

Avec le soutien de :



# COLLOQUE GESTION DES EAUX SOUTERRAINES

Du 15 au 17 février 2023

à l'ENSEGID - Bordeaux INP

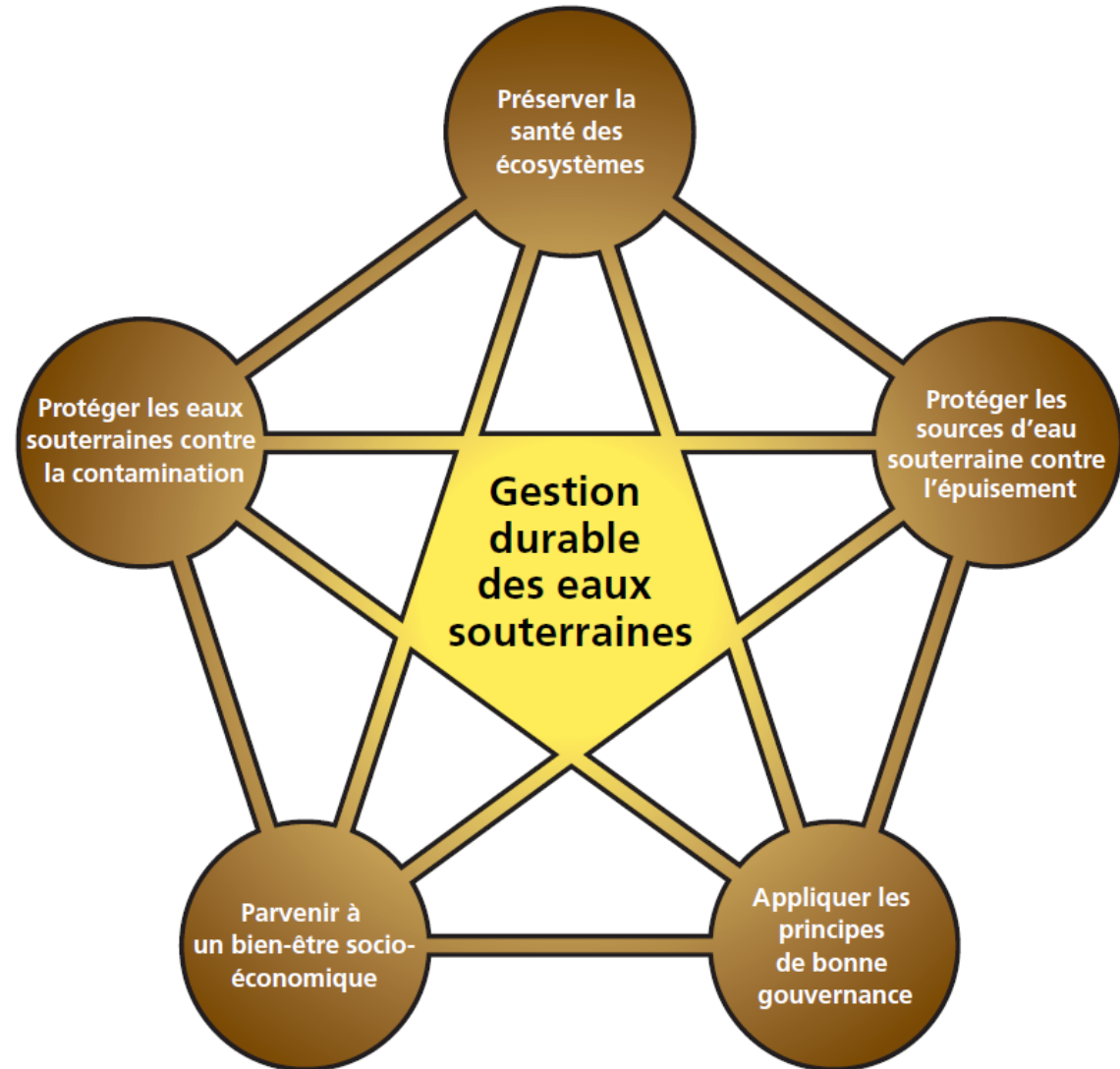
La modélisation intégrée des eaux de surface et des eaux souterraines en appui à la gestion de l'eau

René Therrien

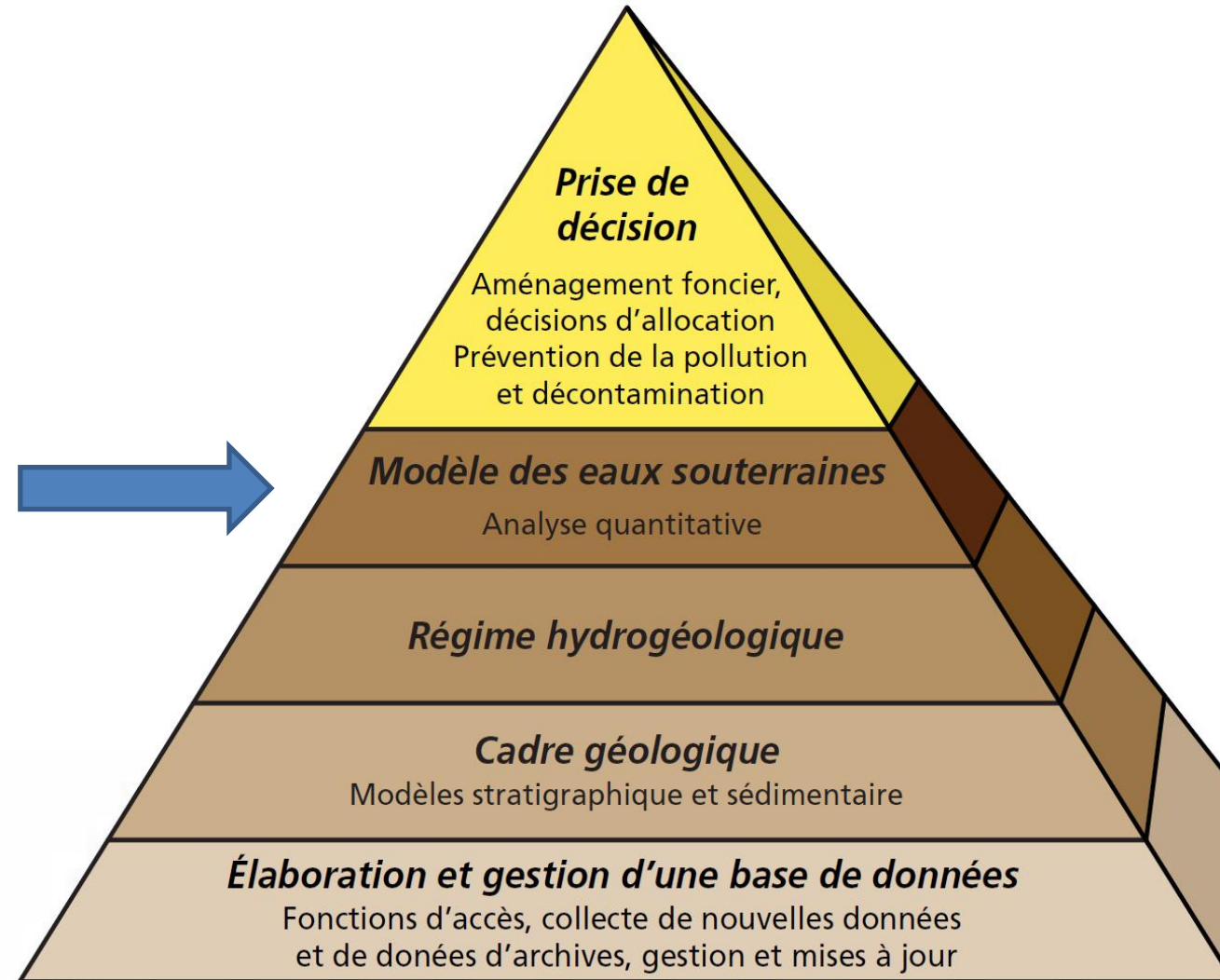
Département de géologie et de génie géologique  
Université Laval, Québec, Canada



# Un comité d'experts canadiens a proposé 5 critères pour assurer la gestion durable de l'eau souterraine

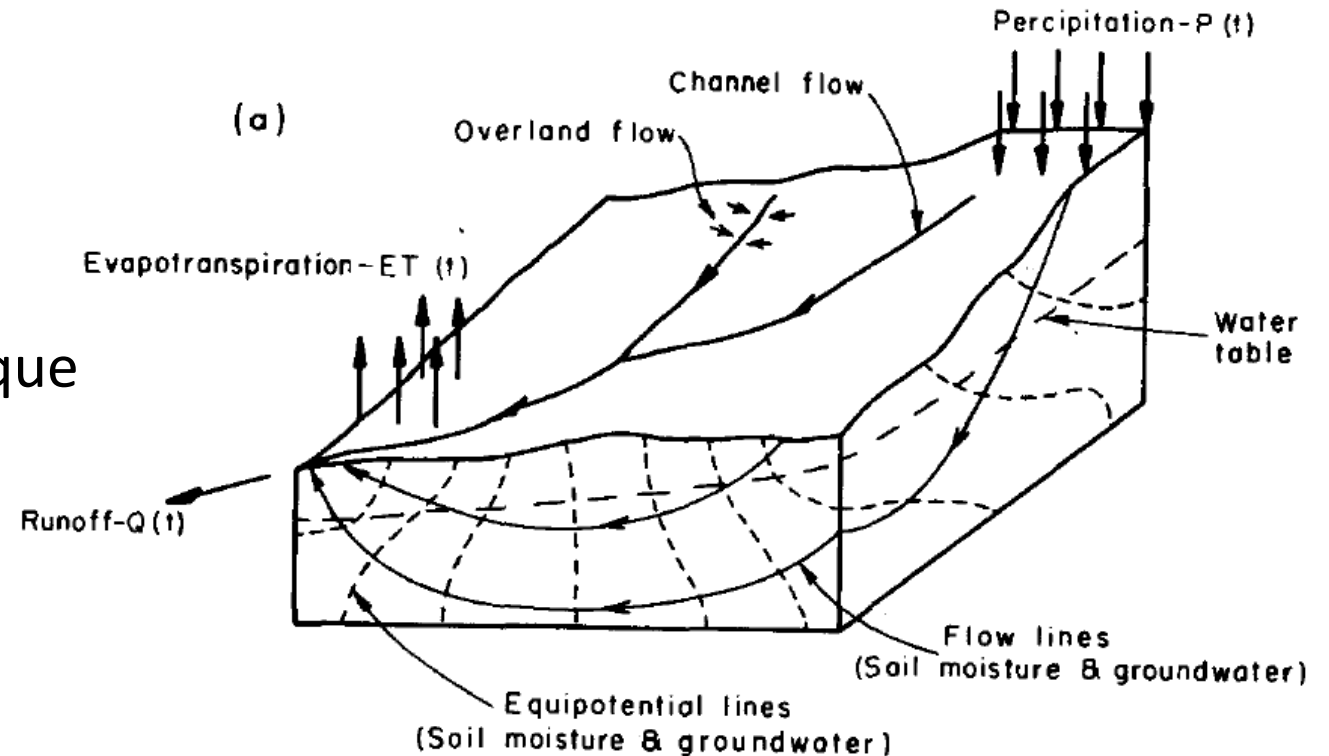


# La modélisation hydrogéologique est une étape nécessaire à la prise de décision



# La plupart des modèles intégrant les eaux de surface et les eaux souterraines sont basés sur Freeze and Harlan (1969): The Blueprint for a Physically-Based Digitally-Simulated Hydrologic Response Model

- Écoulement souterrain
  - 2D, 3D, saturé, non saturé
- Écoulement de surface
  - 1D St. Venant ou vague cinématique
- Précipitation
- Évapotranspiration

