



Rapport technique d'étude

Référence Centre de Géosciences : R24102022NGAL

Référence de contrat ARMINES : 210000353

Transfert de l'application numérique MODCOU 'Tertiaire - Île-de-France' sous architecture EauDyssée

Projet Aqui-FR - Phase 3

*Prévisions saisonnières de la ressource en eau souterraine à l'échelle
nationale issue d'un système multi-modèle*

Nicolas GALLOIS

ARMINES/Mines Paris, PSL Université, Centre de Géosciences



Octobre 2022

ARMINES/Mines Paris, PSL Université, Centre de Géosciences
35, rue Saint-Honoré
F-77 305 FONTAINEBLEAU Cedex

Introduction	vii
1 Description de l'application EauDyssée '<i>Tertiaire-Île-de-France</i>'	1
1.1 Principales caractéristiques structurales	1
1.1.1 Limites du domaine	1
1.1.2 Zone non saturée	2
1.1.3 Compartiment aquifère et relations avec le domaine de surface	3
1.2 Opérations préliminaires à la recalibration	8
1.2.1 Mise à jour des données de prélèvements souterrains	8
1.2.2 Exploitation préliminaire des flux de forçages SURFEX V8F	12
2 Recalibration de l'hydrodynamisme aquifère	15
2.1 Conditions initiales - Régime permanent	15
2.2 Performances de calibration - Régime transitoire	18
2.2.1 Critères statistiques d'évaluation	18
2.2.2 Résultats de simulation	19
Conclusion	31
Bibliographie	33

1	Description des horizons aquifères du bassin de la Seine dans les différentes applications régionales EauDyssée intégrées dans la plate-forme Aquif'FR, en fin de phase 2 du projet.	viii
1.1	Délimitation du domaine d'étude et types de limites latérales. Réseau hydrographique modélisé (bleu foncé) et réseau de drainage de surface associé (bleu clair).	2
1.2	Épaisseur maillée du compartiment non saturé, exprimée en nombre de réservoirs de <i>Nash</i> ainsi qu'en classes d'épaisseurs équivalentes (m).	3
1.3	Lithologies modélisées au sein de l'application MODCOU/EauDyssée <i>Tertiaire-Île-de-France</i> . Organisation des couches aquifères à l'affleurement.	4
1.4	Extensions et maillages respectifs des couches constitutives du système aquifère : (a) ensemble détritique de Sologne, (b) calcaires de Pithiviers, (c) calcaires d'Etampes, (d) sables de Fontainebleau et calcaires de Brie, (e) calcaires de Champigny ss., (f) calcaires de Saint-Ouen, (g) calcaires du Lutétien et sables du Cuisien, (h) sables du Thanétien et (i) Craie. Les secteurs affleurants apparaissent en beige.	5
1.5	Stratigraphie modélisée. Les horizons aquitards, ici mentionnés en gris ne sont pas explicitement décrits dans cette application.	6
1.6	(a) Champ de coefficients de drainance (représenté en $\log_{10}$) (s^{-1}) entre les horizons des calcaires de Pithiviers (horizon supérieur) et d'Etampes (horizon inférieur). (b) Répartition spatiale de l'épaisseur (m) du niveau implicite semi-perméable des molasses du Gâtinais.	7
1.7	Comparatif des topographies maillées de la zone d'étude. Cotes de drainage des formations aquifères de sub-surface et cotes de drainage en rivière : (a) modèle général du bassin de la Seine (Viennot, 2009), (b) application <i>Tertiaire-Île-de-France</i> (Gallois et al., 2017). Les réseaux hydrographiques respectivement inclus aux deux modèles apparaissent en blanc.	8
1.8	Frise chronologique synthétisant les différentes sources de données mobilisées pour décrire les prélèvements d'eau souterraine. Données utilisées avant (haut) et après (bas) la mise à jour de l'application EauDyssée.	9

1.9	Intensités moyennes inter-annuelles (1994-2020) des prélèvements intégrés au modèle <i>Tertiaire-Île-de-France</i> (en $m^3 an^{-1}$), à destination (a) de l'AEP, (b) des industries et (c) du secteur agricole.	10
1.10	(a) Proportions relatives (%) annuelles des trois différents types de prélèvements. (b) Volumes totaux prélevés annuels par type d'usage de l'eau souterraine.	11
1.11	Comparaisons des distributions des lames d'eau infiltrées (en haut) et ruisselées (en bas), exprimées en $mm an^{-1}$, en moyenne sur la période 1985-2020. (a, a') Forçages SURFEX V8F et (b, b') calibration MODSUR (Gallois et al., 2017).	13
1.12	Éléments de comparaison SURFEX-MODSUR : (a) Comparaison des lames infiltrées (Q_i) et ruisselées (Q_r) cumulées, en mm , sur la durée couverte par la simulation : du 01/08/1985 au 31/07/2020, par MODSUR ('MODS.' traits fins) d'une part et SURFEX ('SURF.', traits épais) d'autre part, dans les limites du domaine modélisé. (b) Différentiels SURFEX - MODSUR cumulés des lames infiltrées (Q_i) et ruisselées (Q_r), en mm , sur la durée couverte par la simulation : du 01/08/1985 au 31/07/2020, dans les limites du domaine modélisé. (c) Évolutions comparées des cumuls annuels ruisselés (Q_r), en mm , par les deux méthodes de forçages SURFEX et MODSUR. Cumuls moyennés sur l'ensemble du domaine couvert. (d) Évolutions comparées des cumuls annuels infiltrés (Q_i), en mm , par les deux méthodes de forçages SURFEX et MODSUR. Cumuls moyennés sur l'ensemble du domaine couvert. (e) Évolutions comparés des dynamiques journalières d'infiltration (Q_i), fournies par MODSUR (trait fin orange) et SURFEX (trait rouge épais). Dynamique moyennée, en $mm j^{-1}$, sur l'ensemble du domaine modélisé.	14
2.1	Localisations des piézomètres utilisés pour le calage de l'hydrodynamisme du système aquifère.	16
2.2	Piézométrie initiale utilisée pour la simulation en régime transitoire (calcul en régime permanent). Niveaux des formations à l'affleurement, en $mNGF$. Les figurés ponctuels indiquent l'écart moyen absolu, en m , entre les niveaux simulés aux ouvrages et les niveaux moyens mesurés sur la période de calibration retenue pour la simulation en régime transitoire.	17
2.3	Comparaison des niveaux piézométriques moyens observés et simulés après calibration en régime transitoire, sous forçage SURFEX V8F.	19
2.4	Valeurs des critères de (a) biais et (b) RMSE obtenus après calibration en régime transitoire. Distributions associées respectivement illustrées en encarts (a') et (b'). Dans le cas du biais, un triangle orienté vers le haut (resp. bas) traduit d'une surestimation (resp. sous-estimation) des mesures par la simulation.	20
2.5	(a) Valeurs et (b) distribution associée de l'indicateur R_S (ratio des écarts-types) après recalibration.	21
2.6	Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone 'Beauce' (1/2).	22
2.7	Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone 'Beauce' (2/2).	23

2.8	Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘ <i>Champigny</i> ’ (1/3).	24
2.9	Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘ <i>Champigny</i> ’ (2/3).	25
2.10	Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘ <i>Champigny</i> ’ (3/3).	26
2.11	Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘ <i>Nord-Est</i> ’ (1/2).	27
2.12	Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘ <i>Nord-Est</i> ’ (2/2).	28
2.13	Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘ <i>Nord-Ouest/Craie</i> ’.	29
2.14	Description des horizons aquifères du bassin de la Seine dans les différentes applications régionales EauDyssée intégrées dans la plate-forme Aqui’FR, en fin de phase 3 du projet.	32

La plate-forme *Aqui'FR* comprend actuellement six applications numériques distribuées, sous architecture *EauDyssée* pour décrire les différents horizons lithologiques aquifères du bassin de la Seine. Cinq de ces applications (cf. Fig. 1), dites ‘régionales’ (ou ‘sous-modèles’), assurent une couverture fine de l’auréole de Craie affleurante, *via* les applications *Marne-Loing*, *Marne-Oise*, *Seine-Oise* et *Seine-Eure* (Viennot and Abasq, 2013) d’une part, et des aquifères du Crétacé et du Jurassique de Basse-Normandie (Thierion, 2007), d’autre part. Ces applications ont été intégrées à la plate-forme (Habets et al., 2017), dans l’optique d’une substitution progressive du modèle général du bassin de la Seine (Viennot, 2009), sixième modèle décrivant plus grossièrement l’aquifère de Craie ainsi que les principaux aquifères d’âge tertiaire du domaine (mailles de 1 à 8 km de côté).

L’introduction ici d’une nouvelle application dite ‘*Tertiaire-Île-de-France*’ (Gallois et al., 2017) permet de finaliser cette substitution. Initialement développée pour modéliser l’évolution de la qualité des eaux souterraines vis-à-vis des pollutions nitriques diffuses d’origine agricole¹ (Viennot and Abasq, 2013; Gallois et al., 2018), cette version du modèle décrit neuf horizons, selon une discrétisation homogène à celles des autres ‘sous-modèles’, selon des mailles variant entre 250 m et 2 km de côté. À l’origine conçue sous suite logicielle MODCOU-NEWSAM (Ledoux, 1980) et calibrée sous forçages météorologiques SAFRAN, cette application a fait, dans le cadre de ces travaux, l’objet d’une transposition sous architecture *EauDyssée*, en prévision de son entrée dans la plate-forme *Aqui'FR*. L’hydrodynamisme souterrain a, par ailleurs, été recalibré, sous forçages SURFEX (Masson et al., 2013), dans leur dernière version disponible V8F.

Ce document² décrit les principales caractéristiques de l’application transposée et détaille les performances de restitution de l’hydrodynamisme souterrain simulé après recalibration.

1. Études menées pour l’Agence de l’Eau Seine-Normandie et la DRIEE Île-de-France.

2. Ce rapport répond au point **2.4** intitulé *Extension du domaine d’étude, amélioration des applications* de la proposition technique d’étude associée à la convention de subvention OFB 21-1299.

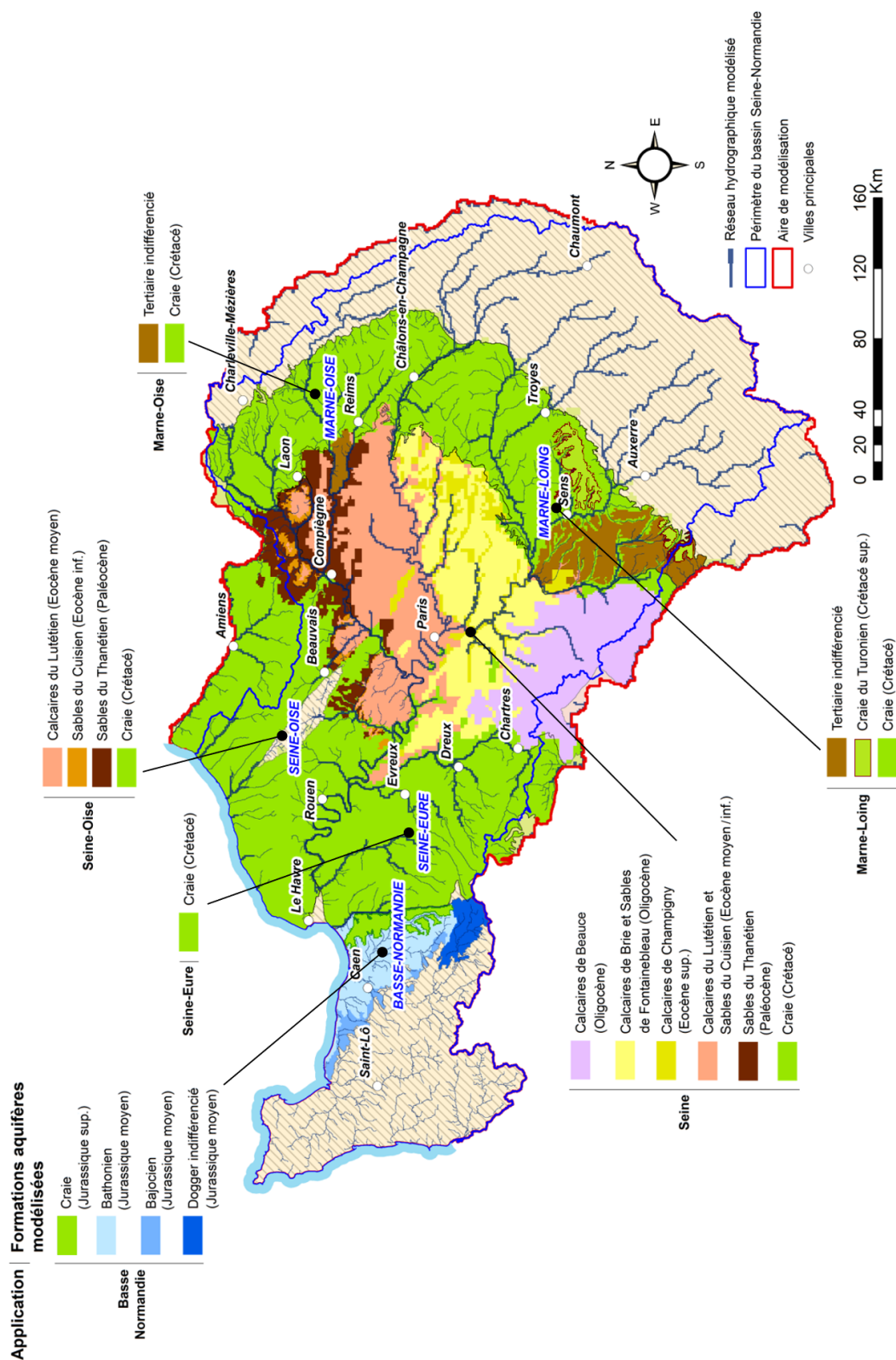


FIGURE 1 – Description des horizons aquifères du bassin de la Seine dans les différentes applications régionales EauDyssée intégrées dans la plate-forme Aquif'FR, en fin de phase 2 du projet.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DE L'APPLICATION EAUDYSSÉE 'TERTIAIRE-ÎLE-DE-FRANCE'

Ce chapitre présente les principales caractéristiques de structure de la nouvelle application *Tertiaire-Île-de-France*, telle que transposée sous architecture EauDyssée. Il illustre, par ailleurs, les principales étapes de mise à jour réalisées, préliminairement à l'exercice de recalibration.

Sommaire

1.1 Principales caractéristiques structurales	1
1.1.1 Limites du domaine	1
1.1.2 Zone non saturée	2
1.1.3 Compartiment aquifère et relations avec le domaine de surface	3
1.2 Opérations préliminaires à la recalibration	8
1.2.1 Mise à jour des données de prélèvements souterrains	8
1.2.2 Exploitation préliminaire des flux de forçages SURFEX V8F	12

1.1 Principales caractéristiques structurales

1.1.1 Limites du domaine

Cette application couvre une surface à l'affleurement de $22\,112\text{ km}^2$. Ses limites latérales sont de deux types :

- hydrauliques : ce type de limite se retrouve sur l'ensemble des bordures Nord et Sud du modèle, respectivement constituées par des bras de l'Oise, la Troësne, l'Epte, l'Aisne et l'Eure d'une part, le Loing et la Loire d'autre part,
- géologiques : c'est le cas en bordure Est de la zone d'étude, le long de la cuesta d'Île-de-France, marquant la limite entre les plateaux tertiaires et la plaine de Champagne crayeuse.

En bordure des bassins de la Seine et de la Loire, une limite piézométrique définie par la ligne de partage des eaux souterraines entre ces deux bassins est considérée (cf. Fig. 1.1). Enfin, en limite verticale inférieure du modèle, de même qu'aux extrémités latérales, une limite à flux nul est considérée. Dédit d'un réseau de drainage construit sur la base d'une analyse d'un MNT à résolution de

250 m, un linéaire total de 6 053 km est représenté dans le modèle, *via* 17 472 mailles rivières de 250 et 500 m de côté.

