



**HAL**  
open science

# Robustesse des modèles hydrologiques en conditions climatiques non stationnaires

Paul Royer-Gaspard, Vazken Andréassian, Guillaume Thirel

► **To cite this version:**

Paul Royer-Gaspard, Vazken Andréassian, Guillaume Thirel. Robustesse des modèles hydrologiques en conditions climatiques non stationnaires. 4es Rencontres HydroGR, Dec 2021, Antony, France. hal-03537111v1

**HAL Id: hal-03537111**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03537111v1>**

Submitted on 20 Jan 2022 (v1), last revised 24 Feb 2022 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



➤ Robustesse des modèles hydrologiques en conditions climatiques non stationnaires

4<sup>es</sup> Rencontres HydroGR

08/12/2021

**Paul Royer-Gaspard, Vazken Andréassian, Guillaume Thirel**

INRAE

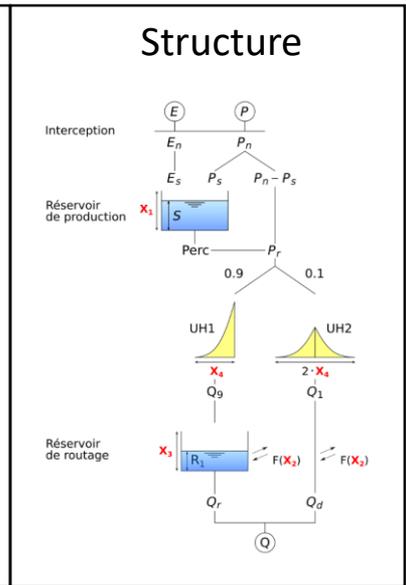
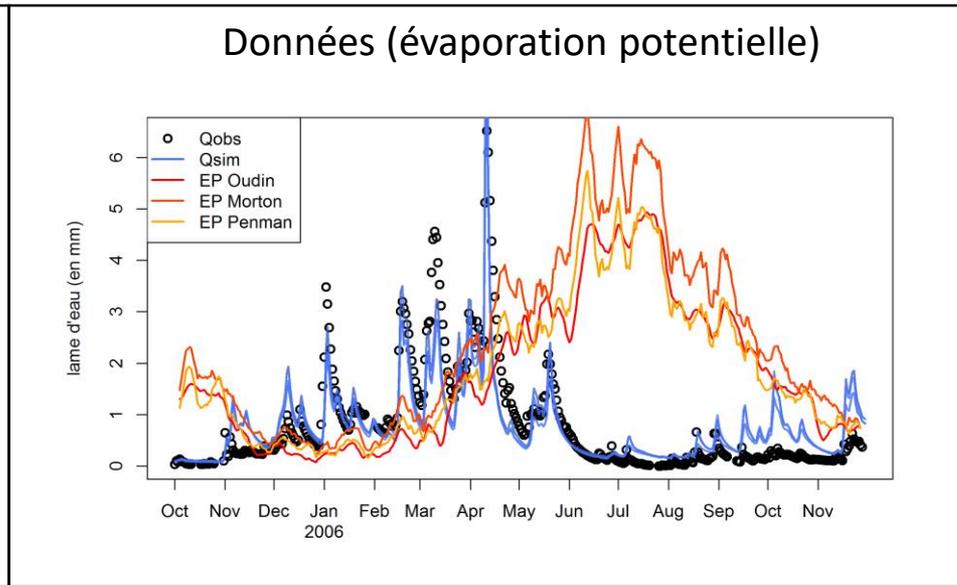
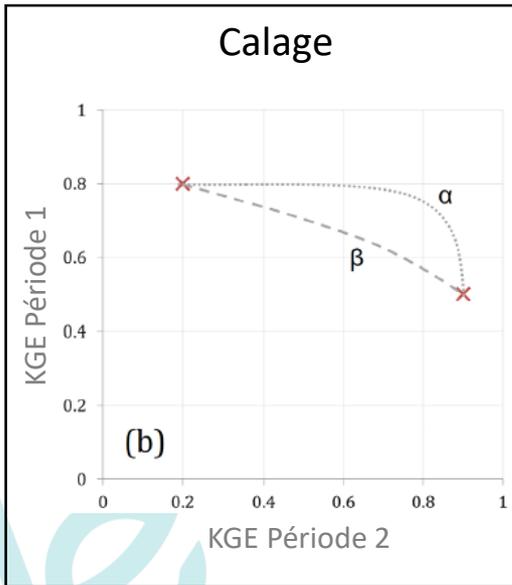
➤ Contexte



# Contexte

## Enjeux de la robustesse des modèles

- Robustesse = capacité des modèles à simuler le régime hydrologique en climat variable
- Applications nombreuses du Differential Split-Sample Test (DSST)  
→ Manque général de robustesse
- Difficulté majeure à l'identification de pistes d'amélioration → imbrication des causes



# > Contexte

## Objectifs

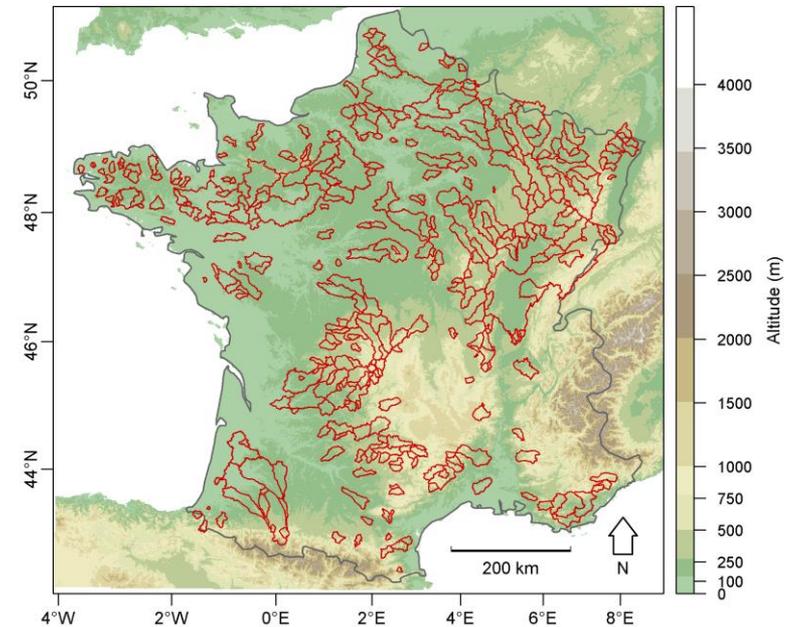
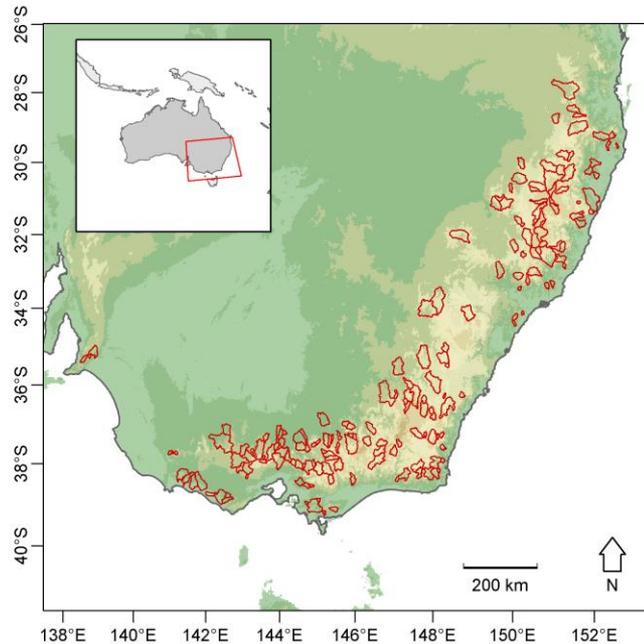
- **Comment améliorer la robustesse des modèles hydrologiques conceptuels ?**
  - Quelles sont les bonnes pratiques en matière de choix de modélisation ? (fonctions objectif, évaporation potentielle)
  - Comment diagnostiquer et améliorer la robustesse de GR4J ?



# ➤ Matériel

## Base de données

- Échantillon de 373 bassins français  
+ 181 bassins versants australiens
- Longues chroniques journalières  
→ Peu influencés  
→ Peu enneigés

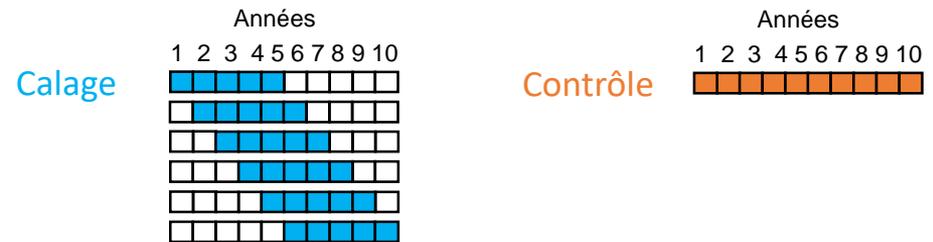


# ➤ Méthodologie

## Évaluation des causes non structurales possibles

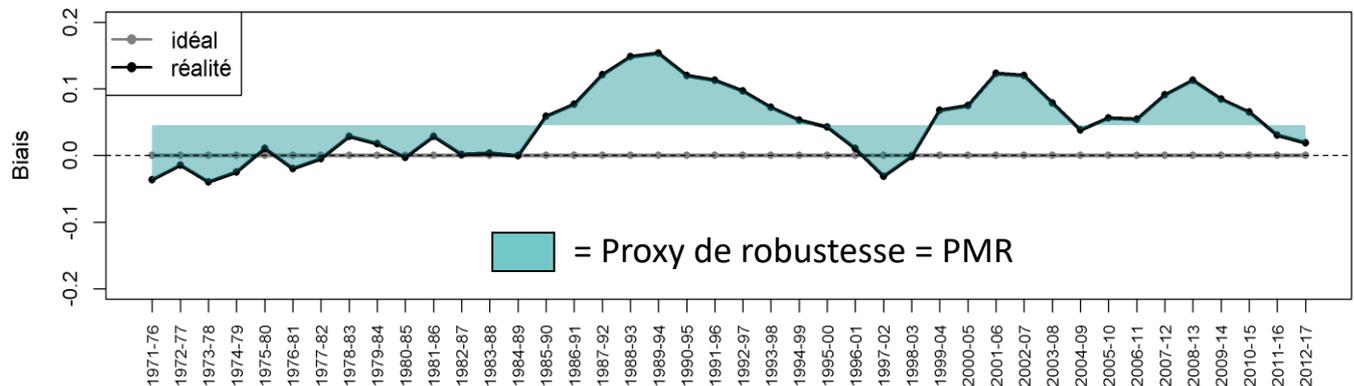
- **Objectif** = évaluer les choix de modélisation hors structure
- **Principe** =
  1. Mise en place d'une procédure systématique de calage-contrôle (GSST)
  2. Comparaison de plusieurs fonctions objectif et formules d'évaporation potentielle

- Generalized Split-Sample Test (GSST)



- Comparaison à partir de trois indicateurs

- NSE
- MARE
- PMR



# ➤ Méthodologie

## Évaluation du potentiel explicatif des causes possibles

- Quatre fonctions objectif

Nom	Avantages
$KGE[Q]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• référence</li> </ul>
$KGE[\sqrt{Q}]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erreurs homoscédastiques</li> </ul>
$SKGE[Q] = \frac{1}{N_y} \sum_{j\text{-th year}}^{N_y} KGE_j[Q]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erreurs interannuelles</li> </ul>
$SKGE[\sqrt{Q}]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erreurs homoscédastiques</li> <li>• erreurs interannuelles</li> </ul>



# ➤ Méthodologie

## Évaluation du potentiel explicatif des causes possibles

- Quatre formules d'évaporation potentielle

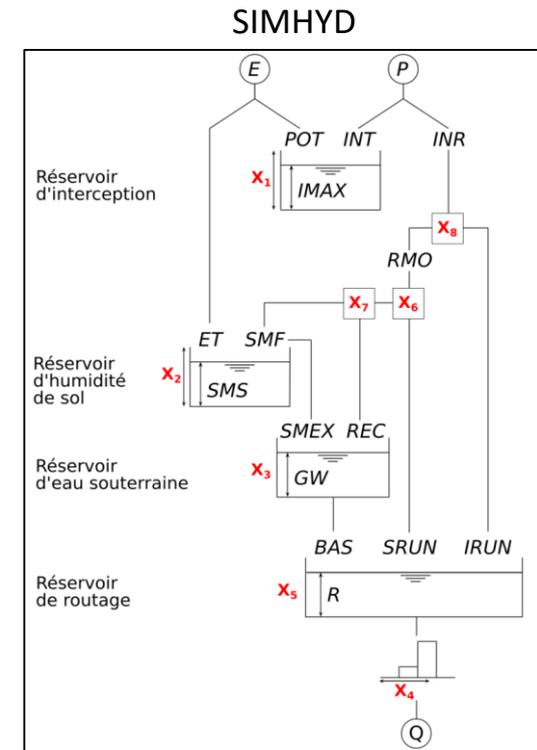
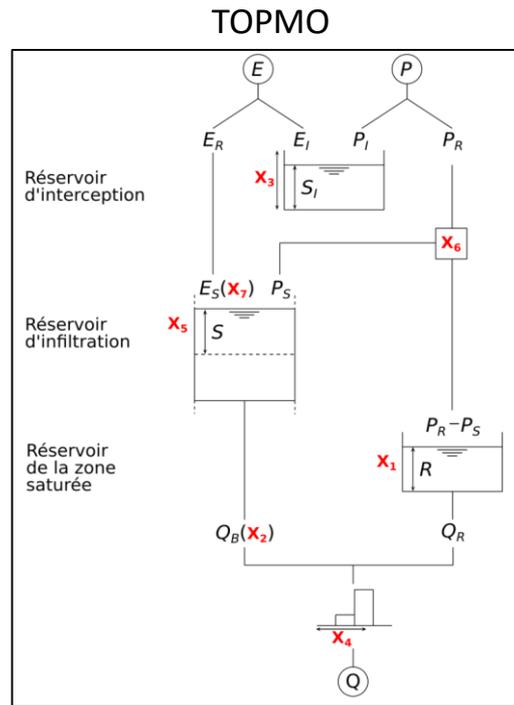
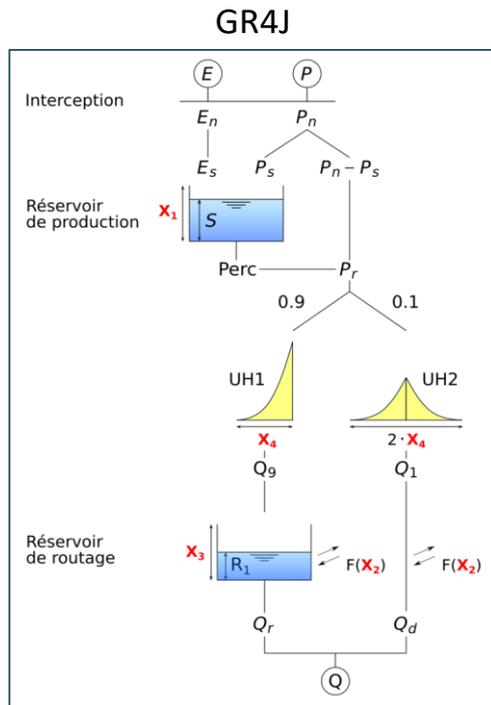
Nom	Type	Variables d'entrée	Avantages
Oudin	Empirique	T	<ul style="list-style-type: none"><li>• Simple</li><li>• Efficace</li></ul>
Morton	Théorique	T, H, R	<ul style="list-style-type: none"><li>• Utilisée en Australie</li></ul>
Penman-Monteith	Théorique	T, H, R, U	<ul style="list-style-type: none"><li>• Populaire</li></ul>
Penman (sans résistance stomatique)	Théorique	T, H, R, U	<ul style="list-style-type: none"><li>• Plus adaptée à la modélisation hydro</li></ul>