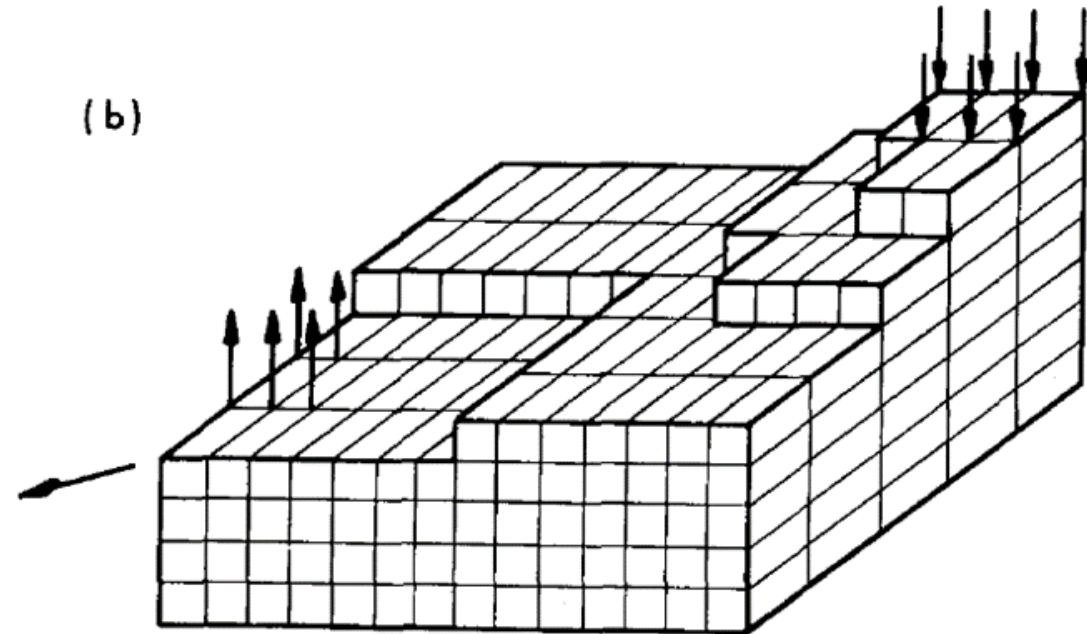


## Basin hydrologique

Freeze and Harlan, JHyd, (1969)

# La plupart des modèles intégrant les eaux de surface et les eaux souterraines sont basés sur Freeze and Harlan (1969): The Blueprint for a Physically-Based Digitally-Simulated Hydrologic Response Model

- Écoulement souterrain
  - 2D, 3D, saturé, non saturé
- Écoulement de surface
  - 1D St. Venant ou vague cinématique
- Précipitation
- Évapotranspiration



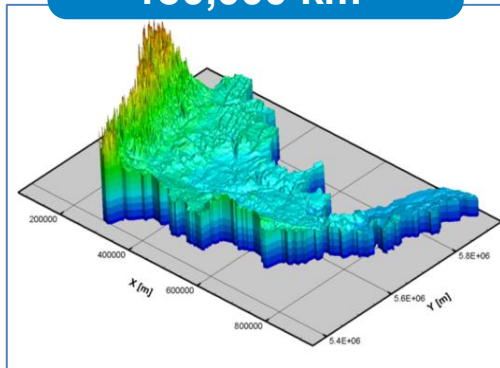
## Basin hydrologique

Freeze and Harlan, JHyd, (1969)

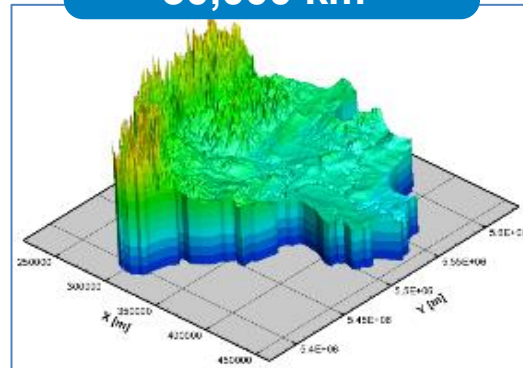
# Quelques enjeux de la modélisation intégrée déjà identifiées par Freeze et Harlan

- Disponibilité des données
- Temps de calcul
- Échelle d'application

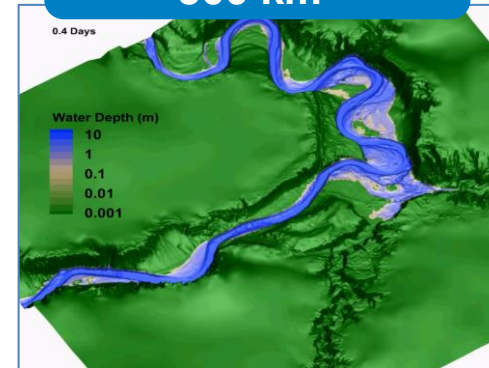
**Major River Basin**  
150,000 km<sup>2</sup>



**Sub-Basin**  
30,000 km<sup>2</sup>



**Regional Scale**  
500 km<sup>2</sup>

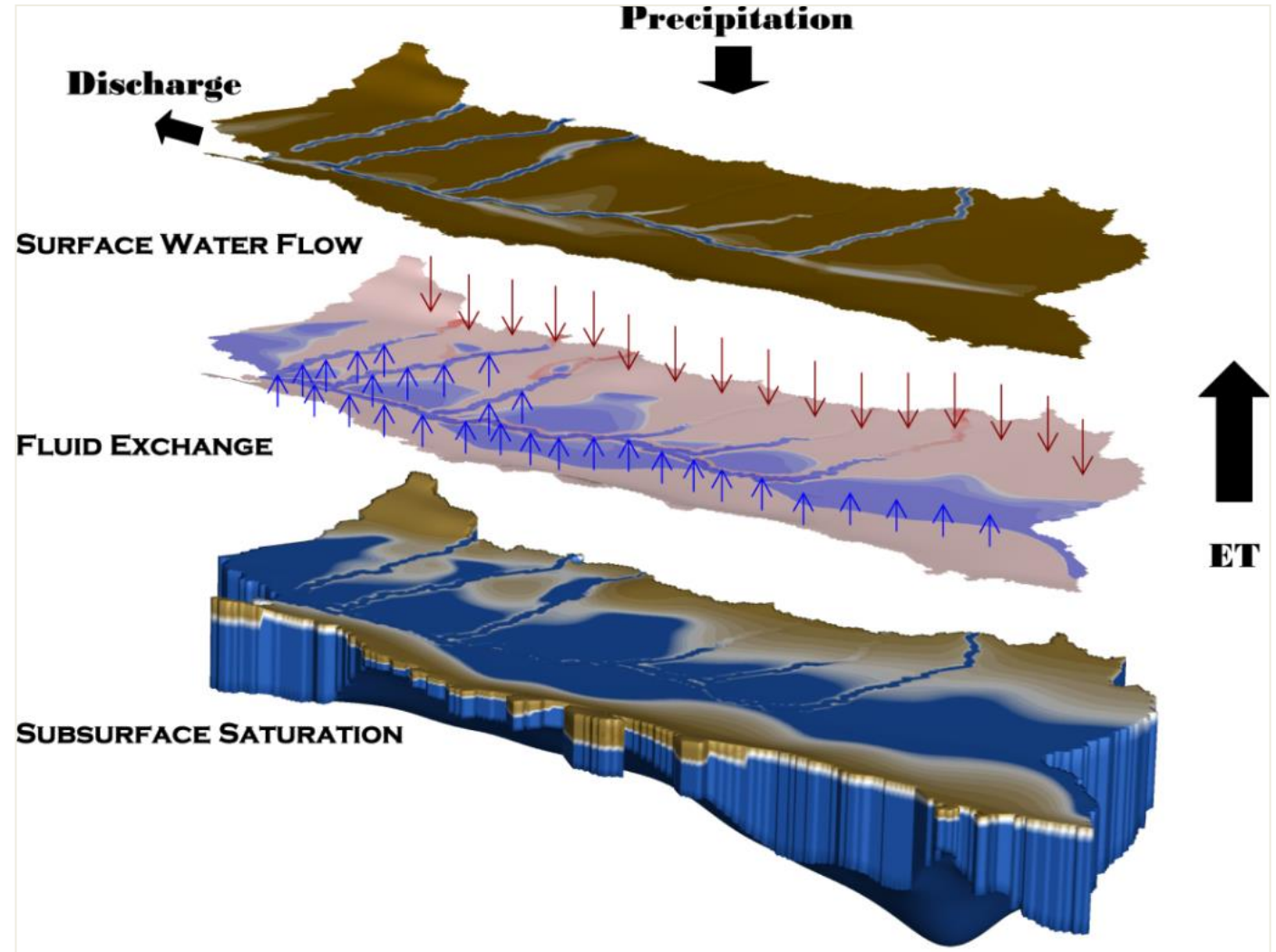


**Field – Soil Scale**  
1 km<sup>2</sup>

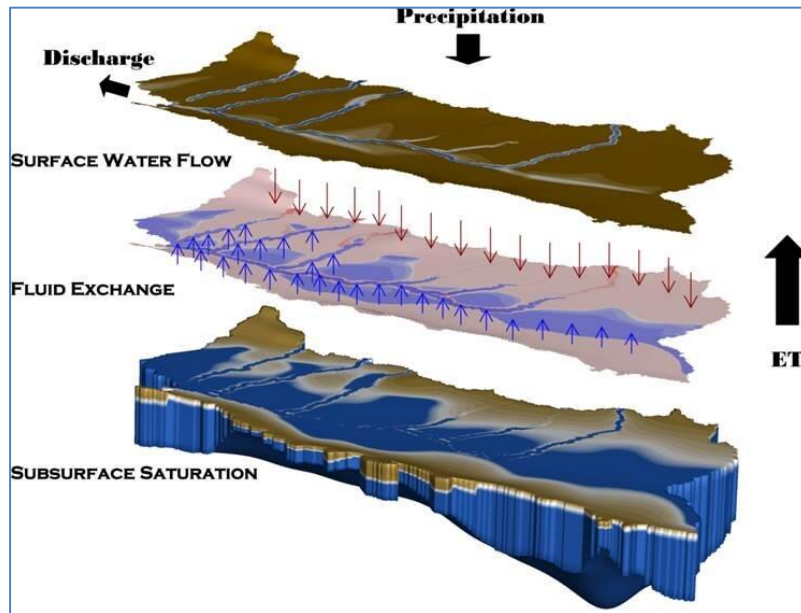


# La plateforme *HydroGeoSphere* (HGS)

- Écoulement de surface 2D
  - Onde diffusive
- Écoulement souterrain 3D
  - Saturation variable (équation de Richards)
- Précipitation, Évapotranspiration, module de neige
- Transport de masse et d'énergie



