

Livrable PARTIE 1

Calibration et validation des modèles hydrogéologiques

Problématique

Évolution des ressources en eau en amont des ouvrages de captage principaux
du système d'alimentation en eau potable

Chaire Eaux et Territoires

Dans le cadre de la thèse de doctorat de

Ronan Abhervé

Sous la direction de

Luc Aquilina, Jean-Raynald de Dreuzy, Stéphane Louaisil

Intégration du changement climatique dans la gestion de la ressource en eau : exemple du bassin rennais



1 Système approvisionnement en eau potable du bassin rennais

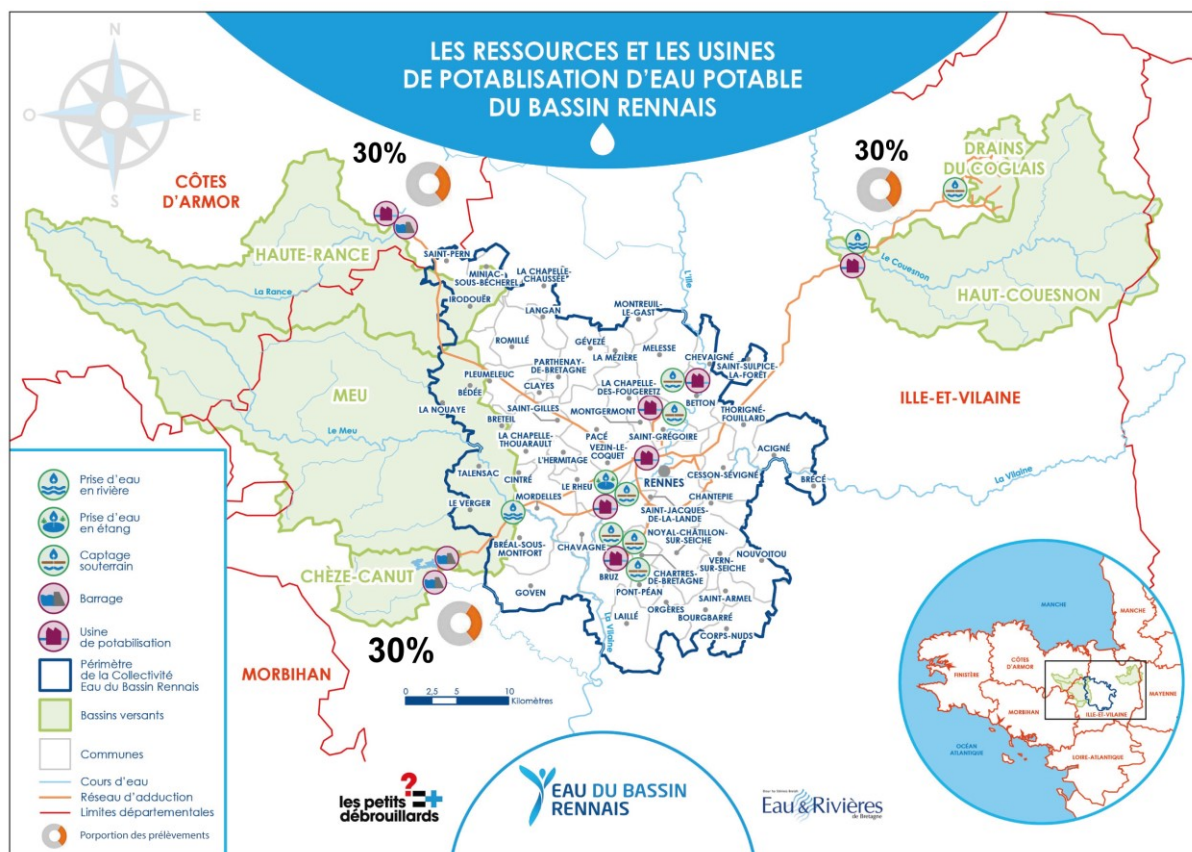


Figure 1. Système d'approvisionnement en eau potable du bassin rennais. Source : CEBR.

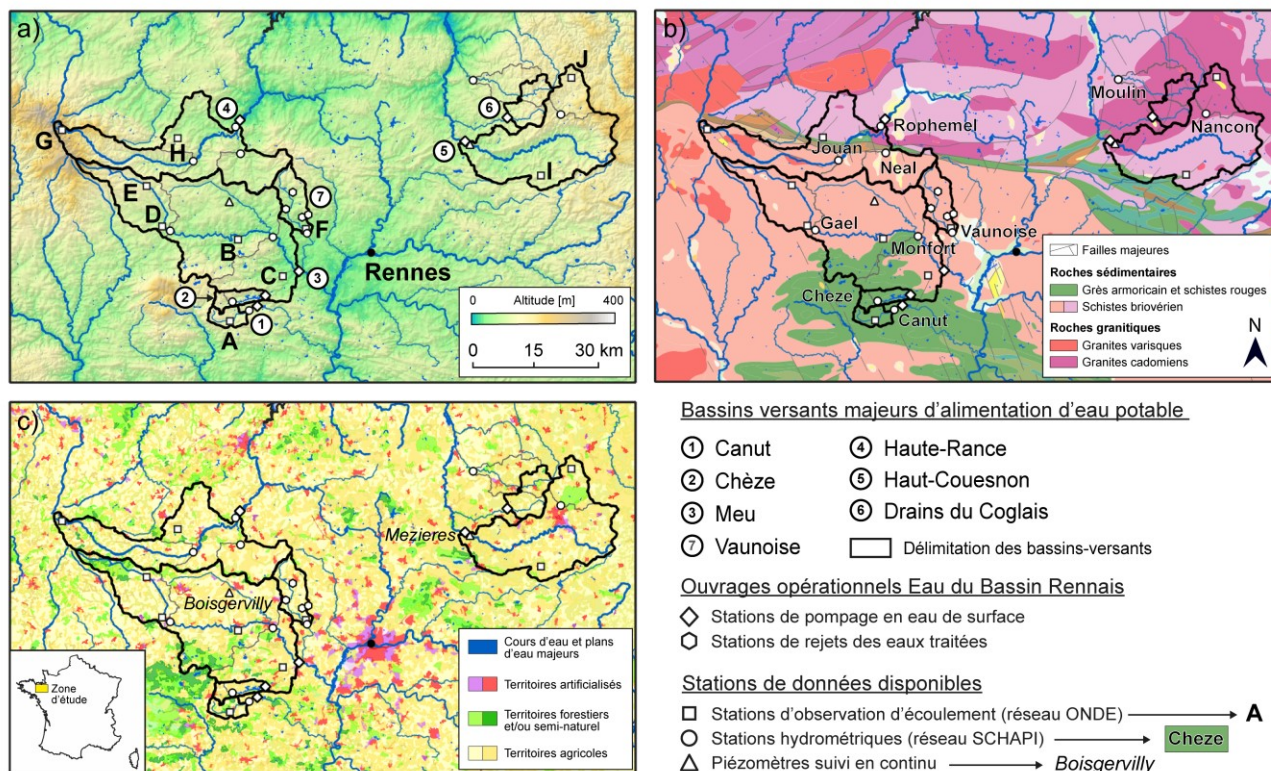


Figure 2. a) Topographie (BD ALTI 75m), b) lithologie (BRGM : 1 : 1 000 000), c) occupation du sol (Corine and Land Cover 2018) des aires d'alimentation en eau potable.

2 Démarche de modélisation et de calibration des modèles à partir des données

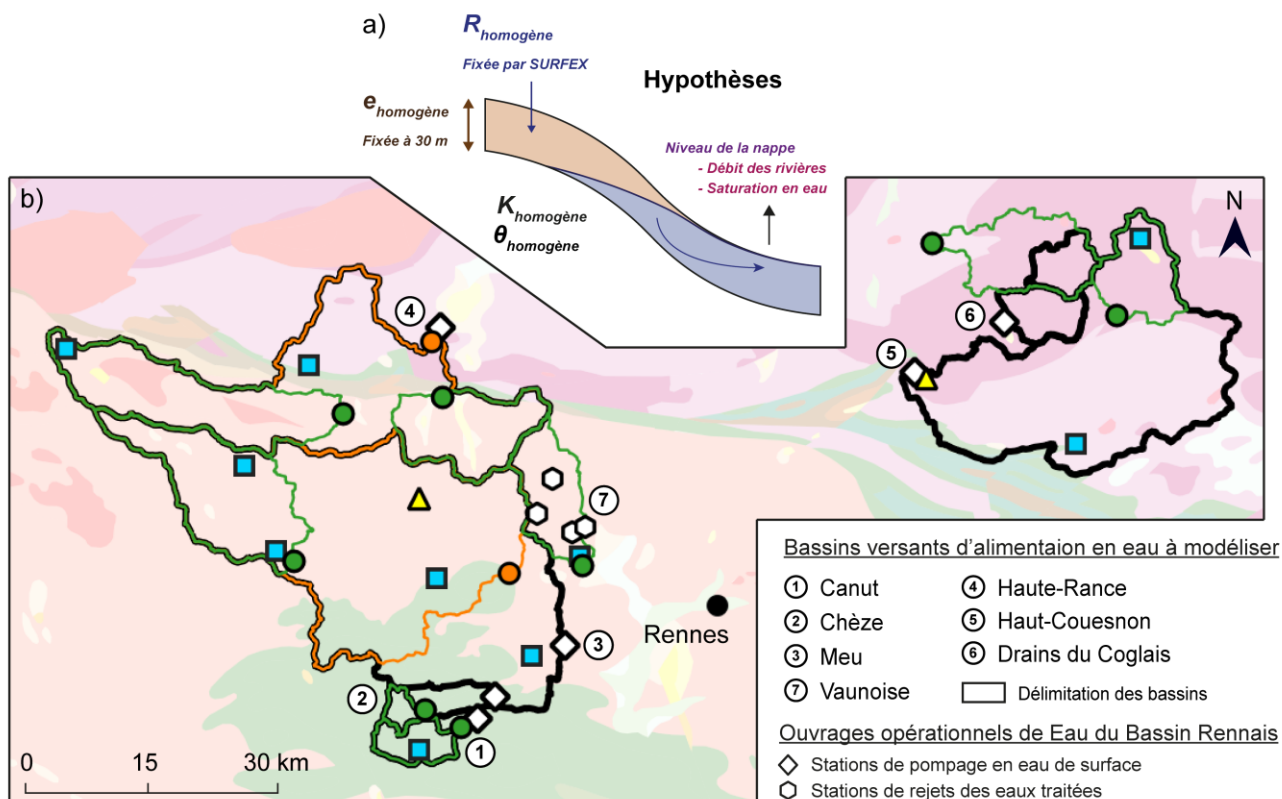
Dans le cadre de la chaire Eaux et Territoires, certains sites d'étude ont dès le départ été ciblés par Eau du Bassin Rennais étant donné leur intérêt majeur pour l'approvisionnement en eau potable (Figure 1 et 2). Pour chacune de ces aires d'alimentation, l'objectif était de développer un modèle hydrogéologique.