# ➤ Méthodologie

## Évaluation du potentiel explicatif des causes possibles

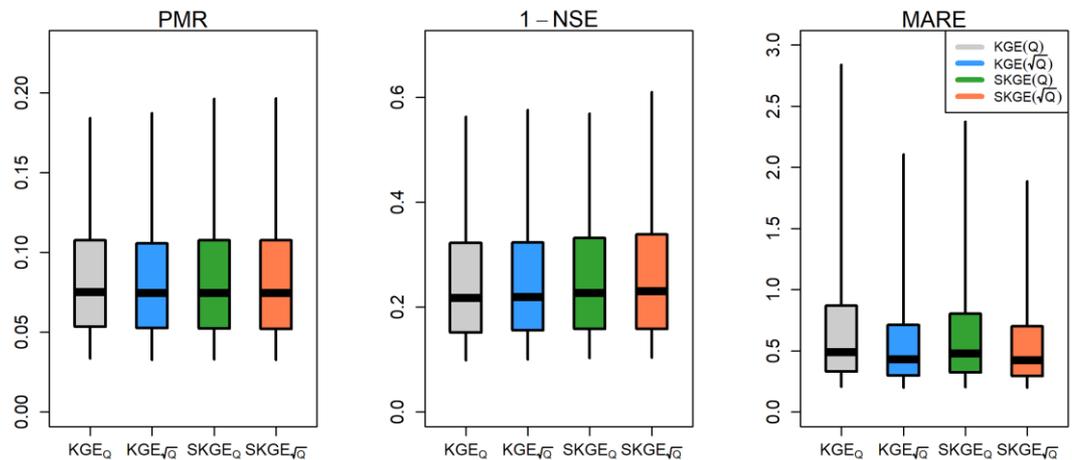
- Trois modèles conceptuels



# ➤ Résultats

## Comparaison des fonctions objectif

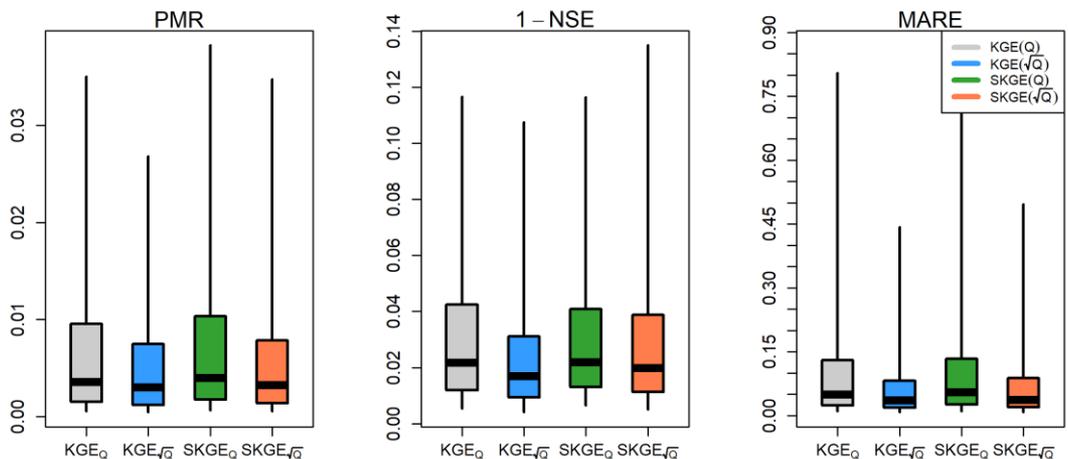
Performances moyennes en contrôle (moyenne sur tous calages)



➔ Robustesse relativement insensible à la fonction objectif

➔  $[\sqrt{Q}]$  = meilleur pour les basses eaux

Variabilité des performances en contrôle (écart-type sur tous calages)



➔  $KGE[\sqrt{Q}]$  moins sensible au choix de la période de calage

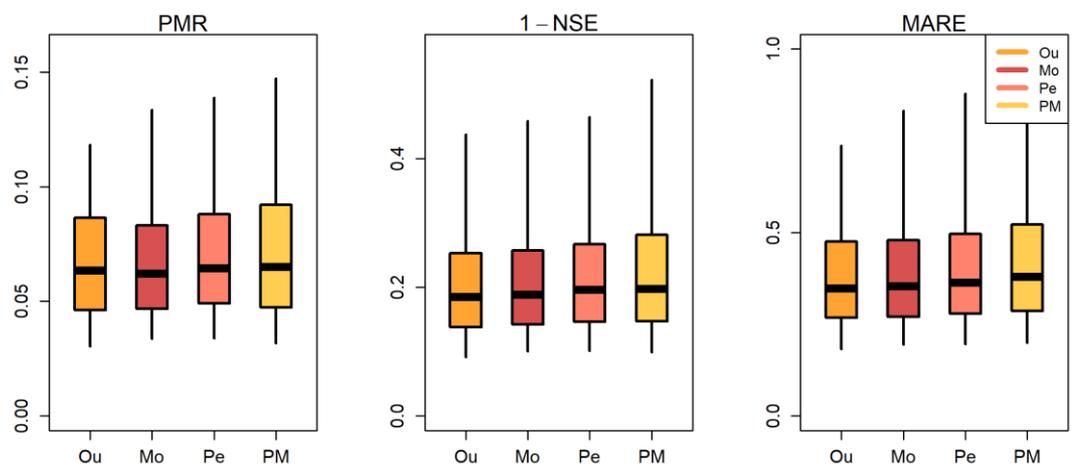
➔  $KGE[\sqrt{Q}]$  le plus robuste



# ➤ Résultats

## Comparaison des formules d'évaporation potentielle

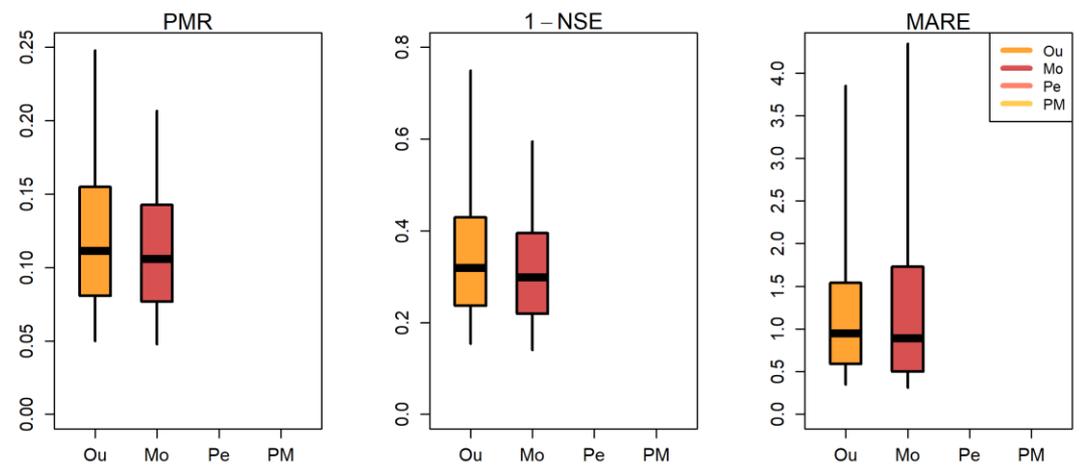
### Performances moyennes en contrôle en France



→ Résultats relativement insensibles au choix de la formule d'EP

→ Oudin = meilleure formule  
Penman-Monteith = pire formule ?

### Performances moyennes en contrôle en Australie

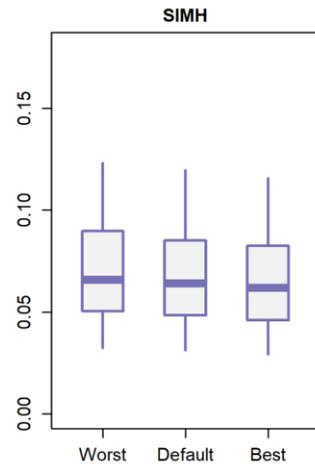
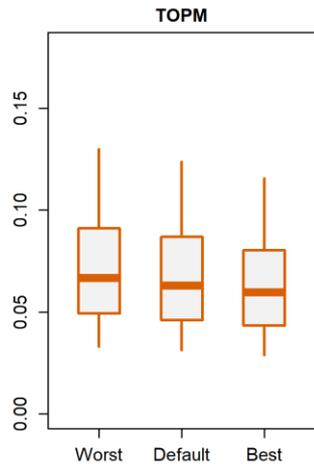
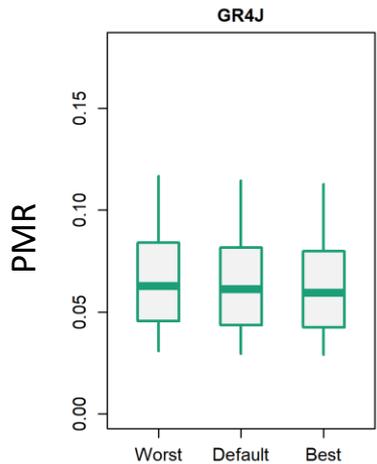


→ Morton = meilleure formule



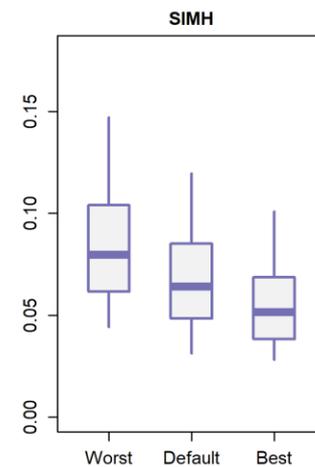
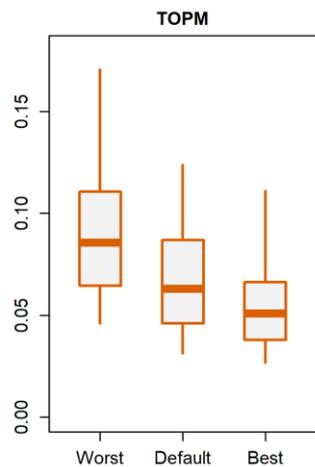
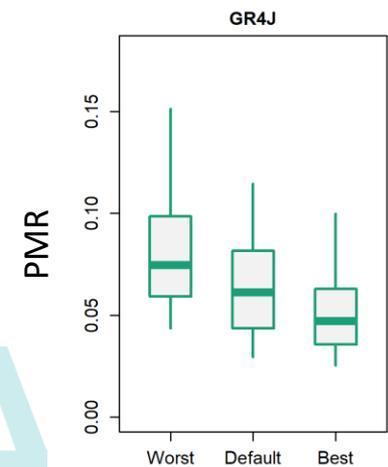
# ➤ Résultats

## Comparaison des marges d'amélioration selon choix de modélisation (France)



Choix de la fonction objectif

→ Peu d'influence



Choix de la formule d'EP

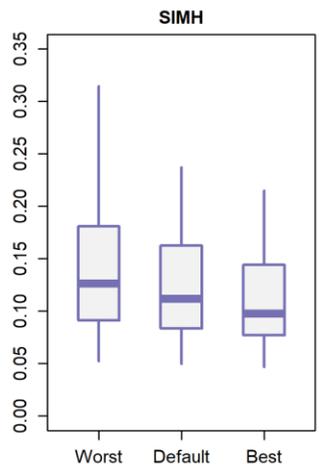
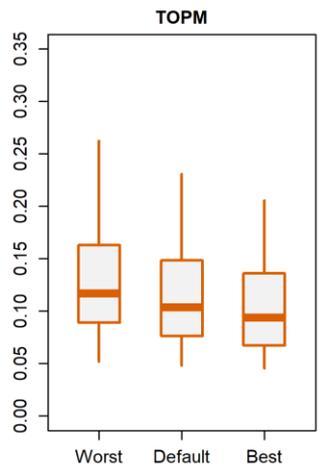
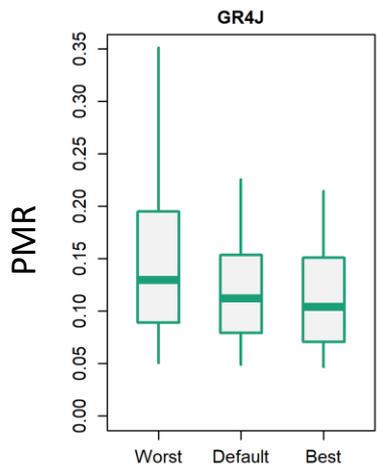
→ Forte influence

→ Forte variabilité spatiale

→ Cohérence entre modèles dans 41% des bassins

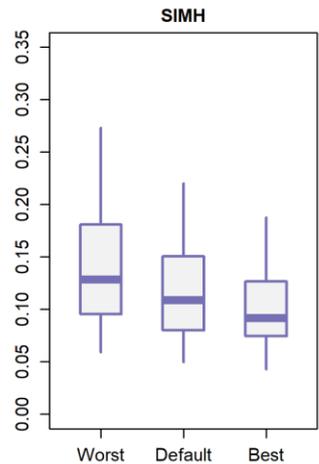
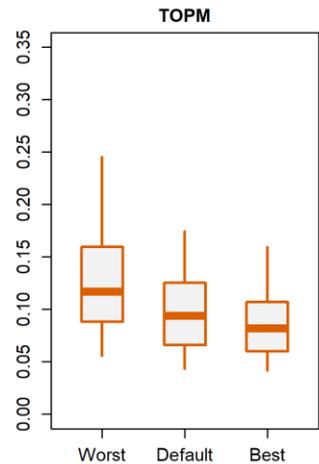
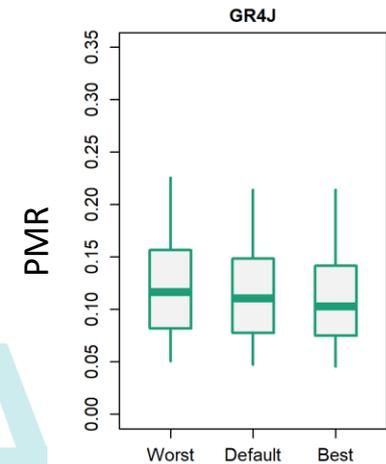
# ➤ Résultats