# Conception d'un modèle HGS

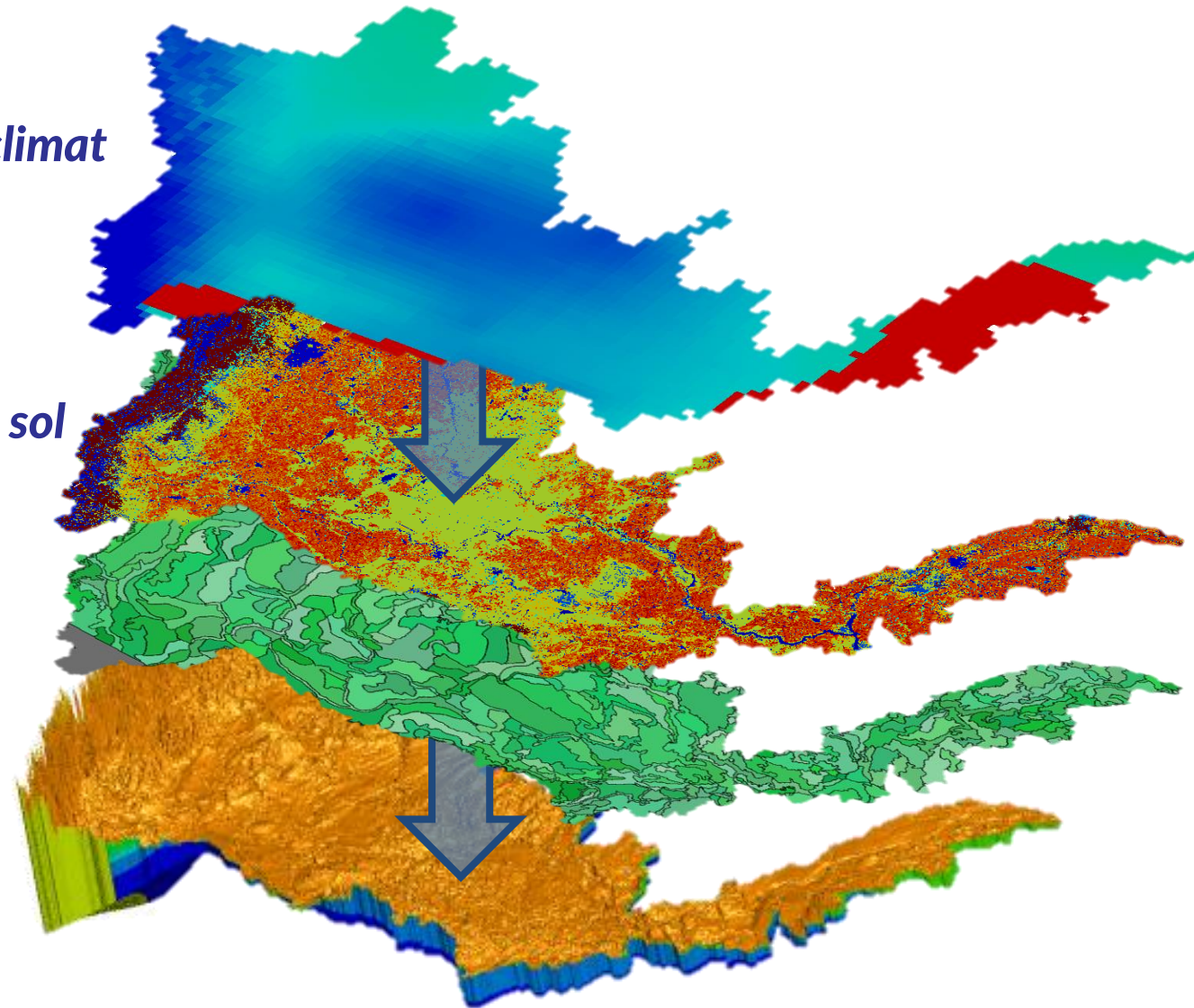


Forçage météo, climat

Occupation du sol

Sols

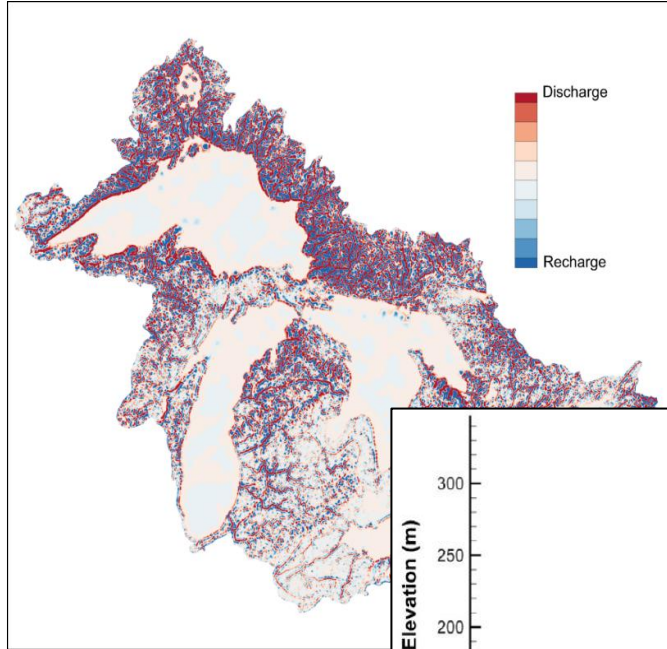
Géologie



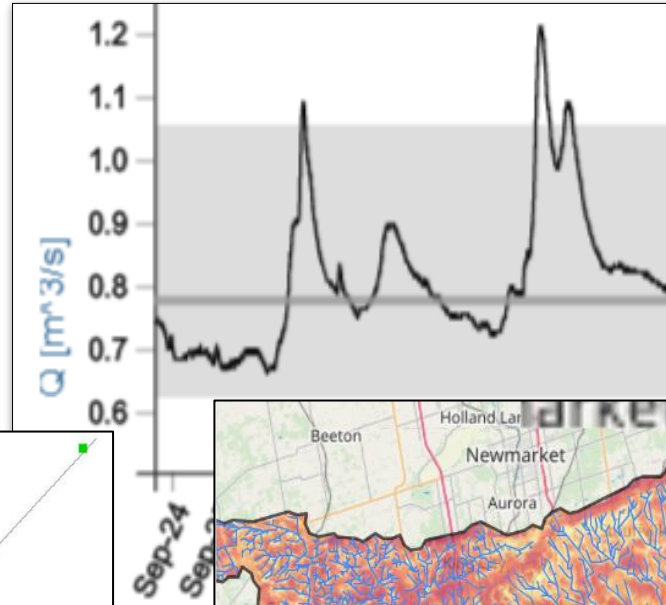


# Exemples de résultats produits par HGS

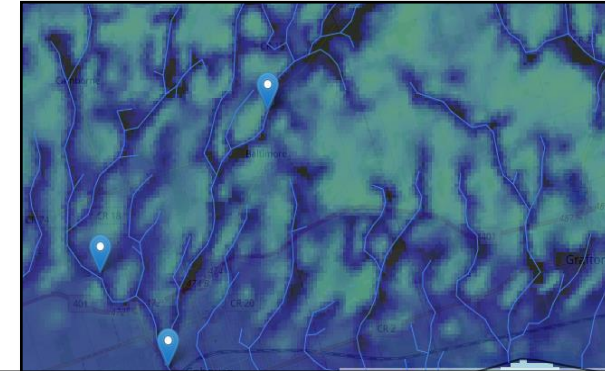
*Distribution de l'infiltration/exfiltration*



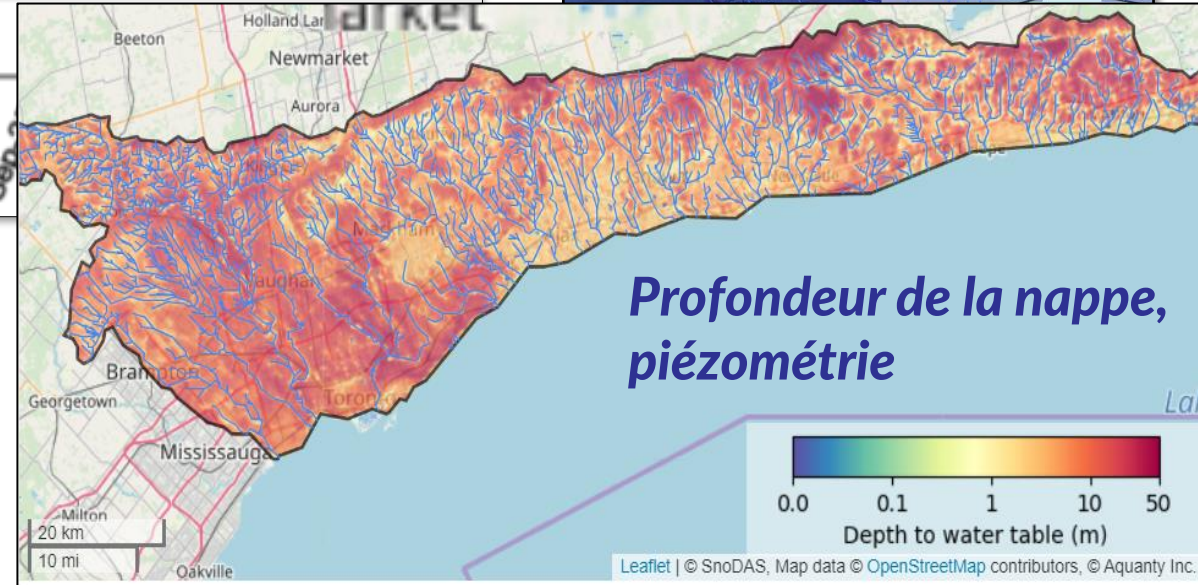
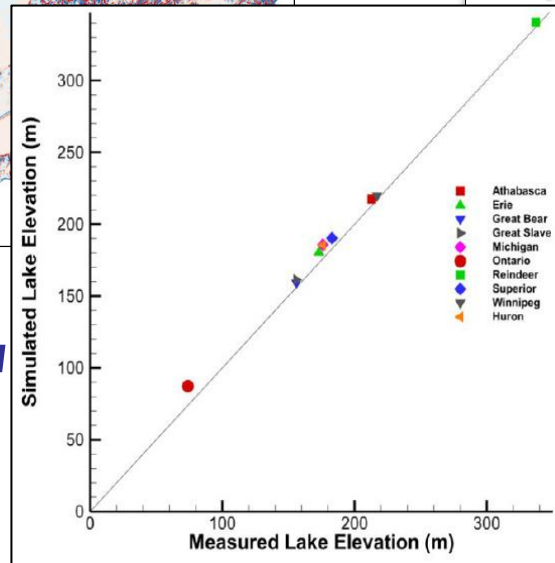
*Débit en cours d'eau*



*Saturation des sols*



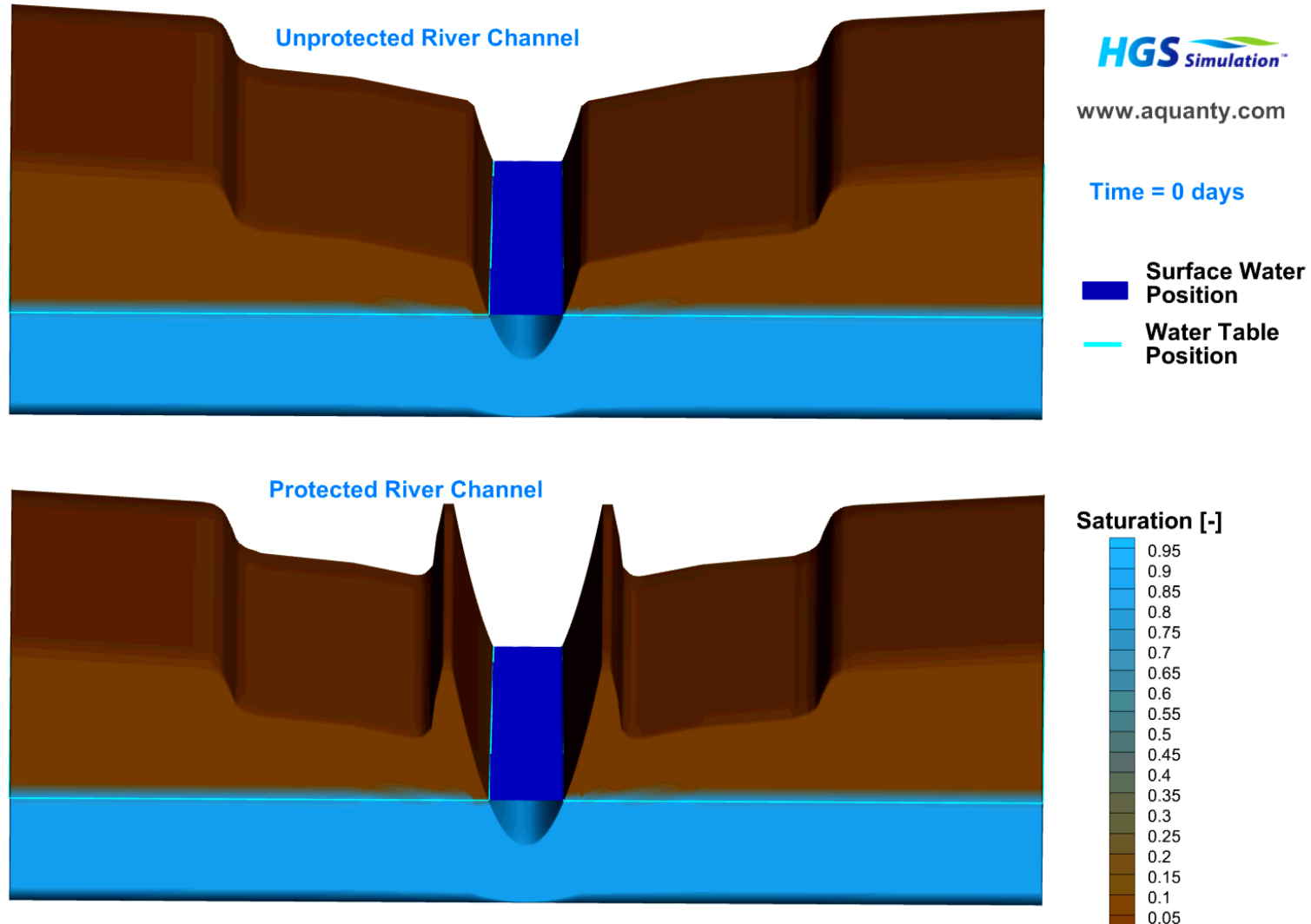
*Niveaux d'eau en surface*



*Aussi, taux d'évapotranspiration, concentrations de solutés, accumulation d'eau en surface, etc...*

