

**QUELLE EST LA RECHARGE DES AQUIFÈRES DE
CHARLEVOIX ET HAUTE-CÔTE-NORD?**
UNE APPROCHE MULTI-MODÈLE APPORTE DES RÉPONSES

Marie-Amélie Boucher, Ph.D. (UQAC)

Romain Chesnaux, ing. Ph.D. (UQAC)

Maryline Huet, M.Sc. (UQAC)

et Charles Poirier, ing. M.Sc. (CEHQ)

INTRODUCTION

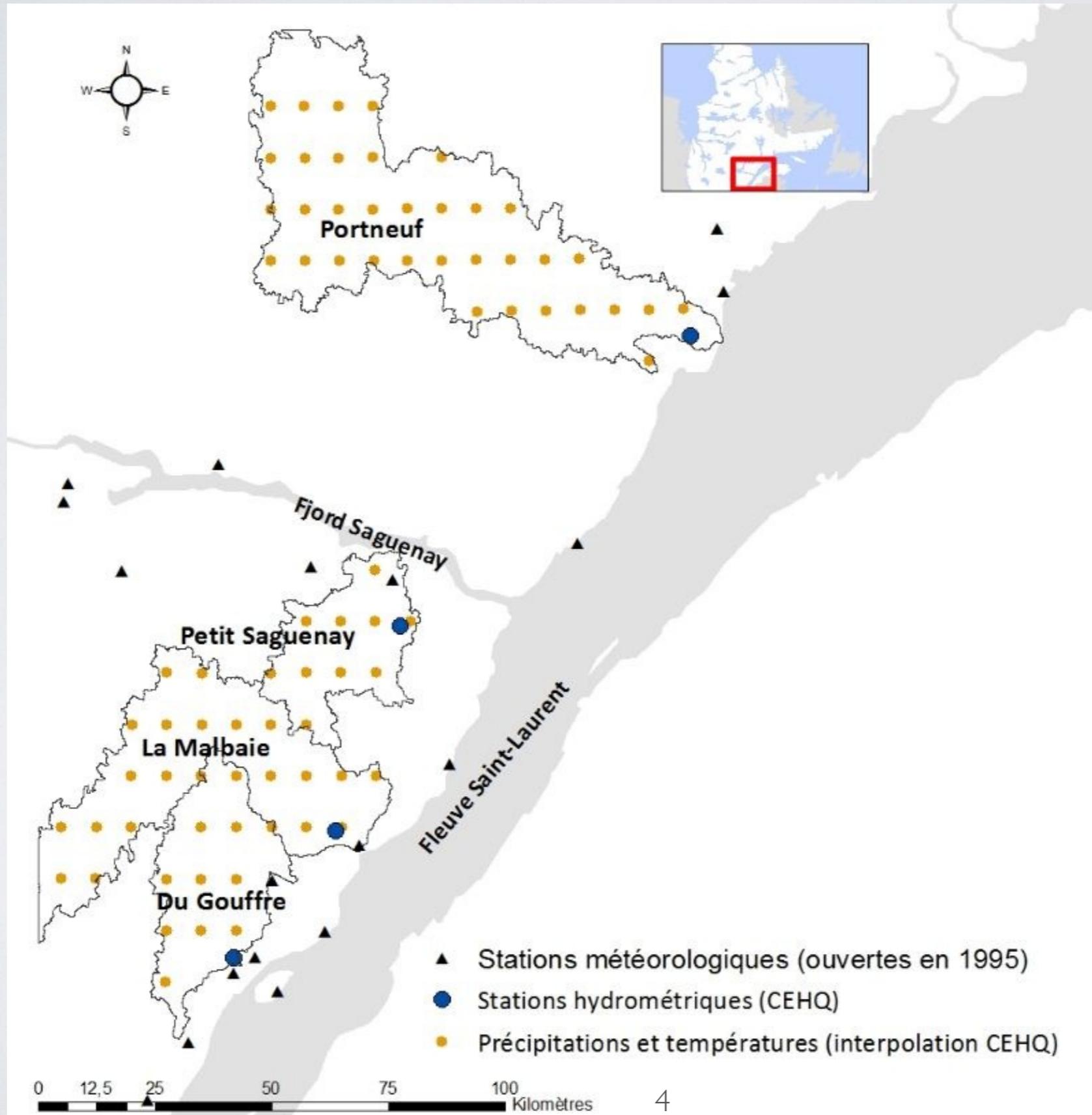
- Recharge: « eaux atteignant la zone saturée et constituant un ajout au réservoir en eaux souterraines. » Vries et Simmer (2002)

Huet M., Chesnaux R., Boucher M.-A. et Poirier C. (2015) Comparing various approaches for assessing groundwater recharge at a regional scale in the Canadian Shield, *Hydrological Sciences Journal* (Accepté)

INTRODUCTION

- Évaluation de la recharge: nécessaire pour éviter la surexploitation
- Recharge: impossible à mesurer à l'échelle du bassin versant
 - Utilisation d'approches indirectes
 - Incertitude
 - Recours à plusieurs méthodes simultanément (ex. Rivard et al., 2014)

BASSINS À L'ÉTUDE



BASSINS À L'ÉTUDE

- Région de Charlevoix-Haute Côte Nord (projet PACES)
 - Bassins entre 712 km² et 3 085 km²
 - Substratum: surtout roches granitiques et gneissiques
 - Socle rocheux dans la partie nord: surtout migmatites.
 - Il existe une cartographie des dépôts de surface (Cousineau *et al.*, 2014).
 - Aquifère: sédiments quaternaires et roc fracturé. Couche de till recouvre la majeure partie de la zone d'étude.

BASSINS À L'ÉTUDE

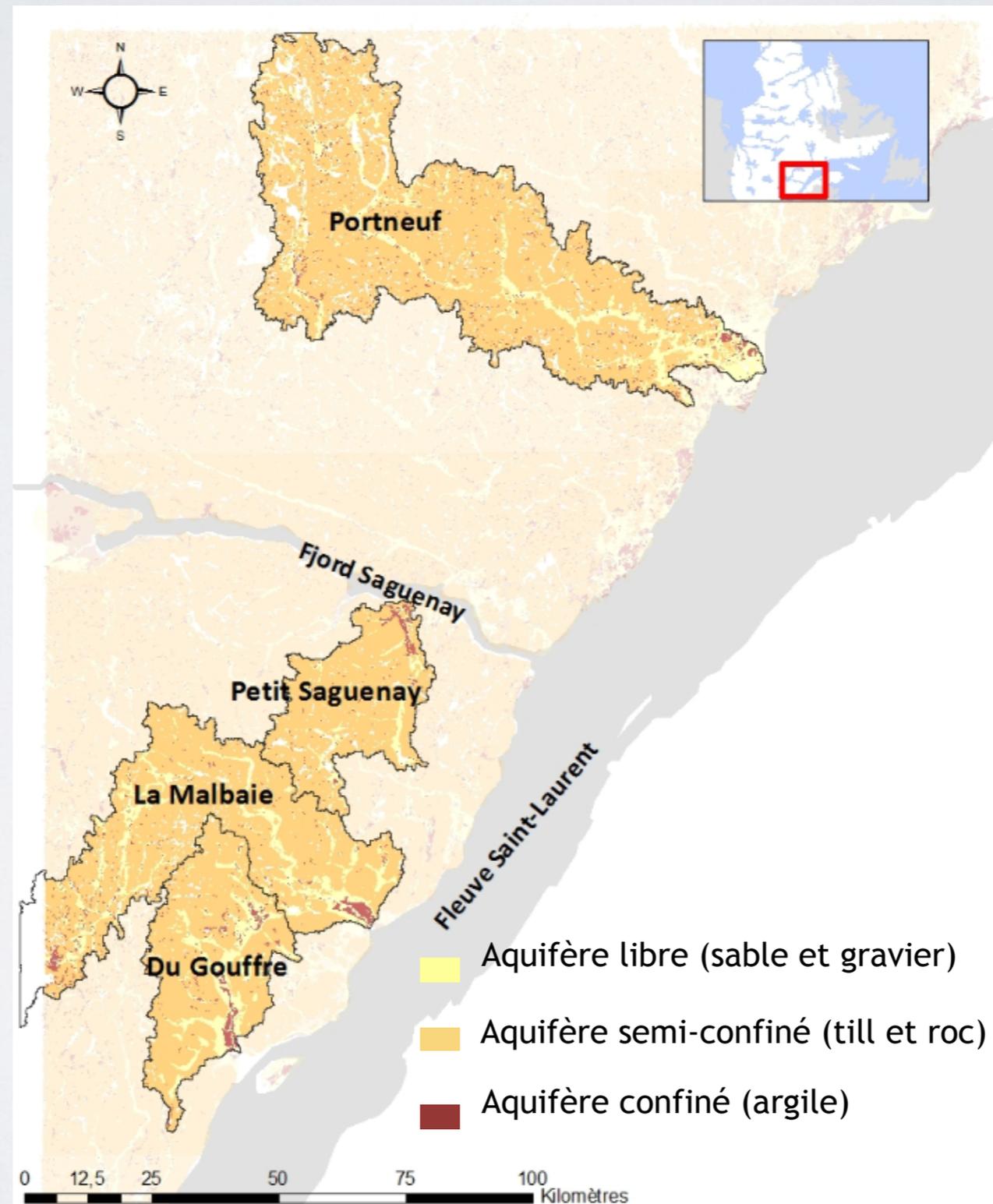
- Région de Charlevoix-Haute Côte Nord (projet PACES)
- Types de surfaces

