

# Estimation de l'évolution temporelle des forts débits saisonniers en utilisant des indices climatiques à court terme et trois modèles d'apprentissage automatique

Une alternative à la modélisation hydroclimatique classique

---

**Andrés F. Gonzalez Mora**

Candidat au Doctorat en sciences de l'eau

Alain N. Rousseau, PhD Ing., Professeur Titulaire

Etienne Foulon, PhD CPI, Associé de recherche

Cristhian Luna, M Sc., Universidad Nacional de Colombia

**29 janvier 2025**

CONTEXTE

OBJECTIFS

MÉTHODE &  
RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

CONCLUSIONS



# LES INONDATIONS ET LEURS IMPACTS

Au Canada et au Québec, les inondations : l'aléa le plus récurrent et coûteux des points de vue humain et financier<sup>[2]</sup>

Impacts sur la santé physique (blessures, pertes humaines) et la santé mentale<sup>[3]</sup>

Répercussions sur l'environnement (qualité de l'eau), et sur la gestion de l'aménagement du territoire <sup>[3]</sup>



**2017-2019**<sup>[4]</sup>

*Inondations printanières  
Rivière des Outaouais  
~ 1 milliard \$*

**2023**<sup>[5]</sup>

*Inondation printanière  
Rivière du Gouffre  
(Baie St-Paul, Charlevoix)  
~ 25 millions \$*

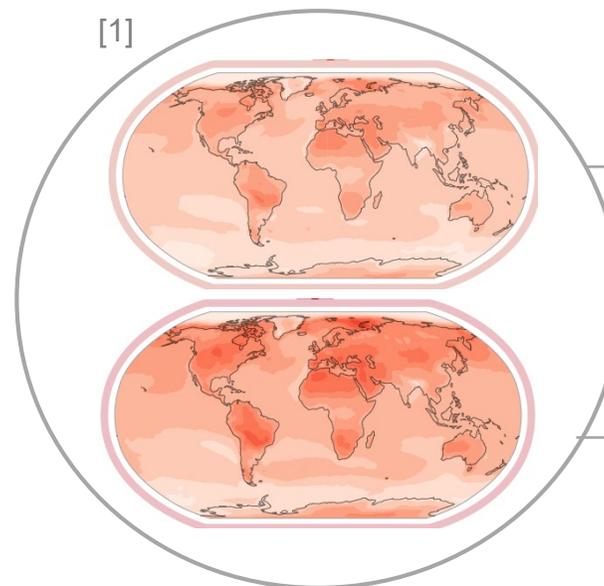
**2024**<sup>[2]</sup>

*Inondations dans plusieurs  
régions du Québec  
~ 2,5 milliards \$*

# ENJEUX FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Taux de réchauffement de la terre par décennie **3x** plus rapide qu'en 1982<sup>[2]</sup>

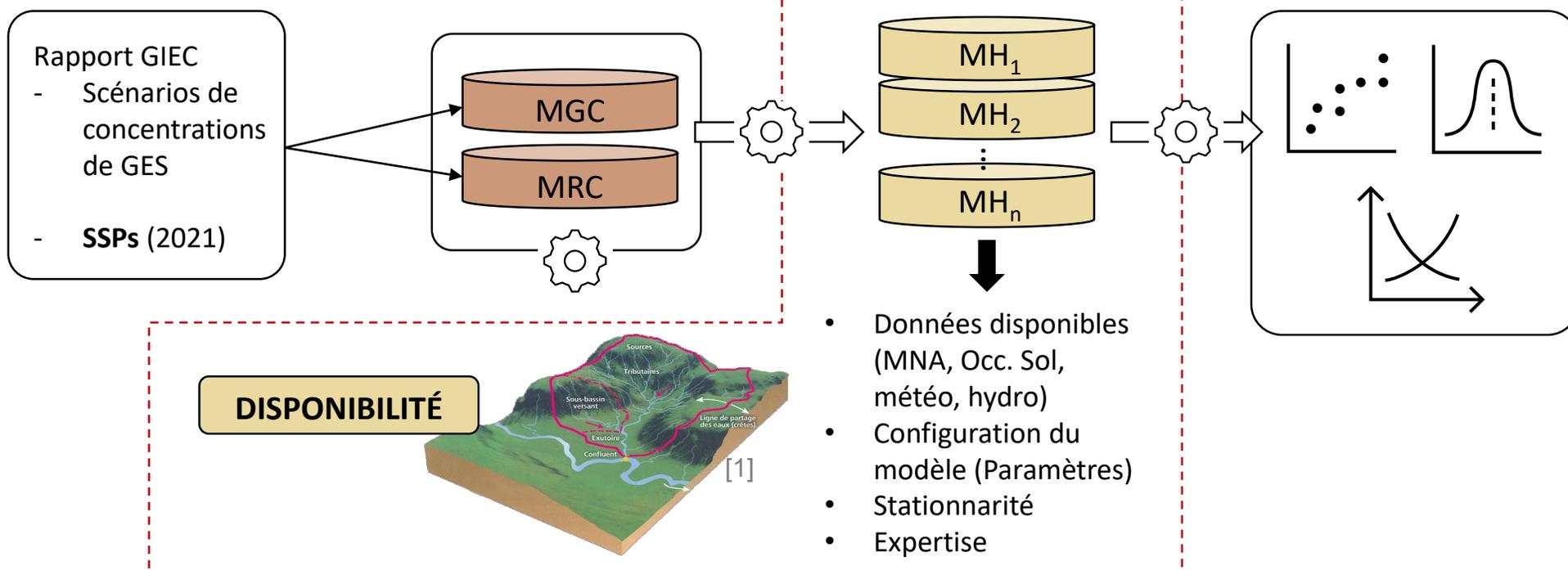
Un réchauffement entraîné en partie par les GES issues des activités humaines (haute probabilité)<sup>[3]</sup>



● **Intensification des processus** dans le système océan-terre-atmosphère: Le **cycle de l'eau** et le régime des précipitations<sup>[3]</sup>

● **Régime hydrique: Forts débits**<sup>[4,5]</sup>  
Estimation de l'intensité et l'évolution temporelle étant un défi de taille

# APPROCHE HYDROCLIMATIQUE



# QUESTIONS DE RECHERCHE

---

Est-il possible d'estimer l'évolution temporelle des forts débits dans un contexte de changement climatique sans nécessairement passer par la modélisation hydrologique?