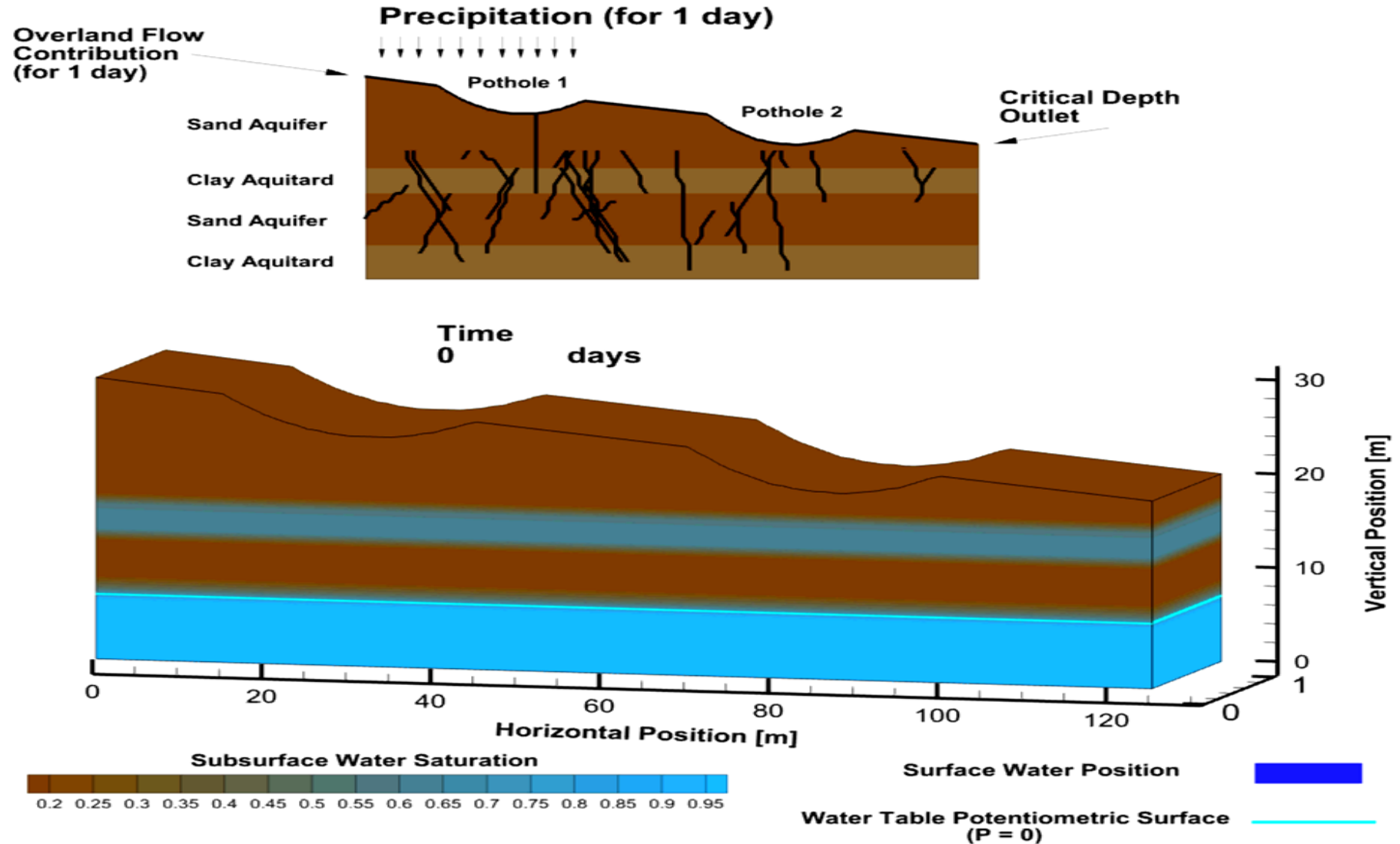
# Simulation d'une stratégie de mitigation d'inondation

## HydroGeoSphere Simulation for Assessing Flood Mitigation Strategies



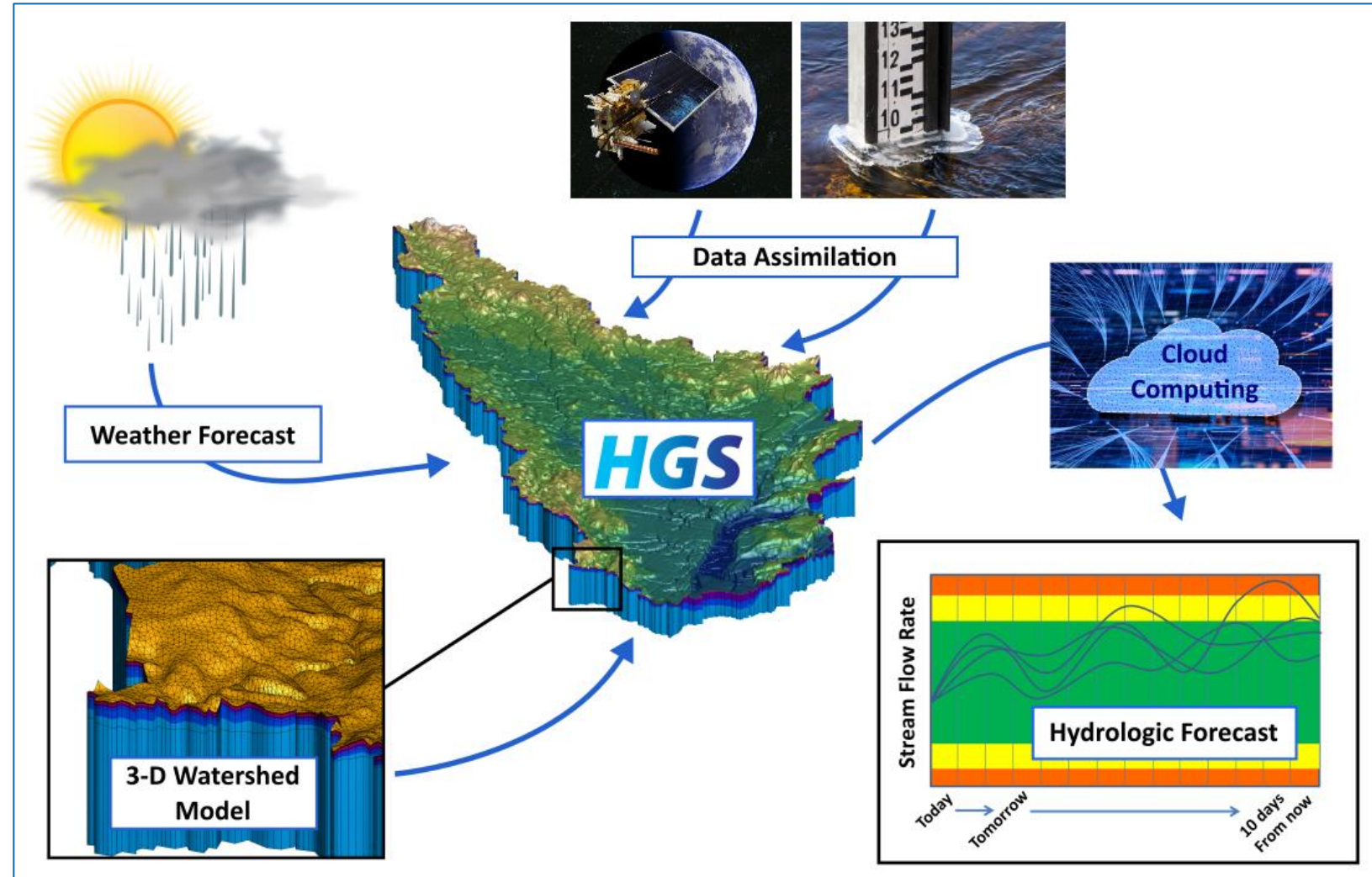
# Simulation conceptuelle de la recharge dans un environnement de "potholes" (prairies canadiennes)

## Prairie Pothole Conceptual Simulation



# HGS-RT – Prévisions hydrologiques en temps réel basées sur le cloud

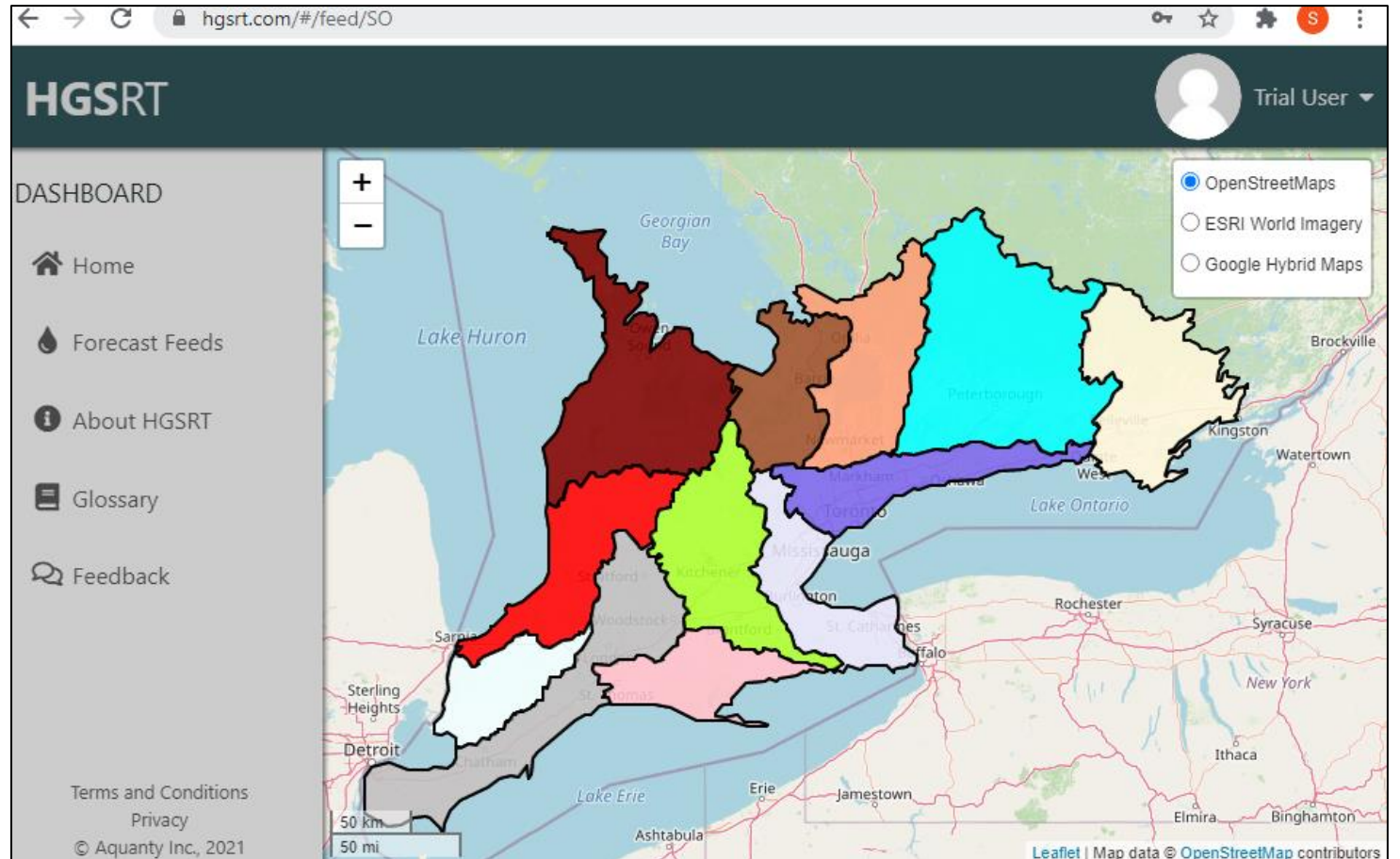
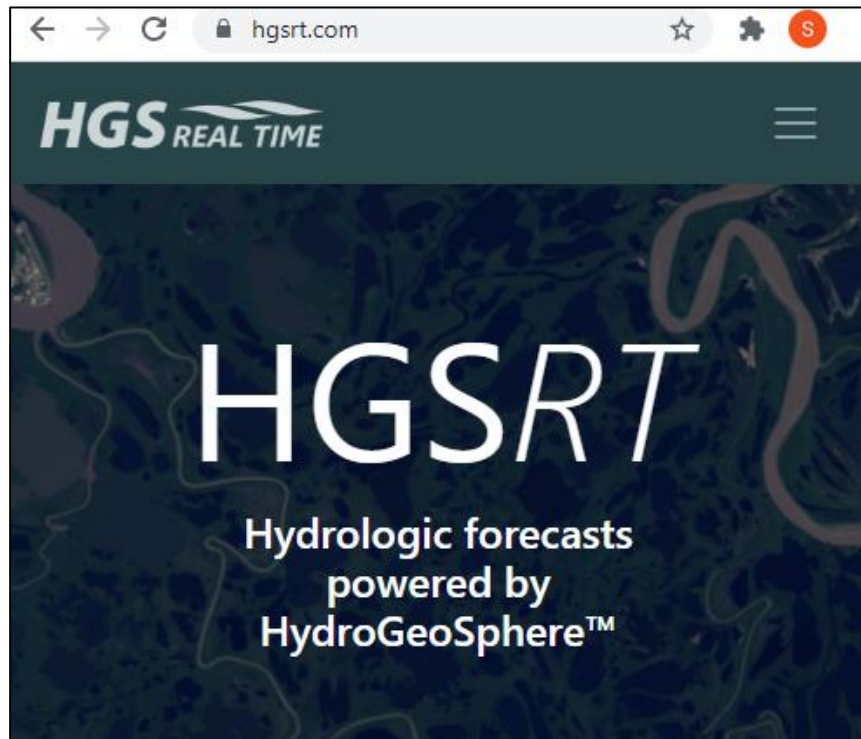
- La modélisation en temps réel avec assimilation de données met à jour l'état du modèle, à partir d'une « banque » de modèles existants.
- Utilisation d'un ou plusieurs scénarios de prévisions météorologiques.
- Les résultats des prévisions d'ensemble peuvent être analysés et présentés dans un cadre probabiliste.