	Du Gouffre	La Malbaie	Petit Saguenauy	Portneuf
Roc affleurant (%)	7	9	16	13
Till (%)	68	66	75	70
Sable/gravier (%)	22	22	6	14
Argile (%)	3	3	3	3
Superficie (km	1707	865	712	3085

BASSINS À L'ÉTUDE

- Région de Charlevoix-Haute Côte Nord (projet PACES)

- Aquifères



MÉTHODES

- **Bilan hydrique**
- Analyse des fluctuations de niveau de la nappe
- **Séparation d'hydrogrammes**
- Traçage chimique
- Techniques physiques
- Modélisation numérique

MÉTHODES

- **Méthode #1:** Séparation d'hydrogramme
- **Méthode #2:** Bilan hydrique global avec GR4J
- **Méthode #3:** Bilan hydrique global avec HYDROTEL
- **Méthode #4:** Bilan hydrique distribué en exploitant la base de données du PACES + méthode du Curve Number modifié

MÉTHODES

- Méthode # 1: Séparation d'hydrogramme
- Filtre digital récursif (Eckhardt, 2005; Poirier et al., 2012)

Débit de base au temps t

Index de débit de base:
ratio du débit de base sur le débit total, à long terme

$$G_t = \frac{[(1 - BFI_{max})aG_{t-1} + BFI_{max}(1 - a)Q_t]}{(1 - a \times BFI_{max})}$$

Index de récession

Débit total au temps t

MÉTHODES

- Méthode # 1 : Séparation d'hydrogramme
- BFI_{max} (Eckhardt, 2008):
 - 0.8 pour cours d'eau permanent avec aquifère poreux
 - 0.5 pour cours d'eau éphémère avec aquifère poreux
 - 0.25 pour cours d'eau permanent avec aquifère rocheux
- Charlevoix Haute-Côte-Nord:
 - Du Gouffre: 0.60
 - La Malbaie: 0.55
 - Petit-Saguenay: 0.55
 - Portneuf: 0.45

MÉTHODES

- Méthode # 1: Séparation d'hydrogramme
 - Courbe de récession: loi de Maillet (Meyboom, 1961)

Débit au début de la
période de récession

Débit au pas de temps t

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

$$a = e^{-\alpha} = \left(\frac{Q_t}{Q_0} \right)^{\frac{1}{t}}$$

MÉTHODES

- Méthode # 1: Séparation d'hydrogramme
- Index de récession a (Poirier et al., 2012):
 - Du Gouffre: 0.963
 - La Malbaie: 0.951
 - Petit-Saguenay: 0.944
 - Portneuf: 0.962

MÉTHODES

- Méthode #2: Bilan hydrique global avec GR4J

Appports verticaux

Ruissellement

$$AV = Re + Ru + ET$$

Recharge

Évapotranspiration

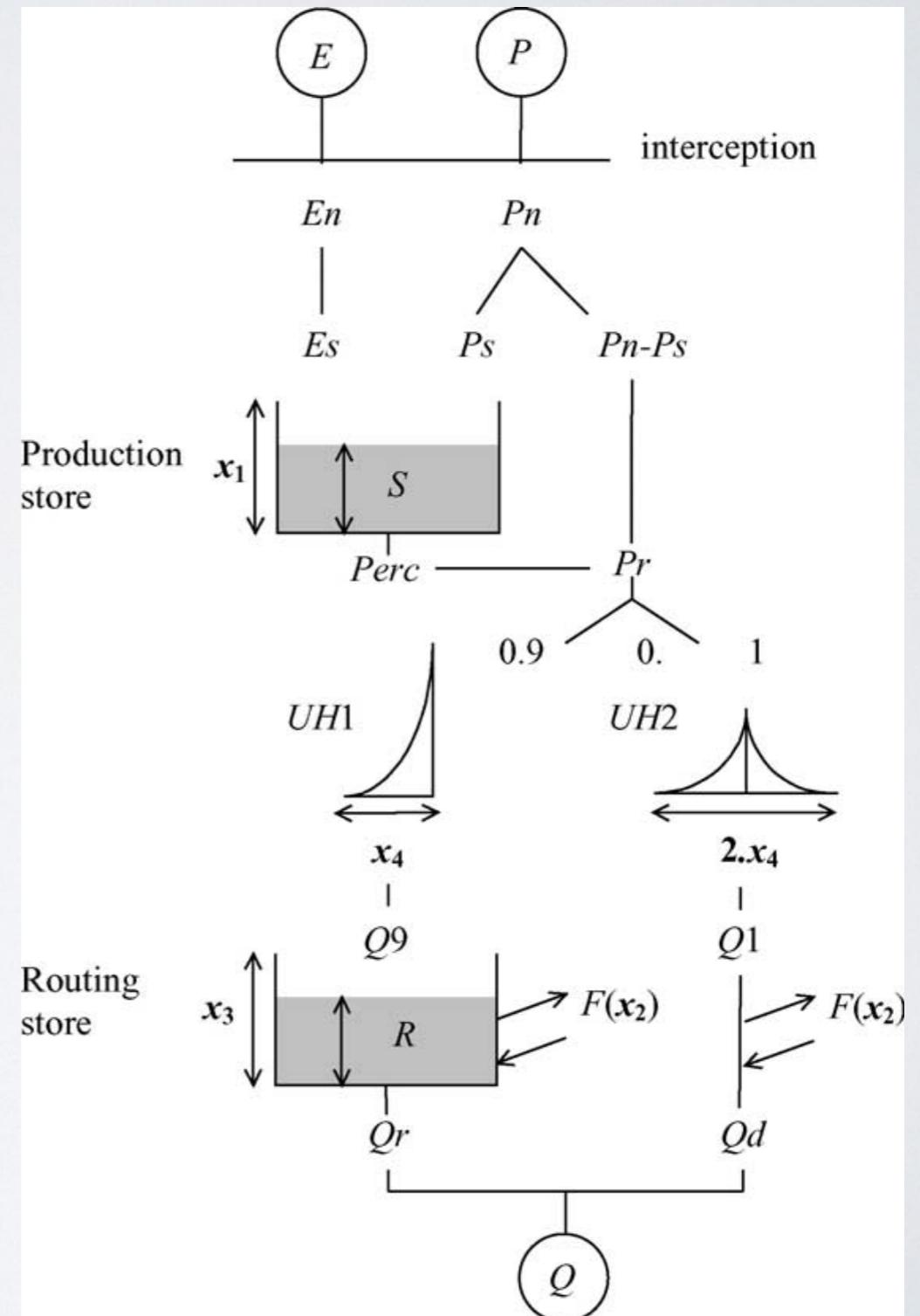
The diagram illustrates the water balance equation $AV = Re + Ru + ET$. It features four descriptive terms with arrows pointing to their respective variables in the equation: 'Appports verticaux' points to 'AV', 'Ruissellement' points to 'Ru', 'Recharge' points to 'Re', and 'Évapotranspiration' points to 'ET'.

- AV calculés avec le « Modèle du **G**énie **R**ural à **4** paramètres **J**ournaliers » (GR4J)
 - Perrin et al. (2003)
- CemaNeige (Valéry 2010)

MÉTHODES

- Méthode #2: Bilan hydrique global avec GR4

Tiré de Perrin et al. (2003)



MÉTHODES

- Méthode #2: Bilan hydrique global avec GR4J
 - Evapotranspiration calculée par la méthode empirique d'Hydro-Québec (Bisson et Roberge, 1983, Dionne et al., 2008)

$$ET = 0.029718(T_M - T_m) \times e^{0.019 \left[\frac{9}{5}(T_M + T_m) + 64 \right]}$$