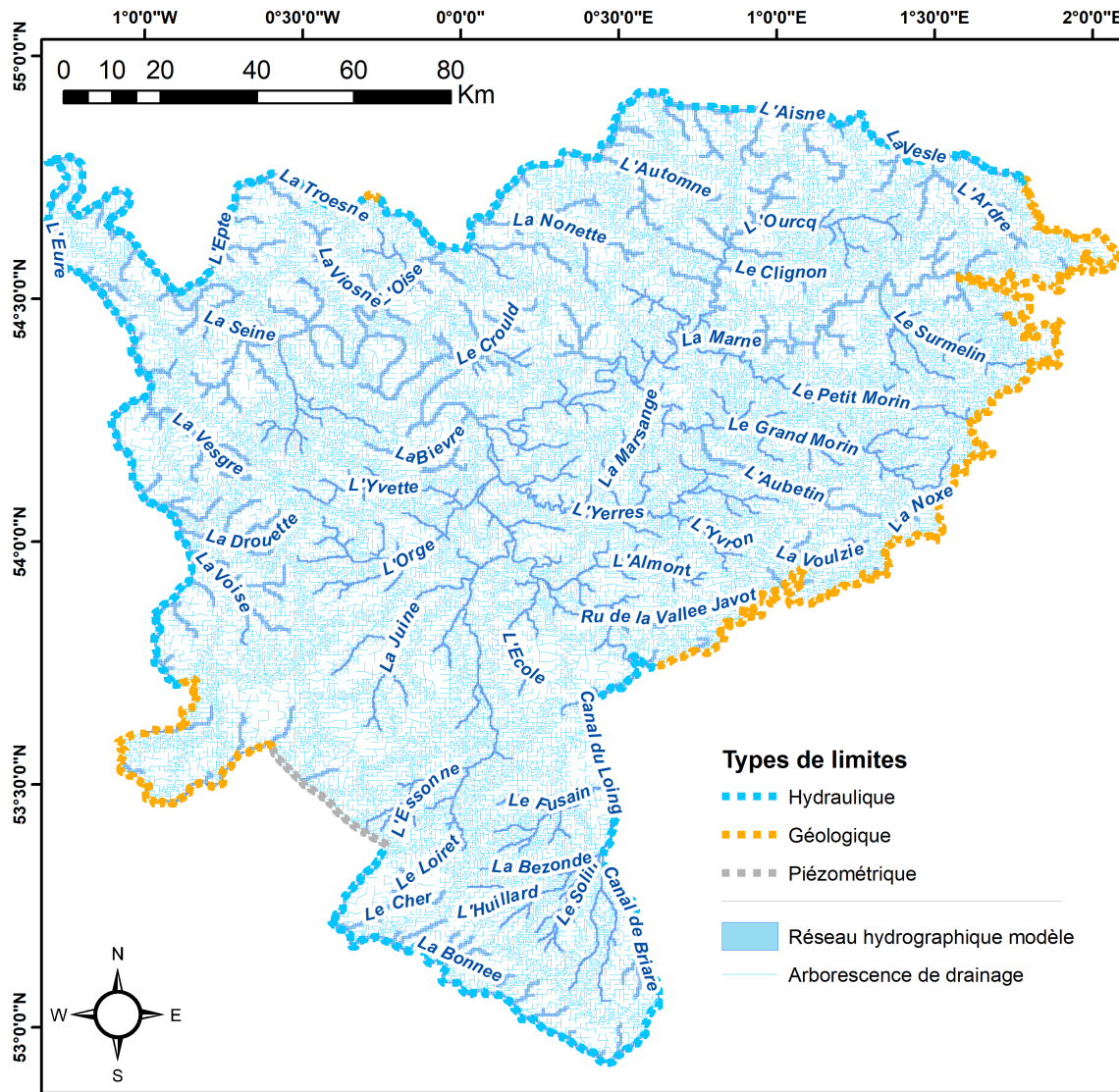


FIGURE 1.1 – Délimitation du domaine d'étude et types de limites latérales. Réseau hydrographique modélisé (bleu foncé) et réseau de drainage de surface associé (bleu clair).

1.1.2 Zone non saturée

Un maillage¹ constitué de 95 394 mailles gigognes assure le support des écoulements verticaux au sein de la zone vadose. Quatre ordres de mailles sont recensés (250 m, 500 m, 1 et 2 km de côté).

1. À l'exception de l'arborescence du réseau hydrographique, le compartiment de surface, tel que décrit dans la suite MODCOU, n'a pas fait l'objet d'une transposition sous EauDyssée. En effet, la grille de forçage SURFEX (cf. Figs. 1.11a et 1.11a') s'y substitue directement ici.

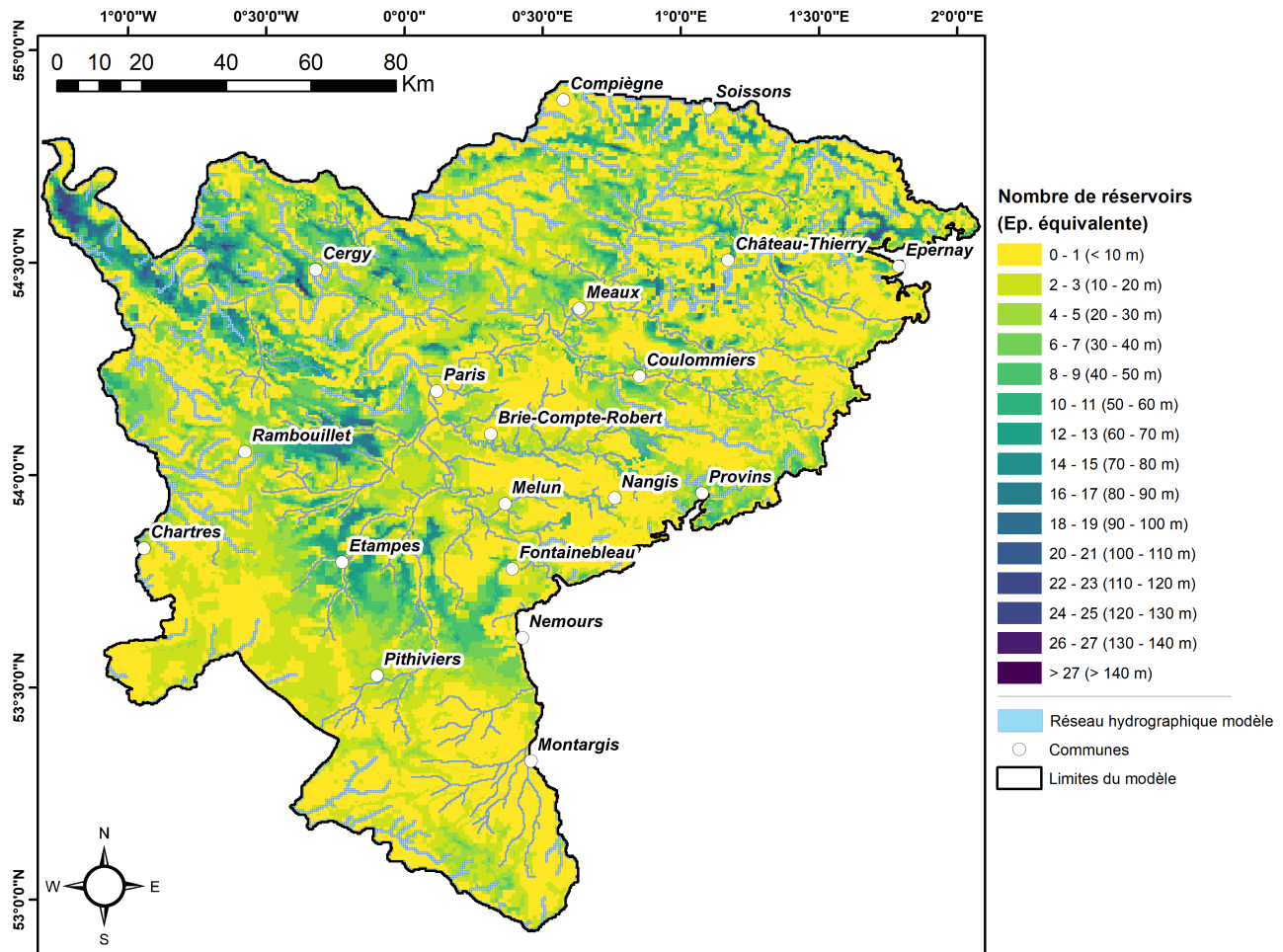


FIGURE 1.2 – Épaisseur maillée du compartiment non saturé, exprimée en nombre de réservoirs de Nash ainsi qu'en classes d'épaisseurs équivalentes (m).

1.1.3 Compartiment aquifère et relations avec le domaine de surface

Les trois principaux systèmes complexes du domaine sont ici scindés en huit horizons aquifères, datés du plus récent au plus ancien, du Burdigalien (Miocène) au Thanétien (Paléocène). Une neuvième couche représente la Craie du Crétacé supérieur, de façon restreinte au nord-ouest du domaine, là où celle-ci sub-affleure (cf. Fig. 1.4). De fait, les échanges verticaux avec la Craie sous couverture tertiaire (*i.e.* là où non modélisée) seront négligés par la suite. L'ensemble de ces couches comptabilisent un total de 157 199 mailles.

Les figures 1.3 et 1.5 présentent l'organisation de ces couches à l'affleurement ainsi que leurs principales caractéristiques respectives. Les caractéristiques et particularités lithologiques de ces formations sont très largement décrites dans [Gallois et al. \(2017\)](#) et ne seront pas reprises ici.

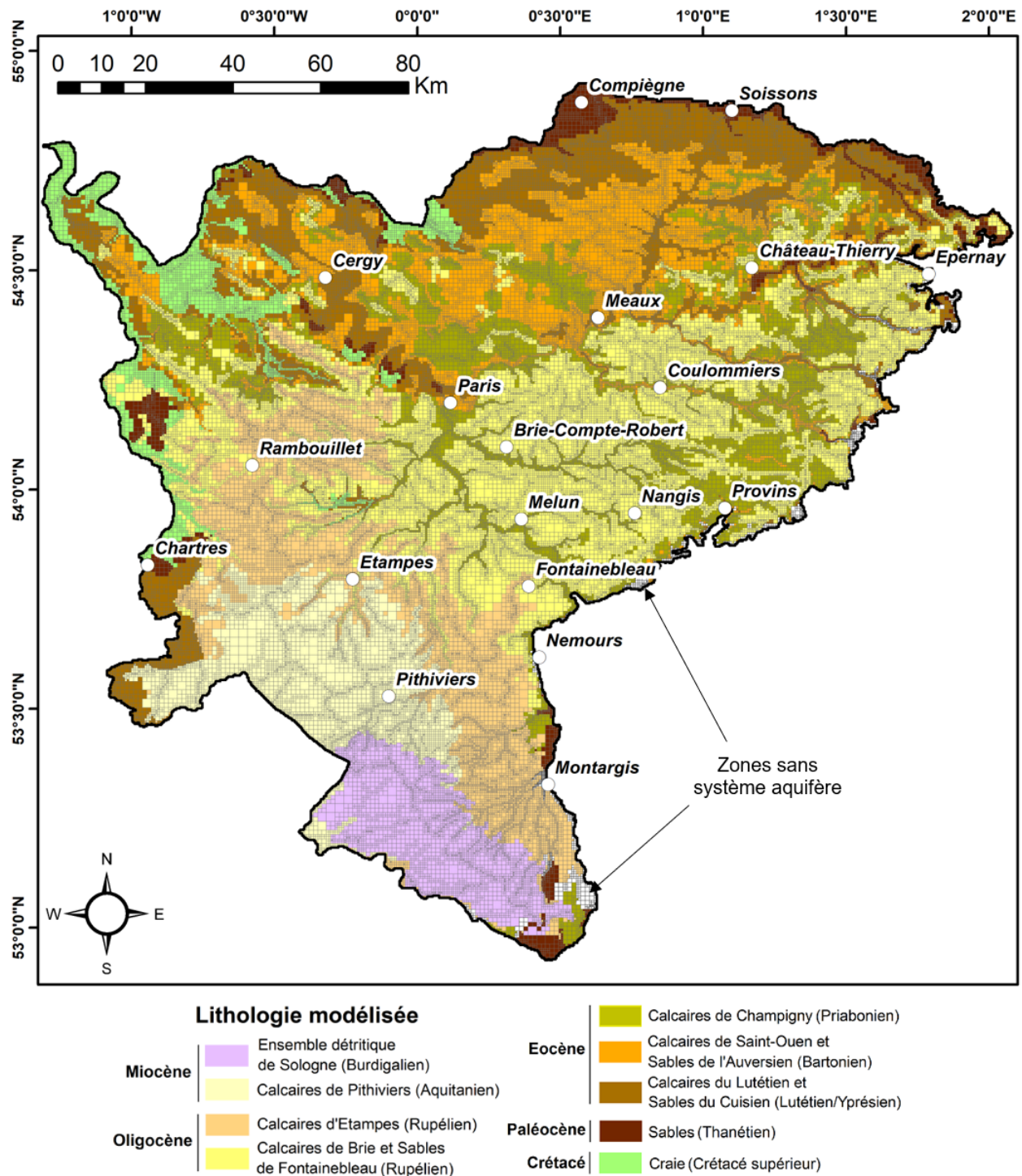


FIGURE 1.3 – Lithologies modélisées au sein de l'application MODCOU/EauDyssée *Tertiaire-Île-de-France*. Organisation des couches aquifères à l'affleurement.

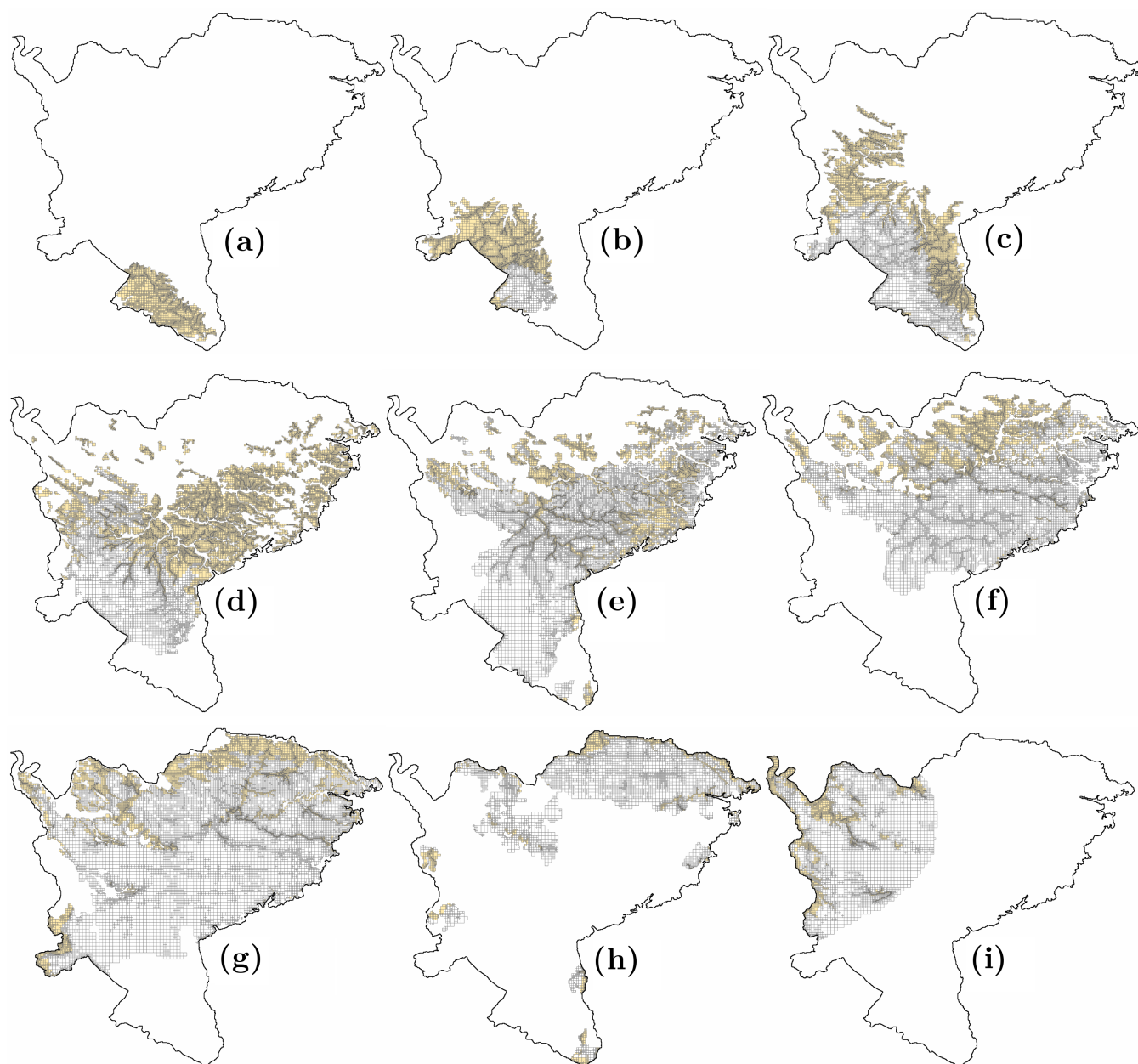


FIGURE 1.4 – Extensions et maillages respectifs des couches constitutives du système aquifère : (a) ensemble détritique de Sologne, (b) calcaires de Pithiviers, (c) calcaires d'Etampes, (d) sables de Fontainebleau et calcaires de Brie, (e) calcaires de Champigny *ss.*, (f) calcaires de Saint-Ouen, (g) calcaires du Lutétien et sables du Cuisien, (h) sables du Thanétien et (i) Craie. Les secteurs affleurants apparaissent en beige.