# HGS-RT – Une plateforme web permet la visualisation des résultats de simulation

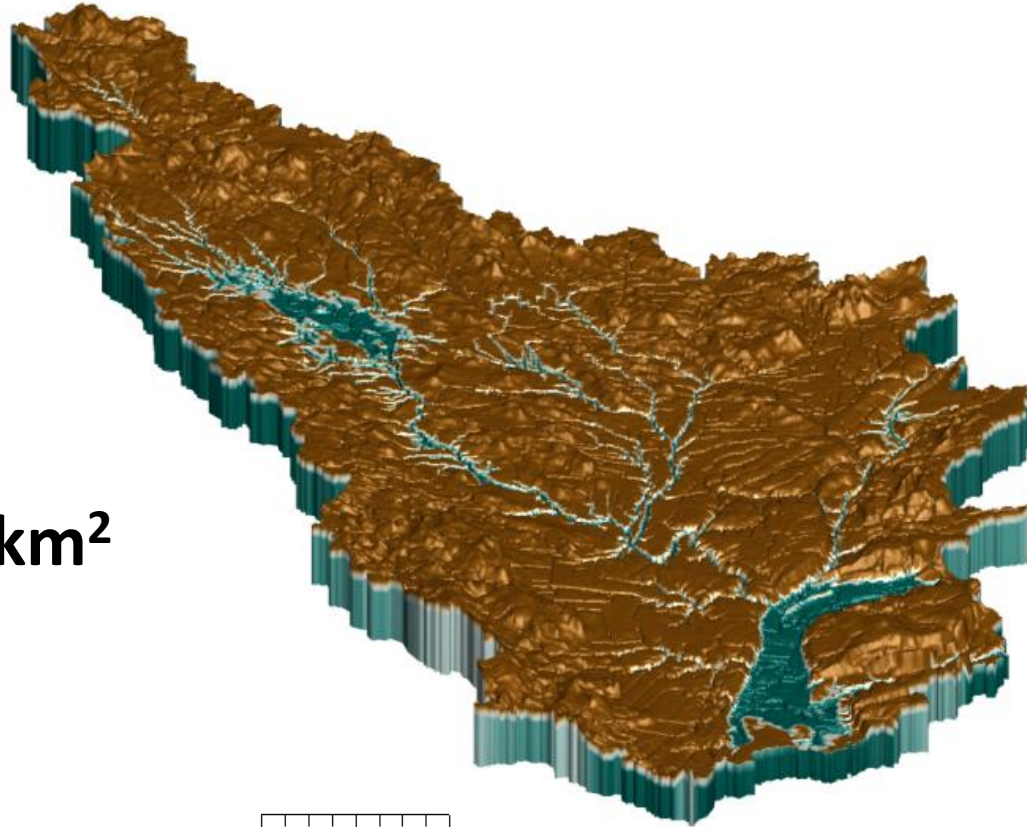
Prévisions hydrologiques opérationnelles basées sur un ensemble de 7 et 32 jours

- Débits des eaux de surface, Niveaux des nappes, Recharge et exfiltration, Humidité du sol



# HGS-RT – Application à la South Nation Watershed

~4200 km<sup>2</sup>



0 5 10 20 Kilometers

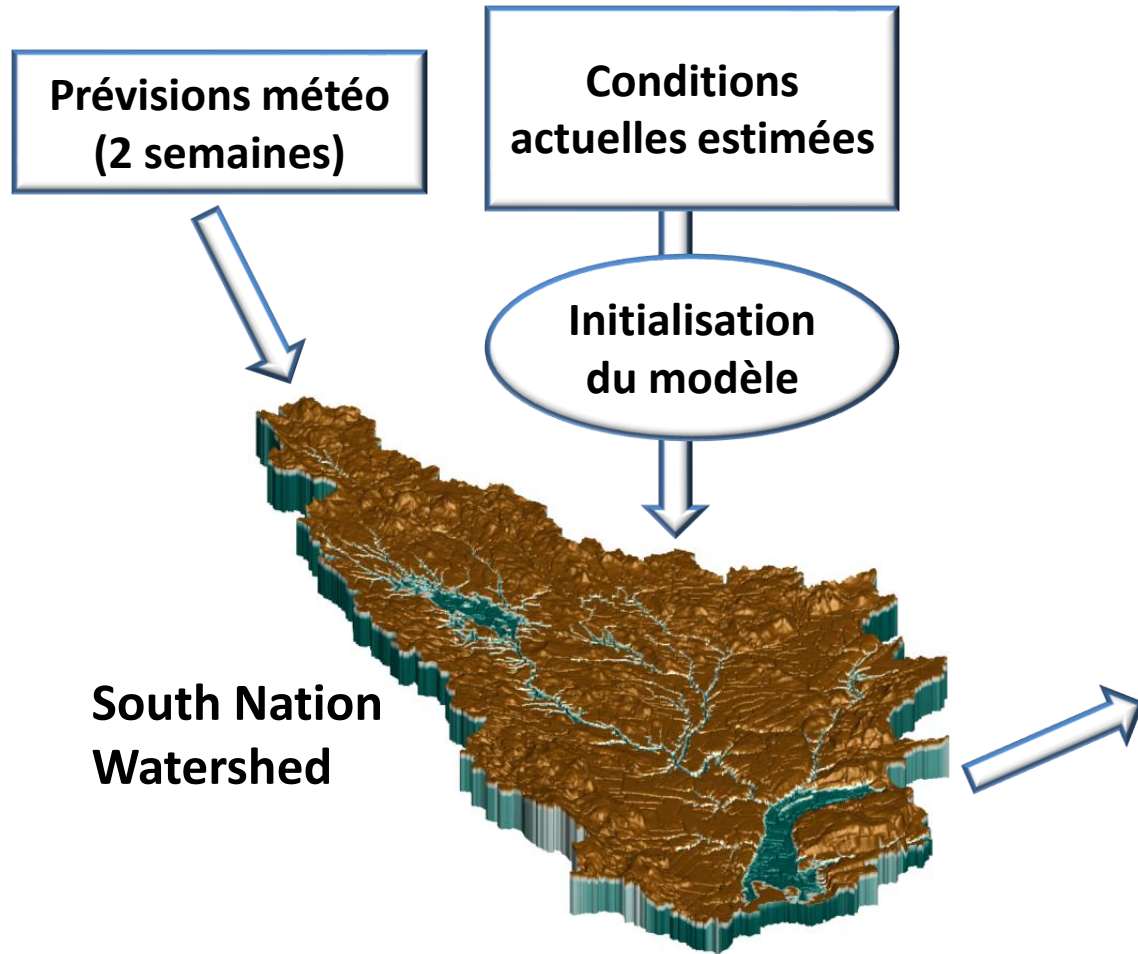
## Observations

- Débit en cours d'eau (10)
- Humidité du sol (~6)
- Niveaux de nappe (~6)
- Équivalent en eau de la neige (7)

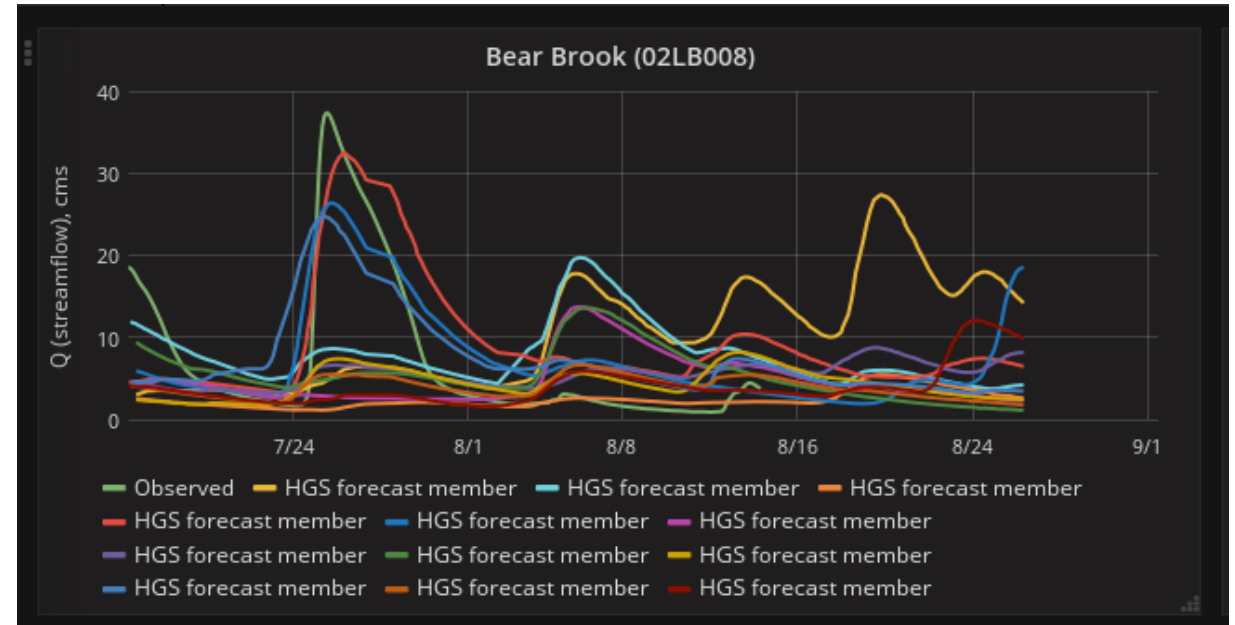
## Modèle

- 7 couches
- 211 000 noeuds par couche
- Taille des éléments
  - Maximale = 75 m
  - Le long des cours d'eau : 75 m

