

Actualisation de l'application CaWaQS-Seine : Extension du système aquifère à la frange orientale du bassin et calibration de son comportement hydrodynamique

Nicolas Gallois^{1,*}, Nicolas Flipo¹, Jonathan Schuite^{2,1}

¹ Centre de Géosciences, ARMINES/MINES ParisTech, Université PSL

² TerraScience

* nicolas.gallois@minesparistech.psl.eu

Résumé

L'application hydrologique et hydrogéologique CaWaQS-Seine, développée par le Centre de Géosciences MINES ParisTech modélise le comportement dynamique intégré de l'hydrosystème régional. Outre le fait d'avoir amélioré sa capacité à reproduire le comportement rétrospectif du bassin (piézométrie, débits) (Flipo et al., 2021), le récent couplage de son module de surface avec les outils de la méthode HYMIT, également conçus et développés au Centre (Schuite et al., 2019) a permis une caractérisation précise, distribuée et quantifiée des principales composantes du bilan hydrique à l'échelle du bassin (i.e. estimation de l'ETR, fractionnement de la pluie efficace, quantification de la recharge aquifère), régissant la manière dont les flux d'eau y transitent (Flipo et al., 2020). Ainsi re-paramétré, le modèle a été mobilisé dans l'optique de tester la sensibilité des différents territoires du bassin à des modifications de la variabilité des signaux climatiques (Fossa et al., 2020). Dans l'objectif d'appliquer ces tests à l'ensemble des formations aquifères du bassin, ce cadre de travail a été l'occasion de réviser la géométrie de l'application (Labarthe, 2016) afin, entre autres, d'y intégrer, pour la première fois, une représentation explicite des unités aquifères du Crétacé inférieur et du Jurassique, manquantes jusqu'alors. Outre ces améliorations géométriques, la dynamique de cette extension du système aquifère ainsi intégrée (environ 29 000 km² supplémentaires à l'affleurement), a fait l'objet d'une calibration dont les performances obtenues, tant du point de la reproduction des niveaux et dynamiques piézométriques que des débits sont très satisfaisantes. La nouvelle calibration d'ensemble de cette application sur le bassin, ainsi que son extension a permis d'établir un nouveau bilan de flux identifiant les traits caractéristiques majeurs du fonctionnement hydrodynamique du bassin.

Points clés

- ✓ Représentation exhaustive, avec l'application CaWaQS-Seine, du système aquifère du bassin de la Seine, du Jurassique inférieur aux formations alluviales.
- ✓ Restitution calibrée de la dynamique souterraine observée très satisfaisante (biais moyen absolu inférieurs à 1,50 m pour 22 des 24 piézomètres, KGE > 0,5 pour 49 des 67 stations hydrométriques).
- ✓ Élaboration d'un bilan de flux actualisé, à l'échelle de l'hydrosystème entier.

Abstract

The hydrological and hydrogeological CaWaQS-Seine application, developed at MINES ParisTech Geosciences Center, models the integrated dynamic behavior of the regional hydrosystem. The recent coupling of its surface module with the HYMIT methodology and calibration tools (also designed and developed at Geosciences Center) (Schuite et al., 2019), led to an unprecedented, finely quantified and distributed characterization of the surface water balance main components (AET estimation, effective rainfall fractionation, aquifer recharge), which greatly dictates the way water flows within the basin (Flipo et al., 2020). In addition to having improved its ability to reproduce the retrospective behavior of the hydrosystem (water table, river discharges) (Flipo et al., 2021), the newly re-parameterized application has been mobilized to test the sensitivity of more local areas of the basin to changes in the variability of climate signals (Fossa et al., 2020). In order to deploy these tests at the entire basin aquifer system scale, this framework led to a significant upgrade regarding the geometry (Labarthe, 2016) used to describe the underground compartments within the application. Therefore, the latter has been extended, now integrating, for the first time ever, an explicit representation of Lower Cretaceous and Jurassic aquifer units, mostly outcropping on the Eastern end of the Seine basin. Besides these geometrical improvements, the aquifer hydrodynamic behavior of the newly covered area (around 29 000 km^2 in size) has been calibrated. Highly satisfactory performances have been obtained, regarding both water table and rivers discharges levels and dynamics. This newly revamped and recalibrated version of the CaWaQS application helped establishing a revised water flow balance of the entire system, outlining the major characteristics of the hydrodynamic functioning of the basin.

Key points

- A revamped version of the CaWaQS-Seine application now describes every outcropping aquifer units of the basin, dating from lower Jurassic to Quaternary.
- The hydrodynamic behavior of the new underground extension has been calibrated (mean absolute biases < 1.50 m for 22 out of 24 piezometers, KGE > 0.5 for 49 out of 67 gauging stations),
- An updated version of the entire hydrosystem water flow balance is proposed.

Introduction

L'application hydrologique et hydrogéologique CaWaQS-Seine, développée par le Centre de Géosciences MINES ParisTech (Labarthe, 2016; Flipo et al., 2020, 2021) permet de caractériser et de reproduire le comportement de l'hydrosystème régional, par simulation couplée des écoulements au sein des différents compartiments qui le compose (*i.e.* surface, réseau hydrographique, zone non saturée et système aquifère).

Les performances de cette application ont été récemment améliorées dans le cadre du projet de recherche *AquiVar* (Flipo et al., 2021), notamment grâce au développement d'une nouvelle méthodologie de calibration emboîtée qui s'appuie sur la mise en œuvre de la méthodologie HYMIT (*HYdrological MINimalist Transfer function* - Schuite et al. (2019)). Fondée sur l'étude des transformations des signaux de précipitations et de débits mesurés sur le bassin par HYMIT, la mise en œuvre de cette nouvelle méthodologie de calibration a abouti à une caractérisation distribuée et quantifiée d'indicateurs hydrologiques fondamentaux tels que le fractionnement de la pluie en évapotranspiration réelle, d'une part, et, d'autre part, en lames d'eau soumises aux écoulements lents (infiltration vers les aquifères) et rapides (ruissellement vers le réseau hydrographique). S'appuyant sur des procédures d'optimisation de type MCMC (*Monte Carlo Markov Chain*), elle a permis de déterminer des jeux de paramètres CaWaQS utilisés pour la simulation du bilan de surface. Le calcul de ce bilan de surface détermine ainsi la recharge des nappes, capitale pour le paramétrage de l'hydrodynamisme du système aquifère. Une révision, conditionnelle aux nouvelles estimations de recharge, des paramètres régissant l'hydrodynamisme des formations d'âges Crétacé supérieur, Tertiaire et Quaternaire a abouti à une reproduction satisfaisante des niveaux et dynamiques piézométriques ainsi que des évolutions des débits au sein du réseau hydrographique principal modélisé (Flipo et al., 2021). Cette application a ainsi servi de support aux travaux de l'UMR M2C (Université de Rouen) afin de tester la sensibilité des différents territoires du bassin à des modifications de la variabilité des signaux climatiques (Fossa et al., 2020).

L'application CaWaQS-Seine utilisée n'intégrait alors, dans son mode de description du système souterrain, que les unités aquifères majeures d'âge post-Cénomaniens¹ (Crétacé supérieur). Avec pour objectif d'élargir l'analyse des réponses du système à ces modifications climatiques à l'intégralité du bassin, il a été jugé pertinent de réviser la géométrie de l'application et d'y intégrer une représentation des unités aquifères du Crétacé inférieur et du Jurassique. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche *AquiVar*².

Le présent rapport synthétise les révisions et améliorations majeures apportées à l'application CaWaQS-Seine initiale pour y inclure une représentation des formations aquifères anté-Cénomaniennes du bassin. Après un récapitulatif de la nouvelle structure ainsi obtenue, les performances de restitution de la piézométrie comme des débits mesurés sur le nouveau secteur modélisé seront présentées. Cette nouvelle calibration a, en complément, donné lieu à l'élaboration d'un bilan actualisé des flux d'eau en transit au sein de l'hydrosystème, permettant de mettre en exergue les principales caractéristiques du fonctionnement hydrodynamique du bassin.

1 Révision de l'application CaWaQS-Seine : Extension du système aquifère à la frange orientale du bassin

1.1 Structure initiale de l'application CaWaQS-Seine

La figure 1 illustre la représentation désormais traditionnellement employée pour décrire le système aquifère au sein de l'application CaWaQS-Seine (Labarthe, 2016). Sept horizons distincts y sont intégrés, en communications hydrauliques ; représentant respectivement, d'âge le plus récent au plus ancien :

- une couche associée aux formations alluviales sablo-graveleuses d'âge quaternaire,
- un horizon représentatif du système complexe des formations calcaires d'âges Miocène et Oligocène

1. *i.e.* Ensembles aquifères complexes du Tertiaire, aquifère régional de la Craie et systèmes alluviaux associés.

2. *AquiVar* et *AquiVar*⁺ sont, tous deux, soutenus par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

(système complexe de la nappe de Beauce),

- les formations de Brie, regroupant les horizons de calcaires lacustres (Calcaires de Brie) et de sables oligocènes (Sables de Fontainebleau),
- la couche des formations de Champigny, englobant les formations calcaires du Bartonien et du Ludien,
- un horizon d'âge Eocène moyen, associé aux formations calcaires grossières du Lutétien et des sables du Cuisien,
- l'horizon du Paléocène, traduisant des formations sableuses de Bracheux (étage du Thanétien),
- une couche associée à l'aquifère régional de la Craie (formations crayeuses du Crétacé supérieur).

Outre ces géométries, l'application intègre un compartiment représentatif de la zone non saturée, selon des limites restreintes à l'extension de la zone aquifère modélisée (donc assimilable aux bordures de l'aquifère de la Craie). En surface, l'application initiale englobe l'extension aquifère totale ainsi que l'extension du bassin topographique de la Seine, tel qu'illustré sur la figure 1.

La géométrie employée pour décrire le réseau hydrographique du bassin est fondée sur celle fournie par la base de données SYRAH-CE (*Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau*) (Valette and Cunillera, 2010), laquelle intègre l'ensemble du chevelu du bassin, soit un linéaire total de 28 378 km. D'une manière générale, le modèle prévoit la possibilité de ne coupler qu'une certaine portion du réseau au système aquifère, portion le long de laquelle seront calculés des échanges nappe-rivière. La version initiale de l'application, compte tenu de la géométrie souterraine précédemment évoquée, couple un linéaire total de rivière de 4 517 km avec les unités aquifères de subsurface. Ces portions de réseau sont matérialisées en bleu foncé sur la figure 1.

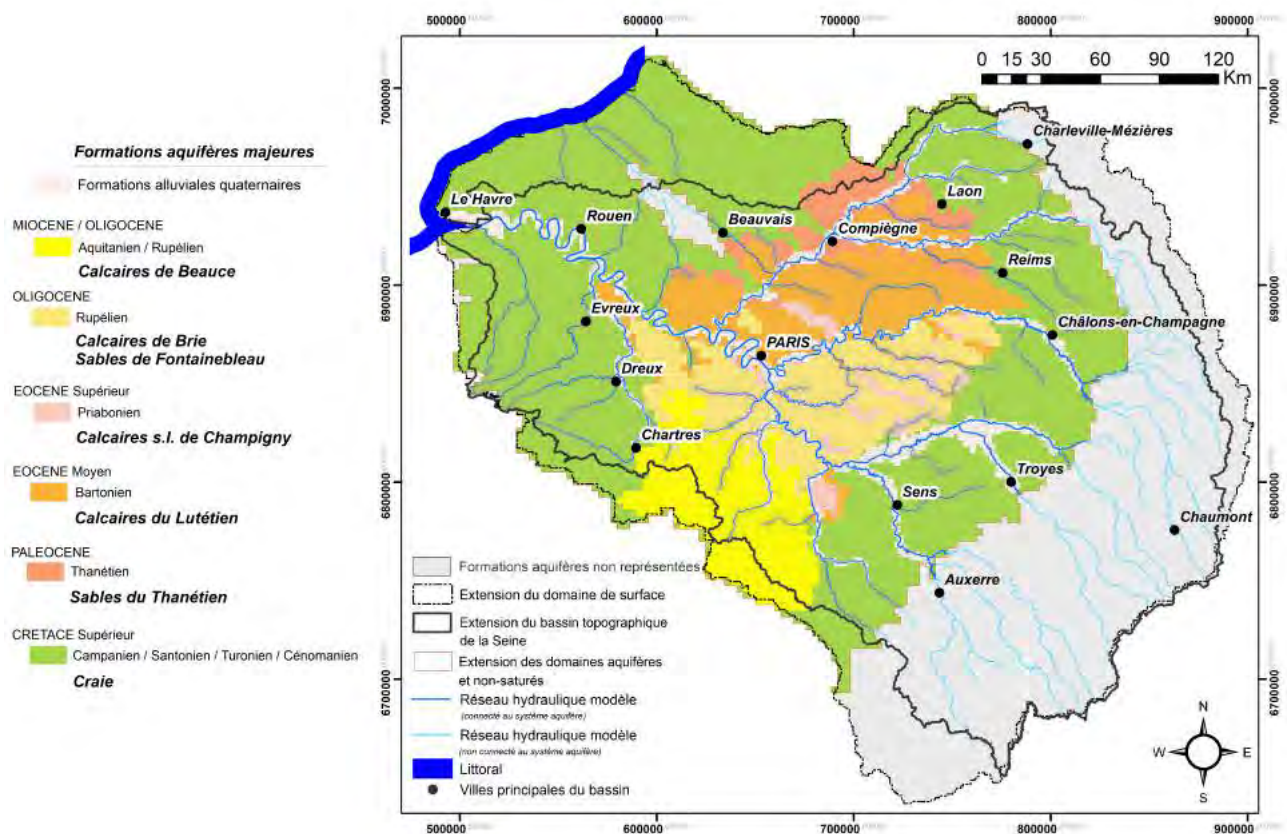


Figure 1. Extensions et principaux niveaux de descriptions géométriques des modules constituant la version initiale de l'application CaWaQS-Seine (Labarthe, 2016; Flipo et al., 2020).