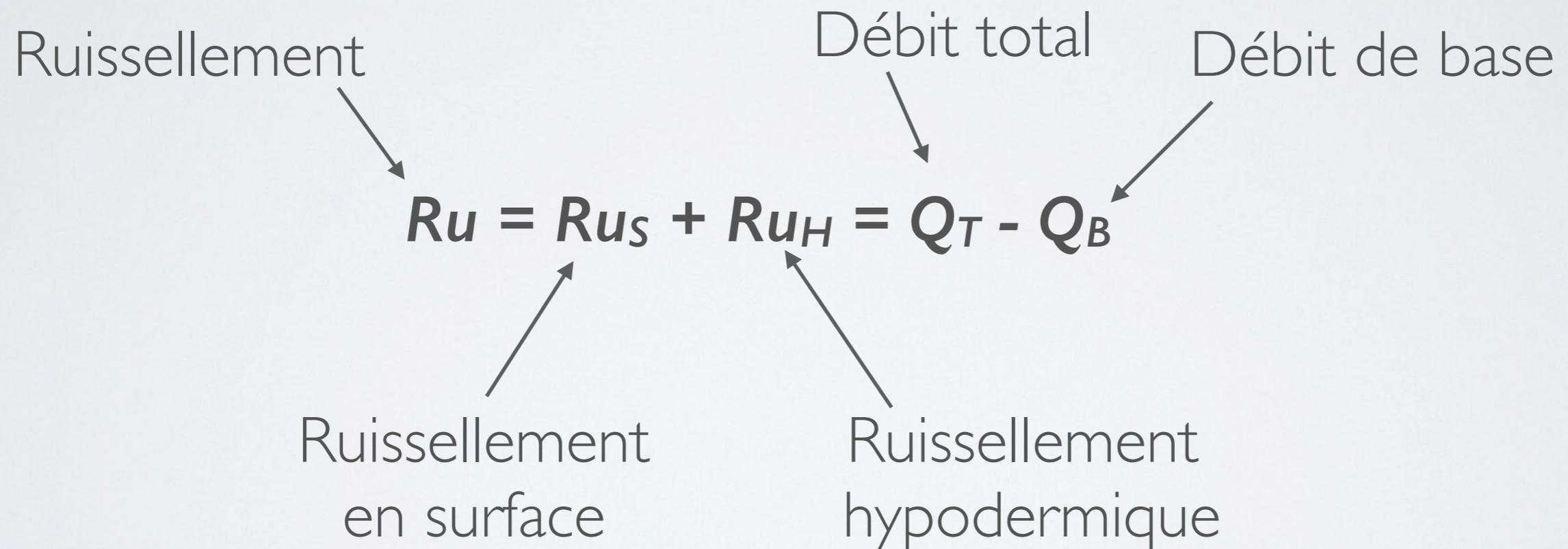
Température min. en °C

Evapotranspiration en mm/jour

Température max. en °C

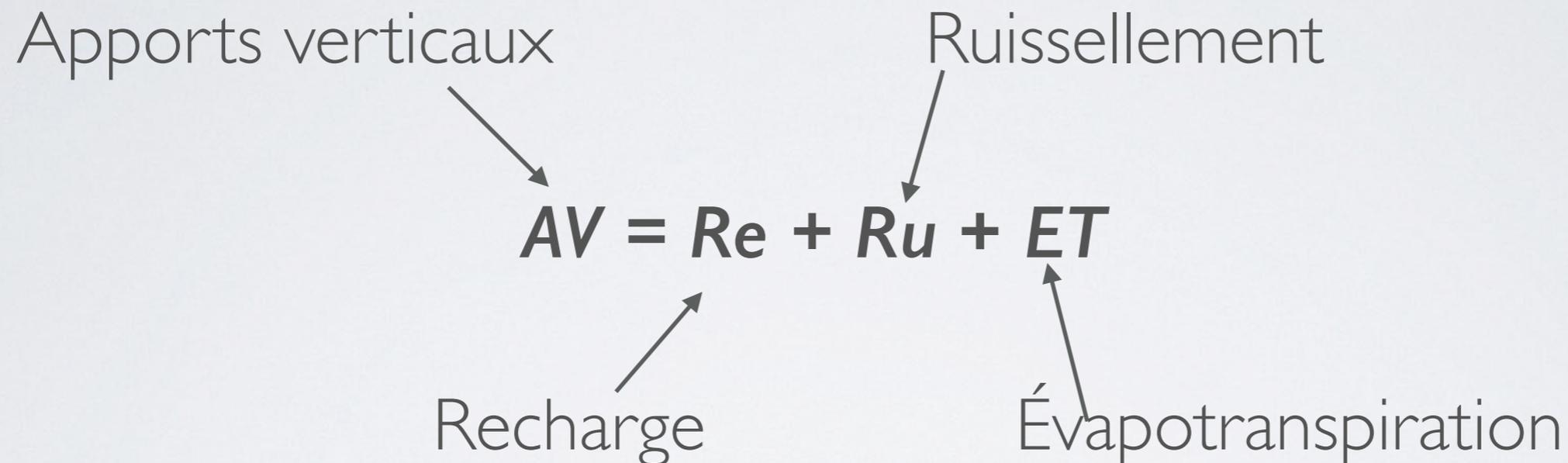
MÉTHODES

- Méthode #2: Bilan hydrique global avec GR4J
 - Calcul du ruissellement



MÉTHODES

- Méthode #3: Bilan hydrique global avec HYDROTEL



- AV calculés avec le modèle hydrologique HYDROTEL (Poirier *et al.*, 2012)
 - HYDROTEL: Distribué et à base physique (Fortin et al. 1995)
 - Pas de temps journalier

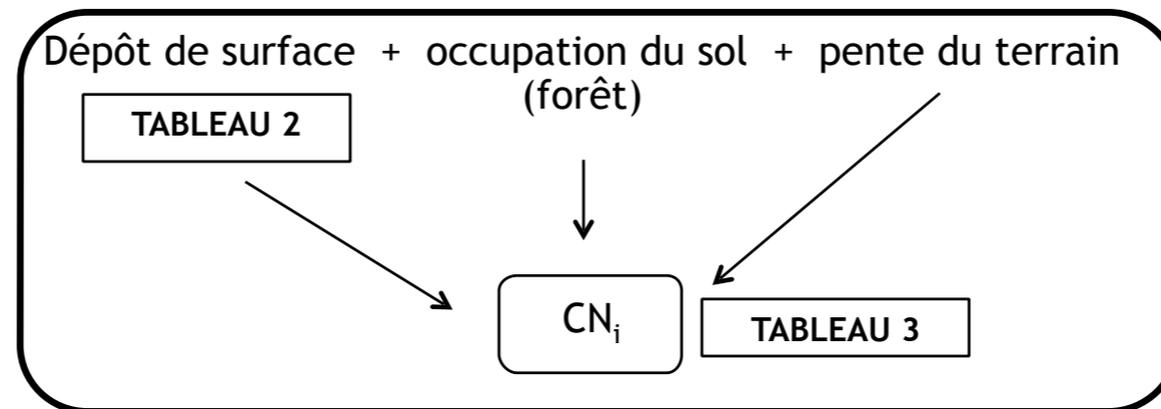
MÉTHODES

- Méthode #4: Bilan hydrique local
 - Grille de 250 m x 250 m
 - Ruissellement estimé grâce à la méthode du Soil Conservation Service (Curve Number) adaptée pour le Québec par Monfet (1979)
 - Ne tient pas compte du débit de base, seulement le ruissellement et l'infiltration.
 - Cartographie des zones de recharge potentielles
 - AV calculés avec le modèle hydrologique HYDROTEL (Poirier *et al.*, 2012)
 - Information détaillée sur les types de sol pour la rivière Portneuf n'est pas disponible.

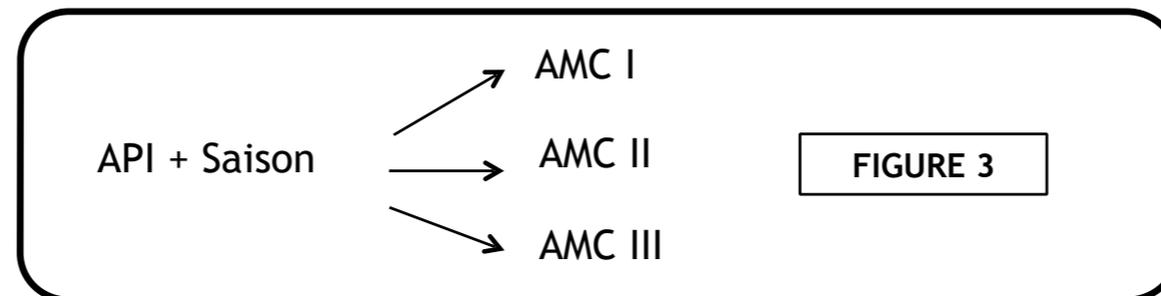
MÉTHODES

- Méthode #4: Bilan hydrique local

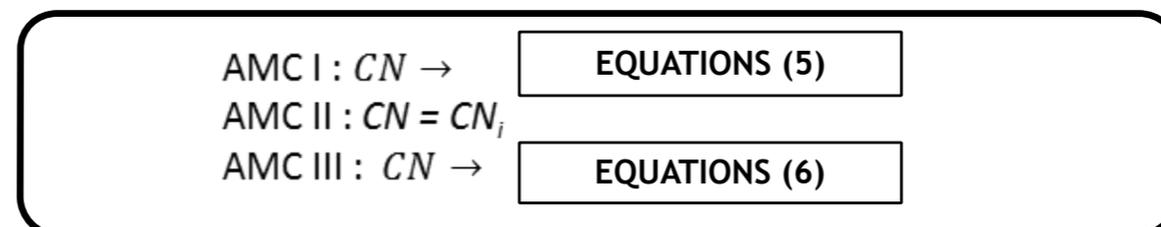
1. Détermination du CN_i (pour chaque unité spatiale de bassin versant; une unité = pixel 200m X 200 m) selon les caractéristiques physique du bassin versant (variables intemporelles):



2. Détermination des conditions moyennes d'humidité initiales du sol (AMC) selon la saison et l'indice API (Antécédent Precipitation Index), (variables temporelles).



