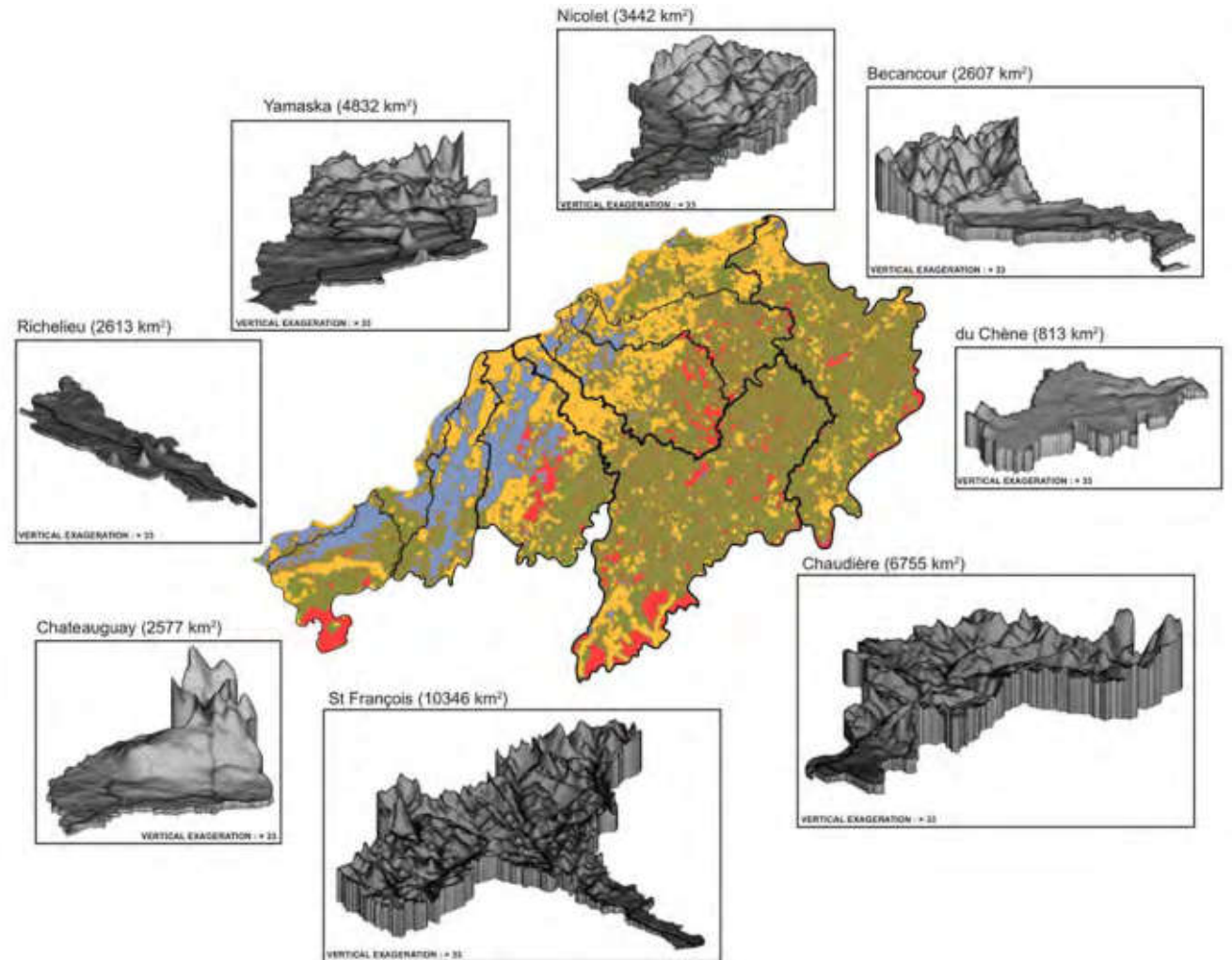
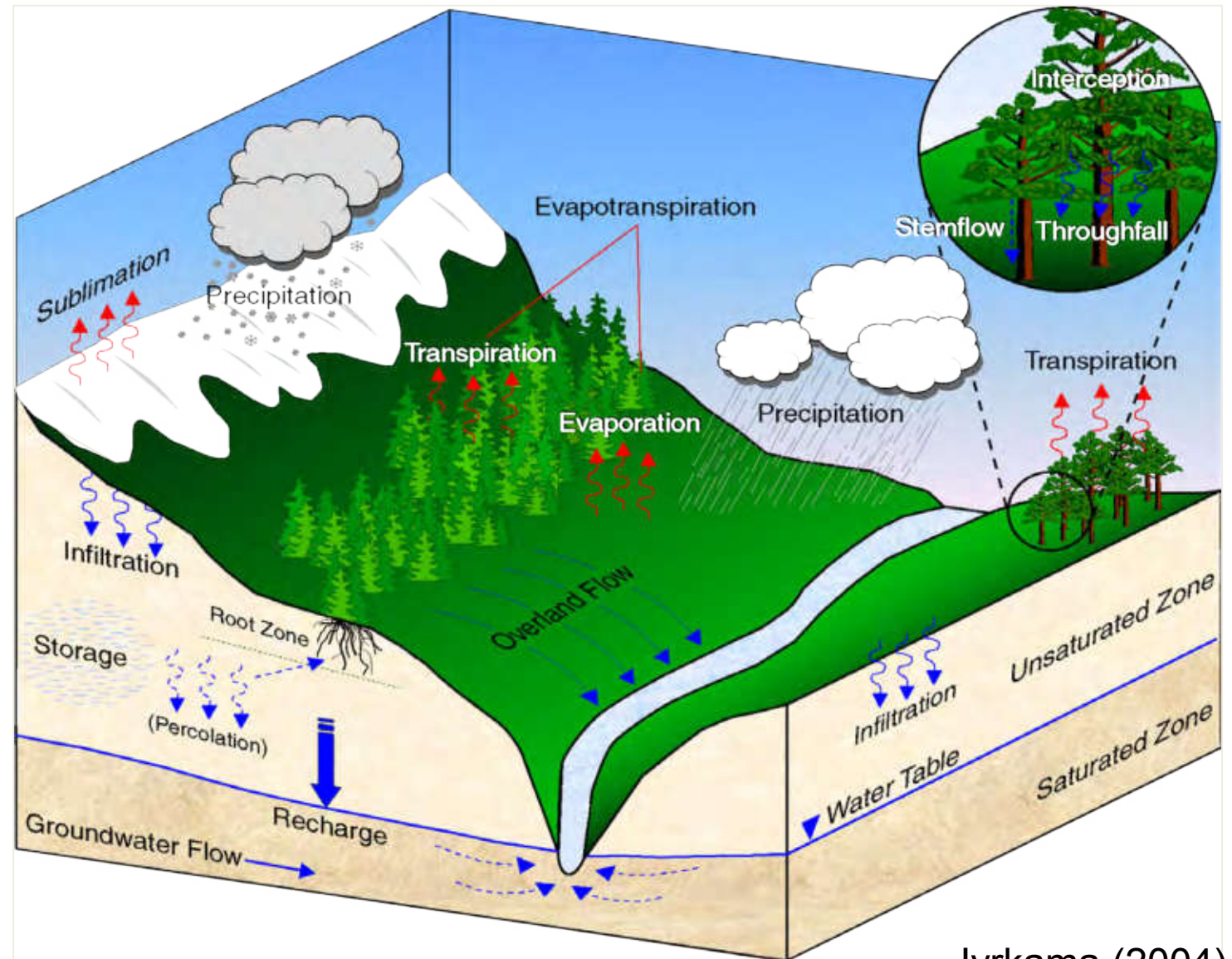


Modélisation hydrologique intégrée des eaux de surface et souterraines



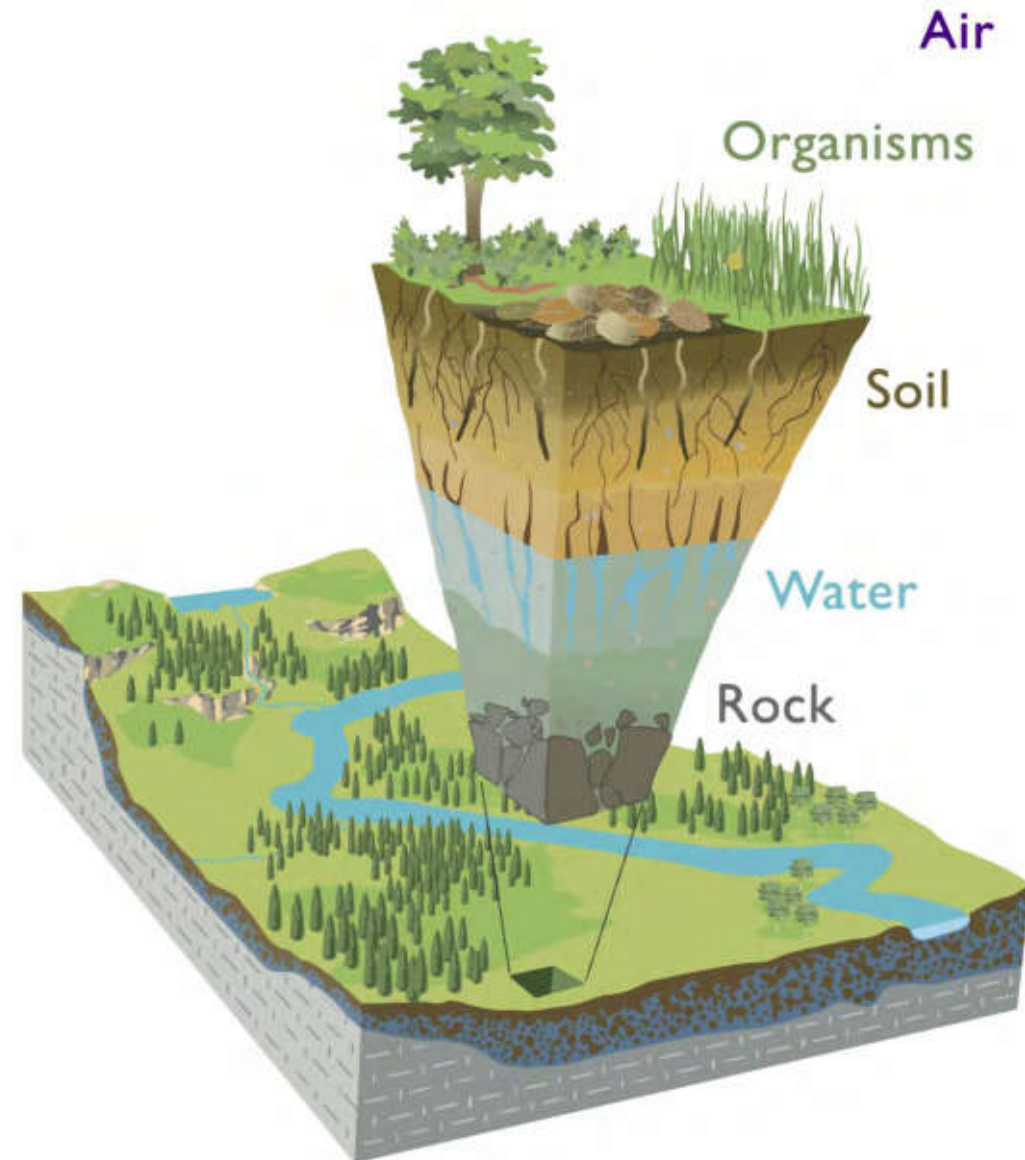
Les modèles hydrologiques intégrés visent à représenter la portion terrestre du cycle hydrologique

- Eau de surface et eau souterraine
- Prédiction de la quantité et qualité de l'eau (changements climatiques, utilisation de l'eau, occupation du territoire, ...)
- Synthèse des connaissances



Les modèles hydrologiques intégrés visent à représenter la portion terrestre du cycle hydrologique