Les modèles sont développés à partir de la topographie (données satellite) où l'on applique une épaisseur d'aquifère de 30 m, généralement retrouvée en Bretagne. Les modèles hydrogéologiques ont été calibrés à partir de données observées : débits des cours d'eau, observation de l'intermittence et cartes de réseau hydrographique (voir manuscrit de thèse Abhervé, 2022). En calant ces modèles, on optimise les propriétés hydrauliques du milieu souterrain : conductivité hydraulique K (capacité à laisser traverser l'eau) et la porosité θ (capacité de stockage). Nous travaillons avec des propriétés hydrauliques effectives, que l'on peut qualifier de « moyennes » à l'échelle du bassin versant. Ainsi, pour chaque bassin-versant, une valeur de K et de θ sont estimées. Les données climatiques intégrées aux modèles hydrogéologiques sont des valeurs de recharge, c'est-à-dire la quantité d'eau qui atteint la nappe d'eau souterraine. Ces données sont produites et fournies par Météo-France (Le Moigne et al., 2020), que ce soit pour l'historique ou pour les scénarios climatiques futurs.

Pour l'ensemble des modèles développés les hypothèses et la stratégie de développement se résument ainsi :

- **Domaine.** Le domaine des modèles est élargi et délimité, par une zone tampon de +10 % de la superficie du bassin-versant, bordée par une condition limite à flux nul.
- **Discretisation.** Un modèle numérique de terrain d'une résolution de 75 m (BD ALTI) constitue la discretisation et la limite supérieure des modèles, où un modèle de conductance est appliqué sur toute la surface. Une seule couche numérique est implémentée au modèle. Les simulations en régime transitoire sont réalisées au pas de temps mensuel.
- **Paramétrisation.** L'épaisseur de l'aquifère fixée à 30 m est constante et parallèle à la topographie. Les propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique K et porosité θ) sont homogènes et isotopes.
- **Recharge.** La recharge moyennée à l'échelle du bassin versant est issue du modèle de surface SURFEX, piloté par la réanalyse météorologique SAFRAN (8 x 8 km). La recharge est normalisée, selon le débit mesuré à la station hydrométrique disponible, afin d'assurer la cohérence entre le flux moyen en entrée et en sortie du bassin-versant. La recharge R uniforme s'opère sur chaque maille.
- **Surface.** Les zones de résurgence (saturation en eau à la surface), de décharge des eaux souterraines, se produisent seulement là où la nappe phréatique atteint la surface. Ces zones de résurgence génèrent des cours d'eau à partir d'un simple routage de surface selon la topographie du bassin-versant.

La calibration des modèles est contrainte par le type et la quantité de données disponibles (Figure 3). Ainsi, dans un premier temps, nous choisissons de caler uniquement les sous-bassins versants disposant de mesures de débit des cours d'eau (contours verts sur la Figure 3). L'exutoire de ces sous-bassins-versants modélisés correspond à une station hydrométrique (ronds verts sur la Figure 3). Pour ces 8 sous bassins-versants, lorsque les données sont disponibles, l'approche de calibration décrite en 4 points dans la section 2.3.6 du manuscrit de thèse est appliquée. La calibration multi-objectifs se base sur 3 types de données (réseau hydrographique, débit des cours d'eau et leur intermittence) qui permettent de contraindre le modèle et de rechercher le meilleur compromis entre les différents objectifs.



Données disponibles pour la calibration et validation des modèles

- Station hydrométrique : calibration des sous-bassin versants sur le débit (NSE_{log})
- Station hydrométrique : validation sur le débit avec la simulation effectuée à partir de ③ et ④
- Stations d'observation d'écoulement : validation de la présence en eau en amont des stations
- ▲ Piézomètres suivi en continu : validation sur le niveau de la nappe

Stratégie de calibration

- Optimisation de K en régime permanent
- cartographie des cours d'eau
- Optimisation de θ en régime transitoire
- débit des cours d'eau
- intermittence des cours d'eau

Figure 3. a) Hypothèses et schéma conceptuel du cas de modélisation de référence appliqué aux modèles. b) Données disponibles pour la calibration et la validation des modèles des 6 bassins-versants majeurs d'alimentation en eau potable (hors Vaunoise).

Les résultats de la calibration pour chaque sous-bassin sont présentés dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Caractéristiques des 8 sous-bassins versants calibrés et résultats de l'optimisation quantitative pour le couple de paramètre K et θ choisi. L'épaisseur de l'aquifère est constante et fixée à 30 m.

	Caractéristiques et paramètres observés					Paramètres optimisés		Critère de performance sur le débit				Saturation modélisée	
	Aire [km ²]	Pente [%]	$A_{sat\ obs\ comp}$ [%]	$A_{sat\ obs\ perm}$ [%]	R [mm/an]	K_{perm} [m/s]	θ [%]	NSE [-]	NSE_{log} [-]	KGE [-]	RMSE [mm/mois]	$A_{sat\ sim\ comp}$ [%]	$A_{sat\ sim\ perm}$ [%]
Canut	24,9	2,7	7,9	3,2	267,0	$5,1 \times 10^{-5}$	0,1	0,80	0,69	0,60	14,40	4,7	1,7
Cheze	9,6	2,7	9,9	3,5	319,9	$3,4 \times 10^{-5}$	0,1	0,67	0,54	0,46	20,85	5,4	1,9
Gael	131,7	2,7	7,1	3,2	254,5	$7,0 \times 10^{-5}$	0,2	0,84	0,57	0,60	11,21	3,5	1,4
Vaunoise	62,0	2,9	8,3	4,2	187,1	$3,0 \times 10^{-5}$	0,2	0,71	0,61	0,55	9,24	5,1	2,5
Neal	83,6	2,9	7,0	4,9	167,8	$1,9 \times 10^{-5}$	0,2	0,80	0,44	0,62	9,13	5,1	2,3
Jouan	143,0	4,1	11,2	4,1	262,2	$4,9 \times 10^{-5}$	0,5	0,78	0,71	0,64	11,46	4,2	2,2
Moulin	82,7	3,9	11,1	6,6	293,8	$2,4 \times 10^{-5}$	2,0	0,55	0,75	0,52	11,79	6,7	4,9
Nancon	57,3	3,6	12,8	4,5	341,5	$5,9 \times 10^{-5}$	2,0	0,61	0,80	0,55	13,58	5,7	3,8

De la Figure 4 à 11, une planche des résultats de calibration est proposée pour chaque sous-bassin calibré. Sans entrer dans les détails ici, plus d'informations à propos de ces fiches sont disponibles dans le manuscrit de thèse (cf. section 5.1.2).

Gaël

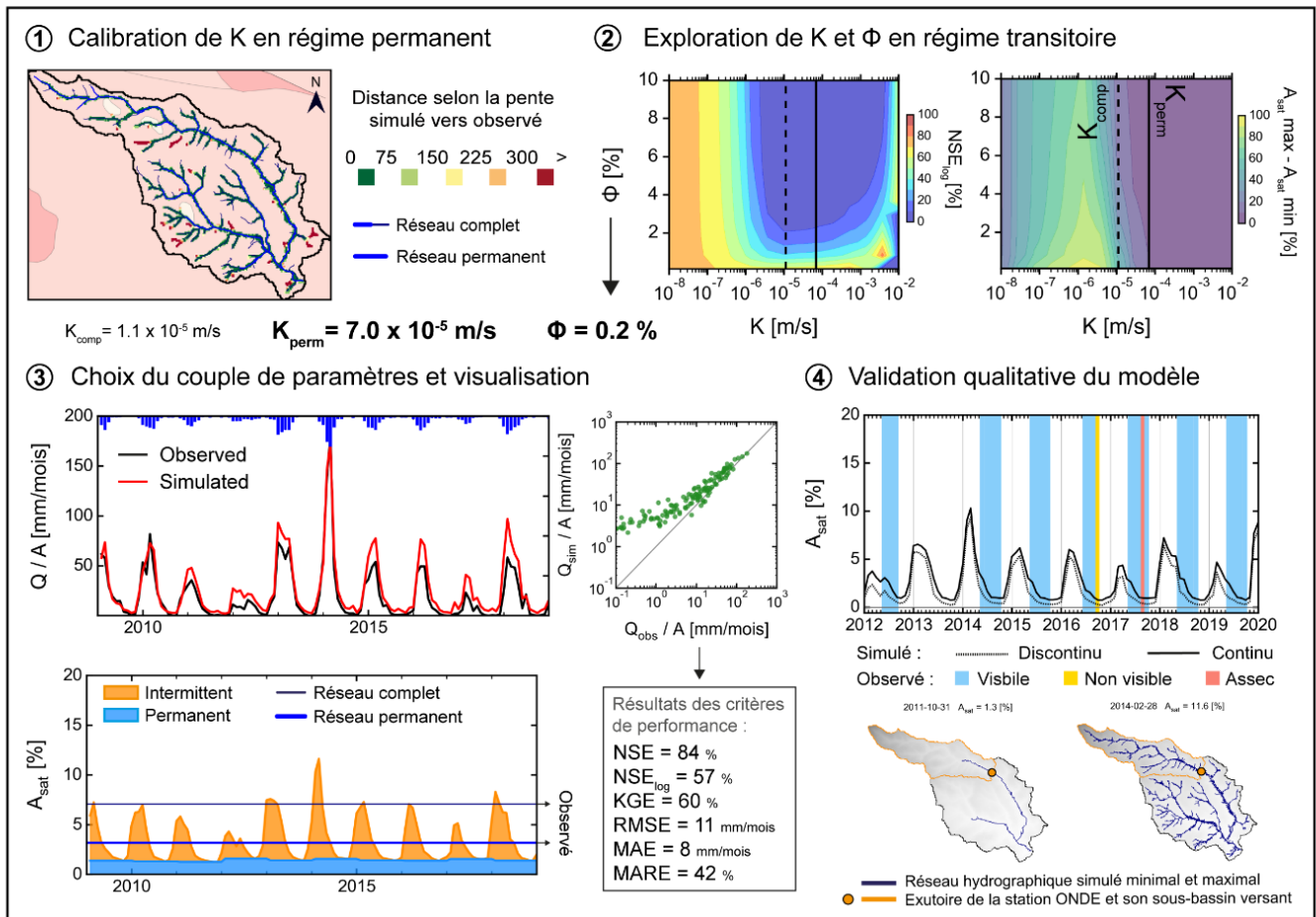


Figure 4. Planche des résultats de la calibration et validation du modèle hydrogéologique du « Gaël ».