1

Existe-t-il une manière de mettre en valeur les interactions du système climat-débit pour estimer l'évolution temporelle des forts débits dans un horizon futur?

2

Serait-il possible d'exploiter les interactions non-linéaires du système climat-débit à l'aide d'un modèle d'apprentissage automatique (MAA) simple et facile à utiliser?

3

Serait-il possible d'obtenir une capacité prédictive de ces MAA similaire à celle de l'approche hydroclimatique classique afin d'estimer l'évolution temporelle des forts débits dans un contexte de changement climatique?

# FACTEURS DÉCLENCHEURS DES FORTS DÉBITS

---



Précipitation



Humidité du sol

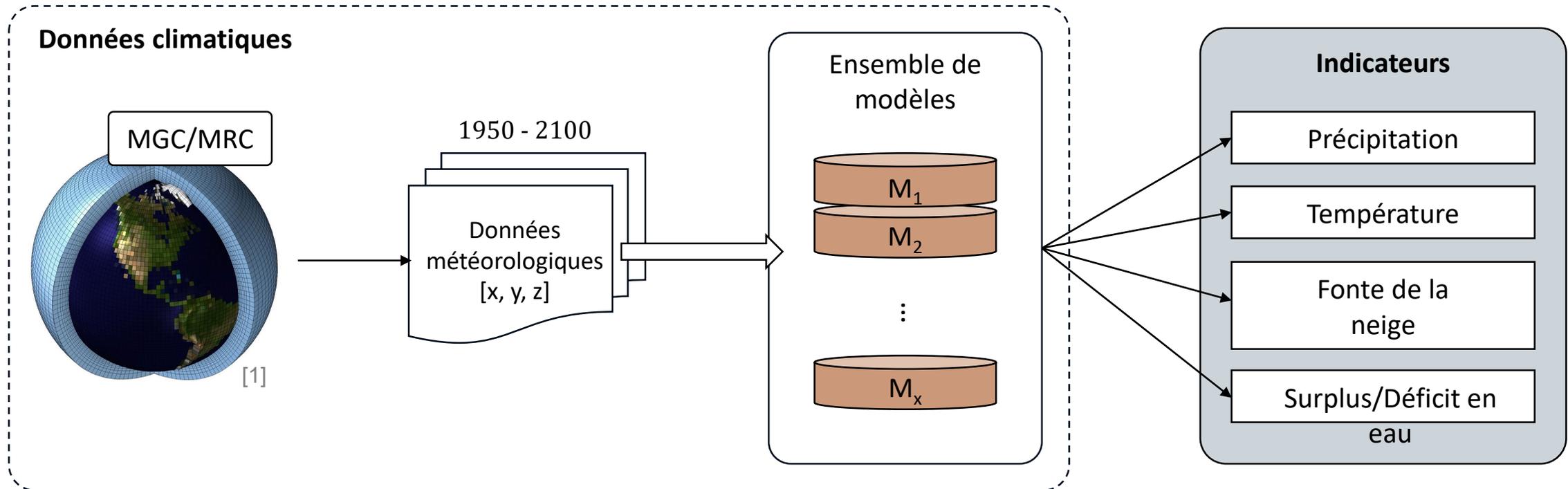


Fonte de la  
neige



Occupation du  
sol

# INDICES CLIMATIQUES À COURT TERME





# INTERACTIONS SYSTÈME CLIMAT-DÉBIT

Journal of Hydrology 557 (2018) 774–790

---

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

 **ELSEVIER**

**Journal of Hydrology**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)



---

Research papers

Development of a methodology to assess future trends in low flows at the watershed scale using solely climate data 

Étienne Foulon <sup>a,\*</sup>, Alain N. Rousseau <sup>a</sup>, Patrick Gagnon <sup>b</sup>

<sup>a</sup> INRS-EIE/Institut National de la Recherche Scientifique—Eau Terre Environnement, 490 rue de la Couronne, Quebec City, Quebec G1K 9A9, Canada  
<sup>b</sup> Agriculture and Agri-Food Canada, 2560 Boulevard Hochelaga, Quebec City, Quebec G1V 2J3, Canada

---



Existe-t-il une manière de mettre en valeur les interactions du système climat-débit pour estimer l'évolution temporelle des forts débits dans un horizon futur?