3. Modification du CN selon la classe AMC.



4. Calcul du ruissellement journalier pour chaque unité spatiale de bassin versant. EQUATIONS (2) ET (3)

MÉTHODES

- Méthode #4: Bilan hydrique local
 - Méthode du Soil Conservation Service (Curve Number)

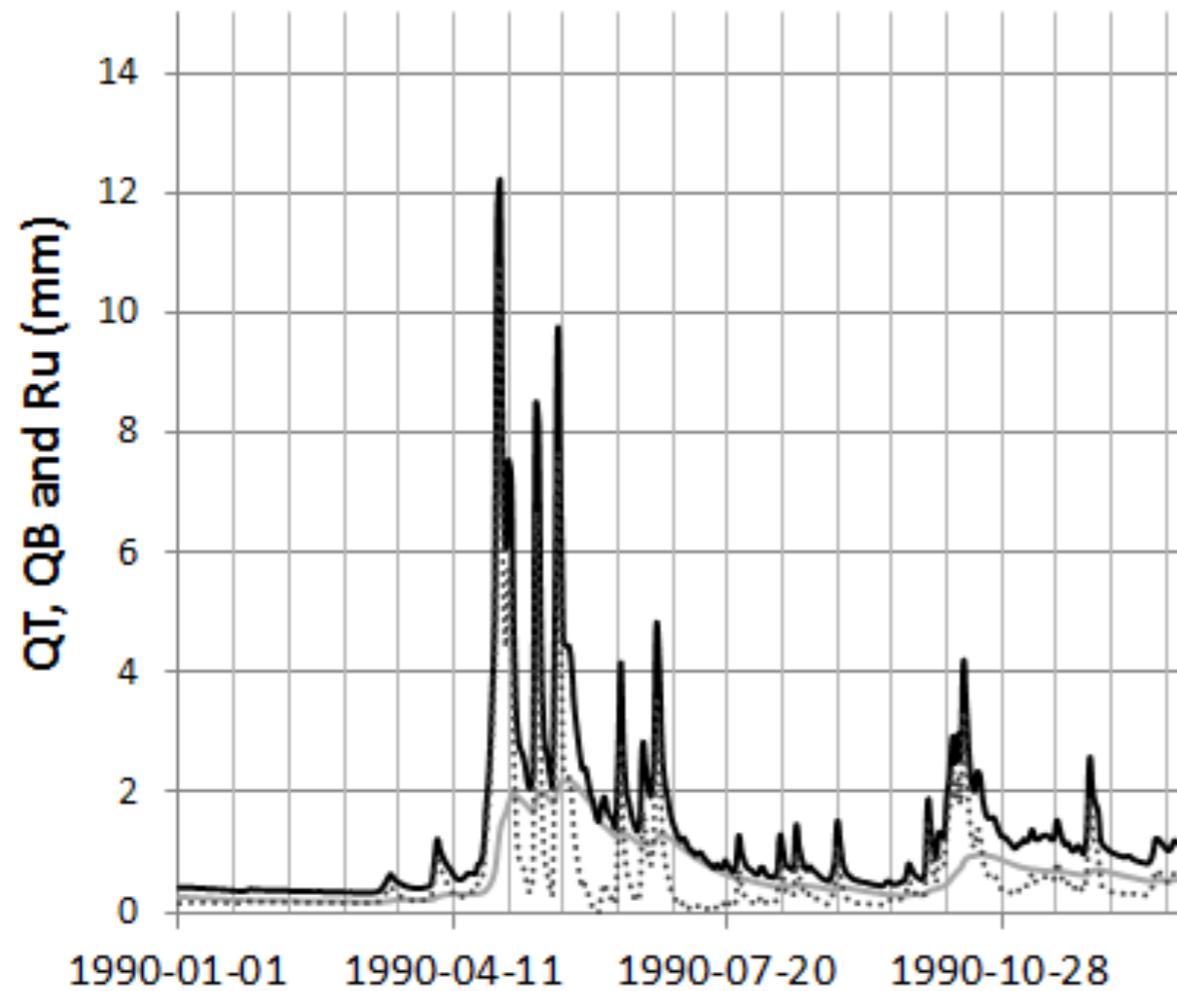
$$Ru_S = \frac{(VI - 0.01S)^2}{(VI + 0.99S)} \quad \text{si } VI > 0.01S$$

$$Ru_S = 0 \quad \text{si } VI \leq 0.01S$$

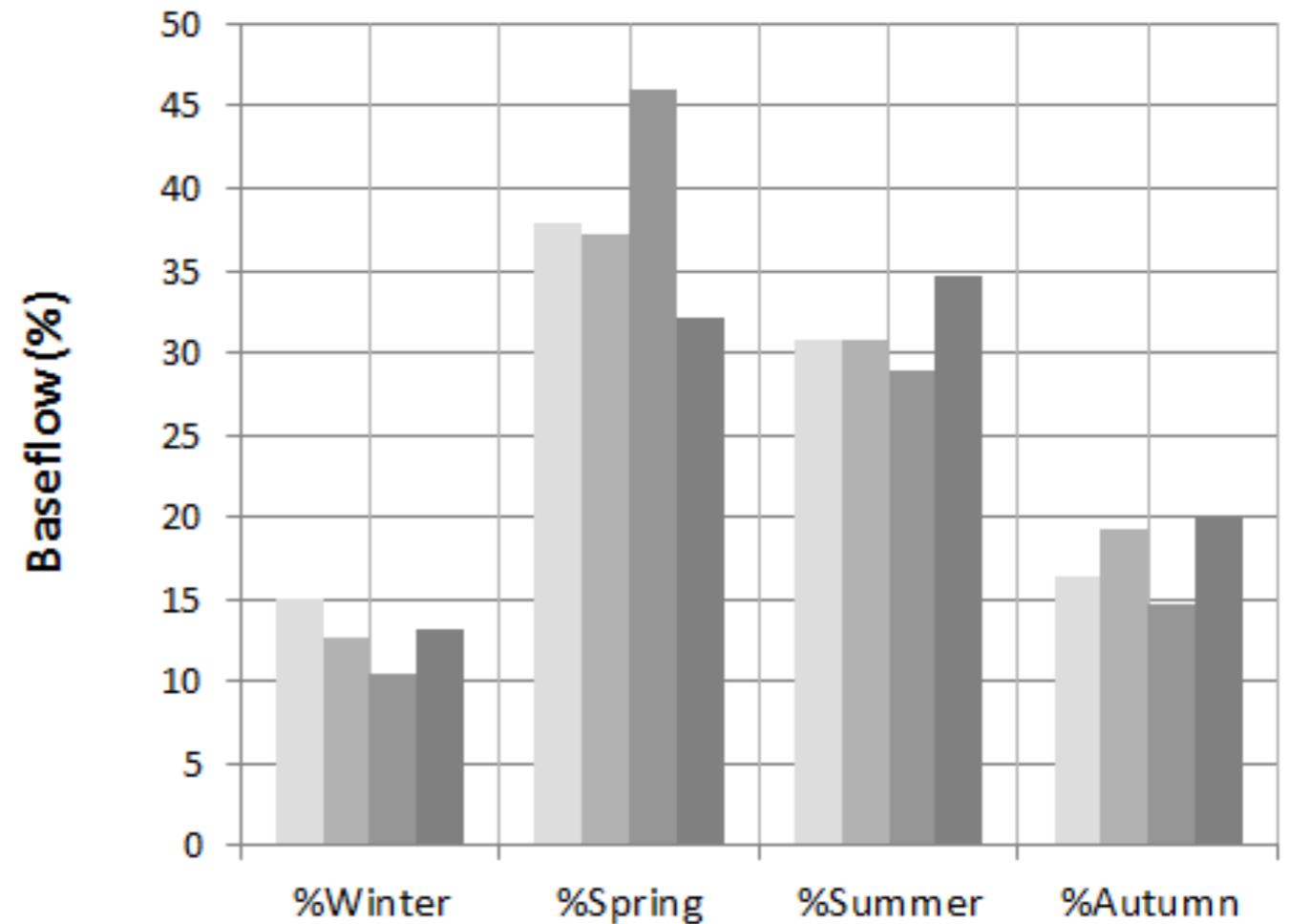
$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