1.2 Série lithologique et géométrie de l'extension du domaine souterrain : Intégration des niveaux du Jurassique et du Crétacé inférieur

Schématiquement, la géologie de bassin de Paris peut s'apparenter à une structure en “*cuvette*” dont le point le plus bas se situe à l'aplomb de la région de Brie³. Elle est constituée de différentes couches géologiques empilées de manière assez régulière. Cet empilement se traduit par une série d'affleurements concentriques, agencement particulièrement visible au niveau de la bordure orientale du bassin de la Seine. Cette bordure est, dans les limites du bassin topographique, principalement constituée d'horizons affleurants plus ou moins perméables, couvrant des âges du Jurassique inférieur (Lias - étage de l'Hettangien, -195 Ma) au Crétacé inférieur (étage de l'Albien, -100 Ma). Dans ces limites de temps et d'espace, sept grands ensembles aquifères peuvent être considérés, entre lesquels s'intercalent différents horizons semi-perméables (ou aquitards). L'ordre stratigraphique associé à ces horizons est illustré par le tableau 1.

C'est précisément cet enchaînement de treize lithologies qui a été récemment intégré à la nouvelle version de l'application CaWaQS-Seine (cf. Fig. 2). Les extensions respectives de chacun de ces horizons ont initialement été déterminées à partir de l'examen de (i) la carte hydrogéologique du Bassin de Paris (Albinet, 1967), (ii) des cartes géologiques au 1/320 000^{ème} et au 1/50 000^{ème} et (iii) de la synthèse géologique du Bassin de Paris (Mégny, 1980). Elles ont été mobilisées dans la construction (i) d'une des premières versions d'un modèle du Bassin de Paris (Viennot and Ledoux, 2003) et (ii) de cette nouvelle application. Par ailleurs, la carte du toit des formations du Keuper (Trias), matérialisant la base de la géométrie que l'on se propose d'intégrer ici, ainsi qu'une série de cartes illustrant les puissances des principales formations, ont été extraites de Mégny (1980).

Tableau 1. Série lithologique associée au domaine datant du Jurassique et du Crétacé inférieur.

Ère	Série	Formations et étages associés	Type
Crétacé	Crétacé inférieur	Argiles du Gault	Aquitard
		Sables de l'Albien	Aquifère
		Argiles de l'Aptien	Aquitard
		Néocomien (Aptien inf., Barrémien et Hautérivien)	Aquifère
Jurassique	Malm	Calcaires du Tithonien	Aquifère
		Marnes et Calcaires marneux du Kimméridgien	Aquitard
		Calcaires de l'Oxfordien	Aquifère
	Dogger	Argiles du Callovo-Oxfordien	Aquitard
		Calcaires du Bathonien	Aquifère
		Marnes du Bajocien supérieur	Aquitard
		Calcaires du Bajocien	Aquifère
	Lias	Argiles du Lias (Toarcien et Pliensbachien)	Aquitard
		Calcaires de l'Hettangien	Aquifère

Les données et informations recueillies, *in fine*, synthétisées sous formes de cotes de toits et de murs (et donc d'épaisseurs), pour chacun de ces horizons, décrivent ainsi les évolutions de ces formations dans les trois principales directions de l'espace. Ces données ont été rassemblées en vue de leur transposition sur un nouveau maillage souterrain CaWaQS, support de cette nouvelle extension du système aquifère. L'introduction d'un maillage multi-couche supplémentaire discrétisant individuellement chaque horizon constitutif de cette extension (13 en l'occurrence) aurait pour conséquence, d'une part, d'augmenter fortement le nombre total de mailles de l'application (ainsi que son temps de calcul *a fortiori*), et, d'autre part, de réduire très significativement la maniabilité générale de l'outil. Par ailleurs, compte tenu de la finalité ici ciblée par l'application, l'intérêt de multiples rajouts d'horizons profonds apparaît vite très limité, là où aucun ouvrage de mesure n'est disponible.

3. À une profondeur maximale d'environ -2 700 m (cf. Fig. 2b)

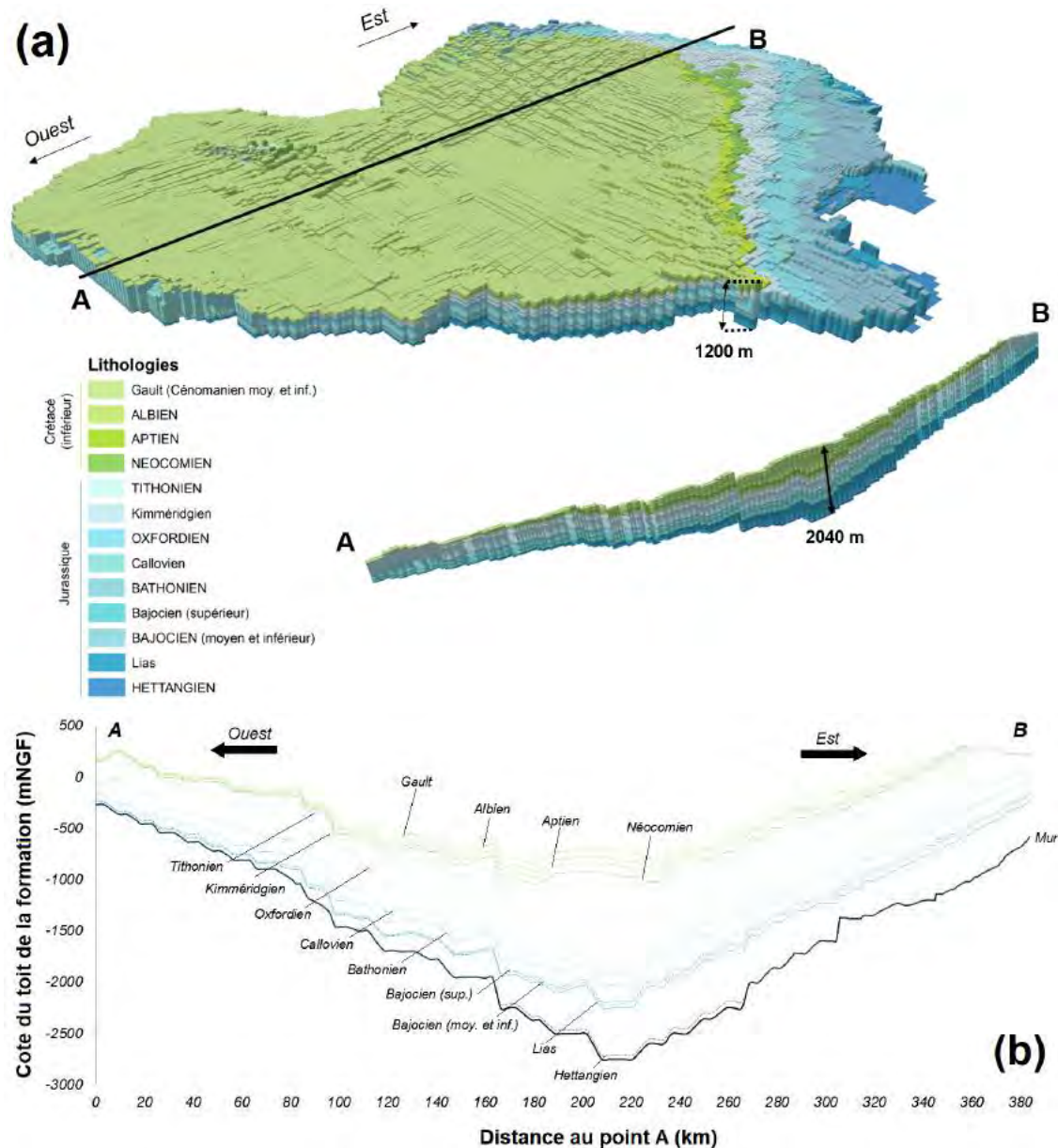


Figure 2. (a) Représentation 3D de la géométrie représentative de l'extension du Jurassique et Crétacé inférieur, intégrée à la nouvelle version de l'application CaWaQS-Seine. Les horizons aquifères sont listés en majuscules, les aquitards en minuscules. (b) Coupe Ouest-Est, orientée selon le trait [AB]. Le code couleur est homogène aux deux illustrations.

Dans ce contexte, une nouvelle fonctionnalité récemment développée au sein du modèle a été exploitée, permettant de tenir compte d'une stratification verticale intra-maille des paramètres descriptifs d'un aquifère (Maillot, 2019). En d'autres termes, l'extension ici ajoutée, prise dans son ensemble, est supportée, au sens du modèle CaWaQS, par une unique couche maillée. Chaque maille de cette couche intègre, dans sa description géométrique verticale, un empilement donné de lithologies, variant d'une maille à l'autre, selon la présence ou non de chacune de ces lithologies. Chaque niveau lithologique est, au sein de chaque maille, caractérisé par des paramètres hydrodynamiques (*i.e.* perméabilités, coefficient de stockage) et de géométrie (épaisseur) propres, afin de traduire des variations locales marquées d'hydrofaciès dans la simulation du comportement du système aquifère.

Une procédure informatique a été développée afin d'intégrer l'ensemble des informations géométriques

descriptives de ces lithologies (cotes de toit, murs, épaisseurs) sur un maillage à mailles carrées emboîtées (dit “gigogne”). Principalement par souci de cohérence avec les couches pré-existantes dans l’application, le support choisi est construit selon une grille initialement homogène, de mailles de 3 200 m de côté, progressivement raffinées selon l’emplacement des linéaires de rivières à connecter au système aquifère (*i.e.* biefs de rivière à ordre de Strahler strictement supérieur à 2). Les mailles les plus fines sont de 100 m de côté, localisées aux amonts du réseau. *In fine*, 34 880 mailles constituent cette grille. La mise en œuvre de la procédure de transposition des données de géométrie a permis d’intégrer, selon ce maillage support, l’ensemble des informations nécessaires au fonctionnement de CaWaQS. Pour chaque maille, ces informations sont de deux types : (i) la cote ($mNGF$) du mur de la formation d’ensemble ajoutée, et (ii) l’épaisseur (m) associée à chaque lithologie. Une visualisation 3D de la géométrie finale, intégrée à l’application CaWaQS-Seine est présentée en figure 2a. Une coupe 2D correspondante, d’orientation Ouest-Est est proposée en illustration 2b.

1.3 Conceptualisations spécifiques employées pour la simulation

Le mode de représentation géométrique ici employé a pour avantage, au sein d’une même couche “modèle”, de pouvoir faire varier les paramètres hydrodynamiques selon le niveau lithologique associé à la charge hydraulique calculée, et ce, à chaque pas de temps. En parallèle de cette représentation, les modélisations réalisées tiennent également compte des caractéristiques de nappe libre, intégrant ainsi les variations de saturation en eau selon celles de la charge hydraulique. En effet, dans une telle configuration, le niveau de saturation varie selon la hauteur piézométrique. La perméabilité diminue avec la diminution de la saturation en eau et le coefficient de stockage est dépendant de la saturation et de la porosité du milieu.

Dans le cas d’une homogénéité lithologique intra-maille, les paramètres hydrodynamiques⁴ sont redéfinis, en tenant compte de la valeur de la charge hydraulique calculée à chaque pas de temps de calcul, et ce, selon les deux ensembles précisés sur la figure 3, dans lesquels T représente la transmissivité ($m^2.s^{-1}$), K est la conductivité hydraulique à saturation (ou “perméabilité”) ($m.s^{-1}$), z_{top} est la cote du toit de la formation (m), t est le temps (s), h est la charge hydraulique (m) de la maille (au pas de temps en cours), σ est la cote du substratum de la formation ($mNGF$) (m) et w_d la porosité cinématique ($-$).

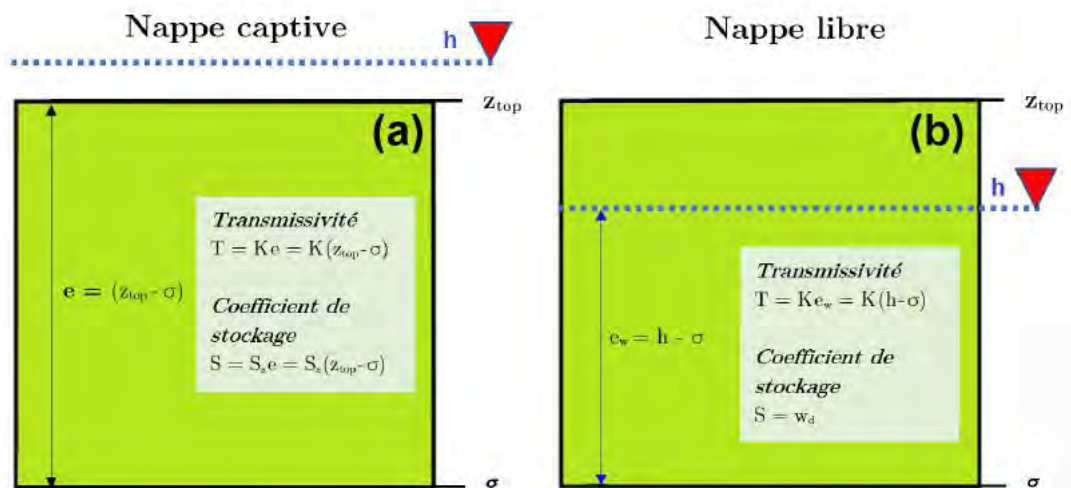


Figure 3. Description du calcul des paramètres hydrodynamiques dans le cas (a) d’une nappe captive et (b) dans le cas d’une nappe libre. Configuration considérant une homogénéité lithologique au sein de la maille.

4. *i.e.* Les paramètres de transmissivité et d’emmaganement, nécessaires à la résolution de l’équation de diffusivité, équation classique de description des écoulements en milieu poreux, résolue par le module souterrain de CaWaQS.

Si l'on considère désormais une hétérogénéité verticale au sein de la maille (cf. Figs. 4a et 4b), tel que c'est le cas ici (et sous hypothèse d'un écoulement principalement horizontal), la transmissivité équivalente de l'ensemble de la série correspond à la somme des transmissivités de chaque lithologie. Dans le cas d'une nappe captive, son expression est simplement donnée par la somme des transmissivités associées à chaque lithologie. Si la charge hydraulique h devient supérieure au niveau du toit de la couche aquifère z_{top} (i.e. passage temporaire de la maille en configuration de nappe captive), la transmissivité équivalente calculée l'est alors en considérant toutes les perméabilités et épaisseurs des lithologies (cf. Fig. 4a). Dans une configuration libre, seules les paramètres des lithologies totalement et partiellement immergées (perméabilités et épaisseurs mouillées) sont considérées dans le calcul (cf. Fig. 4b).