Vaunoise

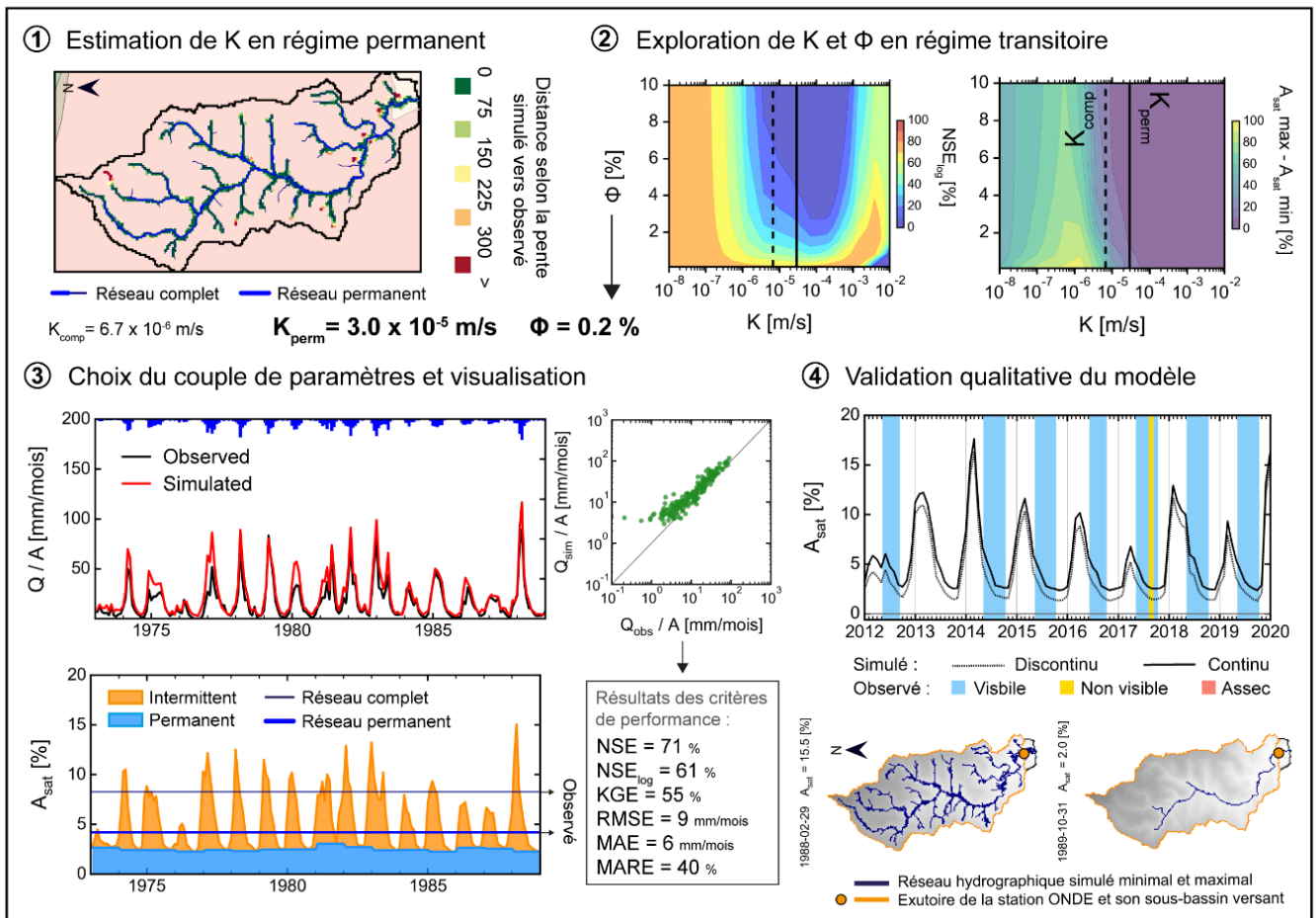


Figure 5. Planche des résultats de la calibration et validation du modèle hydrogéologique de la « Vaunoise ».

Néal

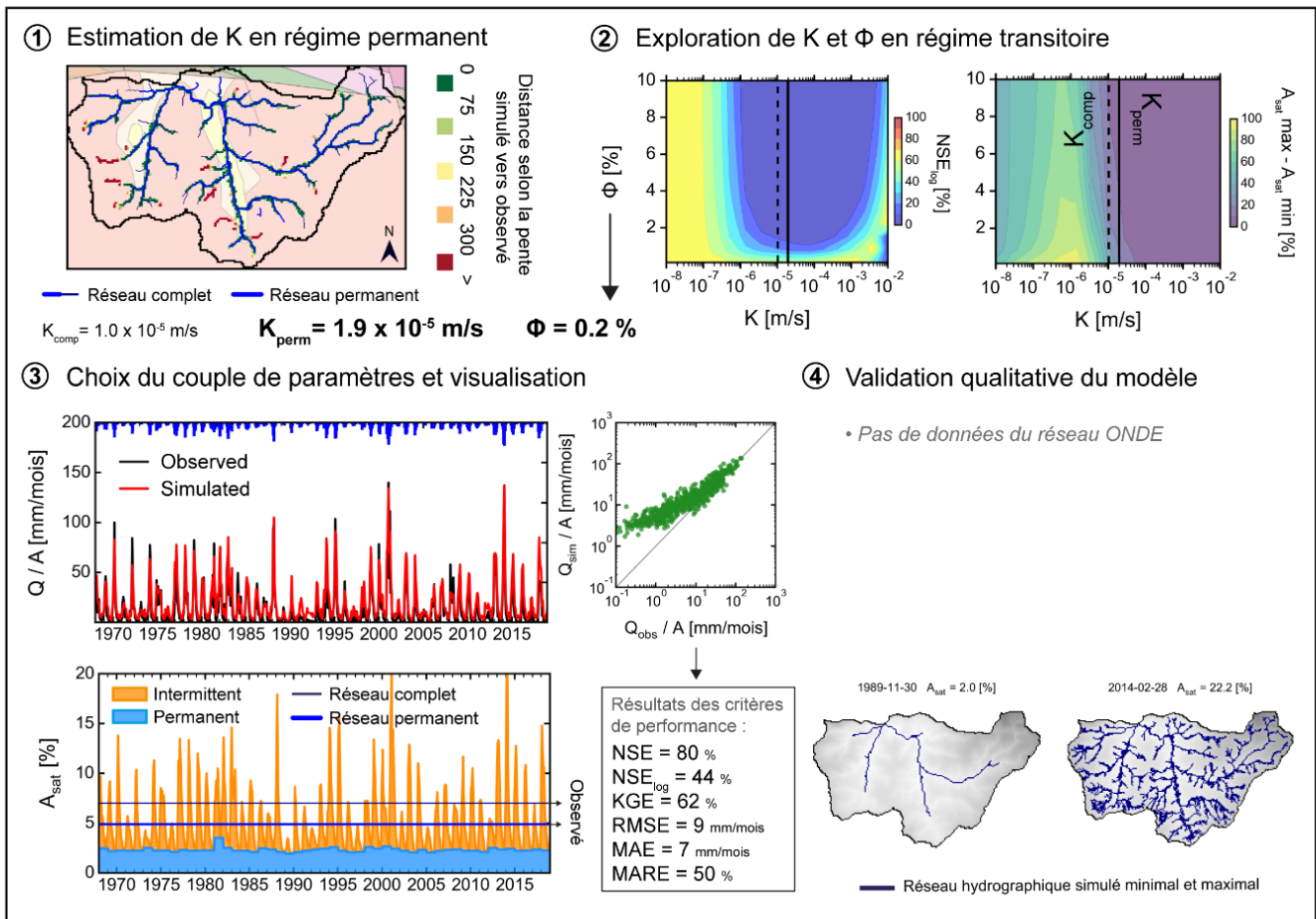


Figure 6. Planche des résultats de la calibration et validation du modèle hydrogéologique du « Néal ».