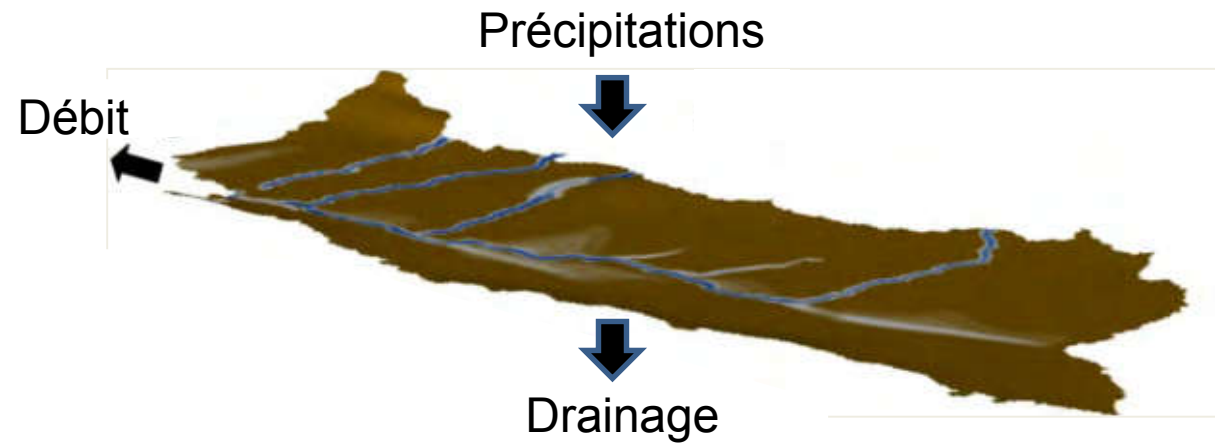
- Interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines
- Zone critique : Sol-Eau-Air-Organismes



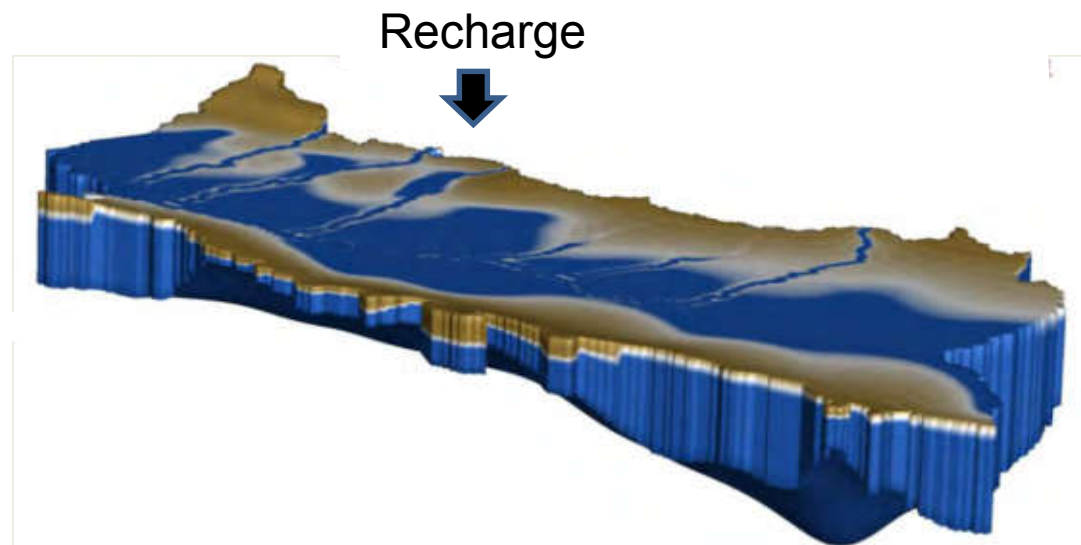
Chorover, J., R. Kretzschmar, F. Garcia-Pichel, and D. L. Sparks (artwork by R. Kindlimann) - The Critical Zone. Illustration modified from Chorover, J., R. Kretzschmar, F. Garcia-Pichel, and D. L. Sparks. 2007. Soil biogeochemical processes in the critical zone. *Elements* 3, 321-326. (artwork by R. Kindlimann). Image Request., CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52661990>

Les modèles hydrologiques de surface et souterrains ont généralement évolué en parallèle (sans « couplage » ou « interaction »)

Hydrologie
Modèle de surface

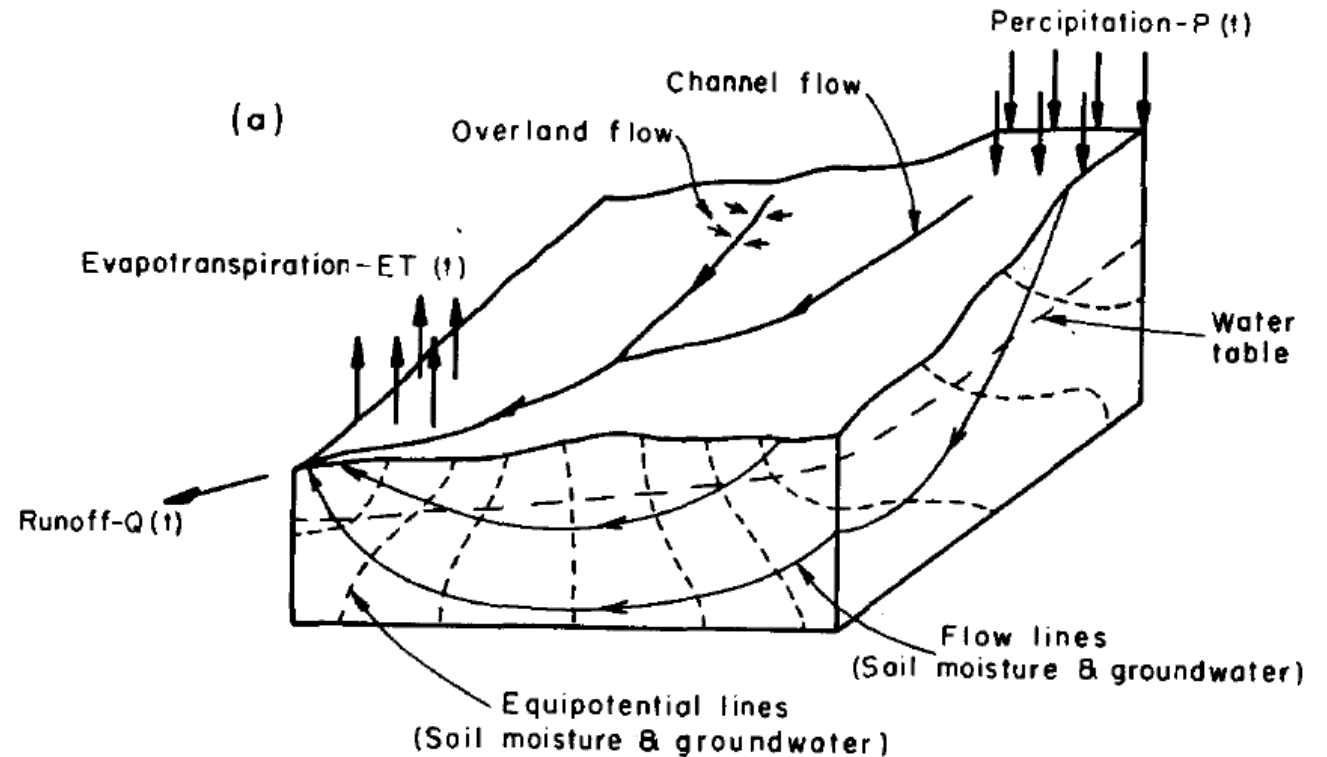


Hydrogéologie
Modèle souterrain



Freeze and Harlan (1969): The Blueprint for a Physically-Based Digitally-Simulated Hydrologic Response Model - Modèle conceptuel

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

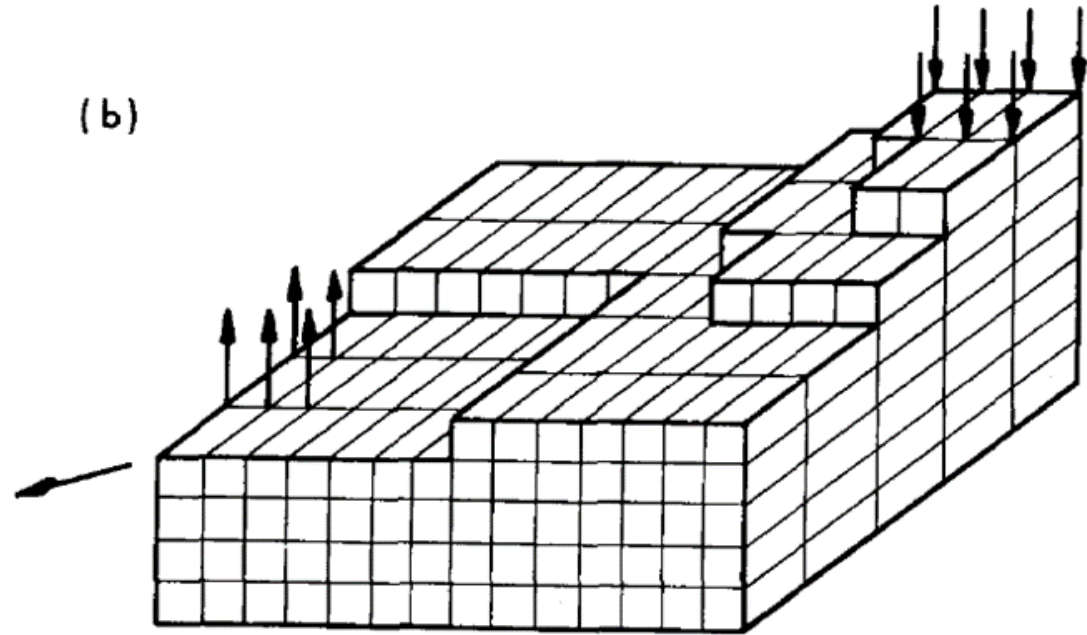


Bassin versant

Freeze and Harlan, JHyd, (1969)

Freeze and Harlan (1969): The Blueprint for a Physically-Based Digitally-Simulated Hydrologic Response Model - Modèle conceptuel

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

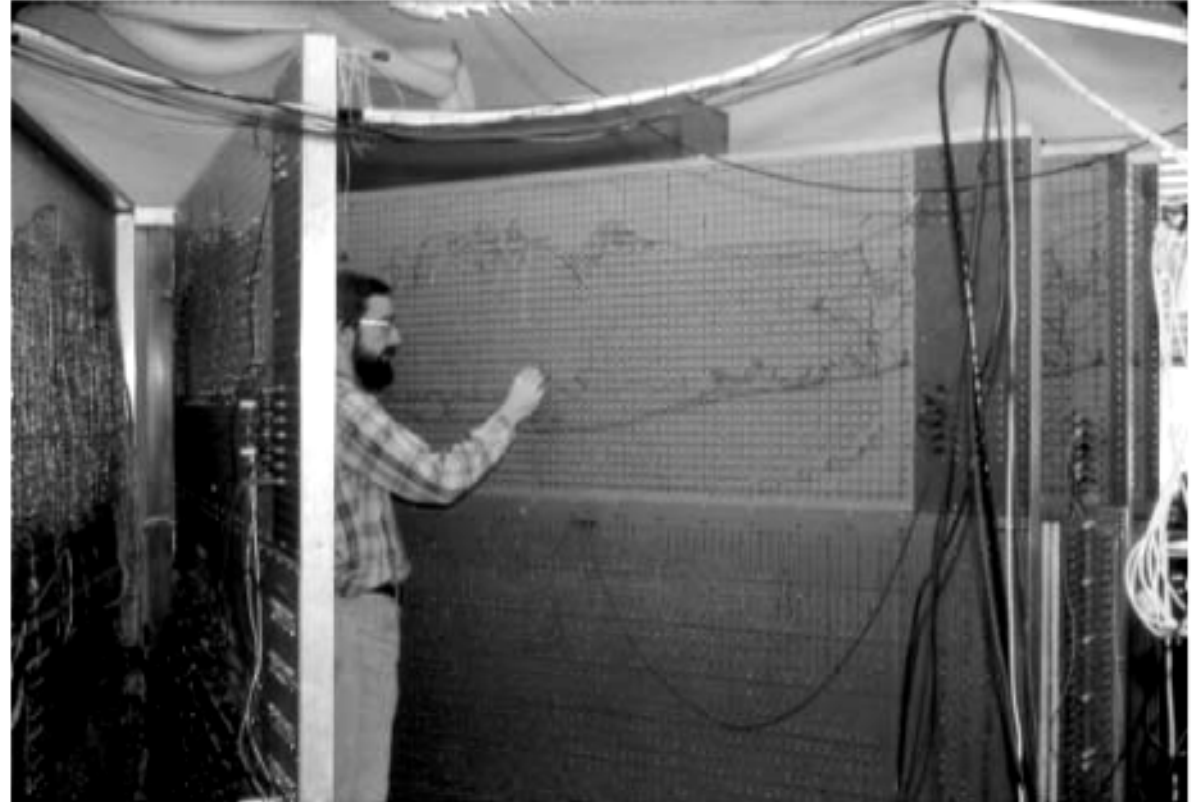


Modèle numérique

Freeze and Harlan, JHyd, (1969)