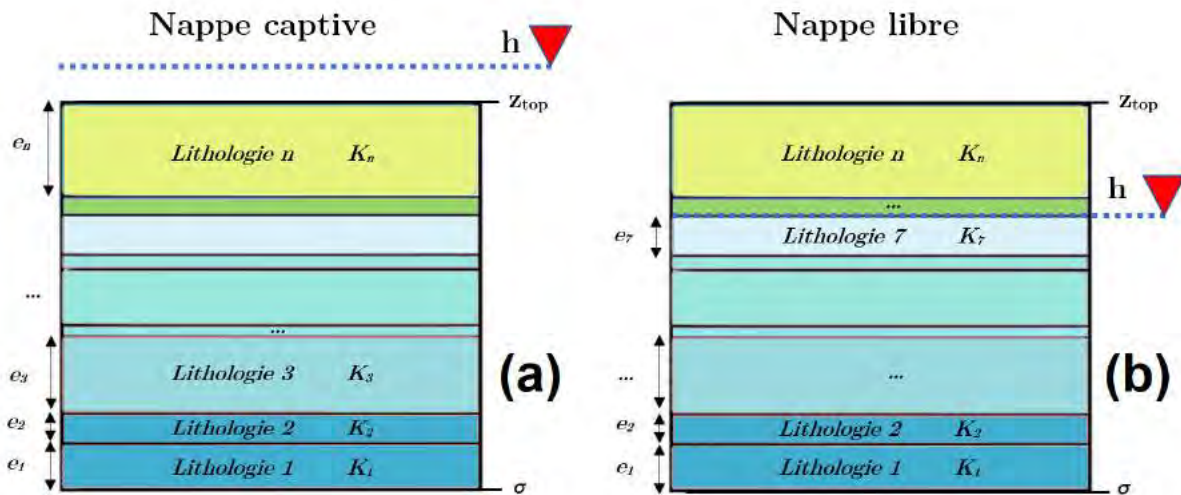


Figure 4. Stratification verticale intra-maille : (a) dans le cas d'une nappe captive et (b) dans le cas d'une nappe libre.

En ce qui concerne le coefficient de stockage, en configuration de nappe libre, la valeur considérée est celle associée au niveau lithologique dans lequel se situe la surface libre de la nappe au pas de temps considéré. A l'inverse, en configuration captive, la valeur du paramètre intégrée au calcul est égale au produit du coefficient d'emménagement de la lithologie affleurante par un facteur multiplicatif, calibré par le modélisateur (de l'ordre de 10^{-2} généralement), de manière à assurer le passage d'un ordre de grandeur de porosité aux valeurs classiques d'emménagement en nappe captive.

1.4 Révision des relations du système aquifère avec les domaines de surface et de subsurface

Dans le cas d'une application couplée telle que celle du bassin de la Seine, laquelle fait interagir plusieurs modules entre eux, des modifications de la géométrie d'un compartiment unique sont, le plus souvent, source d'incohérences au sein du modèle intégré. Ainsi, l'extension de la géométrie aquifère à la frange orientale du bassin a été l'occasion d'étendre :

1. la proportion du réseau hydrographique du bassin, initialement connecté au système aquifère, aux cours d'eau situés en amont du bassin. Cette modification accroît la proportion du réseau le long de laquelle seront calculés les échanges nappe-rivière (cf. Tab. 2),
2. l'extension couverte par le module de zone non saturée, en cohérence avec la nouvelle extension aquifère, afin d'assurer la modulation des flux d'infiltration avant que ceux-ci ne parviennent aux formations aquifères affleurantes du secteur.

Le premier point est illustré par les figures 5a et 5b. La première représente l'ensemble du linéaire du bassin, illustré en bleu foncé, désormais en connexion avec le système souterrain, ainsi que ses relations avec le maillage aquifère des formations à l'affleurement (cf. Fig. 6). 2 300 km de rivières ont été ajoutés suite à cette révision, comprenant les amonts des rivières de l'Aire, l'Aisne, l'Armançon, l'Aube, l'Aujon, la Blaise, la Brenne, la Chée, le Cousin, la Cure, la Marne, l'Oise, l'Ornain, l'Ource, le Rognon, la Saulx, la Seine, le Serein, le Thon, la Voire et l'Yonne (cf. Fig. 5b).

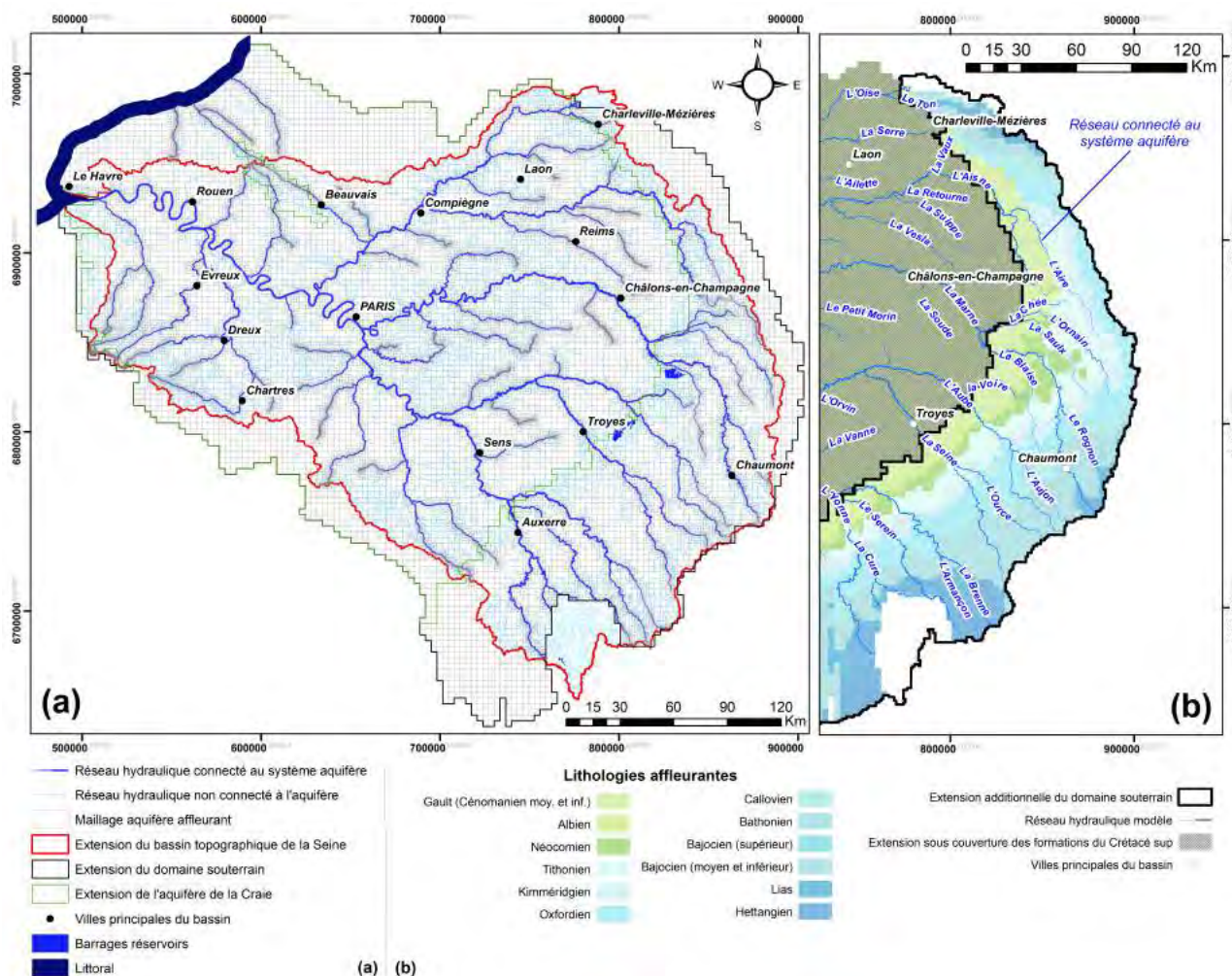


Figure 5. (a) Cartographie des linéaires de rivières en connexion avec la nouvelle description du système aquifère intégrant les lithologies affleurantes de la frange Est du bassin de la Seine. (b) Localisation et noms des rivières associées.

1.5 Vue d'ensemble de la nouvelle version de l'application

La figure 6 illustre une vue d'ensemble de la nouvelle géométrie de l'application CaWaQS-Seine révisée. Une couverture intégrale des aquifères profonds du bassin de la Seine est désormais proposée. A titre de synthèse, le tableau 2 répertorie les principaux chiffres-clés traduisant les principales évolutions géométriques des différents modules constitutifs de l'application.

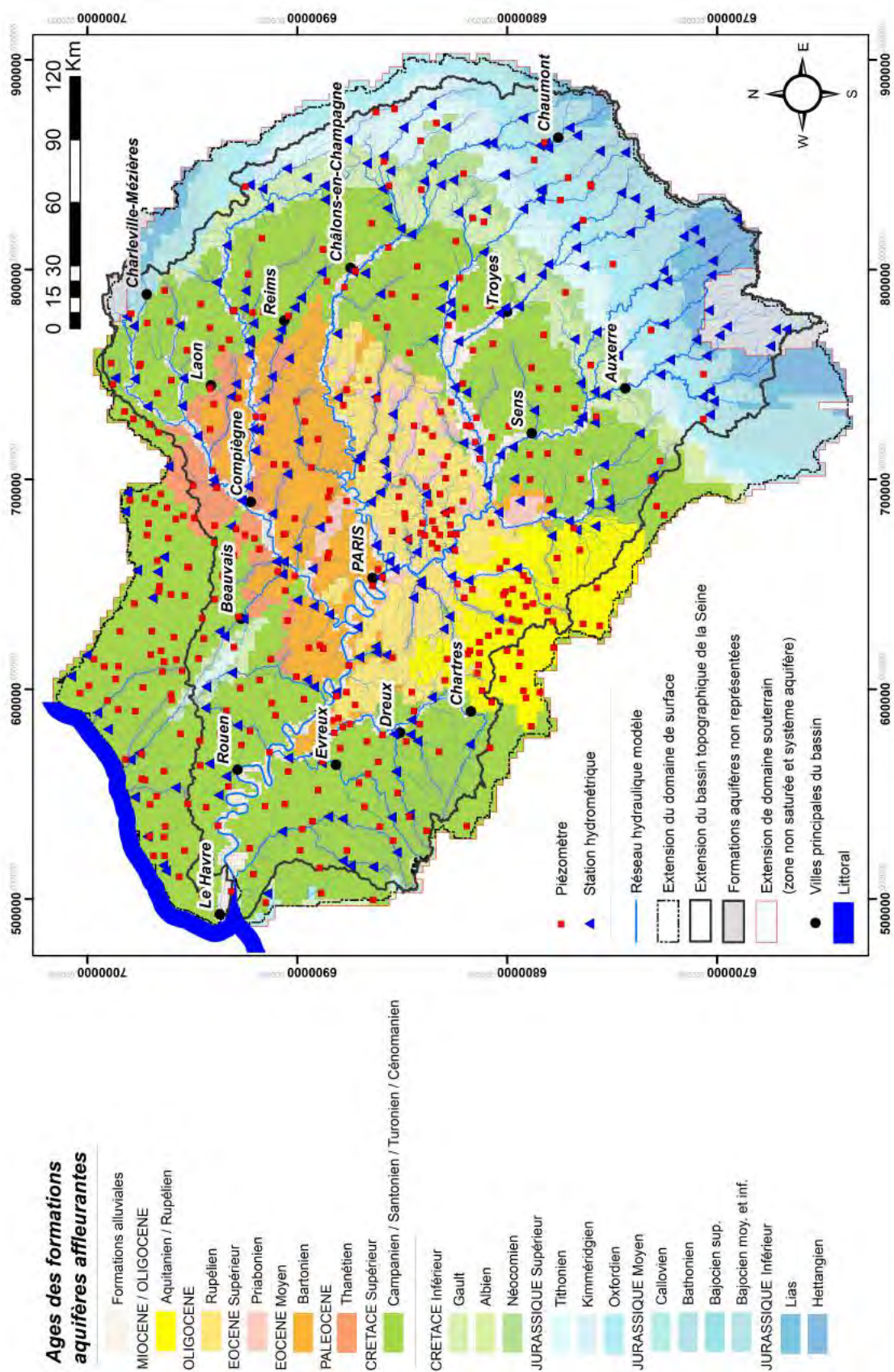


Figure 6. Vue générale de la nouvelle version de l'application CaWaQS-Seine, intégrant une description explicite des niveaux lithologiques du Crétacé inférieur et du Jurassique.

Tableau 2. Chiffres-clés décrivant les principales évolutions géométriques de l'outil numérique CaWaQS-Seine.

Module	Caractéristique géométrique	Version initiale (2016)	Version enrichie (2021)
<i>Domaine de subsurface</i>			
	Surface couverte (km^2)	95 105	
	Nombre de mailles de surface (–)	10 829	
<i>Réseau hydrographique et échanges nappes-rivières</i>			
	Linéaire total (km)	28 378	
	Nombre total de “mailles rivière” (–)	21 832	26 803
	Linéaire connecté au système aquifère (km)	4 517	6 830
	Nombre de “mailles rivière” connectées au système aquifère (–)	15 474	20 937
<i>Zone non saturée</i>			
	Surface couverte (km^2)	67 578	96 205
	Nombre de mailles de zone non saturée (–)	24 559	68 087
<i>Système aquifère</i>			
	Nombre de mailles souterraines (–)	72 596	107 476
	Surface à l’affleurement (km^2)	67 534	96 205
	Nombre de couches aquifères “modèle” (–)	7	8
	Nombre de niveaux lithologiques distincts (–)	7	20

1.6 Compléments : Actualisation des données de prélèvements en eau souterraine

L'application CaWaQS-Seine permet de prendre en compte l'action de l'Homme sur le milieu en intégrant les pressions locales induites par les prélèvements d'eau. Cette pression est renseignée par l'utilisation des données de prélèvements d'eau souterraine, collectées et mises à disposition par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie depuis 1994 jusqu'à 2010, date à partir de laquelle l'AESN a téléversé ses données dans la BNPE (*Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau*). L'exploitation des données fournies par la BNPE a permis d'actualiser les prélèvements pour les années de 2012 à 2018 incluses. Cependant, les données pour les années 2011 ainsi que pour la période 2019-2020 n'assurent encore qu'une couverture partielle du bassin. Les volumes ainsi considérés dans le modèle, pour ces deux intervalles, résultent d'une duplication des données des années 2010 et 2018 respectivement (cf. Fig. 7).