Série	Etage	Couche aquifère modélisée	Surface modélisée (km ²)	Nombre de mailles	Système aquifère majeur
Miocène inférieur	Burdigalien	ensemble détritique de Sologne	1159	4267	« Nappe de Beauce »
	Aquitaniien	marnes de Blamont			
		calcaires de Pithiviers	2435	7445	
Oligocène	Rupélien	molasses de Gâtinais			« Nappe de l'Oligocène »
		calcaires d'Etampes	5678	16795	
		sables de Fontainebleau & calcaires de Brie	9659	32152	
		marnes Vertes et Supragypseuses			
Eocène supérieur	Priabonien	calcaires de Champigny ss.	11721	30618	« Nappe de Champigny sl. »
		marnes Infragypseuses			
Eocène moyen	Bartonien	calcaires de Saint-Ouen & sables de l'Auvésien	11161	23549	
Eocène inférieur	Lutétien/ Yprésien	Marnes et Caillassees			
		calcaires du Lutétien & sables du Cuisien	16347	24608	
		argiles du Sparnacien			
Paléocène	Thanétien	sables du Thanétien	5960	8618	
Crétacé supérieur	Crétacé	Craie	6590	9147	-

FIGURE 1.5 – Stratigraphie modélisée. Les horizons aquitards, ici mentionnés en gris ne sont pas explicitement décrits dans cette application.

Bien que non décrites au moyen d'une couche maillée dédiée, les extensions et épaisseurs des formations semi-perméables recensées (cf. Tab. 1.5) ont été ici prises en compte dans le paramétrage du modèle, et ce, plus particulièrement dans la spatialisation des coefficients de drainance.

Ce paramètre permet de moduler les quantités d'eau échangée verticalement entre les couches en communication hydraulique directe. Afin de distribuer du mieux possible les champs associés à chaque couche aquifère, les extensions et épaisseurs respectives (Abasq et al., 2013) des différentes épontes intervenant dans la structure géologique (*e.g.* marnes de Blamont, molasses du Gâtinais, marnes Vertes et Supragypseuses, etc.) compartimentant les niveaux aquifères ont été prises en compte au sein de ce calcul. Un exemple en est donné en figures 1.6a et 1.6b, dans le cas du calcul du champ de coefficients de drainance de l'horizon des calcaires d'Etampes vers les calcaires de Pithiviers (présence des molasses lacunaires du Gâtinais entre ces deux niveaux aquifères). Cependant, faute d'informations, les valeurs initiales de perméabilités verticales associées aux formations semi-perméables ont été initialement ajustées de façon arbitraire puis localement remodulées afin d'améliorer la représentation des niveaux piézométriques par le modèle.

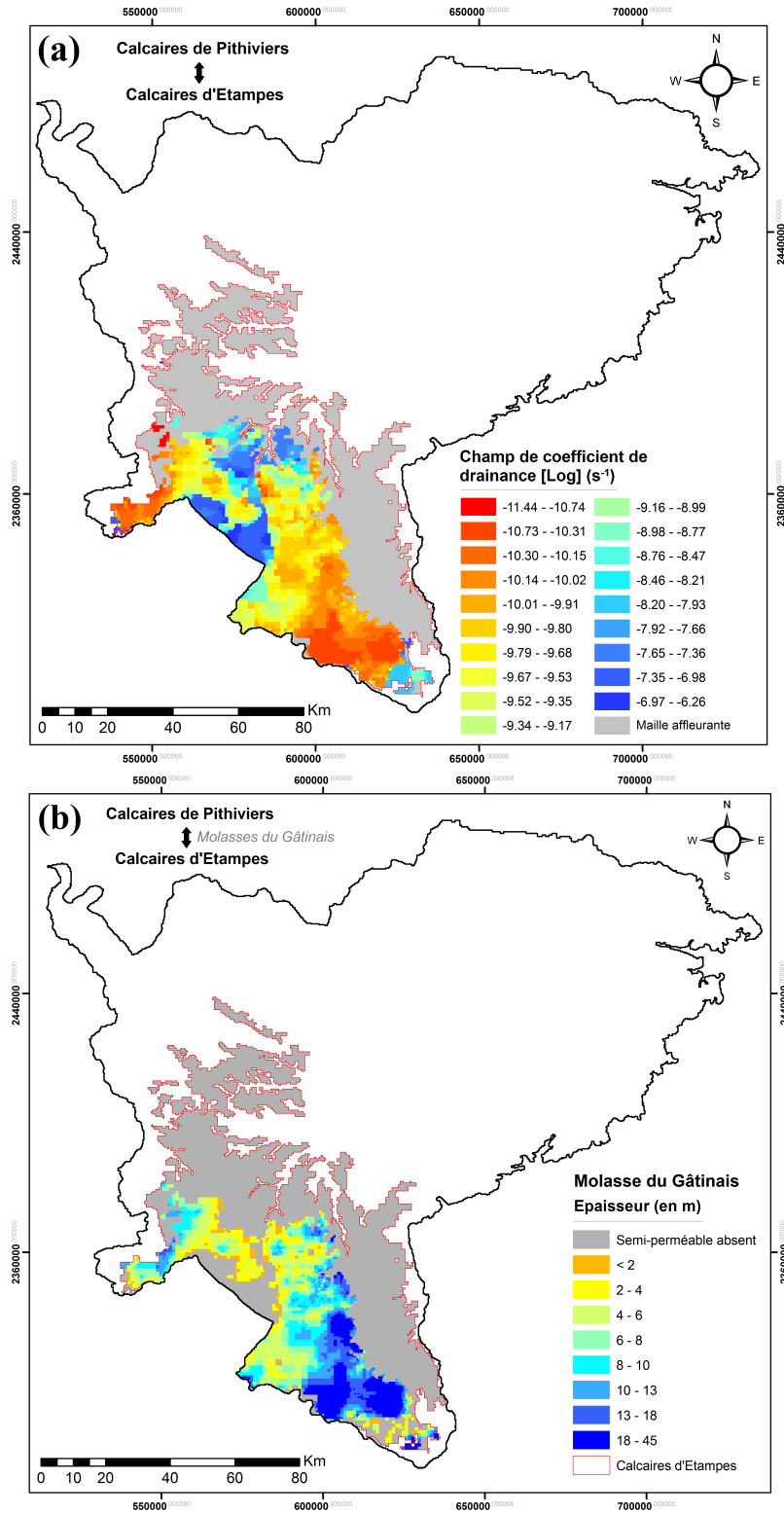


FIGURE 1.6 – (a) Champ de coefficients de drainance (représenté en $\log_{10}$) (s^{-1}) entre les horizons des calcaires de Pithiviers (horizon supérieur) et d'Etampes (horizon inférieur). (b) Répartition spatiale de l'épaisseur (m) du niveau implicite semi-perméable des molasses du Gâtinais.

Comparativement à l'application générale du bassin de la Seine (Viennot, 2009), cette nouvelle application permet une meilleure contrainte des formations aquifères sub-affleurantes (cf. Fig. 1.7) notamment par une intégration d'un réseau hydrographique plus détaillé (description fine des vallées, etc.)².

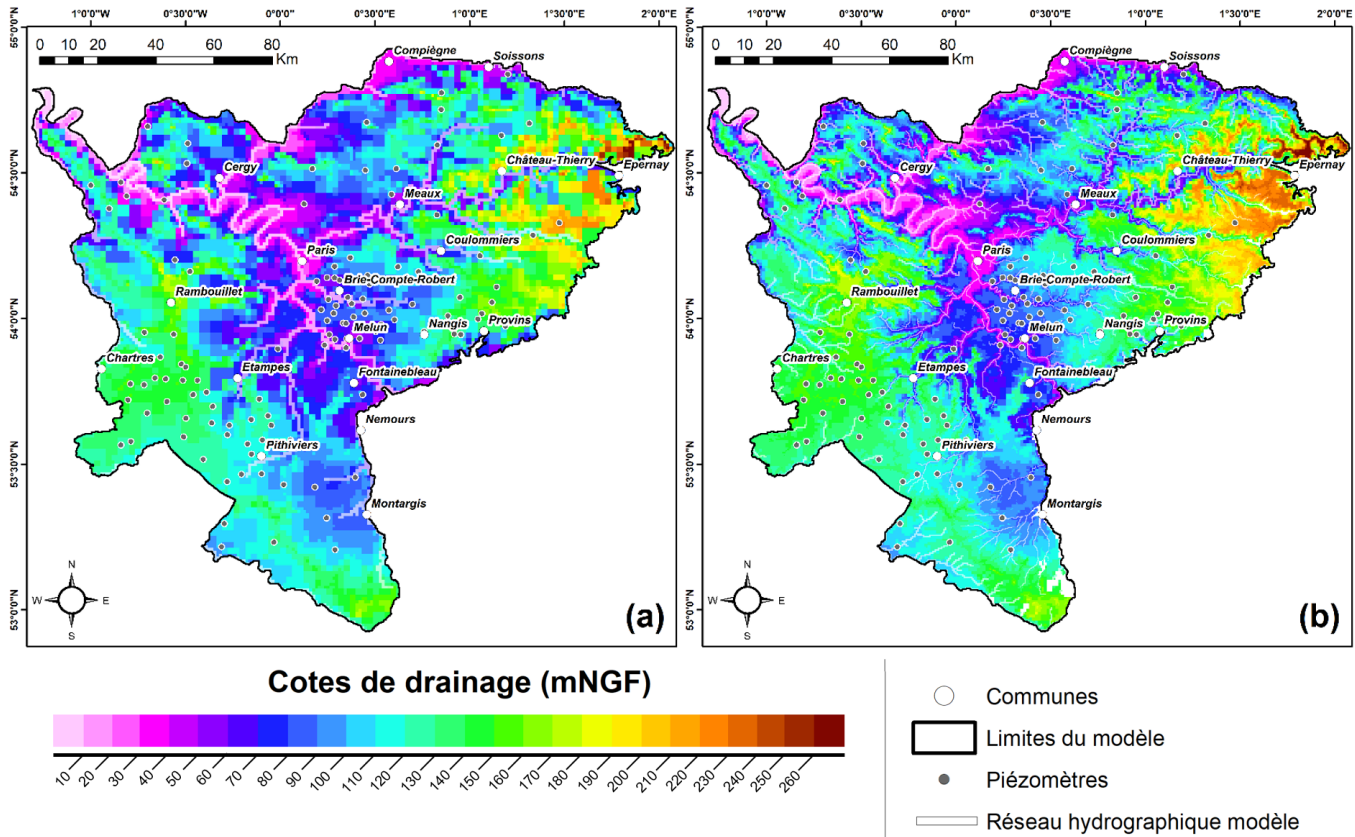


FIGURE 1.7 – Comparatif des topographies maillées de la zone d'étude. Cotes de drainage des formations aquifères de sub-surface et cotes de drainage en rivière : (a) modèle général du bassin de la Seine (Viennot, 2009), (b) application *Tertiaire-Île-de-France* (Gallois et al., 2017). Les réseaux hydrographiques respectivement inclus aux deux modèles apparaissent en blanc.

1.2 Opérations préliminaires à la recalibration

1.2.1 Mise à jour des données de prélèvements souterrains

Sous version MODCOU initiale, l'application mobilise les données de déclarations annuelles de prélèvements d'eau souterraine, fournies par les agences de l'eau Seine-Normandie et Loire-Bretagne (région de Beauce). Ces données brutes couvrent la période 1994-2012. Dans le cadre de ces travaux,

2. Dans les limites de l'application *Tertiaire-Île-de-France*, le modèle général de la Seine n'intègre que 1 500 km de rivières environ.

la période de simulation ayant été mise à jour à fin juillet 2020, les données de prélèvements ont été actualisées, en mobilisant les données de la base nationale BNPE (Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau) sur la période 2012-2020. La frise proposée en figure 1.8 synthétise les sources des données de prélèvements utilisées au cours de la simulation. En raison de trop grosses lacunes, voire de quantités significatives de données encore indisponibles sur l'année 2020, ce sont, dans ce cas, les données de 2019 qui sont considérées. Dans le cas de la période pré-1994, aucune donnée n'est disponible. De fait, des prélèvements moyens, calculés sur la période 1995-2000 sont considérés.

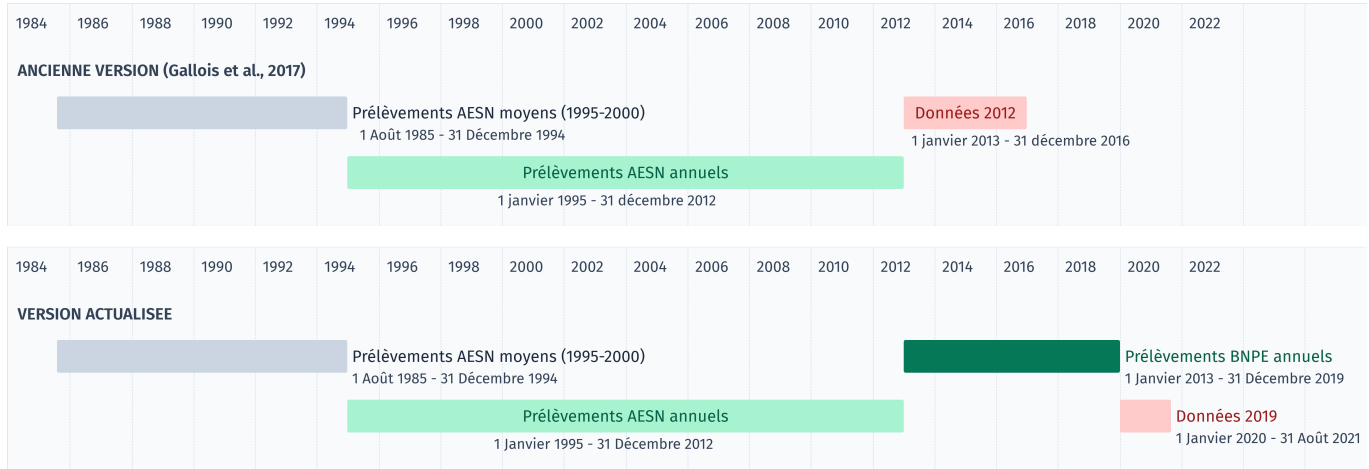


FIGURE 1.8 – Frise chronologique synthétisant les différentes sources de données mobilisées pour décrire les prélèvements d'eau souterraine. Données utilisées avant (haut) et après (bas) la mise à jour de l'application EauDyssée.

Les prélèvements intégrés sont de trois types : alimentation en eau potable (AEP), agricoles et industriels. Les figures 1.9a à 1.9c ci-après représentent, par type, les intensités inter-annuelles moyennes des prélèvements intégrés au modèle, calculées sur la période 1995-2020.

Pour un volume total moyen prélevé sur la zone modélisée d'environ 474 Mm^3 sur la période 1994-2020, les prélèvements les plus stables sont les prélèvements industriels (8,5 % des prélèvements totaux en moyenne, soit 40 Mm^3). Liés aux conditions climatiques, les prélèvements agricoles présentent une plus grande amplitude de variation, allant de 7 à 31 % des prélèvements totaux (moyenne de 22 % soit 104 Mm^3). Majoritaires, les prélèvements AEP représentent en moyenne 70 % du volume total prélevé annuel ou environ 329 Mm^3 (cf. Fig. 1.10).

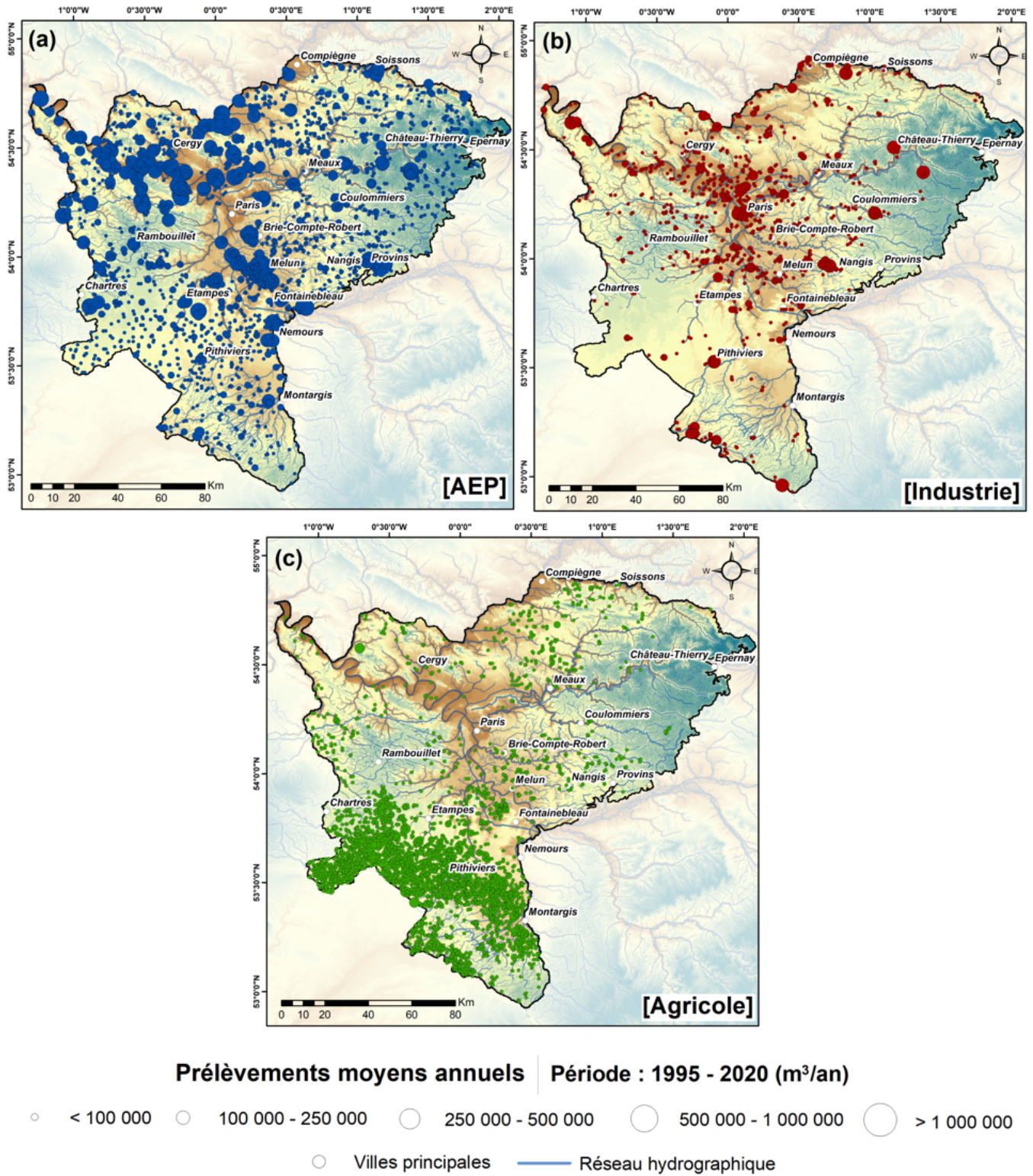


FIGURE 1.9 – Intensités moyennes inter-annuelles (1994-2020) des prélèvements intégrés au modèle *Tertiaire-Île-de-France* (en $m^3 an^{-1}$), à destination (a) de l'AEP, (b) des industries et (c) du secteur agricole.