## Comparaison des marges d'amélioration selon choix de modélisation (Australie)



Choix de la fonction objectif

- Influence non négligeable
- Variabilité spatiale moyenne



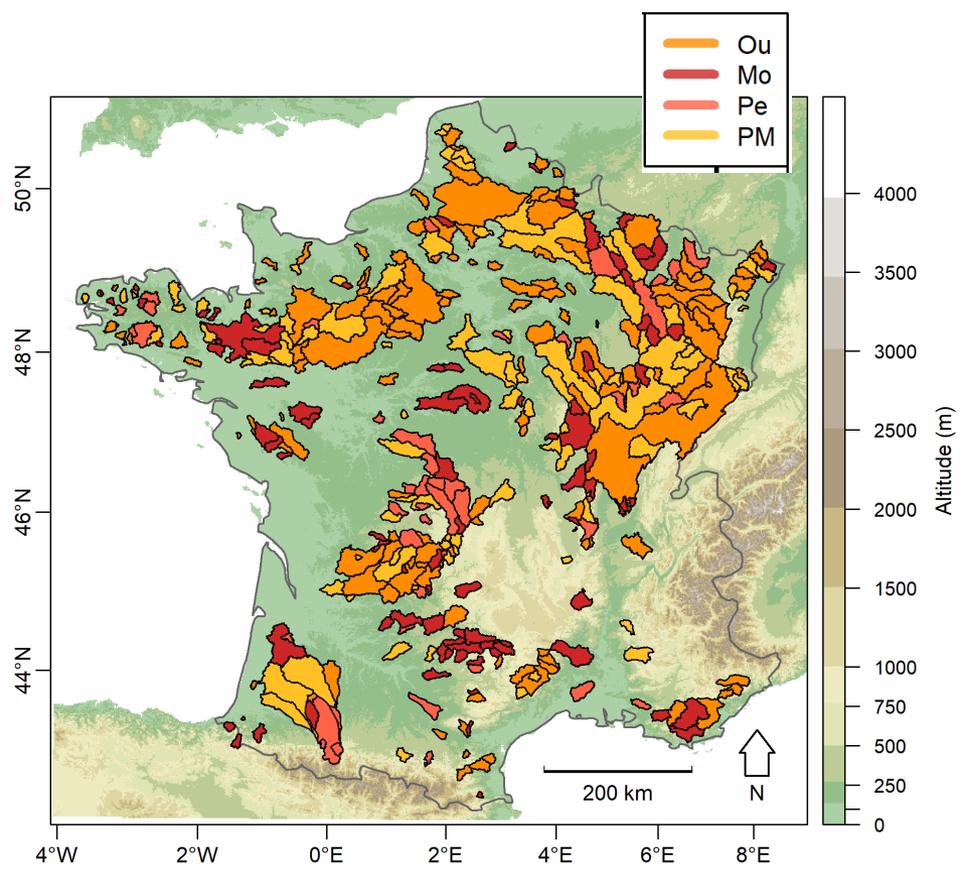
Choix de la formule d'EP

- Influence variable selon modèle
- Variabilité spatiale moyenne
- Cohérence entre modèles dans 50% des bassins

# ➤ Résultats

## Règle pour le choix de la formule d'évaporation potentielle (France)

Carte des meilleures formules d'EP pour GR4J



Règle pour le choix de la formule d'EP ?

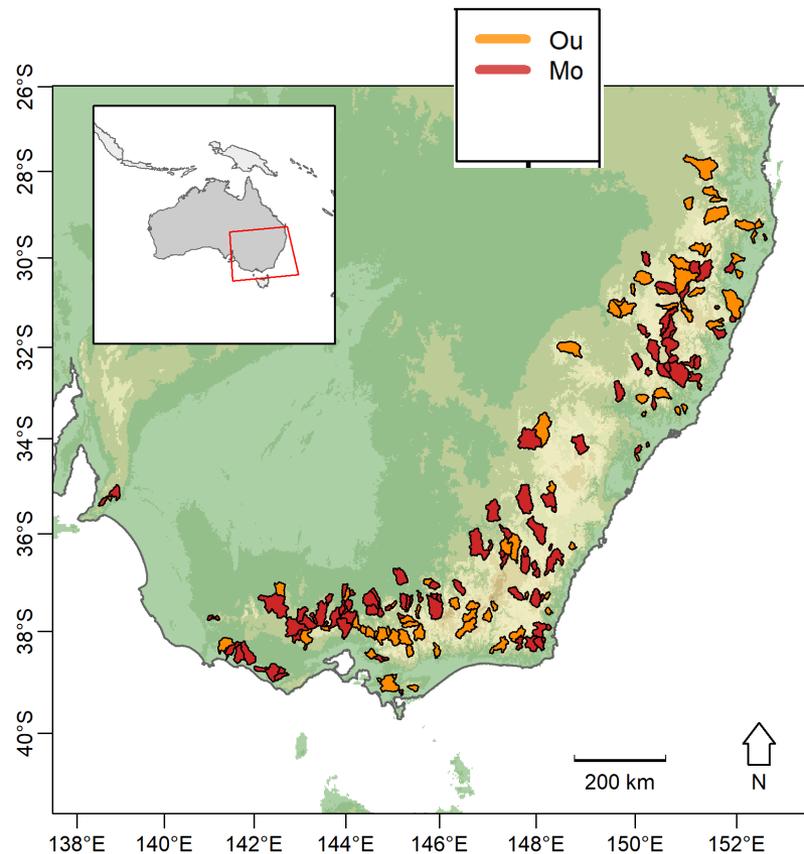
- Oudin pour grands bassins
- Morton pour petits bassins
- Pas de règle évidente pour les autres formules



## ➤ Résultats

### Règle pour le choix de la formule d'évaporation potentielle (**Australie**)

Carte des meilleures formules d'EP pour GR4J



Règle pour le choix de la formule d'EP ?

→ Oudin pour bassins pentus et forestier

## > Conclusion

- **Comment améliorer la robustesse des modèles hydrologiques ?**
  - Recherche de bonnes pratiques en matière de choix de modélisation
  - Comparaison des pistes de recherche
  
- **Messages clés**
  1. Le PMR est un indicateur synthétique et utile de la robustesse
  2. Prendre garde à l'hétéroscédasticité des erreurs en calage
  3. Choix d'une formule d'évaporation potentielle non anodin
  4. Très peu de règles fiables en matière de choix de la formule d'évaporation potentielle
    - Variabilité spatiale incohérente
    - Interactions avec la structure des modèles



INRAE

➤ Annexes



INRAE



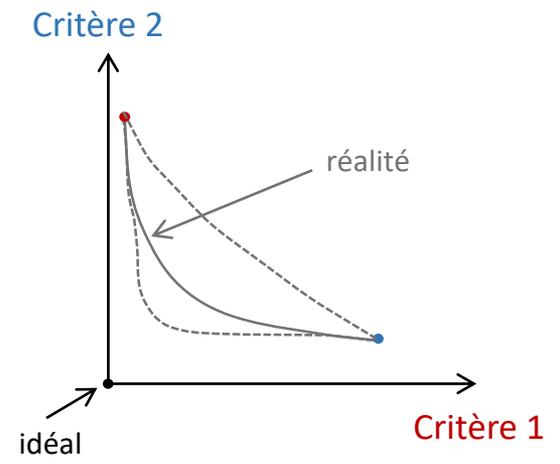
# ➤ Méthodologie

## Analyse structurelle d'un modèle

- **Objectif** = identifier voies d'amélioration d'un modèle en limitant les compromis entre critères de performance

- **Principe de la méthode**

1. Chercher critères de performance incompatibles
2. Groupes incompatibles de critères compatibles
3. Analyser les paramètres et états du modèle en optimisant chaque groupe de critère

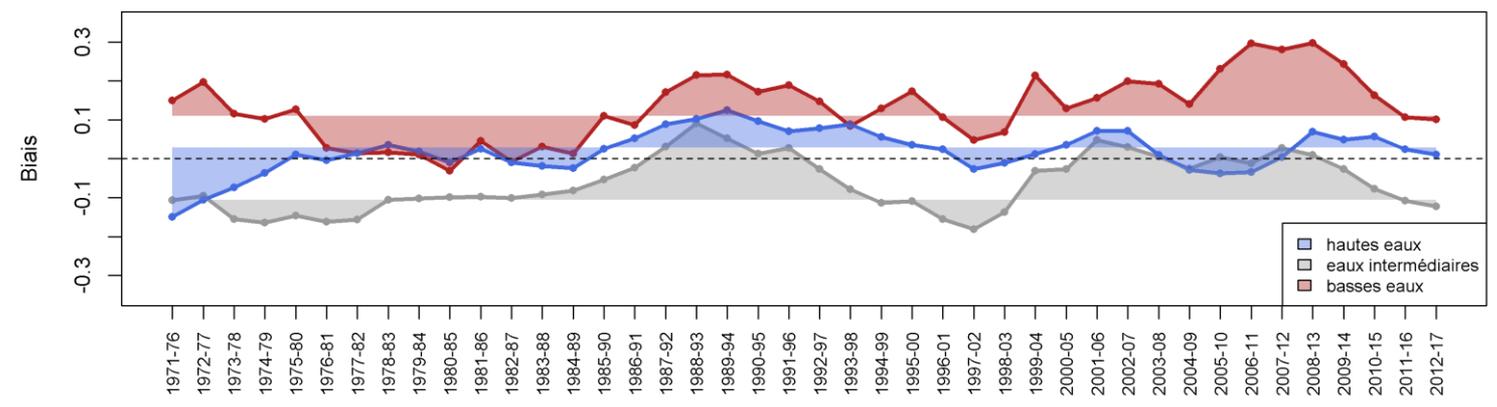


- **Application à GR4J**

=> 3 groupes (critères basses eaux, eaux intermédiaires, hautes eaux)

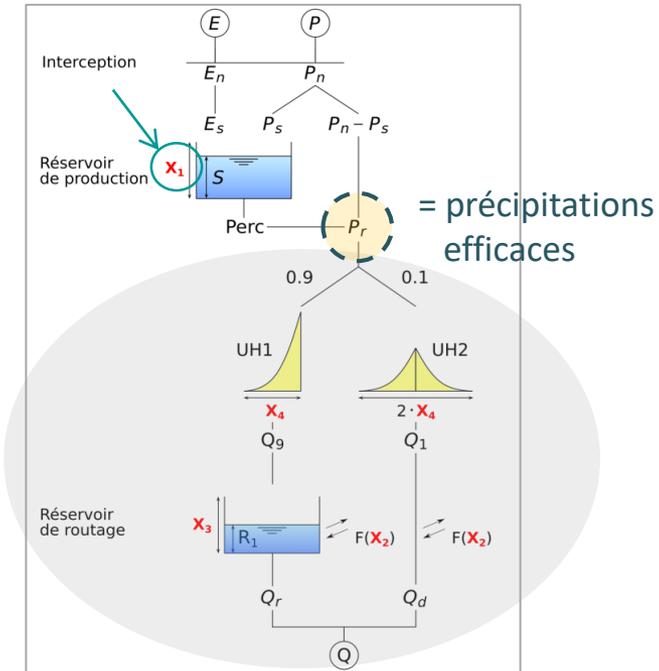
1 groupe de critère =

BIAIS + PMR

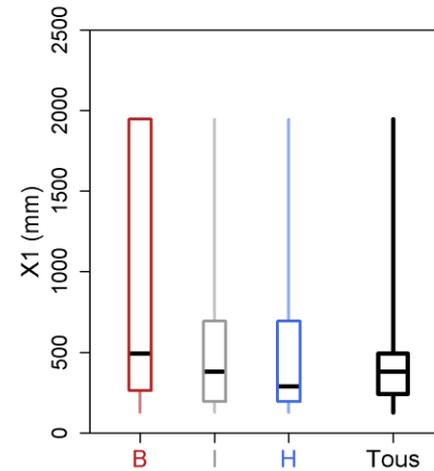


# ➤ Résultats

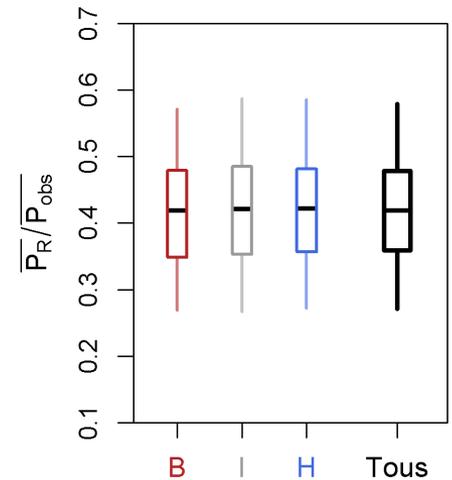
## Analyse de la fonction de production de GR4J



Taille du réservoir de production

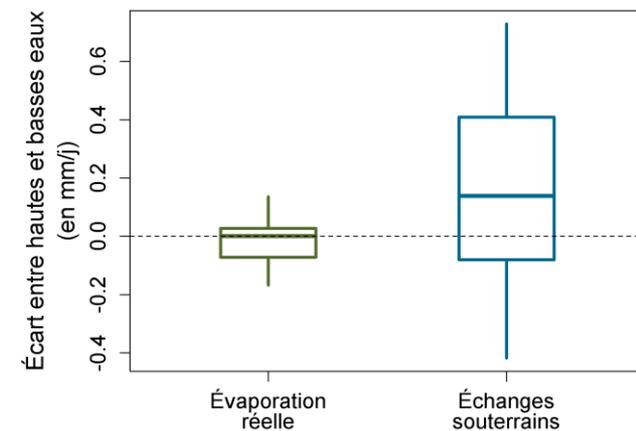


Rendement du réservoir de production



Sur quel flux agissent les paramètres en calage pour contrôler le bilan hydrique du modèle ?