Figure 7. Frise chronologique synthétisant les différents types de données décrivant les prélèvements d'eau souterraine. Données utilisées avant et après mise à jour de l'application CaWaQS-Seine.

Qu'il s'agisse de prélèvements A.E.P. (alimentation en eau potable) ou industriels, les volumes annuels déclarés sont répartis de façon homogène au cours des mois de l'année. Les prélèvements agricoles sont concentrés sur la période estivale, entre mai à août, selon la répartition suivante, exprimée en pourcentages du volume annuel au point de données considéré : 20% en mai, 30% en juin, 30% en juillet et 20% en août.

A titre d'illustration, sur la période couverte par la mise à jour des données (2012-2018), le volume moyen total prélevé en nappe, s'élève à $1,14 \text{ Gm}^3$, réparti selon 72,0 % (823 Mm^3), 11,3 % (128 Mm^3) et 16,7 % (194 Mm^3) à destination respectivement de l'A.E.P., des secteurs industriels et agricoles (cf. Fig. 8a et Fig. 8b).

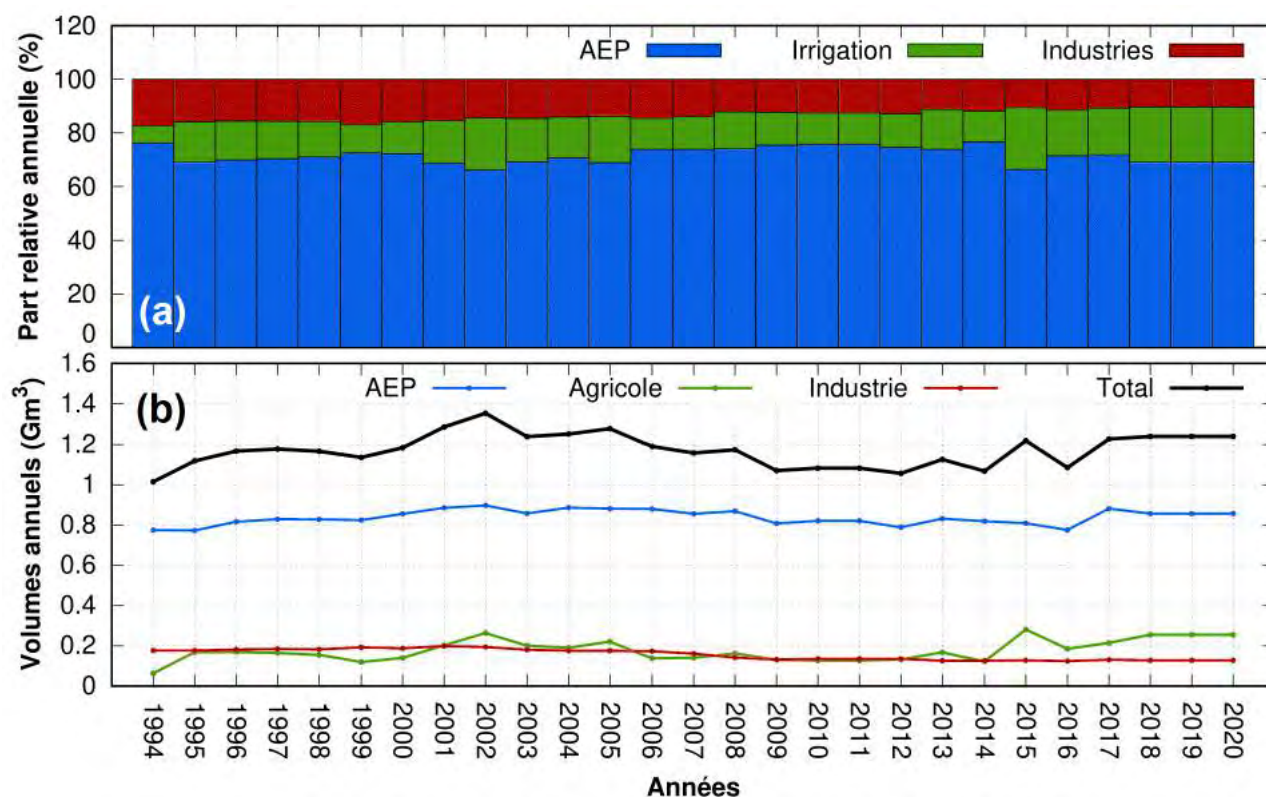


Figure 8. (a) Proportions relatives du volume annuel total (%) représentées par les trois principaux types de prélèvements d'eau souterraine (AEP, industries et usage agricole). (b) Volumes annuels totaux, et dissociés par types de prélèvements, exprimés en $\text{Gm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ sur l'ensemble du domaine modélisé.

2 Calibration de la réponse dynamique de la nouvelle extension du système aquifère

Cette section détaille les performances de restitution des données observées par CaWaQS-Seine. Ces résultats viennent compléter ceux obtenus sur les formations d'âge post-Cénomaniens, largement détaillés dans Flipo et al. (2021), non repris ici. Sur ce domaine, et dans les limites du bassin topographique de la Seine, les données de mesure associées à 24 ouvrages piézométriques et 67 stations de jaugeage⁵ ont été compilées (cf. Fig. 10a et Fig. 10b), respectivement depuis les banques nationales ADES et HYDRO. Les figures 10a et 10b précisent les localisations et dénominations respectives des ouvrages utilisés pour la calibration (stations et piézomètres).

La calibration du bilan de surface mobilisant une analyse HYMIT a permis de finement caractériser la recharge spatialisée des formations aquifères (Flipo et al., 2020, 2021). Les infiltrations qui en résultent servent ici d'entrée pour calibrer et simuler l'hydrodynamisme des compartiments souterrains.

5. Dans ces limites, d'autres stations disposent effectivement de données d'observation. Cependant, la simulation, et plus particulièrement, la géométrie du réseau hydrographique intégré à l'application (cf. §. 1.4), impose de ne retenir que les stations situées sur le linéaire connecté au système aquifère.

Cette calibration, réalisée manuellement et de manière itérative, distingue deux étapes successives (cf. Fig. 9) :

- une phase initiale, centrée autour d'un calcul en régime permanent du système aquifère. Cette étape a pour objectif de reproduire globalement les niveaux moyens mesurés par ajustements des valeurs de transmissivités T_{aq} . Le régime transitoire débutant au 1^{er} août 1985, le régime permanent a été calculé avec une alimentation moyenne correspondant à la période 1982-1988 (cf. Fig. 10c).
- une seconde étape de calcul, en régime transitoire journalier initialisé par le résultat du calcul en régime permanent, est conduite en mobilisant l'ensemble des modules constituant l'application CaWaQS-Seine. Cette étape permet l'ajustement complémentaire des coefficients d'emménagement S_{aq} , afin de reproduire au mieux la dynamique des variations d'eau souterraine.

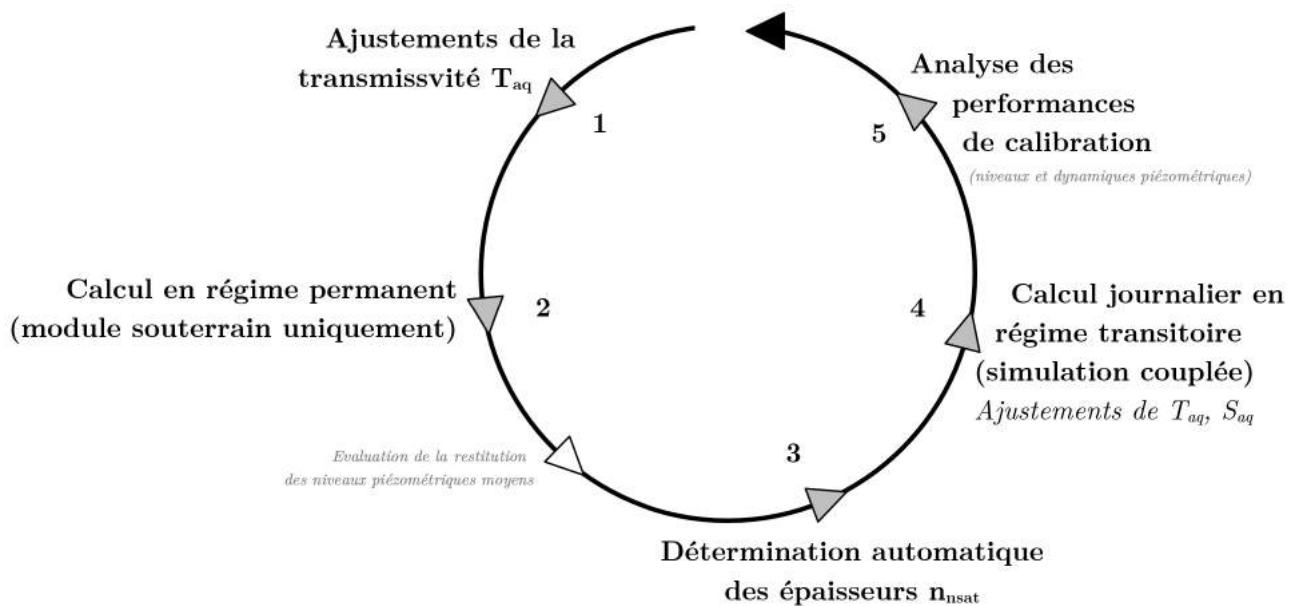


Figure 9. Procédure des différentes étapes successives d'une itération de calibration du domaine souterrain.

2.1 Mode d'évaluation des performances de calibration

Qu'il s'agisse de la simulation transitoire, de la piézométrie ou des débits, les performances de calibration ont été évaluées par calcul de critères statistiques usuels à chaque point de mesure⁶. Ces critères ont été calculés sur une durée de 17 ans, correspondant à la période de stationnarité des signaux hydrologiques d'intérêt⁷, à savoir les fluctuations piézométriques du bassin (aquifère de Beauce) (Flipo et al., 2012) et du débit de la Seine (Massei et al., 2010; Massei and Fournier, 2012; Labarthe, 2016). Les critères statistiques utilisés par la suite, sont :

- Le **critère de Nash** (Nash and Sutcliffe, 1970), fonction objectif plus couramment utilisée dans le cas des débits de rivière. La calibration des paramètres associés est jugée correcte pour des valeurs supérieures à 0,5 et très satisfaisante au-delà de 0,7. Son expression mathématique est précisée par l'équation (1), dans laquelle X_i^{obs} représente la valeur observée du débit et X_i^{sim} , celle simulée au pas de temps de calcul i . \overline{X}^{obs} et \overline{X}^{sim} désignent respectivement les moyennes des séries observées et simulées, et N le nombre de couples de valeurs simulées-observées disponibles au point d'observation considéré.

6. Sous réserve que le point d'observation comptabilise un minimum de 200 observations.

7. La variabilité des signaux hydrologiques du bassin de la Seine comporte une forte composante sinusoïdale (Flipo et al., 2012), ce qui signifie que la moyenne de ces signaux n'a de sens que pour des périodes temporelles correspondant à un multiple de la période d'oscillation du signal sinusoïdale, à savoir 17 ans.

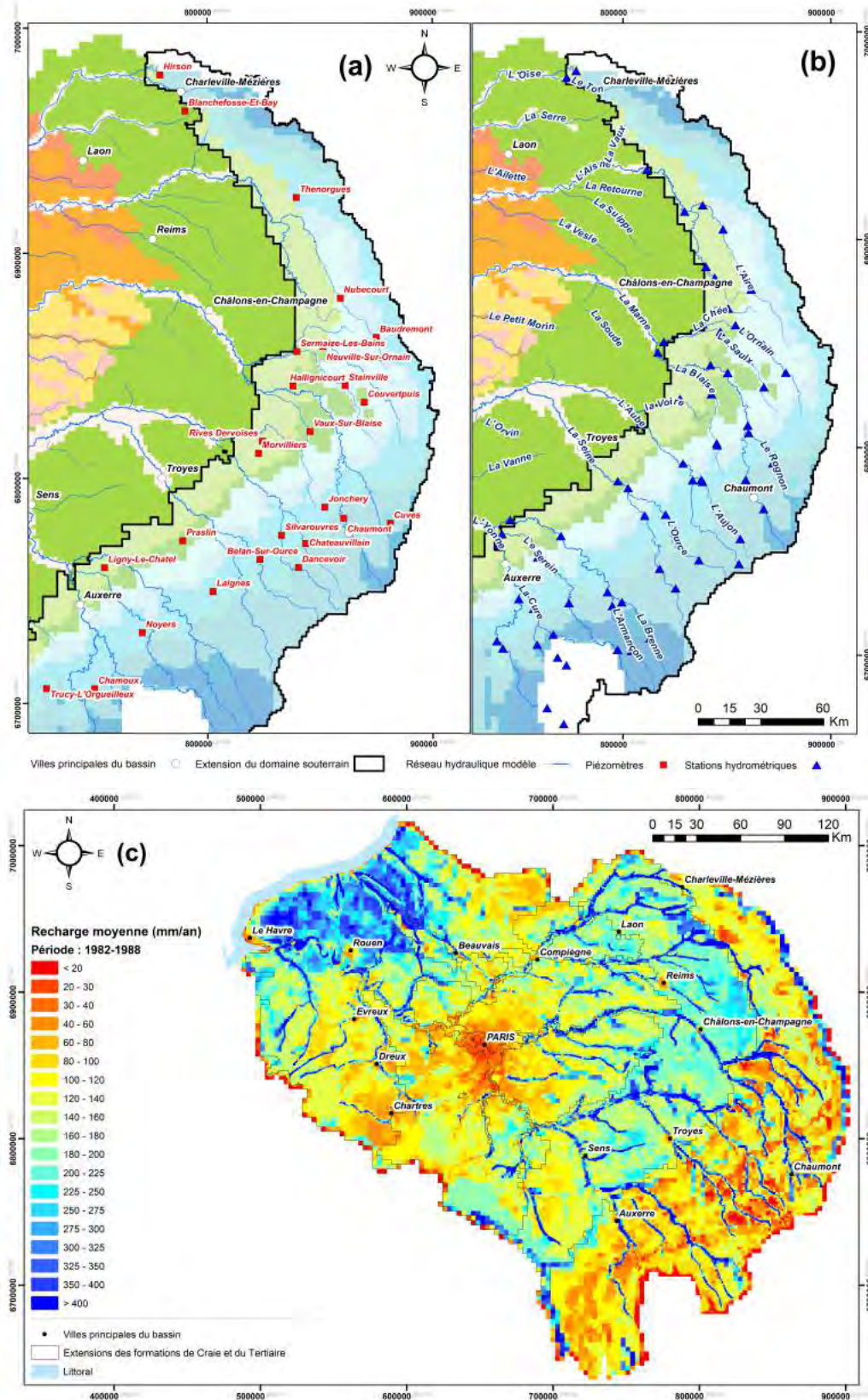


Figure 10. Localisation des ouvrages de calibration du nouveau secteur : (a) Piézomètres, (b) Stations de jaugeage. (c) Recharge moyenne du système aquifère, en mm.an^{-1} , calculée sur la période 1982-1988, et obtenue suite au paramétrage du bilan de surface par la méthode HYMIT (Flipo et al., 2021). Recharge utilisée pour la simulation en régime permanent. Projection sur le maillage du système aquifère affleurant.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i^{sim} - X_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (X_i^{obs} - \overline{X^{obs}})^2} \quad (1)$$