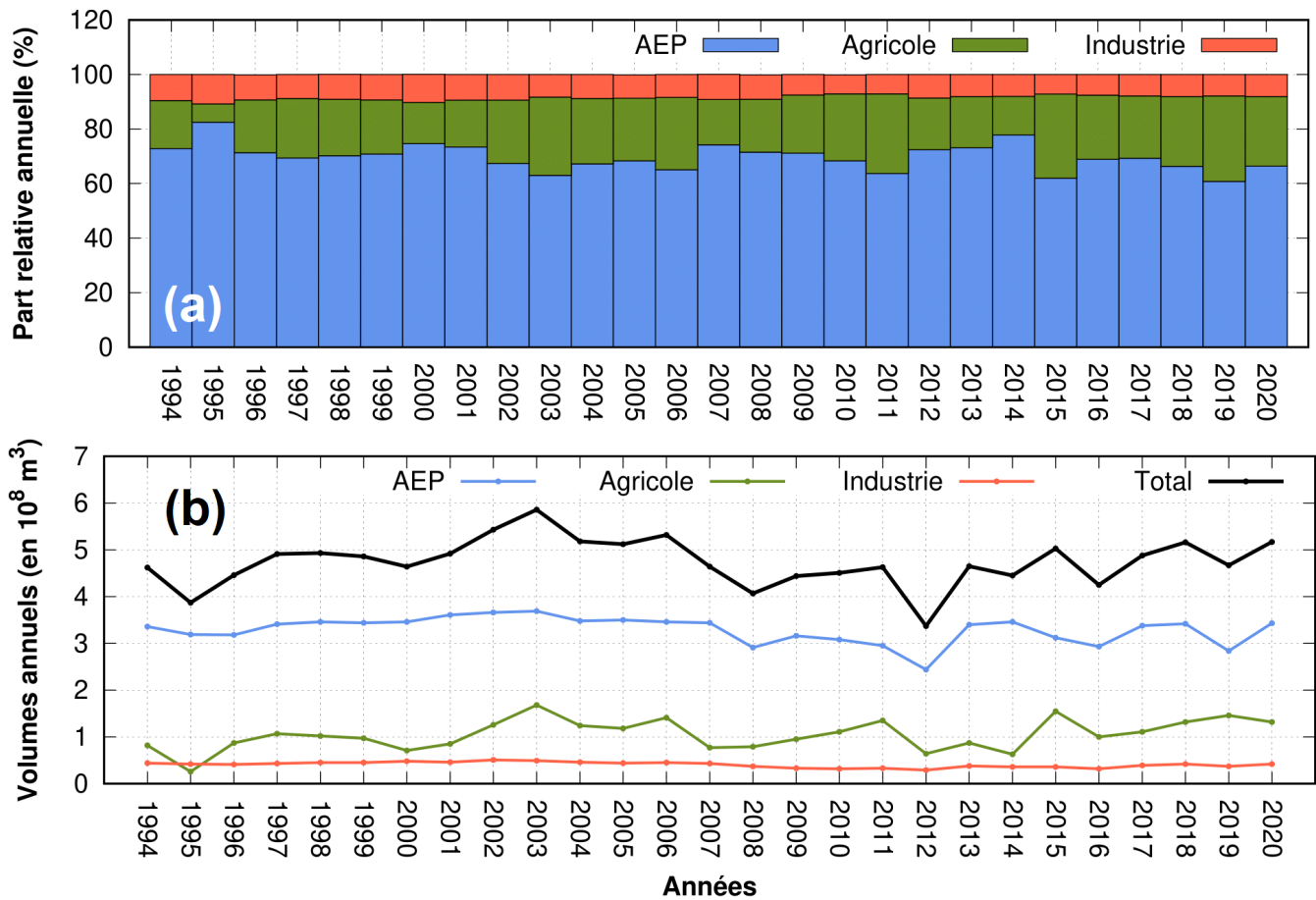


FIGURE 1.10 – (a) Proportions relatives (%) annuelles des trois différents types de prélèvements. (b) Volumes totaux prélevés annuels par type d'usage de l'eau souterraine.

Mode de répartition temporelle des prélèvements : Qu'il s'agisse de prélèvements AEP ou à destination de l'industrie, les volumes déclarés annuels sont répartis de façon homogène au cours des différents mois de l'année. Les prélèvements agricoles, eux, sont concentrés autour de la période estivale, entre les mois de mai à août avec la répartition suivante (en termes de pourcentages du volume déclaré annuel) : 20 % en mai, 30 % en juin, 30 % en juillet et 20 % en août.

Mode de répartition verticale des prélèvements : Si les bases de données permettent d'approximer la localisation des différents points de prélèvements, la série des formations captées reste majoritairement non renseignée. Certaines règles de localisation automatique des prélèvements ont ainsi été instaurées lorsque l'horizon (ou série aquifère) capté n'est pas mentionné dans les bases de données. Ces règles sont héritées de [Viennot \(2009\)](#) et [Abasq et al. \(2013\)](#) : *Pour les captages AEP, l'aquifère capté est généralement précisé, ce qui permet d'affiner la prise en compte des prélèvements. Pour les puits agricoles ou industriels, lorsque l'aquifère n'est pas précisé, on suppose que le prélèvement est effectué dans la couche aquifère la plus en surface. Lorsque plusieurs aquifères sont*

indiqués, le volume total est réparti sur chaque couche aquifère, au prorata de son épaisseur mouillée. Les prélèvements ne sont effectués que lorsque la couche cible présente au moins 20 m d'épaisseur mouillée. Si tel n'est pas le cas, mais que l'épaisseur mouillée est d'au moins de 10 m, le prélèvement est équitablement réparti sur cette couche et la suivante ayant une épaisseur mouillée minimale de 10 m. Enfin, dans le cas d'une épaisseur mouillée inférieure à 10 m, les prélèvements sont reportés sur une couche plus profonde selon les règles énoncées précédemment'.

1.2.2 Exploitation préliminaire des flux de forçages SURFEX V8F

Les forçages SURFEX fournissent des flux horaires d'infiltration et de ruissellement, distribués selon un pas spatial régulier de 8 km. 418 mailles couvrent le domaine d'étude. Dans le cadre de ces travaux, ces flux (cf. Figs. 1.11a et 1.11b) se substituent aux productions ruisselées et infiltrées initialement calculées par le module de surface de la suite MODCOU : MODSUR. Ce dernier, centré autour de *fonctions-productions* permet, entre autres, une estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) et la répartition de la lame d'eau disponible au sol entre infiltration et ruissellement à partir des précipitations totales (pluie et neige) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Ces calculs sont réalisés *via* une conceptualisation paramétrique à réservoirs.

Afin d'anticiper l'ampleur de la recalibration à réaliser, une brève analyse comparative des productions initialement calibrées *via* MODSUR (Gallois et al., 2017) d'une part et des flux fournis par SURFEX, d'autre part, à été menée. Les figures 1.11 et 1.12 en synthétisent les principaux résultats.

D'une manière générale, l'approche SURFEX produit des lames d'eau efficaces plus importantes que MODSUR à l'échelle du domaine d'étude. Les flux infiltrés apparaissent globalement cohérents, de part et d'autre, tant du point de vue spatial (cf. Fig. 1.11) que temporel (cf. Figs. 1.12d et 1.12e). Notons cependant, dans le cas de SURFEX, une absence surprenante de l'empreinte liée aux grandes étendues urbanisées du centre d'Île-de-France, sur l'infiltration et le ruissellement. En moyenne inter-annuelle 1985-2020, et de manière intégrée à l'échelle de l'ensemble du domaine modélisé, des surplus de +13 et +27 % environ sont respectivement identifiés sur les flux d'infiltration et ruissellement SURFEX, comparativement à MODSUR (131 contre 115 $mm\ an^{-1}$ pour l'infiltration, 56 contre 44 $mm\ an^{-1}$ pour le ruissellement).

Les lames ruisselées, elles, diffèrent assez significativement dans leurs distributions. L'approche MODSUR tend à infiltrer une majeure partie de la lame efficace aux niveaux des zones agricoles et de privilégier le ruissellement aux niveaux de *fonctions-productions* dédiées sur le secteur de Brie, afin de traduire de l'impact de la présence significative de drains agricoles dans ce secteur. D'une façon générale, le ruissellement SURFEX, lui, apparaît beaucoup plus homogène.

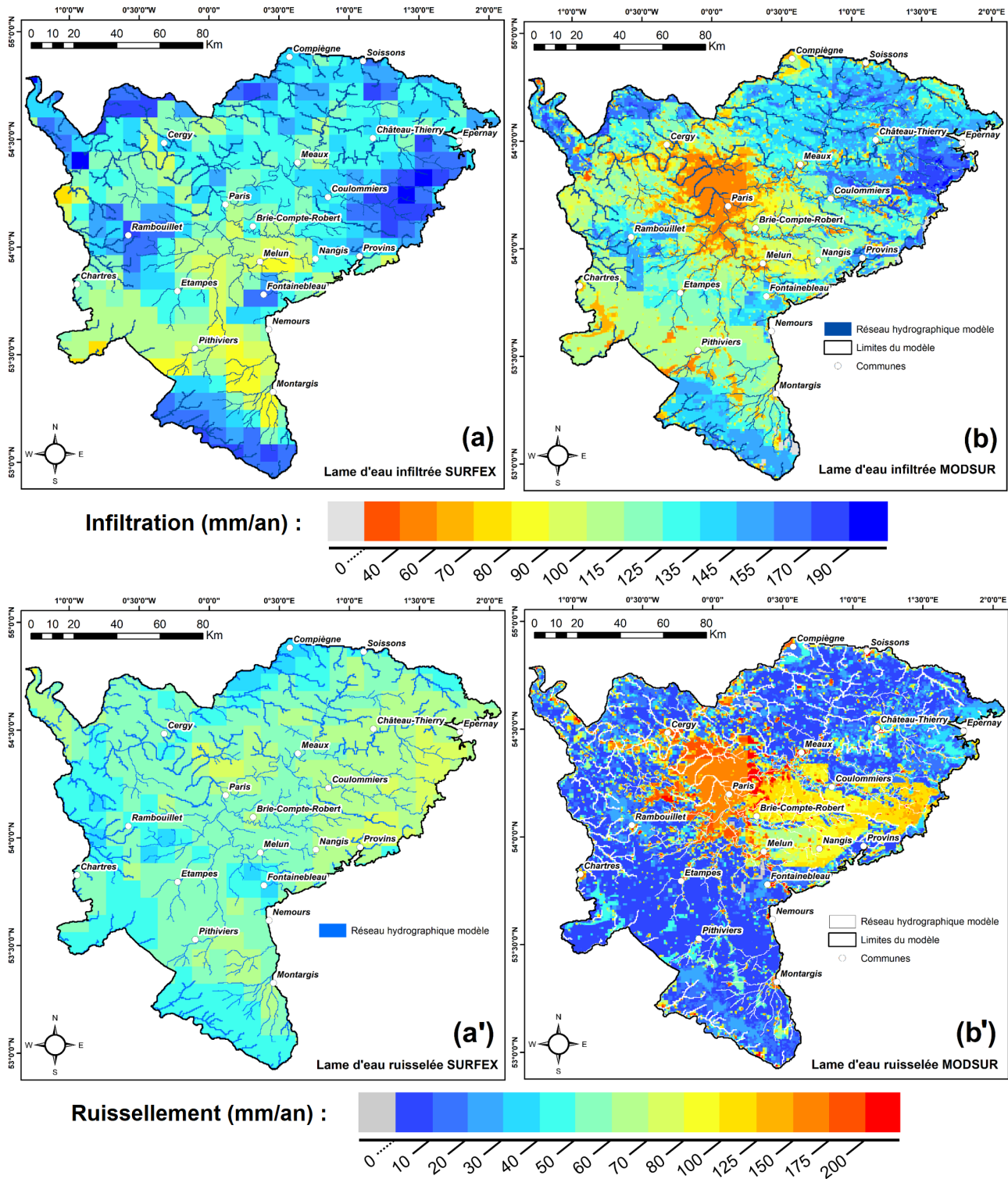


FIGURE 1.11 – Comparaisons des distributions des lames d'eau infiltrées (en haut) et ruisselées (en bas), exprimées en $mm\ an^{-1}$, en moyenne sur la période 1985-2020. (a, a') Forçages SURFEX V8F et (b, b') calibration MODSUR (Gallois et al., 2017).

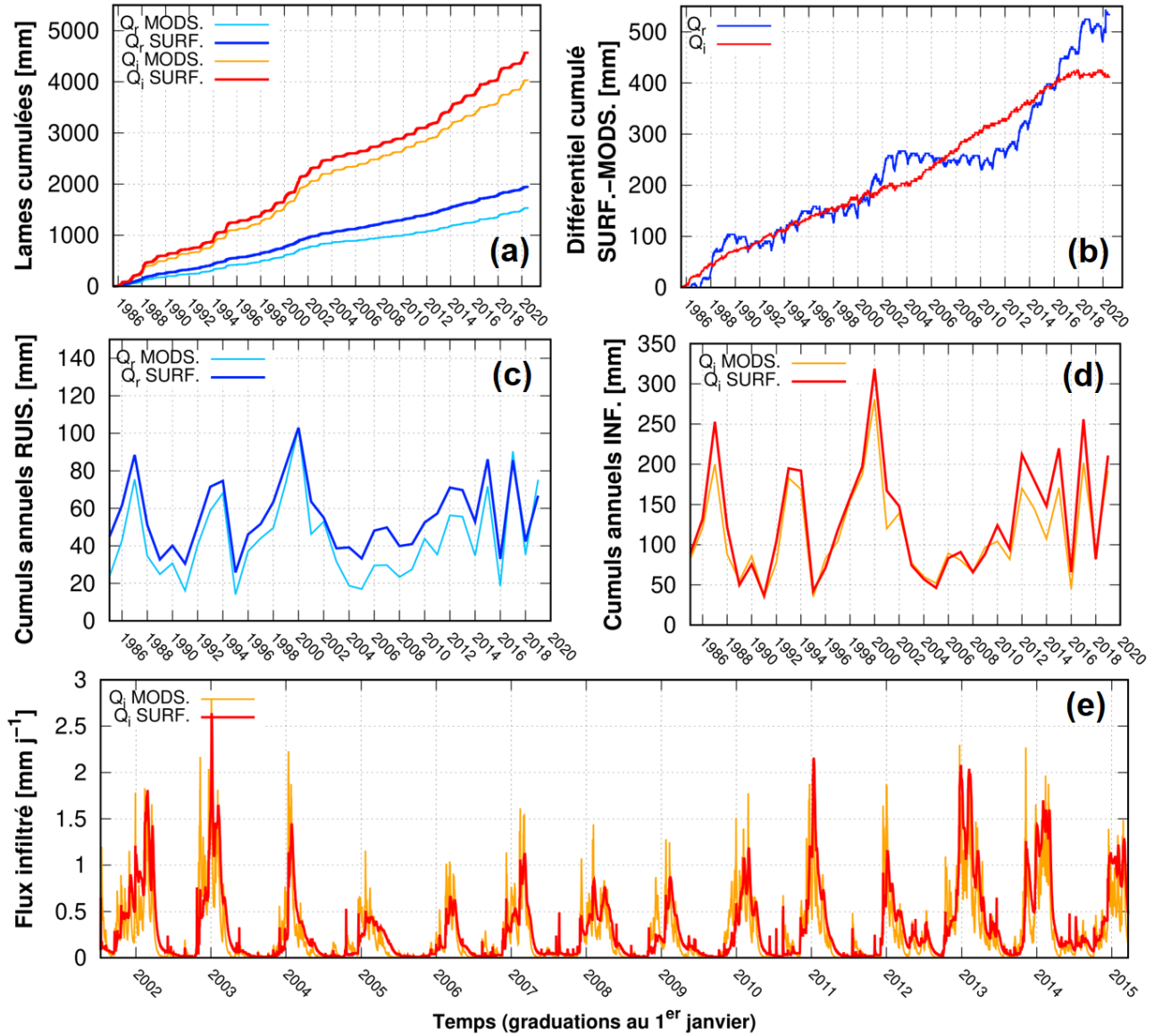


FIGURE 1.12 – Éléments de comparaison SURFEX-MODSUR : (a) Comparaison des lames infiltrées (Q_i) et ruisselées (Q_r) cumulées, en mm , sur la durée couverte par la simulation : du 01/08/1985 au 31/07/2020, par MODSUR ('MODS.' traits fins) d'une part et SURFEX ('SURF.', traits épais) d'autre part, dans les limites du domaine modélisé. (b) Différentiels SURFEX - MODSUR cumulés des lames infiltrées (Q_i) et ruisselées (Q_r), en mm , sur la durée couverte par la simulation : du 01/08/1985 au 31/07/2020, dans les limites du domaine modélisé. (c) Évolutions comparées des cumuls annuels ruisselés (Q_r), en mm , par les deux méthodes de forçages SURFEX et MODSUR. Cumuls moyennés sur l'ensemble du domaine couvert. (d) Évolutions comparées des cumuls annuels infiltrés (Q_i), en mm , par les deux méthodes de forçages SURFEX et MODSUR. Cumuls moyennés sur l'ensemble du domaine couvert. (e) Évolutions comparées des dynamiques journalières d'infiltration (Q_i), fournies par MODSUR (trait fin orange) et SURFEX (trait rouge épais). Dynamique moyennée, en $mm\ j^{-1}$, sur l'ensemble du domaine modélisé.