RÉSULTATS

- Méthode # 1: Séparation d'hydrogramme



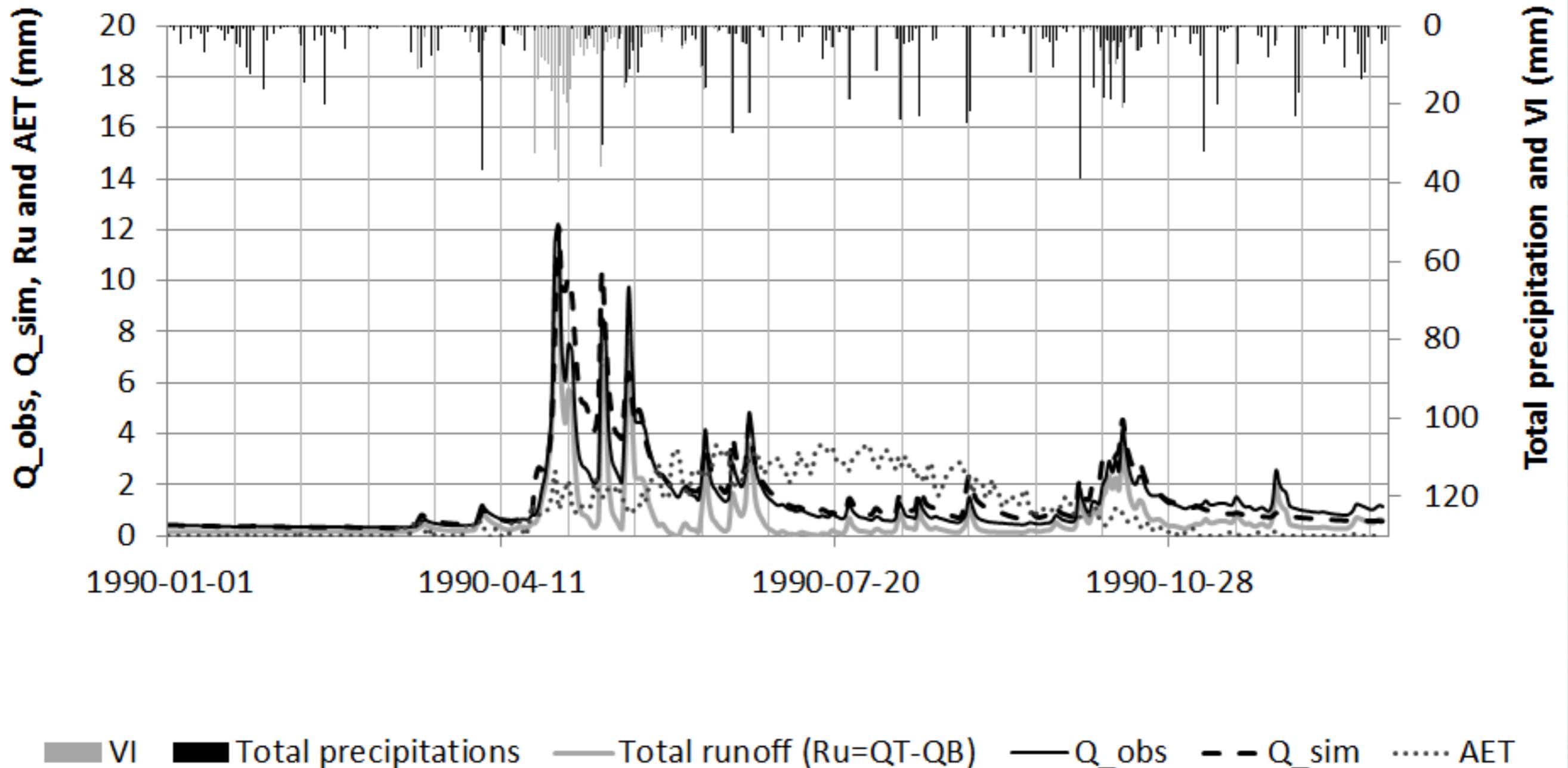
a) — QB — QT Ru (QT-QB)



b) ■ Du Gouffre ■ Malbaie ■ Petit Saguenay ■ Portneuf

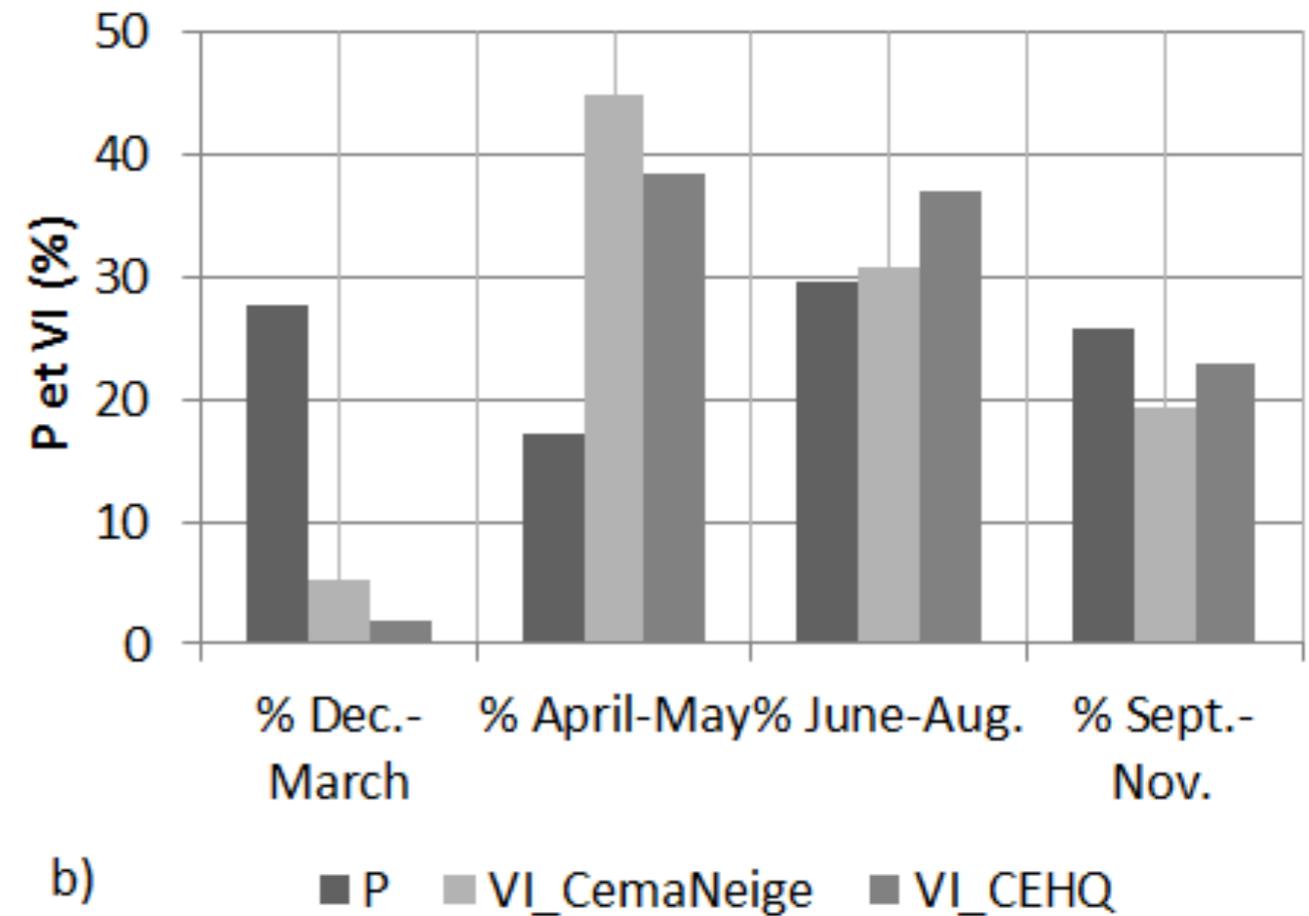
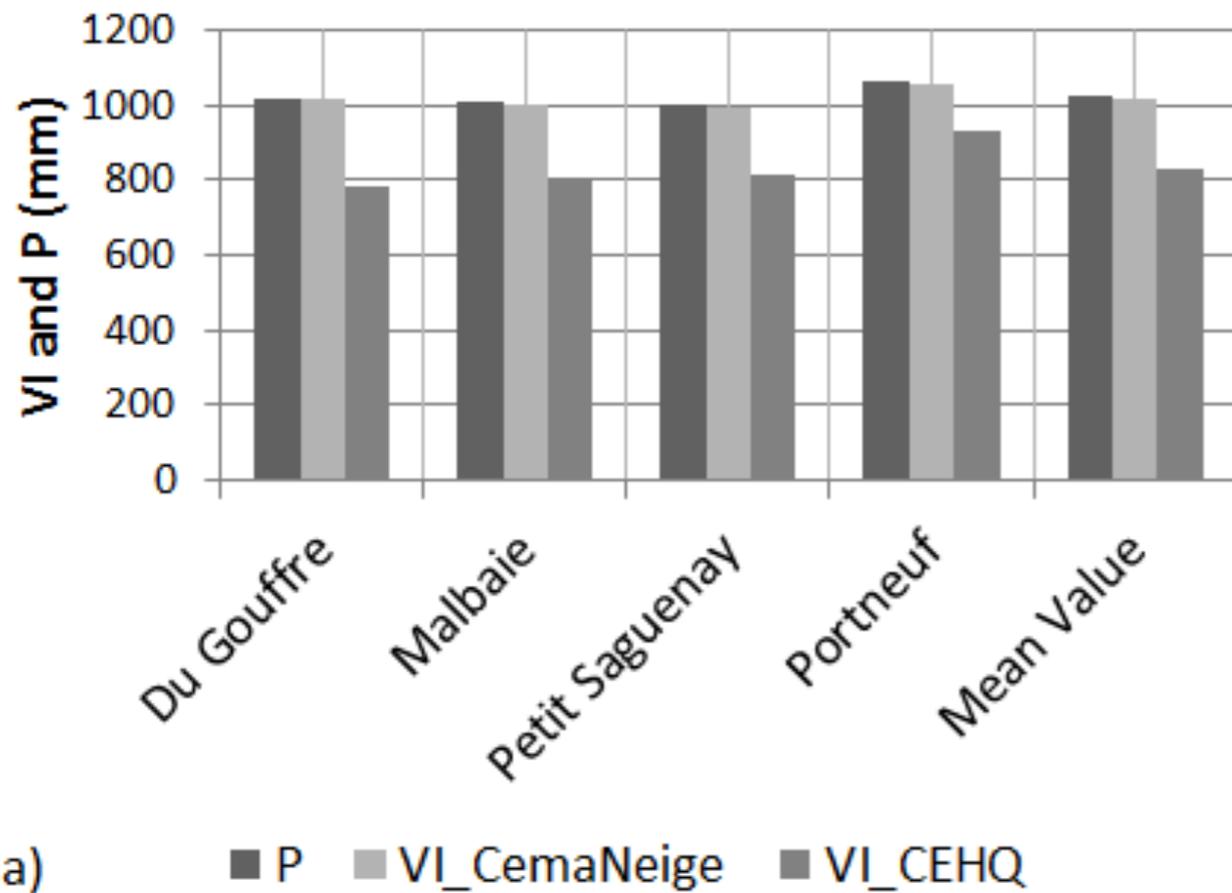
RÉSULTATS