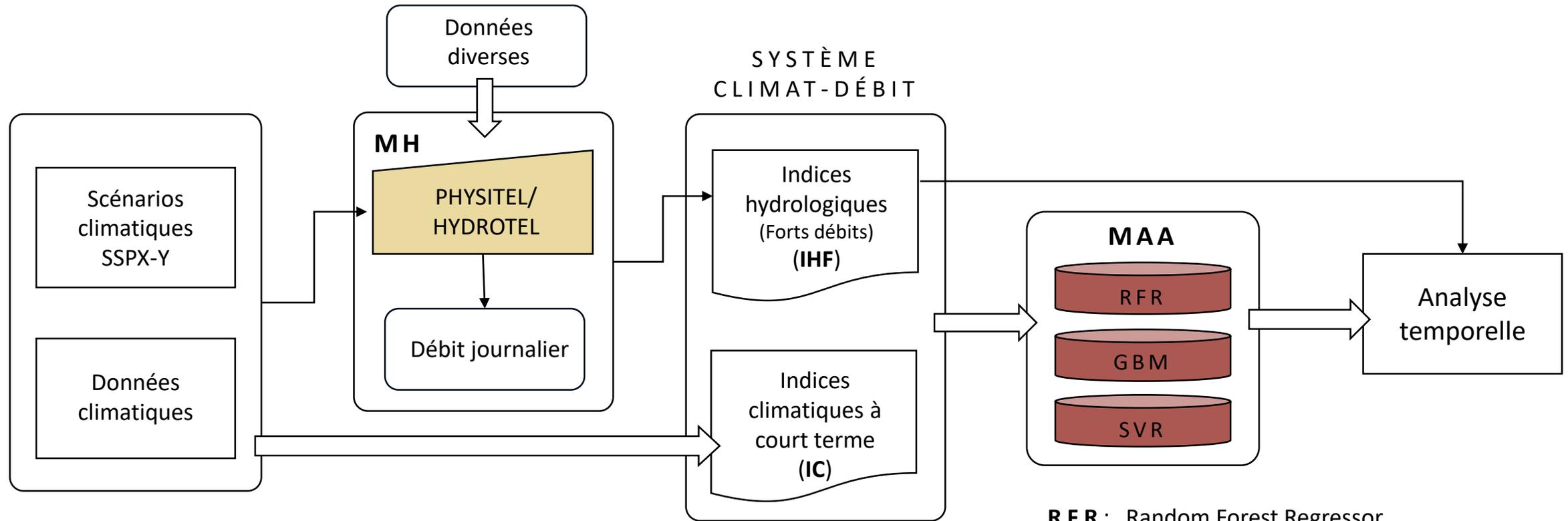


Serait-il possible d'exploiter ces interactions du système climat-débit à l'aide d'un modèle d'apprentissage automatique (MAA) simple et facile à utiliser?



Serait-il possible d'obtenir une capacité prédictive de ces MAA similaire à celle de l'approche hydroclimatique classique afin d'estimer l'évolution temporelle des forts débits dans un contexte de changement climatique?

# INTÉGRATION DES MODÈLES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE (MAA)



**RFR** : Random Forest Regressor  
**GBM** : Gradient Boosting Machines  
**HGBM** : Histogram-based GBM  
**SVR** : Support Vector Regressors