CHAPITRE 2

RECALIBRATION DE L'HYDRODYNAMISME AQUIFÈRE

L'application transposée sous EauDyssée et mise à jour sur la période 1985-2020, a été forcée au pas de temps journalier, par les flux SURFEX V8F. Par suite, une recalibration des paramètres régissant l'hydrodynamisme souterrain (*i.e.* transmissivités, coefficients d'emmagasinement et de conductance) a été réalisée.

Sommaire

2.1	Conditions initiales - Régime permanent	15
2.2	Performances de calibration - Régime transitoire	18
2.2.1	Critères statistiques d'évaluation	18
2.2.2	Résultats de simulation	19

2.1 Conditions initiales - Régime permanent

Le calcul d'une simulation en régime permanent a été intégrée à la procédure itérative de calibration du compartiment souterrain. Contraint par un champ de recharge moyen (calculé sur la période 1980-1990), ce calcul permet d'assurer des niveaux piézométriques initiaux cohérents avec les niveaux moyens mesurés (cf. Fig. 2.2).

Afin d'évaluer les performances de calibration, les données de 123 piézomètres ont été sélectionnés. Ces ouvrages ont majoritairement été retenus sur des critères de représentativité et de longueur de chroniques. Certains piézomètres additionnels ont été conservés, car présentant une dynamique clairement identifiable, et ce, malgré une chronique lacunaire et/ou un effectif de mesures restreint. Ces séries temporelles ont été extraites depuis la base nationale [ADES](#). La figure 2.1 en précise leurs localisations ainsi que les couches aquifères respectivement observées. Les nombres mentionnés sur cette même figure comptabilisent le nombre d'ouvrages associés à chaque horizon.

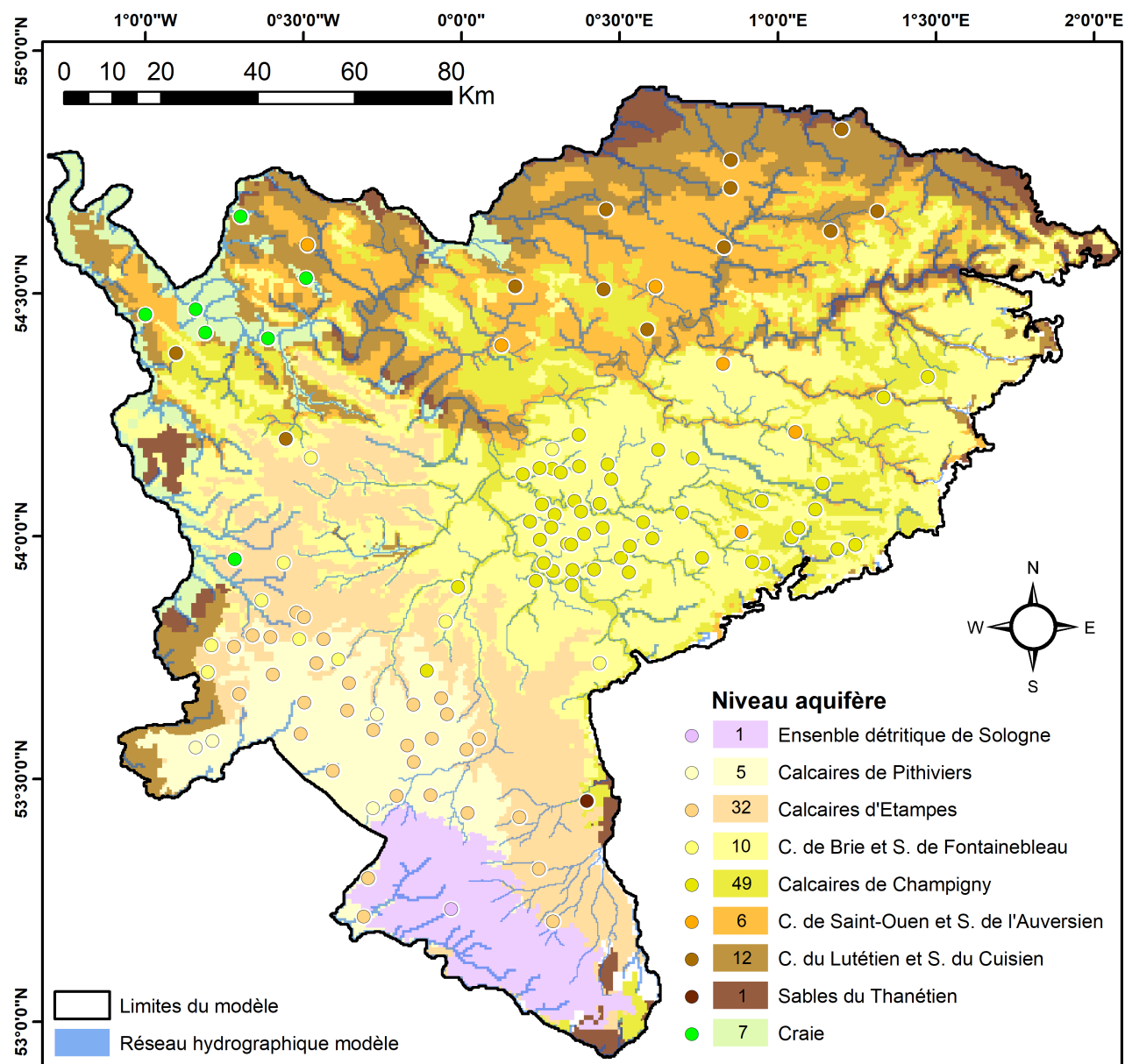


FIGURE 2.1 – Localisations des piézomètres utilisés pour le calage de l'hydrodynamisme du système aquifère.

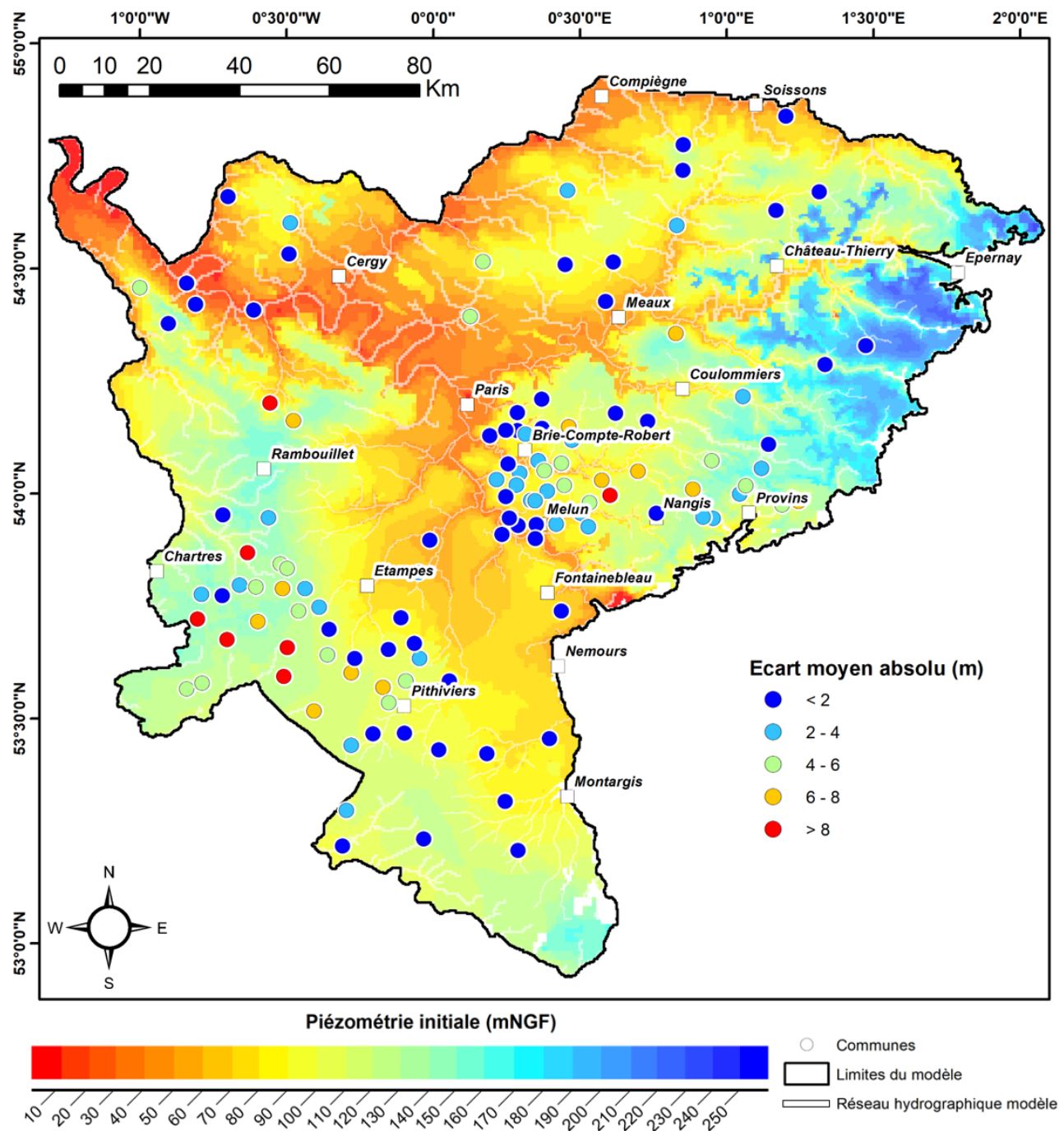


FIGURE 2.2 – Piézométrie initiale utilisée pour la simulation en régime transitoire (calcul en régime permanent). Niveaux des formations à l’affleurement, en *mNGF*. Les figurés ponctuels indiquent l’écart moyen absolu, en *m*, entre les niveaux simulés aux ouvrages et les niveaux moyens mesurés sur la période de calibration retenue pour la simulation en régime transitoire.

2.2 Performances de calibration - Régime transitoire

2.2.1 Critères statistiques d'évaluation

N.B. : Dans ce paragraphe, sont désignés par :

- X_i^{sim} et X_i^{obs} , les valeurs respectivement simulées et observées pour un pas de temps journalier i de calcul,
- $\overline{X^{sim}}$ et $\overline{X^{obs}}$, les moyennes respectives des séries simulées et observées sur la période associée au calcul des critères statistiques,
- N , le nombre de couples de valeurs (X_i^{sim}, X_i^{obs}) sur cette même période,
- σ_{sim} et σ_{obs} , les écarts-types des séries simulées et observées.

Outre une comparaison visuelle, les performances de l'application recalibrée ont été quantifiées par le calcul des valeurs de critères statistiques usuels aux niveaux de chaque ouvrage. Dans les pages suivantes, les indicateurs suivants sont mentionnés et/ou illustrés :

- Le **biais moyen** B : D'optimum nul, exprimé en mètres, il évalue l'écart relatif entre valeurs observées et simulées (cf. Eq. 2.1). Il permet d'identifier la tendance du modèle à sous-estimer ($B < 0$) ou surestimer ($B > 0$) les niveaux mesurés.

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i^{sim} - X_i^{obs}) \quad (2.1)$$

- La **RMSE** (*Root Mean Square Error*) ou 'erreur quadratique moyenne' : elle estime l'écart moyen entre séries simulées et mesurées (cf. Eq. 2.2). Exprimée en mètres, la qualité de la reproduction de la variable observée est d'autant plus acceptable que la valeur de la RMSE est faible, 0 étant sa valeur optimale.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i^{sim} - X_i^{obs})^2}{N}} \quad (2.2)$$

- Le **coefficient de corrélation** γ (cf. Eq. 2.3) et le **ratio des écarts-types** R_S (cf. Eq. 2.4) ont également été quantifiés. La calibration est jugée satisfaisante pour des valeurs respectives de γ et R_S supérieures à 0,7 et proche de 1,0. Une valeur de R_S supérieure (resp. inférieure) à 1,0 indique une surestimation (resp. sous-estimation) par le modèle de la variabilité temporelle du signal observé.

$$\gamma = \frac{1}{N\sigma_{obs}\sigma_{sim}} \sum_{i=1}^N (X_i^{obs} - \overline{X^{obs}}) (X_i^{sim} - \overline{X^{sim}}) \quad (2.3)$$

$$R_S = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i^{sim} - \overline{X^{sim}})^2}{\sum_{i=1}^N (X_i^{obs} - \overline{X^{obs}})^2}} \quad (2.4)$$

- Le calcul du critère **KGE** ou *Kling-Gupta efficiency* (Gupta et al., 2009; Kling et al., 2012) dont l'expression est précisée en équation (2.5), intègre directement les trois composantes de biais (B), d'amplitude (R_S) et de corrélation. Sa valeur optimale est de 1,0.

$$KGE = 1 - \sqrt{(B - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (2.5)$$

avec α , variabilité du modèle, tel que $\alpha = (\sigma_{sim} \overline{X_{obs}}) / (\overline{X_{sim}} \sigma_{obs})$.

2.2.2 Résultats de simulation

En première approche, la figure 2.3 précise la relation $Y = f(X)$ entre niveaux piézométriques moyens, observés et simulés, aux niveaux des 123 ouvrages, calculés sur la période du 1^{er} août 1985 au 31 juillet 2020. La figure 2.4 cartographie les distributions des valeurs de biais et de RMSE pour l'ensemble des ouvrages.