Freeze and Harlan (1969): The Blueprint for a Physically-Based Digitally-Simulated Hydrologic Response Model - Modèle conceptuel

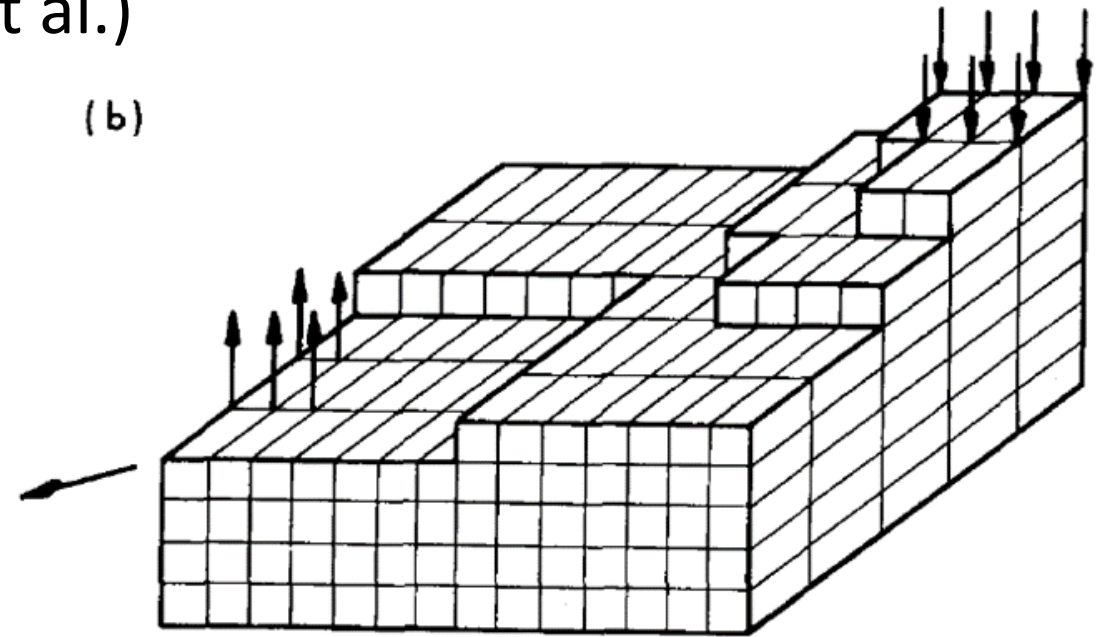
USGS 1975 – Modèle hydrogéologique analogue électrique, Long Island, NY



Quelques modèles hydrologiques intégrés basés sur l'équation de Richards 3D (écoulement souterrain à saturation variable)

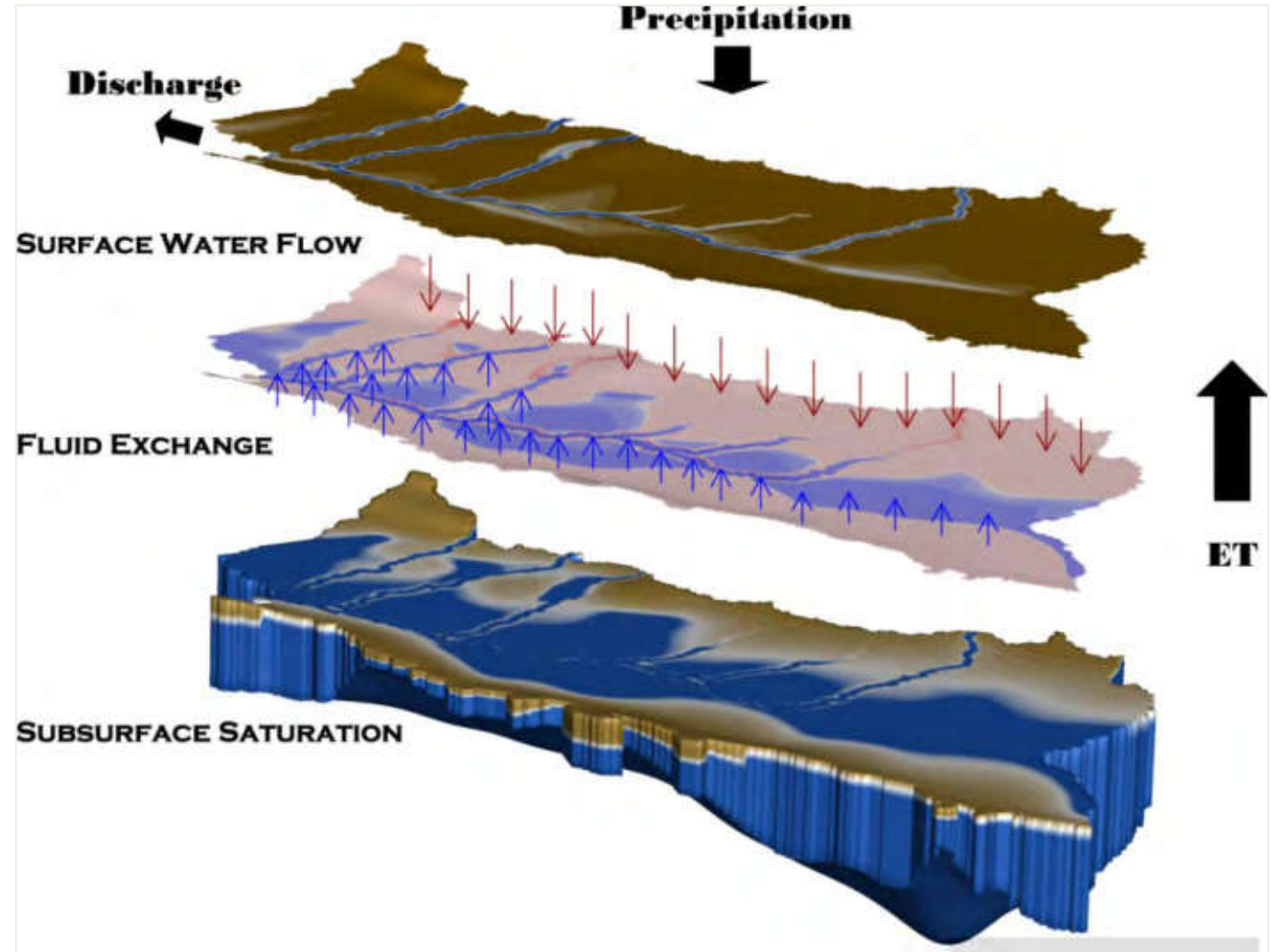
- **HydroGeoSphere** (Laval-Waterloo)
- **OpenGeoSys** (UFZ Leipzig, Delfs, Kolditz et al.)
- **MODHMS** (HydroGeologic Inc)
- **ParFlow** (LLNL, Maxwell, Kollett et al.)
- **CATHY** (Camporese, Paniconi, Putti et al.)
- **WASH123D** (Yeh et al.)
- **CAST3M** (CEA, France)
- **InHM** (Vanderkwaak, Loague et al.)

- MIKE-SHE, PIHM, ...



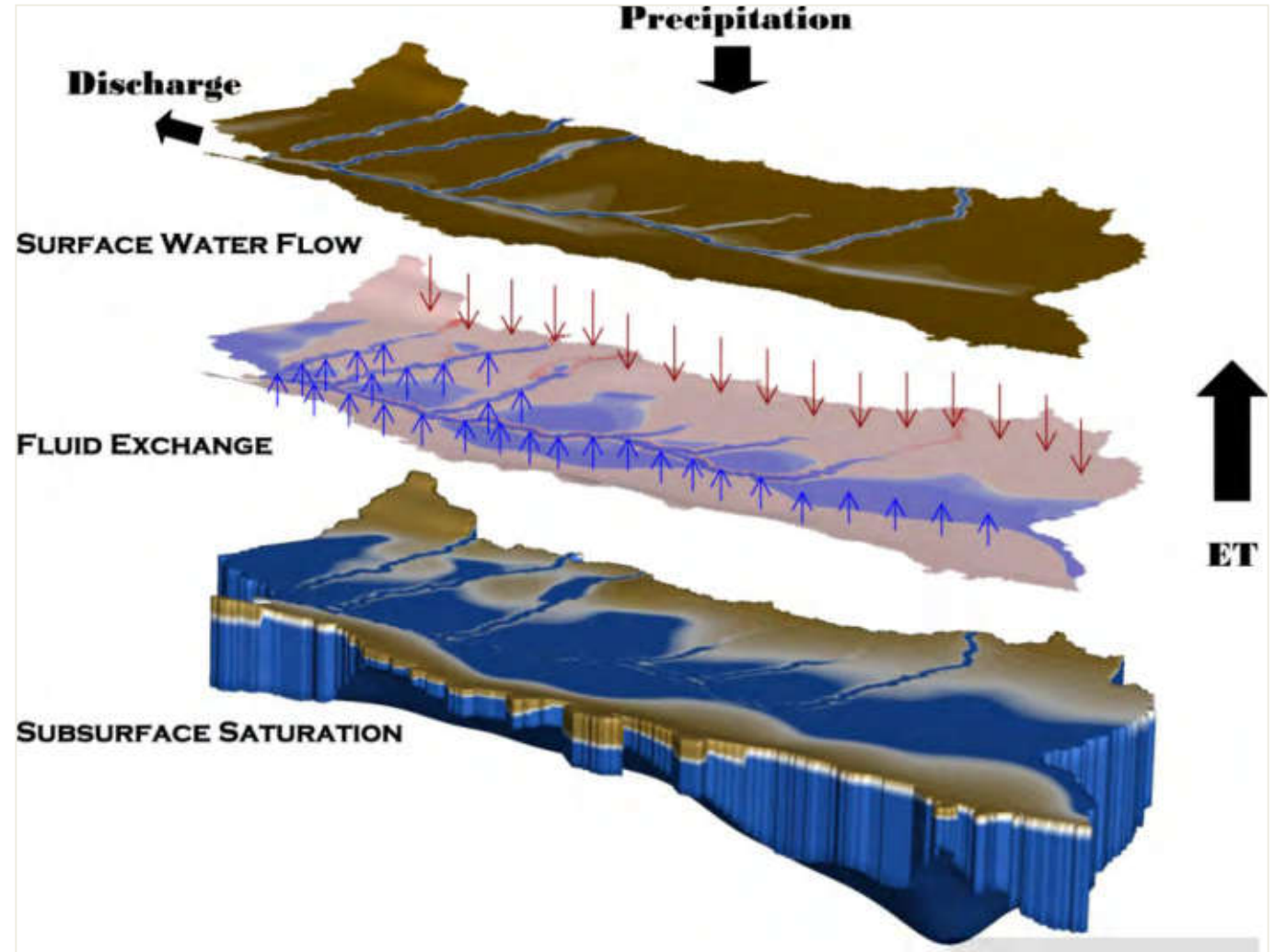
Le modèle *HydroGeoSphere* (HGS)