# HGS-RT – Application à la South Nation Watershed



## Prévisions d'ensemble sur 2 semaines

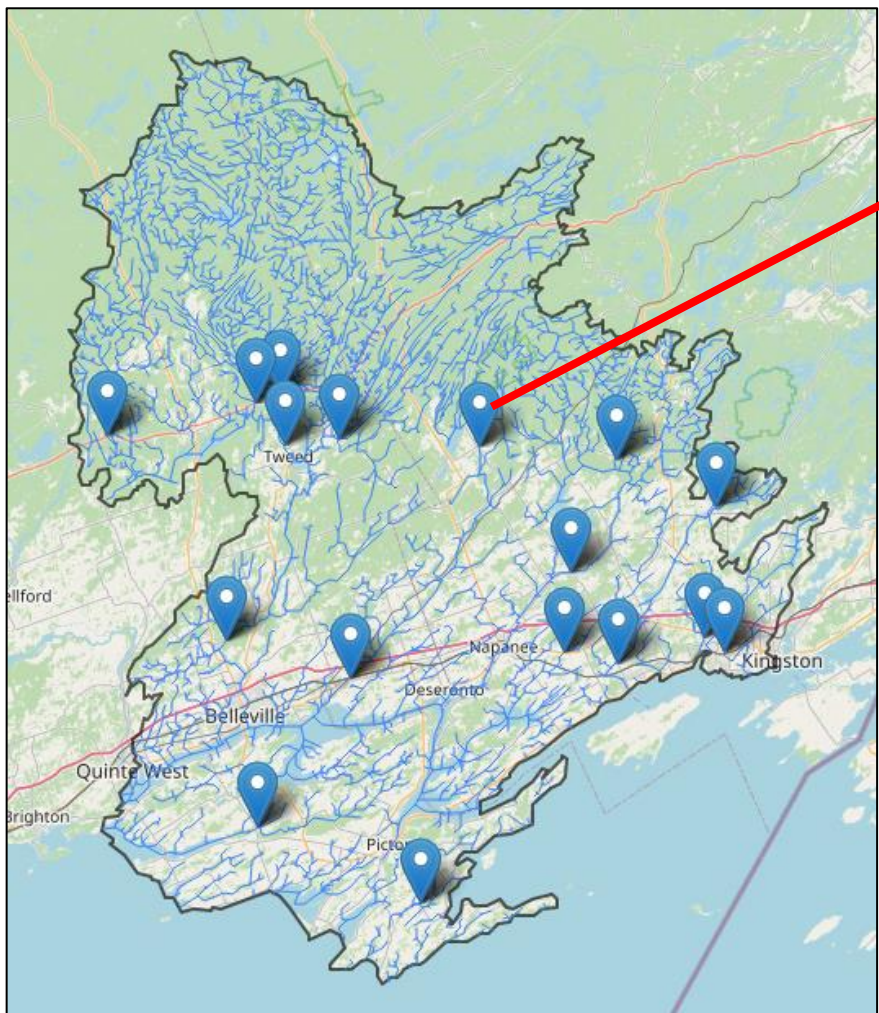


### Prévisions sur 2 semaines:

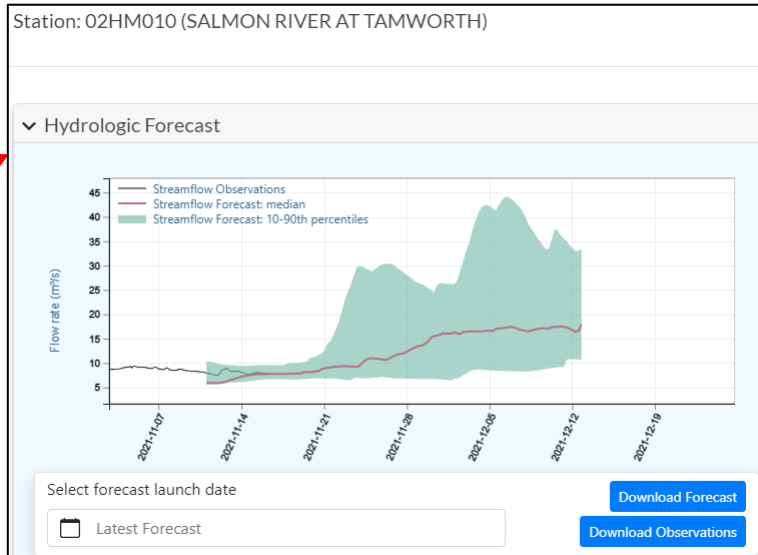
- Débit aux de surface
- humidité du sol
- Niveau de nappe
- accumulation de neige (hiver)
- évapotranspiration (été)
- alarmes hydrologiques

- Mise à jour des prévisions aux 12 h ou 24 h

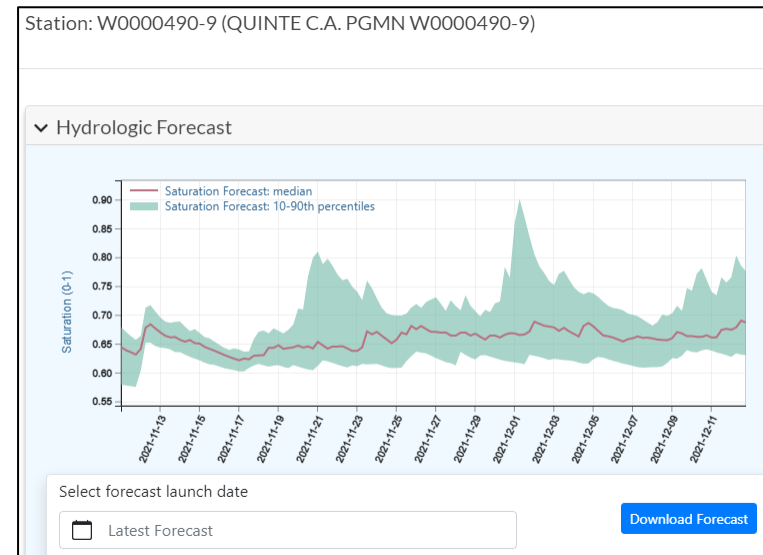
# Quelques résultats de simulation pour le bassin versant Quinte (Ontario)



