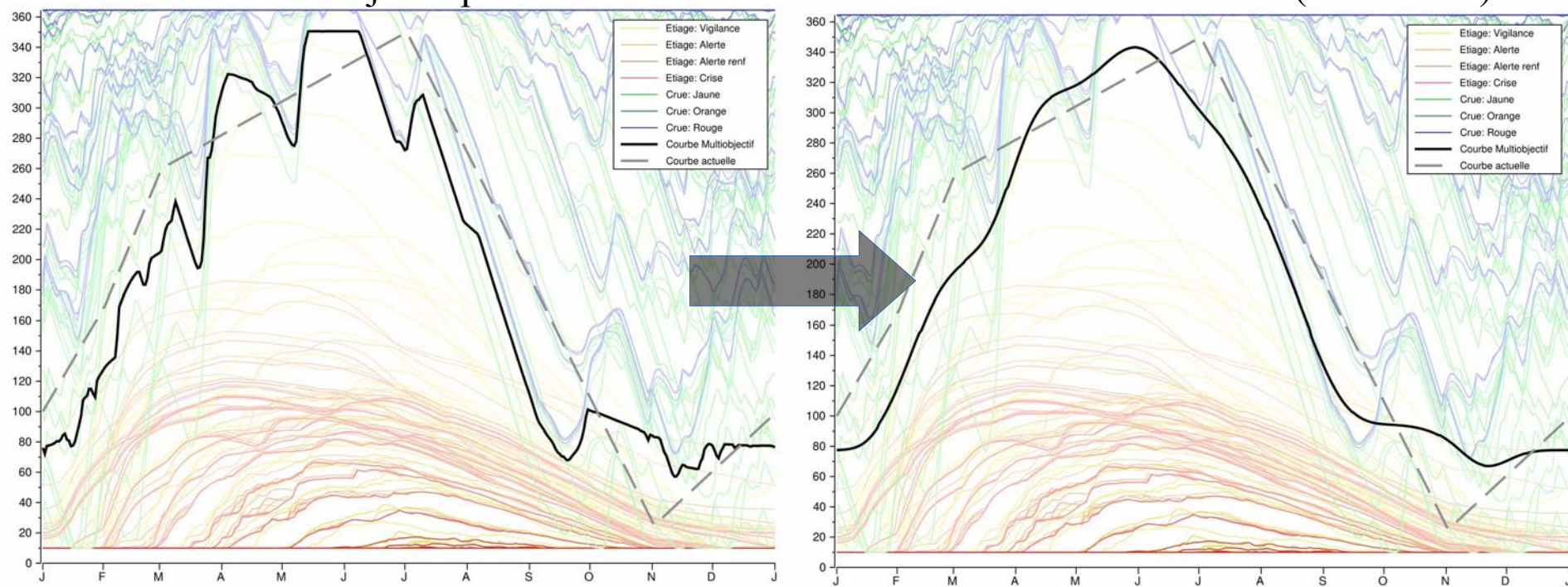
## Construction de courbes multi-objectif

- Calcul d'une fonction "coût" pour un volume donné journalier et sa position par rapport aux courbes iso-fréquence
- Affectation d'une pondération pour chaque tuple [Objectif, station, période de retour]
- Recherche du volume journalier minimisant la somme des coûts pour tous les objectifs



# Construction de courbes multi-objectif

Courbe multi-objectif pour le lac Marne calculée sur les débits naturalisés (1900-2009)