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



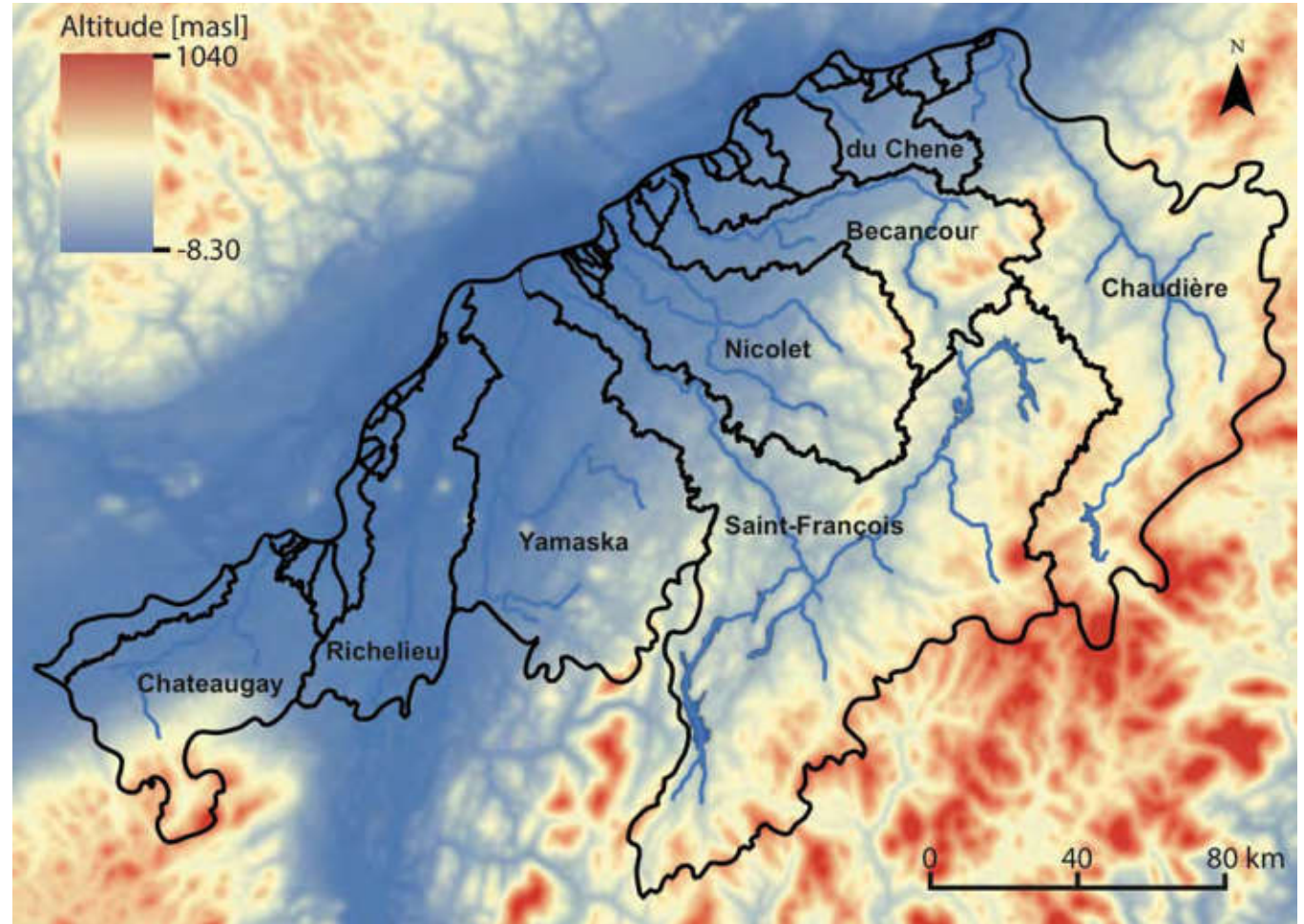
Le modèle *HydroGeoSphere* (HGS)

- Volume d'eau stockée
- Surface
 - Profondeur d'eau
 - Débit
 - Infiltration
 - Exfiltration
- Souterrain
 - Charge hydraulique (niveau de la surface libre)
 - Saturation
 - Débit de base



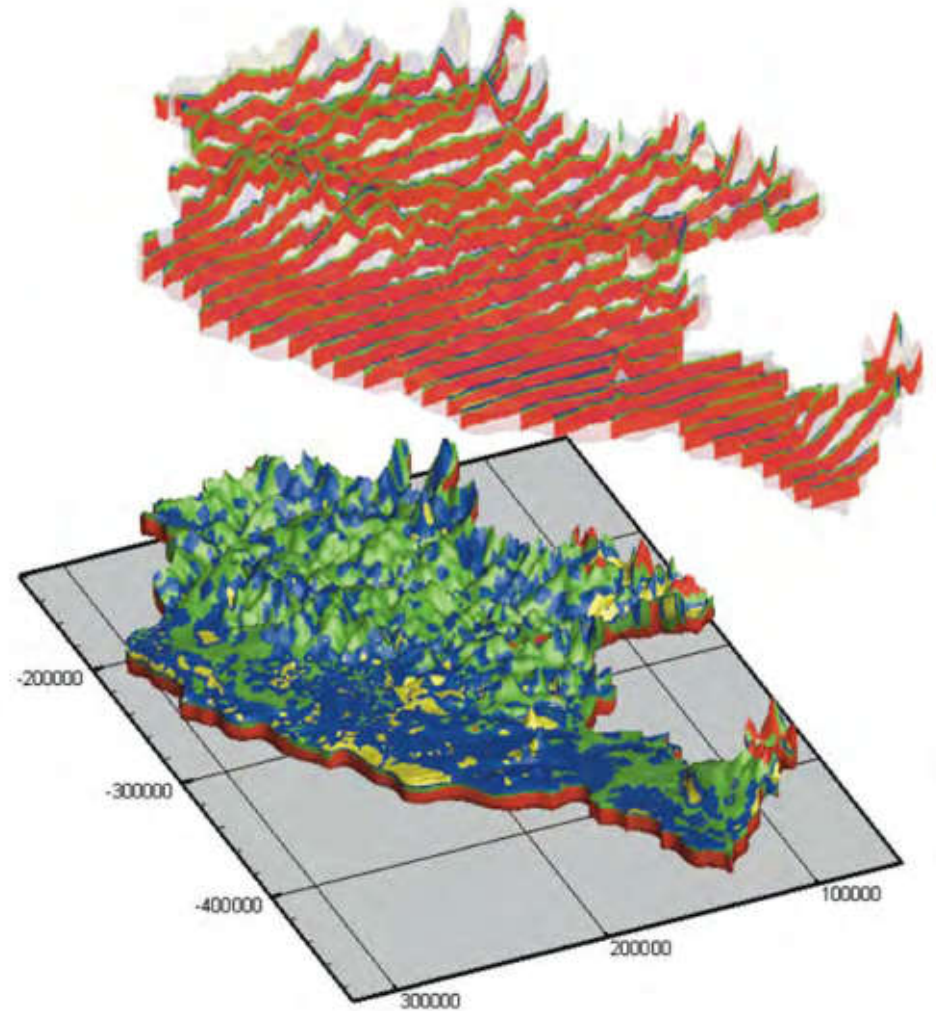
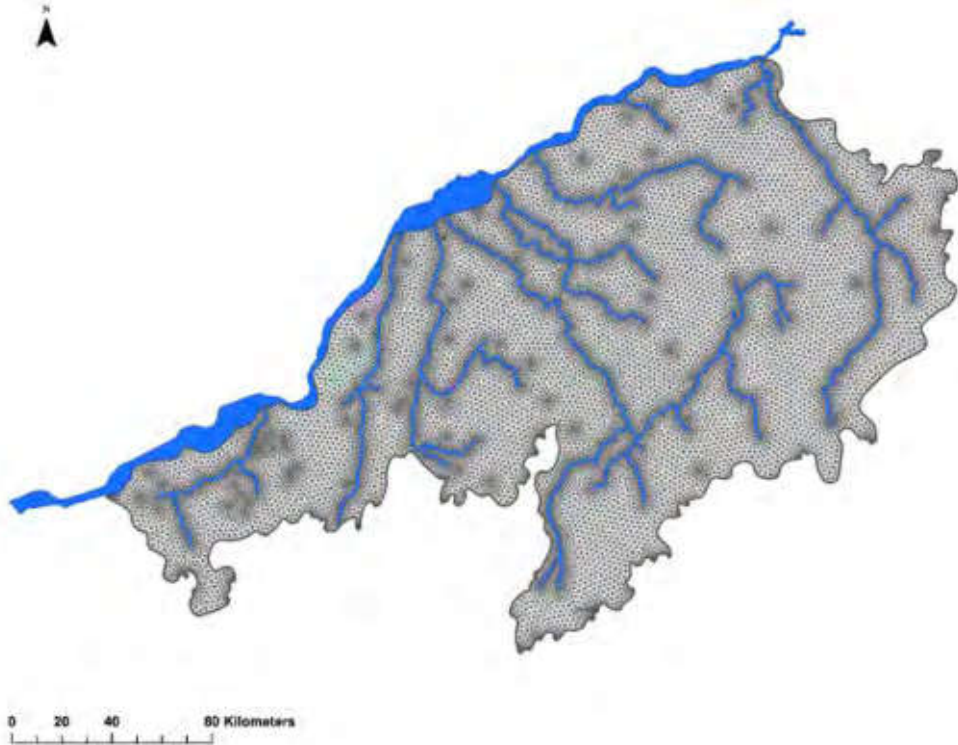
Application HGS au sud du Québec (Delottier et al)

- Collaboration MELCC
- Impact des changements climatiques
 - Débits d'étiages
- 8 sous-bassins
- 36 900 km²



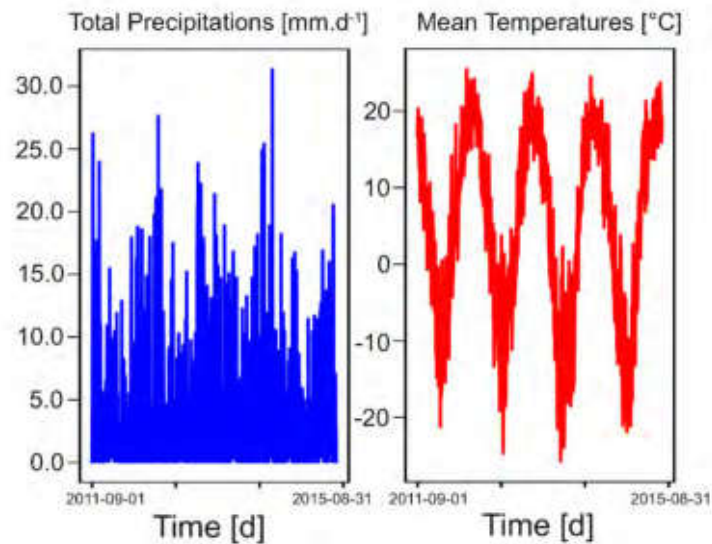
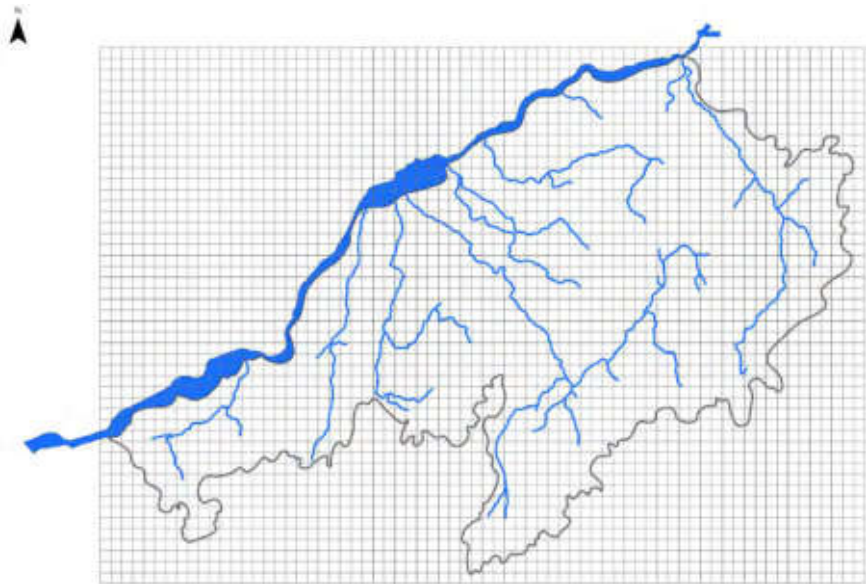
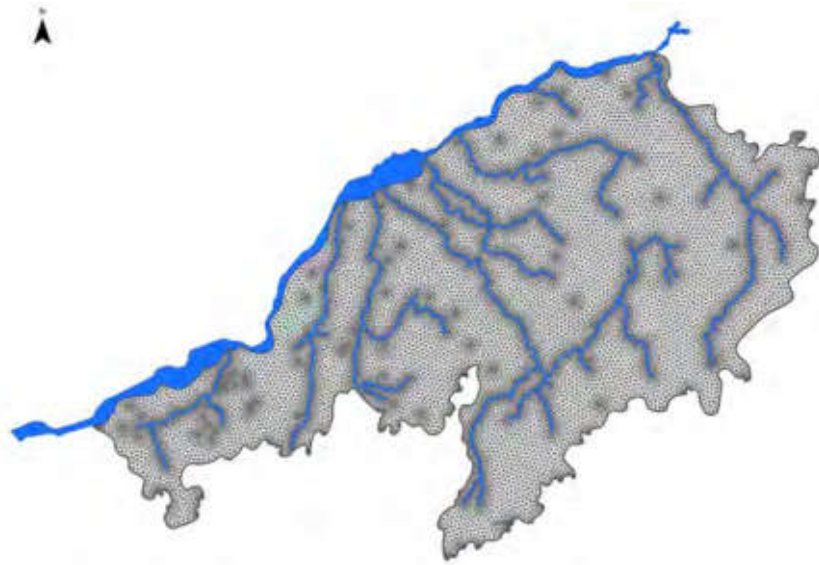
Conception du modèle couplé 2D-3D