Jouan

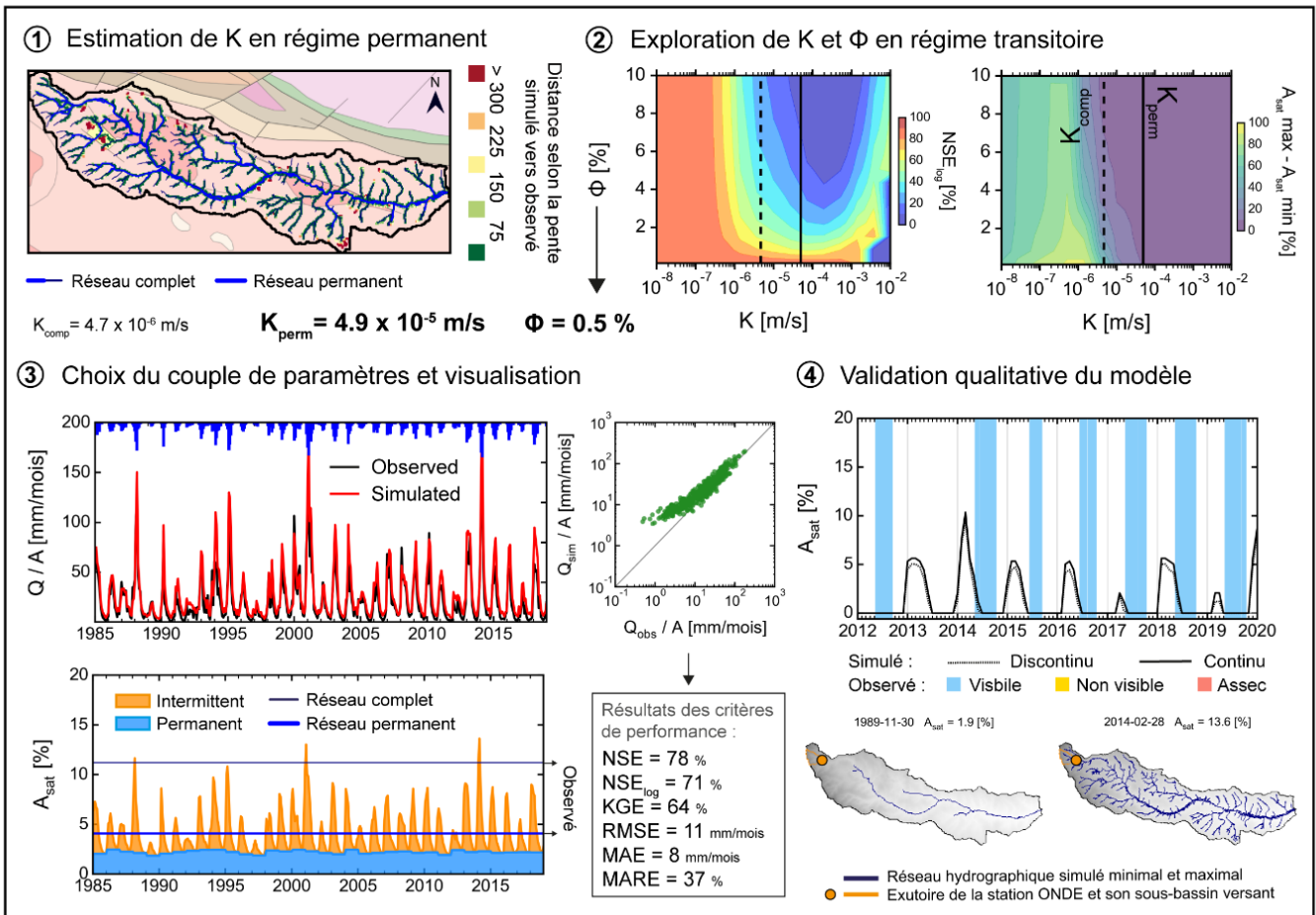


Figure 7. Planche des résultats de la calibration et validation du modèle hydrogéologique du « Jouan ».

Moulin

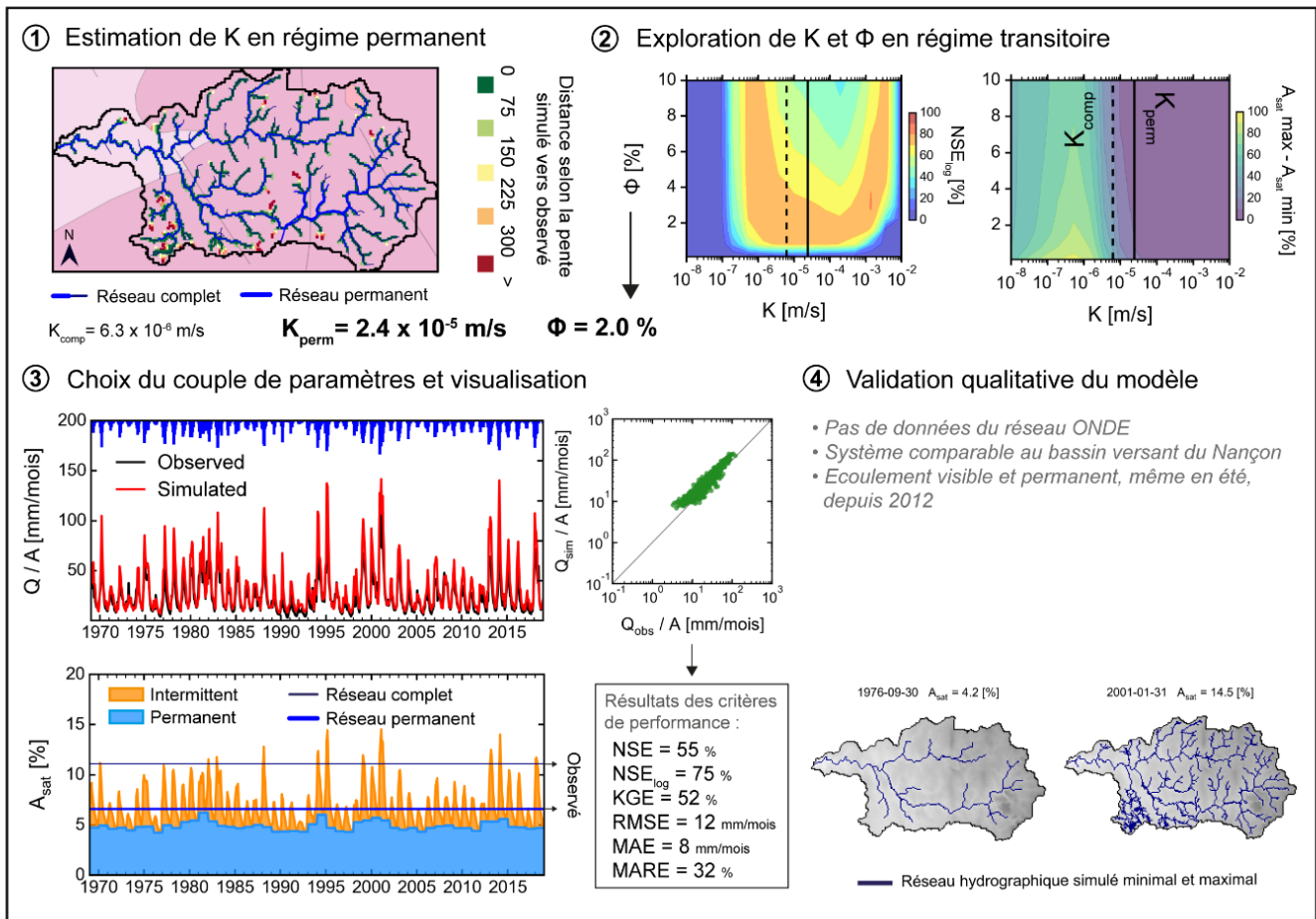


Figure 8. Planche des résultats de la calibration et validation du modèle hydrogéologique du « Moulin ».

Nançon

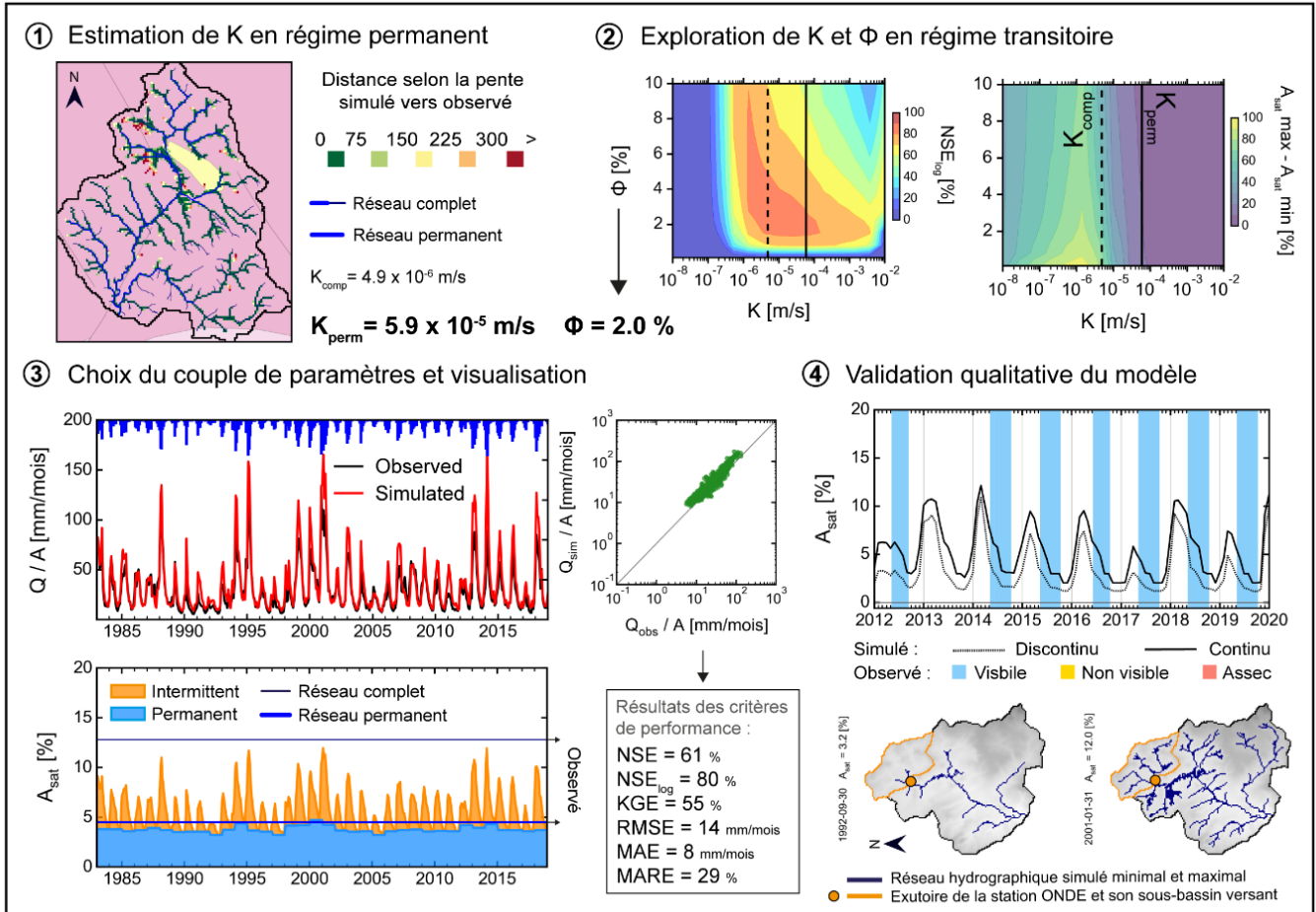


Figure 9. Planche des résultats de la calibration et validation du modèle hydrogéologique du « Nançon ».