# INTÉGRATION DES BASSINS HYDROGRAPHIQUES

## Saguenay et lac Saint-Jean

- Ashuapmushuan

## Saint-Laurent nord-ouest

- Montmorency

## Saint-Laurent sud-ouest

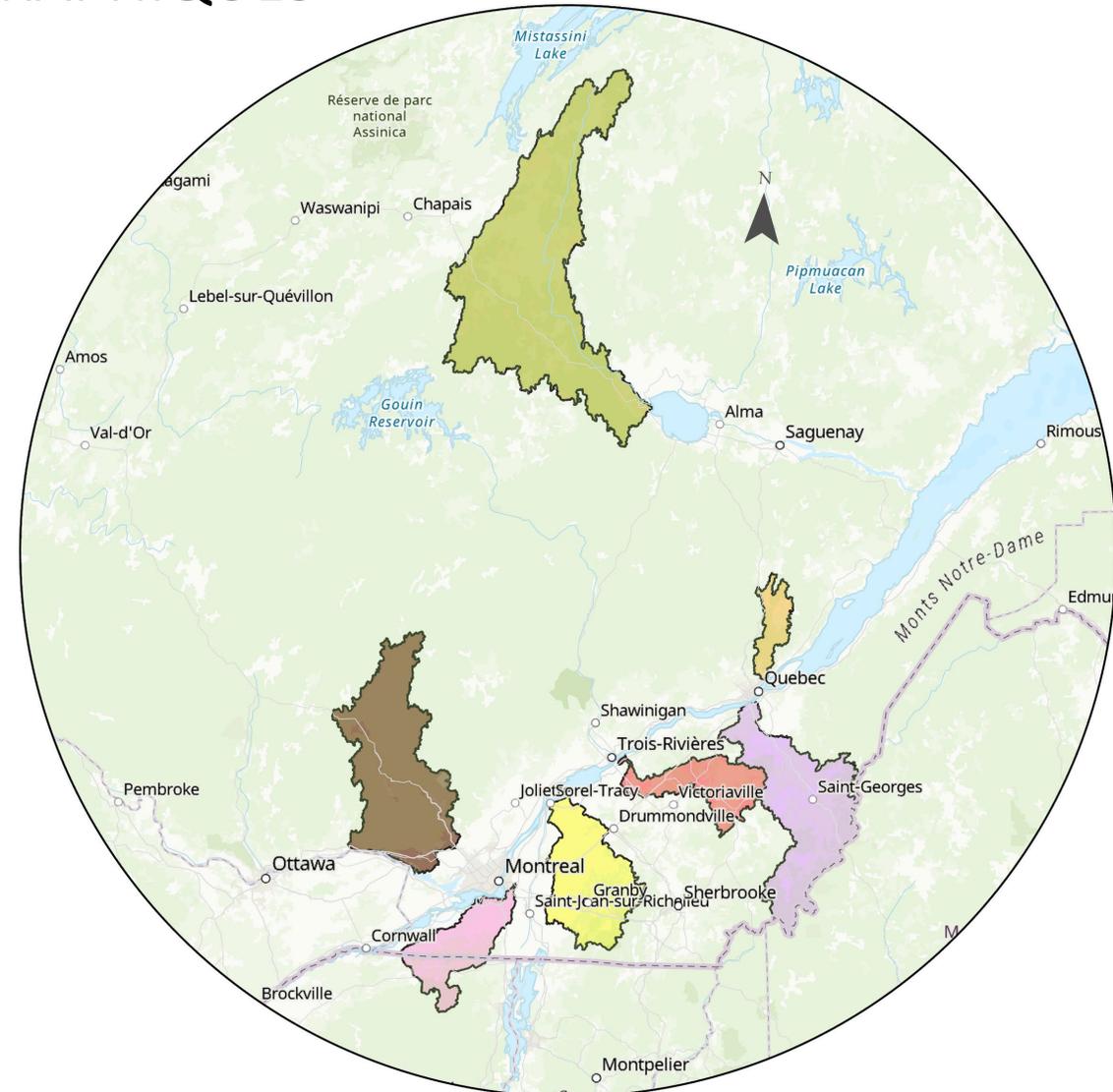
- Châteauguay
- Yamaska

## Saint-Laurent sud-est

- Bécancour
- Chaudière\*

## Outaouais et Montréal

- Rouge



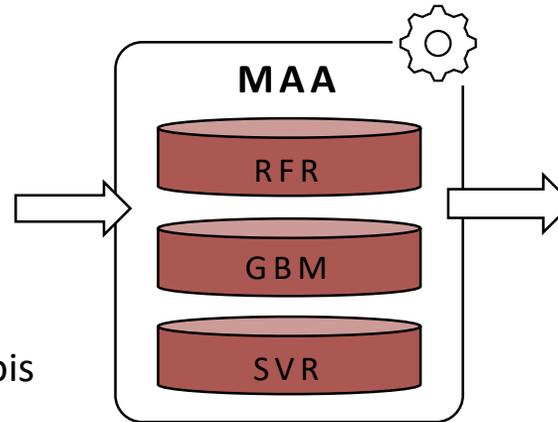
# PHASE D'ENTRAÎNEMENT DE MAA

Ensemble de Simulations  
Post-traitées d'Ouranos  
CMIP6 (RDRS v2.1)  
15 modèles climatiques  
(MGC)

Scénarios  
climatiques  
SSP2-4.5,  
SSP3-7.0,  
SSP5-8.5

**208** indices  
climatiques à  
court terme

- 1 à 5 jours
- 1 à 3 semaines
- 1 - 6, 8, et 10 mois



**8** indices  
hydrologiques  
(forts débits)

- $SxQMAX$
- $Sx50C$
- $Sx80C$
- $Sx90C$

EEN, (couvert nival =  
1)