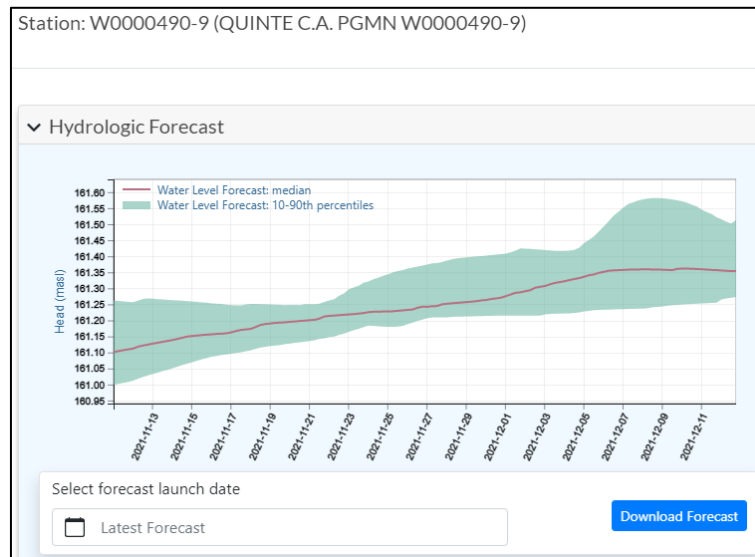
## Débit en cours d'eau



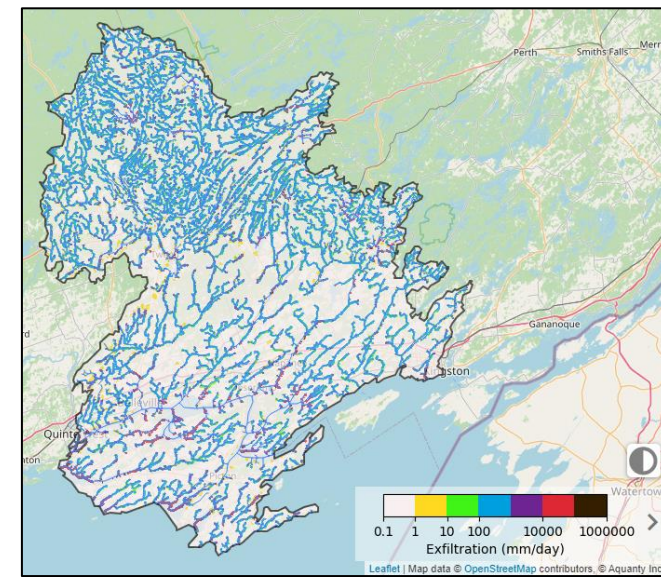
## Saturation dans le sol



## Niveau piézométrique



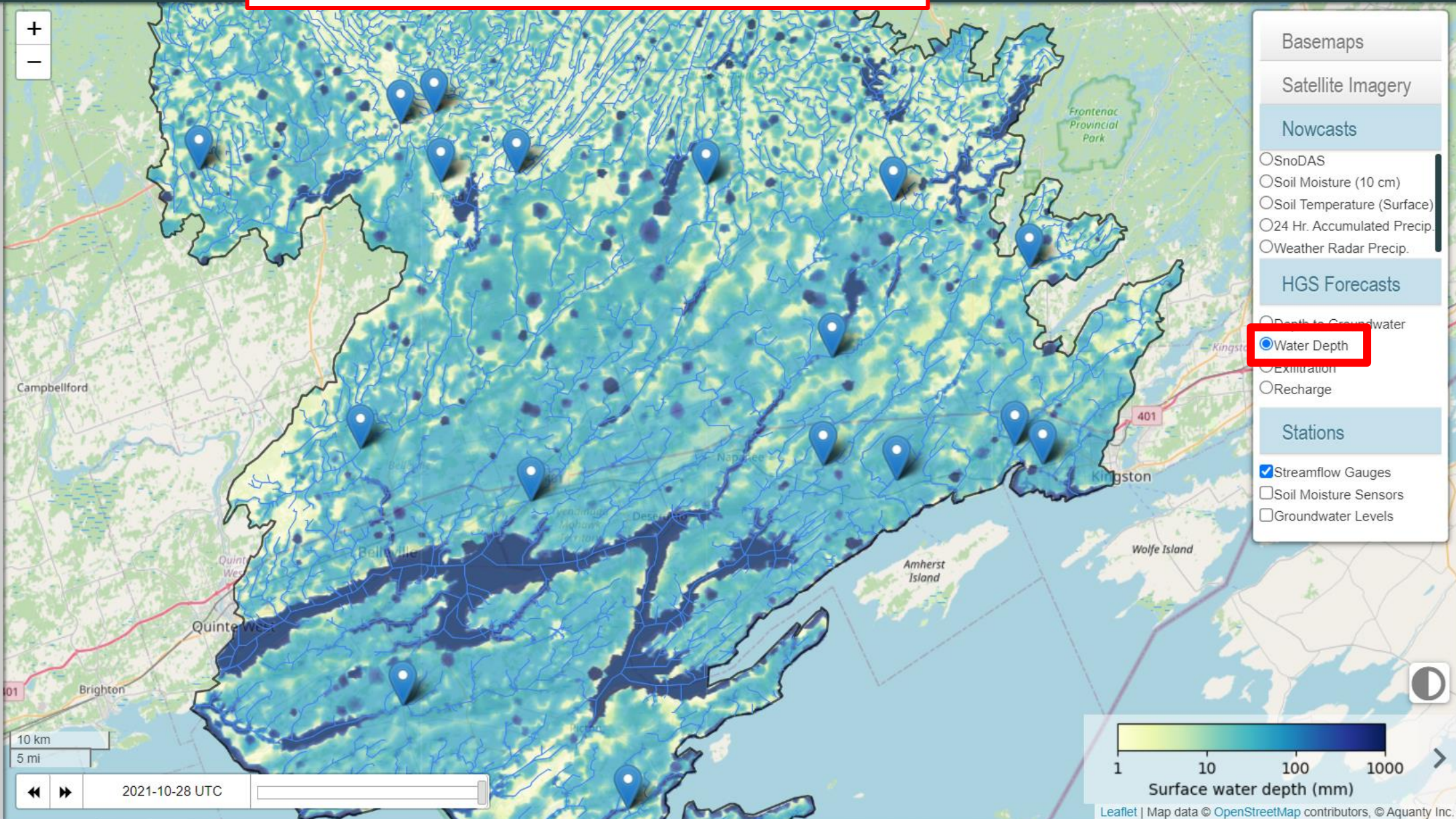
## Exfiltration eau souterraine



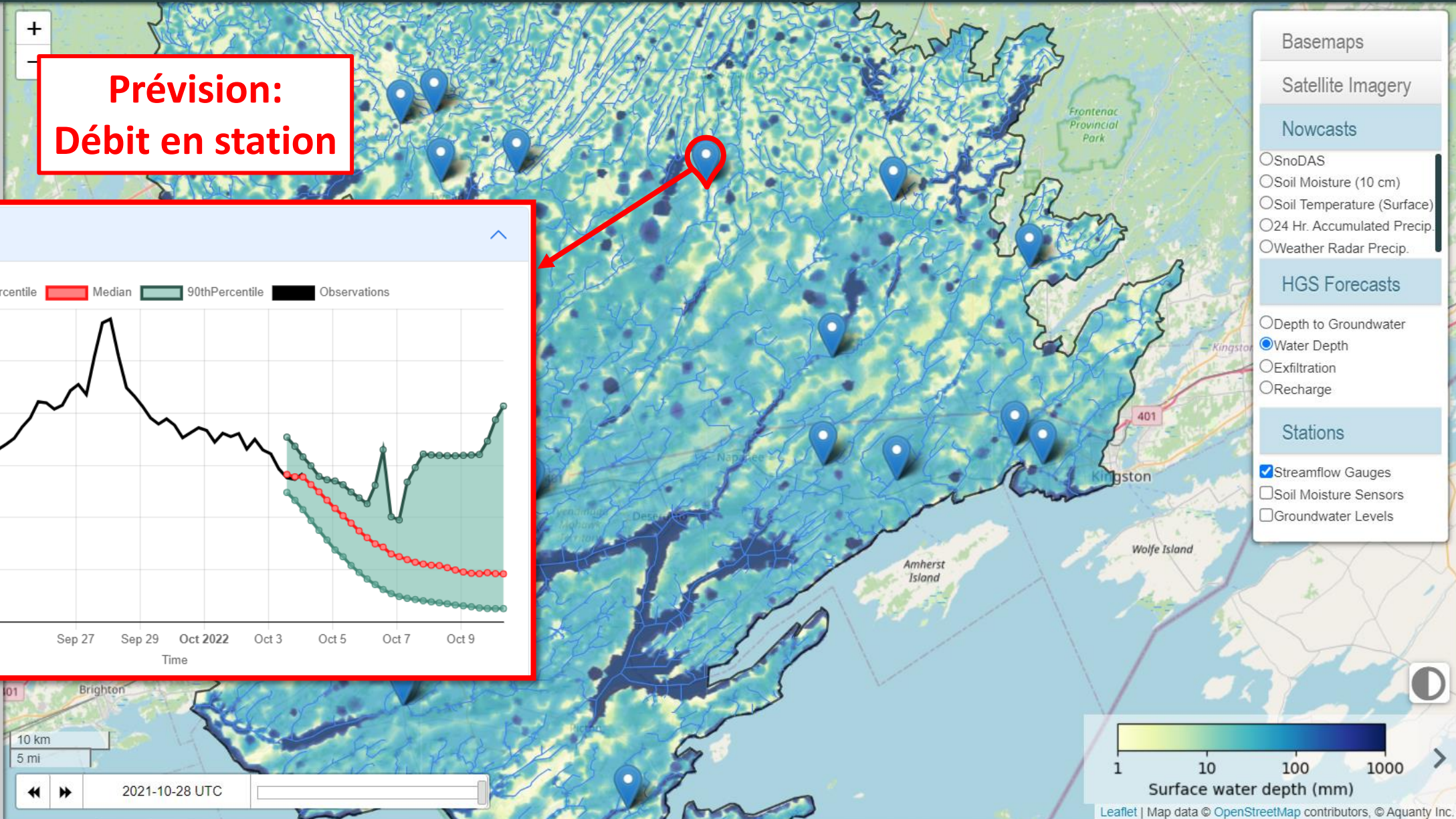
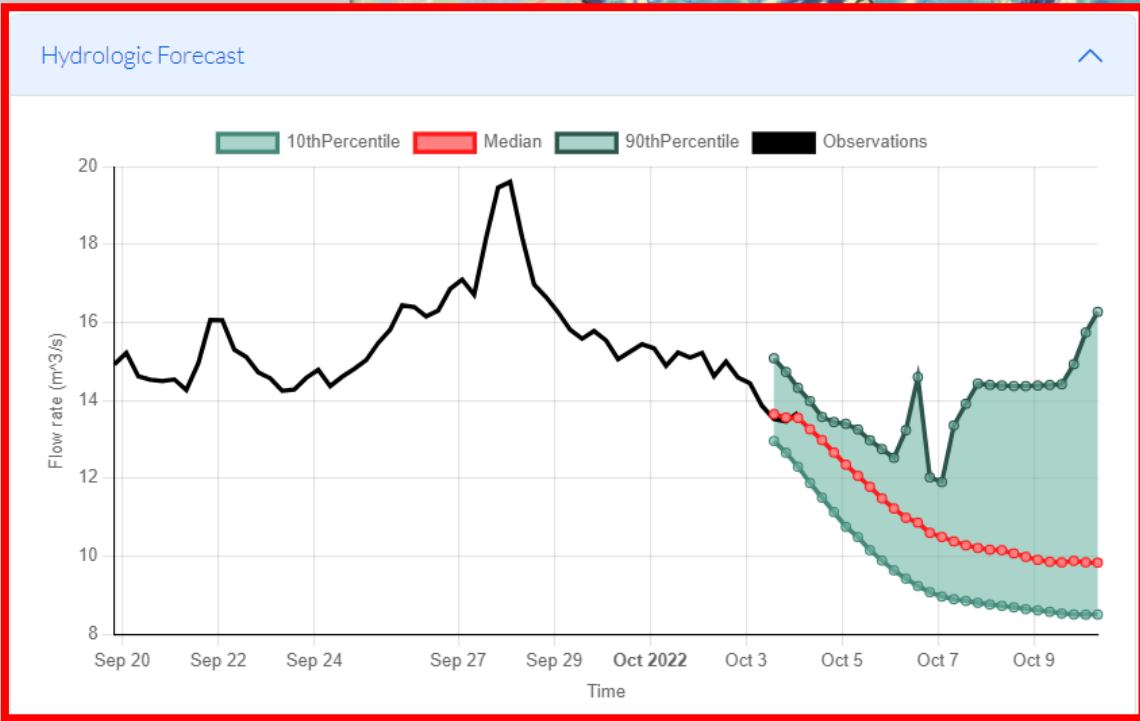


# Prévision : Hauteur d'eau en surface

- DASHBOARD
- Home
- Forecast Feeds
- About HGSRT
- Glossary
- Feedback



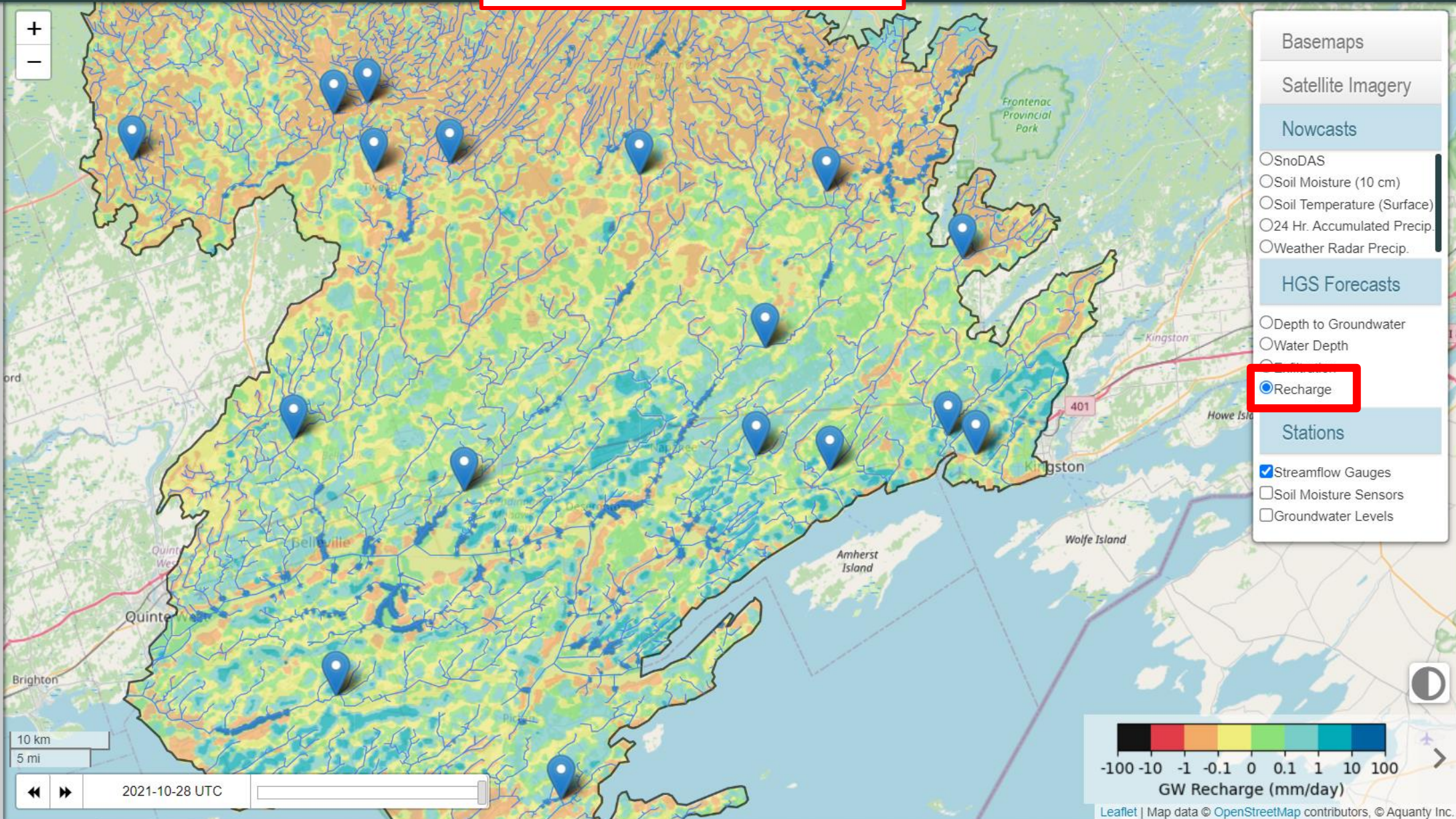
**Prévision:  
Débit en station**



- Basemaps
- Satellite Imagery
- Nowcasts
  - SnoDAS
  - Soil Moisture (10 cm)
  - Soil Temperature (Surface)
  - 24 Hr. Accumulated Precip.
  - Weather Radar Precip.
- HGS Forecasts
  - Depth to Groundwater
  - Water Depth
  - Exfiltration
  - Recharge
- Stations
  - Streamflow Gauges
  - Soil Moisture Sensors
  - Groundwater Levels

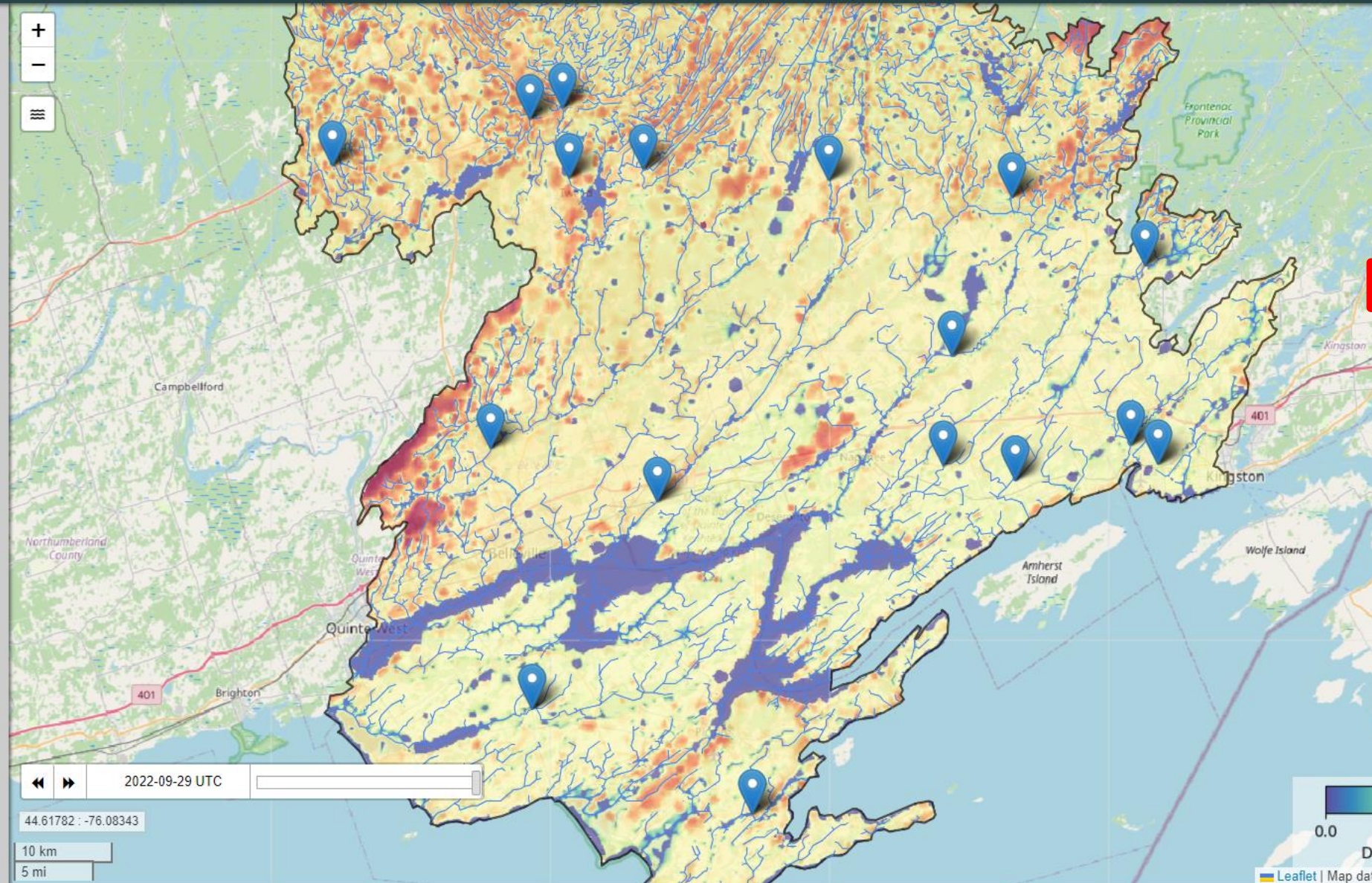
## Prévision : Recharge

- DASHBOARD
- Home
- Forecast Feeds
- About HGSRT
- Glossary
- Feedback



# Prévision: Profondeur de la nappe

- DASHBOARD
- Home
- Forecast Feeds
- Remote Sensing
- About HGSRT
- Glossary
- Feedback