Canut

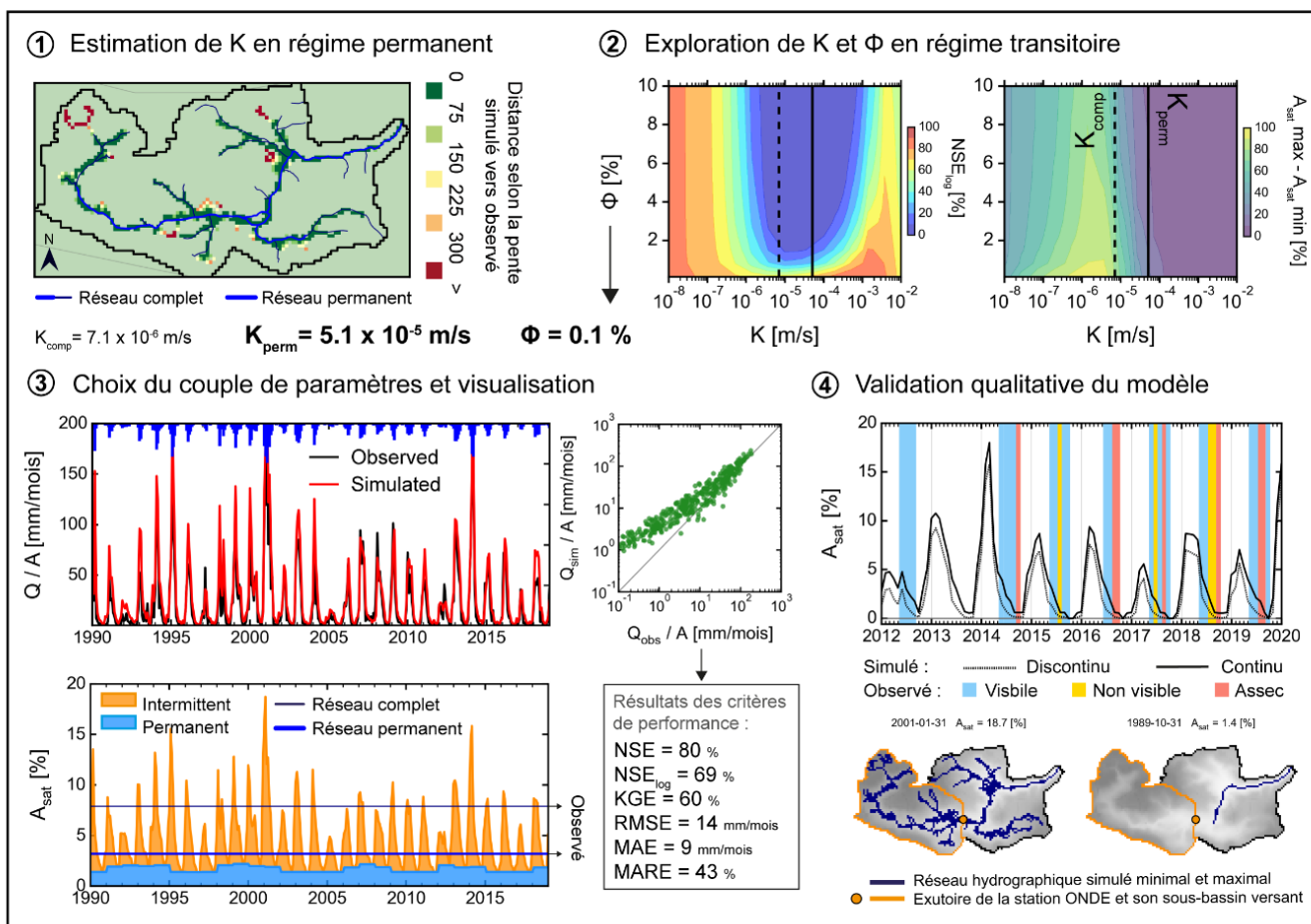


Figure 10. Planche des résultats de la calibration et validation du modèle hydrogéologique du « Canut ».

Chèze

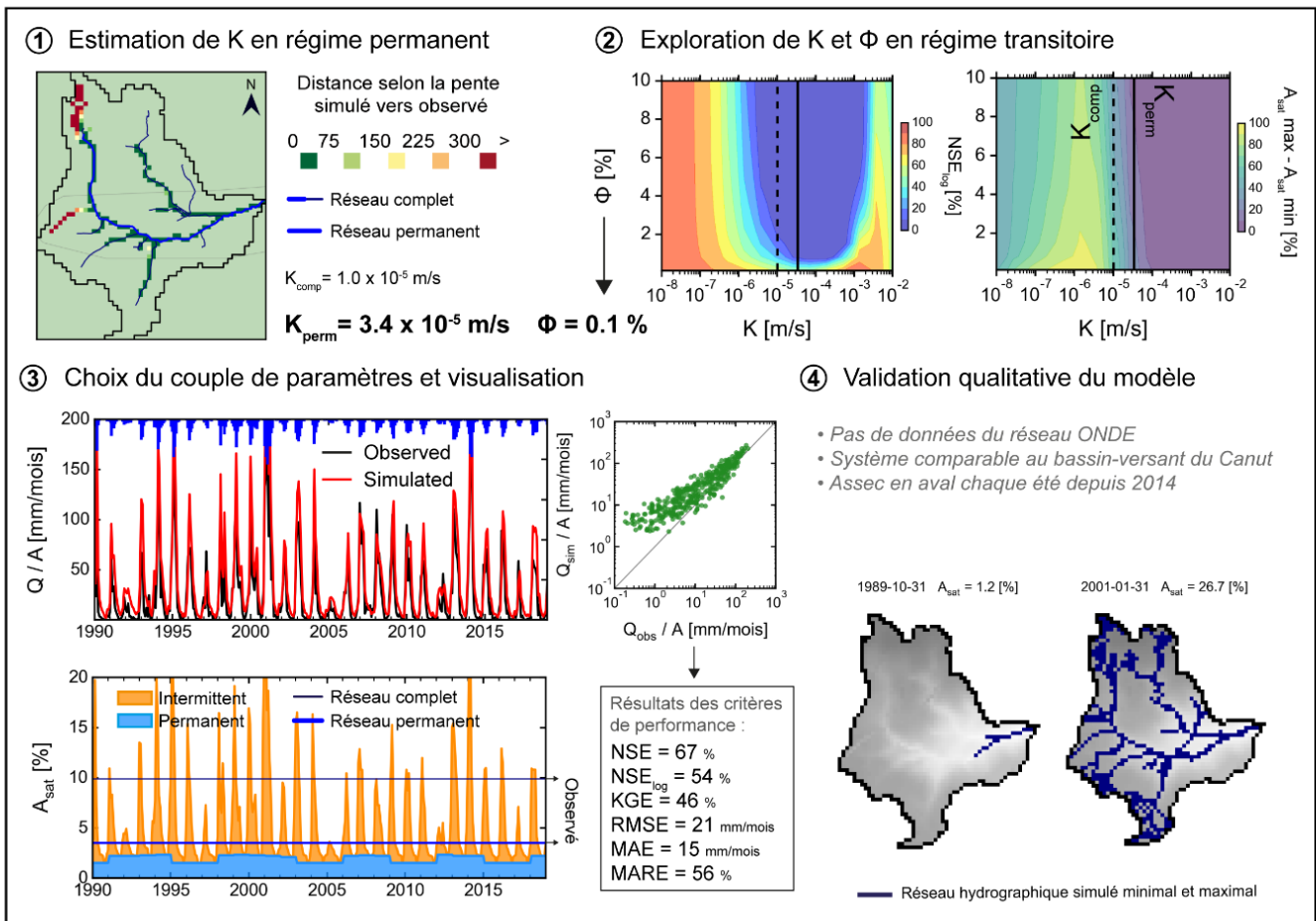


Figure 11. Planche des résultats de la calibration et validation du modèle hydrogéologique de la « Chèze ».

Sur la base des sous-bassins versants calibrés à partir des données observées, il est possible d'extrapoler nos résultats de calibration aux bassins-versants plus larges ; en amont des captages destinés à l'alimentation en eau potable (Figure 1 et 2). Les propriétés hydrauliques obtenues pour les sous-bassins calés sont extrapolées selon la lithologie dominante retrouvée (Tableau 2). Le Tableau 2 récapitule les paramètres appliqués aux 6 modèles de bassins-versants d'intérêt majeur.

Tableau 2. Caractéristiques des 6 bassins d'alimentation en eau potable et paramétrisation des modèles.