$$x = \begin{cases} 0, & x = F \\ 1, & x = C \end{cases}$$

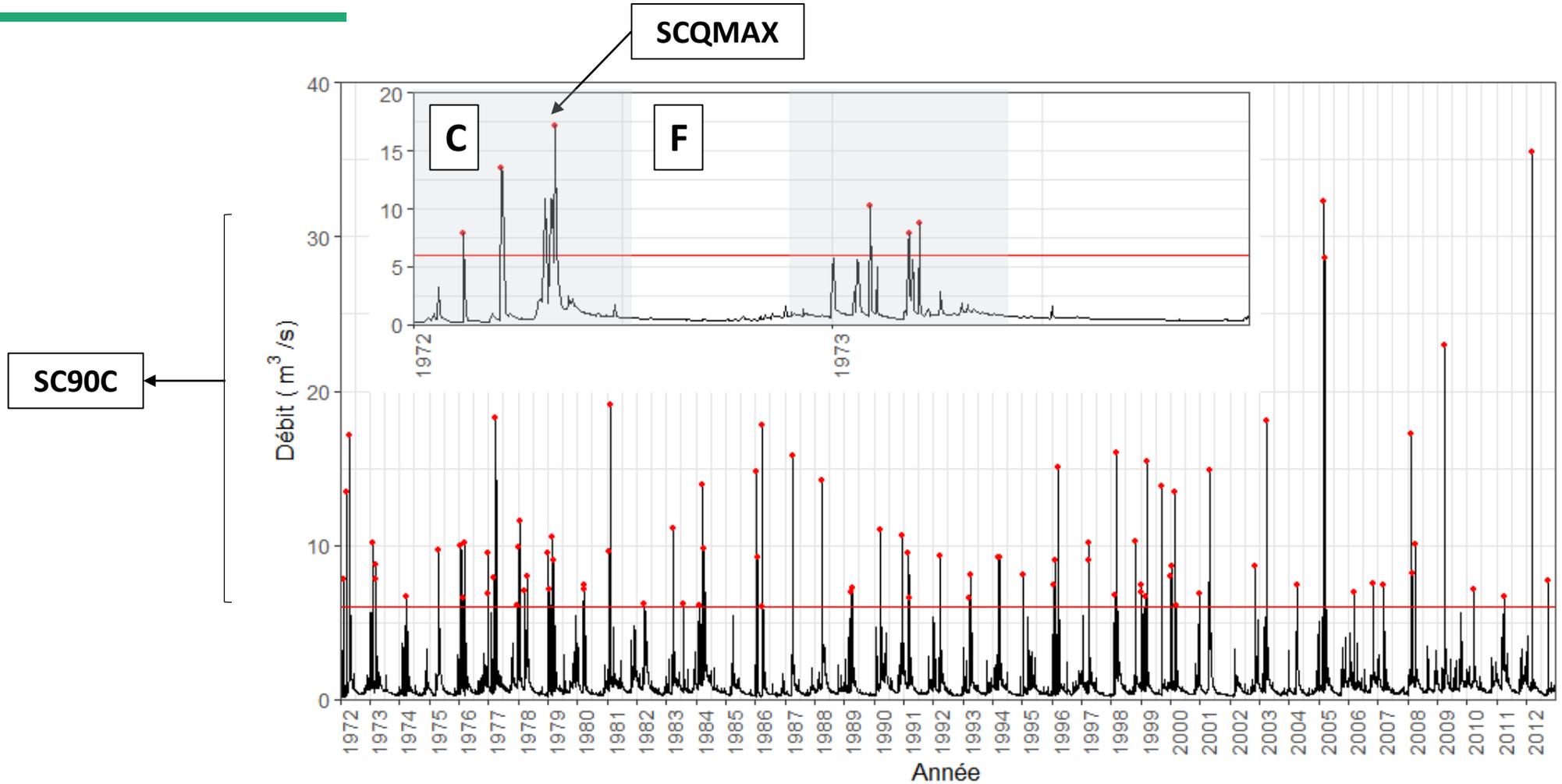
**MH**

*PHYSITEL-HYDROTEL*  
Approche  
hydroclimatique

14 Paramètres  
Données climatiques  
CMIP6  
Calage automatique  
Post-traitement des  
débits

# INDICES HYDROLOGIQUES

## FORTES DÉBITS (IHF)



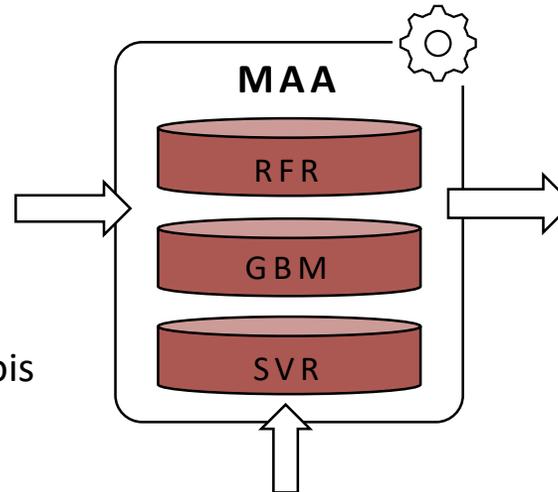
# PHASE D'ENTRAÎNEMENT DE MAA

Ensemble de Simulations  
Post-traitées d'Ouranos  
CMIP6 (RDRS v2.1)  
15 modèles climatiques  
(MGC)

Scénarios  
climatiques  
SSP2-4.5,  
SSP3-7.0,  
SSP5-8.5

**208** indices  
climatiques à  
court terme

- 1 à 5 jours
- 1 à 3 semaines
- 1 - 6, 8, et 10 mois



1. Passé (1997 – 2023)
2. Split données 70/30
3. Validation croisée avec 10 répétitions
4. 2 hyperparamètres

**8** indices  
hydrologiques  
(forts débits)

- $SxQMAX$
- $Sx50C$
- $Sx80C$
- $Sx90C$

EEN, (couvert nival = 1)

$$x = \begin{cases} 0, & x = F \\ 1, & x = C \end{cases}$$

**MH**

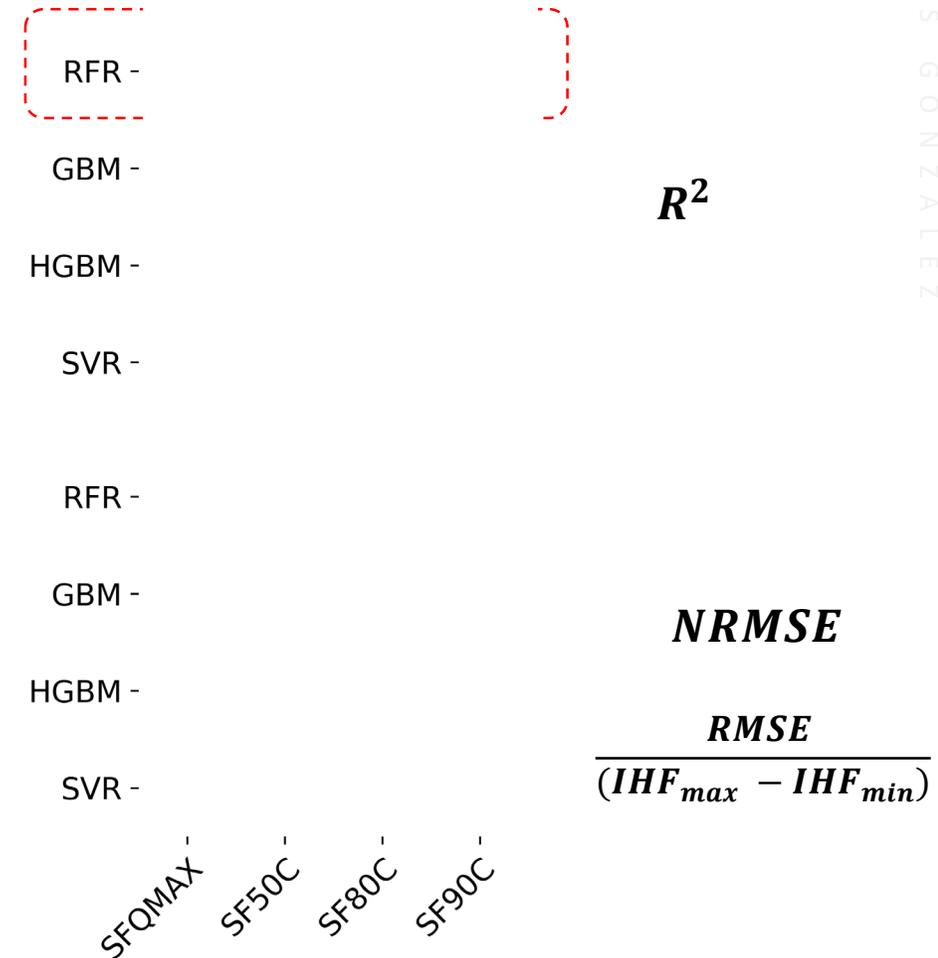
*PHYSITEL-HYDROTEL*  
Approche  
hydroclimatique

14 Paramètres  
Données climatiques  
CMIP6  
Calage automatique  
Post-traitement des  
débits

# PHASE D'ENTRAÎNEMENT DE MAA

Performance de l'entraînement pour les indicateurs pendant la période **sans** couvert nival (Crue estivales)

- Bonne représentation de la variabilité des données ( $R^2$  entre 0.8 et 0.99)
- Faible erreur systématique (valeurs NRMSE < 0.21)