- La **RMSE** (ou *Root Mean Square Error*) permet quant à elle d'estimer l'écart moyen entre les données simulées et observées (cf. Eq. 2). Sa dimension est celle de la variable simulée. La qualité de la reproduction de la variable observée est d'autant plus acceptable que la valeur absolue de la RMSE sera faible, 0 étant sa valeur optimale.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i^{sim} - X_i^{obs})^2}{N}} \quad (2)$$

- Le **KGE** (ou *Kling-Gupta Efficiency*) (Gupta et al., 2009; Kling et al., 2012), d'optimum 1,0, dont la formulation (3) permet de rassembler trois critères :

$$KGE = 1 - \sqrt{(\beta - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (3)$$

- le **biais moyen** $\beta = \overline{X_{sim}} / \overline{X_{obs}}$,
- la **variabilité du modèle** $\alpha = (\sigma_{sim} \overline{X_{obs}}) / (\overline{X_{sim}} \sigma_{obs})$, avec σ_{obs} et σ_{sim} , respectivement écarts-types des séries de valeurs observées et simulées,
- le **coefficient de corrélation** γ :

$$\gamma = \frac{1}{N \sigma_{obs} \sigma_{sim}} \sum_{i=1}^N (X_i^{obs} - \overline{X^{obs}}) (X_i^{sim} - \overline{X^{sim}}) \quad (4)$$

2.2 Restitution de la piézométrie et des débits

2.2.1 Débits aux stations hydrométriques

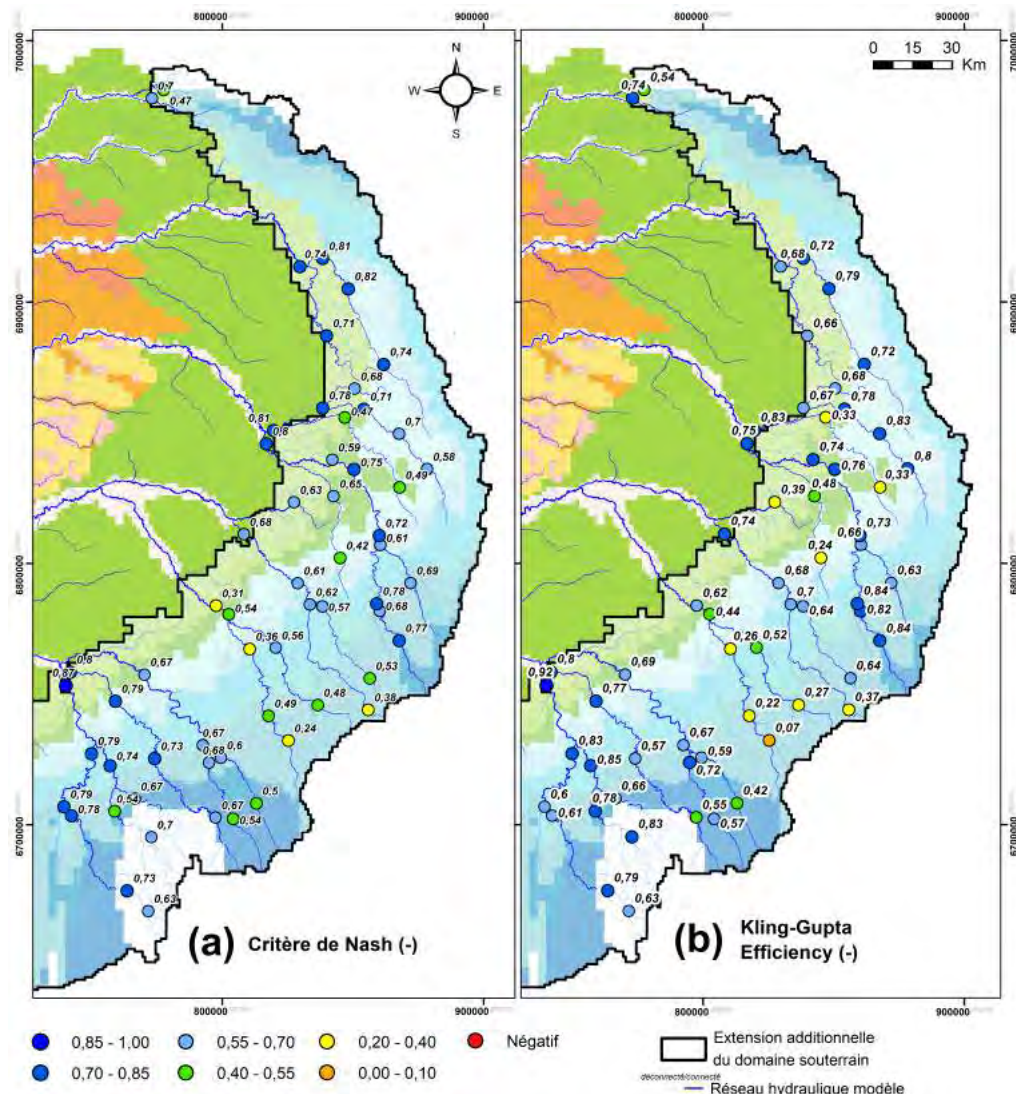
Les figures 11a et 11b illustrent respectivement les valeurs de critères de Nash et de KGE déterminées à l'issue de la calibration pour chaque station. Les chroniques synchrones, entre séries simulées (traits pleins rouges) et observées (points verts) sont par la suite rassemblées, selon trois sous-secteurs géographiques, organisés du Sud vers le Nord : “Morvan”, “Seine-Marne” et “Aire-Aisne”. Les illustrations respectives sont proposées en figures 12, 13 et 14. Parmi les ouvrages à disposition, les trois sélections proposées par la suite ont été établies de manière à couvrir chaque cours d'eau modélisé du domaine. Pour une même rivière, deux stations peuvent être sélectionnées afin d'illustrer à la fois le comportement simulé plus particulièrement en amont du réseau hydrographique et la dynamique globale, intégrée sur le bassin versant amont associé à la station de mesure située en amont direct de la transition vers le contact avec les formations du Crétacé supérieur.

Sur chaque graphique, les informations complémentaires suivantes sont rappelées :

- le nombre n (–) de couples de valeurs observées et simulées, considéré pour le calcul des critères statistiques, sur la période 2003-2020,
- les valeurs moyennes, exprimées en $m^3.s^{-1}$, des débits moyens simulés X_{sim} et mesurés X_{obs} (sur cette même période),
- les valeurs du critère de Nash (–), à la fois calculées selon la formulation (1) ainsi que sous forme logarithmique ($Nash-In$),
- la valeur du coefficient de corrélation γ (–), tel que formulé par la relation (4) (ici noté C_c),
- le ratio des écarts-types α (–) (*i.e.* représentation de la variabilité du modèle) des séries simulées et observées (ici noté R_s),

- la valeur du KGE (-) (cf. Eq. 3),
- un indicateur précisant la nature des débits observés : débits naturalisés (" Q_{nat} ")⁸ ou bruts (" Q_{brut} ").

Qu'il s'agisse du critère de Nash ou de l'évaluation des performances *via* le KGE, les restitutions des débits observés, pour 49 des 67 stations hydrométriques (soit 73 % au total), indiquent des valeurs de critères strictement supérieures à 0,5. 25 stations sont simulées avec des valeurs supérieures à 0,7. Un indicateur de variabilité α compris dans la gamme [0,7;1,1] est recensé aux niveaux de 42 stations. il est à noter que les points d'observations sont tous associés à des valeurs de coefficients de corrélation supérieures à 0,7. 33 (resp. 11) présentent des coefficients supérieurs à 0,85 (resp. 0,9).



8. Les débits mesurés aux stations de jaugeage situées en aval d'un des barrages-réservoirs du bassin ont fait l'objet d'une correction visant à "effacer" de ces enregistrements leurs influences sur le régime hydraulique enregistré. Cette correction, détaillée dans [Flipo et al. \(2021\)](#) est réalisée sur la base, à la fois, des chroniques de volumes journaliers effectivement soutirés et restitués au système par chacun de ces ouvrages (données EPTB Seine Grands-Lacs) ainsi que du temps de parcours de l'eau, sur la portion de réseau, entre un barrage et la station en question, en aval de celui-ci. Ici, seules trois stations (la Marne à Frignicourt ainsi que l'Yonne à Montigny et Gurgy) sont concernées.

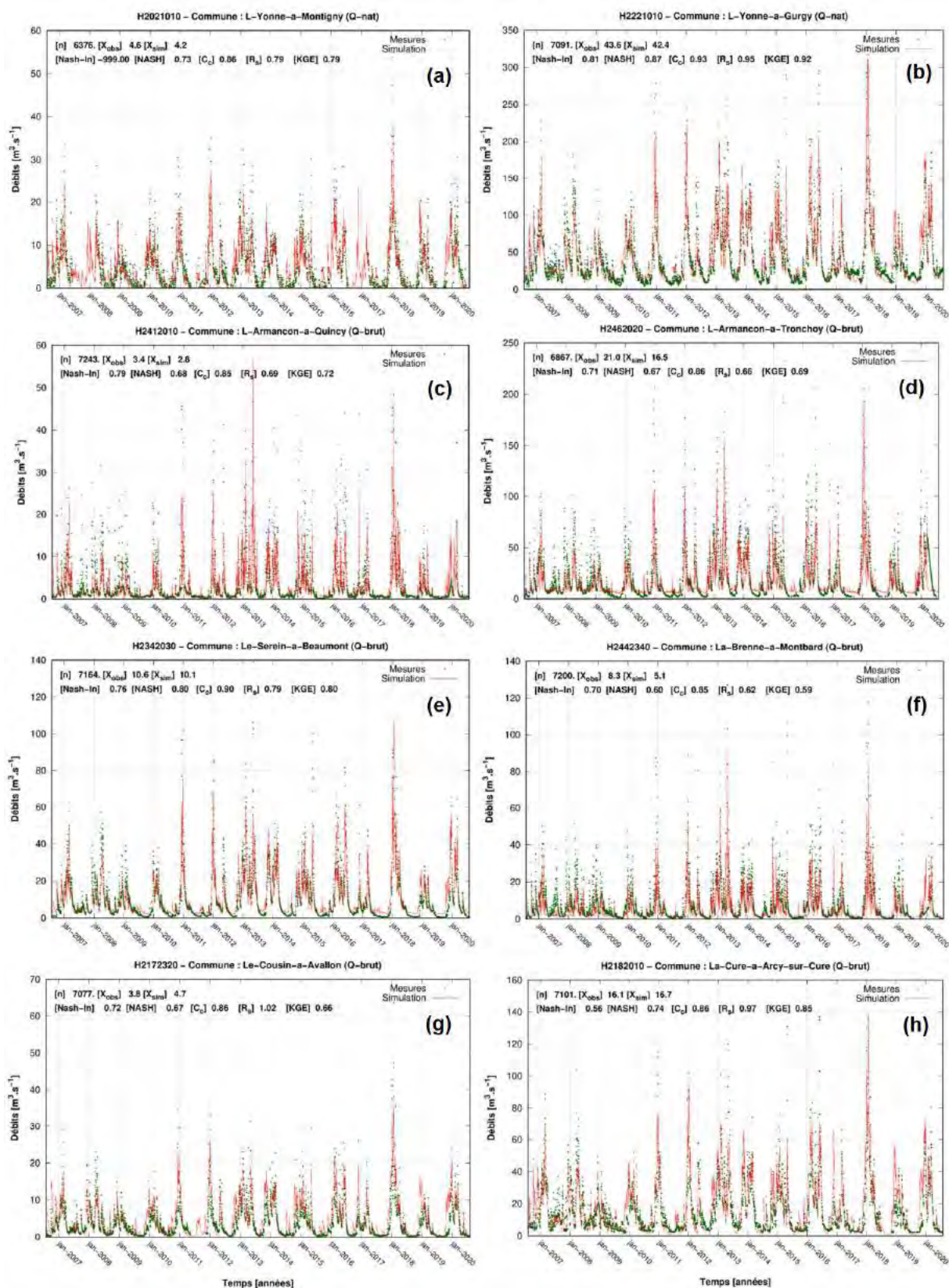


Figure 12. Comparaisons des débits mesurés et simulés aux niveaux de 8 stations du secteur "Morvan". Cours d'eau de l'Yonne, de l'Armançon, du Serein, de la Brenne, du Cousin et de la Cure.