- Méthode # 2: Bilan global avec GR4J (rivière Du Gouffre)



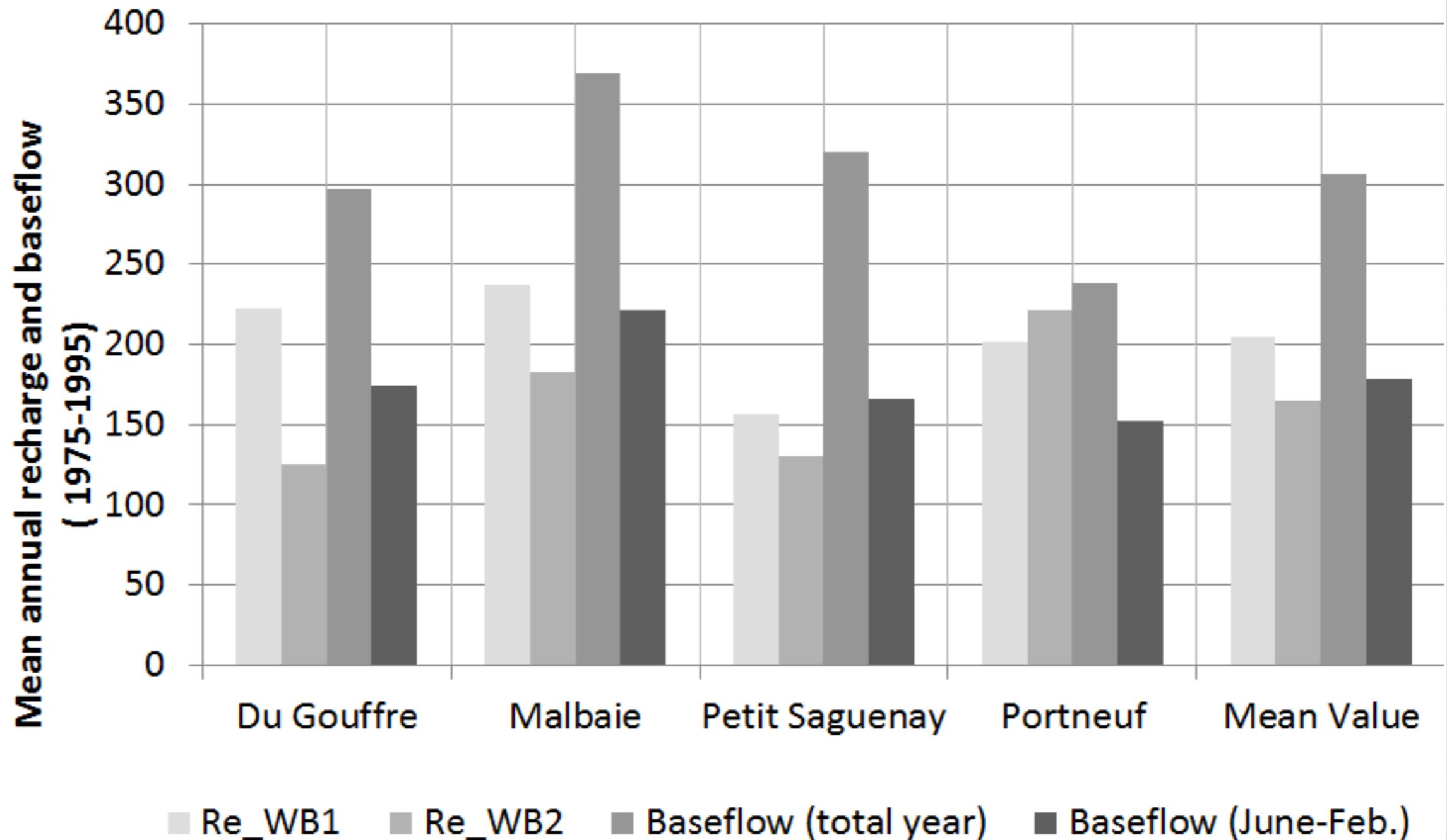
RÉSULTATS

- Méthodes #2 et #3: apports verticaux



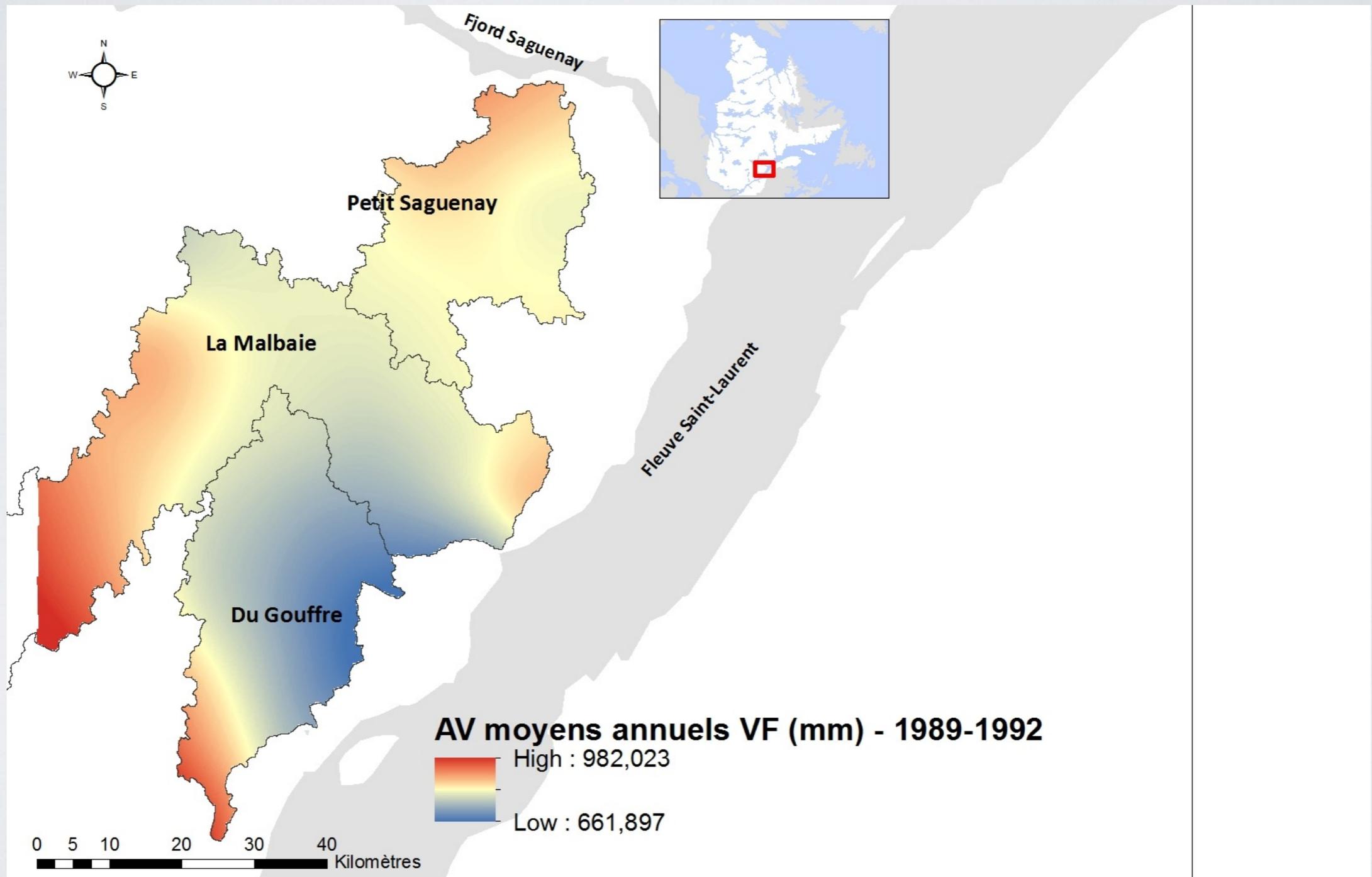
RÉSULTATS

- Méthodes # 1-2-3: Comparaison



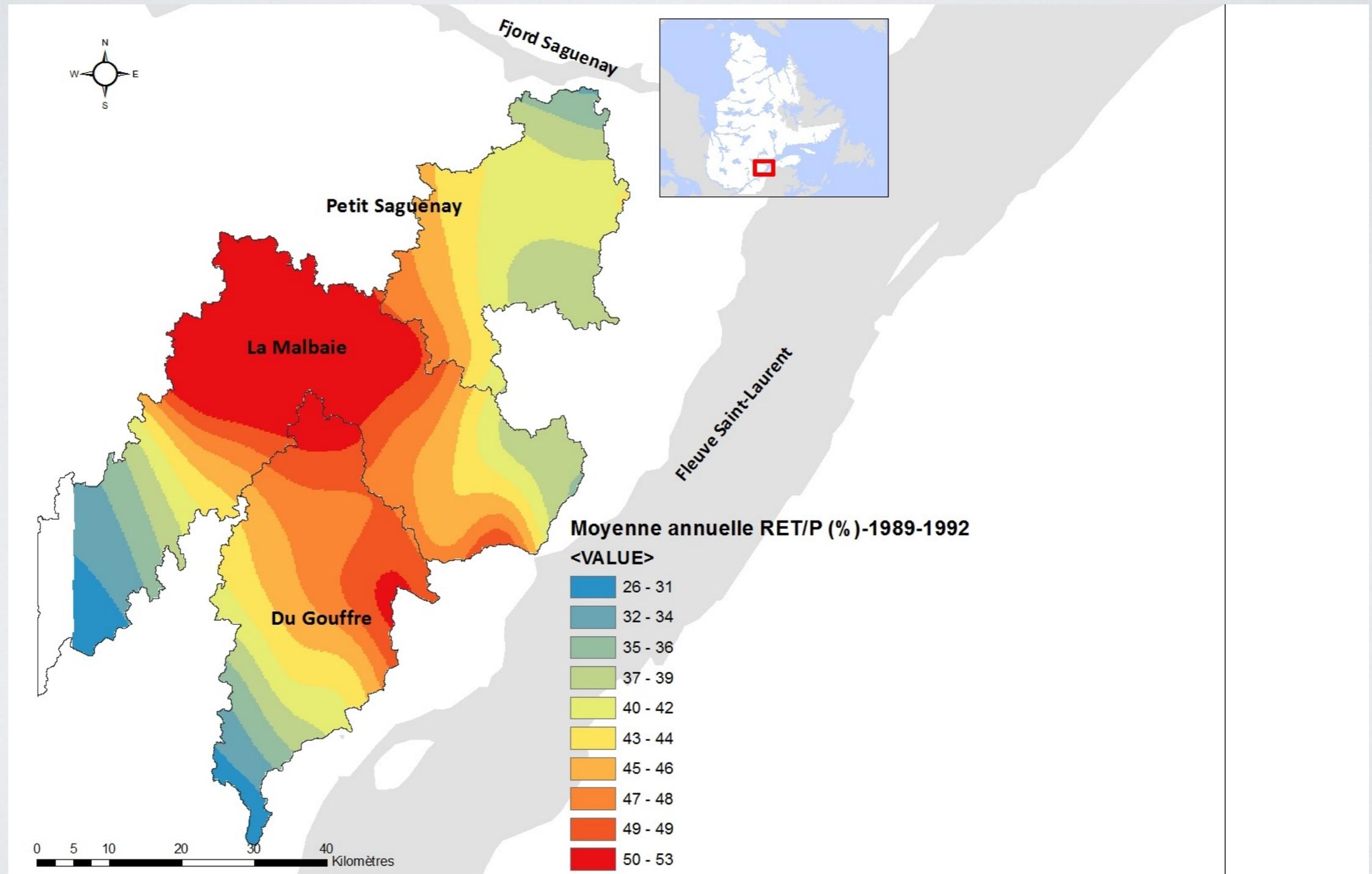
RÉSULTATS

- Méthode #4: apports verticaux



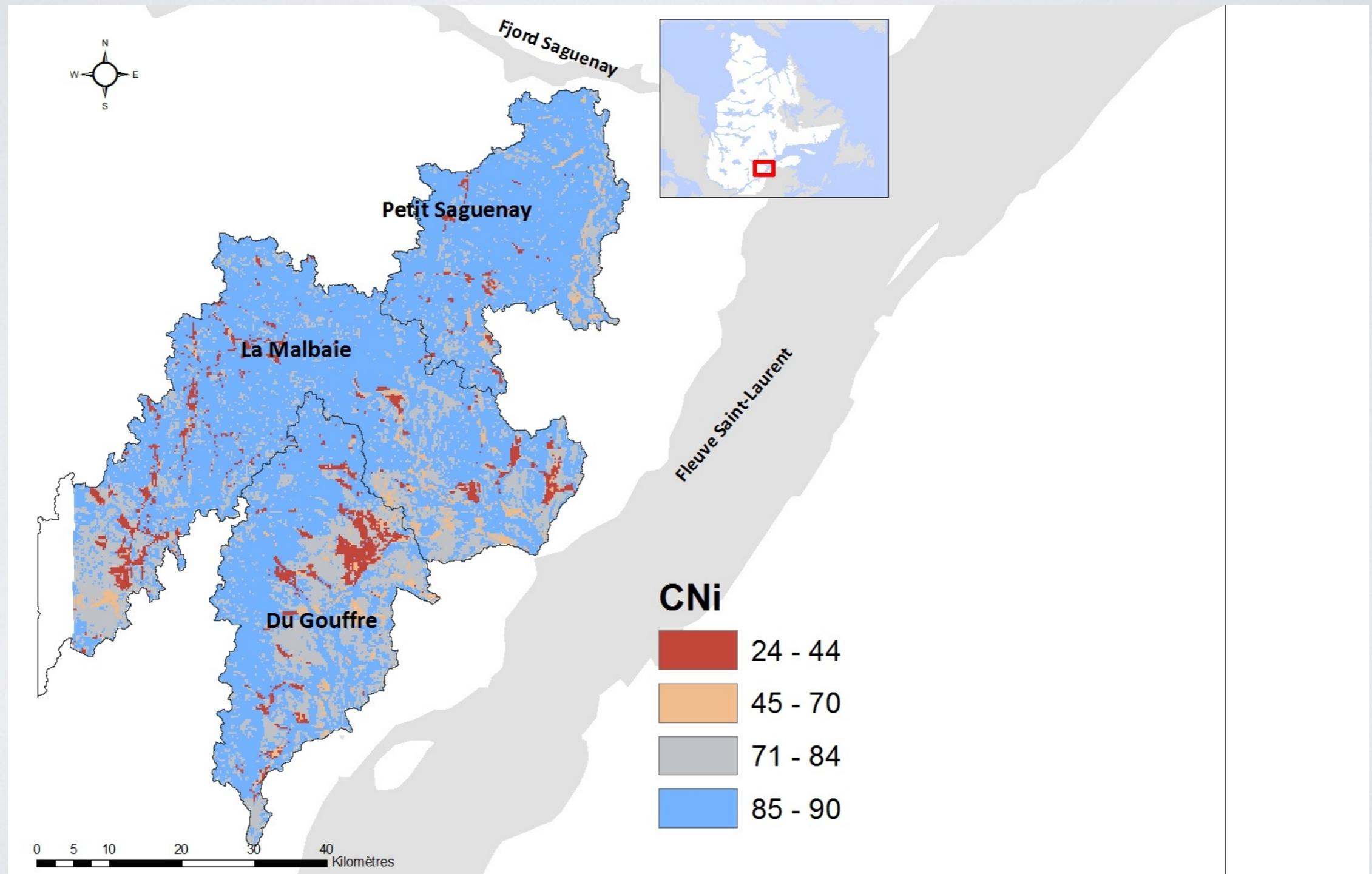
RÉSULTATS

- Méthode #4: évapotranspiration



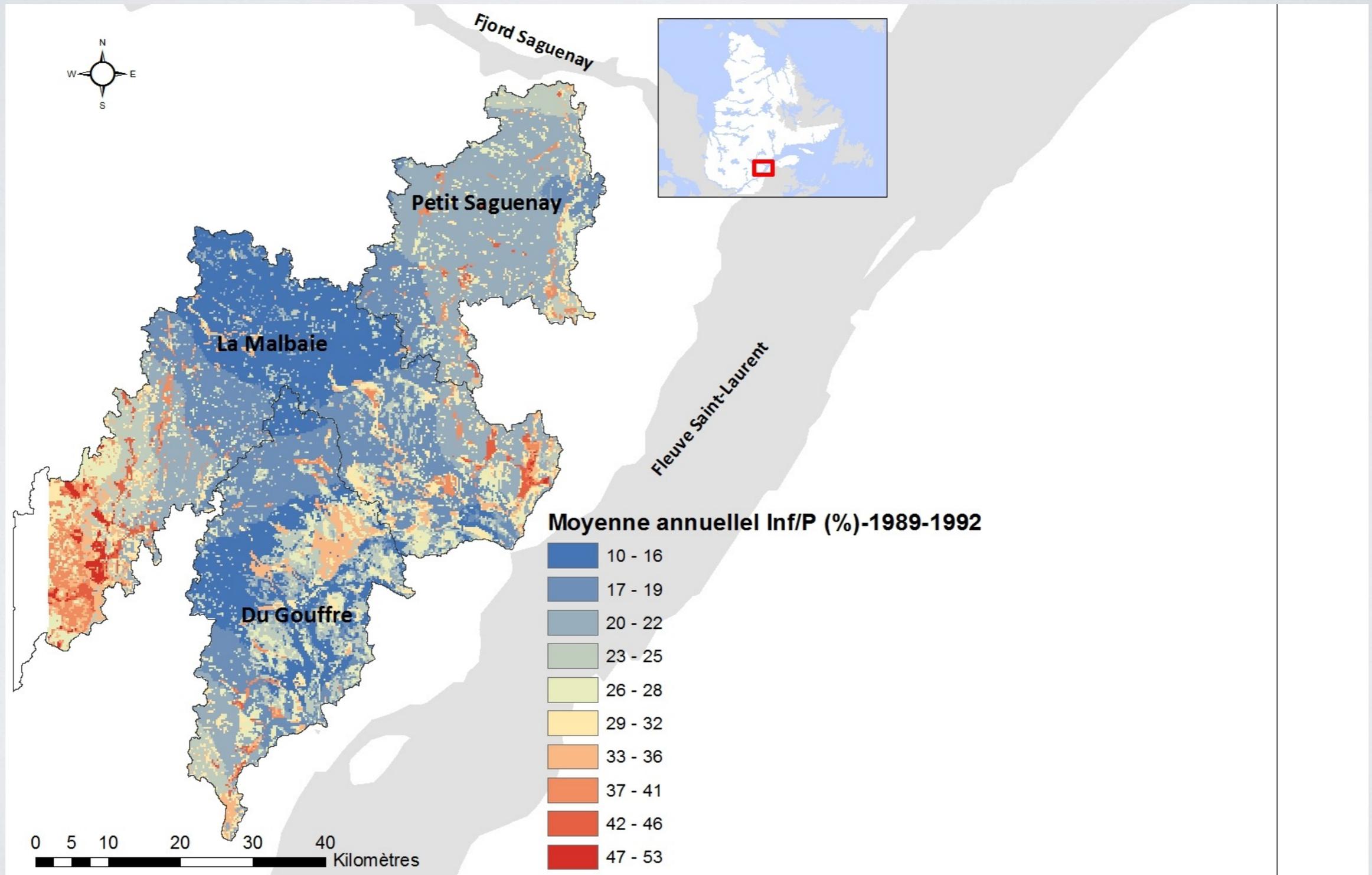
RÉSULTATS

- Méthode #4: Curve Number



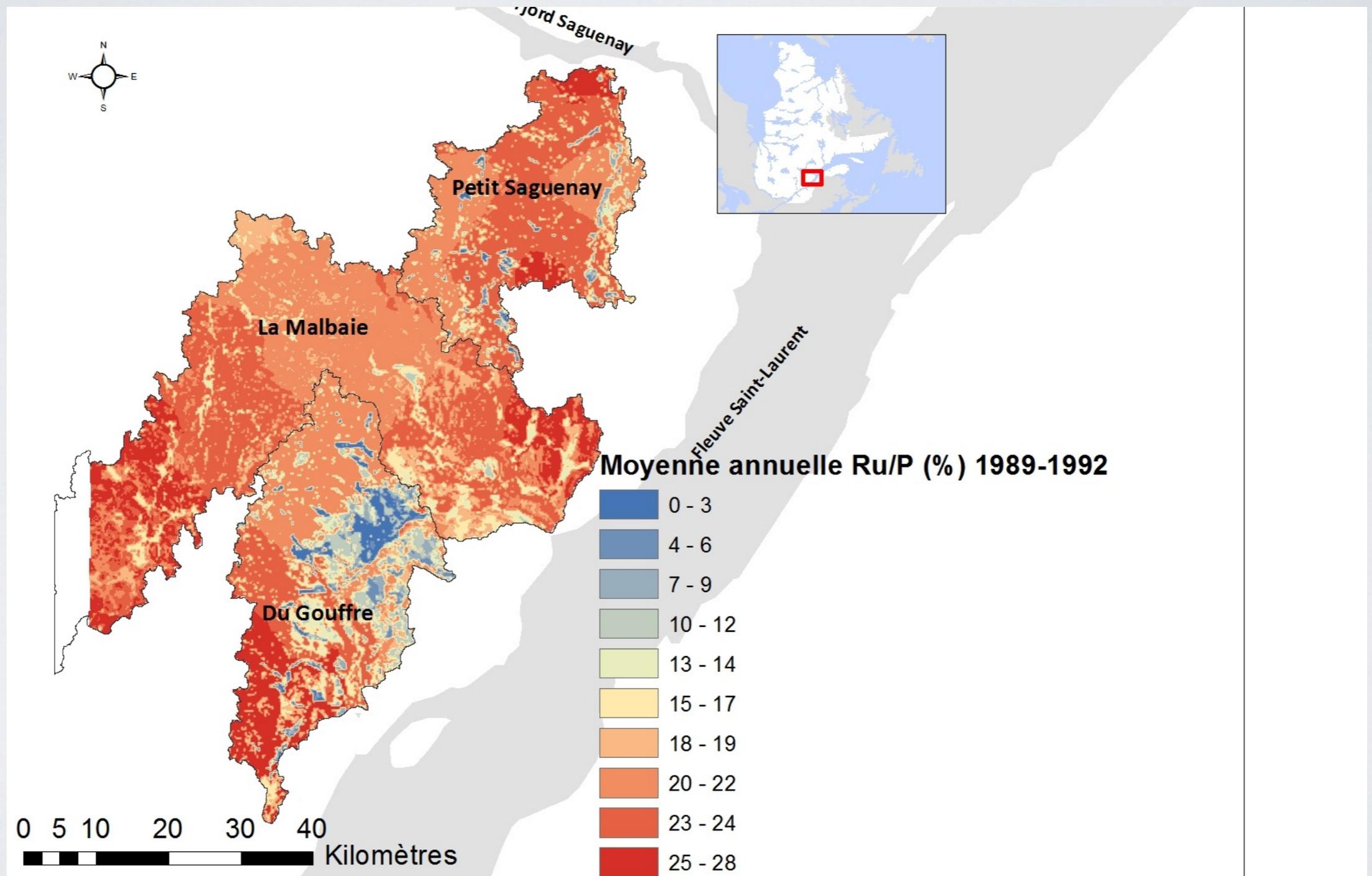
RÉSULTATS

- Méthode #4: Infiltration



RÉSULTATS

- Méthode #4: Ruissellement



RÉSULTATS

- Synthèse

Water budget components	Du Gouffre		Malbaie		Petit-Saguenay		Portneuf		Mean value	
	Value (mm)	% P	Value (mm)	% P	Value (mm)	% P	Value (mm)	% P	Value (mm)	% P
<i>P</i>	1019	100	1008	100	1000	100	1065	100	1023	100
<i>AET</i>	480	47	498	49	506	51	481	45	491	48
<i>Ru</i>	316	31	265	26	330	33	373	35	321	31
Surface Ru (1989-1992)	166	18	171	21	205	21			181	20
Infiltration (1989-1992)	194	21	215	22	214	22			208	22
<i>Re</i>	125-223	12-22	183-237	18-24	131-166	13-16	153-221	14-21	180	18

CONCLUSIONS

- Recharge minimale: Petit-Saguenay
 - Roc et dépôts de till
- Recharge maximale: La Malbaie
 - Sable et gravier sur plus de 20% de la superficie.
- Fiabilité des méthodes de bilan hydrique dépend directement de la fiabilité des intrants.