➔ Échanges souterrains quasi exclusivement

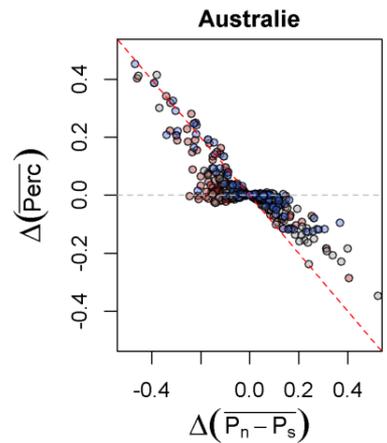
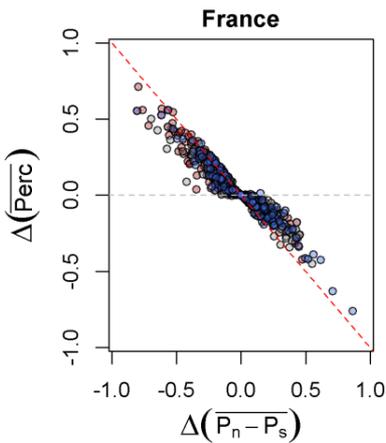


# ➤ Résultats

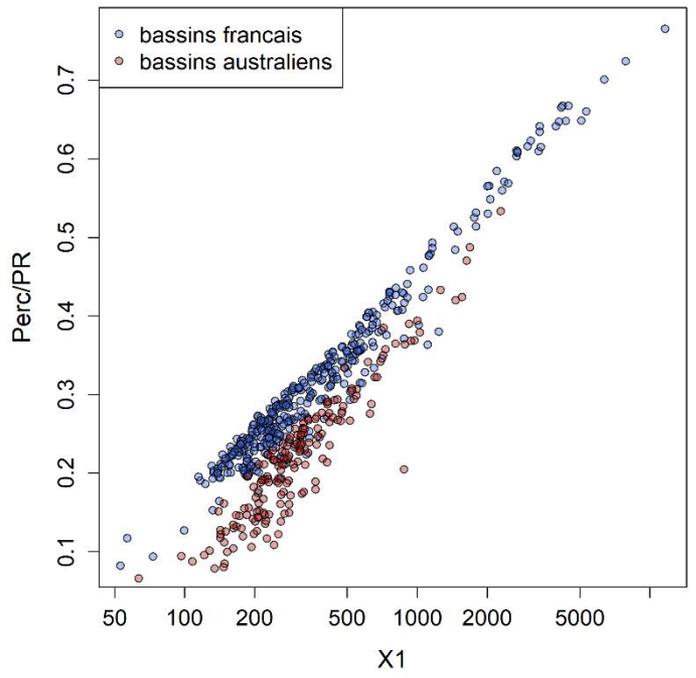
## Analyse de la fonction de production de GR4J

Taille du réservoir de production presque sans influence sur le rendement du modèle  
➔ Pourquoi ?

Percolation en fonction des précip. non captées



Relation entre comportement et taille du réservoir



- Compensation entre variations des deux termes
- Moins forte en Australie ?

$$Perc = S * \frac{1}{4} \left( \frac{4S}{9X_1} \right)^4$$

dépend de  $X_1$

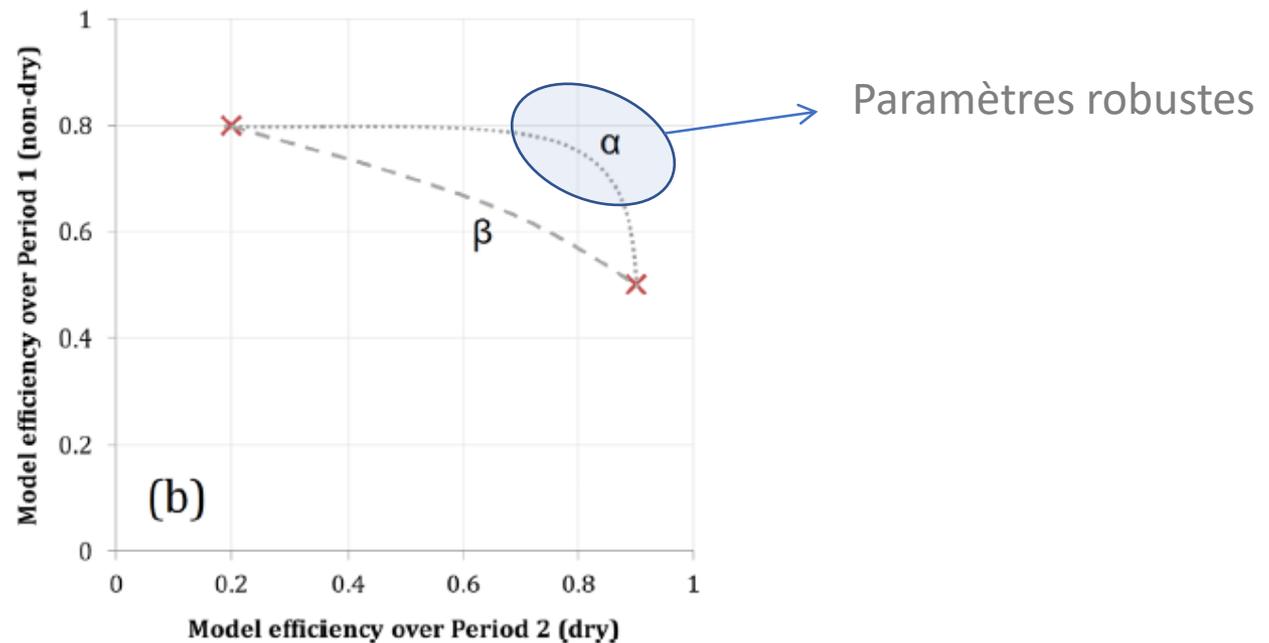
$$\frac{S}{X_1} \begin{cases} = 0,43 \text{ en Australie} \\ = 0,54 \text{ en France} \end{cases}$$

quasi indépendant de  $X_1$  dans les faits

# ➤ Problématique

Pistes d'amélioration en dehors de la structure des modèles

- Calage des modèles
  - Sous-optimalité des paramètres (algorithmes)
  - Optimum mathématique  $\neq$  optimum hydrologique (fonction objectif)



Fowler et al., 2016

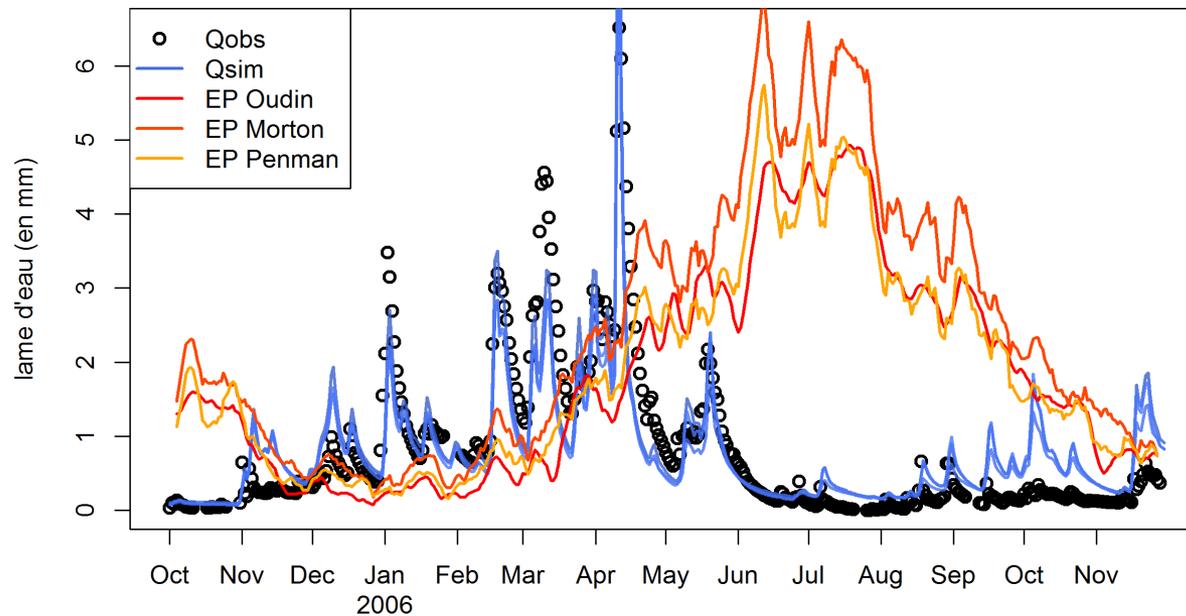


# ➤ Objectifs

## Pistes d'amélioration en dehors de la structure des modèles

- Evaporation potentielle
  - Evaluation directe difficile
  - Faible sensibilité des modèles hydrologiques
  - Compensation en calage

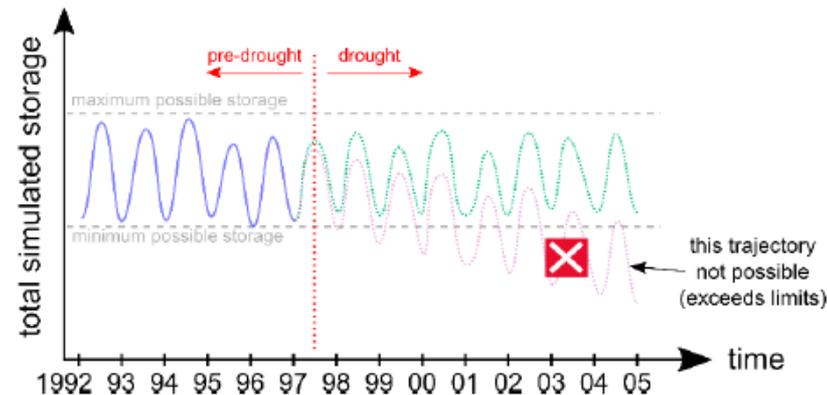
La Teyssonne à Changy



# ➤ Objectifs

## Pistes d'amélioration des modèles

- Structure des modèles
  - Processus manquants
  - Processus mal paramétrés
  - Identification difficile (calage + données d'entrée)



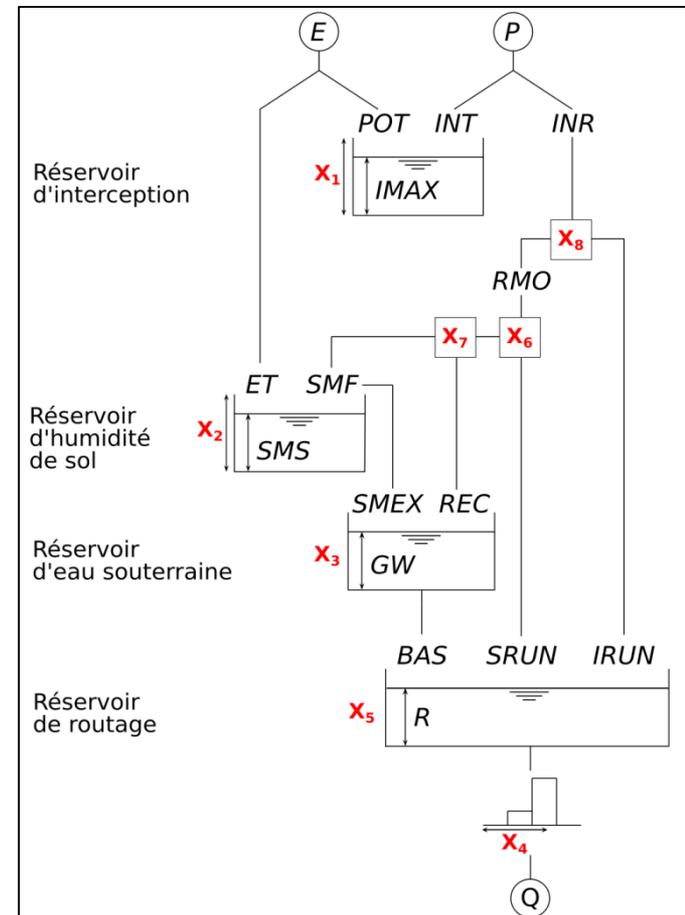
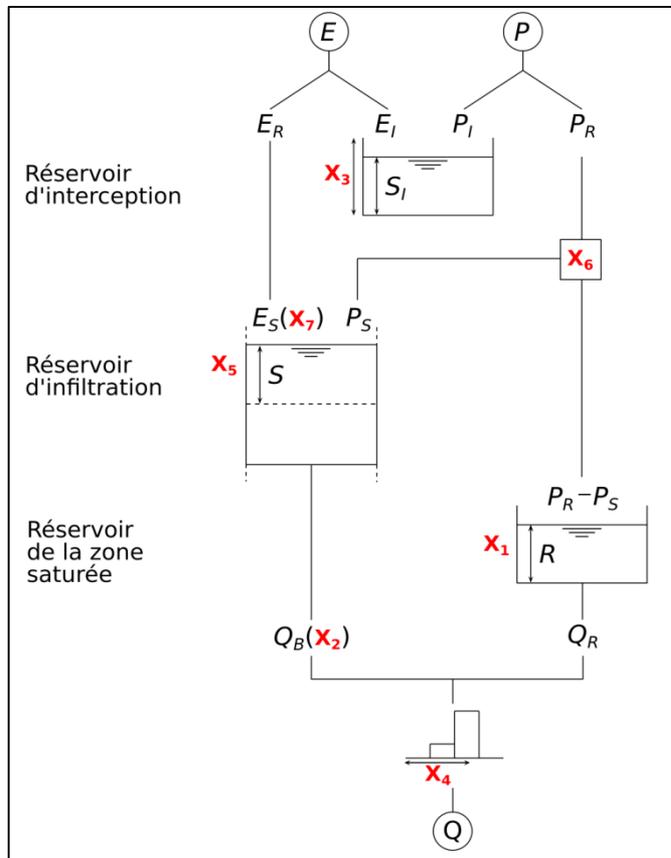
Fowler et al., 2020



# ➤ Matériel

## Modèle hydrologique

- Modèle TOPMO
- Modèle SimHyd



# ➤ Comparaison des fonctions objectif

## Comparaison de fonctions objectif

- 4 fonctions objectif adaptées du KGE

$$KGE = 1 - \sqrt{(\rho - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

$$\rho = \text{cor}(Q_o, Q_s) \quad ; \quad \alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad ; \quad \beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$$

Nom	Avantages
$KGE[Q]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>référence</li> </ul>
$KGE[\sqrt{Q}]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>erreurs homoscedastiques</li> </ul>
$SKGE[Q] = \frac{1}{N_y} \sum_{j\text{-th year}}^{N_y} KGE_j[Q]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>erreurs interannuelles</li> </ul>
$SKGE[\sqrt{Q}]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>erreurs homoscedastiques</li> <li>erreurs interannuelles</li> </ul>



# ➤ Comparaison des formules d'évaporation potentielle

Comparaison de plusieurs formules

- Quatre formules d'EP

Nom	Type	Variables d'entrée	Avantages
Oudin	Empirique	T	<ul style="list-style-type: none"><li>• Simple</li><li>• Efficace</li></ul>
Morton	Théorique	T, H, R	<ul style="list-style-type: none"><li>• Utilisée en Australie</li></ul>
Penman-Monteith	Théorique	T, H, R, U	<ul style="list-style-type: none"><li>• Populaire</li></ul>
Penman (sans résistance stomatique)	Théorique	T, H, R, U	<ul style="list-style-type: none"><li>• Plus adaptée à la modélisation hydro</li></ul>