- Génération d'un maillage 3D
 - 3.4 millions d'éléments
 - 1.8 millions de noeuds



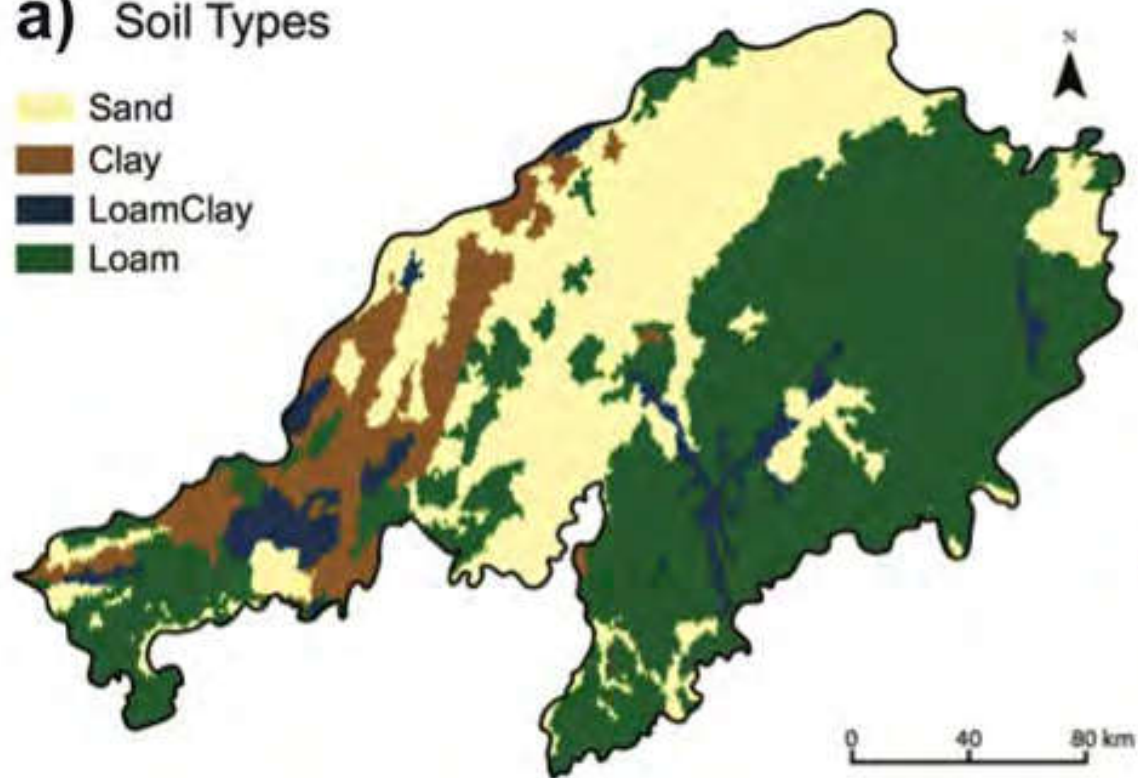
Unités géologiques

Données climatiques historiques au 25 km² (2011-2015)

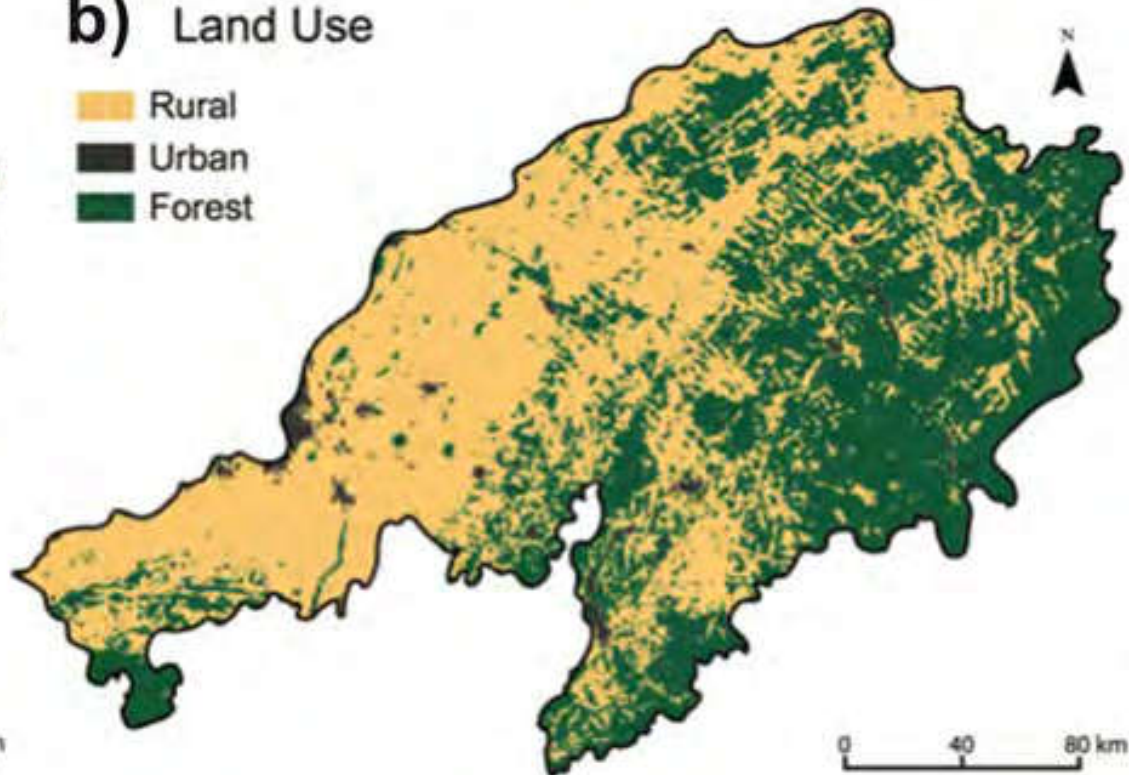


Données de surface

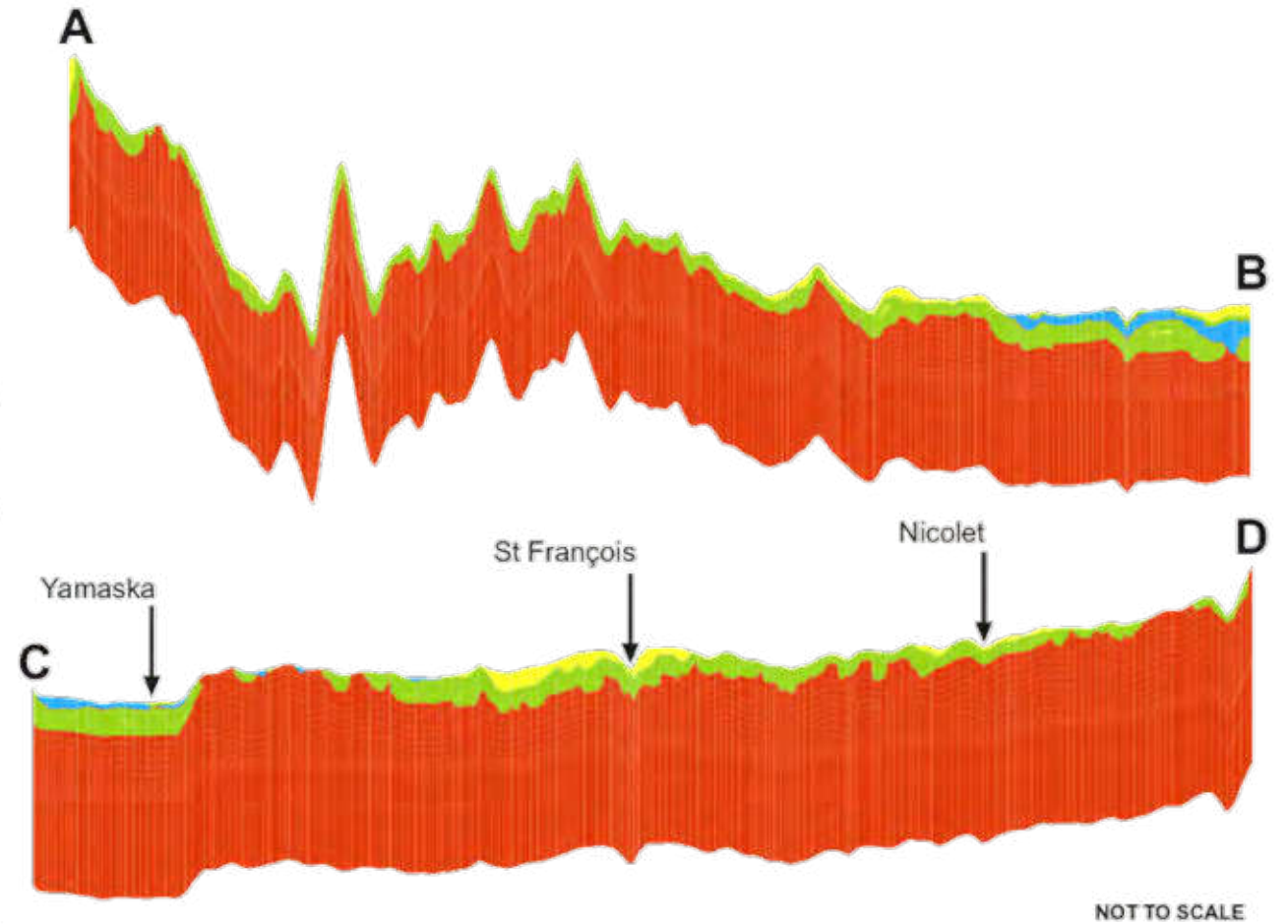
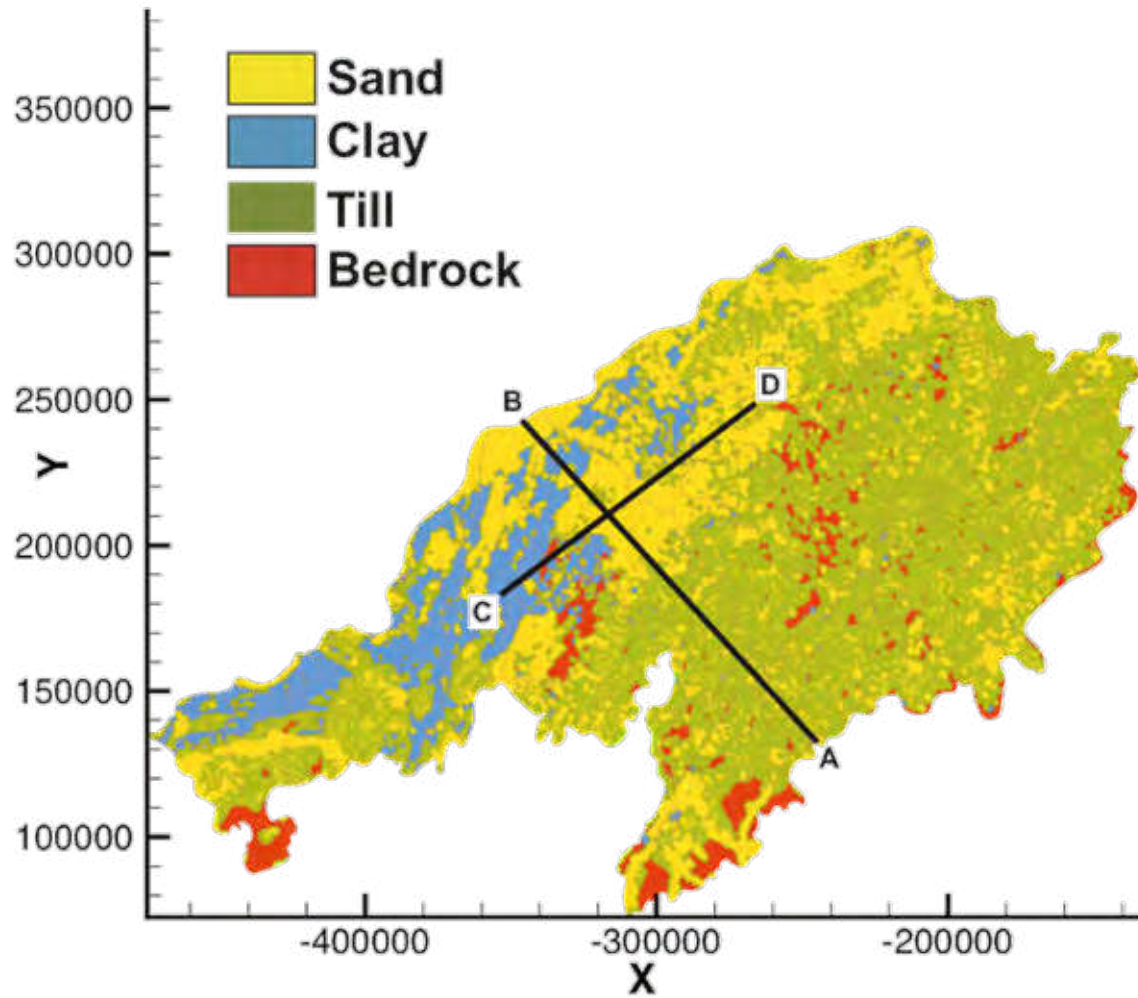
a) Soil Types