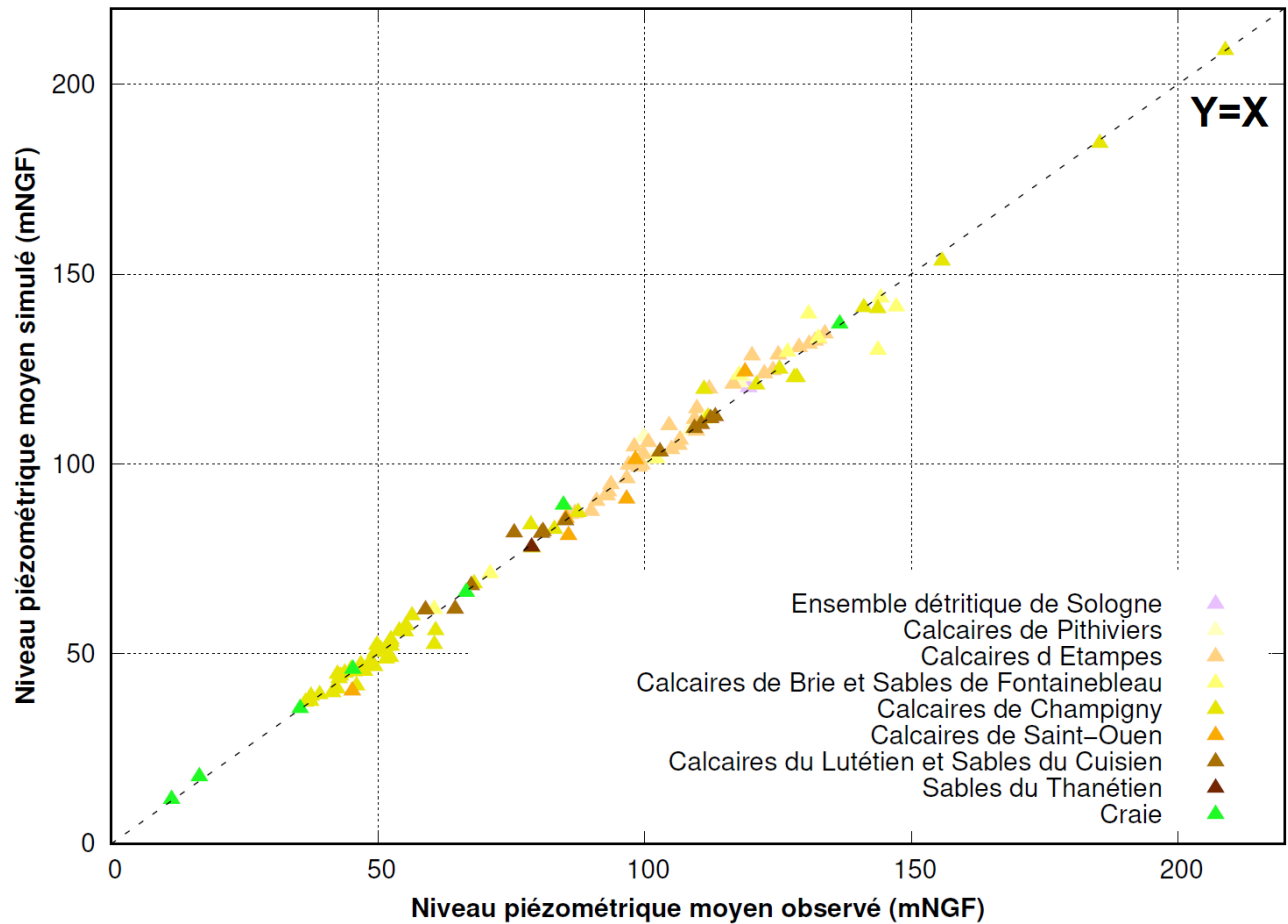


FIGURE 2.3 – Comparaison des niveaux piézométriques moyens observés et simulés après calibration en régime transitoire, sous forçage SURFEX V8F.

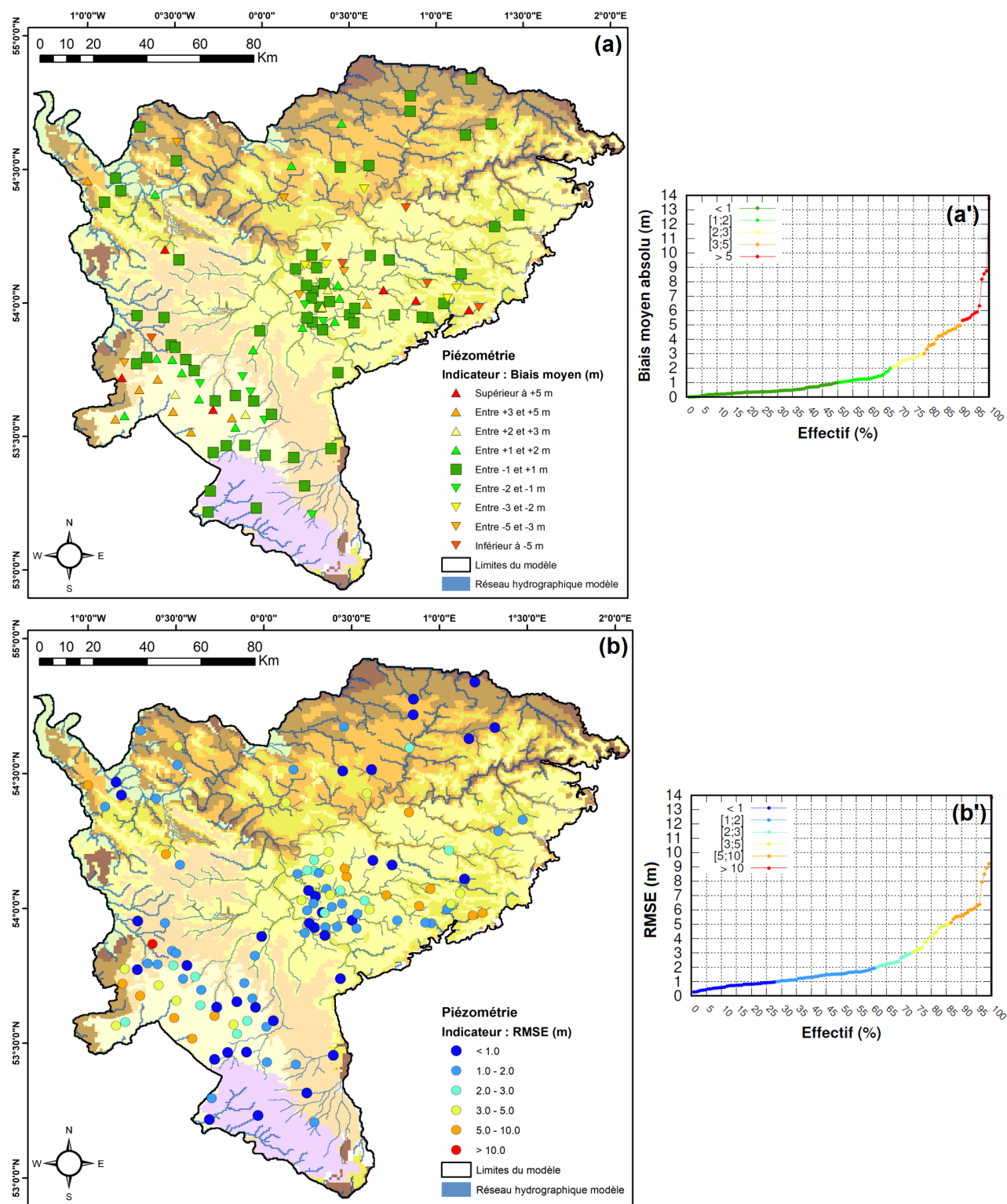


FIGURE 2.4 – Valeurs des critères de (a) biais et (b) RMSE obtenus après calibration en régime transitoire. Distributions associées respectivement illustrées en encarts (a') et (b'). Dans le cas du biais, un triangle orienté vers le haut (resp. bas) traduit d'une surestimation (resp. sous-estimation) des mesures par la simulation.

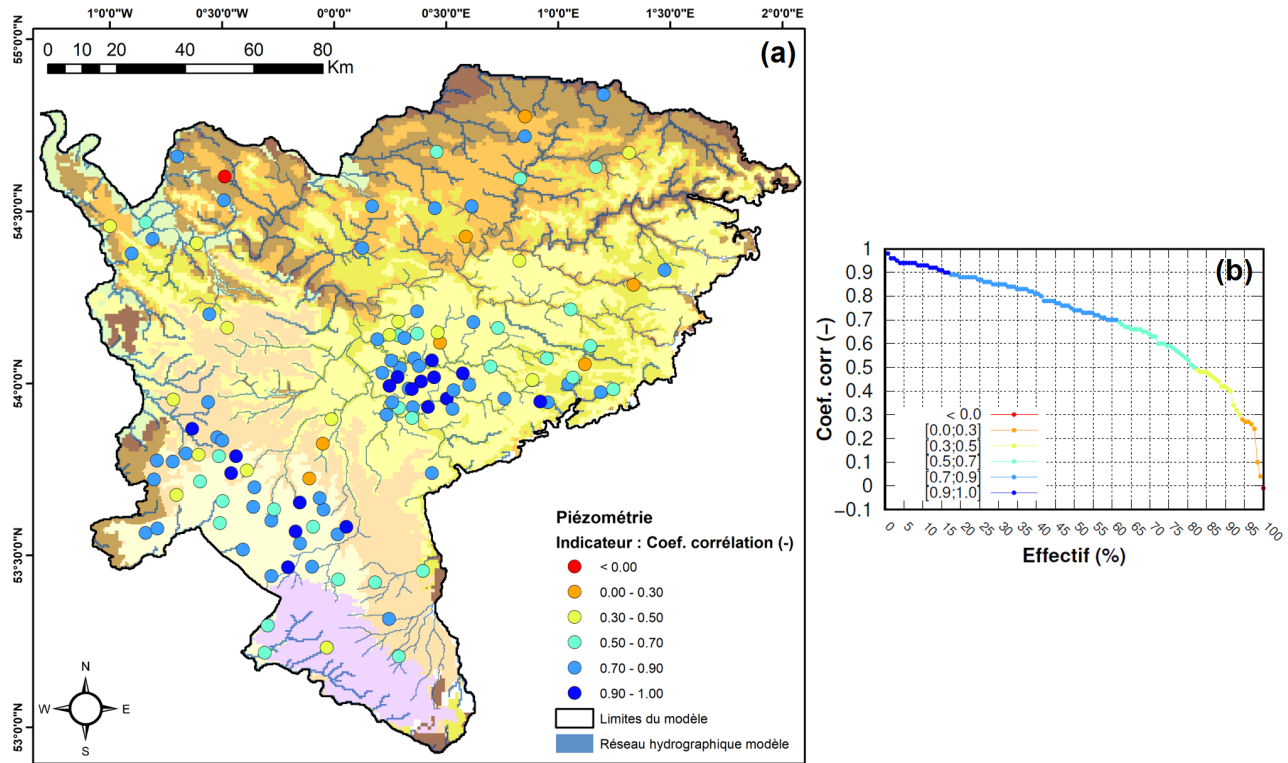


FIGURE 2.5 – (a) Valeurs et (b) distribution associée de l'indicateur R_S (ratio des écarts-types) après recalibration.

50 % des points de contrôle (*i.e.* 63 ouvrages) présentent un biais moyen absolu strictement inférieur à 1 mètre. 67 % des piézomètres (85) sont associés à un biais strictement inférieur à 2 mètres (cf. Figs. 2.4a et 2.4a'). 79 ouvrages (62 % de l'effectif total) présentent une RMSE inférieure à 2 mètres. La reproduction des dynamiques est globalement satisfaisante : 60 et 81 % des points de mesures sont respectivement associés à une valeur de coefficient de corrélation supérieure ou égale à 0,70 et 0,50. Des difficultés persistent sur ce point, notamment dans le secteur de Beauce, où l'impact des prélèvements est, pour certains points, exagéré sur le signal simulé, conséquence probable d'une mauvaise répartition des prélèvements au sein du système multi-couche. Cet aspect reste cependant, très difficile à corriger, les informations sur les horizons captés n'étant que très peu renseignées.

Les ouvrages du domaine ont, dans la suite, été scindés selon quatre secteurs géographiques : 'Beauce', 'Champigny', 'nord-est' et 'nord-ouest/Craie'. Les planches 2.6 à 2.13 suivantes proposent quelques illustrations d'évolutions synchrones comparées entre signaux observés et simulés, sur l'ensemble de la période de simulation 1985-2020. Les entêtes des différents graphiques constitutifs de ces planches précisent, d'une part, la localité, le code BSS ainsi que l'horizon observé¹ et d'autre

1. La nomenclature suivante est employée : *DSOL* : ensemble détritique de Sologne, *PITH* : calcaires de Pithiviers, *ETAM* : calcaires d'Etampes, *CBSF* : calcaires de Brie et sables de Fontainebleau, *CHAM* : calcaires de Champigny ss., *OUEN* : calcaires de Saint-Ouen, *LUCU* : calcaires du Lutétien et sables du Cuisien, *THAN* : sables du Thanétien, *CRAI* : Craie.

part, les valeurs des niveaux moyens simulés (*sim*) et observés (*obs*) ainsi que les valeurs de biais B , de RMSE, de coefficient de corrélation γ , de ratio des écarts-types R_S et de KGE.

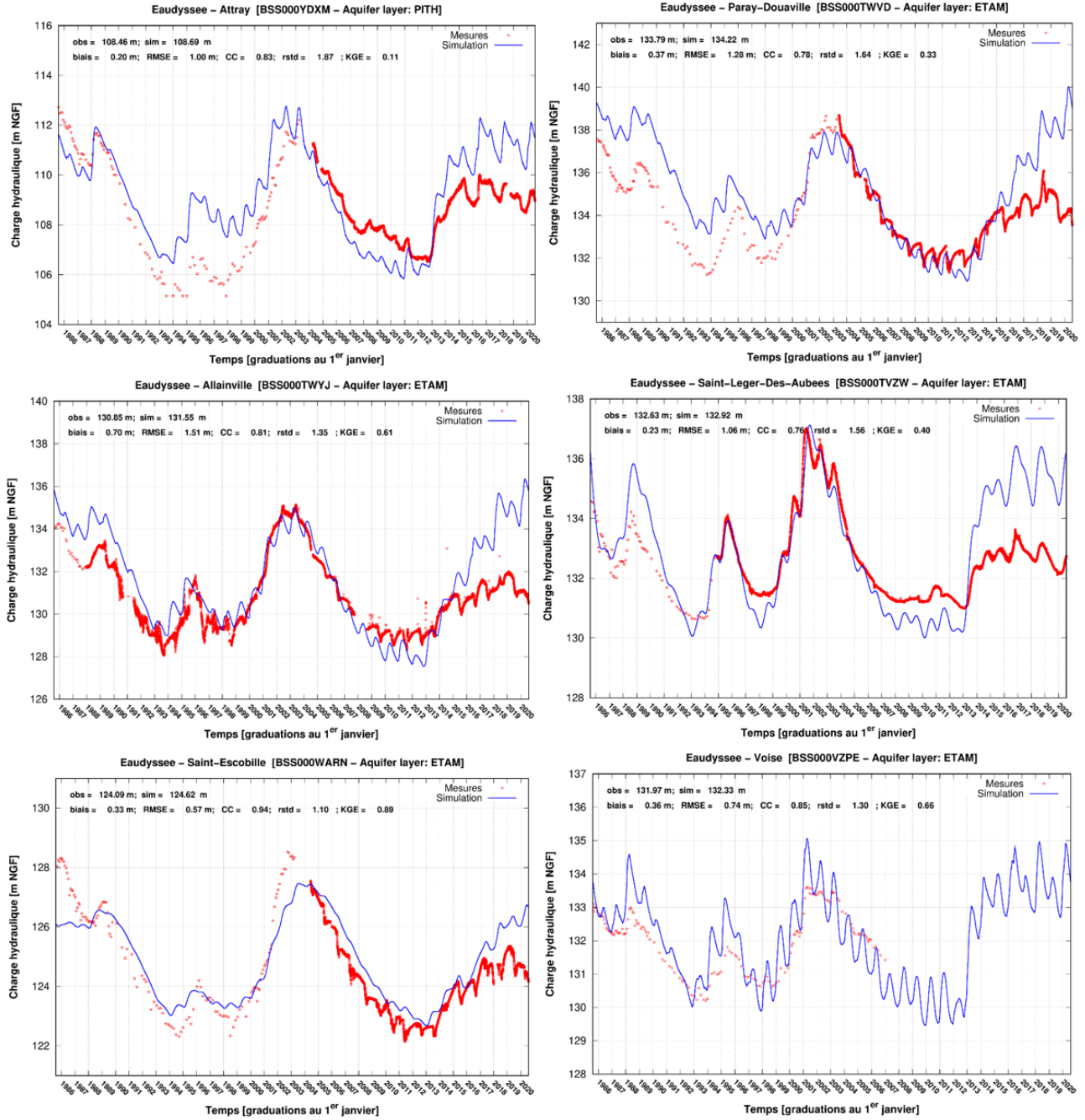


FIGURE 2.6 – Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘Beauce’ (1/2).