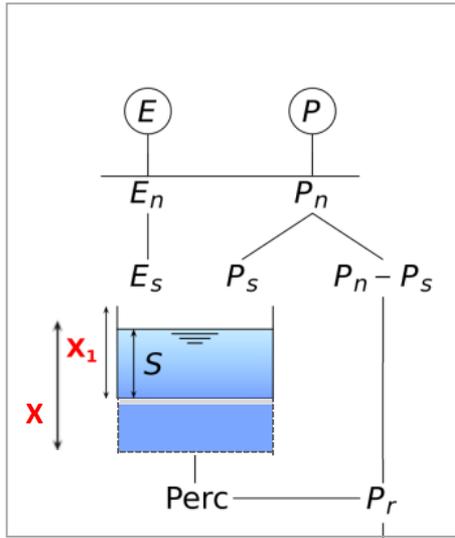


# ➤ Résultats

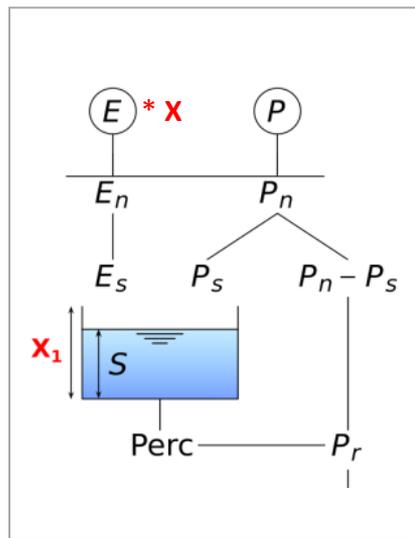
## Modifications de la structure de GR4J

- Constat : Quasi insensibilité du rendement du réservoir de production aux paramètres
- Solutions testées : Paramétrage du comportement du réservoir de production

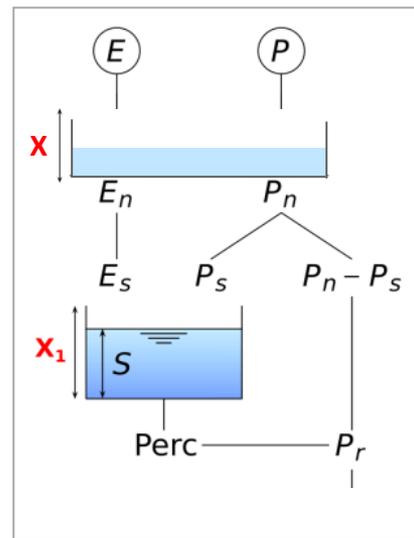
Réservoir virtuel



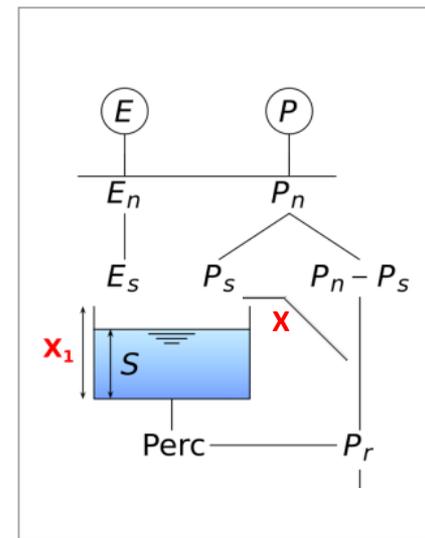
Correction de l'EP



Réservoir d'interception



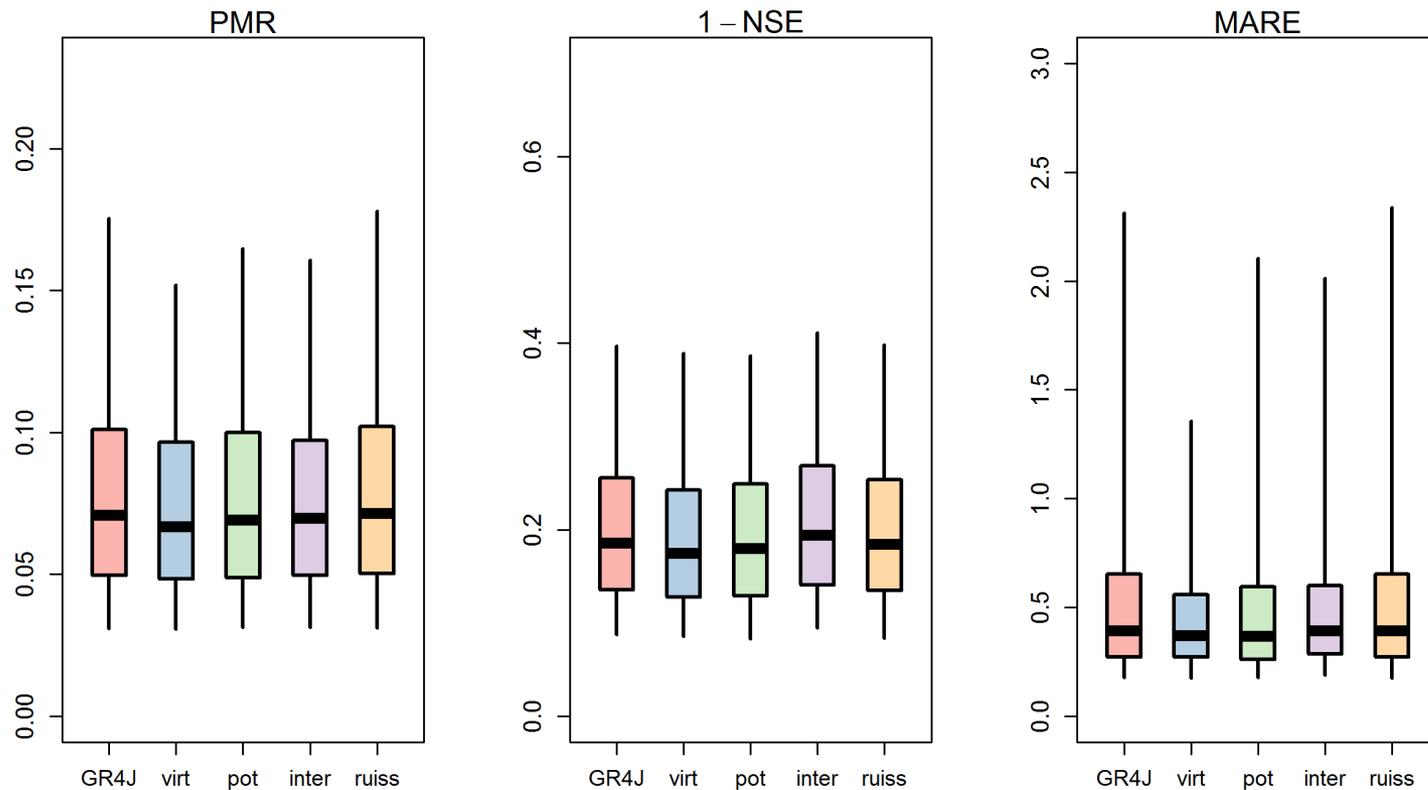
Ruissellement par pluies intenses



# ➤ Résultats

## Modifications de la structure de GR4J

- En calage



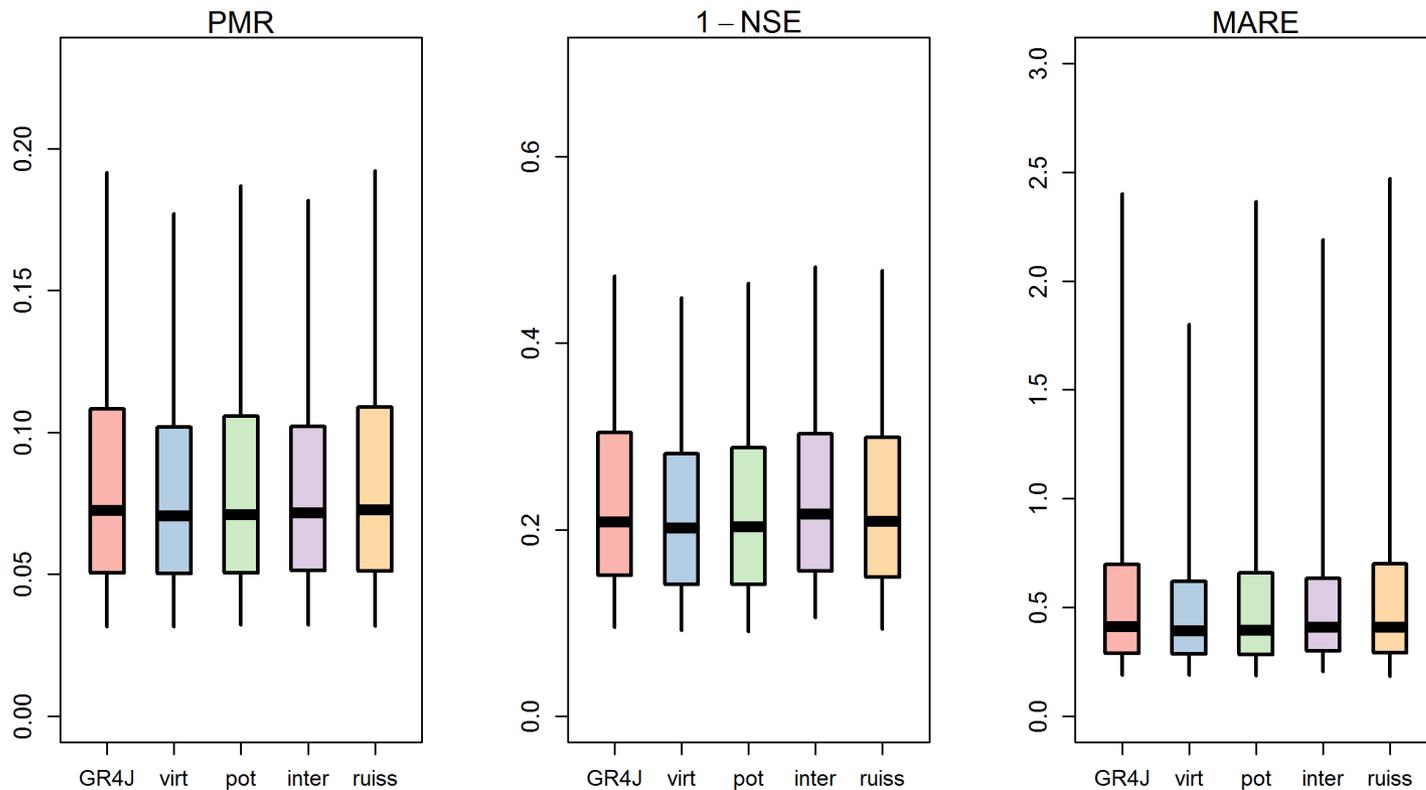
→ Changements faibles

→ Le réservoir virtuel est le plus intéressant

# ➤ Résultats

## Modifications de la structure de GR4J

- En contrôle

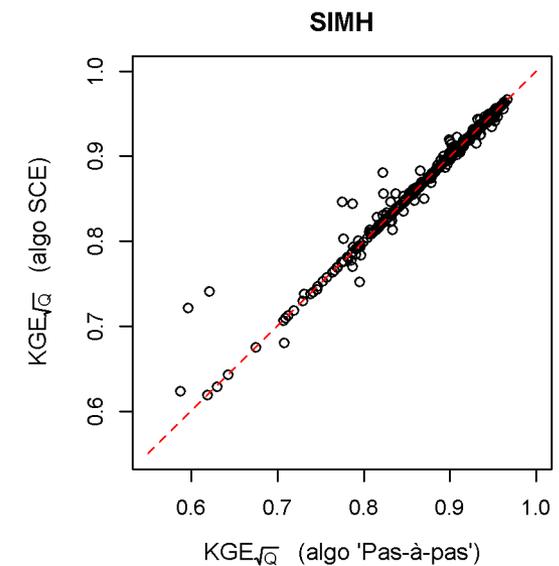
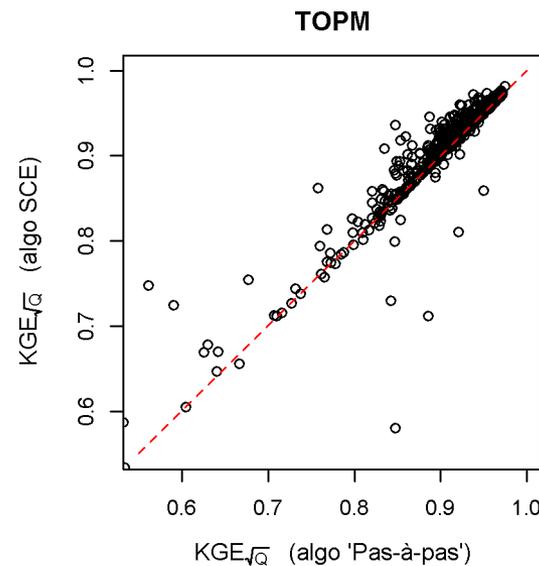
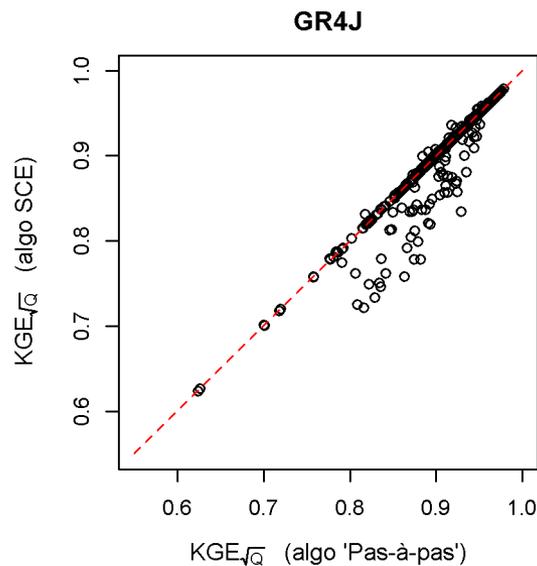


→ Le réservoir virtuel est le plus intéressant  
→ Mais les gains restent très marginaux

# ➤ Comparaison des algorithmes

Comparaison des optima de la fonction objectif en calage

- Méthode “pas-à-pas” (Michel, 1989)
- Méthode SCE-UA (Duan et al., 1992)