b) Land Use



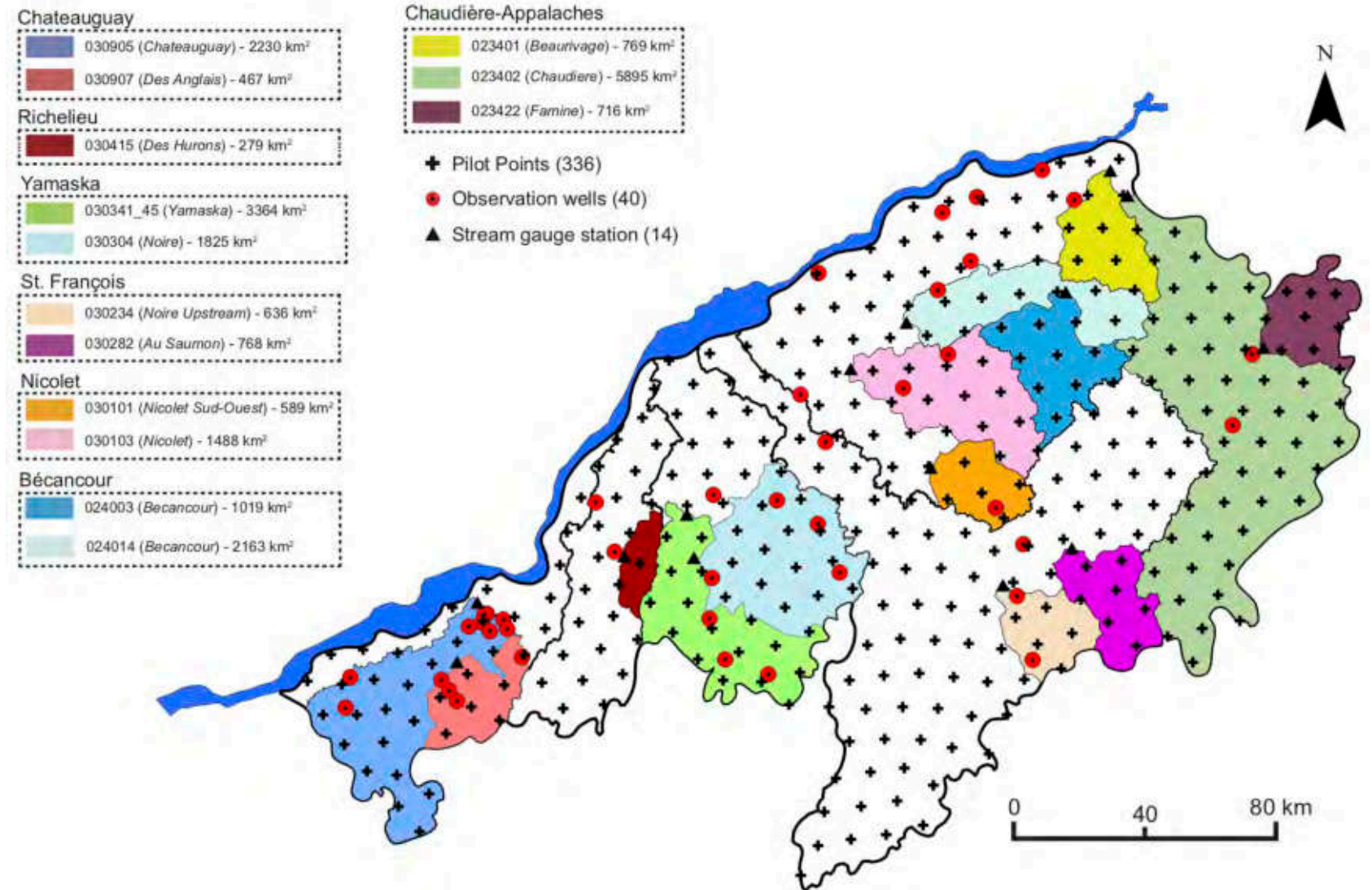
Données géologiques (modèle regional simplifié)



Observations disponibles pour le calage

Séries chronologiques

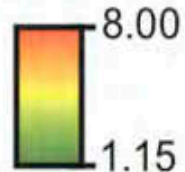
- Niveaux piézométriques (42)
- Débits de base (17)
- Evapotranspiration (0.25 km²)
- Couvert de neige (1 km²)



Calage de l'évapotranspiration et accumulation de neige

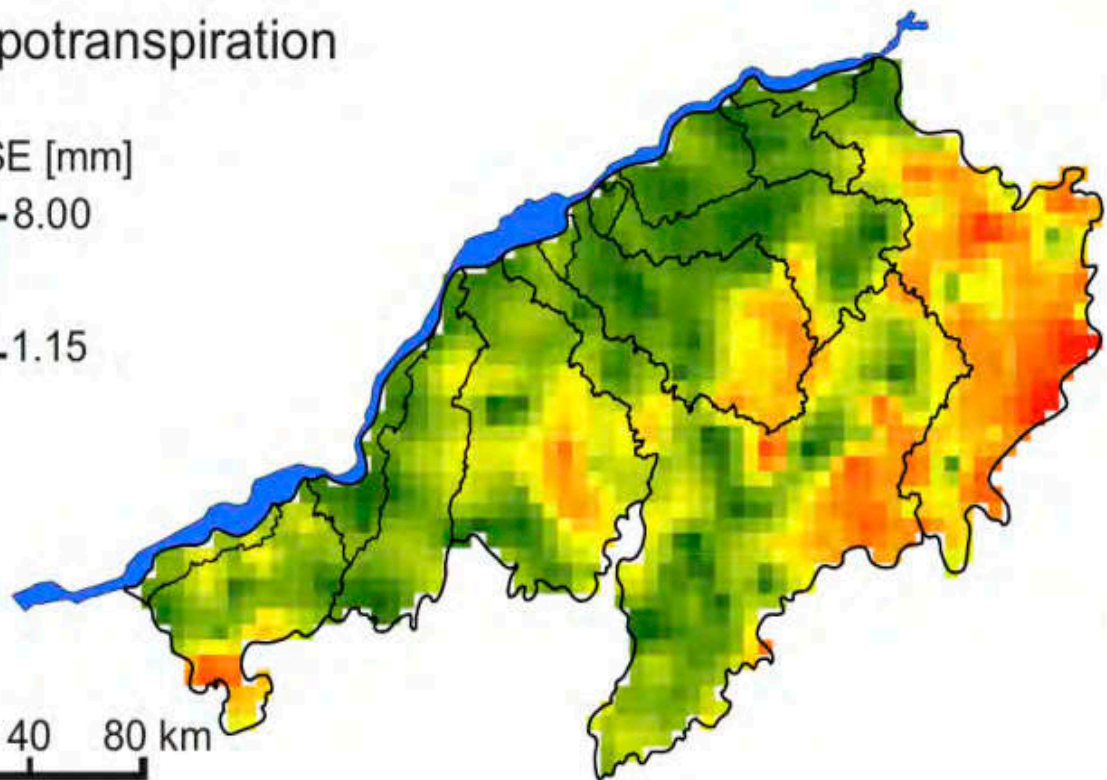
Evapotranspiration

RMSE [mm]



0 40 80 km

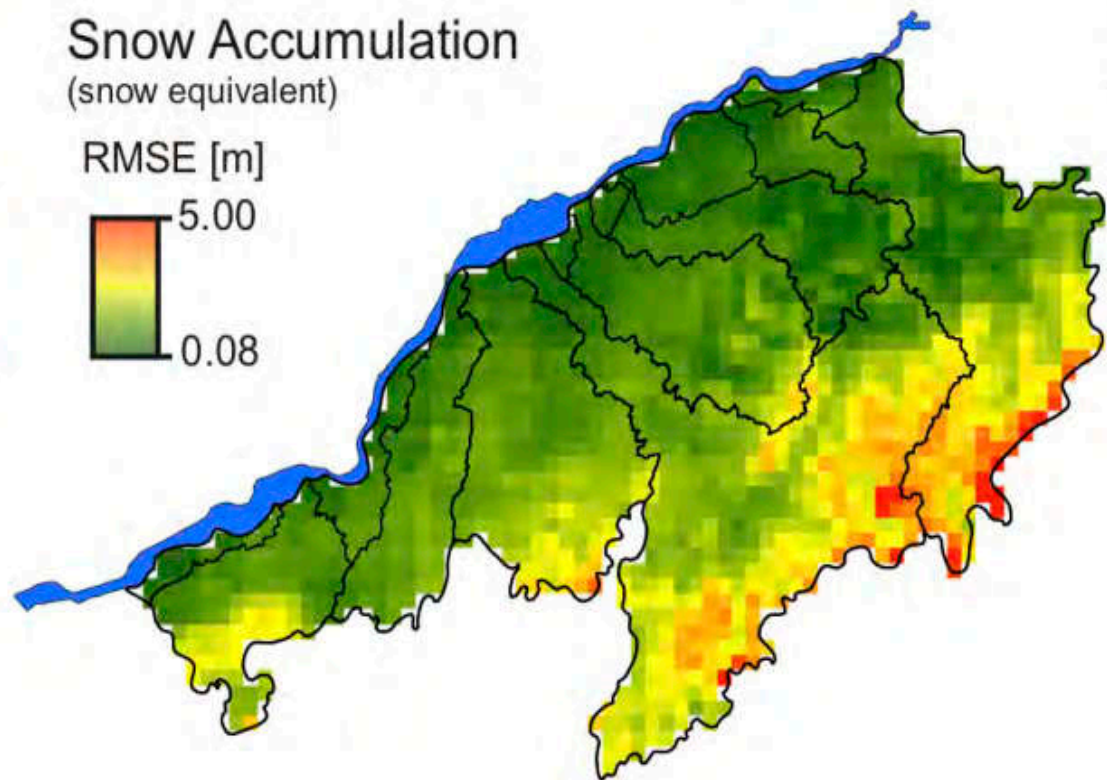
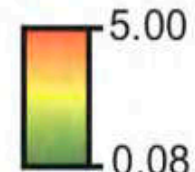
A horizontal scale bar for the Evapotranspiration map, showing 0, 40, and 80 km.