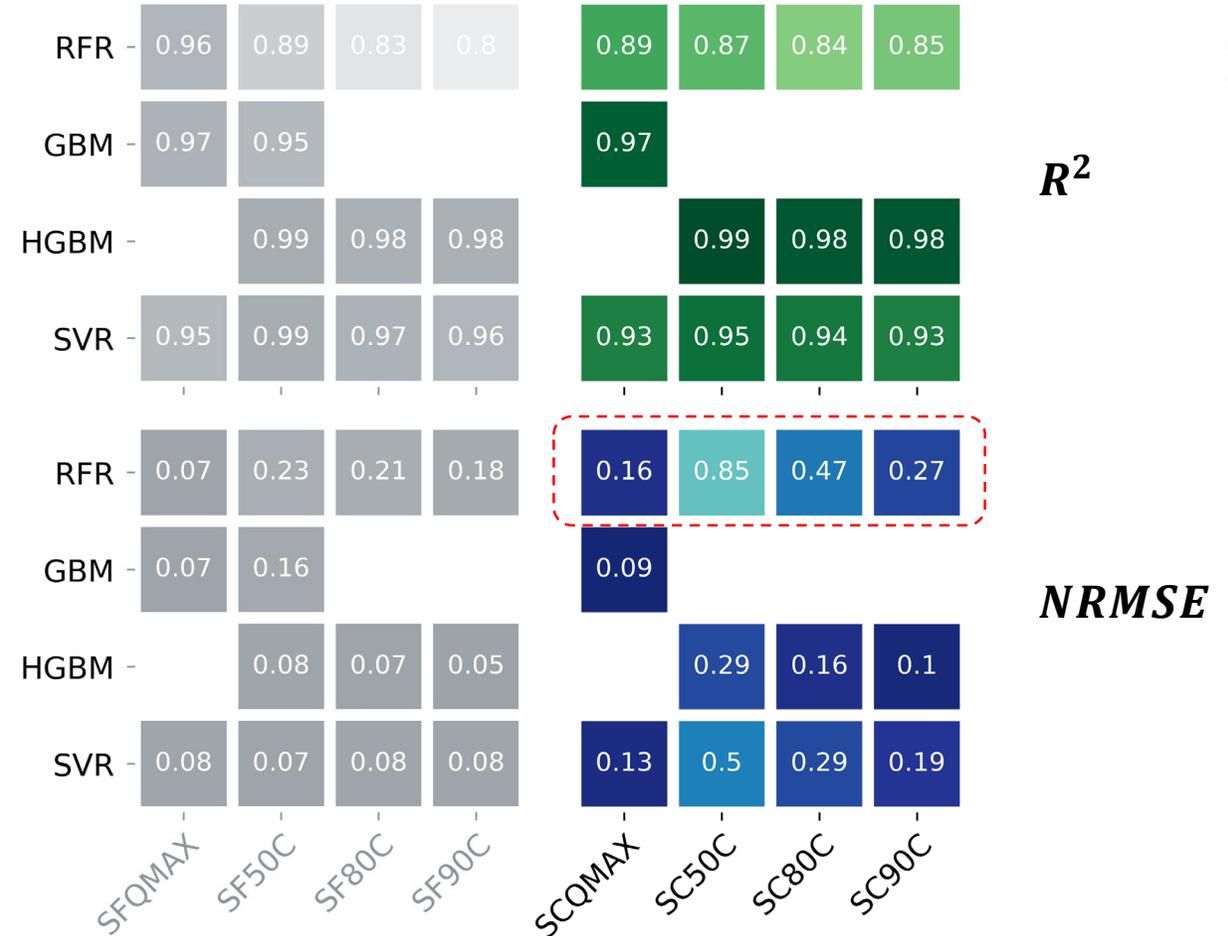
**RFR** : Random Forest Regressor  
**GBM** : Gradient Boosting Machines  
**HGBM** : Histogram-based GBM  
**SVR** : Support Vector Regressors

**SxQMAX** : Débit maximum annuel (x : sans (F) ou avec (C) couvert nival)  
**Sx50/80/90C** : Débit au-dessous du 50, 80, 90 centiles

# PHASE D'ENTRAÎNEMENT DE MAA

Performance de l'entraînement pour les indicateurs pendant la période **avec** couvert nival (Crues hivernales et printanières)

- Bonne représentation de la variabilité des données
- Erreur systématique en général plus élevée  
RFR : Débits en-dessus du 50 centile (SC50C)



**RFR** : Random Forest Regressor  
**GBM** : Gradient Boosting Machines  
**HGBM** : Histogram-based GBM  
**SVR** : Support Vector Regressors

**SxQMAX** : Débit maximum annuel (x : sans (F) ou avec (C) couvert nival)  
**Sx50/80/90C** : Débit au-dessous des 50, 80, 90 centiles



Existe-t-il une manière de mettre en valeur les interactions du système climat-débit pour estimer l'évolution temporelle des forts débits dans un horizon futur?



Serait-il possible d'exploiter ces interactions du système climat-débit à l'aide d'un modèle d'apprentissage automatique (MAA) simple et facile à utiliser?