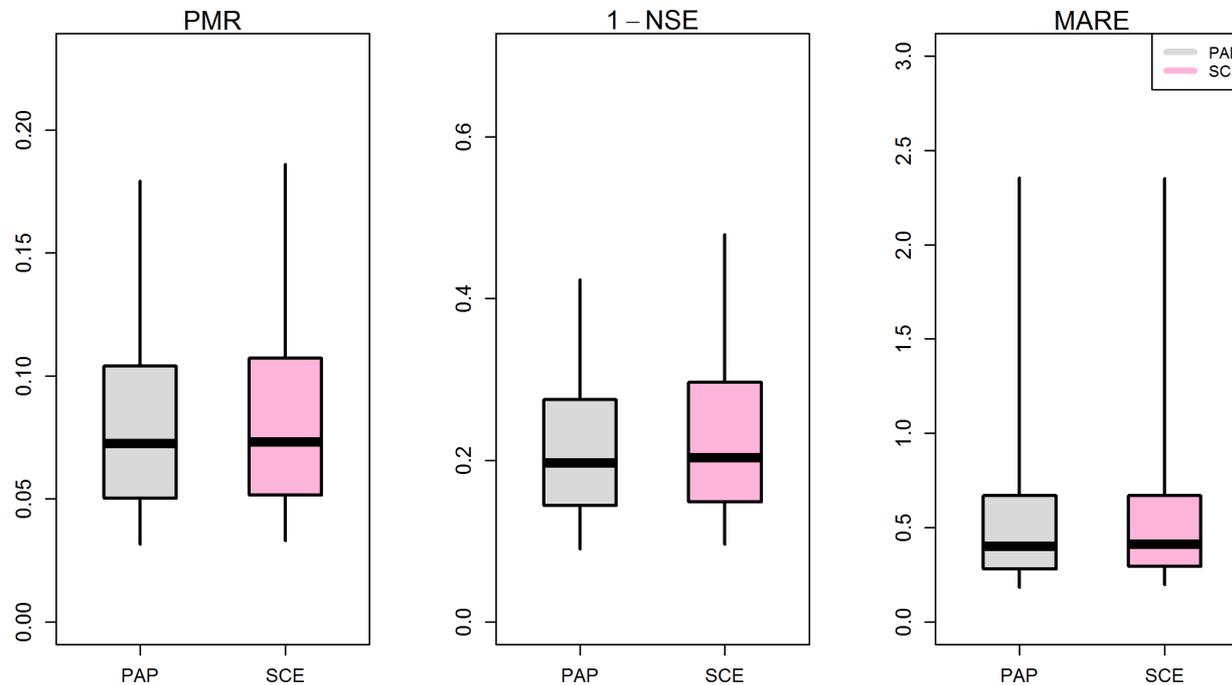
- Algorithme inégalement efficace selon les modèles
- Motifs similaires avec les autres fonctions objectif
- Le choix de l'algorithme dépend fortement du modèle



# ➤ Comparaison des algorithmes

Comparaison des optima de la fonction objectif en contrôle

- Répartition des performances moyennées par bassin
  - GR4J



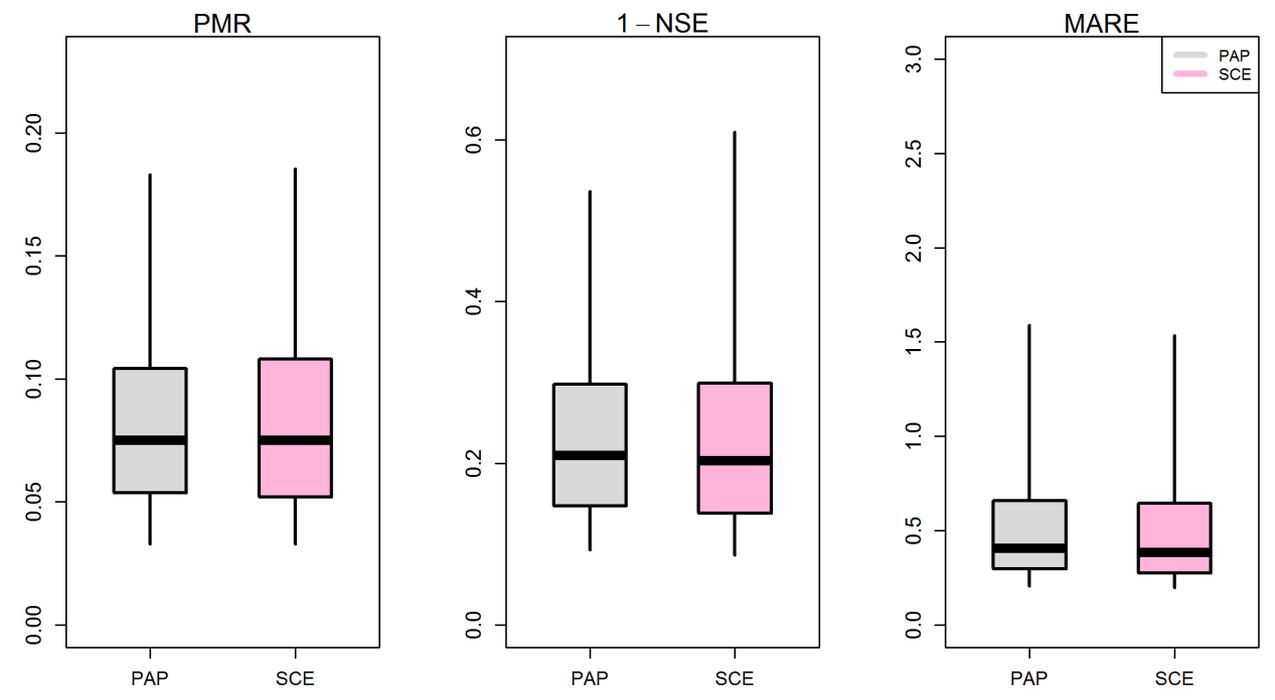
→ Perte de NSE



# ➤ Comparaison des algorithmes

## Comparaison des optima de la fonction objectif en contrôle

- Répartition des performances moyennées par bassin
  - TOPMO



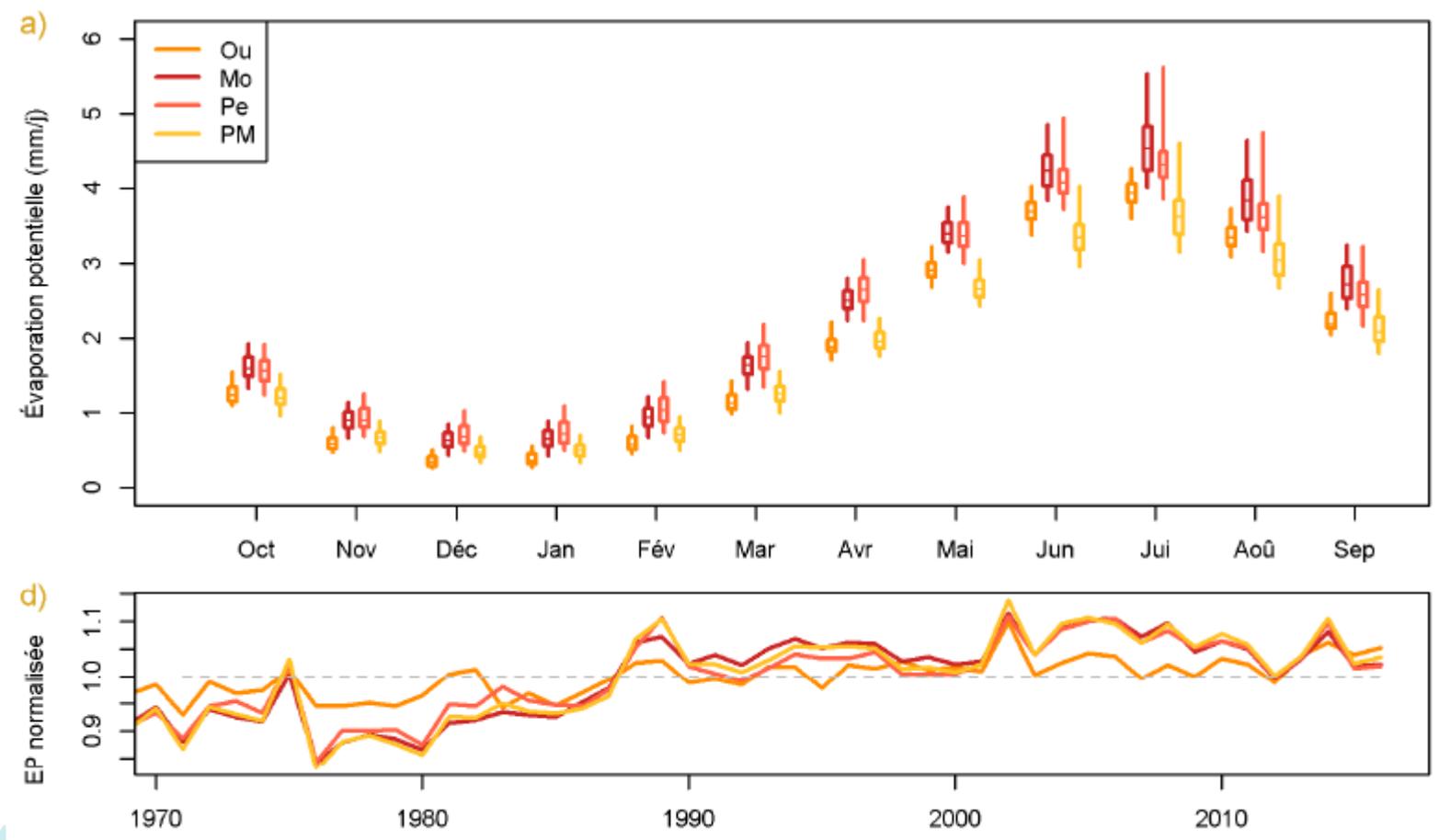
→ SCE pas meilleur que la méthode « pas-à-pas »



# ➤ Comparaison des formules d'évaporation potentielle

Comparaison de plusieurs formules

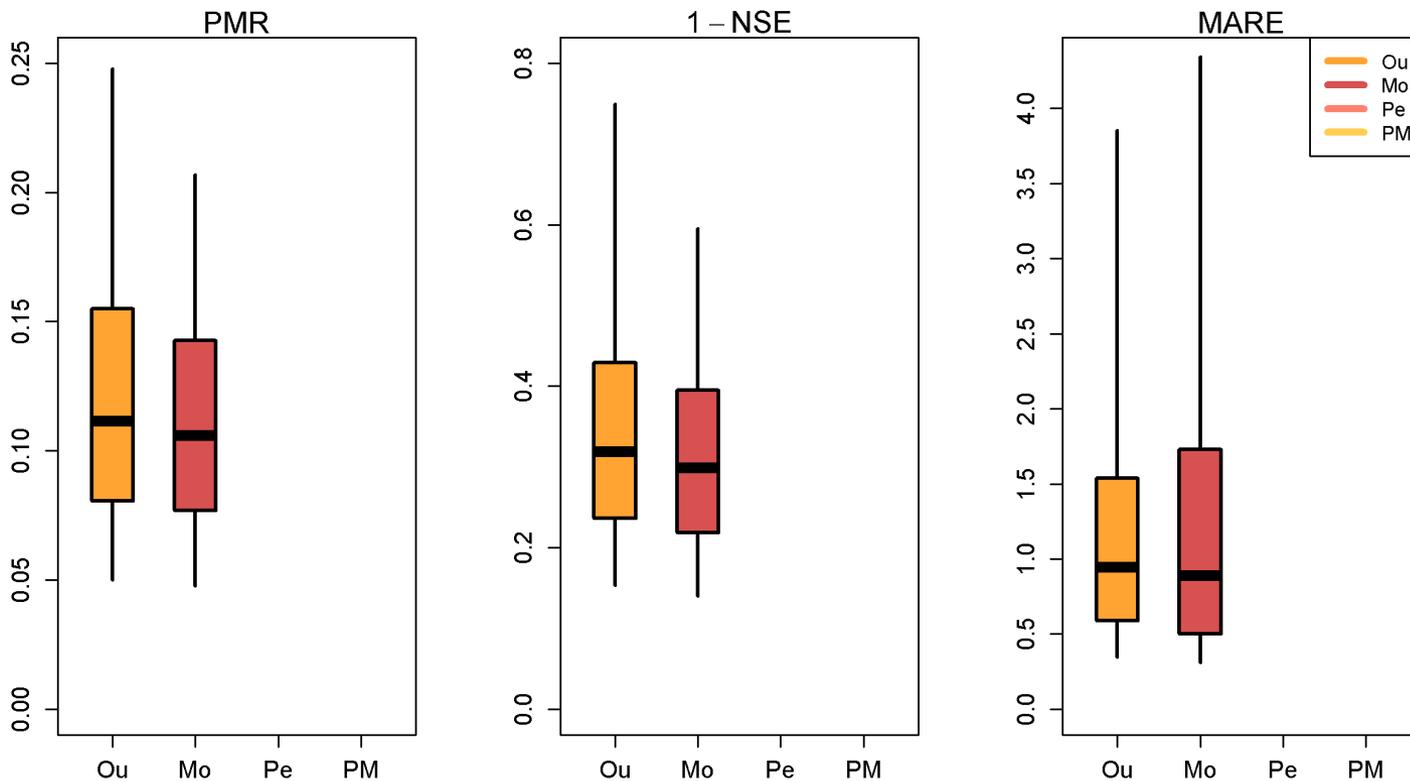
- Quatre formules d'EP



# ➤ Comparaison des formules d'évaporation potentielle

Performances dans le cadre du GSST

- Répartition des performances moyennées par bassin
  - En Australie



- ➔ Robustesse relativement insensible au choix de l'EP
- ➔ Avantage formule Morton



# ➤ Comparaison des formules d'évaporation potentielle

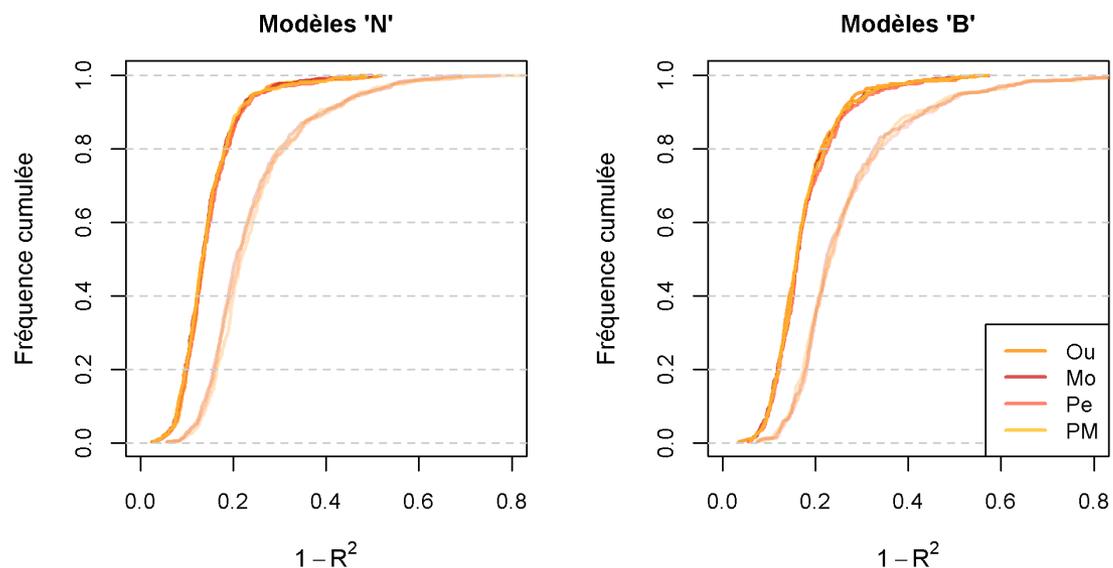
Comparaison sans modèle hydrologique

## Méthode :

- Modèles « sans processus » basés sur l'élasticité
- $\Delta Q = \alpha_P * \Delta P + \alpha_{EP} * \Delta EP$

## Résultats :

- Fortement sensibles au modèle
  - Informations sur années passées
  - Forme de la relation pluie-debit (linéaire, budyko)