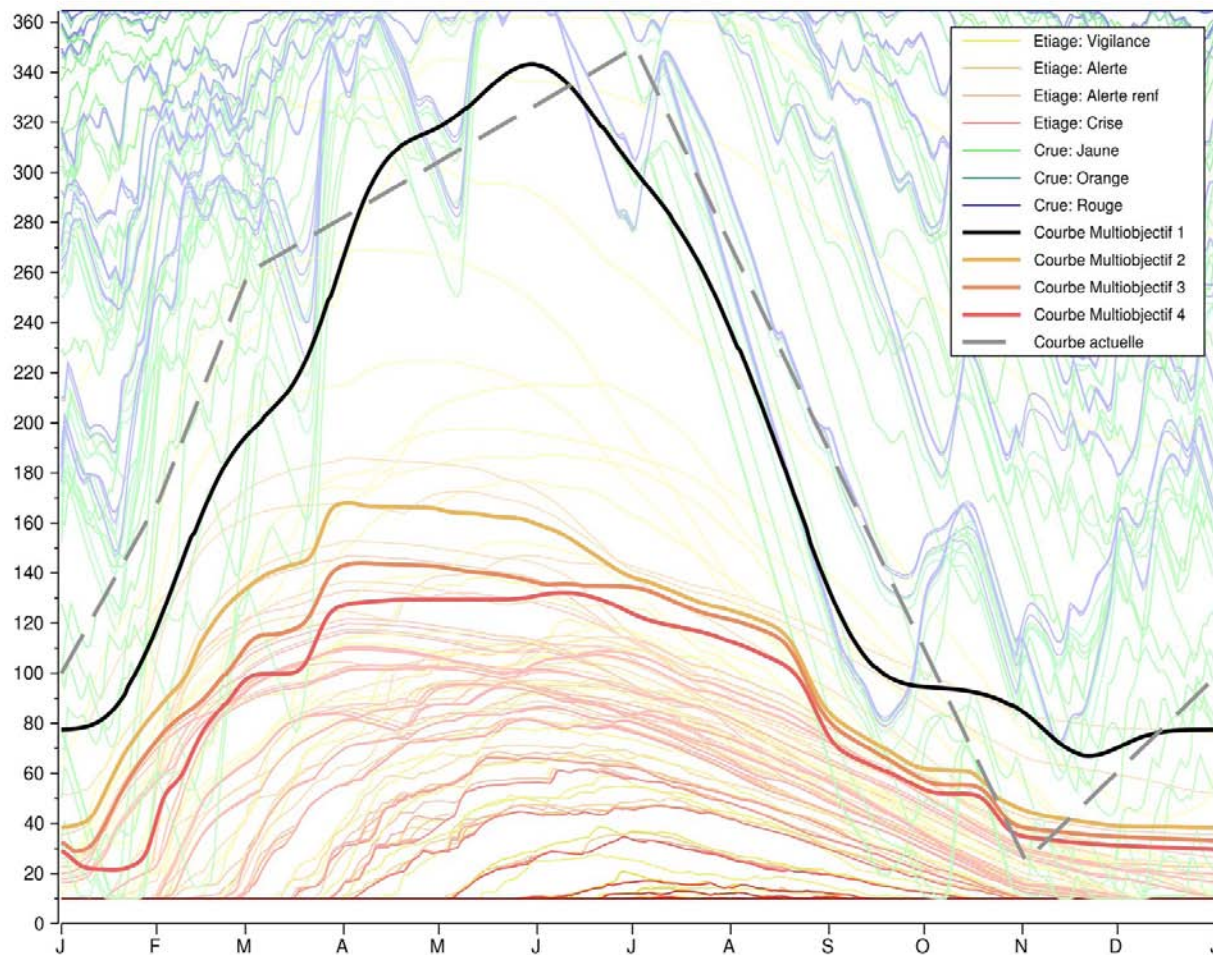


## Problématique du soutien d'étiage

- Les courbes multi-objectif sont construites pour minimiser le risque de non-satisfaction dans le futur (gestion tactique). Pas pour le jour même (gestion opérationnelle).
- Face à une crue ou un étiage, il faut s'écarter de la courbe ce qui augmente les risques pour le futur.
- Nécessité de définir des seuils au delà desquels il faut changer d'objectif pour assurer sa pérennité.

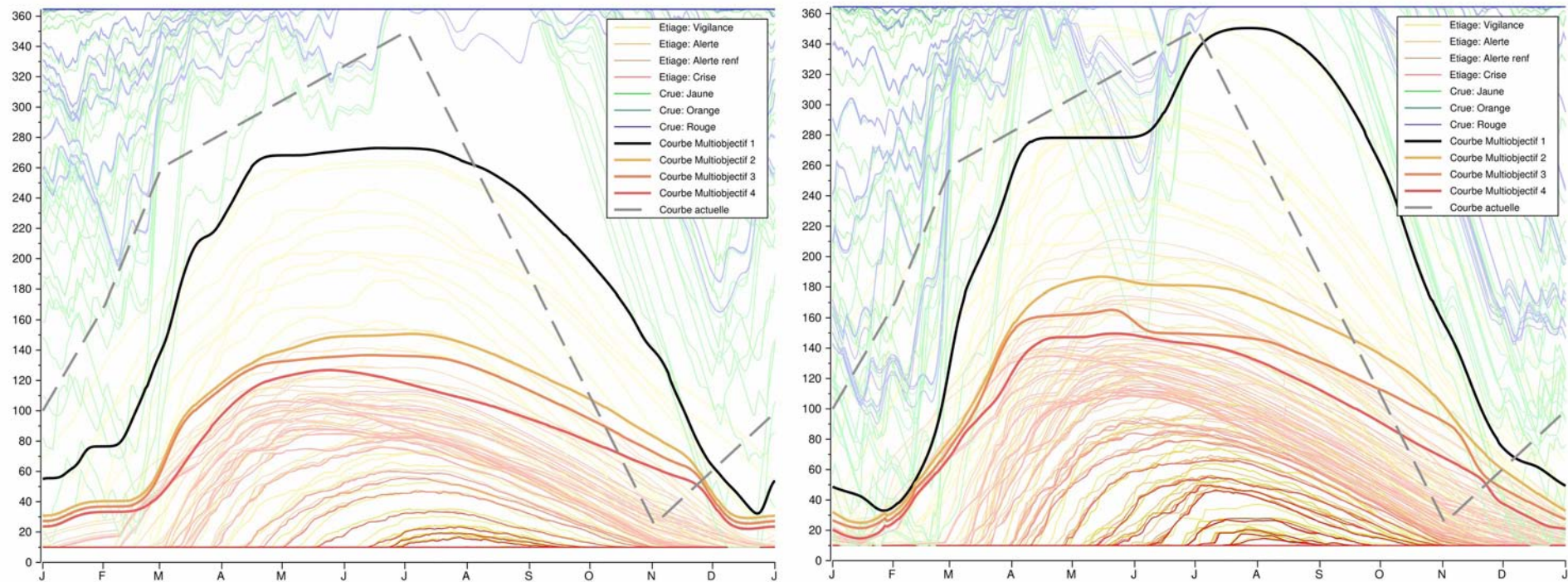
# 4 Courbes pour gérer le risque en soutien d'étiage