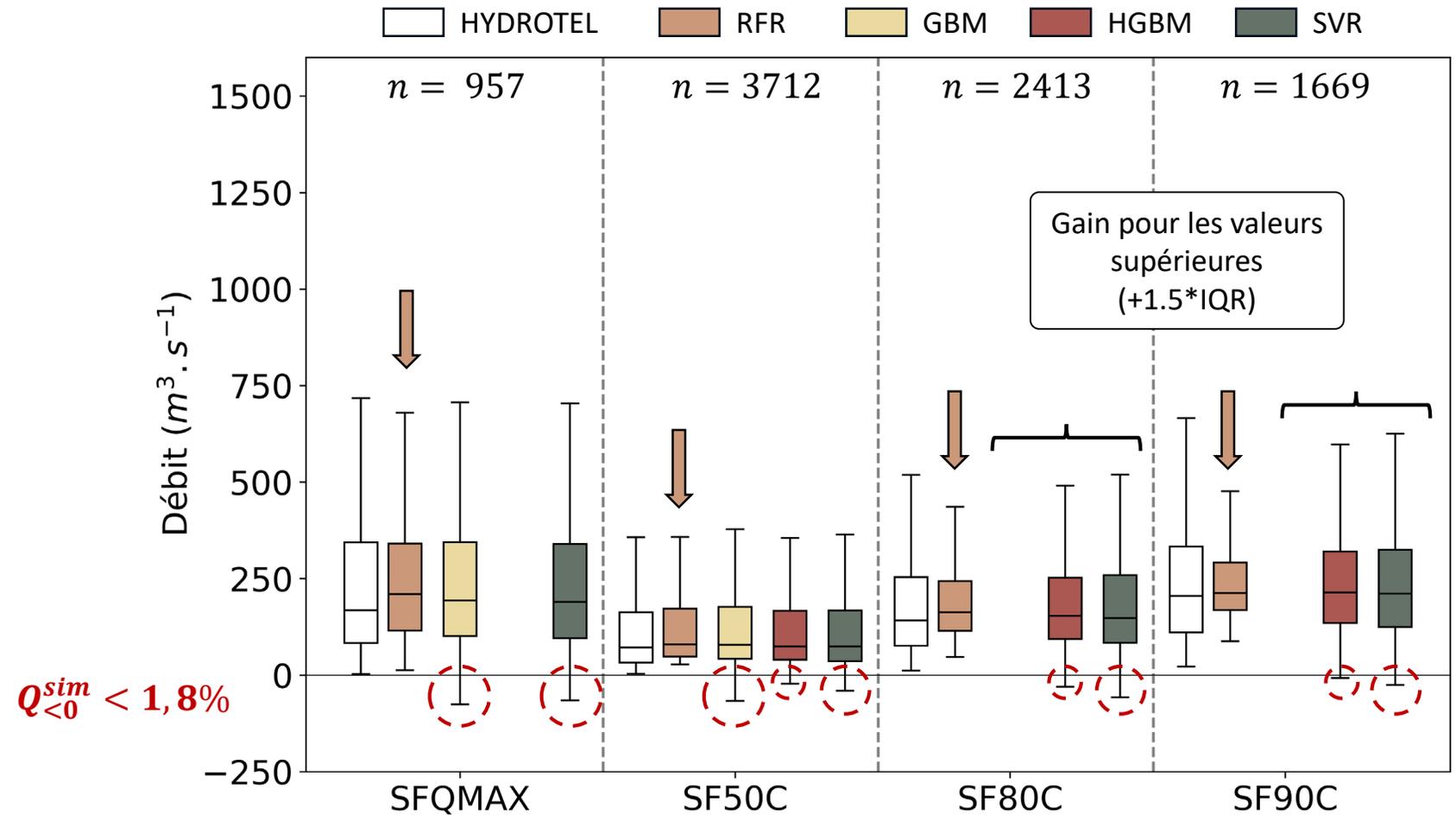
Serait-il possible d'obtenir une capacité prédictive de ces MAA similaire à celle de l'approche hydroclimatique classique afin d'estimer l'évolution temporelle des forts débits dans un contexte de changement climatique?

# ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ PRÉDICTIVE

Scénario climatique SSP3-7.0

Période de référence (1997 – 2023)

Données utilisées (Test)



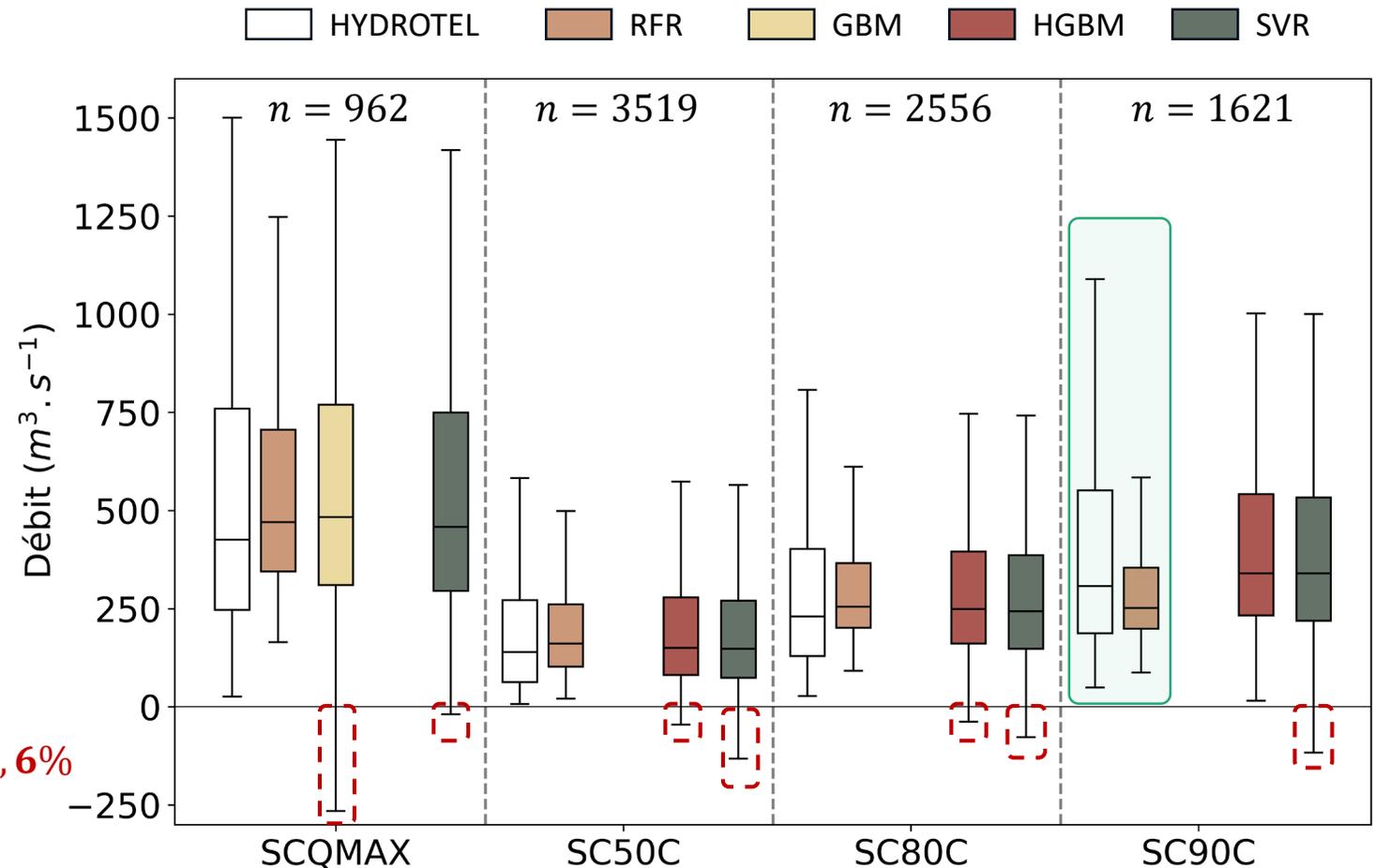
# ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ PRÉDICTIVE

Ampleur de la queue de distribution vers le haut (crues printanières)

Représentativité des valeurs dans le Q3 et  $+1.5 \cdot \text{IQR}$

Troncation de la distribution pour des valeurs de débit inférieures à zéro

$$Q_{<0}^{sim} < 1,6\%$$



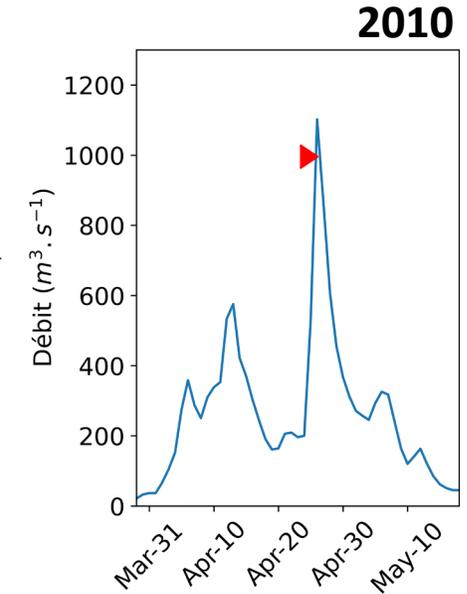
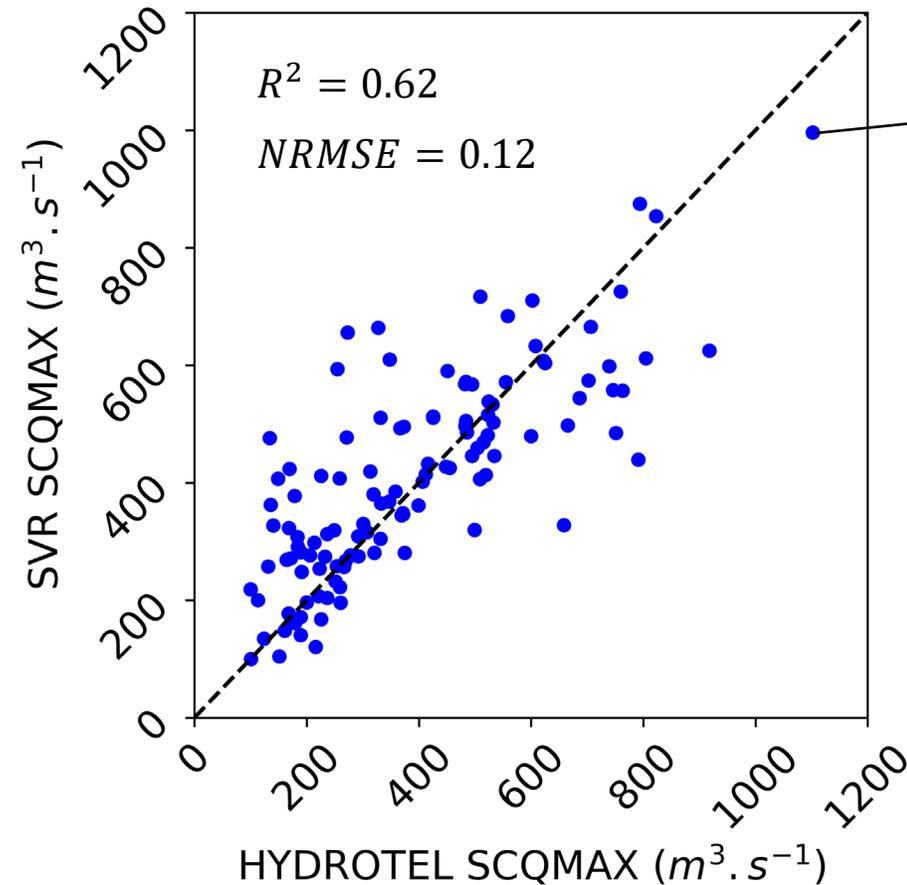
# PERSPECTIVE HYDROLOGIQUE

## RIVIÈRE BÉCANCOUR

Débit maximum saisonnier avec  
couvert nival (**SCQMAX**)

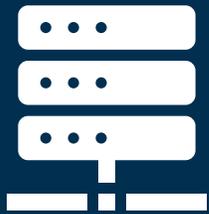
Données du test des simulations de  
débits de crue de la rivière Bécancour  
avec le modèle **SVR**

Les données SVR représentant  
62% de la variabilité des débits  
simulés par HYDROTEL



# CONCLUSION

---



Mise en valeur des données des modèles climatiques afin de caractériser les conditions antérieures aux événements de crues



Exploration de l'utilisation des modèles d'apprentissage automatique pour l'estimation de l'évolution temporelle des forts débits (IHF)



Utilisation de trois modèles d'apprentissage automatique avec des performances à l'entraînement satisfaisantes



Distributions des IHF des MAA très similaires à celles obtenues avec l'approche hydroclimatique classique (HYDROTEL)



Institut national  
de la recherche  
scientifique

# Merci de votre attention

[andres.gonzalez@inrs.ca](mailto:andres.gonzalez@inrs.ca)

---

 **SYMPOSIUM**  
**OURANOS 2025**

**Remerciements:**

Spécialistes Scénarios et Service climatiques:

- **Marco Braun et Gabriel Rondeau-Genesse**

  
**Ouranos**