Bassin versant	Superficie km ²	Lithologie dominante	Proportion superficie [%]	K [m/s]	θ [-]	Station hydrométrique	Facteur normalisation	Recharge [mm/an]	Ruissellement [mm/na]
Chèze	10	• Grès Armoricaïn	100	3,4 x 10 ⁻⁵	0,1	J736422001	1,0	238	70
Canut	25	• Grès Armoricaïn	100	5,1 x 10 ⁻⁵	0,1	J751301001	0,9	204	63
Drains	58	• Pluton granitique	100	2,4 x 10 ⁻⁵	2	J014401001	1,0	229	78
Couesnon	373	• Schiste Briovérien • Pluton granitique	60 40	5,0 x 10 ⁻⁵	1,0	J001401001	1,0	236	82
Rophémel	373	• Schiste Briovérien • Pluton granitique	80 20	2,5 x 10 ⁻⁵	0,3	J061161001 J062661001	1,0	202	73
Mordelles	600	• Schiste Briovérien • Grès Armoricaïn	70 30	6,2 x 10 ⁻⁵	0,2	J731301001 J735301001	0,8	160	56

3 Validation des modèles pour les 6 bassins d'alimentation en eau potable

La Figure 12 permet de valider la paramétrisation des 6 modèles de bassin-versant ciblés. Ces simulations réalisées à partir de données historiques (1975 à 2019) permettent de valider si les modèles représentent correctement le débit de cours d'eau, l'amplitude du niveau de la nappe et la dynamique du réseau hydrographique dans l'espace et le temps (Figure 12).

Au vu de la cohérence des résultats obtenus, on peut considérer que les modèles sont bien calés et que l'exercice d'extrapolation réalisé est validé.

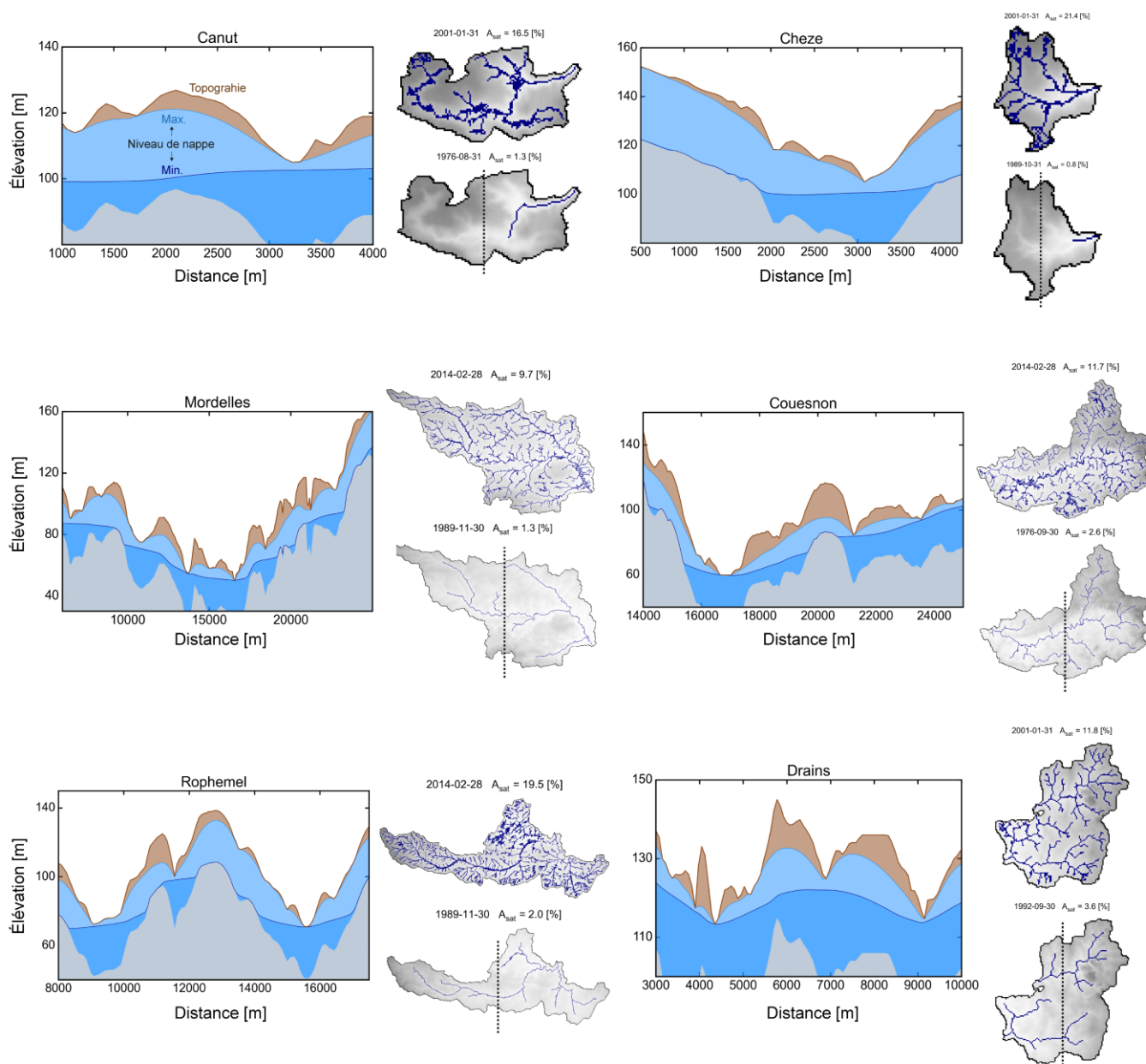
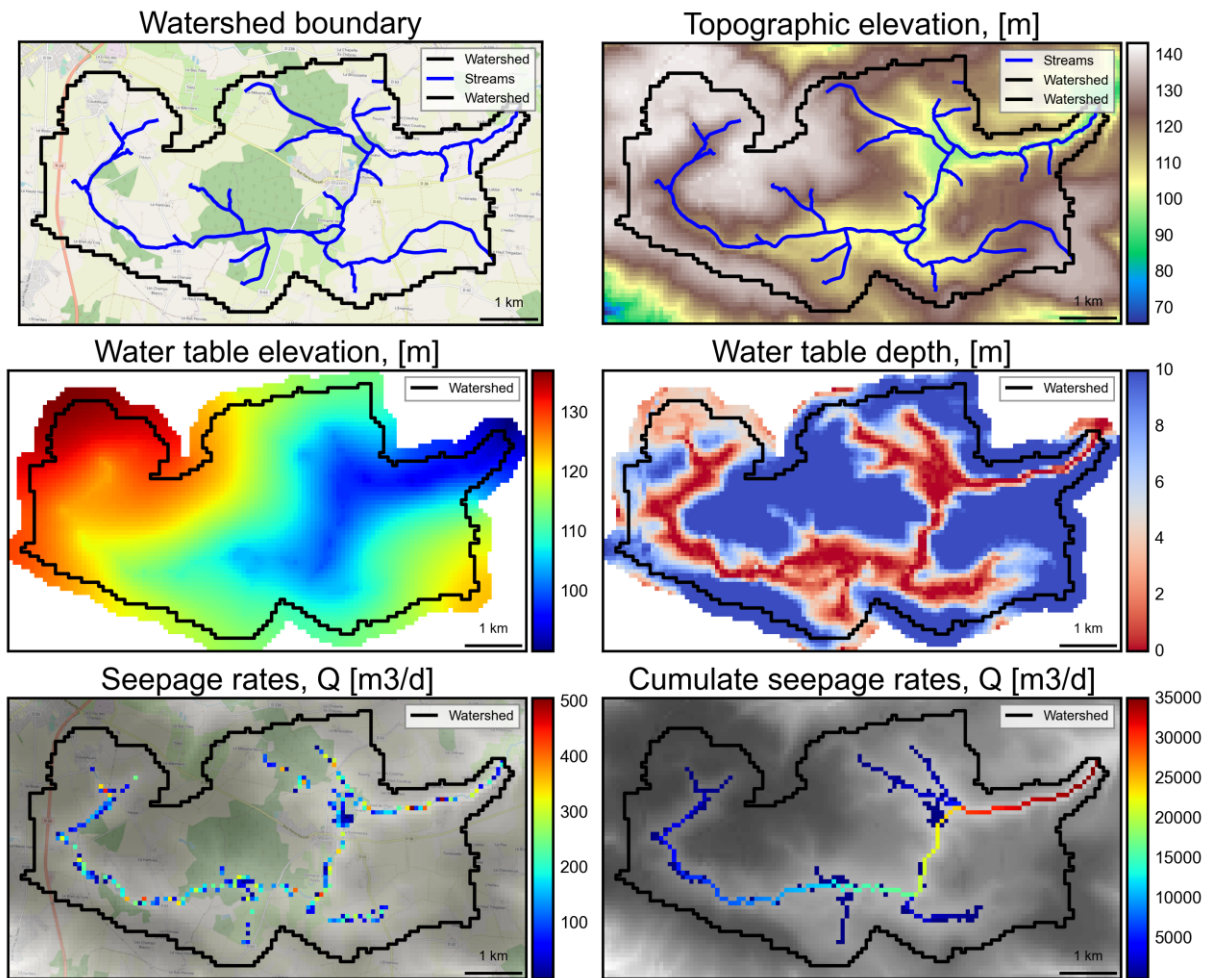


Figure 12. Vue transversale du niveau de nappe minimal et maximal simulé entre 1975 et 2020 pour chacun des 6 bassins, avec les cartographies du réseau hydrographique associées. A_{sat} [%] représente la proportion d'aire saturée à l'échelle du bassin versant (densité de drainage ou densité de cours d'eau).