Basemaps

Satellite Imagery

Current Conditions

Static Data

HGS Forecasts

- Depth to Groundwater
- Exfiltration
- Recharge

Stations

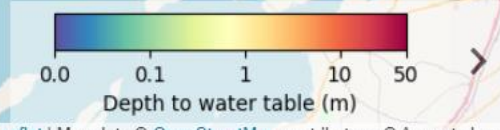
- Streamflow Gauges
- Soil Moisture Sensors
- Groundwater Levels

2022-09-29 UTC

44.61782 : -76.08343

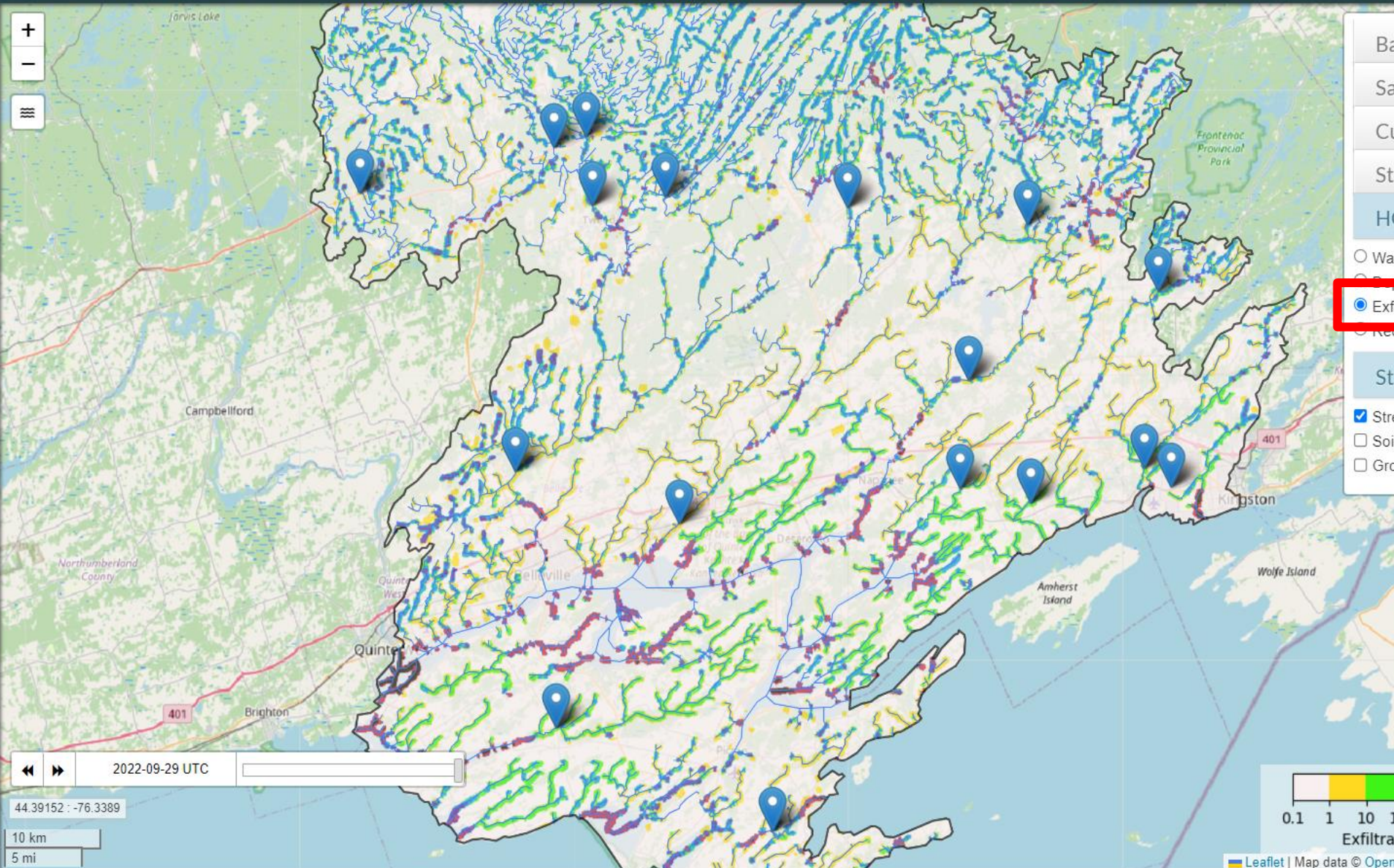
10 km

5 mi



## Prévision: Exfiltration

- DASHBOARD
- Home
- Forecast Feeds
- Remote Sensing
- About HGSRT
- Glossary
- Feedback



- Basemaps
- Satellite Imagery
- Current Conditions
- Static Data
- HGS Forecasts**
- Water Depth
- Groundwater
- Exfiltration
- Recharge
- Stations**
- Streamflow Gauges
- Soil Moisture Sensors
- Groundwater Levels

# À une échelle complètement différente - Le projet Canada One Water

Modélisation intégrée surface-souterrain-climat pour l'adaptation au changement climatique



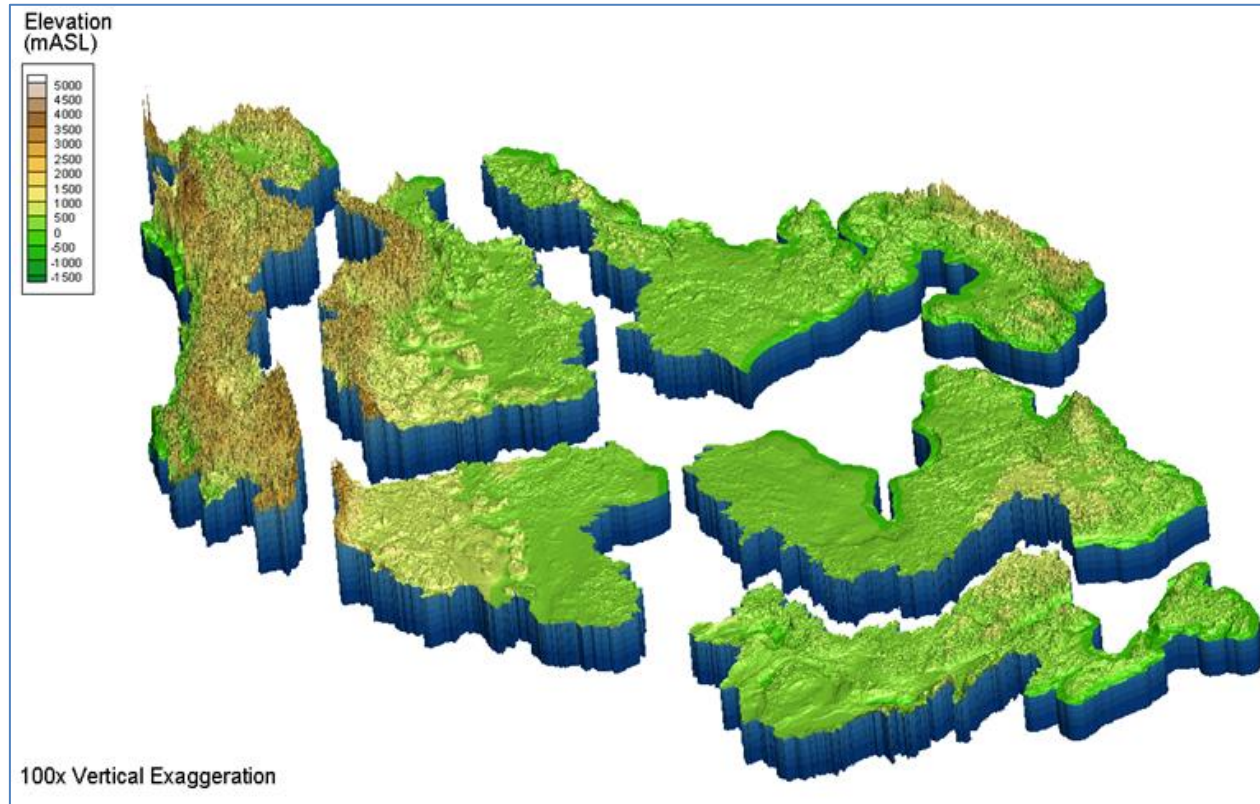
- Territoire continental canadien
  - ~ 10,000,000 km<sup>2</sup>
- Partenaires principaux
  - Ressources naturelles Canada (Commission géologique du Canada)
  - Agriculture Canada
  - Aquanty

# Le projet Canada One Water – Les objectifs



1. Développer des modèles entièrement intégrés d'eaux souterraines et d'eaux de surface pour le Canada.
2. Utiliser les modèles pour évaluer l'influence potentielle du changement climatique sur les ressources en eau (à grande échelle).
3. Traduire les résultats des modèles en paramètres pertinents pour la société.

# Le territoire est subdivisé en six zones de drainage de taille similaire (~2,000,000 km<sup>2</sup> chacune)



- Caractéristiques physiographiques prises en compte pour la délimitation des régions de drainage
- Tailles des éléments de 1000 à 5000 m
- 7 à 8 couches pour discrétiser le milieu souterrain
- 2,5 à 4 millions d'éléments 3D
- Basé sur un modèle développé par Chen et al.





# Développement et assemblage des bases de données

## Modèle surface souterrain

- MNT de la surface terrestre et bathymétrie des principaux lacs
- réseau de drainage des eaux de surface (classement)
- couverture du sol
- sols et propriétés hydrauliques
- Modèle hydrostratigraphique 3D (superficiel, roche-mère)
  - distribution du pergélisol
  - caractérisation des propriétés hydrauliques de la subsurface
  - données pour calage (niveaux nappe, niveaux eau de surface, humidité du sol), débit en cours d'eau, puits d'observation, etc.

## Atmosphérique (Historique)

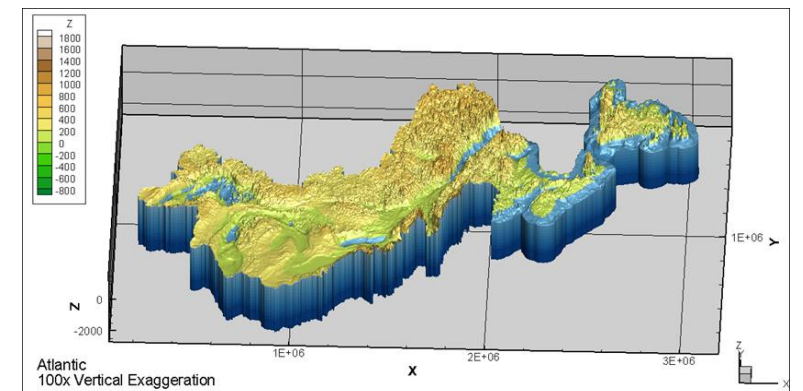
- Précipitation
- Neige, accumulation et fonte
- Évapotranspiration potentielle
- Température à la surface

## Atmosphérique (Projections)

- CMIP6, CORDEX

## Téledétection

- GRACE
- Humidité du sol
- Eau de surface



# Modèles intégrés : Perspectives

- Potentiel croissant d'application/développement : Désormais utilisé pour caractériser les processus hydrologiques à des échelles de plus en plus grandes.
- Il y a toujours des données "manquantes", mais les ensembles de données à grande échelle sont de plus en plus disponibles.
- Des défis informatiques subsistent, mais avec les méthodes modernes de solutions numériques, le calcul parallèle et le calcul intensif, on peut espérer traiter de très grands systèmes complexes avec des niveaux croissants de réalité physique, et quantifier l'incertitude.

# Modèles intégrés vs modèles plus simples : Perspectives

- Un modèle complexe peut toujours être simplifié.
- Idéalement, le modèle plus détaillé est nécessaire pour la comparaison (modèle simplifié, émulateur).
- Confiance accrue dans le modèle complexe pour les prévisions en dehors de la gamme de calage (history-matching)
- Quantification de l'incertitude dans les prévisions