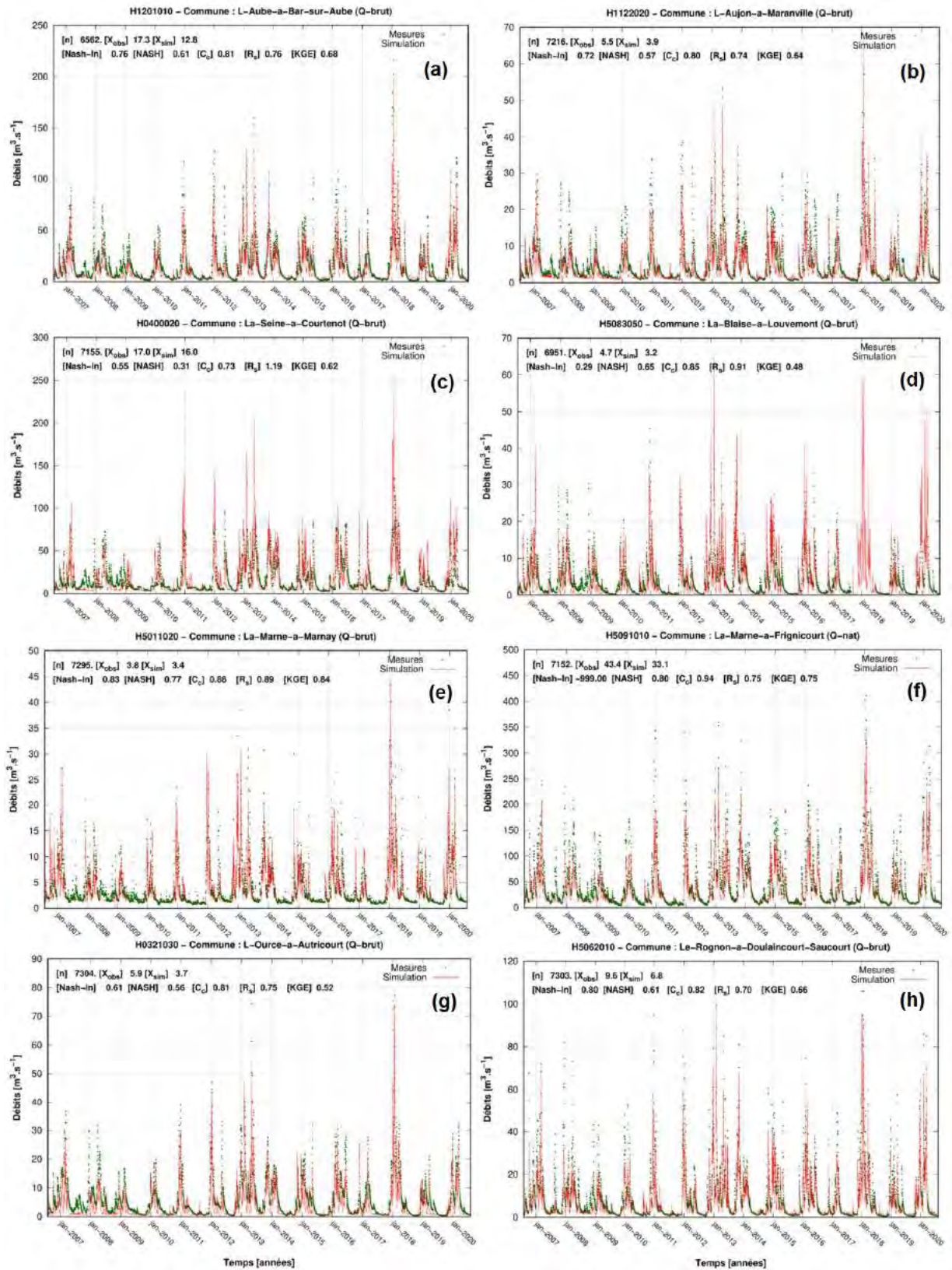


Figure 13. Comparaisons des débits mesurés et simulés aux niveaux de 8 stations du secteur "Seine-Marne". Cours d'eau de l'Aube, de l'Aujon, de la Seine, de la Blaise, de la Marne, de l'Ource et du Rognon.

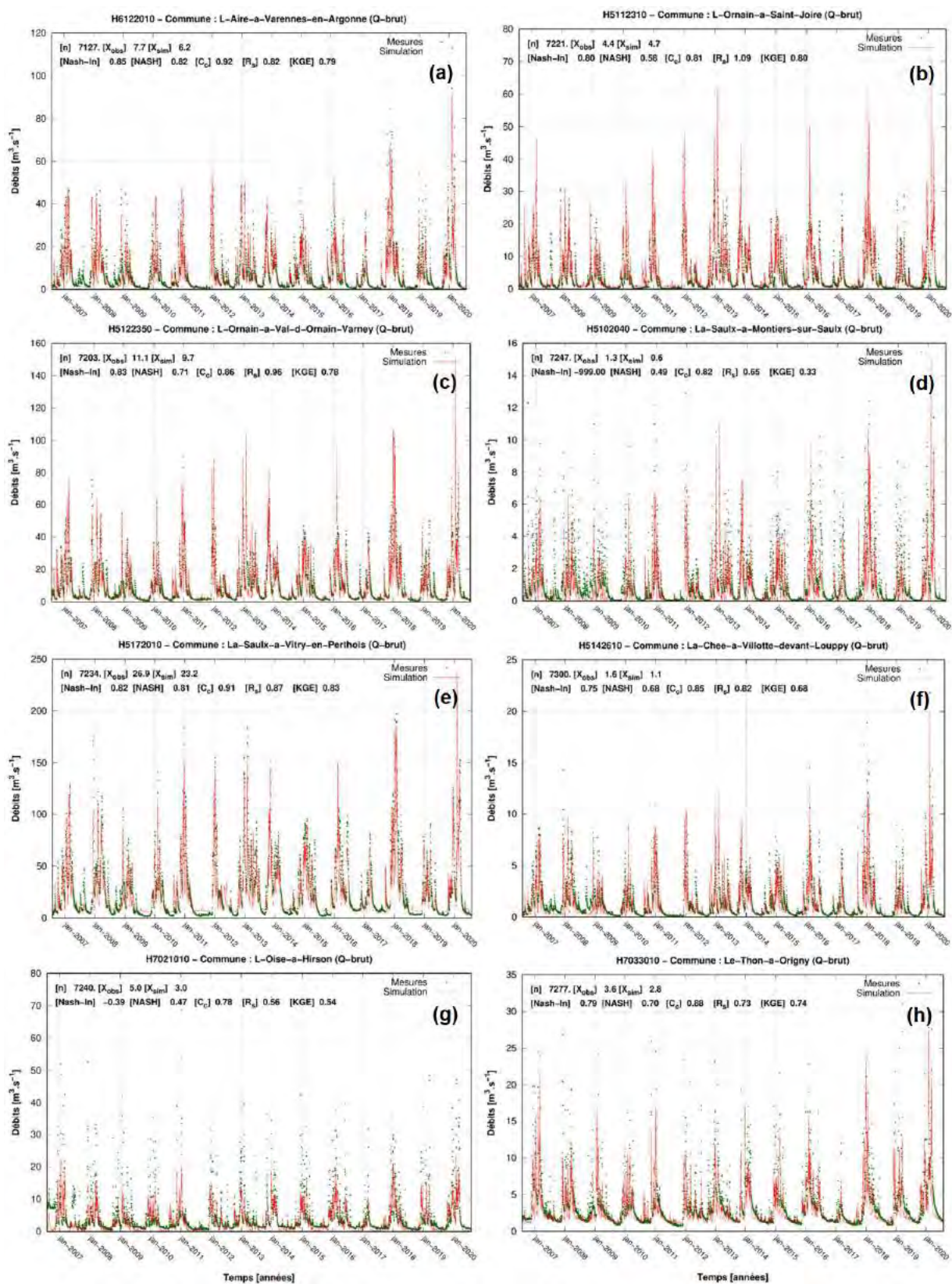


Figure 14. Comparaisons des débits mesurés et simulés aux niveaux de 8 stations du secteur "Aire-Aisne". Cours d'eau de l'Aire, de l'Ornain, de la Saulx, de la Chée, de l'Oise et du Thon.

2.2.2 Piézométrie

Les résultats obtenus au niveau des piézomètres sont synthétisés selon trois types d'illustrations :

- la figure 15, précisant à la fois la relation $Y=f(X)$ entre niveaux piézométriques moyens observés et simulés (cf. Fig. 15a) calculés sur la période 2003-2020, ainsi que la cartographie 15b, des valeurs des critères de biais β (m) pour chacun des ouvrages,
- le tableau 3 synthétise les valeurs de RMSE (m) et de biais β déterminés aux niveaux de ces ouvrages,
- enfin, les deux figures 16 et 17, illustrent les évolutions synchrones des signaux observés (points verts) et simulés (traits pleins rouges) aux points d'observations du secteur. Afin de faciliter la lecture de ces graphiques, les informations précédentes sont rappelées sur chacun d'entre eux, en plus des valeurs des niveaux moyens observés (X_{obs}) et simulés (X_{sim}), sur la période 2003-2020, ainsi que le nombre de couples de valeurs (n) considéré pour ce calcul.

Exception faite pour deux ouvrages, les niveaux piézométriques sont généralement très bien restitués. 22 des 24 piézomètres affichent un biais moyen absolu strictement inférieur à 1,5 m. Parmi ces points, 19 et 12 d'entre-eux sont respectivement associés à des biais absolus inférieurs à 1 m et 50 cm. Les valeurs d'indicateurs de restitution des dynamiques sont également satisfaisante. A titre d'exemple, 1 ouvrage sur 2 possède un critère de variabilité α (cf. définition fournie en page 15) dans l'intervalle [0,7;1,3], traduisant une mésestimation de l'amplitude moyenne des variations piézométriques inférieure à 30 %.

Tableau 3. Statistiques usuelles (niveaux moyens simulés, biais β et RMSE), exprimés en m, obtenus à l'issue de la procédure de calibration du système aquifère Crétacé inférieur et Jurassique. Valeurs calculées sur la période 2003-2020.

BSS	Nom	n (-)	$\overline{h_{OBS}}$ (m)	$\overline{h_{SIM}}$ (m)	RMSE (m)	β (m)
03708X0007/SONDAG	Belan	4015	208,5	208,3	0,56	-0,19
00678X0013/RECEAU	Blanchefosse	3613	178,8	178,9	0,24	0,13
03366X0021/P1	Chaumont	2982	249,8	249,8	0,86	-0,01
03375X0013/P1	Cuves	3916	380,8	380,9	0,37	0,09
03713X0037/PZ3	Chateauvillain	1334	228,9	227,6	2,21	-1,38
03717X0020/PZ	Dancevoir	3570	254,9	254,1	0,96	-0,81
03717X0004/P1	Dancevoir	3758	253,6	253,3	0,80	-0,26
00516X0059/S1	Hirson	4697	185,2	185,0	0,49	-0,24
04051X0016/SONDAG	Laignes	6905	211,5	208,9	3,84	-2,65
01918X0006/P1	Baudremont	3851	267,6	268,4	2,21	0,80
02281X0037/S1	Cousances	3850	289,1	289,7	5,68	0,56
03712X0012/P1	Silvarouvres	705	211,1	209,8	1,64	-1,35
01107X0094/P	Thenorgues	3098	185,7	185,3	0,76	-0,39
04652X0005/F2	Trucy	5615	152,4	165,4	13,09	13,05
01616X0006/S1	Nubecourt	5336	214,5	215,0	0,95	0,47
02653X0001/F1	Couvertpuis	2282	247,5	246,9	1,75	-0,66
01022X0073/P	Hodenc	4747	120,3	120,3	0,59	0,03
01915X0023/PC7	Neuville	5495	157,6	157,6	0,34	0,00
03693X0017/P2	Praslin	7303	188,1	189,9	3,65	1,81
02276X0050/P1	Stainville	5473	201,6	200,3	1,88	-1,28
02648X0020/S1	Vaux	6923	173,6	173,3	1,76	-0,25
02994X0092/D07L	Morvilliers	6047	140,2	139,7	1,10	-0,43
02645X0038/D601	Rives	6229	124,9	125,6	1,02	0,68
02267X0030/S1	Hallignicourt	7260	134,1	134,1	1,46	-0,02
01907X0068/PZ2013	Sermaize	7440	125,3	125,8	0,69	0,50

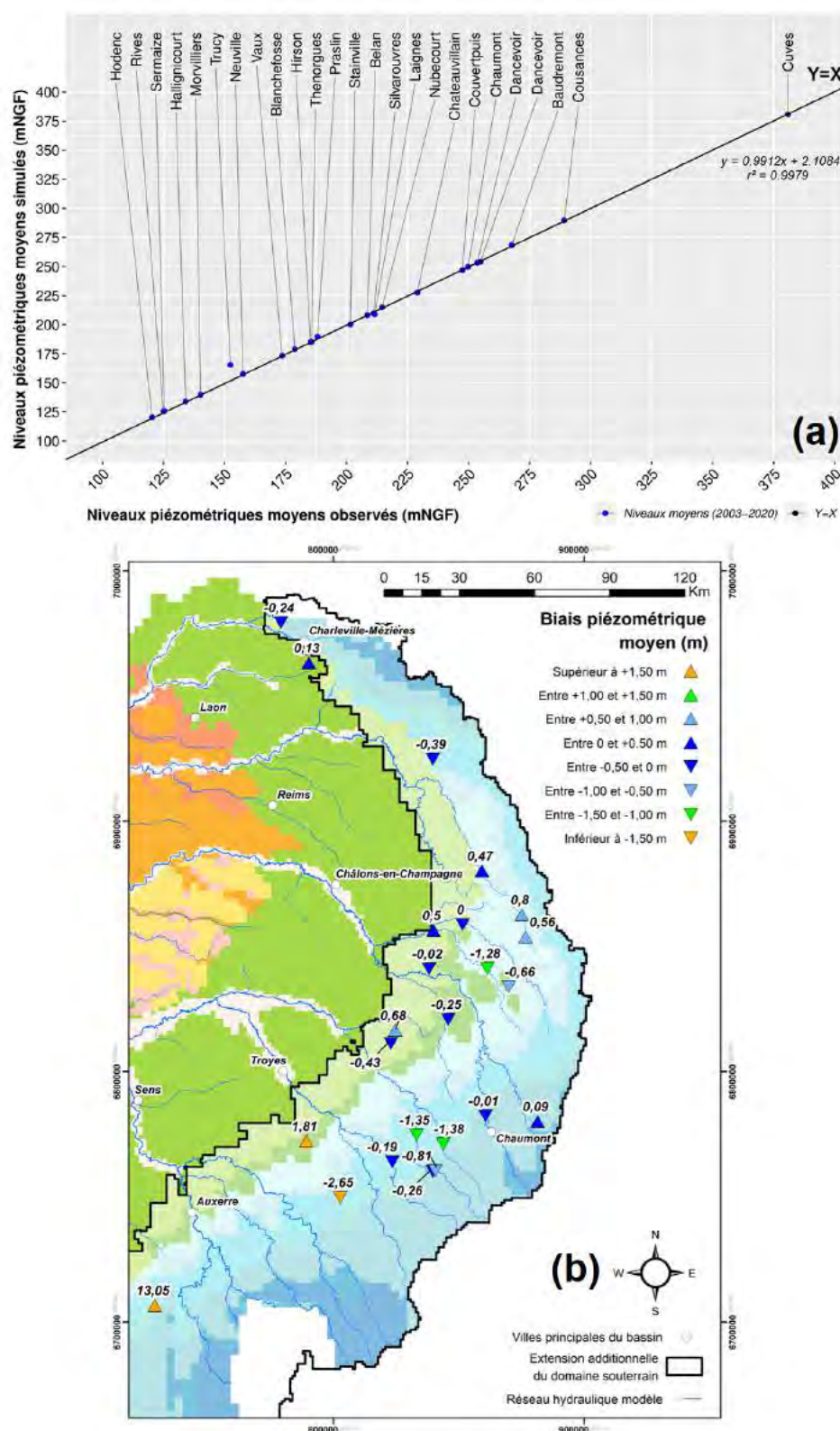


Figure 15. (a) Comparaison des niveaux piézométriques moyens observés et simulés, en mNGF, aux ouvrages localisés dans les limites de la nouvelle extension aquifère. (b) Cartographie de la répartition spatiale des valeurs de biais moyens, en m, obtenus aux niveaux des ouvrages piézométriques du secteurs, à l'issue de la phase de calibration des paramètres aquifères. Valeurs calculées sur la période 2003-2020. Un triangle orienté vers le haut (resp. vers le bas) traduit d'une surestimation (resp. sous-estimation) du niveau moyen mesuré.