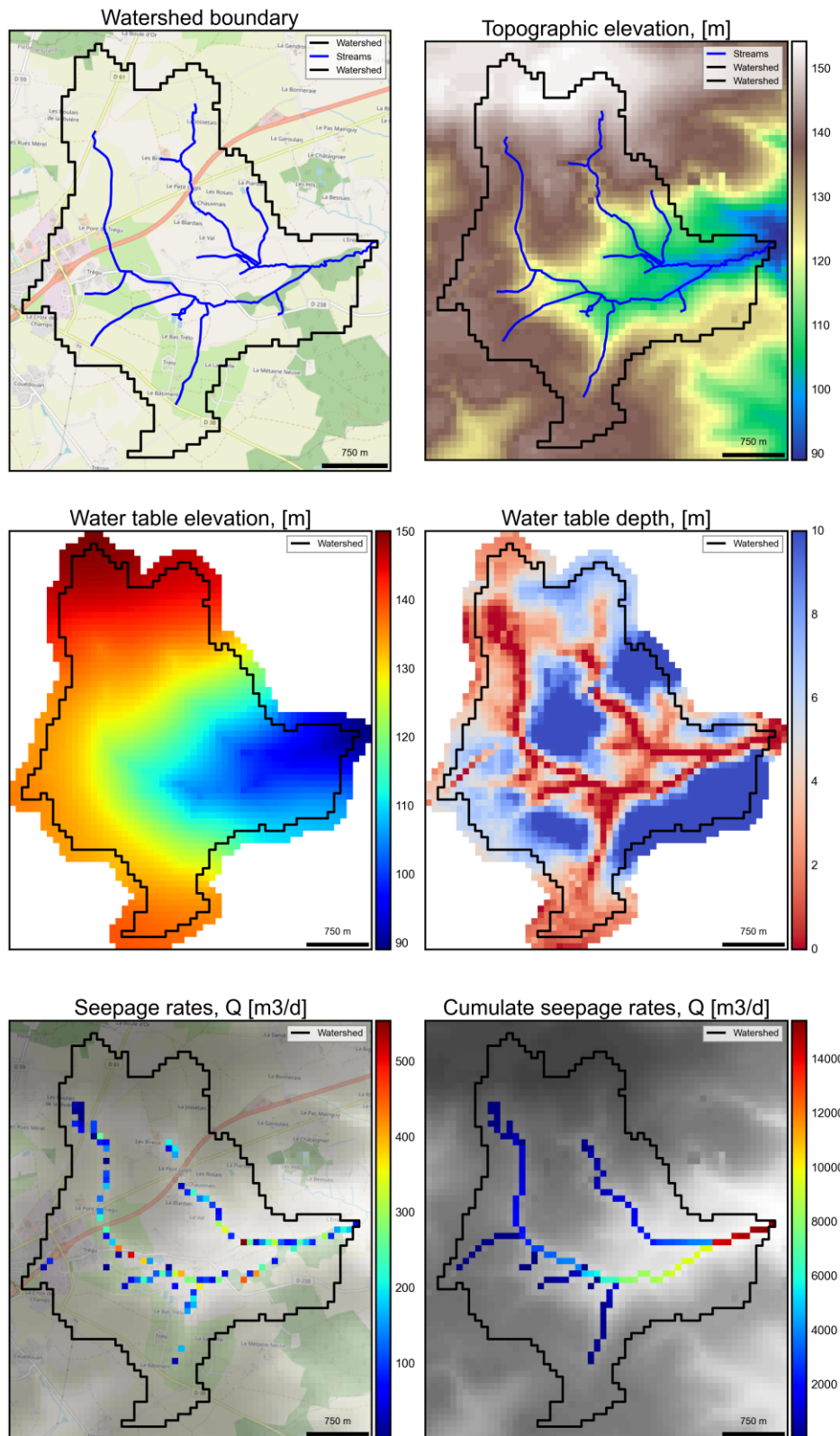
D'autres résultats de simulation en régime permanent sont disponibles en annexe de ce document pour ces 6 bassins.

4 Annexes

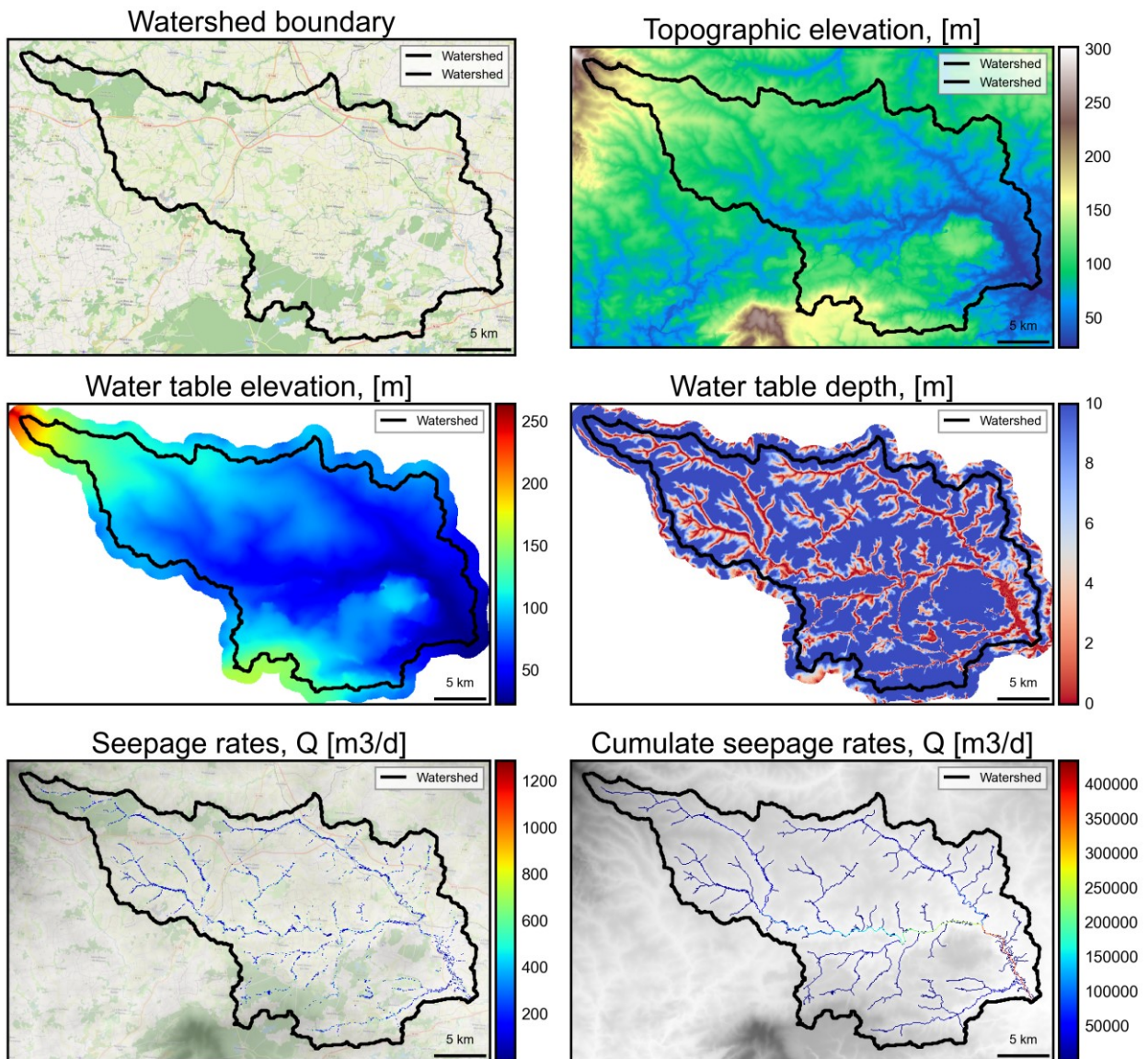
Canut



Chèze

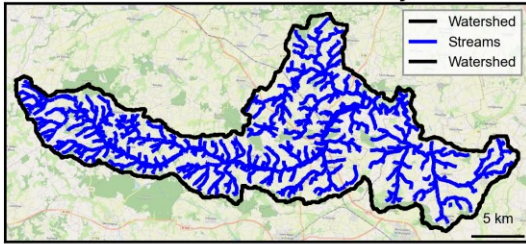


Meu

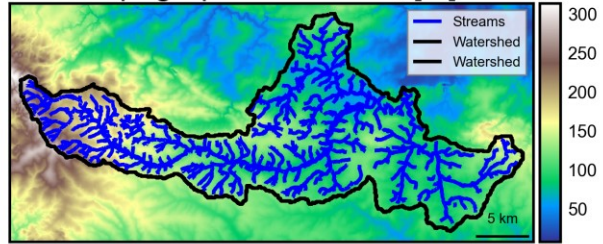


Haute-Rance

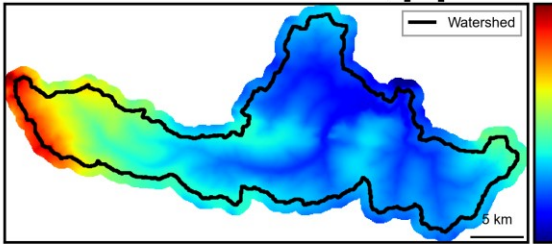
Watershed boundary



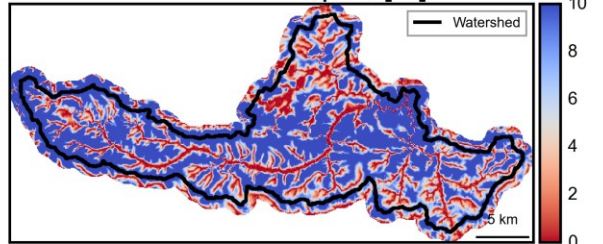
Topographic elevation, [m]



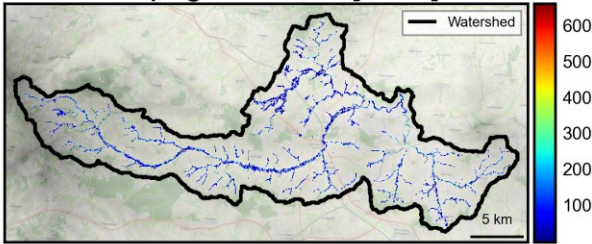
Water table elevation, [m]



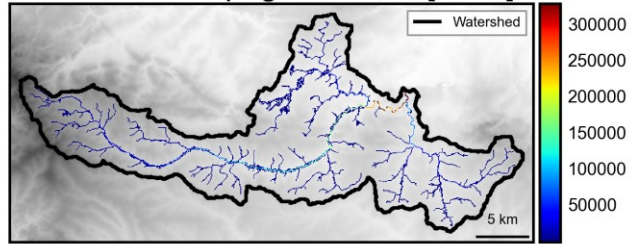
Water table depth, [m]