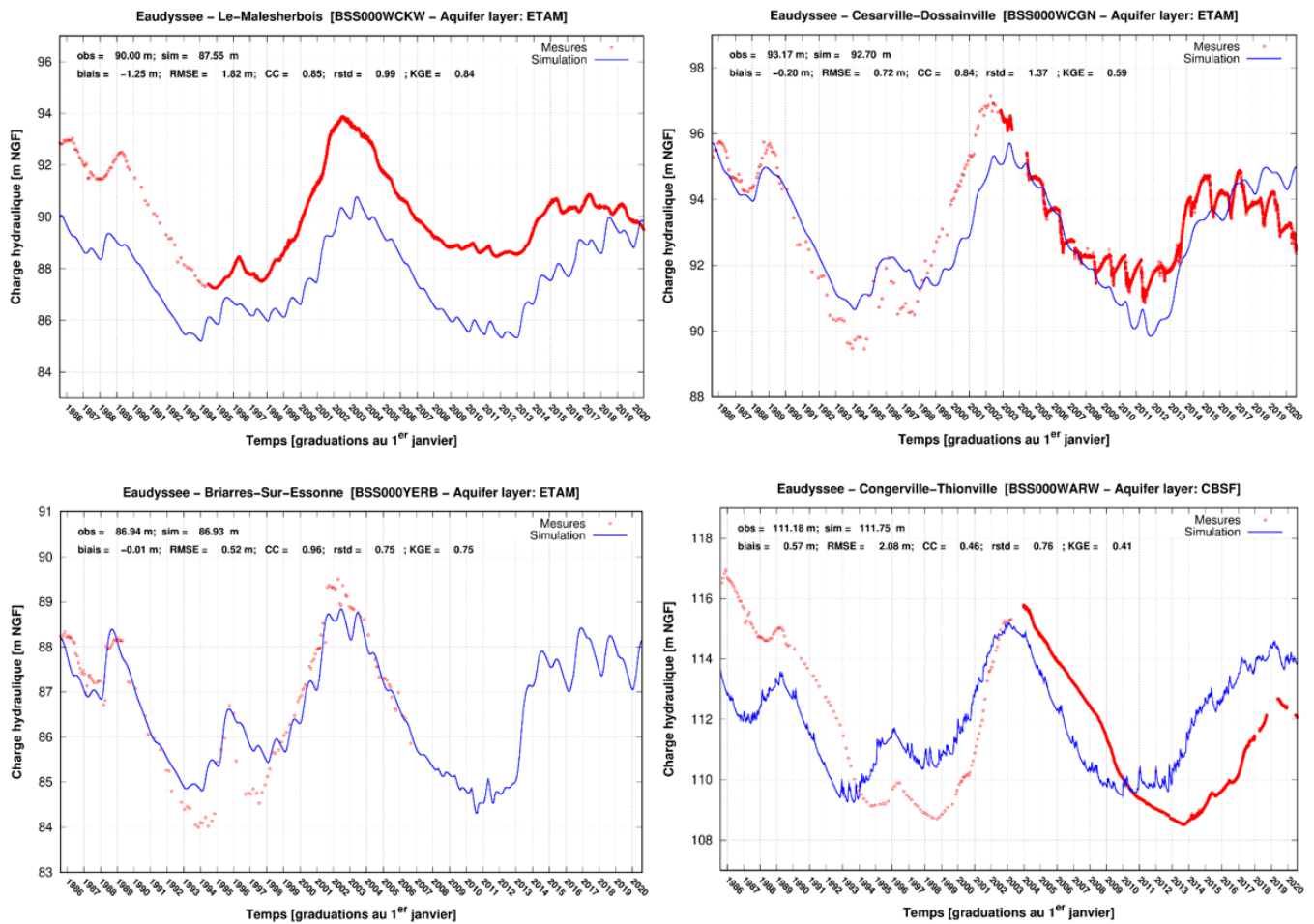


FIGURE 2.7 – Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘Beauce’ (2/2).

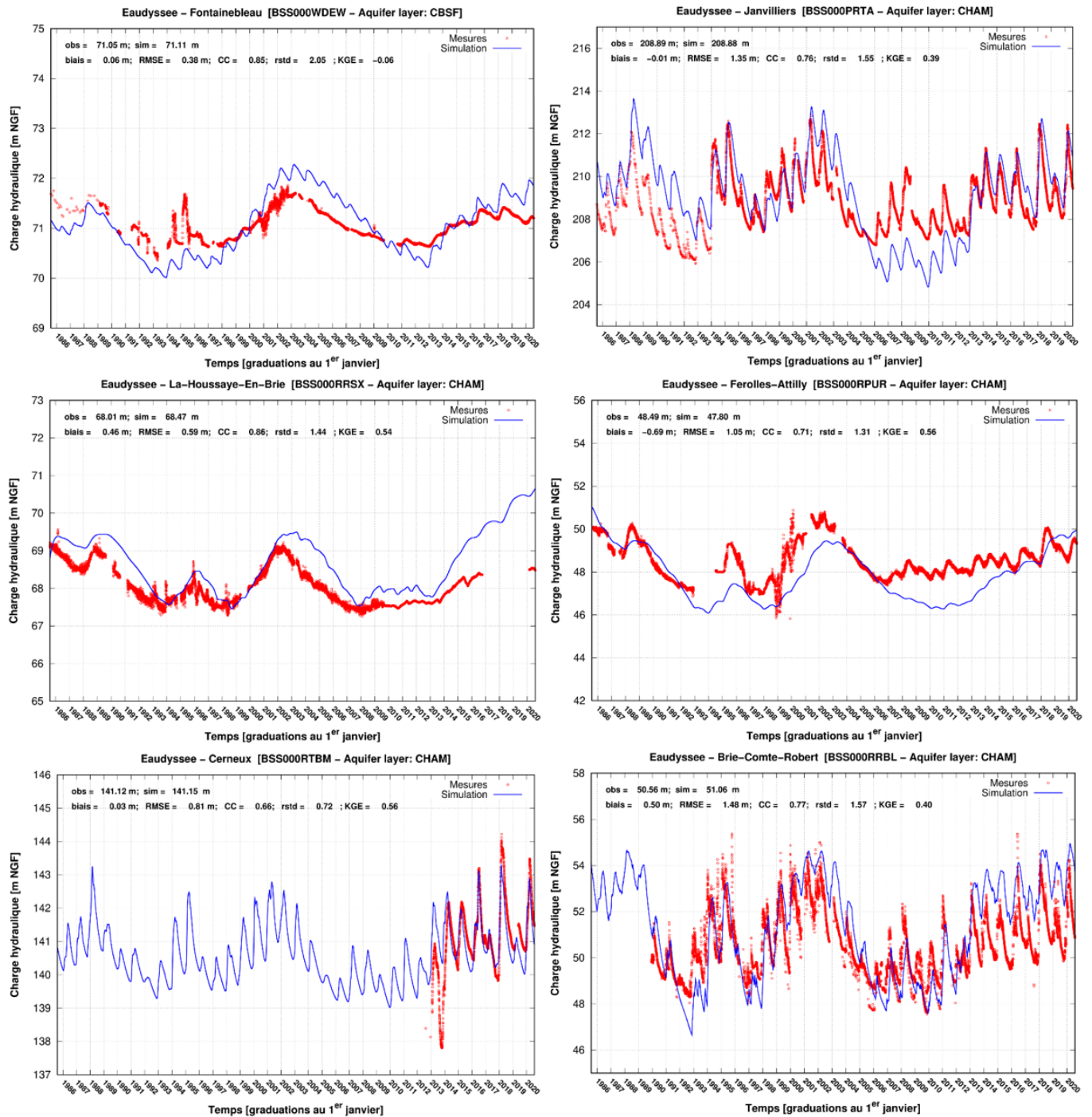


FIGURE 2.8 – Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘Champigny’ (1/3).

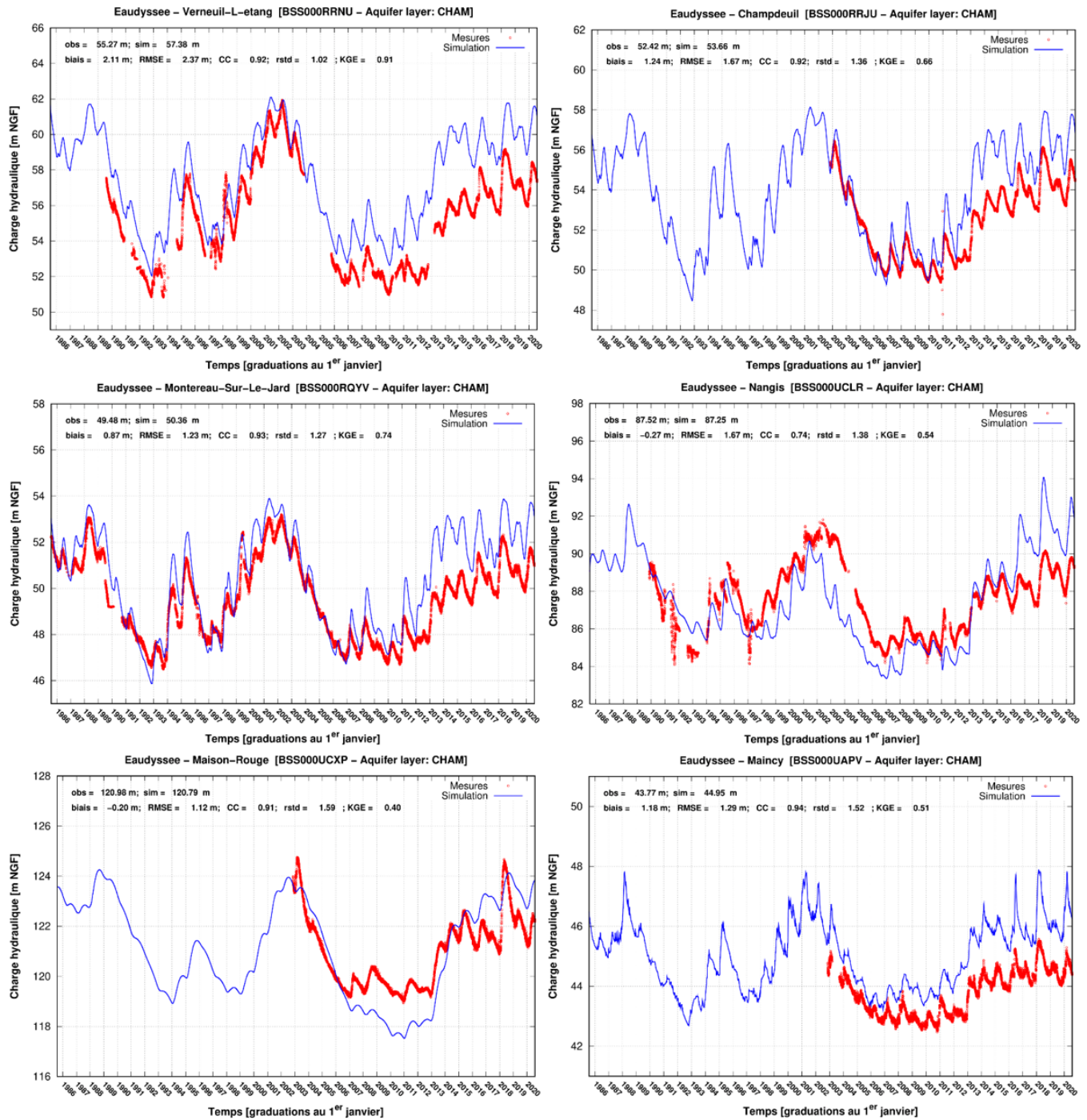


FIGURE 2.9 – Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘Champigny’ (2/3).

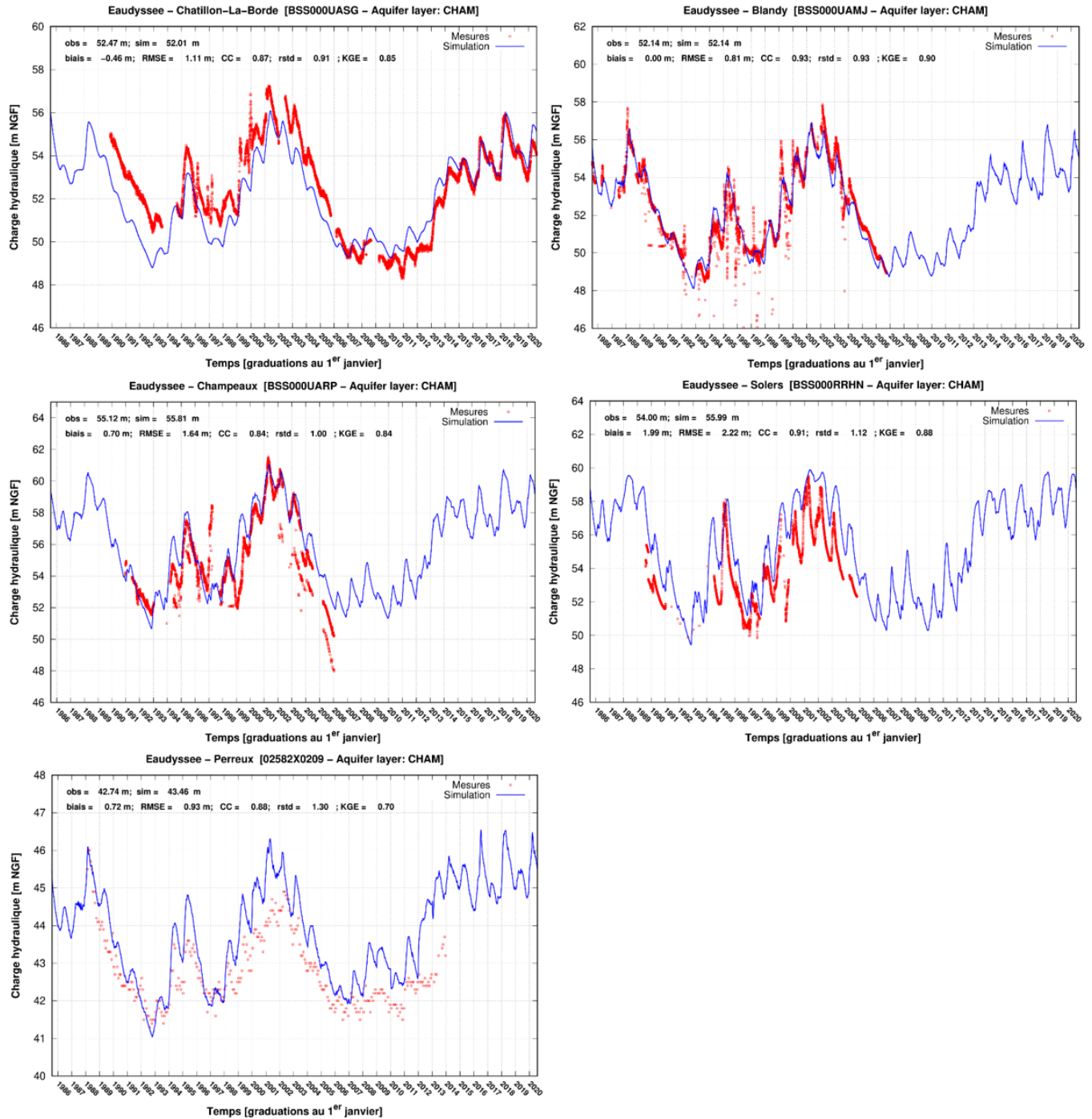


FIGURE 2.10 – Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘Champigny’ (3/3).

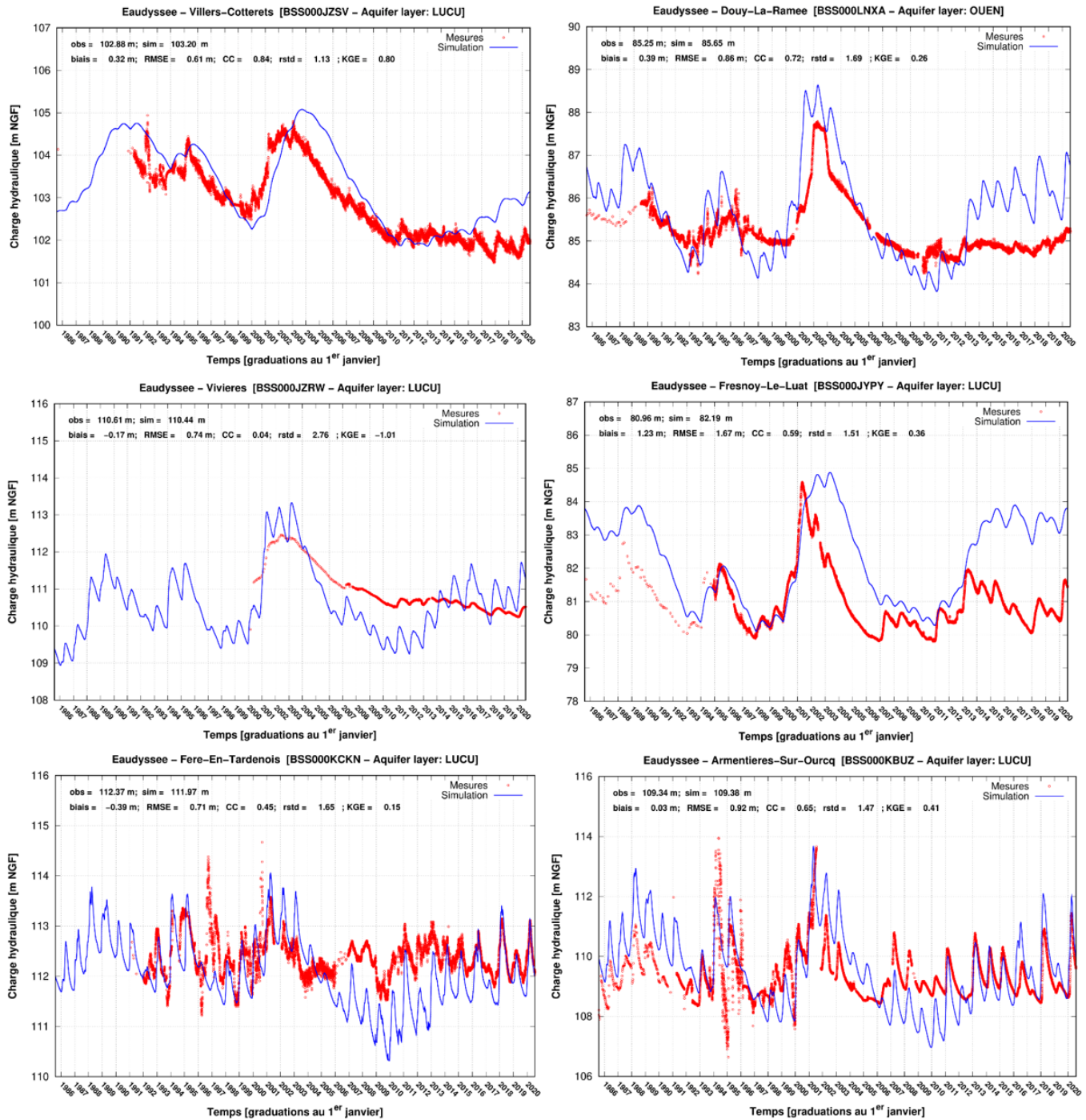


FIGURE 2.11 – Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘Nord-Est’ (1/2).