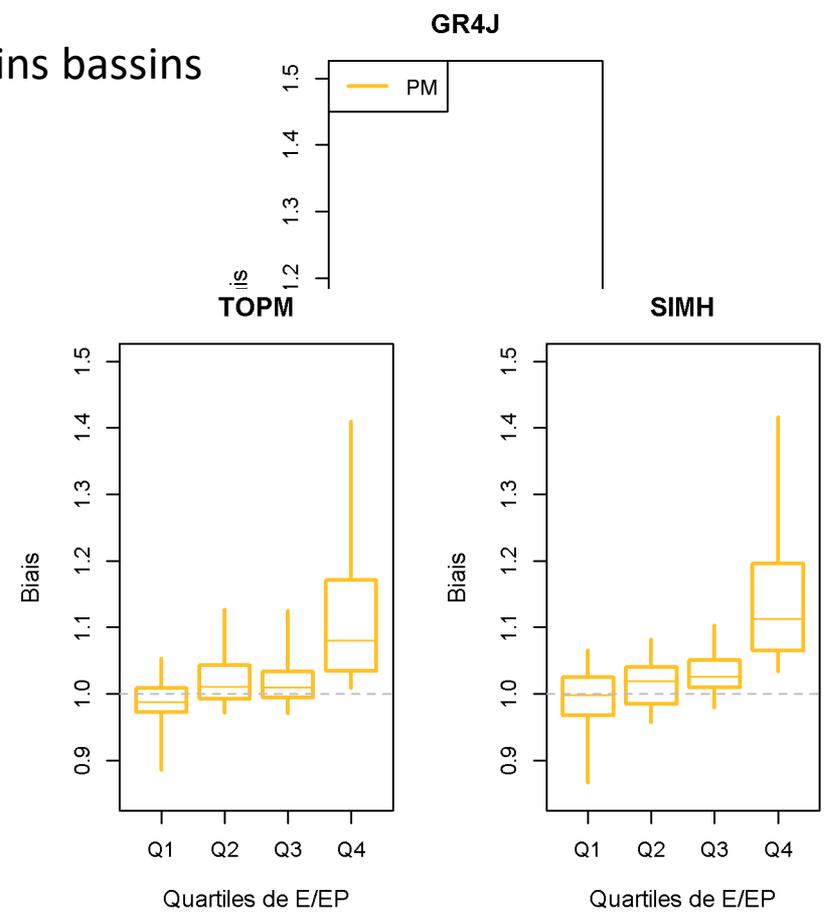
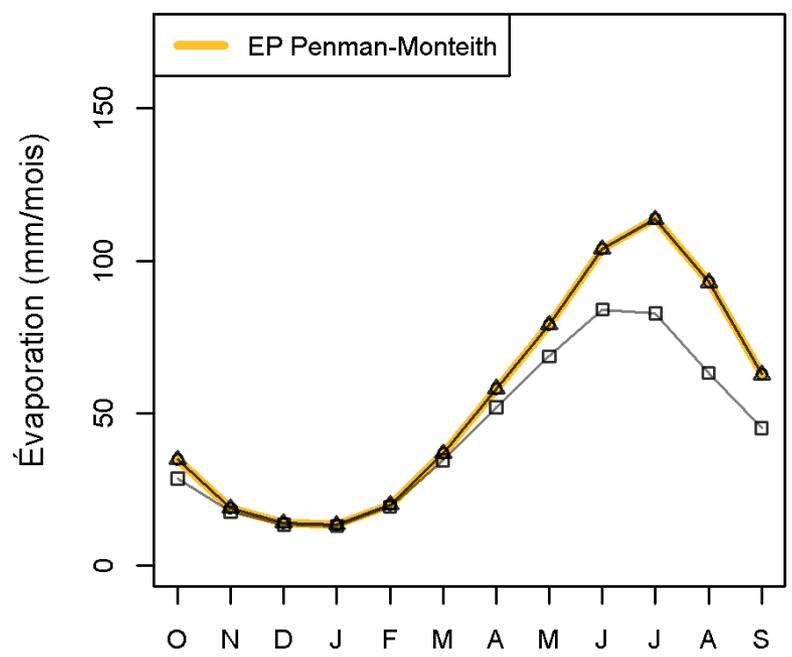


# ➤ Comparaison des formules d'évaporation potentielle

## Sensibilité des modèles au choix de la formule d'évaporation

- Problème : EP sous-estimée sur certains bassins

Le Vieux Jonc à Buellas



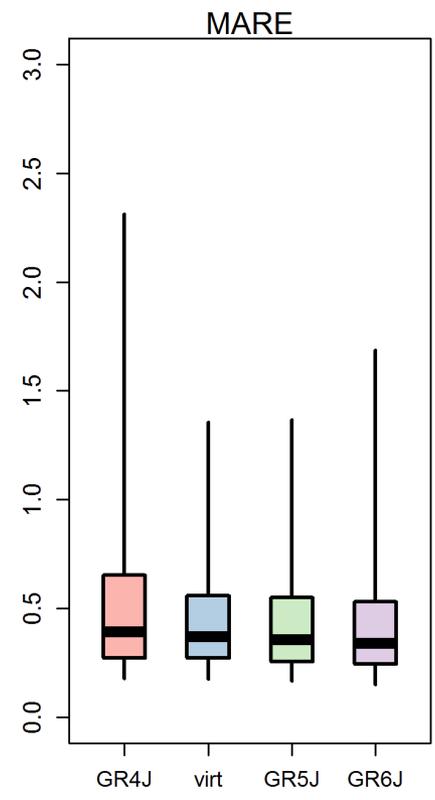
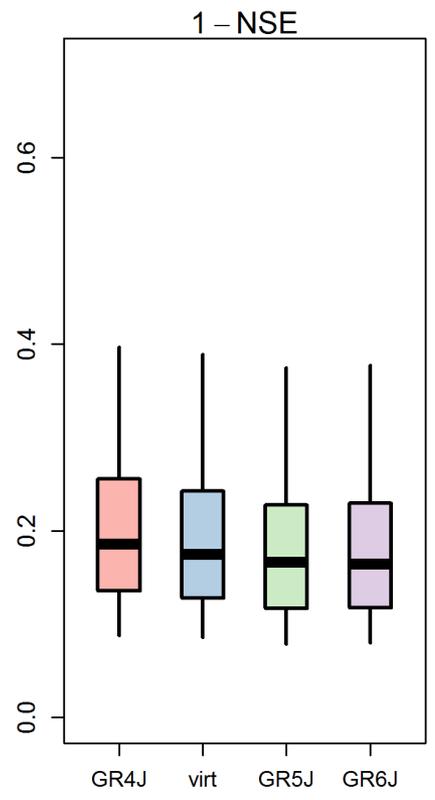
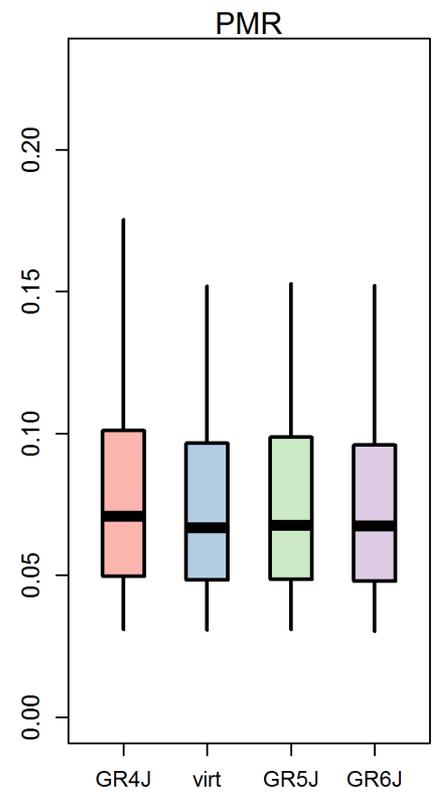
➔ Concerne Penman-Monteith (surtout) et Oudin (moins)



# > Résultats

## Comparaison avec des modifications antérieures de GR

- En calage



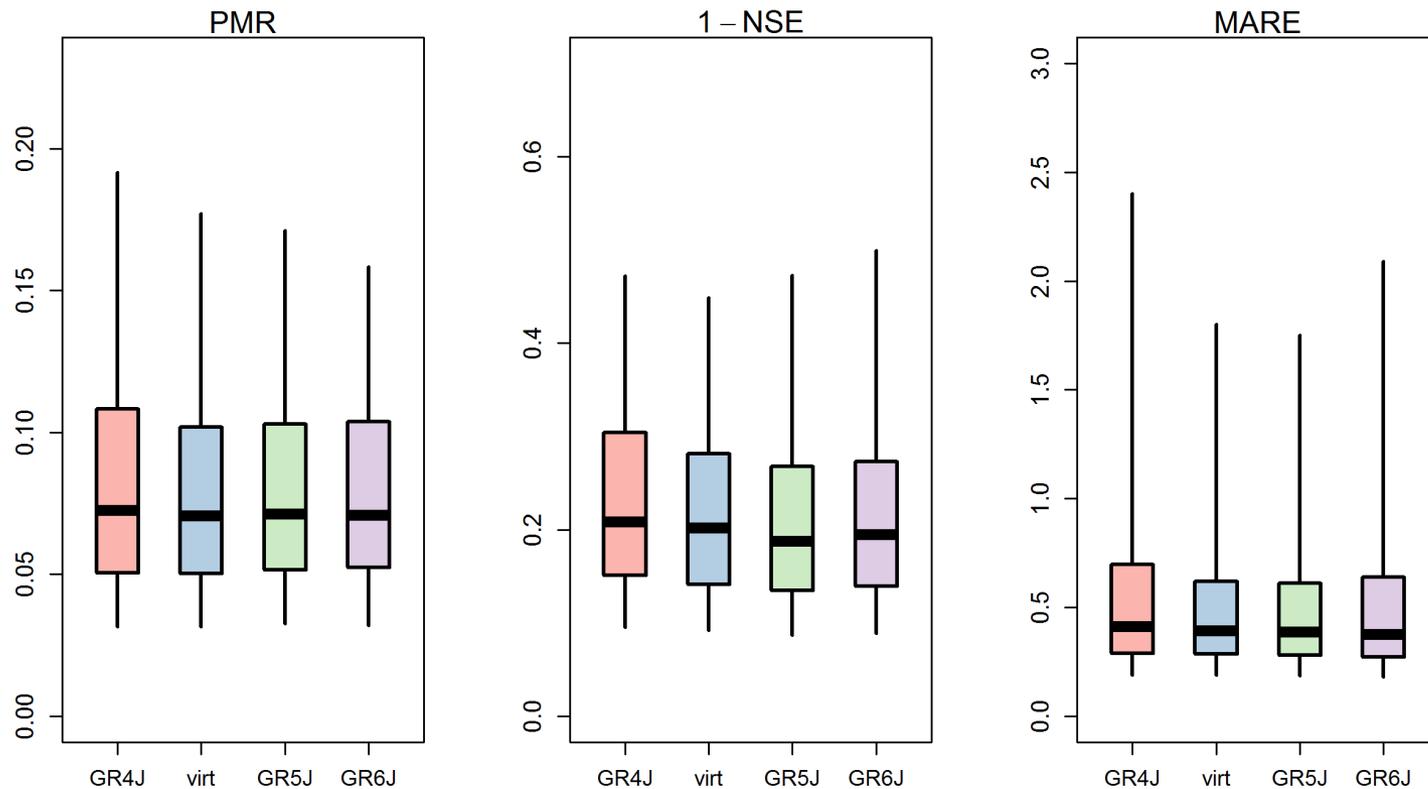
→ Réservoir virtuel pas plus intéressant que GR5J  
→ GR6J nettement plus robuste ?



## ➤ Résultats

### Comparaison avec des modifications antérieures de GR

- En contrôle



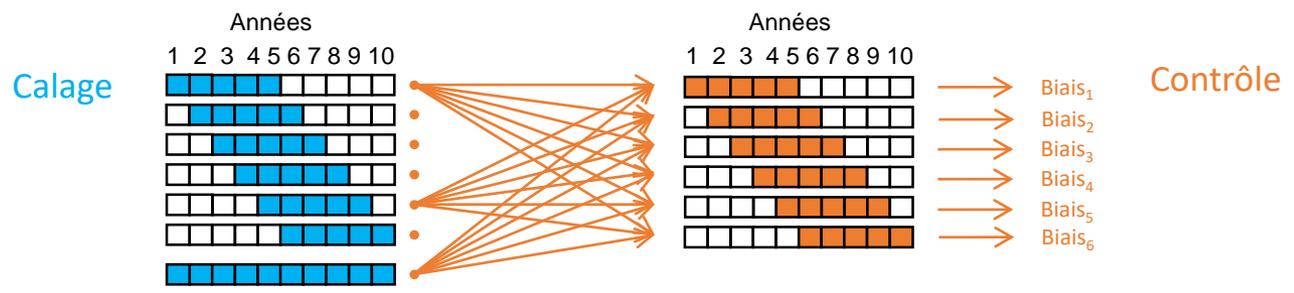
→ GR6J pas moins robuste que GR5J !

→ Problème de calage (Pelletier et Andréassian, 2021, *in review*)

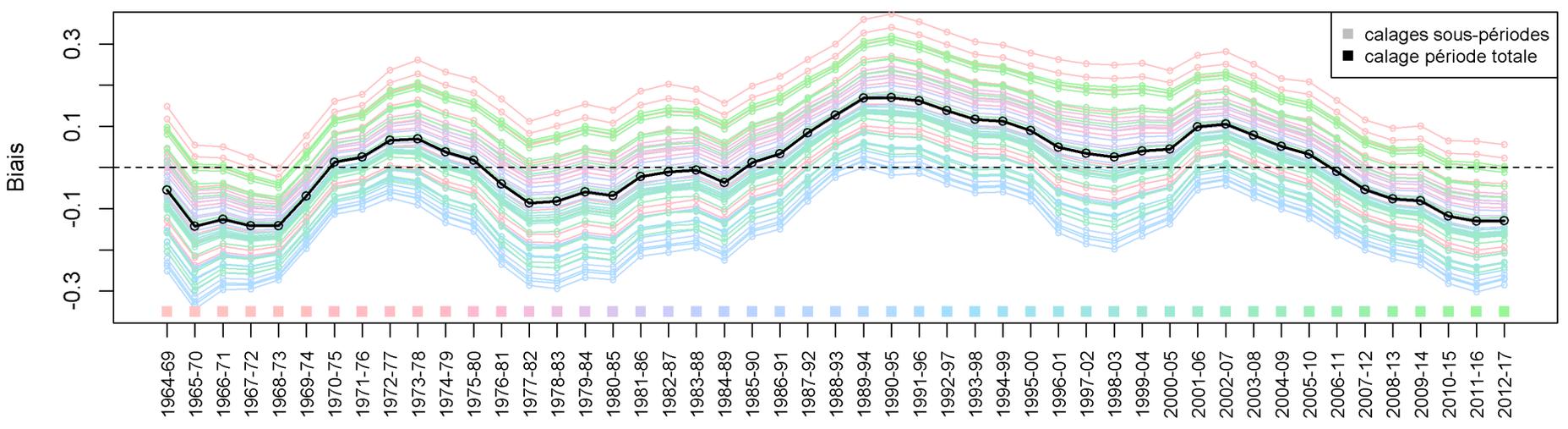
# Évaluation des modèles hydrologiques

## Generalized Split-Sample Test

- Généralisation du DSST (Coron et al., 2012)



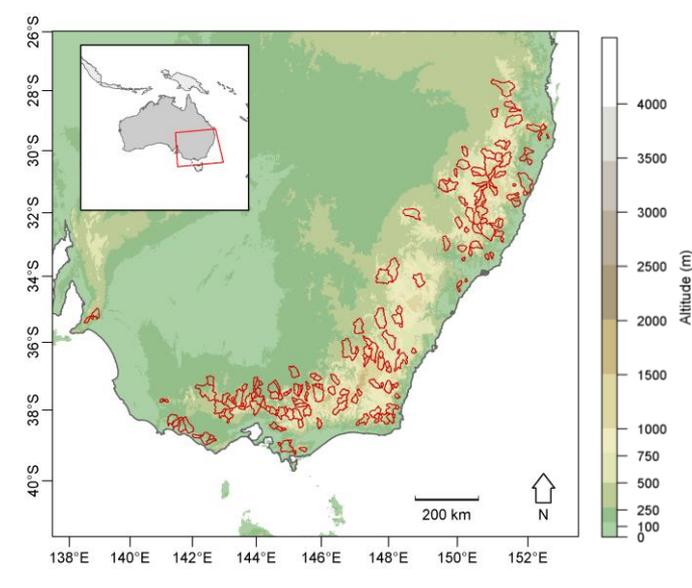
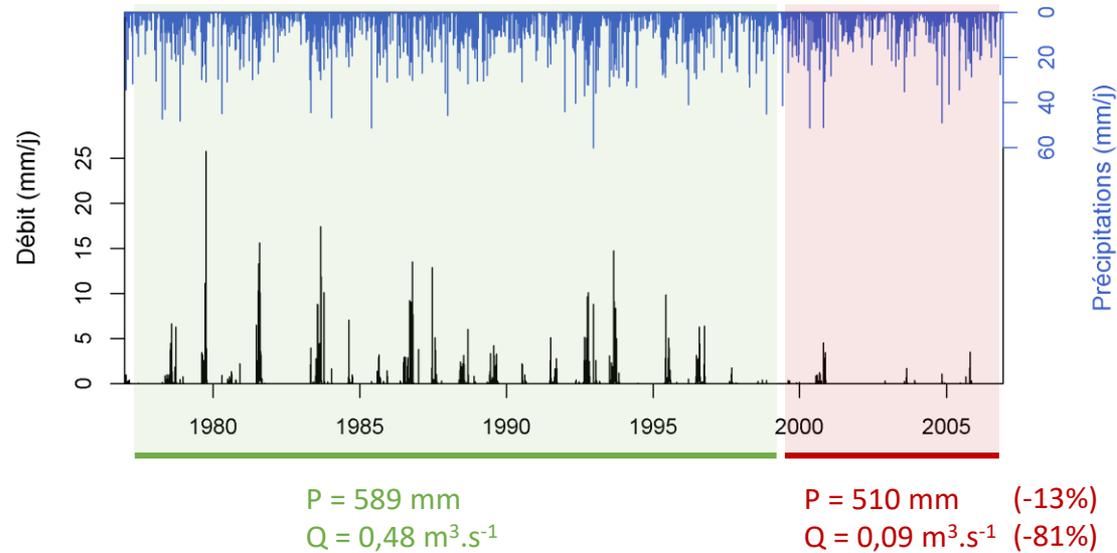
Courbe des biais glissants



# ➤ Caractérisation de la Millenium Drought

## Exemple

- Exemple de la Major Creek River à Graytown

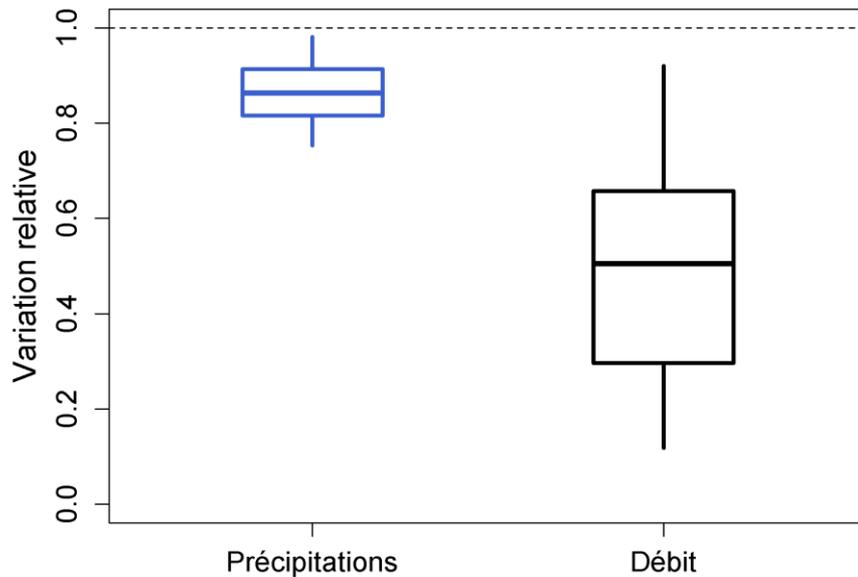


# ➤ Caractérisation de la Millenium Drought

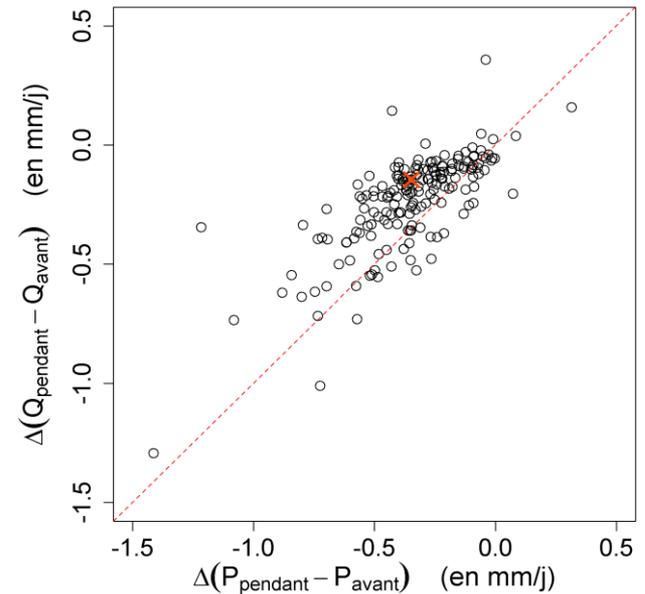
Exemple et cas général

- Caractérisation générale

Variations relatives



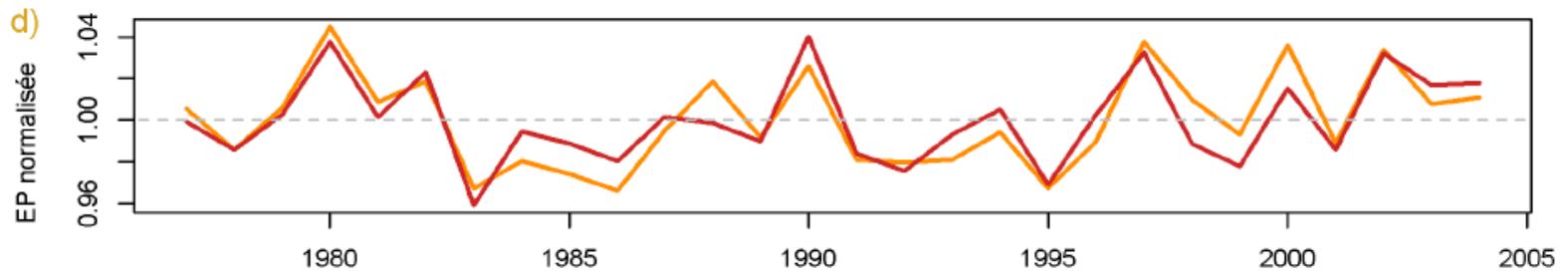
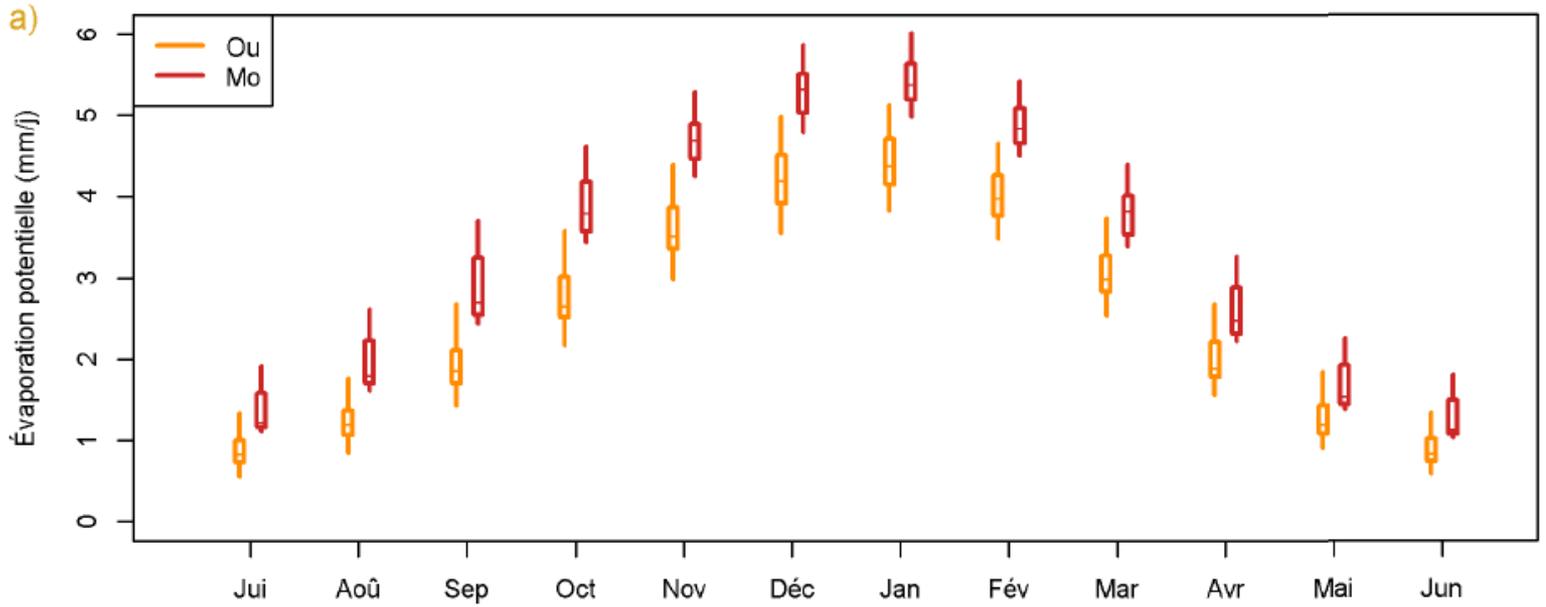
Variations absolues



# ➤ Comparaison des formules d'évaporation potentielle

Comparaison de plusieurs formules

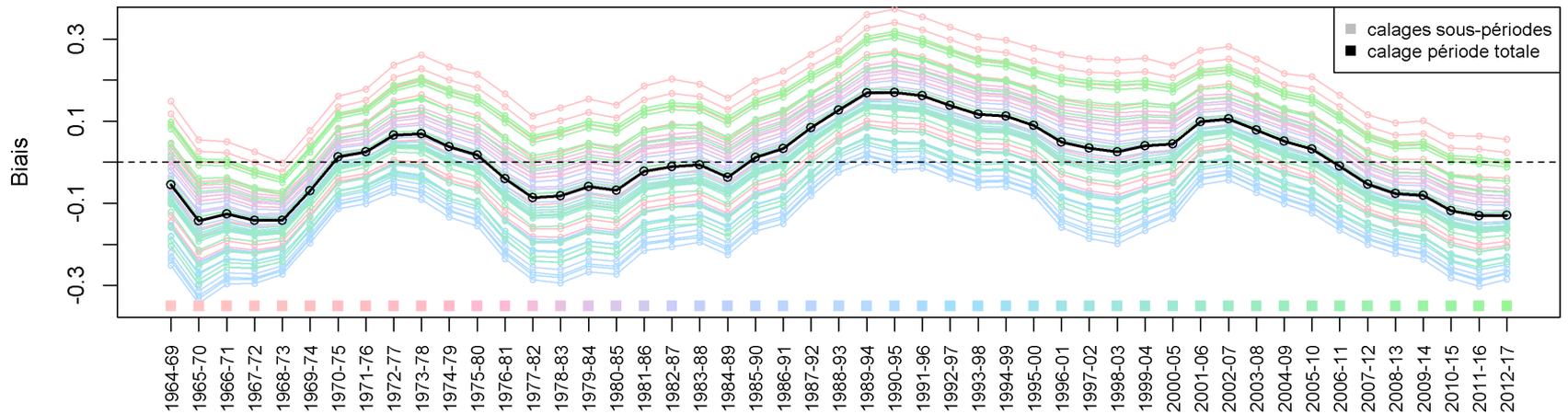
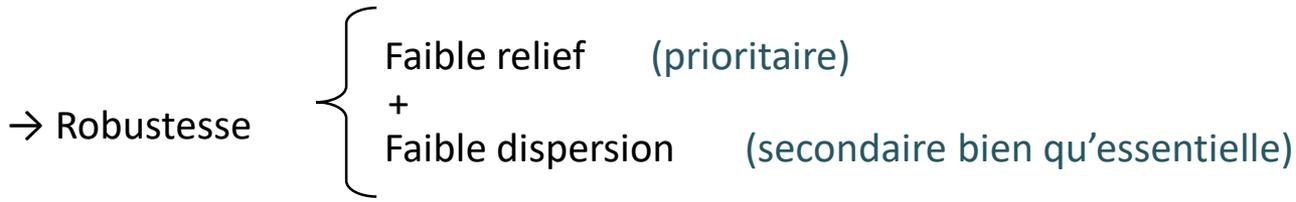
- Quatre formules d'EP



# ➤ Enjeux liés aux courbes des biais glissants

## Relief et dispersion

- Relief = potentiel de la structure du modèle (robustesse « potentielle »)
- Dispersion = valorisation des données en calage (robustesse « effective »)



# ➤ Complexification formule d'Oudin

## Pistes

Synthèse de Bansept (2013)

Trois facteurs déterminent l'importance de l'évaporation en forêt :

- Développement foliaire des arbres (LAI)
- Rugosité du couvert forestier
- Teinte du feuillage (albédo)

• Idées :

- Facteur correctif fixe (ex :  $\frac{albédo_{bassin}}{albédo_{ref}}, \frac{LAI_{bassin}}{LAI_{ref}}$ )
- Facteur correctif variable (à partir de modèles de surface continentale ?)  
(ex :  $1 + \frac{\Delta(LAI)}{LAI_{bassin}}$ )