Seepage rates, Q [m³/d]

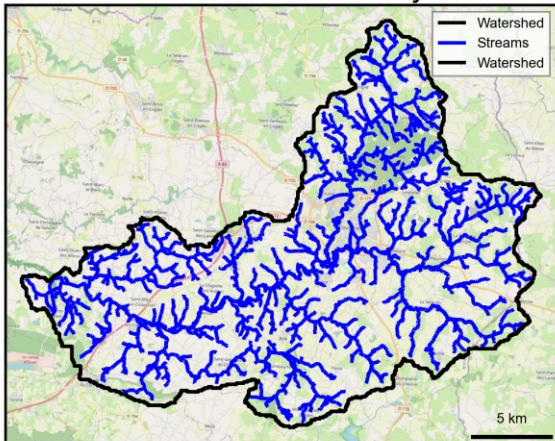


Cumulate seepage rates, Q [m³/d]

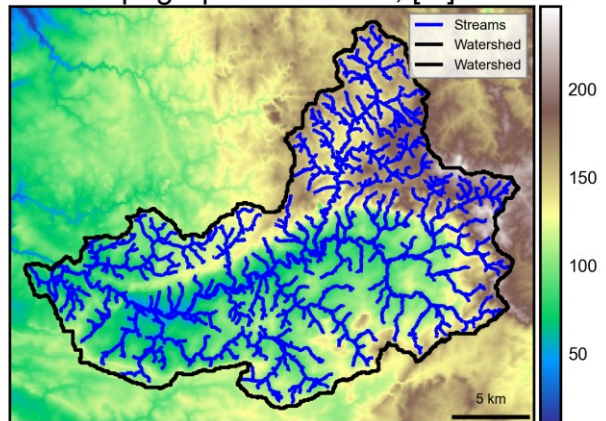


Couesnon

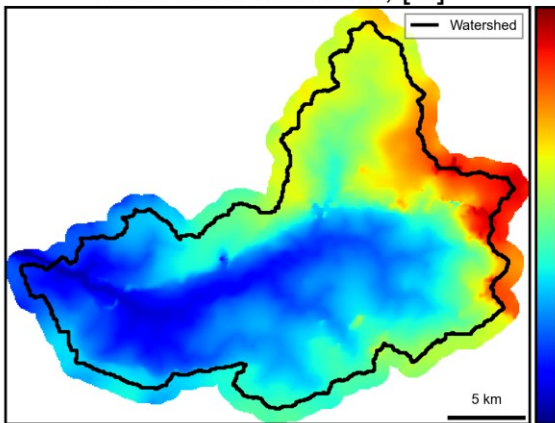
Watershed boundary



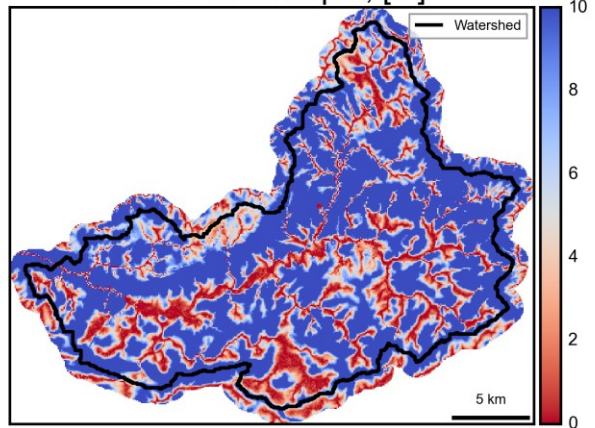
Topographic elevation, [m]



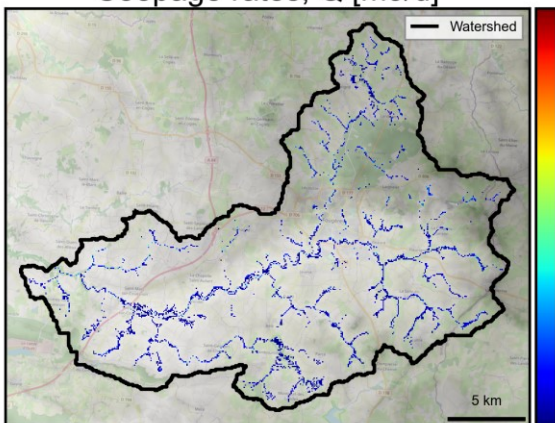
Water table elevation, [m]



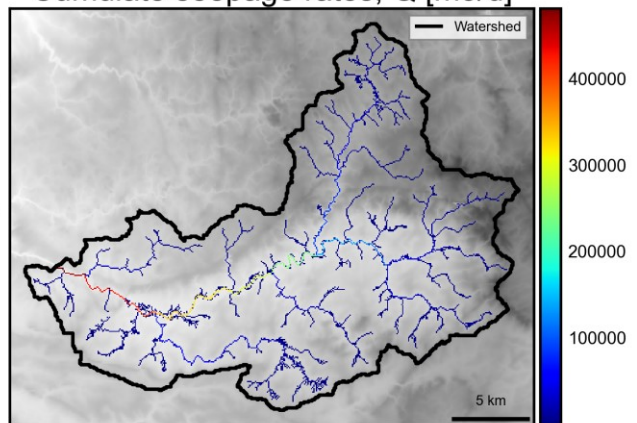
Water table depth, [m]



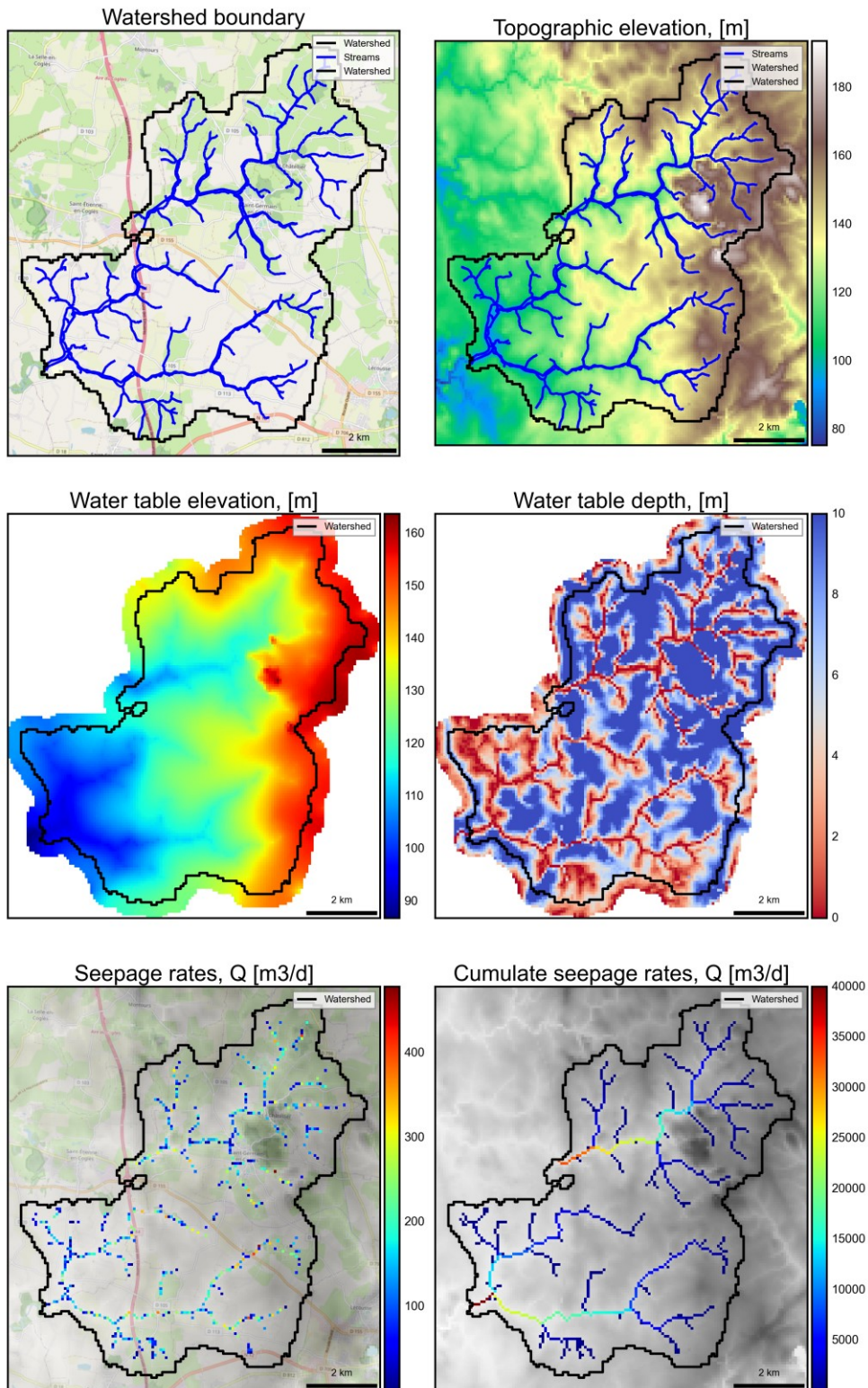
Seepage rates, Q [m³/d]



Cumulate seepage rates, Q [m³/d]



Drains



5 Références

Abhervé, R., (2022). Intégration du changement climatique dans la gestion de la ressource en eau : exemple du bassin rennais. Thèse Université de Rennes 1. Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR), Géosciences Rennes. Eau du Bassin Rennais, Rennes Métropole. Chaire Fondation Rennes 1 "Eaux et Territoires".

Lien vers le manuscrit de thèse :

<https://www.theses.fr/2022REN1B067>

Lien vers d'autres document en lien avec la thèse et la Chaire Eaux et Territoires :

<https://www.creseb.fr/integration-du-changement-climatique-dans-la-gestion-de-la-ressource-en-eau-bassin-rennais/>

Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., & Rousset-Regimbeau, F. (2020). The Latest Improvements in SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou Hydrometeorological Model over France. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1–32. <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-31>