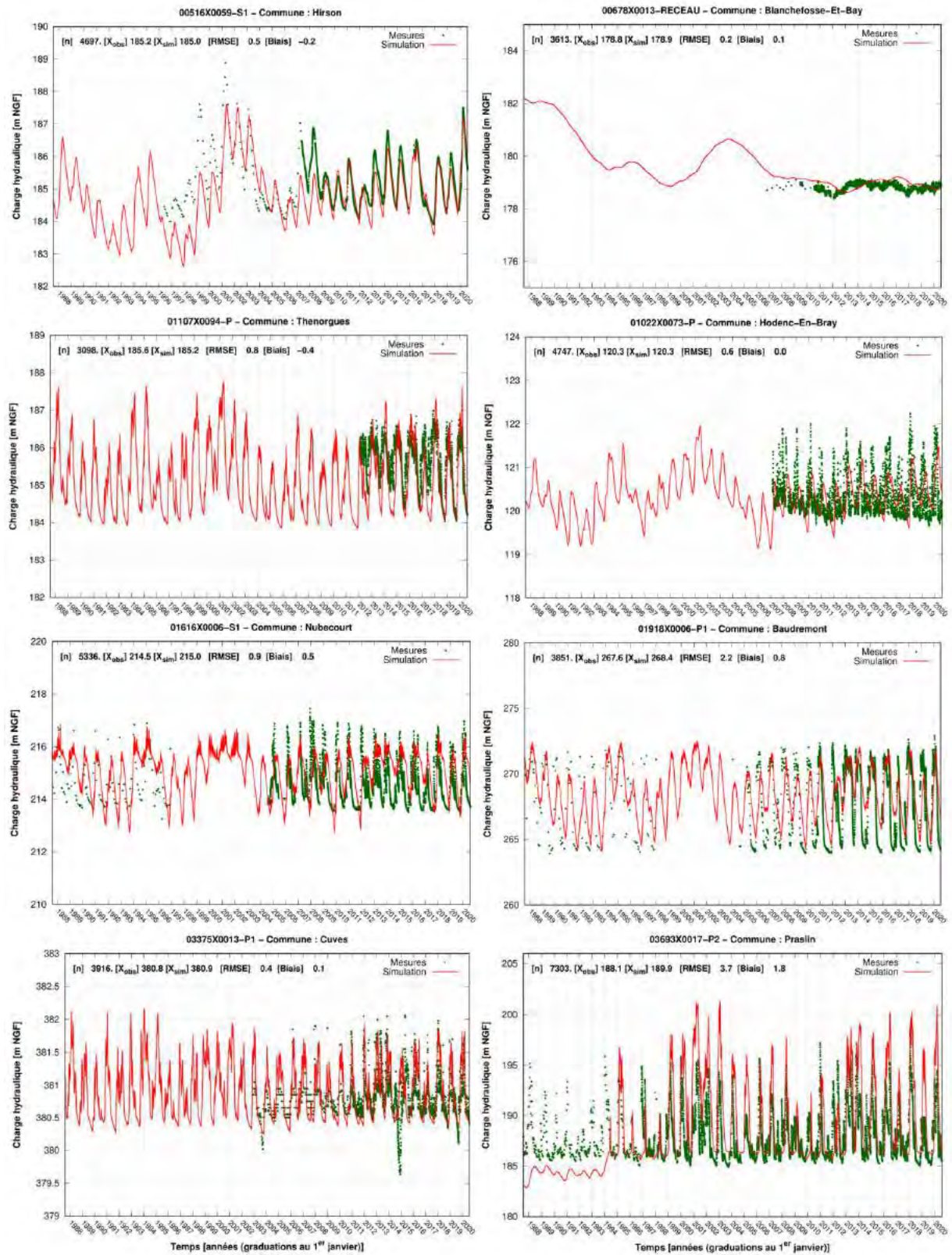


Figure 16. Exemples de comparaisons des dynamiques et niveaux piézométriques, mesurés (points vert) et simulés (traits pleins rouges), sur la période simulation 1985-2020, aux niveaux de 16 ouvrages piézométriques (1/2).

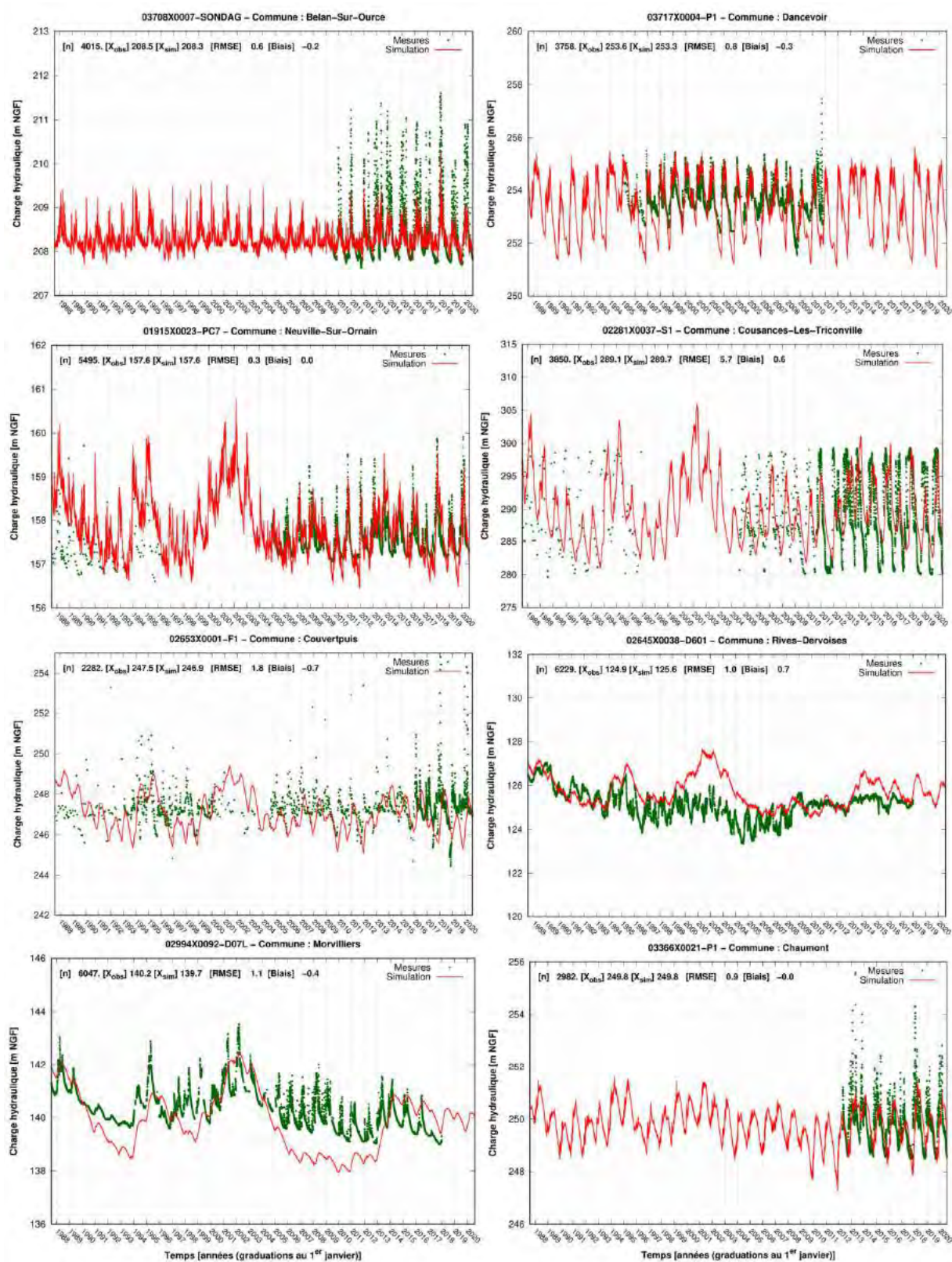


Figure 17. Exemples de comparaisons des dynamiques et niveaux piézométriques, mesurés (points vert) et simulés (traits pleins rouges), sur la période simulation 1985-2020, aux niveaux de 16 ouvrages piézométriques (2/2).

3 Fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin : bilan de flux au sein de l'hydrosystème Seine

Un bilan synthétique des flux simulés dans l'ensemble du système, présenté sur un cycle de 17 ans (2003-2020) est finalement établi à l'aide de CaWaQS- Seine (Fig. 18). Pour une question de cohérence générale du bilan et du bon bouclage des flux d'eau dans l'ensemble du système, il est nécessaire de tenir compte, selon le compartiment considéré, de deux échelles spatiales distinctes pour calculer ce bilan, à savoir, soit :

- (i) les limites effectives du bassin topographique pour les termes associés aux domaines de surface (composantes du bilan hydrique, apports au réseau hydrographique de la Seine à son exutoire). Les valeurs de flux calculées dans ces conditions sont mentionnées en **rouge**.
- (ii) l'extension totale du compartiment en question. Ce cas s'applique au domaine souterrain (zone non saturée et système aquifère), dont les limites s'étendent au-delà des limites du bassin topographique (cf. Fig. 6). Les valeurs correspondantes sont précisées en **bleu**.

Ainsi, tout particulièrement aux interfaces entre surface et souterrain (limite supérieure de la zone non saturée, échanges nappes-rivières, etc.), il a été nécessaire de quantifier, de façon isolée, les flux associés aux secteurs situés en dehors du bassin de la Seine. Ceux-ci sont matérialisés par des flèches dédiées sur la figure 18, étiquetées "A.H.L." et "E.H.L.", pour "*apports hors limites*" et "*exports hors limites*" respectivement, et dont les valeurs associées sont indiquées en **vert**. Dans le paragraphe suivant, la signification précise de ce type de flux est explicitée au besoin, selon les cas. Par ailleurs, les valeurs de certains flux sont converties, lorsque approprié, en $mm.an^{-1}$ pour en faciliter la compréhension. Les valeurs correspondantes du graphique sont rappelées entre crochets dans le texte suivant, pour repérage. Sauf rare exception, les valeurs sont ici arrondies à l'unité.

Dans les limites du bassin de la Seine (soit environ $76\,000\ km^2$), les valeurs moyennes inter-annuelles des forçages climatiques utilisés (base de données SAFRAN) sont respectivement de $765\ mm.an^{-1}$ [$1\,837\ m^3.s^{-1}$] et $888\ mm.an^{-1}$ [$2\,133\ m^3.s^{-1}$] pour les précipitations et l'ETP (évapotranspiration potentielle). Une très large partie (73,8 %) de ces précipitations est convertie en ETR (évapotranspiration réelle) (lame moyenne de $564\ mm.an^{-1}$ [$1\,356\ m^3.s^{-1}$]).

La fraction efficace restante, soit 26,2 % (lame moyenne de $201\ mm.an^{-1}$ [$482\ m^3.s^{-1}$]) est principalement répartie entre, d'une part, un flux d'infiltration représentant 17,6 % des précipitations ($134\ mm.an^{-1}$ [$323\ m^3.s^{-1}$]) et, d'autre part, un flux de ruissellement à hauteur de 8,6 % ($66\ mm.an^{-1}$ [$158\ m^3.s^{-1}$]). Des flux négligeables (< 0.1 % des précipitations) associés au stock d'eau dans les sols ainsi qu'à un court-circuit hydraulique⁹ pour les secteurs au droit desquels aucun aquifère n'est représenté sont également simulés (socle du Morvan principalement).

Un flux total d'eau infiltrée de $443\ m^3.s^{-1}$ (soit $185\ mm.an^{-1}$) est simulé en transit au travers de l'ensemble de la zone non saturée (d'environ $96\,000\ km^2$), alimentant les différents secteurs affleurants des formations aquifères. Le tableau 4 distingue plus précisément, entres autres, pour chacune des formations modélisées du souterrain, la valeur moyenne de recharge simulée, en $mm.an^{-1}$, ainsi que la fraction de surface à l'affleurement associée.

Les prélèvements anthropiques dans le système aquifère représentent 7,8 % de l'alimentation totale du compartiment ($34,7\ m^3.s^{-1}$ soit environ $1,09\ Gm^3.an^{-1}$). La caractérisation des flux verticaux échangés entre les unités en communication hydraulique met notamment en exergue deux principaux points :

- dans le cas des formations alluviales, une alimentation globale par flux ascendants, en particulier depuis la Craie, supérieure à sa recharge par impluvium ($53,7$ contre $34,3\ m^3.s^{-1}$ respectivement),

9. Sur ces zones, la lame d'eau journalière simulée est directement transformée en ruissellement et transférée au réseau hydrographique.