 - ET représente 48% de la précip. annuelle: son estimation a beaucoup d'influence
 - Incertitudes relatives aux observations hydro-météorologiques
- Séparation d'hydrogrammes: pics de recharge irréalistes au printemps et en été.
- Échanges souterrains ignorés dans la présente étude

RÉFÉRENCES

Bisson J. et Roberge F. (1983) Préviation des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec, workshop on flow predictions. Toronto, Conférence de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

Cousineau P., Poirier B., Brouard E., Amrani M.E., Roy D., Walter J., Lambert M. et Lajeunesse P. (2014) Rapport Final sur les travaux de cartographie des formations superficielles réalisés dans les territoires municipalisés de la Haute-Côte-Nord et de Charlevoix (Québec) entre 2012 et 2014, Rapport de recherche de l'Université du Québec à Chicoutimi, Université Laval, Ministères des Ressources naturelles, 104 pages..

Dionne F.-L., Ciobanas A. I. et Rousseau A.N. (2008) Validation d'un modèle de rayonnement net et comparaison de l'équation d'évaporation d'Hydro-Québec avec le bilan d'énergie thermique de surface. Québec: INRS-Eau, Terre et Environnement. Rapport de recherche No R-1036. 41 pages.

Eckhardt K. (2005) How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol. Process.* **19**(2), 507–515.

Eckhardt K. (2008) A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *J. Hydrol.* **352**(1–2), 168–173.

Fortin J.P., Moussa R., Bocquillon C. et Villeneuve, J.P. (1995) HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Rev. Sci. Eau*, **8**(1), 97.

RÉFÉRENCES

Meyboom P. (1961) Estimating ground-water recharge from stream hydrographs. *J. Geophys. Res.* **66**(4), 1203–1214.

Monfet J. (1979) Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée, Gouvernement du Québec, ministère des Richesse naturelle : Service de l'hydrométrie. 35 pages.

Perrin C., Michel C. et Andréassian V. (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* **279**(1–4), 275–289.

Poirier C., Fortier Filion T.-C., Turcotte R. et Lacombe P. (2012) Apports verticaux journaliers estimés de 1900 à 2010 – version 2012. Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), 112 pages.

Rivard C., Lefebvre R. et Paradis D. (2014) Regional recharge estimation using multiple methods: an application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada). *Environ. Earth Sci.* **71**(3), 1389–1408.

Valéry A. (2010) Modélisation précipitations–débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Agro Paris Tech Paris Fr. 405 pages
U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (1973) A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds, Rapport Technique no 149, Washington DC, 21 pages

de Vries J.J. et Simmers I. (2002) Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol. J.* **10**(1), 5–17.