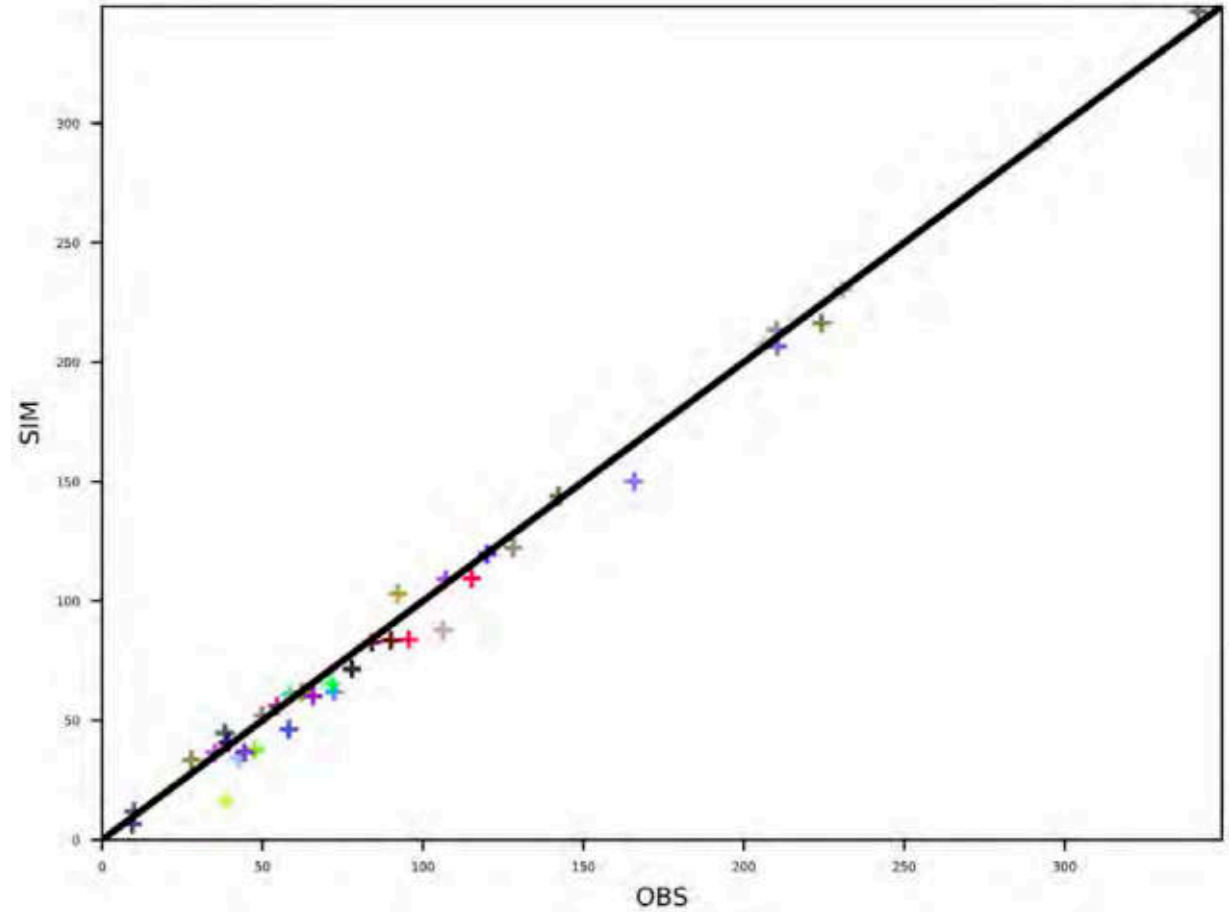
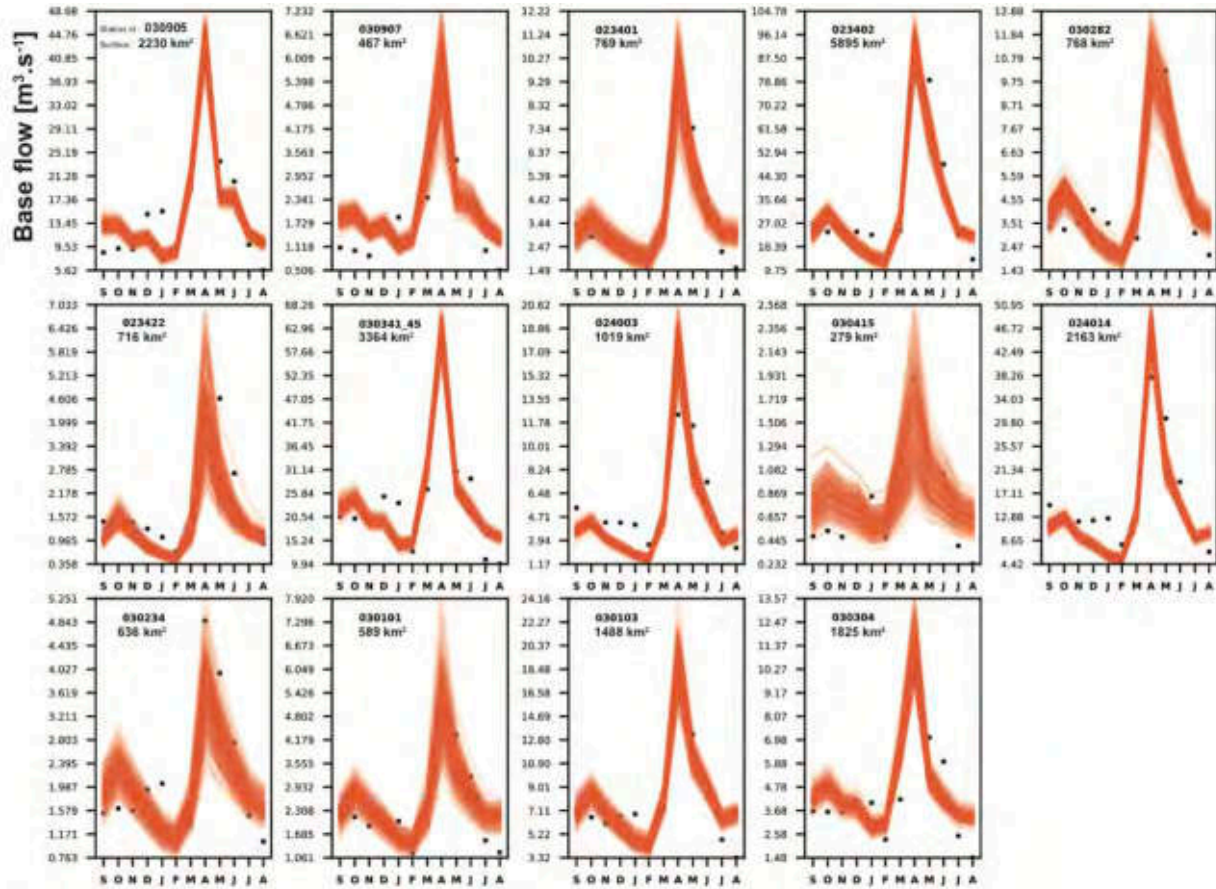
Snow Accumulation

(snow equivalent)

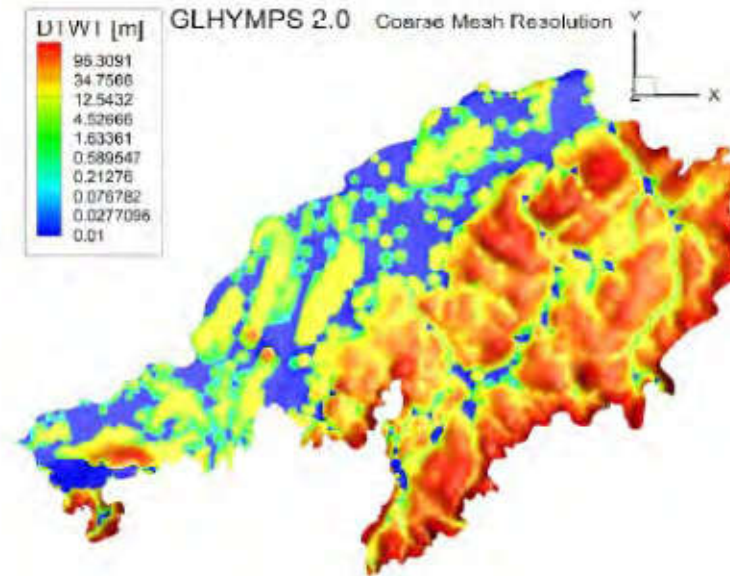
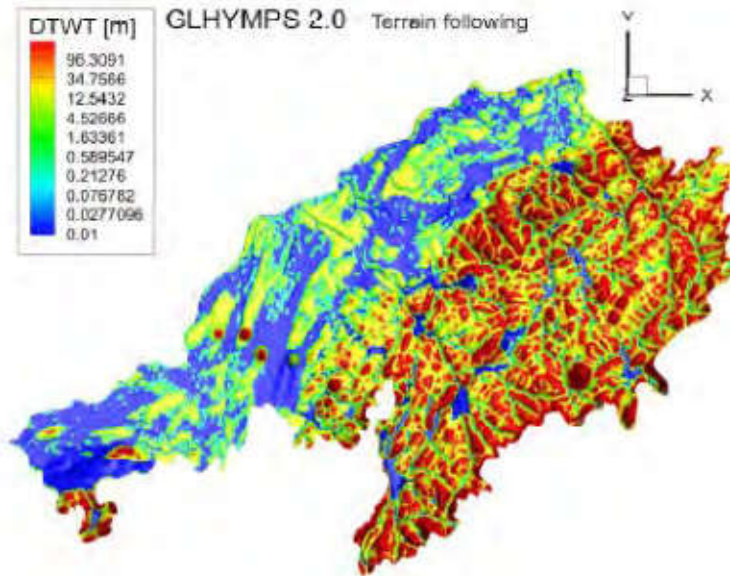
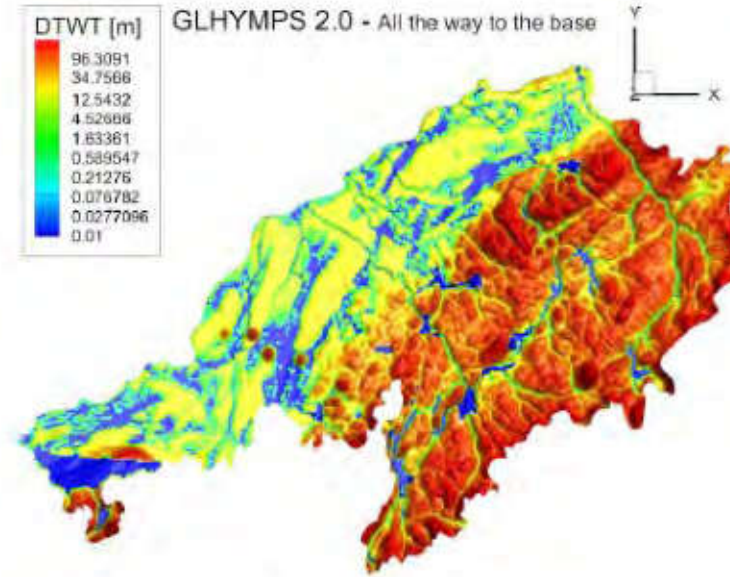
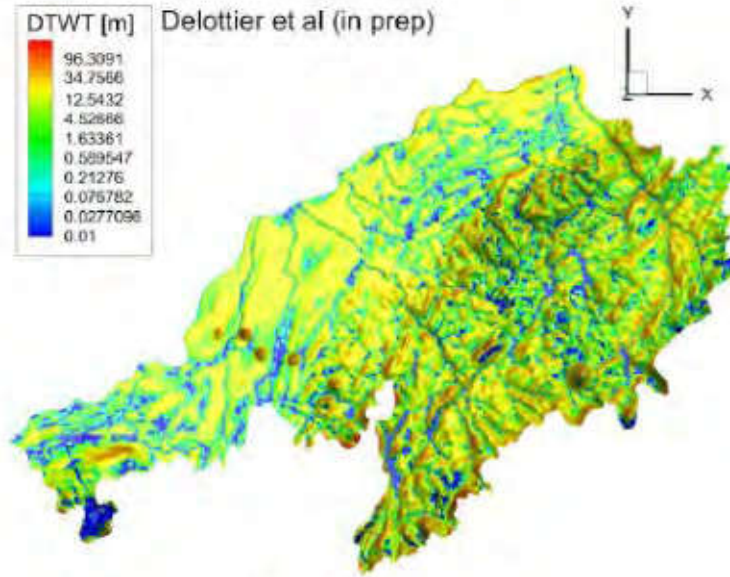
RMSE [m]



Calage du debit de base et la charge hydraulique

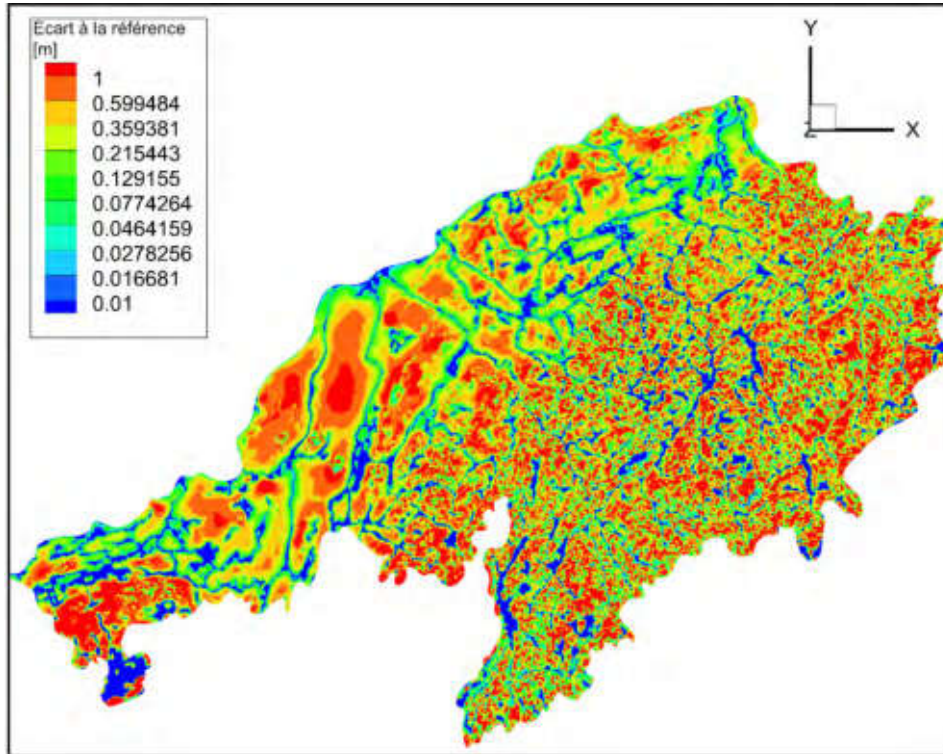


Représentation de la géologie – Profondeur de la surface libre

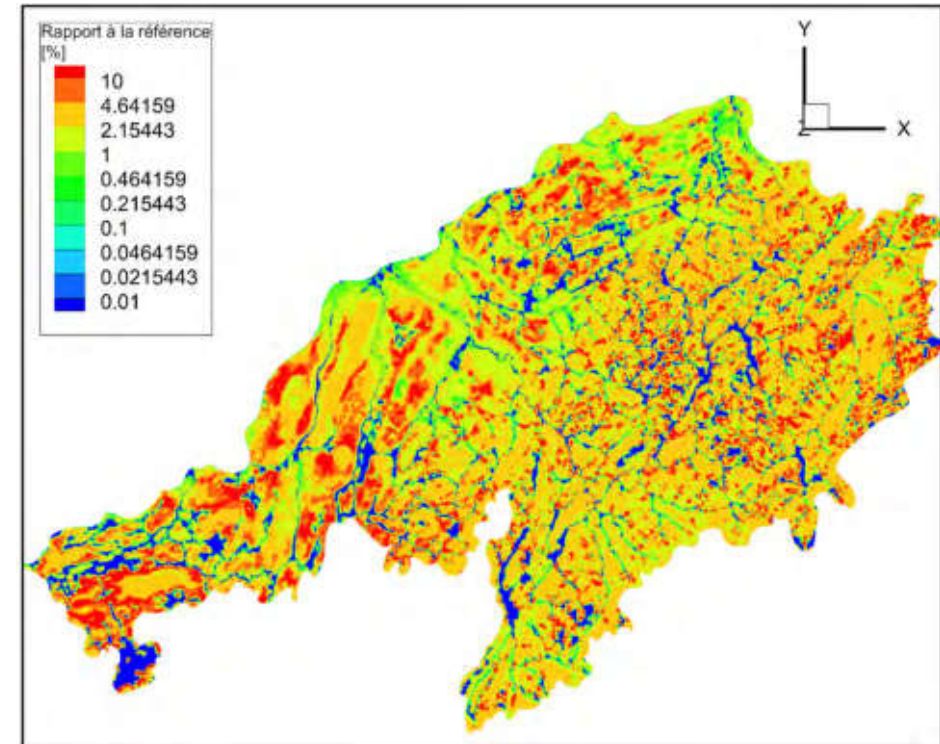


Simulation de scénarios climatiques

Variation (augmentation) à la fin du siècle (2070-2100) par rapport à la période de référence (2015-2015)

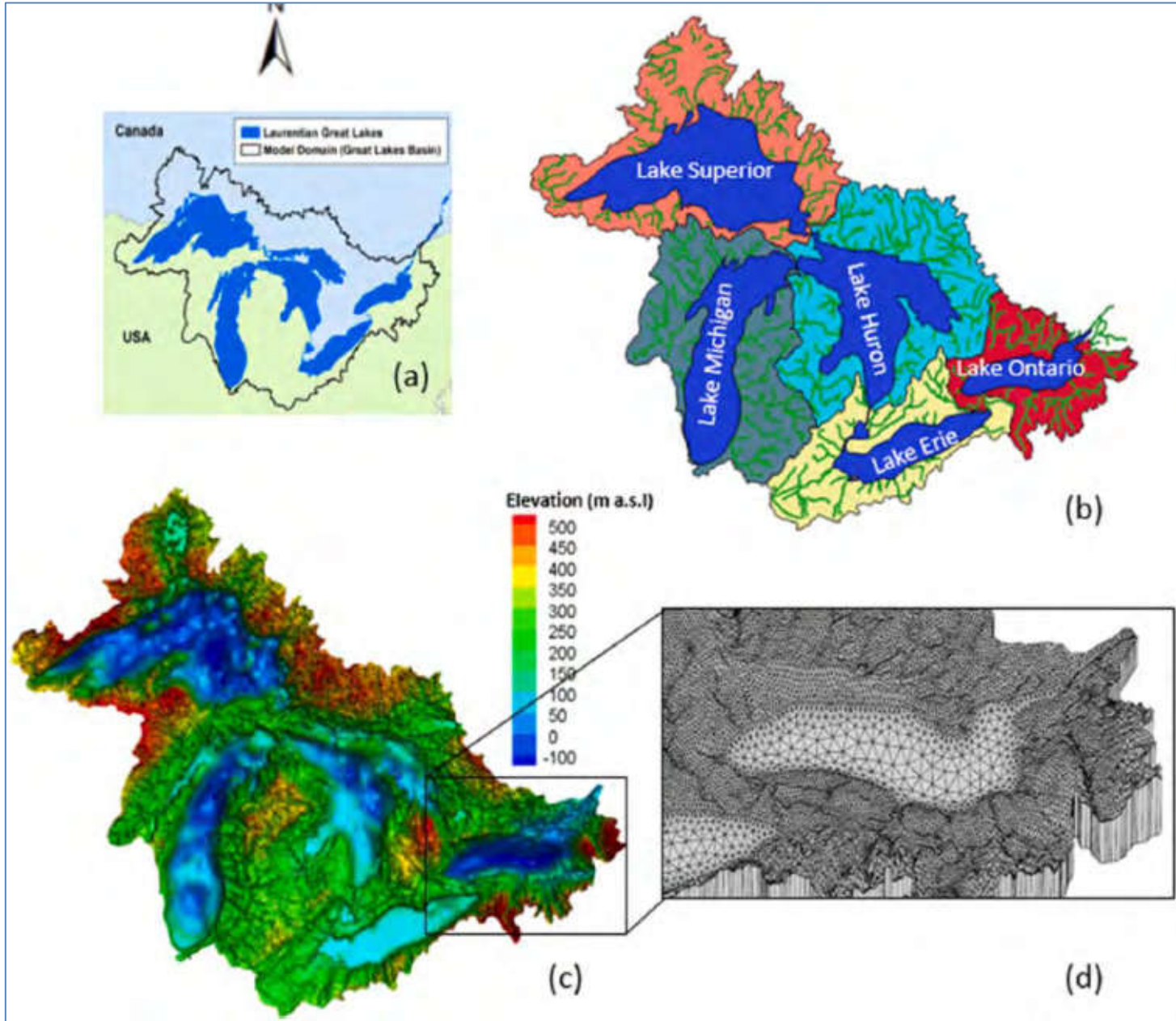


Niveau moyen annuel de la surface libre



Saturation moyenne annuelle du sol

Bassin des Grands Lacs (750 000 km²)



Journal of Hydrology 504 (2021) 125913

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

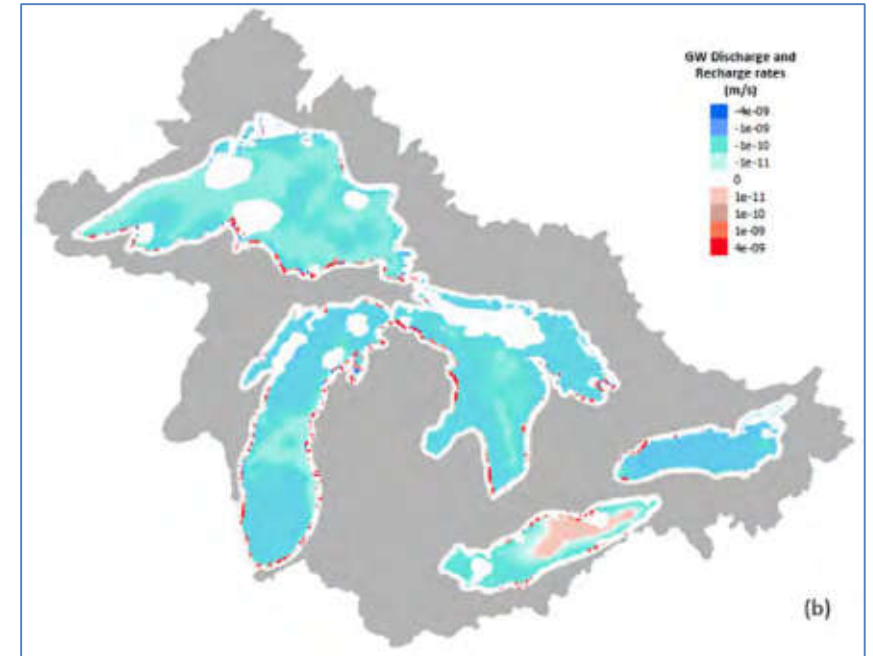
ELSEVIER

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol

Research papers

Investigating groundwater-lake interactions in the Laurentian Great Lakes with a fully-integrated surface water-groundwater model

Shu Xu^a, S.K. Frey^{a,b,c}, A.R. Erler^{a,d}, O. Khader^a, S.J. Berg^{a,b}, H.T. Hwang^{a,b}, M.V. Callaghan^a, J.H. Davison^a, E.A. Sudicky^{a,b}



Recharge des eaux souterraines par les lacs en été (inverse en hiver)