Soutien du seuil	Jusqu'à un risque de non satisfaction de soutien du seuil
Vigilance	Alerte de 1/5
Alerte	Alerte renforcée de 1/15
Alerte renforcée	Crise de 1/50
Crise	Vidange du lac





# Application de la méthode pour les scénarios climatiques (7 scénarios cumulés)

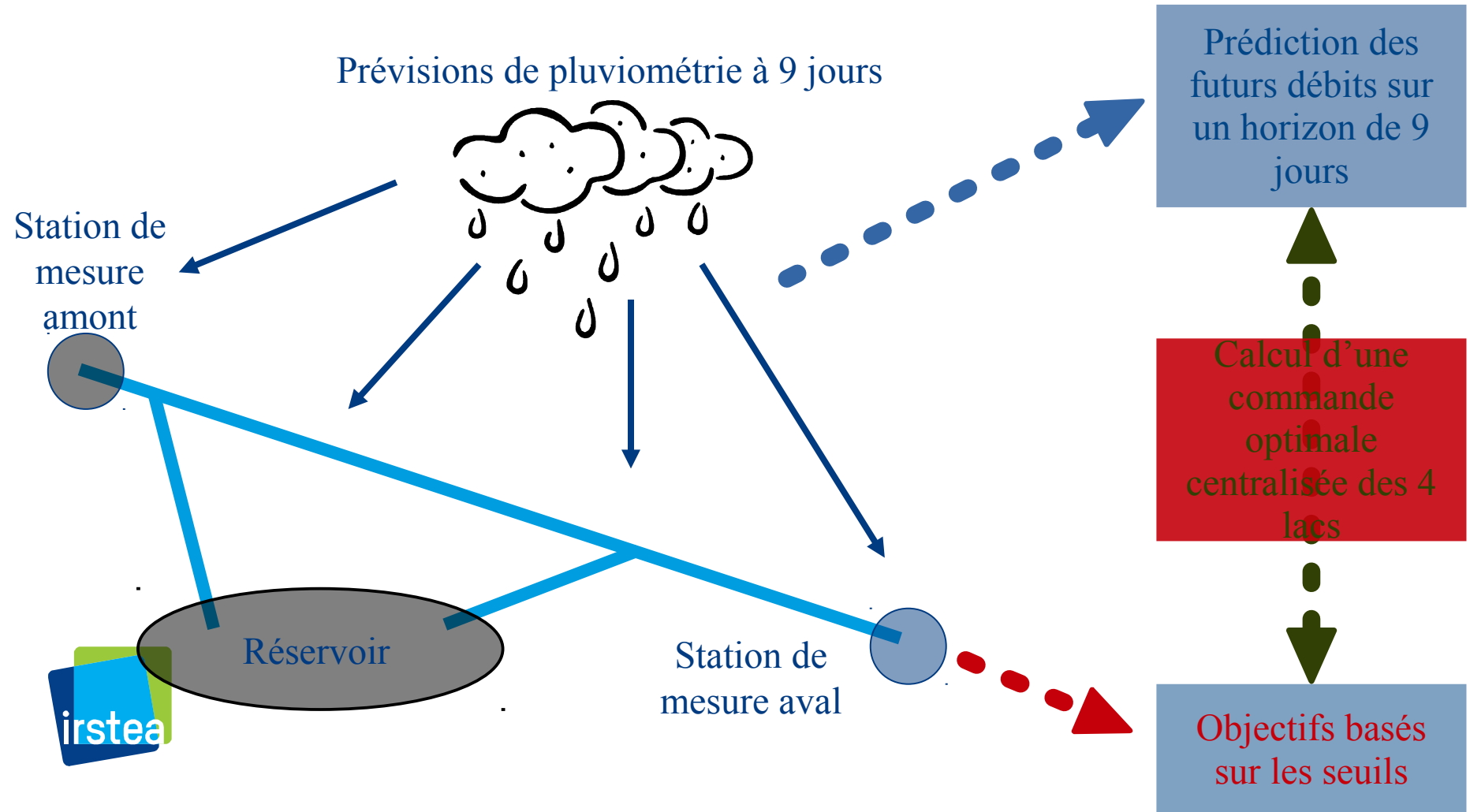


Courbes multi-objectif pour le lac Marne (1961-1991 et 2046-2065)

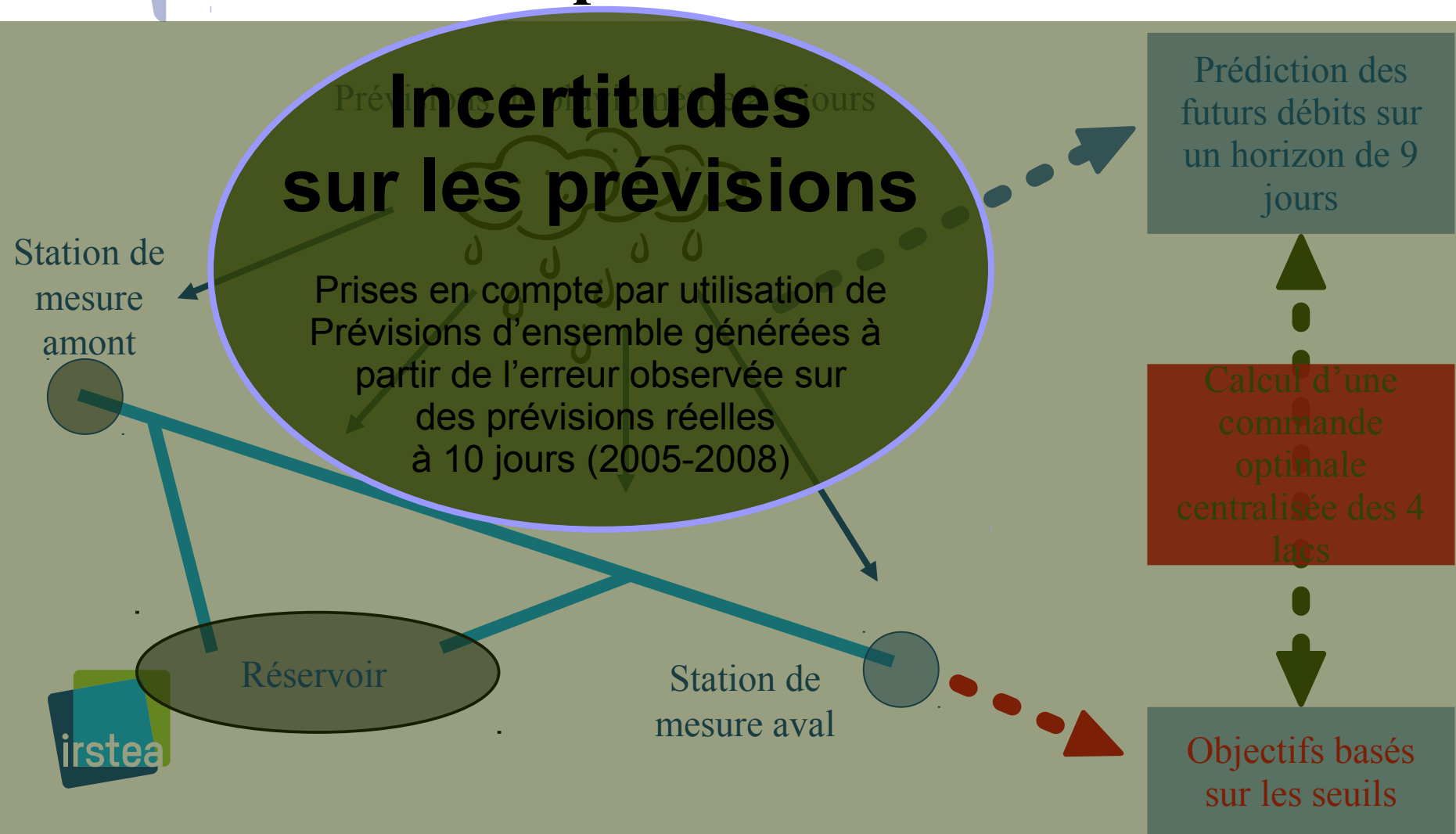


# Adaptation de la gestion opérationnelle

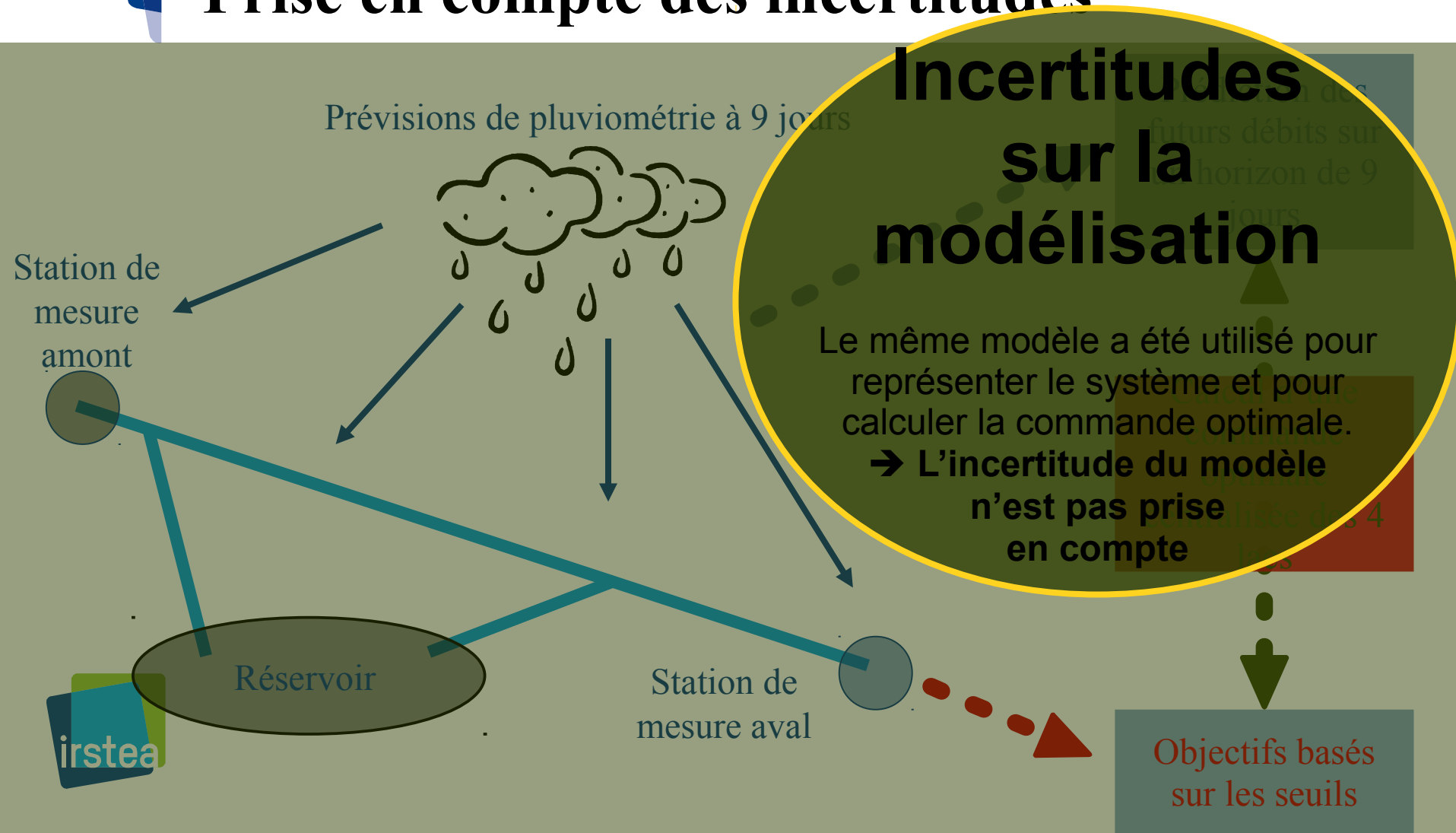
## Qu'est-ce que la commande prédictive ?



# Commande prédictive : Prise en compte des incertitudes



# Commande prédictive : Prise en compte des incertitudes



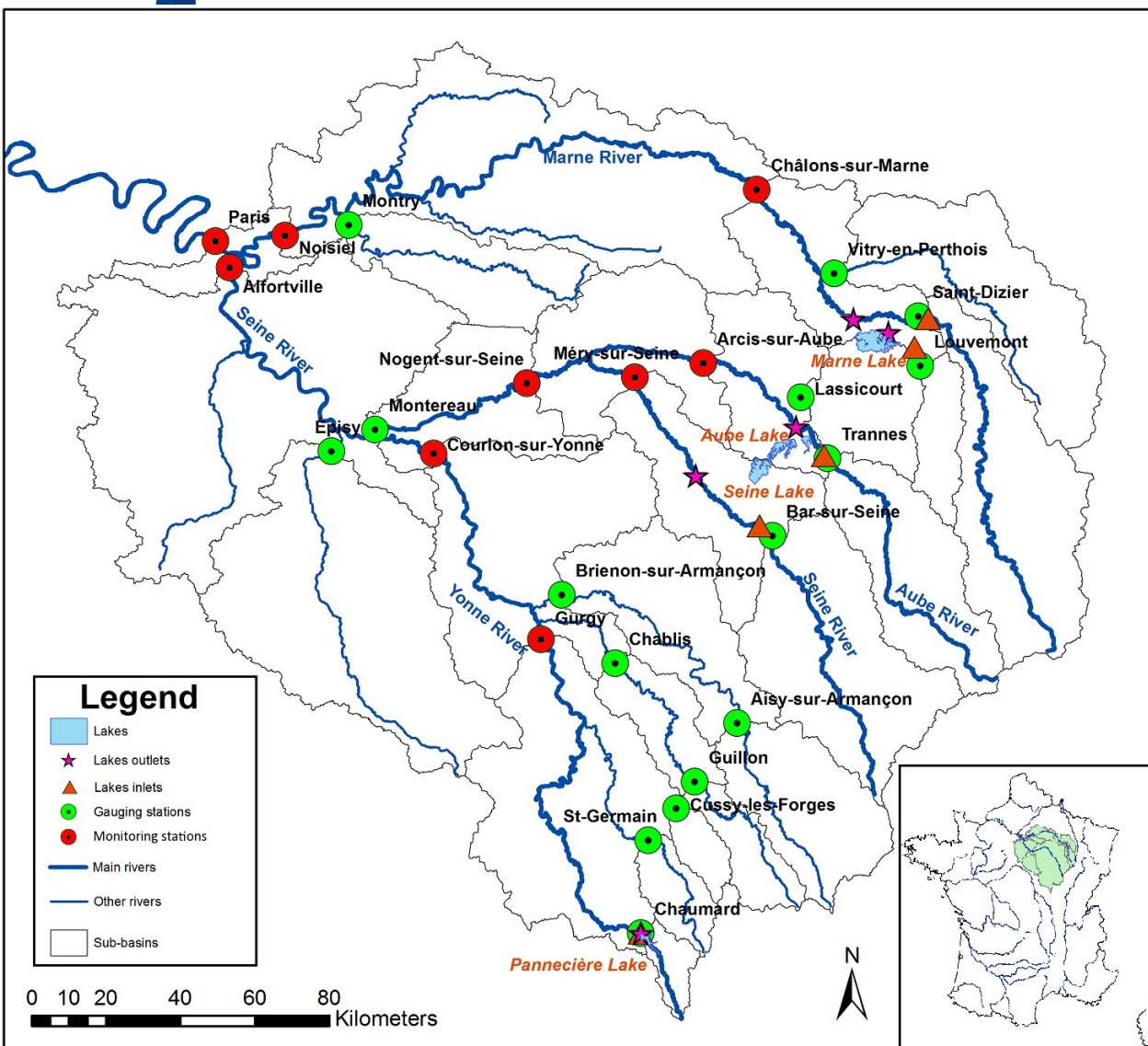


# Plan de la présentation

- Présentation du projet
- Modélisation du bassin versant
- Impact du changement climatique
- Adaptation de la gestion des lacs
- **Comparaison des adaptations**
- Conclusion

# Les objectifs à l'aval des lacs

Basés sur les seuils de crue et d'étiage sur 9 stations de contrôle à l'aval des lacs



Seuils d'étiage (basés sur les seuils de l'arrêtè sècheresse) :

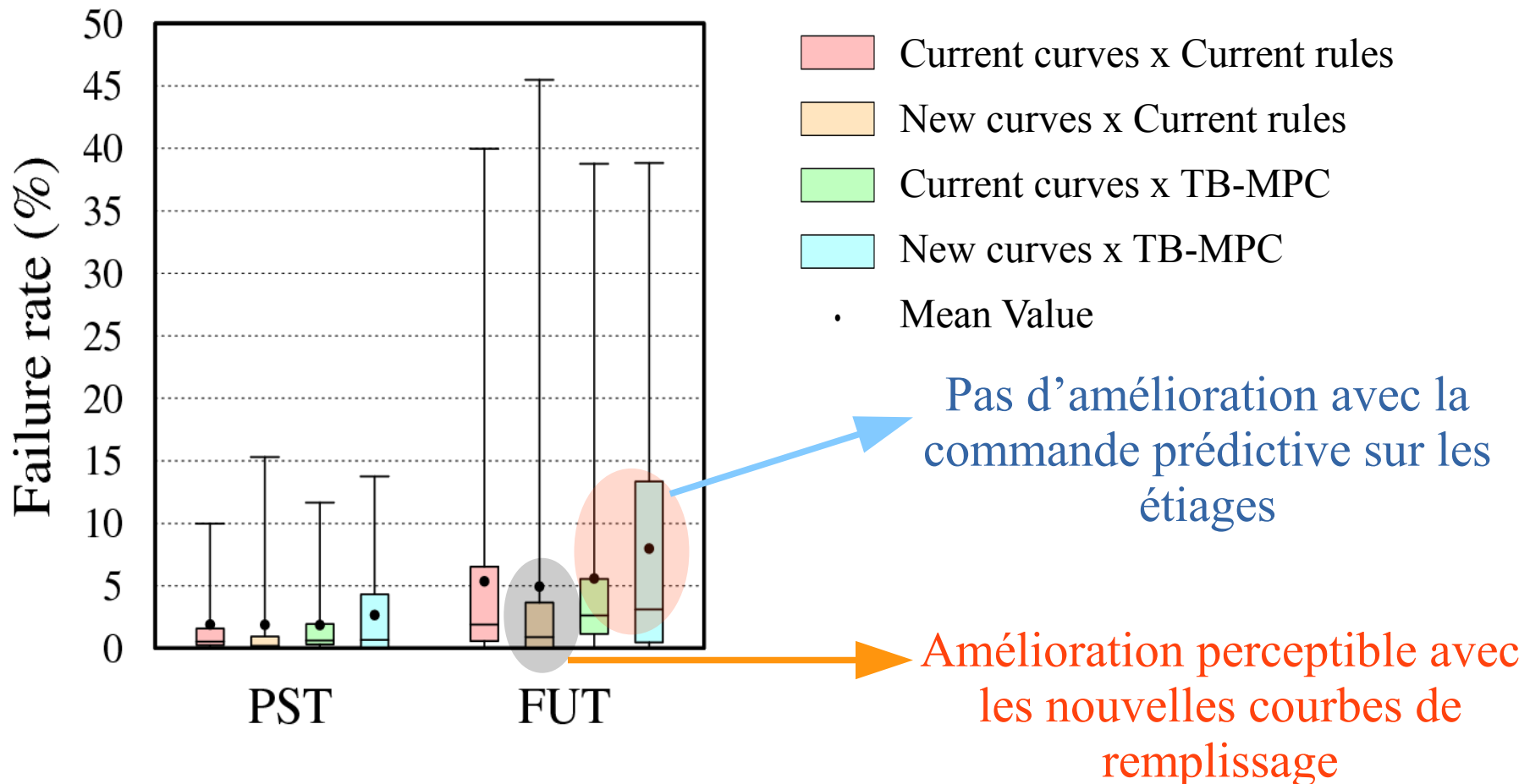
- 1<sup>st</sup>: vigilance
- 2<sup>nd</sup>: alerte
- 3<sup>rd</sup>: alerte renforcée
- 4<sup>th</sup>: crise

Seuils de crue :

- 1<sup>st</sup>: jaune
- 2<sup>nd</sup>: orange
- 3<sup>rd</sup>: rouge

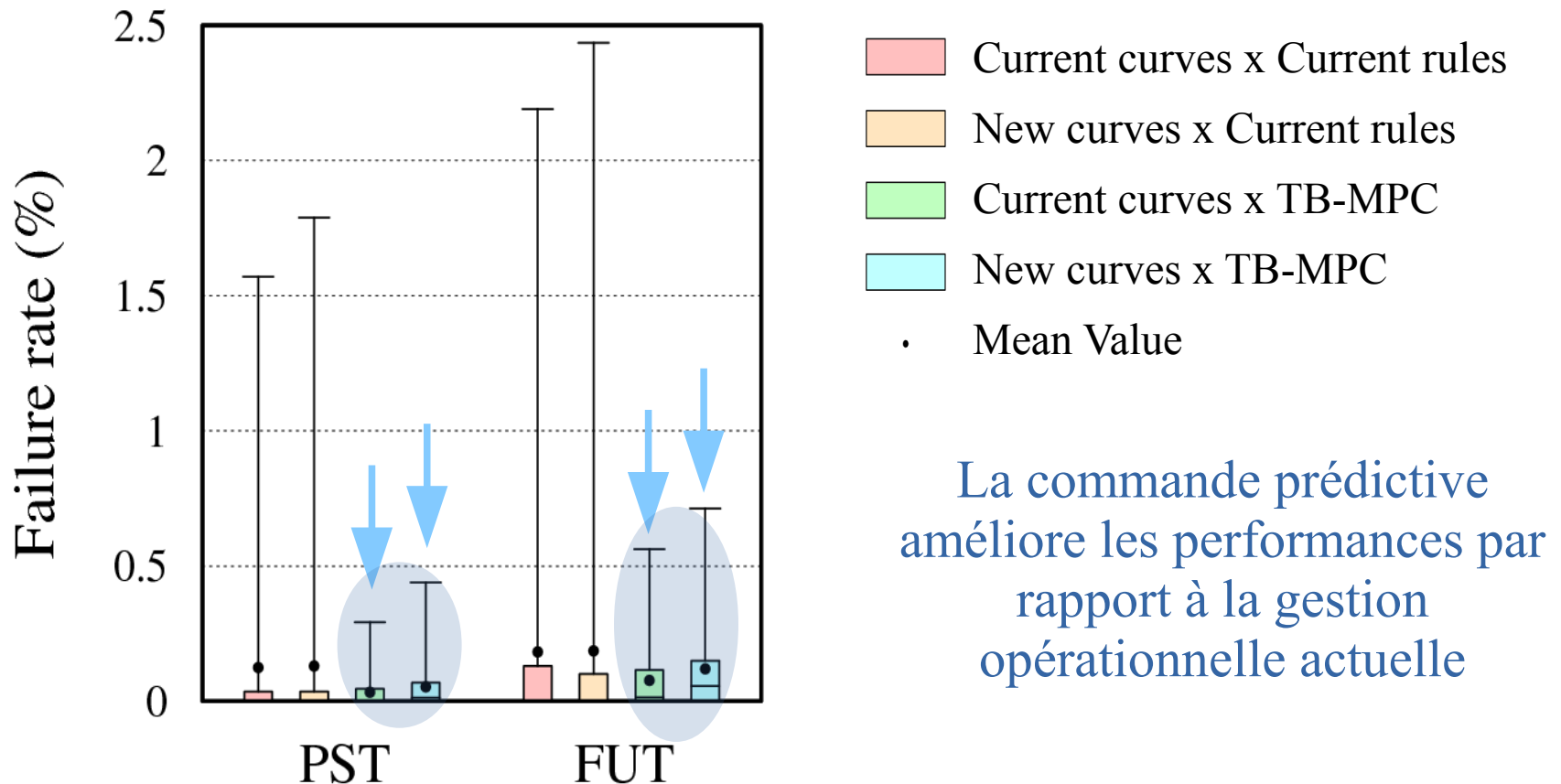
# Comparaison des différentes adaptations

## Etiage : 2<sup>nd</sup> seuil (Alerte)



# Comparaison des différentes adaptations

## Crue : 2<sup>nd</sup> seuil (Orange)





# Plan de la présentation

- Présentation du projet
- Modélisation du bassin versant
- Impact du changement climatique
- Adaptation de la gestion des lacs
- Comparaison des adaptations
- **Conclusion**





# Conclusion 1/2

- **Les débits de la Seine seront affectés par le changement climatique**
  - Avec très probablement un fort impact sur les étiages
- **Adaptation de la gestion tactique** → Nouvelles courbes multi-objectifs
  - Amélioration perceptible des performances en étiage
- **Adaptation de la gestion opérationnelle** → Commande prédictive
  - Amélioration de la gestion sur les événements de crue
  - Problèmes d'optimisation numérique encore à résoudre
  - Difficultés pour résoudre la contradiction des objectifs à court et moyen terme (Les étiages sont plus long que l'horizon de prédiction)
  - Absence de prise en compte des incertitudes du modèle pluie-débit



## Conclusion 2/2

- **Par rapport à la DCE, « Bon état des eaux »** ↔ respect du premier seuil d'étiage (Vigilance)
  - Risque de difficultés importantes dans le futur avec les infrastructures actuelles

## Transfert technologique et perspectives

- **Fourniture d'un outil permettant d'évaluer le risque de non satisfaction d'un objectif à l'aval des lacs**
  - Utilisation dans le cadre des révisions des règlements d'eau des lacs
  - Mise à jour nécessaire pour prise en compte des dernières crues de printemps
- **Perspectives d'amélioration de la gestion des lacs**
  - Utilisation de méthodes multi-critères pour optimiser les règles de remplissage des lacs (Post-Doc Axa)



*Thanks for your attention*



# Indicateurs de performance pour chaque objectif

3 indicateurs :

- Le taux d'échec
- La fréquence d'événement
- La vulnérabilité