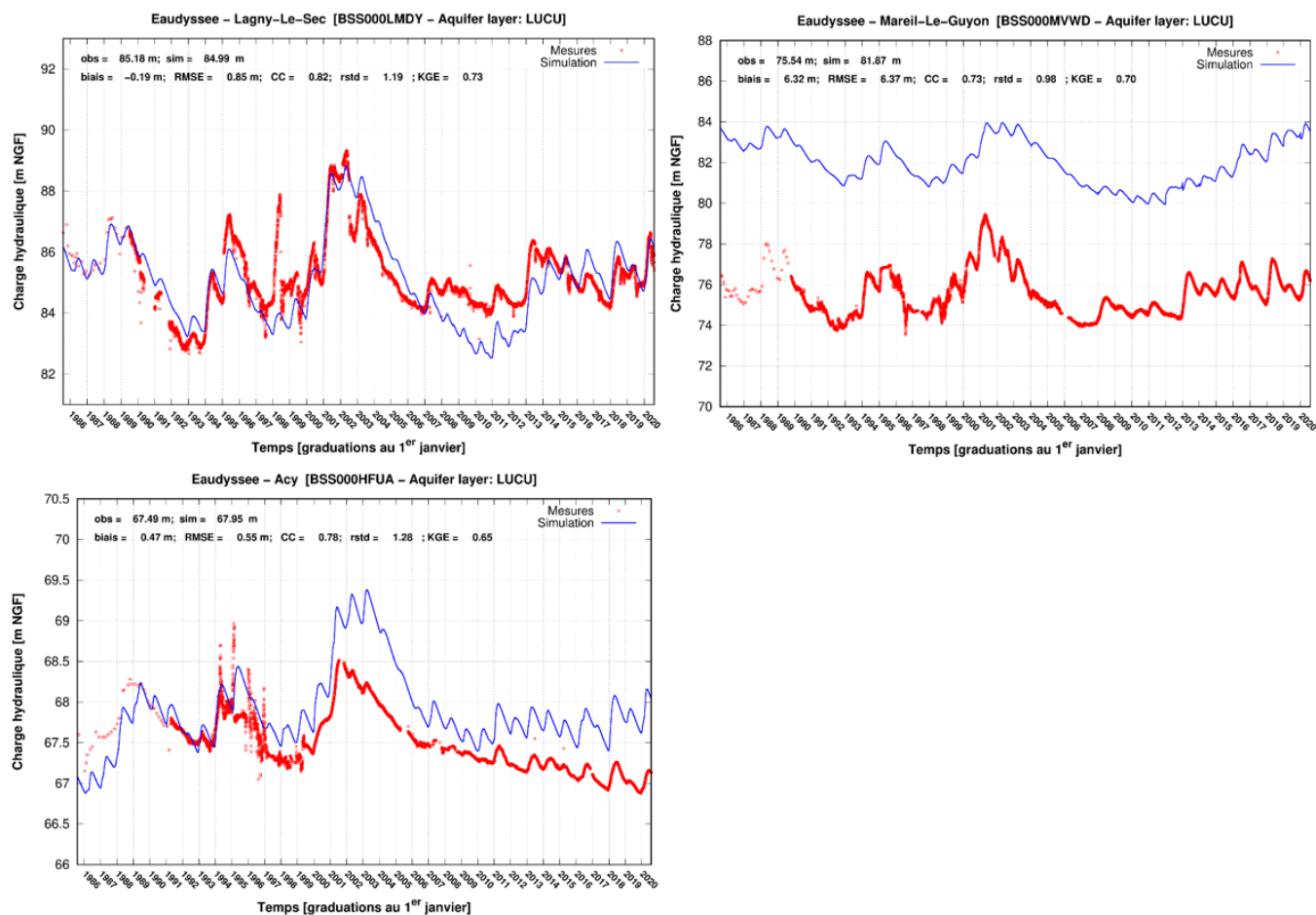


FIGURE 2.12 – Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘Nord-Est’ (2/2).

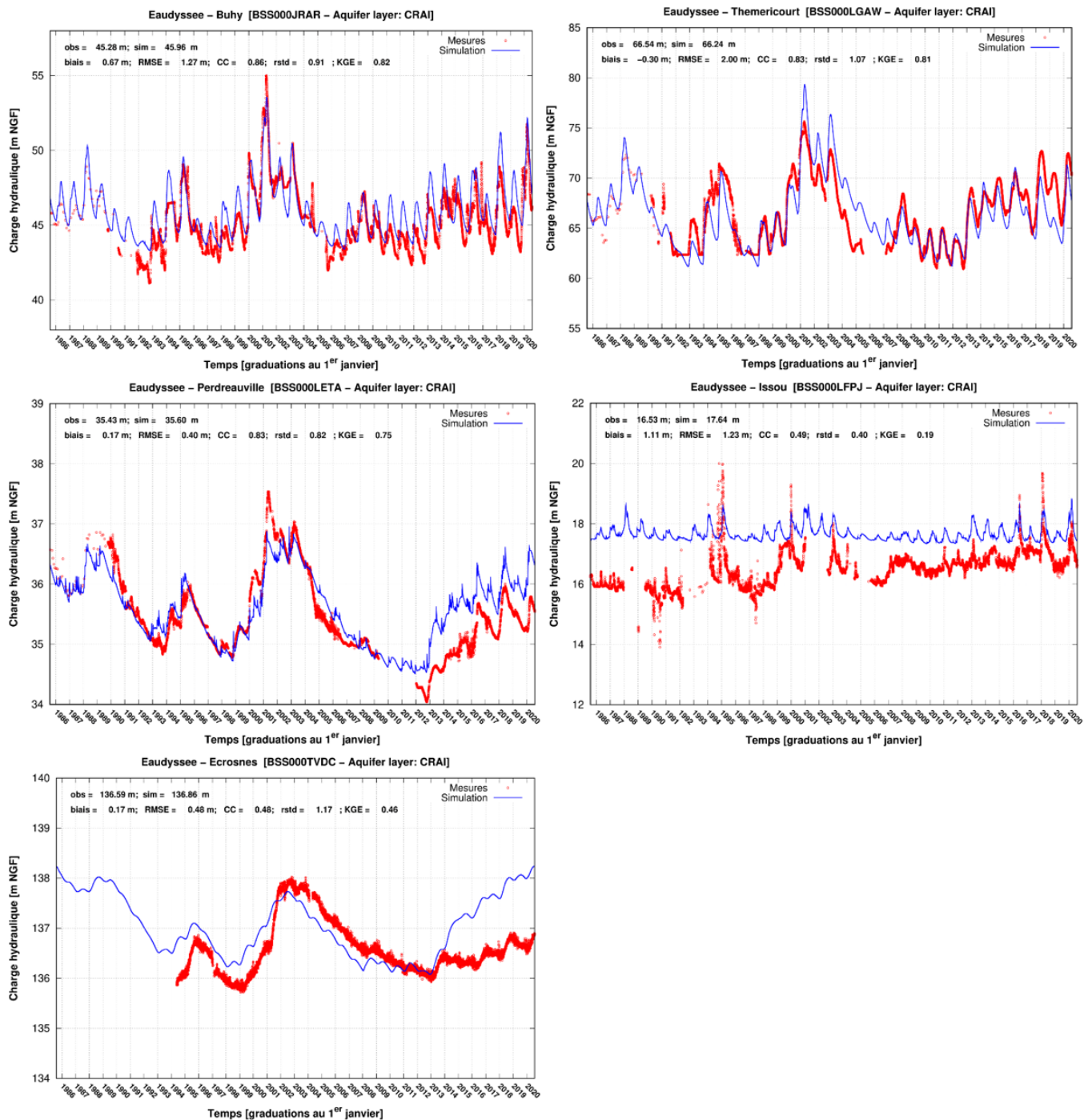


FIGURE 2.13 – Évolutions comparées des piézométries calculées et mesurées pour quelques ouvrages de la zone ‘Nord-Ouest/Craie’.

Ces travaux mettent désormais à disposition de la plate-forme Aqui'FR une nouvelle application EauDyssée représentant finement les principaux ensembles complexes du Tertiaire du bassin de la Seine.

La recalibration de sa réponse hydrodynamique souterraine, forcé sous flux SURFEX V8F a abouti à une reproduction généralement satisfaisante des niveaux et des dynamiques piézométriques, aux niveaux de plus d'une centaine d'ouvrages de mesure. Après recalibration, 50 % et 67 % des 123 piézomètres du domaine sont respectivement associés à des biais moyens absolus inférieurs à un et deux mètres. 60 et 81 % des points de mesures présentent respectivement des valeurs de coefficient de corrélation supérieures ou égales à 0,70 et 0,50.

Son transfert dans la plate-forme Aqui'FR et son degré de discrétisation homogène aux autres sous-modèles distribués de Seine permettront la mise en œuvre de travaux de connexions entre applications locales dans l'optique de fournir une représentation plus fine des échanges nappe-rivières à l'échelle du bassin.

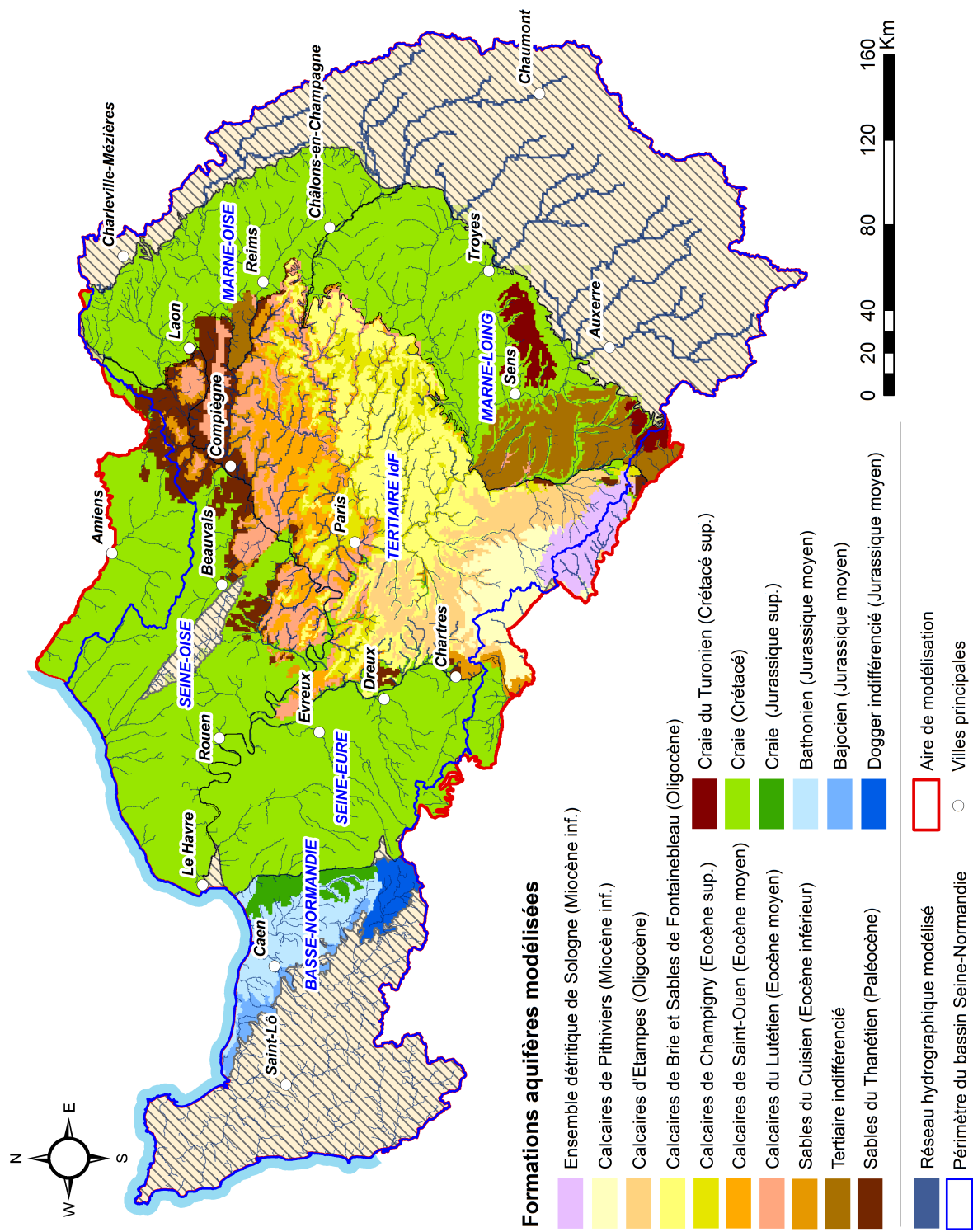


FIGURE 2.14 – Description des horizons aquifères du bassin de la Seine dans les différentes applications régionales EauDyssée intégrées dans la plate-forme Aquif'FR, en fin de phase 3 du projet.

- Abasq, L., Viennot, P., and Verjus, P. (2013). Modélisation des écoulements et des pollutions nitriques dans les formations tertiaires du Bassin Parisien - Méthodologie et résultats du calage. Rapport technique d'étude, Centre de Géosciences - MINES ParisTech/ARMINES.
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., and Martin, E. (1993). A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology*, 18 :65–71.
- Gallois, N., Puech, T., Mignolet, C., Schott, C., Viennot, P., Beaudoin, N., Mary, B., and Le Bas, C. (2018). Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie - Actualisation des modélisations couplées STICS-MODCOU - Modélisation de scénarios agricoles sous changement climatique. Rapport technique d'étude, Centre de Géosciences - MINES ParisTech/ARMINES, INRAE SAD-Aster, INRAE Agroimpact et INRAE Info-sol.
- Gallois, N., Viennot, P., and Verjus, P. (2017). Modélisation mathématique du comportement hydrogéologique des formations tertiaires du bassin parisien. Rapport technique d'étude, ARMINES/MINES ParisTech - DRIEE Île-de-France.
- Gupta, H., Harald, K., and Martinez, G. (2009). Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2) :80–91.
- Habets, F., Amraoui, N., Caballero, Y., Thiéry, D., Vergnes, J.-P., Morel, T., Le Moigne, P., Roux, N., de Dreuzy, J.-R., Longuevergne, L., Ackerer, P., Maina, F., Besson, F., Etchevers, P., Regimbeau, F., and Viennot, P. (2017). Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR - Rapport de fin de phase I. Rapport technique d'étude, Office Français de la Biodiversité.
- Habets, F., Amraoui, N., Thiéry, D., Vergnes, J.-P., Morel, T., Le Moigne, P., Munier, S., Leroux, D., de Dreuzy, J.-R., Longuevergne, L., Ackerer, P., Besson, F., Etchevers, F., Rousset, F., Willemet, J.-M., Viennot, P., and Gallois, N. (2021). Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR - Rapport de fin de phase II. Rapport technique d'étude, Office Français de la Biodiversité.

- Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425 :264–277.
- Ledoux, E. (1980). *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique*. Thèse de docteur-ingénieur, Sciences de l’eau, École Nationale Supérieure des Mines de Paris - Université Pierre et Marie Curie.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., and al. (2013). The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6(4) :929–960.
- Thierion, C. (2007). Modélisation hydrogéologique des aquifères du bajocien-bathonien dans le secteur des bocages normands. Rapport Master 2 Sciences de l’Univers, Environnement, Écologie Parcours Hydrologie-Hydrogéologie, Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris / École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.
- Viennot, P. (2009). Modélisation mathématique du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la seine : Représentation différenciée des aquifères du tertiaire - intégration des prélèvements anthropiques. Rapport technique d’étude, ARMINES/MINES ParisTech - DIREN Île-de-France.
- Viennot, P. and Abasq, L. (2013). Modélisation de la pollution nitriques des grands aquifères du bassin Seine-Normandie à l’échelle des masses d’eau. Rapport technique d’étude, ARMINES/MINES ParisTech.