- une recharge principale de la formation des calcaires du Champigny par drainance depuis la formation du Brie ($12,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ contre $6,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en recharge au travers de la zone non saturée), constat en partie expliqué par sa surface restreinte à l'affleurement (cf. Tab. 4).

Quant aux échanges nappe-rivière, un régime largement majoritaire d'exfiltration depuis le système souterrain vers le réseau hydraulique est simulé (flux nets d'échanges positifs - cf. Fig. 18). Selon la géométrie utilisée pour décrire les relations de connexion entre formations aquifères et le réseau principal (cf. Fig. 6), un flux de $263 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est en moyenne drainé par ce dernier, soustrait, dans les limites du bassin de la Seine, de $18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (soit $245 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nets), principalement associé au drainage par les cours d'eau littoraux (E.H.L. sur la Fig. 18). A cette contribution s'ajoute un flux de $73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ associé aux débordements de nappe. Une cartographie (non proposée ici) des secteurs de débordements récurrents montre une très bonne cohérence spatiale avec les zones caractérisées par un réseau hydrographique dense non connecté à l'aquifère (tronçons de premiers ordres de Strahler). Il est également intéressant de noter un flux significatif de débordements hors-bassin ($81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, E.H.L. à gauche de la Fig. 18)), très majoritairement concentrés le long des linéaires de la Meuse, à l'extrême est du domaine, et de la Loire, au sud.

Les contributions au débit total moyen simulé à l'exutoire du réseau du bassin de la Seine ($477 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) sont à hauteur de 33 % ($160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) issues des processus de surface et subsurface et 67 % du domaine souterrain ($318 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Tableau 4. Flux moyens d'eau au travers des différentes unités aquifères modélisées, calculés sur la période 2003-2020. Pour chaque unité aquifère, un flux positif (resp. négatif) traduit d'une entrée (resp. sortie) d'eau dans/de la formation.

All. : Formations alluviales quaternaires, *Bea.* : Nappe des Calcaires de Beauce, *Bri.* : Calcaires de Brie et Sables de Fontainebleau, *Cha.* : Calcaires de Champigny, *Lut.* : Calcaires du Lutétien, *Tha.* : Sables du Thanétien, *Cra.* : Craie, *C.I.J.* : Ensemble du Crétacé inférieur et du Jurassique.

	All.	Bea.	Bri.	Cha.	Lut.	Tha.	Cra.	C.I.J.	Total
Surface totale (km^2)	5 430	5 625	10 000	8 663	16 250	7 950	67 530	96 205	-
Proportion à l'affleurement (%)	100	99	65	19	42	33	58	30	-
<i>Flux caractéristiques</i>									
Recharge ($\text{mm} \cdot \text{an}^{-1}$)	199	131	94	123	110	128	167	130	185
Recharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	34,3	23,4	19,3	6,4	23,8	10,8	206,8	117,9	442,7
Prélèvements ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	-7,9	-4,3	-2,7	-1,1	-2,2	-0,7	-13,0	-2,7	-34,4
Débordements ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	-13,2	-5,4	-2,9	-1,0	-4,9	-6,5	-71,4	-48,5	-153,7
Bilan net d'échange nappes-rivières ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	-86,0	-9,8	-1,5	-3,9	-10,7	-2,5	-80,9	-67,7	-262,8
Echanges avec les unités sous-jacentes ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	72,7	-3,9	-13,7	-8,6	-10,0	-2,3	0,1	0,0	34,2
Echanges avec les unités sus-jacentes ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0,0	-0,1	0,5	7,8	2,1	0,9	-45,2	-0,1	-34,2
Stock ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0,1	0,1	1,0	0,3	1,8	0,4	3,5	1,1	8,3
Bilan (Erreur) ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	~0,0	~0,0	~0,0	~0,0	~0,0	~0,0	~0,0	~0,0	~0,0

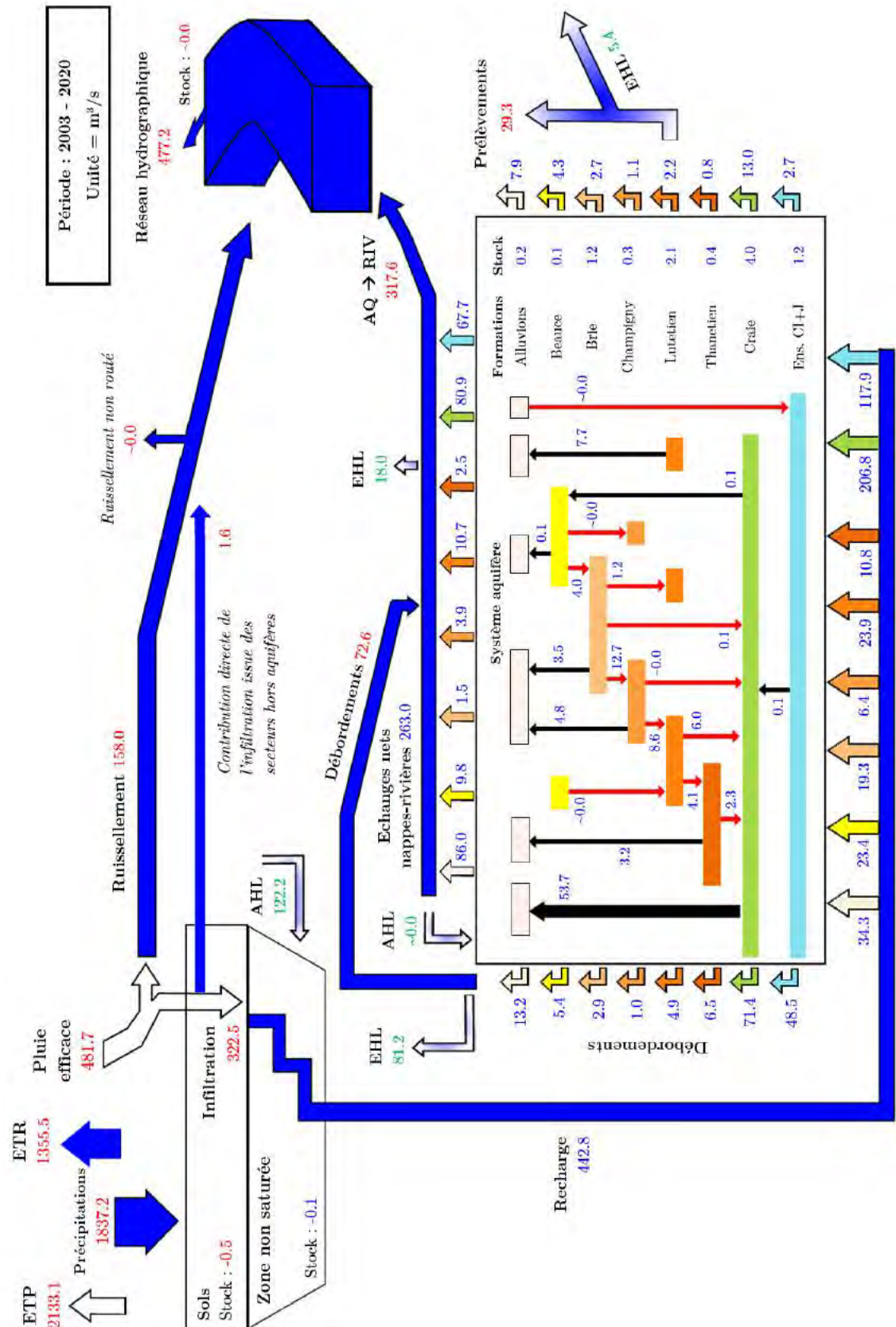


Figure 18. Schéma-bilan de la structure et du fonctionnement moyen de l'hydrosystème Seine, tel que simulé par la nouvelle version de l'application. Débits (m³.s⁻¹) moyens inter-annuels, sur la période 2003-2020. Au sein du système aquifère, les flèches noires (resp. rouges) indiquent un flux d'eau ascendant (resp. descendant).

Conclusion

Les travaux et résultats ici rassemblés témoignent d'une avancée significative autour de la modélisation de l'hydrosystème Seine. D'une part, l'élaboration de la première application couplée offrant une couverture complète des aquifères du bassin, d'âges secondaire à quaternaire, et, d'autre part, l'amélioration de sa calibration globale, rendue, en grande partie, possible grâce à la mise en oeuvre de la méthode HYMIT sur le territoire, ont permis de finement caractériser et spatialiser les propriétés physiques du bassin (Flipo et al., 2020) ainsi que sa réponse hydrodynamique. Cette nouvelle version de l'application est actuellement mobilisée par plusieurs actions du PIREN-Seine.

Sur le volet hydrodynamique, elle est le support de l'exercice d'étude de la sensibilité de la ressource en eau du bassin de la Seine à la modification des variabilités des signaux hydro-climatiques (Fossa et al., 2020). Cette intégration des formations anté-Cénomaniennes a permis d'étendre ces analyses sur ce secteur. Elle sera également mobilisée pour simuler l'impact du changement climatique suivant des projections climatiques du nouvel exercice du GIEC (CMIP6), pertinentes à l'échelle du bassin de la Seine (Boé, 2020).

Par ailleurs, les nombreux développements récents dédiés au transport de solutés et de chaleur dans l'hydrosystème, réalisés au sein de la plateforme CaWaQS3.x (Gallois et al., 2020; Kilic et al., 2021), bénéficieront également de ces avancées, en contraignant mieux ces transferts à l'échelle du bassin, *via* une meilleure représentation des partages entre écoulements lents et rapides (Gallois et al., 2020). Cela permettra notamment d'affiner les premières estimations de transferts de nitrates proposées par Passy et al. (2018). La plateforme servira également, toujours dans le cadre de la phase 8 du programme, de support à la simulation des transferts de pesticides dans le bassin.

Remerciements *Les auteurs remercient l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, pour son soutien aux projets AqviVar et AqviVar⁺, dont sont issus ces résultats.*

Bibliographie

- Albinet, M. (1967). *Carte hydrogéologique du Bassin de Paris*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- Boé, J. (2020). Résultats des nouvelles projections climatiques sur le bassin de la Seine et évaluation de leur capacité à simuler la variabilité basse-fréquence. Technical report, PIREN-Seine.
- Flipo, N., N. Gallois, B. Labarthe, F. Baratelli, P. Viennot, J. Schuite, A. Rivière, R. Bonnet, and J. Boé (2020). *The Seine River Basin*, Chapter Pluri-annual water budget on the Seine basin : past, current and future trends, pp. 59–89. Handbook of Environmental Chemistry. Cham, Switzerland : Springer.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2020). Recalibration du bilan hydrologique de surface du bassin de la Seine à l'aide de la méthode HYMIT. Rapport PIREN-Seine de phase VIII, PIREN-Seine.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2021). Recalibration du modèle CaWaQS-Seine pour l'analyse du fonctionnement du bassin. Rapport technique d'étude R310521NFLI, Centre de Géosciences - ARMINES/MINES ParisTech.
- Flipo, N., C. Monteil, M. Poulin, C. de Fouquet, and M. Krimissa (2012). Hybrid fitting of a hydrosystem model : long term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research* 48, W05509.
- Fossa, M., N. Massei, M. Fournier, N. Flipo, N. Gallois, J. Boé, and B. Dieppois (2020). Réponses hydrologiques à des scénarisations climatiques sur le bassin de la Seine : une approche par modification du contenu spectral

des pluies sur le bassin versant en fonction des caractéristiques spectrales de la variabilité climatique à grande échelle. Rapport PIREN-Seine, Université de Normandie, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C.

Gallois, N., A. Rivière, and N. Flipo (2020). Développements numériques au sein de la plate-forme de modélisation des hydrosystèmes CaWaQS : Introduction des premières fonctionnalités de transport conservatif. Rapport technique PIREN-Seine, ARMINES/MINES ParisTech, PSL Université - Centre de Géosciences.

Gupta, H., K. Harald, and G. Martinez (2009). Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377(1-2), 80–91.

Kilic, D., A. Rivière, N. Gallois, S. Wang, and N. Flipo (2021). Simulation du transport de chaleur au sein de la plateforme de modélisation des hydrosystèmes CaWaQS. Rapport technique PIREN-Seine phase VIII, MINES ParisTech, PSL Université - Centre de Géosciences.

Kling, H., M. Fuchs, and M. Paulin (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424-425, 264–277.

Labarthe, B. (2016). *Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème Seine par modélisation multi-échelle*. Thèse de doctorat, MINES ParisTech, PSL Research University.

Maillot, M. (2019). *Étude des remontées de nappe de Paris et de la Petite Couronne lors des épisodes de crue de la Seine et de la Marne*. Thèse de doctorat, MINES ParisTech, PSL Research University.

Massei, N. and M. Fournier (2012). Assessing the expression of large-scale climatic fluctuations in the hydrological variability of daily Seine river flow (France) between 1950 and 2008 using Hilbert-Huang Transform. *Journal of Hydrology* 448-449, 119–128.

Massei, N., B. Laignel, J. Deloffre, J. Mesquita, A. Motelay, R. Lafite, and A. Durand (2010). Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950-2008. *International Journal of Climatology* 30(14), 2146–2154.

Mégnién, C. (1980). *Synthèse géologique du bassin de Paris*. Mémoire du BRGM - n°102, Volume II. BRGM.

Nash, J. and J. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I, a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.

Passy, P., P. Viennot, N. Gallois, G. Billen, J. Garnier, M. Silvestre, V. Thieu, and N. Flipo (2018). Modélisation des apports diffus d'azote et de phosphore aux masses d'eau de surface du bassin Seine-Normandie. Technical report, PIREN-Seine.

Schuite, J., N. Flipo, N. Massei, A. Rivière, and F. Baratelli (2019). Improving the spectral analysis of hydrological signals to efficiently constrain watershed properties. *Water Resources Research* 55(5), 4043–4065.

Valette, L. and A. Cunillera (2010). Cahiers techniques SYRAH-CE. Rapport technique d'étude, ONEMA - Cemagref Lyon.

Viennot, P. and E. Ledoux (2003). Modélisation mathématique du système hydrogéologique du Bassin Parisien - Application au site de l'Est : Modification de la structure discrétisée du modèle régional et simulation de transport de traceurs à l'échelle régionale. Rapport technique d'étude LHM/RD/03/52, Centre d'Informatique Géologique - Ecole des Mines de Paris - Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire.