



Centre de
Géosciences

Rapport technique d'étude

Référence (Centre de Géosciences) : R161022025NGAL

Référence (ARMINES) : 240000481

Plateforme nationale de modélisation AQUI-FR : Calibration de l'application hydrogéologique "Eaudyssée-Loire" sous forçage SURFEX V8F

Projet AQUI-FR - Phase 4



Octobre 2025

Nicolas GALLOIS

ARMINES/Mines Paris, Centre de Géosciences, PSL Université

35, rue Saint-Honoré

F-77 305 FONTAINEBLEAU Cedex

Table des matières

1	Contexte et informations générales	1
2	Mises à jour préliminaires à la calibration	2
2.1	Points de contrôle piézométrique	2
2.2	Prélèvements souterrains	3
3	Calibration de l'hydrodynamisme aquifère	6
3.1	Pré-calibration en régime permanent	7
3.2	Restitution de la piézométrie en régime transitoire	9
4	Conclusion	17
ANNEXES		19
A	Vérifications informatiques : Conservation des performances de calibration au sein de la plateforme	21
B	Exemples de chroniques comparées de restitution piézométrique	23
C	Courbes classées détaillées des critères statistiques de calibration	30
Références		31

Table des figures

Fig. 1	Localisation, géométrie et extension aquifère modélisée au sein de l'application "Eaudyssée-Loire"	1
Fig. 2	Localisation comparée des piézomètres de contrôle actuellement pris en compte dans la plateforme et de ceux ajoutés pour la phase de calibration	3
Fig. 3	Sources de données mobilisées, extensions spatiales et couvertures temporelles associées pour décrire les prélèvements souterrains au sein de l'application.	4
Fig. 4	Volumes annuels prélevés sur l'ensemble du système aquifère modélisé. Volumes totaux et distinction par type de prélèvement. Parts relatives du volume total annuel prélevé dédiée à chaque usage.	5
Fig. 5	Distribution mensuelle des pompages cumulés sur l'ensemble de l'emprise souterraine modélisée	6
Fig. 6	Évolution journalière du nombre de mesures piézométriques disponibles aux 188 points de contrôle sur la période 1965–2025.	7
Fig. 7	Distribution des lames d'infiltration moyennes interannuelles issues de SURFEX V8F (1995–2020) dans les limites du système aquifère modélisé et du bassin versant topographique. Cumuls annuels d'infiltration agrégés sur le domaine souterrain modélisé	8
Fig. 8	Biais piézométriques obtenus à l'issue de la phase de pré-calibration en régime permanent. Détail pour chacun des trois horizons aquifères. De gauche à droite : nappe de Beauce, Craie et sables du Cénomanien. Cartes piézométriques simulées associées.	9
Fig. 9	Comparaison des biais moyens obtenus aux 188 piézomètres pour la version actuellement incluse à la plateforme, après intégration des paramètres issue de Monteil (2011) et à l'issue de la phase de calibration en régime transitoire. Distribution des biais et des RMSE présentés pour l'ensemble du système aquifère. Détail par couche pour chacune des trois configurations "PL", "CM" et "Clb."	11
Fig. 10	Distribution des valeurs de biais moyens et de RMSE à l'issue de la calibration en régime transitoire	12
Fig. 11	Distribution des valeurs de coefficient de corrélation à l'issue de la calibration en régime transitoire	13
Fig. 12	Détail distribué des valeurs de biais piézométriques par horizon modélisé et pour chacune des trois configurations "PL", "CM" et "Clb."	14
Fig. 13	Comparaison de la piézométrie de la nappe de Beauce simulée et observée : Configuration de hautes eaux 2002 et 2004	15

Fig. 14	Détail distribué des valeurs de RMSE par horizon modélisé et pour chacune des trois configurations "PL", "CM" et "Clb."	16
Fig. A.1	Comparaison des niveaux piézométriques moyens simulés par la version d'Eau-dyssée incluse à la plateforme Aquif-Fr et la version 'locale' utilisée pour réaliser la calibration. Détail des indices usuels de performances pour chaque point	21
Fig. A.2	Chroniques piézométriques pour les six points de contrôle présentant les valeurs de RMSE les plus élevées. Comparaison entre les résultats mensuels issus de la plateforme et la simulation journalière issue de la version "locale"	22
Fig. B.1	Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la nappe de Beauce (1/3).	23
Fig. B.2	Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la nappe de Beauce (2/3).	24
Fig. B.3	Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la nappe de Beauce (3/3).	25
Fig. B.4	Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la Craie séno-turonienne (1/2).	26
Fig. B.5	Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la Craie séno-turonienne (2/2).	27
Fig. B.6	Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages des sables cénomaniens (1/2).	28
Fig. B.7	Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages des sables cénomaniens (2/2).	29
Fig. C.1	Courbes classées comparées des critères statistiques aux niveaux des 188 piézomètres sur la période de calage avant et après calibration. Agrégation sur l'ensemble du système aquifère et détail par couche modèle	30

Liste des tableaux

Tab. 1	Nombre d'ouvrages de suivi piézométrique pris en compte pour la calibration. . . .	2
Tab. 2	Répartition de l'effectif des piézomètres de calibration pour différentes valeurs seuils de critères statistiques	10
Tab. 3	Biais moyens à l'issue de la calibration en régime transitoire : médiane, premier et troisième quartile. Agrégation sur l'ensemble du système aquifère et détail par horizon simulé	13
Tab. 4	RMSEs obtenues à l'issue de la calibration en régime transitoire : médiane, premier et troisième quartile. Agrégation sur l'ensemble du système aquifère et détail par horizon simulé	13

1 Contexte et informations générales

Le projet Aqui-FR vise à déployer une plateforme nationale de modélisation de la ressource en eau souterraine, dédiée au suivi, à la prévision saisonnière et aux projections sous changement climatique. Agrégateur d'applications numériques pré-existantes, des travaux récurrents sont nécessaires pour assurer leurs mises à jour afin de garantir le maintien opérationnel de l'outil. Dans cette optique, une actualisation de l'application hydrogéologique "Eaudyssée-Loire" (Monteil, 2011), simulant une large partie du système aquifère sédimentaire de Loire moyenne (Fig. 1), a été envisagée dans le cadre de la phase 4 du projet. Afin d'améliorer la restitution de la piézométrie régionale, des travaux ont été jugés nécessaires, l'application n'ayant encore jamais fait l'objet d'une calibration dédiée, conditionnée aux flux de forçage SURFEX (Le Moigne *et al.*, 2020) (v. V8F), utilisés pour décrire les écoulements de sub-surface et contraindre l'ensemble des applications de la plateforme.

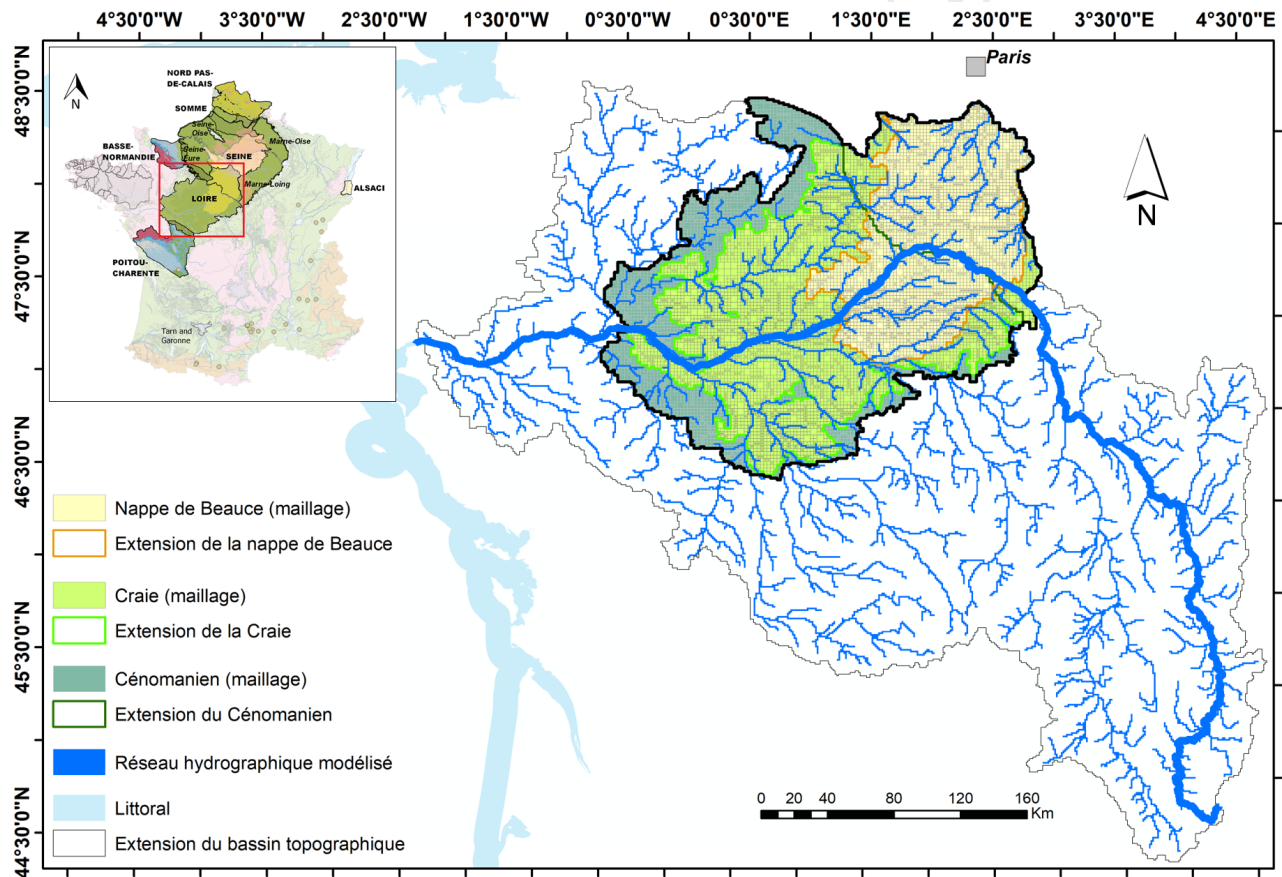


Fig. 1 – Localisation, géométrie et extension aquifère modélisée au sein de l'application "Eaudyssée-Loire". Carte de localisation extraite de Vergnes *et al.* (2020). Le bassin topographique couvre environ 123 430 km².

Compte tenu des performances piézométriques actuellement très insatisfaisantes du modèle (Fig. 10), il a été proposé de scinder le travail de calibration en deux étapes au cours du projet. La première — dont les résultats sont présentés ici — consiste en une calibration de l'hydrodynamisme souterrain,

incluant une première mise à jour des prélèvements en nappes sur la base des données nationales disponibles (§. 2.2). Cet ajustement pourra être finalisé, à l'issue d'une autre action du projet, menée en parallèle, visant à développer un outil commun de mise à jour des prélèvements souterrains pour l'ensemble des applications de la plateforme, si cette actualisation d'ensemble venait à dégrader significativement les performances de l'application.

37 620 mailles souterraines, variant entre 1 000 et 4 000 m de côté décrivent le système aquifère actuellement modélisé (Fig. 1). Couvrant une surface totale d'environ 38 750 km², trois horizons "modèle" sont utilisés :

- un horizon représentatif du système multicouche complexe de la nappe de Beauce (c.-à-d. des calcaires de Pithiviers aux calcaires éocènes), incluant les formations sablo-argileuses de Sologne (6 738 mailles);
- un niveau décrivant l'aquifère de Craie séno-turonienne (15 448 mailles);
- une couche profonde associée aux Sables du Cénomaniens (15 434 mailles).

2 Mises à jour préliminaires à la calibration

2.1 Points de contrôle piézométrique

La version transmise par Météo-France (MF) au début des travaux recense 115 piézomètres. Aucun ne couvre les sables cénomaniens (Tab. 1). Un croisement entre les points de calibration identifiés par [Monteil \(2011\)](#) et les données actuellement disponibles dans ADES (ades.eaufrance.fr) a permis d'identifier des ouvrages supplémentaires exploitables. Cette actualisation porte le nombre de points de calibration de 115 à 188 (Fig. 2).

Horizon aquifère "modèle"	v. initiale MF	v. actualisée
Nappe de Beauce	78	85
Craie séno-turonienne	37	44
Sables cénomaniens	0	59
Total	115	188

Tab. 1 – Nombre d'ouvrages de suivi piézométrique pris en compte pour la calibration.

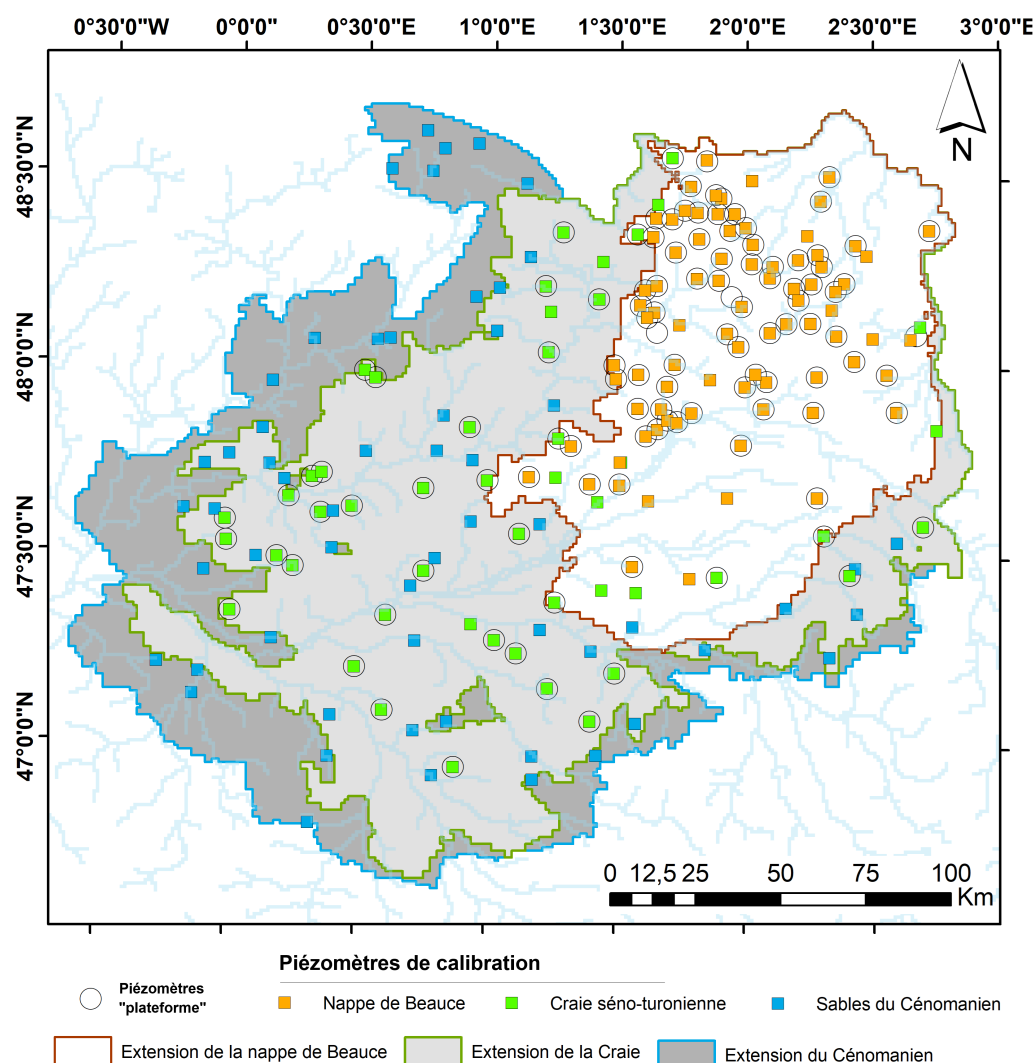


Fig. 2 – Localisation des 188 piézomètres de contrôle utilisés par la suite pour l'exercice de calibration. Les cercles vides matérialisent les 115 ouvrages listés dans l'application en début de travaux.

2.2 Prélèvements souterrains

L'exploitation des données initiales intégrées à l'application fait état d'un unique fichier annuel, répété sur l'ensemble de la durée de simulation. Les prélèvements correspondants s'élèvent au total à $347 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ pour l'ensemble du système aquifère (Fig. 4-a), distribués à raison de $205 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ pour la couche de la nappe de Beauce (59 % du total), $92 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ pour la Craie (27 %) et $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ pour le Cénomaniien (14 %).

Afin d'anticiper et de prendre en compte au mieux dès à présent l'effet des prélèvements en amont de la calibration, une première mise à jour est réalisée. Un ensemble de fichiers annuels de prélèvements a ainsi été reconstitué, couvrant la période 1994–2025. Trois sources de données ont été mobilisées (Fig. 3). Sur la période antérieure à 2012, les volumes sont issus des redevances annuelles transmises

par les agences de l'eau Seine-Normandie (AESN) et Loire-Bretagne (AELB), initialement compilées en interne au Centre de Géosciences pour la partie Seine, et par [Monteil \(2011\)](#) dans les limites du bassin de la Loire. Par ailleurs, les données de prélèvements en nappe profonde issues de la [BNPE](#) ont été utilisées pour la période 2012–2020 sur l'ensemble du domaine. Les lacunes, notamment entre 2007 et 2011 sur le bassin de la Loire, ont été comblées au mieux à partir des données disponibles (Fig. 3). Pour pallier les lacunes encore persistantes des données de la BNPE sur les années les plus récentes sur le secteur (2021–2025), les données de l'année 2020 ont été répétées. Enfin, l'année 1998-1999 est utilisée pour inférer des prélèvements aux années de simulations plus anciennes, pour lesquelles les prélèvements ne sont pas connus (Fig. 3).

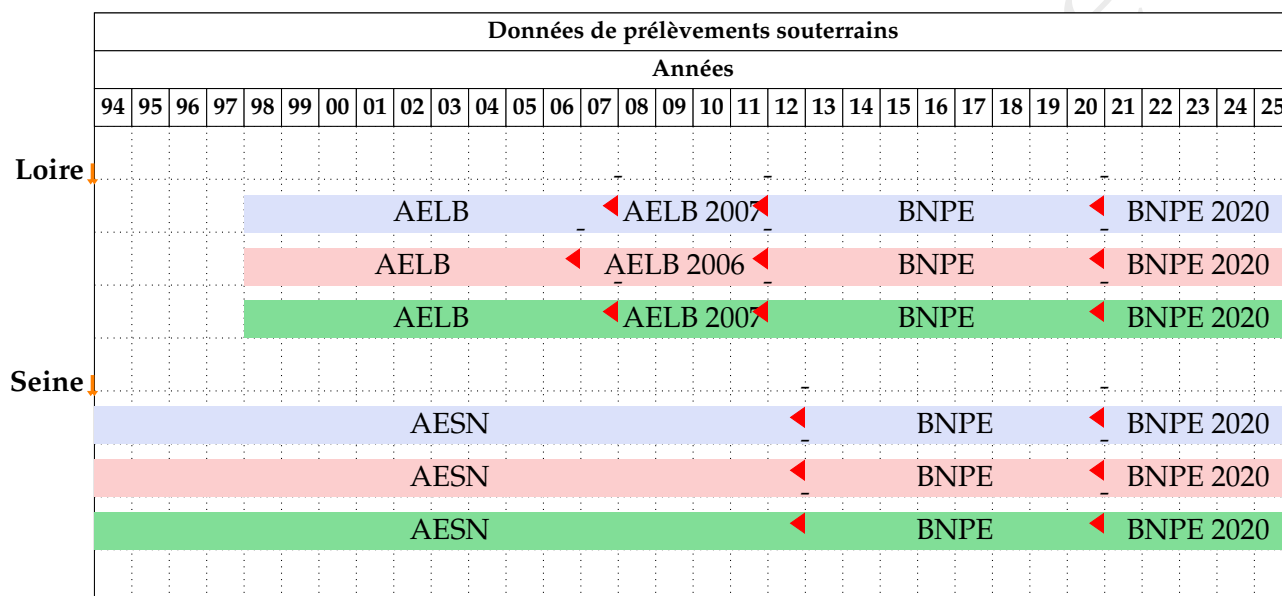


Fig. 3 – Sources de données mobilisées, extensions spatiales et couvertures temporelles associées permettant de décrire les prélèvements souterrains au sein de l'application "Eaudyssée-Loire". Les données relatives à l'alimentation en eau potable (AEP), au secteur industriel et à l'irrigation agricole sont respectivement représentées en bleu, rouge et vert. La notation "Xy" indique que les données de l'année y, issues de la source X, ont été répétées sur l'ensemble de la période considérée. Un changement de base de données intervient de part et d'autre des triangles rouges.

Les modalités d'attribution des prélèvements aux couches du modèle, établies à partir des données de [Monteil \(2011\)](#), ont été conservées (données pré-2012 sur la Loire donc). Les données AESN antérieures à 2012 sur le bassin de la Seine, initialement intégrées dans le modèle régional du bassin de la Seine ([Flipo et al., 2023](#)), ont été transposées dans l'application. Plus précisément, les données rapatriées regroupent les prélèvements associés aux couches de la nappe de Beauce, aux Calcaires de Brie et Sables de Fontainebleau. Les données BNPE ont été temporairement associées aux couches du modèle "Loire" selon une règle d'attribution systématique¹.

1. La première couche rencontrée depuis la surface avec épaisseur supérieure à 20 m, est ciblée par défaut. Cette affectation pourra être affinée ultérieurement, à l'issue de l'action du projet visant à actualiser toutes les données de prélèvements de la plateforme.

Les modalités de distribution temporelle des prélèvements diffèrent selon leur usage. Elles ont été homogénéisées avec celles initialement définies par [Monteil \(2011\)](#) sur l'ensemble de la période de simulation. Ainsi, les volumes annuels destinés à l'AEP et à l'industrie sont répartis de manière uniforme sur l'année, tandis que les prélèvements agricoles sont centrés sur la période estivale, d'avril à octobre, selon les coefficients mensuels suivants : 0.01, 0.07, 0.20, 0.33, 0.26, 0.11 et 0.02 (Fig. 5).

Sur la période 1998-2020, cumulant des données réelles sur l'ensemble du domaine modélisé (Fig. 3), les prélèvements mis à jour comptabilisent $457 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$, soit 32 % de plus que la valeur totale annuelle initialement considérée. Ces prélèvements se répartissent en moyenne annuelle sur cette période à hauteur de 255, 172 et 31 millions de m^3 respectivement à destination de l'irrigation, de l'AEP et de l'industrie (Fig. 4-a), se partageant ainsi 54.7, 38.4 et 6.9 % du volume moyen total (Fig. 4-b).

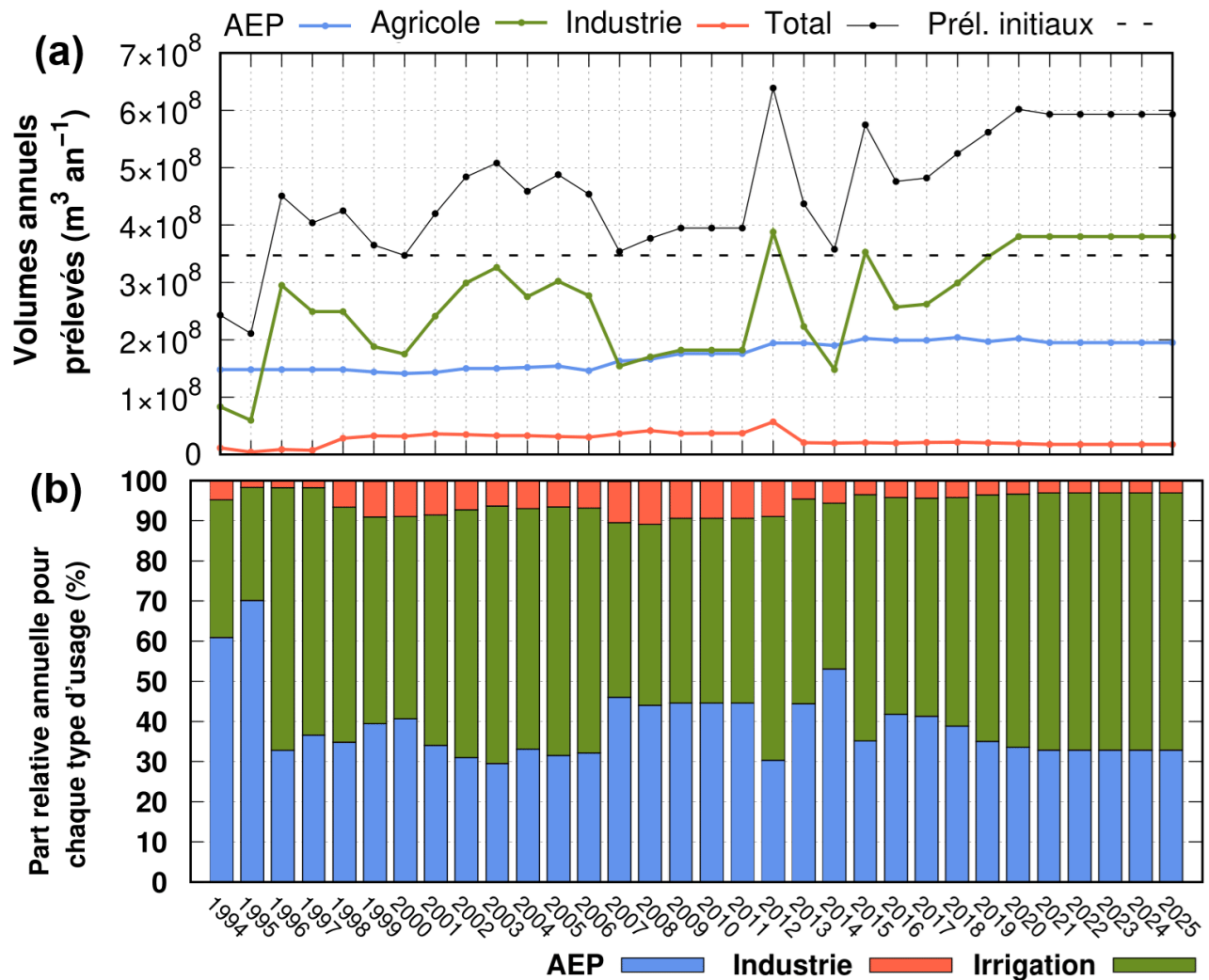


Fig. 4 – (a) Volumes annuels prélevés ($\text{m}^3 \text{ an}^{-1}$) sur l'ensemble du système aquifère modélisé. Volumes totaux (courbe pleine noire) et distinction par type de prélèvement. La ligne pointillée représente le volume total annuel fixe initialement considéré de $347 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. (b) Parts relatives (%) du volume total annuel prélevé dédiées à chaque usage.

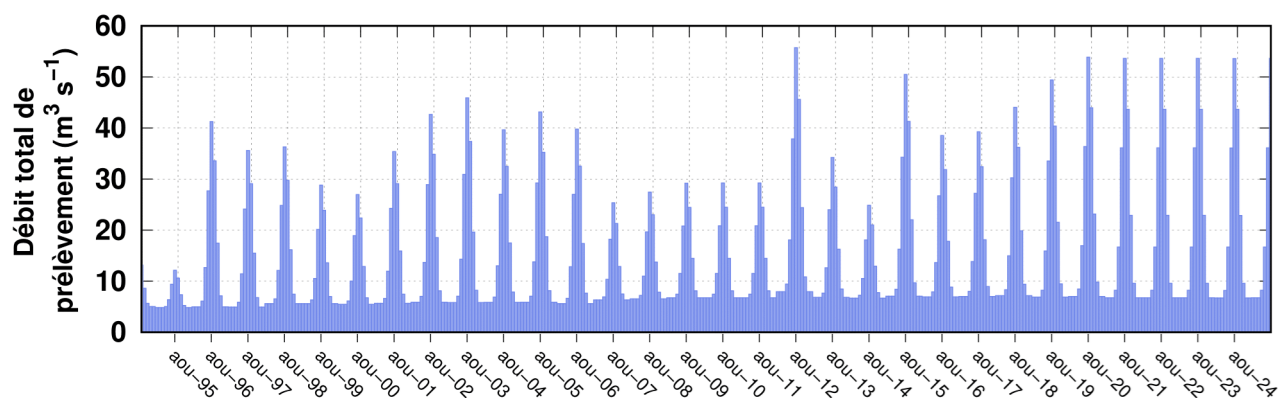


Fig. 5 – Distribution mensuelle (août 1994 - juillet 2025) des pompages cumulés actualisés sur l'ensemble de l'emprise souterraine modélisée. Valeurs en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

3 Calibration de l'hydrodynamisme aquifère

Le diagnostic et l'exploitation des paramètres souterrains² de l'application, dans sa version initiale transmise par Météo-France, font état de champs dont la provenance est difficilement traçable. Selon le paramètre considéré, des similarités de zonage peuvent être identifiées avec les champs initiaux (HydroExpert, 2004; Sogreah, 2006) ou finaux issus des travaux de calibration de Monteil (2011), mais avec des valeurs différentes — notamment pour la transmissivité et l'emménagement des formations de Craie et du Cénomane. D'autres sont entachés d'erreurs de jointure SIG ou ne sont pas définis (débit limite d'infiltration). Dans ce contexte, ce paramétrage est contourné au profit d'une nouvelle configuration initiale de calibration, à partir des champs finaux issus des travaux de Monteil (2011); champs de paramètres établis conditionnellement à un bilan de surface issu de fonctions-productions Eaudyssée, forcées par SAFRAN.

Dans la suite du document, la nomenclature ci-dessous est utilisée pour différencier les performances de l'application selon le jeu de paramètres souterrains associé :

1. "PL" (= 'plateforme') désigne le jeu de paramètres actuellement utilisé dans la plateforme Aquif-ER, à la date de décembre 2025. Il correspond à celui transmis par Météo-France au début des travaux, et a servi de base aux productions réalisées lors des phases 1 à 3 du projet sur ce secteur ;
2. "CM" correspond aux performances obtenues après substitution des paramètres "PL" (Fig. 9), par ceux issus des travaux de thèse de Céline Monteil (2011). Ce jeu constitue le point de départ de la calibration sous flux SURFEX V8F présentée dans la suite (§. 3) ;
3. "Cib." (= 'calibration') désigne les performances actualisées finales obtenues à l'issue de la nouvelle calibration sous flux SURFEX (§. 3.2).

2. Ce terme rassemble ici les champs de transmissivité, d'emménagement, de drainance verticale entre couches aquifères, de conductance au sol et de débit limite d'infiltration du réseau hydrographique vers le système aquifère.

3.1 Pré-calibration en régime permanent

Une phase préliminaire en régime permanent permet un premier ajustement des niveaux moyens simulés à ceux mesurés aux 188 piézomètres (Fig. 8), à partir de la configuration "CM", utilisée comme point de départ³. Compte tenu de la distribution temporelle des mesures disponibles (Fig. 6) et de la période réellement couverte par les données de prélèvements (Fig. 3), la période 1995–2020 est retenue comme référence. Un champ moyen de recharge aquifère issu de SURFEX V8F (Fig. 7) et de prélèvements calculés sur cette période sont ainsi utilisés pour contraindre cette simulation.

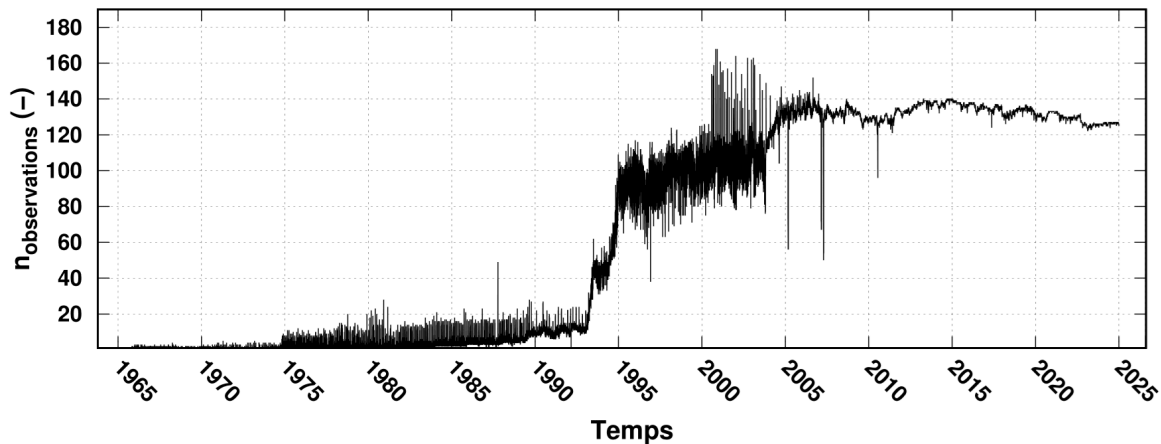


Fig. 6 – Évolution journalière du nombre de mesures piézométriques disponibles aux 188 points de contrôle sur la période 1965–2025.

3. Pour archivage des résultats intermédiaires et quantification de l'amélioration des performances suite à la nouvelle calibration (Fig. 9-b,c), une simulation en régime transitoire 1985-2025 est réalisée sous configuration "CM", forcée au pas de temps journalier par SURFEX V8F, sans aucune modification des paramètres souterrains (Fig. 9-b, et Figs. 12 et 14 - colonnes du milieu).

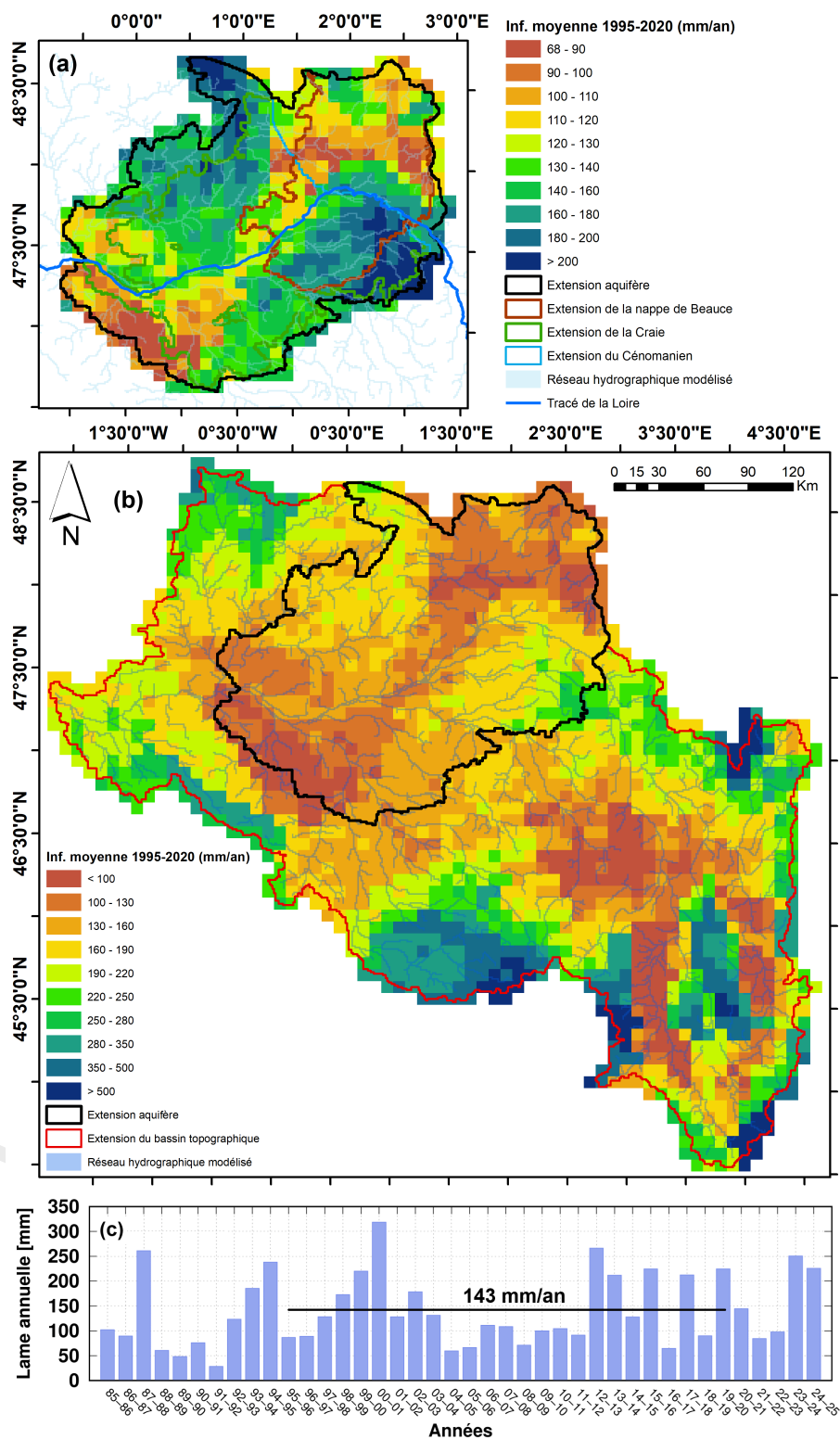


Fig. 7 – Distribution des lames d'infiltration moyennes interannuelles simulées par SURFEX V8F (1995–2020) dans les limites du **(a)** système aquifère modélisé et du **(b)** bassin versant topographique. Valeurs en mm an^{-1} . **(c)** Cumuls annuels d'infiltration agrégés sur le domaine souterrain modélisé. La ligne horizontale mentionne la valeur moyenne d'infiltration issue du champ distribué, calculé pour contraindre la pré-calibration en régime permanent.

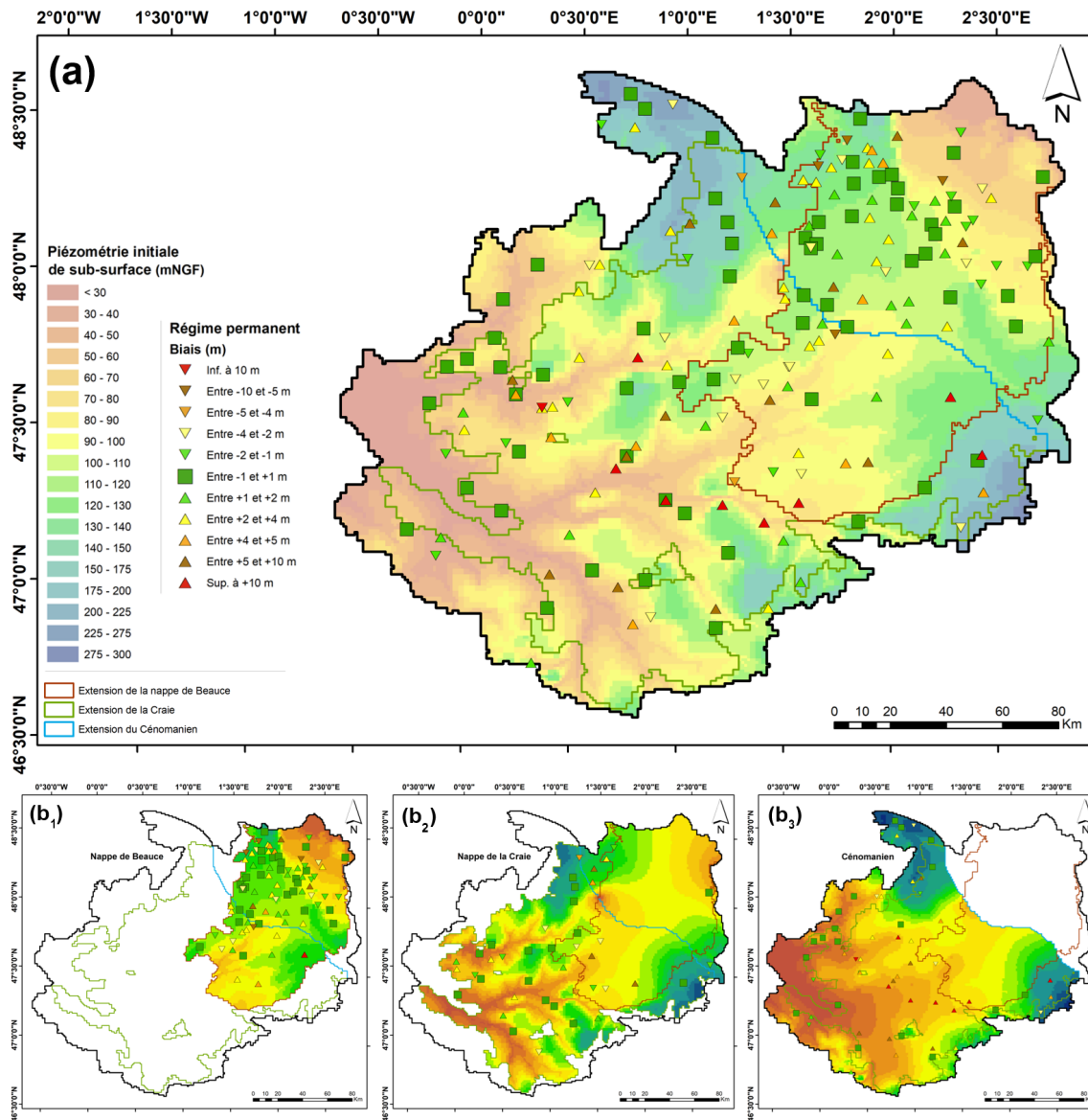


Fig. 8 – (a) Biais piézométriques (m) obtenus à l'issue de la phase de pré-calibration en régime permanent. **(b_i)** Détail pour chacun des trois horizons aquifères. De gauche à droite : nappe de Beauce, Craie et sables du Cénomaniens. Dans le cas de **(a)**, le fond de carte représente la piézométrie de sub-surface simulée sur l'ensemble du domaine. Les illustrations **(b_i)** mentionnent les piézométries calculées pour chacune des couches. Valeurs en mNGF.

3.2 Restitution de la piézométrie en régime transitoire

Les cartes piézométriques précédemment simulées (Fig. 8) servent de conditions initiales à une première simulation couplée surface/souterrain réalisée en régime transitoire (1985–2025), au pas de temps journalier, forcée par SURFEX V8F et contrainte par la base de prélèvements mensuels mise à jour (§. 2.2). À ce stade, des ajustements complémentaires sont réalisés par zonages successifs des

paramètres souterrains, afin d'améliorer la représentation des écoulements régionaux (Fig. 13), ainsi que des niveaux piézométriques moyens et dynamiques. En complément, précisons que les simulations intègrent une distribution des constantes de vidange des réservoirs de Nash de la zone non saturée, selon les travaux de [Monteil \(2011\)](#). Le nombre de réservoirs associé à chaque maille, représentatif de l'épaisseur de la zone non saturée, est, quant à lui, réactualisé selon la différence entre la cote du sol et la piézométrie de sub-surface précédemment obtenue en régime permanent (Fig. 8-a). En cas de modifications locales significatives des niveaux piézométriques entre deux itérations essais-erreurs, une simulation intermédiaire (*spin-off*) est réalisée en cours de procédure afin de restabiliser les niveaux piézométriques et réajuster localement les conditions initiales de la simulation suivante. *Spin-off* exclus, 52 simulations permettent d'aboutir aux performances présentées en Tab. 2, Figs. 9 à 14 (configuration "Clb.") ainsi qu'en annexes B et C.

La nouvelle calibration conduit à une nette amélioration des niveaux moyens sur l'ensemble du domaine (Fig. 9, 12 et 14 et Tab. 2). 69 % des piézomètres présentent désormais des RMSEs inférieures à 3 m, contre 14 % initialement. De même, 59 % des ouvrages affichent des biais absolus inférieurs à 2 m, contre 13 % auparavant. Les biais médians et les écarts interquartiles des niveaux sont fortement réduits pour chaque couche (Tab. 3 et 4). Une zone critique subsiste toutefois au niveau de quatre ouvrages du Cénomaniens, sous couverture de Craie, en rive gauche de la Loire (vallée du Cher), avec des biais et des RMSEs supérieurs à 10 m (Fig. 10). Une large part des piézomètres reste fortement influencée par la variabilité saisonnière des prélèvements agricoles (cf. Annexe B), difficile à reproduire fidèlement sans une connaissance fine des pratiques locales. Bien qu'une amélioration notable de la variabilité temporelle et des amplitudes des signaux observés soit constatée (cf. distribution des ratios des écarts-types des séries temporelles simulées et observées – Annexe C), aucune amélioration significative des dynamiques n'est globalement observée par rapport à la configuration initiale (Tab. 2). Notons cependant la forte concentration de points affleurants de la nappe de Beauce, pour lesquels les dynamiques sont reproduites de manière satisfaisante (coefficient de corrélation supérieurs à 0,7) (Fig. 11, Annexe C), ainsi que des gradients régionaux cohérents avec les observations (Fig. 13).

Seuil / Configuration	"Clb."	"CM"	"PL"
Biais absolu			
Inf. à 3 m	74 %	32 %	17 %
Inf. à 2 m	59 %	22 %	13 %
Inf. à 1 m	38 %	12 %	7 %
RMSE			
Inf. à 3 m	69 %	28 %	14 %
Inf. à 2 m	47 %	17 %	9 %
Coefficients de corrélation			
Sup. à 0.5	58 %	59 %	60 %
Sup. à 0.7	42 %	41 %	41 %

Tab. 2 – Répartition de l'effectif des piézomètres de calibration pour différentes valeurs seuils de critères statistiques. Valeurs arrondies à l'entier le plus proche.

Enfin, précisons que des vérifications informatiques préalables ont été effectuées afin de comparer les résultats de simulation obtenus avec la version du code Eaudyssée utilisée dans la plateforme Aquif-FR et celle mobilisée pour les présents travaux. Les résultats concordants obtenus, détaillés en annexe A, garantiront la pleine conservation des nouvelles performances de calibration lors de la réintégration de cette version de l'application au sein de la plateforme.

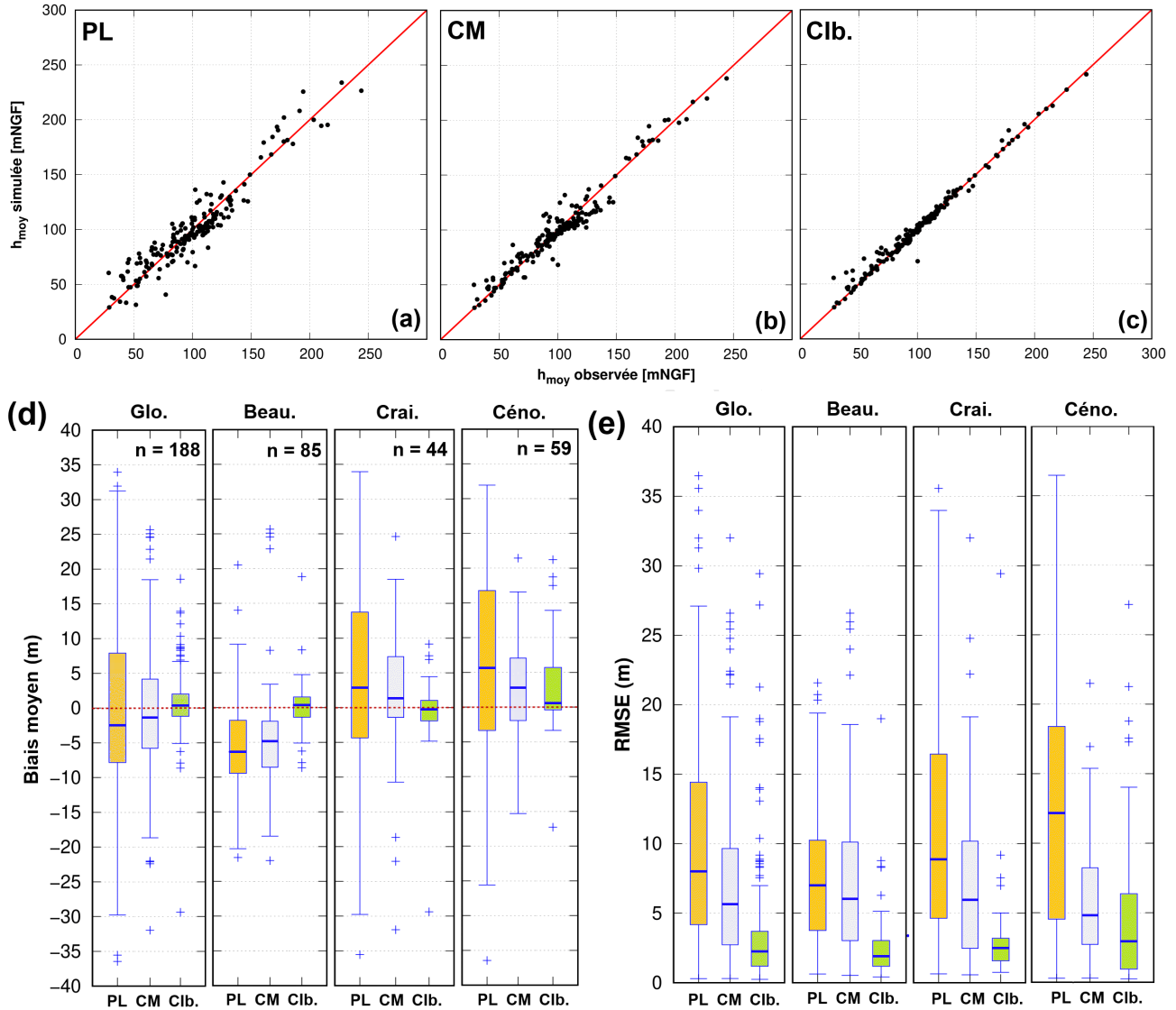


Fig. 9 – Comparaison des biais moyens (m) obtenus aux 188 piézomètres : (a) pour la version actuellement incluse à la plateforme ("PL"), (b) après intégration des paramètres issue de [Monteil \(2011\)](#), sans réajustement des paramètres ("CM") et (c) à l'issue de la nouvelle calibration en régime transitoire ("Clb."). Box-plots de distribution des (d) biais et des (e) erreurs quadratiques moyennes (RMSE) présentés pour l'ensemble du système aquifère ('Glo.' = *global*). Détail par couche pour chacune des trois configurations ("PL" en orange, "CM" en gris et "Clb." en vert) : nappe de Beauce ('Beau.'), Craie séno-turonienne ('Crai.') et sables du Cénomanien ('Céno.'). n rappelle l'effectif de piézomètres pour chacun des cas.

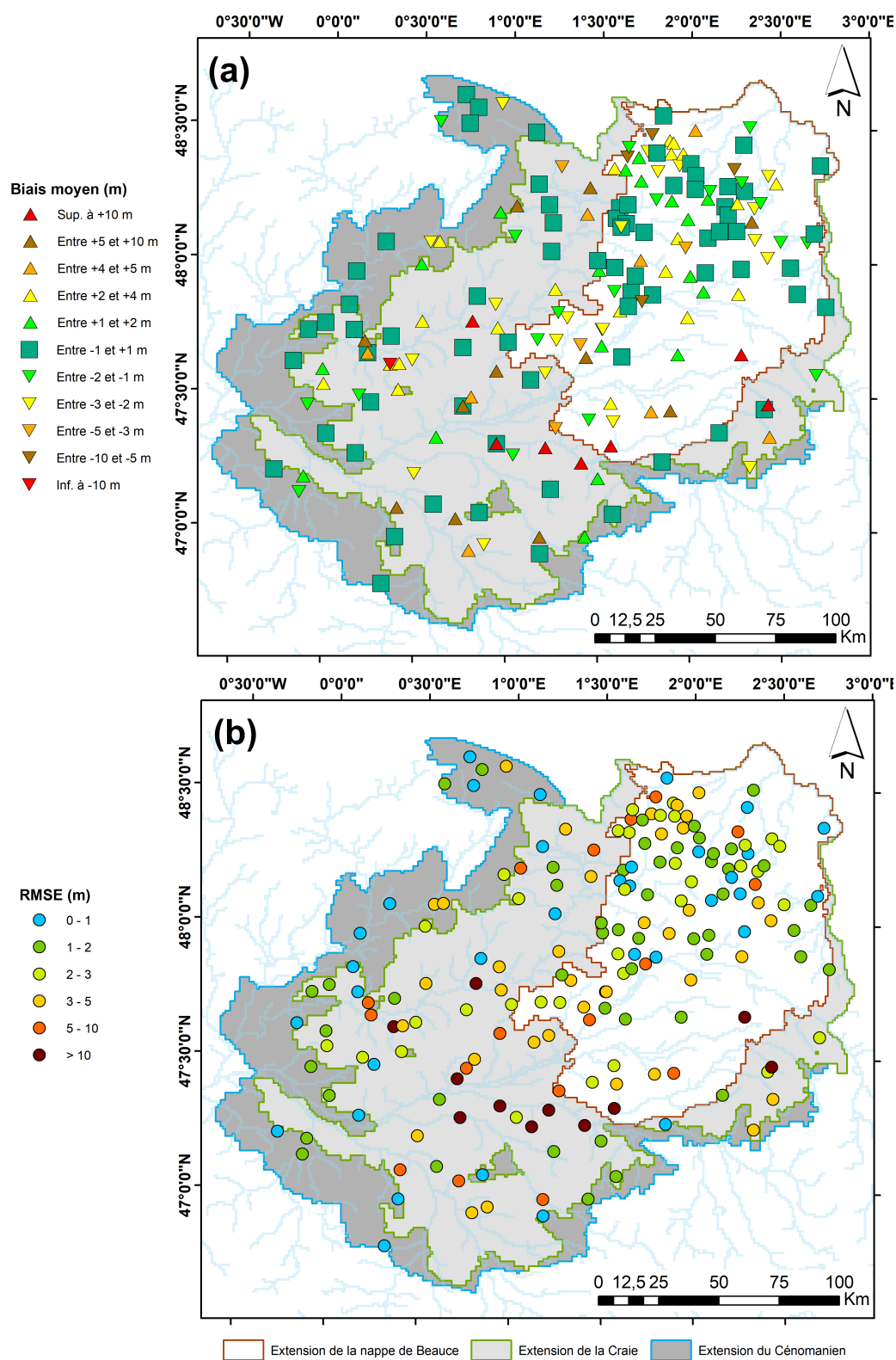


Fig. 10 – Distribution des valeurs de **(a)** biais moyens et **(b)** de RMSE à l'issue de la calibration en régime transitoire. Configuration "Clb.". Valeurs en m.

	Q ₁	Méd.	Q ₃	Q ₁	Méd.	Q ₃	Q ₁	Méd.	Q ₃	Q ₁	Méd.	Q ₃
	<i>Global</i>			<i>Beauce</i>			<i>Craie</i>			<i>Cénomannien</i>		
PL	-7,82	-2,47	+7,84	-9,47	-6,40	-1,83	-4,36	+2,80	+13,5	-3,26	+5,62	+16,4
Clb.	-1,15	+0,26	+2,02	-1,37	+0,33	1,53	-1,90	-0,24	+0,97	-0,37	+0,54	+5,22

Tab. 3 – Valeurs (m) des biais moyens à l'issue de la calibration en régime transitoire : la médiane ('Méd.') ainsi que les valeurs des premiers (Q₁) et troisième quartiles (Q₃) sont précisées. Agrégation sur l'ensemble du système aquifère ('Global') et détail par horizon simulé.

	Q ₁	Méd.	Q ₃	Q ₁	Méd.	Q ₃	Q ₁	Méd.	Q ₃	Q ₁	Méd.	Q ₃
	<i>Global</i>			<i>Beauce</i>			<i>Craie</i>			<i>Cénomannien</i>		
PL	4,22	7,99	14,35	3,76	7,00	10,25	4,64	8,87	16,27	4,59	12,17	18,12
Clb.	1,19	2,23	3,70	1,17	1,92	3,04	1,59	2,49	3,18	0,94	2,93	6,22

Tab. 4 – Valeurs (m) des RMSE à l'issue de la calibration en régime transitoire : la médiane ('Méd.') ainsi que les valeurs des premiers (Q₁) et troisième quartiles (Q₃) sont précisées. Agrégation sur l'ensemble du système aquifère ('Global') et détail par horizon simulé.

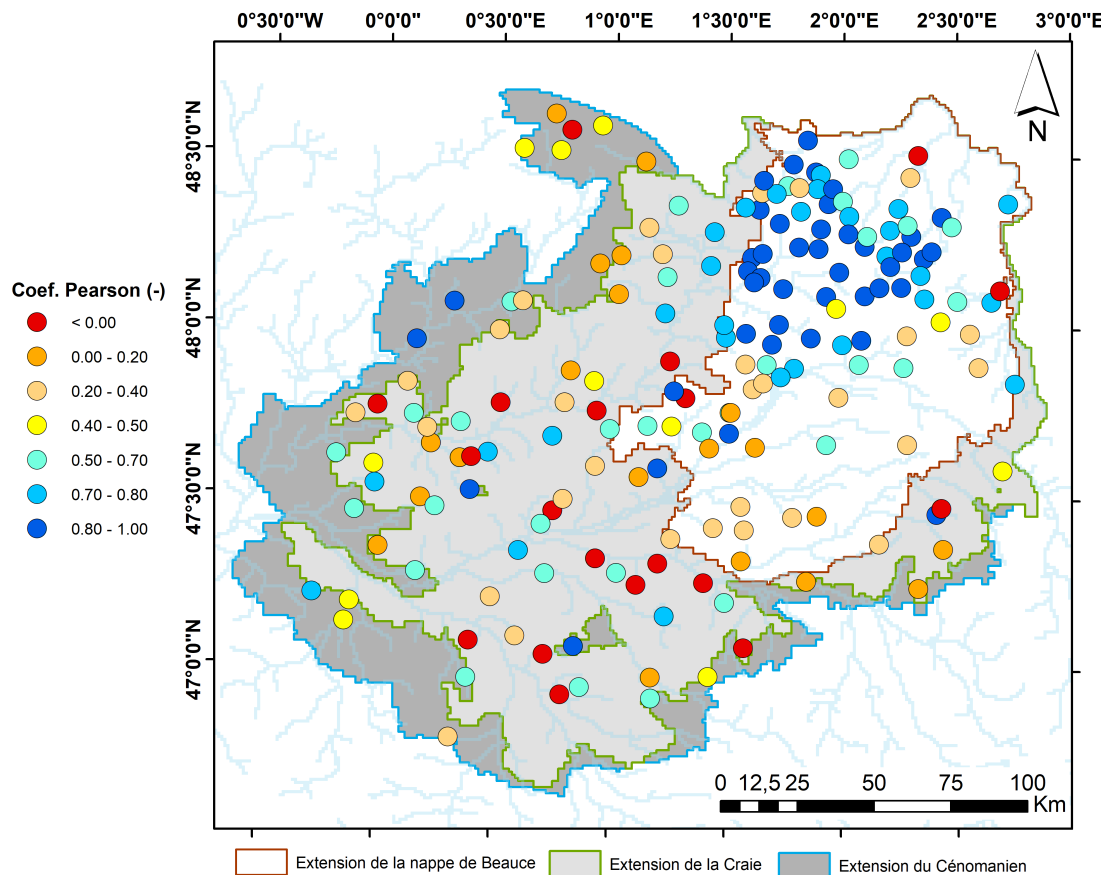


Fig. 11 – Distribution des valeurs de coefficient de corrélation (coef. de Pearson - adimensionnel) à l'issue de la calibration en régime transitoire. Configuration "Clb.".

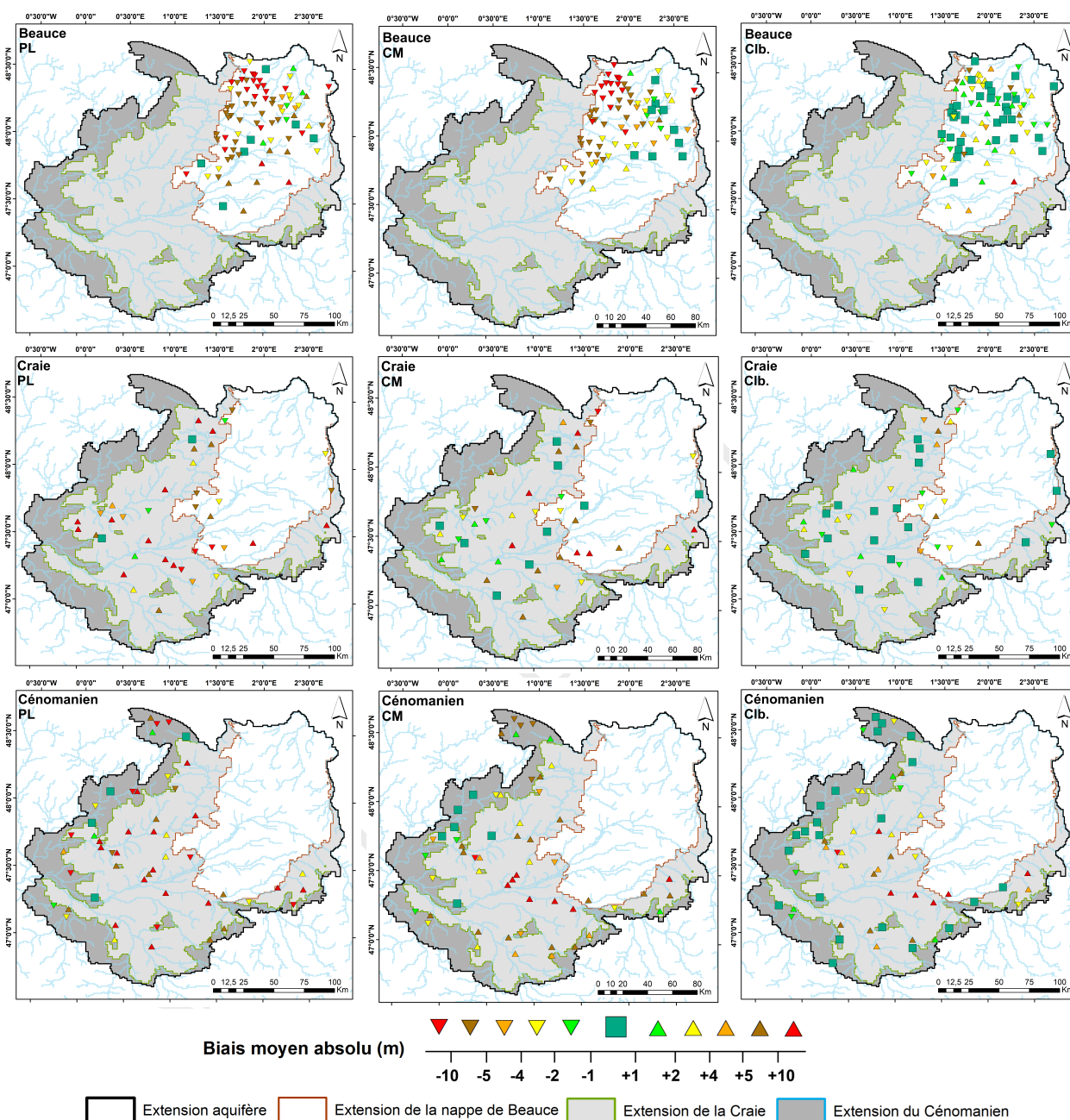


Fig. 12 – Détail distribué des valeurs de biais piézométriques (m) par horizon modélisé (en ligne : Beauce, Craie et Cénomanien, de haut en bas) pour chacune des trois configurations : Configuration initiale Aquifère ("PL", colonne de gauche), après mise à jour des paramètres souterrains issus des travaux de [Monteil \(2011\)](#) ("CM", colonne centrale) et à l'issue de la calibration ajustée en régime transitoire (configuration "Clb.", colonne de droite).

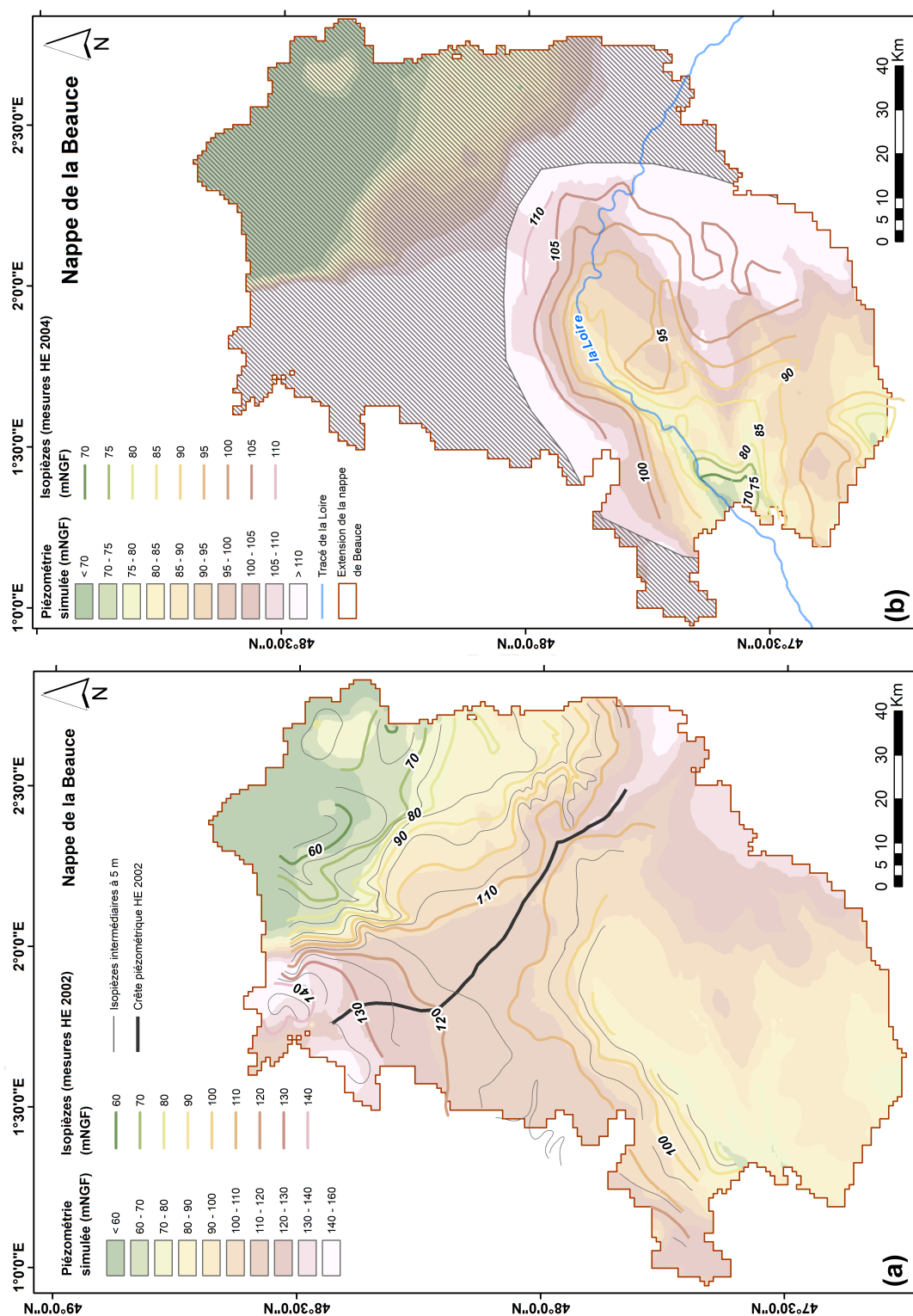


Fig. 13 – (a) Comparaison de la piézométrie Nord de la nappe de Beuce simulée (fond de carte) et observée (isopiezies). Configuration de hautes eaux 2002 (période du 15 mars au 15 avril 2002 - [Verley et al. \(2003\)](#)). (b) Identique à (a) pour la nappe de Beuce sud (région de Sologne). Configuration de hautes eaux 2004 (période du 1^{er} au 19 avril 2004 - [Calligee \(2004\)](#)).

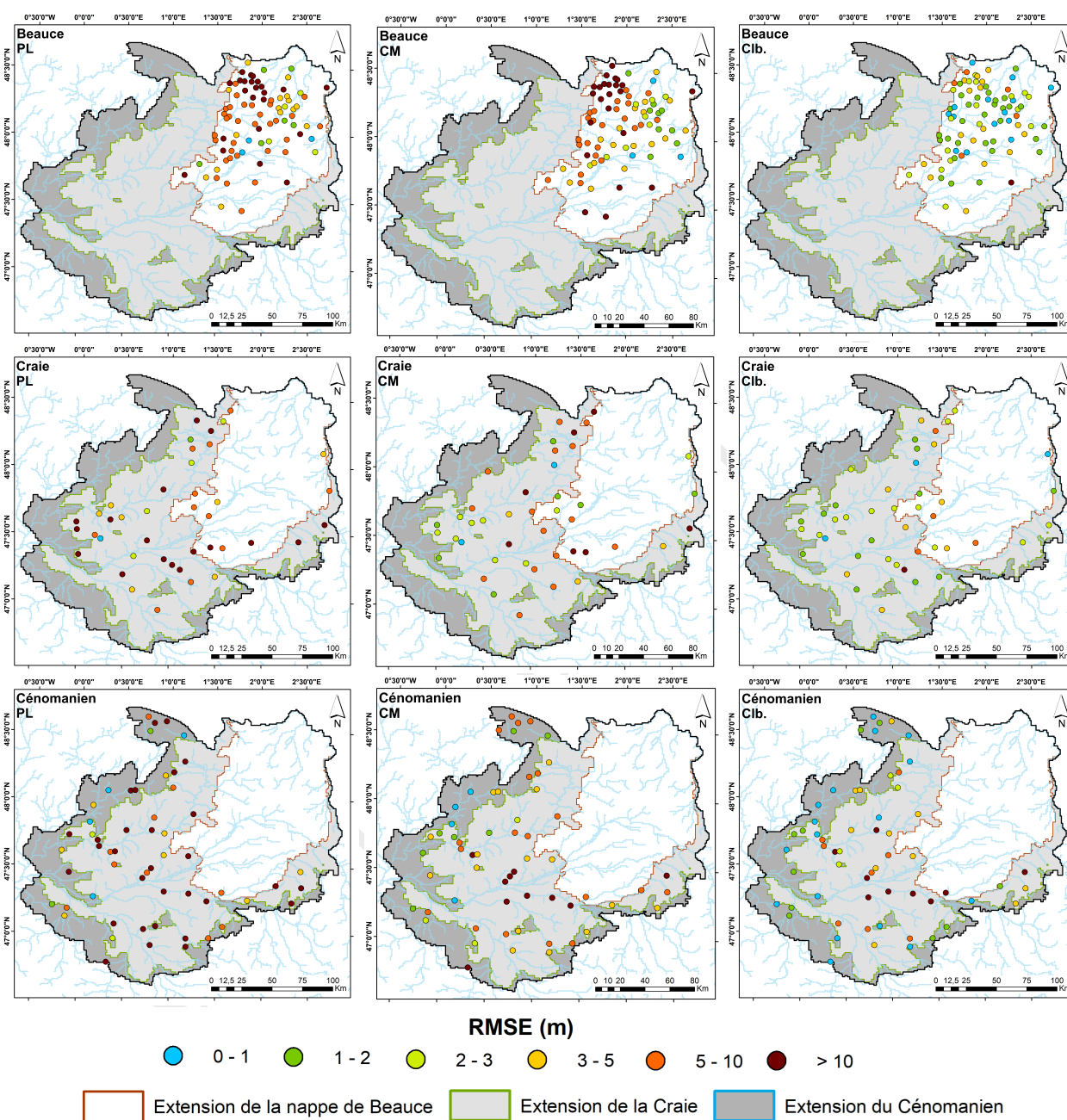


Fig. 14 – Figure identique à la figure 12, appliquée à la RMSE. Valeurs en m.

4 Conclusion

Ces travaux mettent désormais à disposition de la plateforme Aqui-FR une version calibrée de l'application "Eaudyssée-Loire", conditionnée aux flux de sub-surface issus de SURFEX V8F. Cette calibration améliore significativement la représentation de l'hydrodynamisme aquifère. Les performances actuelles de restitution de la piézométrie indiquent notamment :

- 69 % des piézomètres avec une RMSE inférieure à 3 m (contre 14 % auparavant) ;
- 59 % des ouvrages présentant un biais absolu inférieur à 2 m (contre 13 % initialement) ;
- une réduction notable des écarts interquartiles des biais piézométriques pour chaque couche ;
- une restitution satisfaisante des gradients régionaux et des dynamiques, notamment pour la nappe de Beauce.

Malgré ces progrès, certaines zones critiques subsistent localement, en particulier sous couverture de Craie, où les biais et RMSE restent élevés. La variabilité et localisations précises des prélèvements agricoles, difficile à caractériser finement à partir des données nationales disponibles, limite encore la restitution des dynamiques aux niveaux de nombreux ouvrages.

Version provisoire

Annexes

Sommaire

A	Vérifications informatiques : Conservation des performances de calibration au sein de la plateforme	21
B	Exemples de chroniques comparées de restitution piézométrique	23
C	Courbes classées détaillées des critères statistiques de calibration	30

Version provisoire

A Vérifications informatiques : Conservation des performances de calibration au sein de la plateforme

Afin de prévenir d'éventuelles divergences liées aux versions du code de calcul susceptibles de biaiser les performances présentées dans ce document lors de la réintégration de l'application "Eaudyssée-Loire" dans la plateforme, des vérifications ont été mises en œuvre en amont de ces travaux. Celles-ci comparent les résultats de piézométrie obtenus à partir de la version du code Eaudyssée utilisée dans la plateforme (désignée "plateforme" - Figs. A.1 et A.2) à ceux produits par la version actuellement compilée sur les serveurs du Centre de Géosciences ("local"). Les charges hydrauliques mensuelles simulées par la plateforme sont comparées à celles obtenues localement (simulation journalière) sur l'ensemble de la période de simulation considérée dans la plateforme (1958-2025), sous mêmes forçages, contraintes de prélèvements souterrains et conditions initiales (Figs. A.1, A.2).

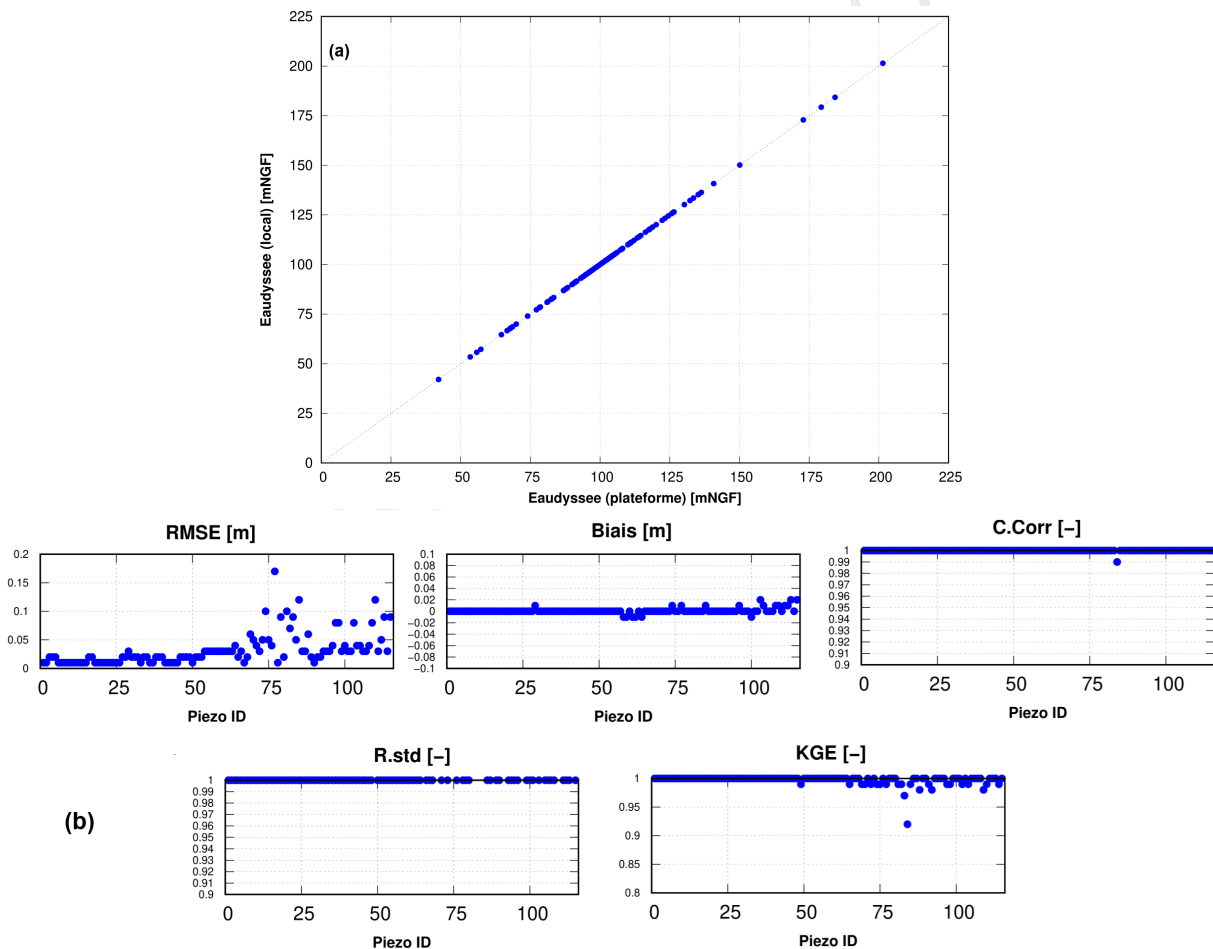


Fig. A.1 – (a) Niveaux piézométriques moyens simulés aux niveaux des 115 points initiaux de contrôle piézométriques : Comparaisons entre la version d'Eaudyssée incluse à la plateforme Aquif-Fr (abscisse) et la version "locale" utilisée pour réaliser la calibration (ordonnée). Valeurs moyennées en chaque point sur la durée totale de simulation : 1958-2025. **(b)** Détail des indices usuels de performances aux niveaux de chaque point.

Les critères statistiques obtenus aux 115 points d'extraction correspondent globalement bien à leur optimum respectif (Fig. A.1-b), à l'exception de quelques uns qui s'en écartent légèrement (six points à $RMSE > 10$ cm). Dans ces cas, les comparaisons visuelles fournies (Fig. A.2) permettent de vérifier la bonne cohérence des résultats. Ces écarts mineurs sont donc uniquement liés à la différence de pas de temps utilisée de part et d'autre pour la comparaison.

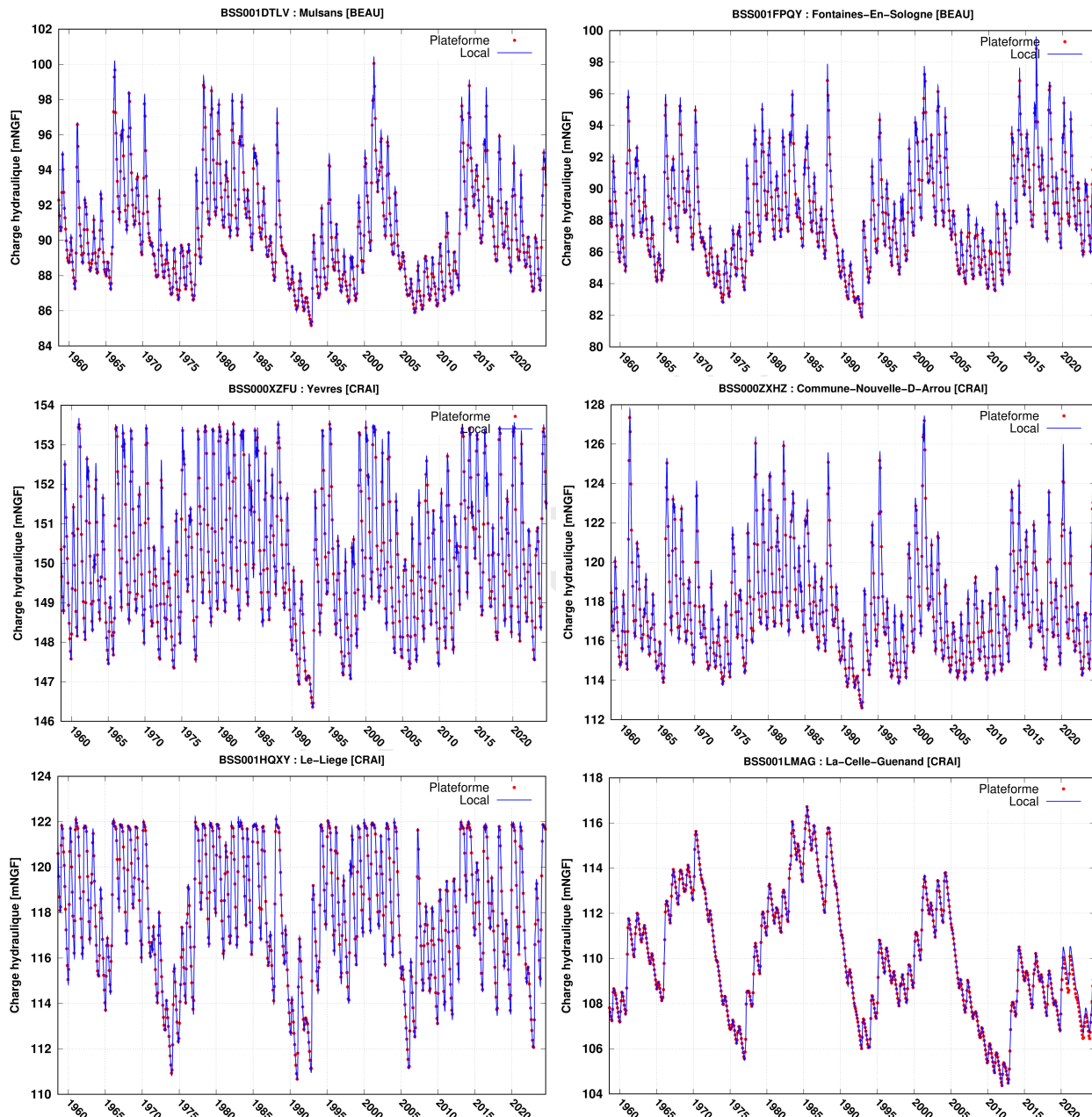


Fig. A.2 – Chroniques piézométriques pour les six points de contrôle aux valeurs de RMSE les plus élevées (c.-à-d., sup. à 10 cm) : Comparaison entre les résultats issus de la plateforme (pas de temps mensuel, points rouges) et la version "locale" (résultats journaliers, courbes bleues).

B Exemples de chroniques comparées de restitution piézométrique

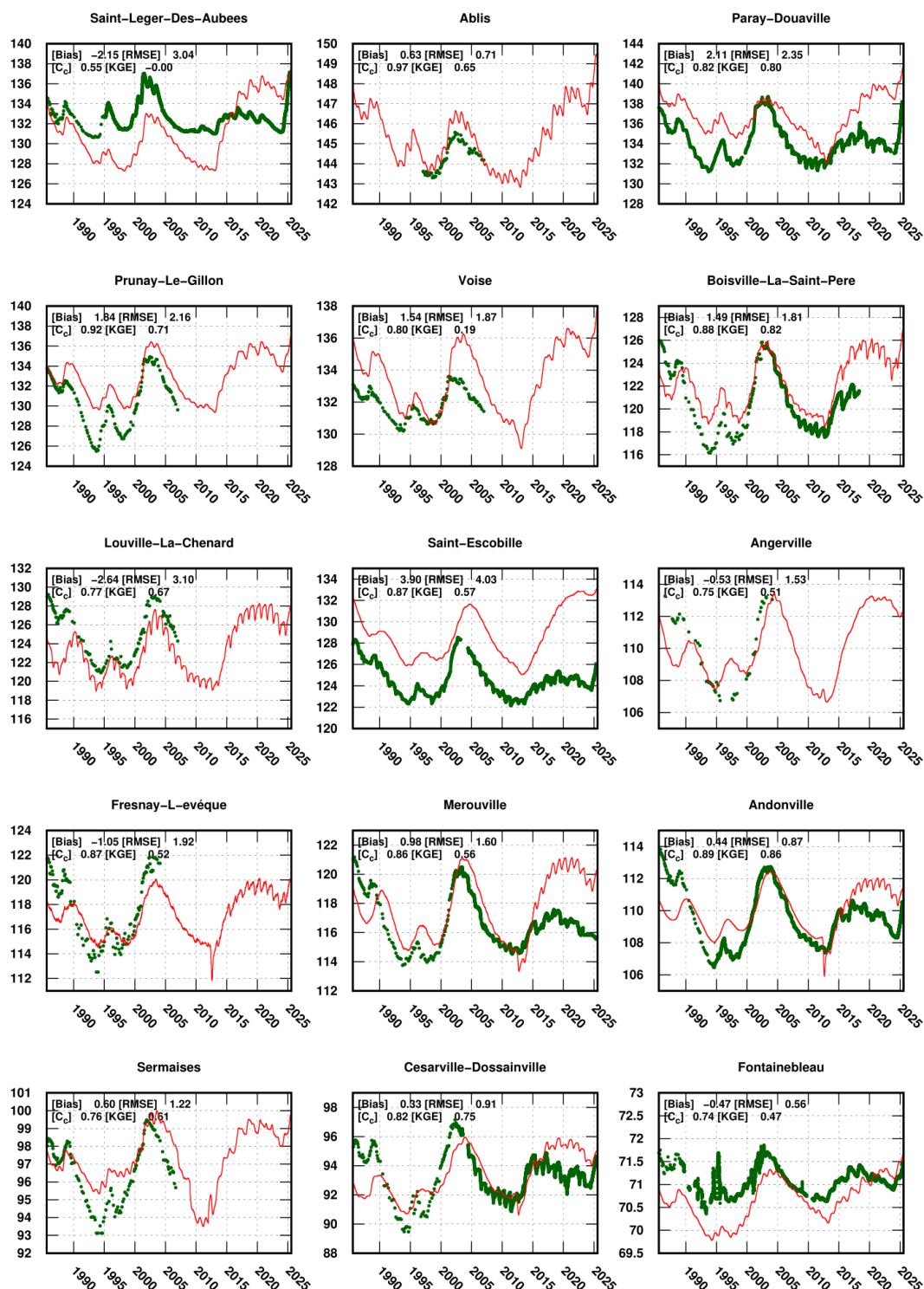


Fig. B.1 – Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la nappe de Beauce (1/3).

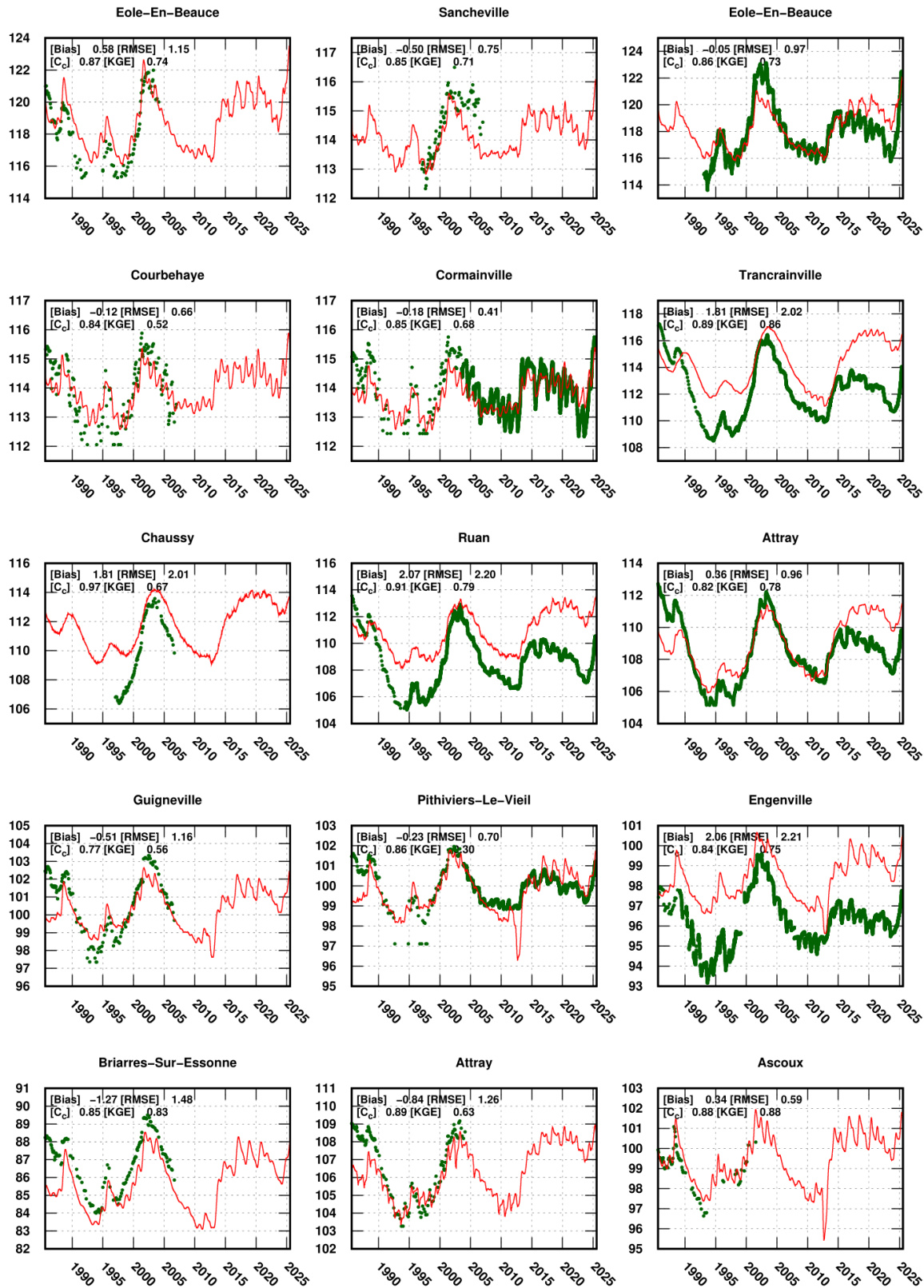


Fig. B.2 – Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la nappe de Beauce (2/3).

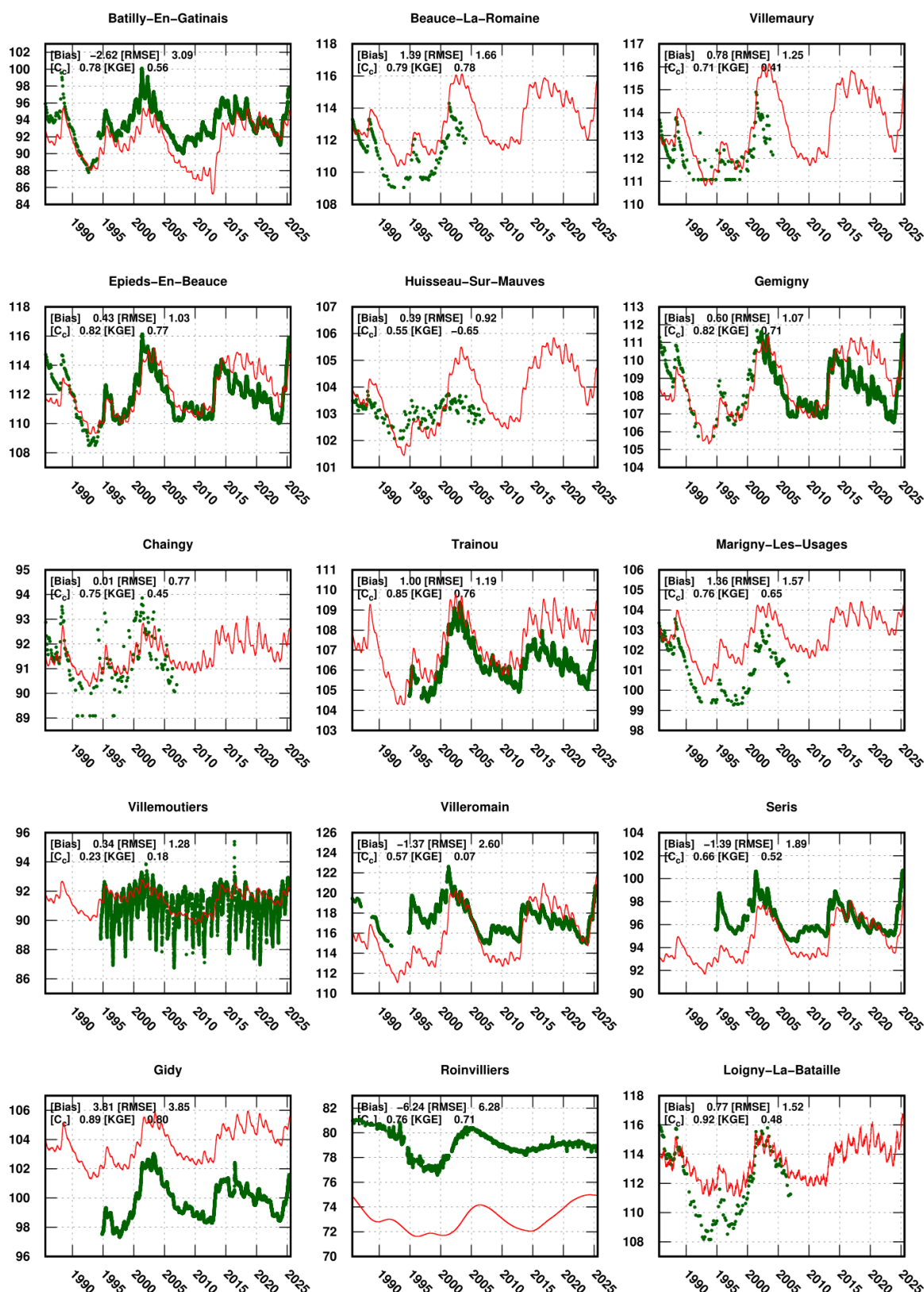


Fig. B.3 – Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la nappe de Beauce (3/3).

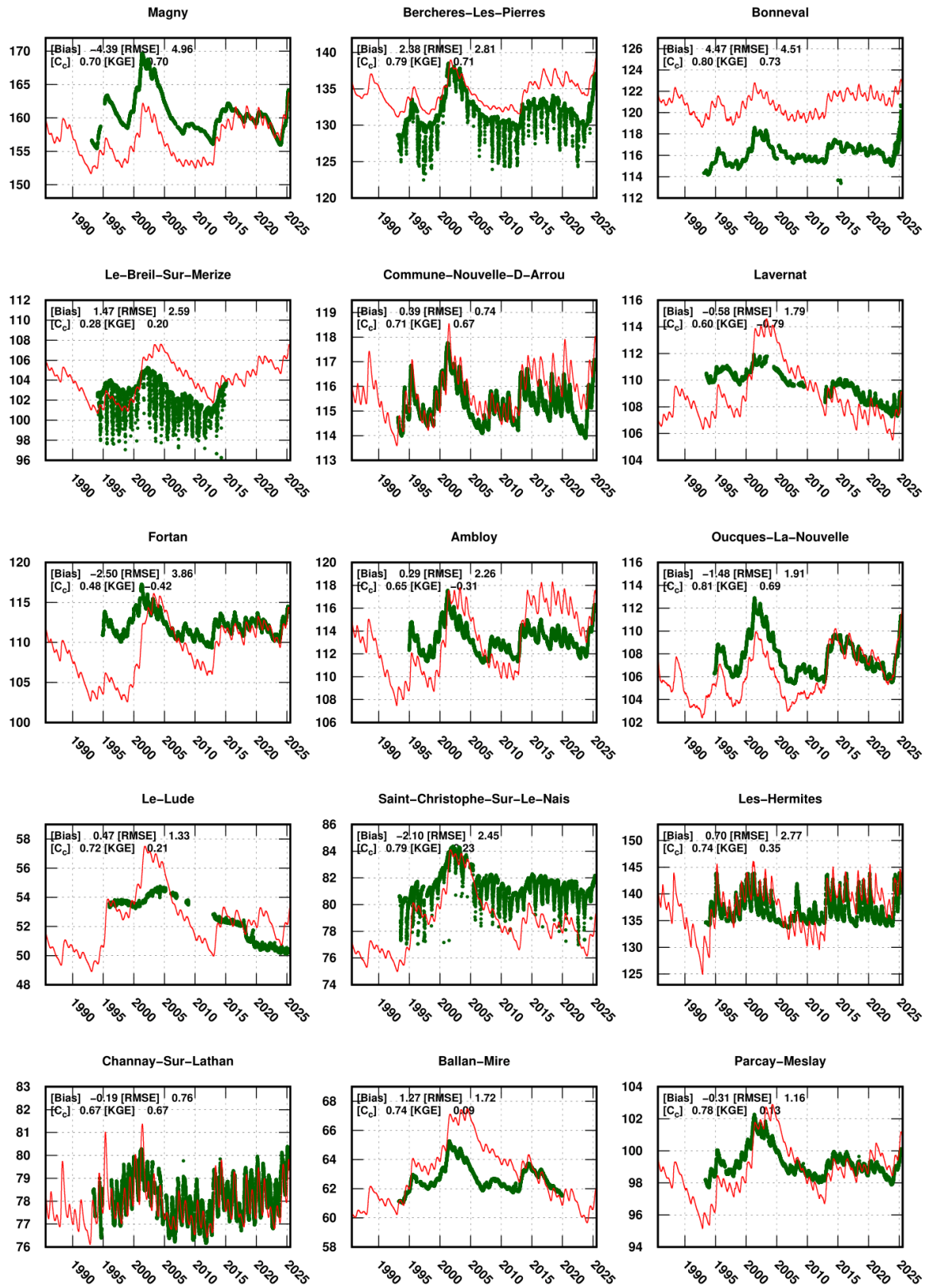


Fig. B.4 – Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la Craie sénéto-turonienne (1/2).

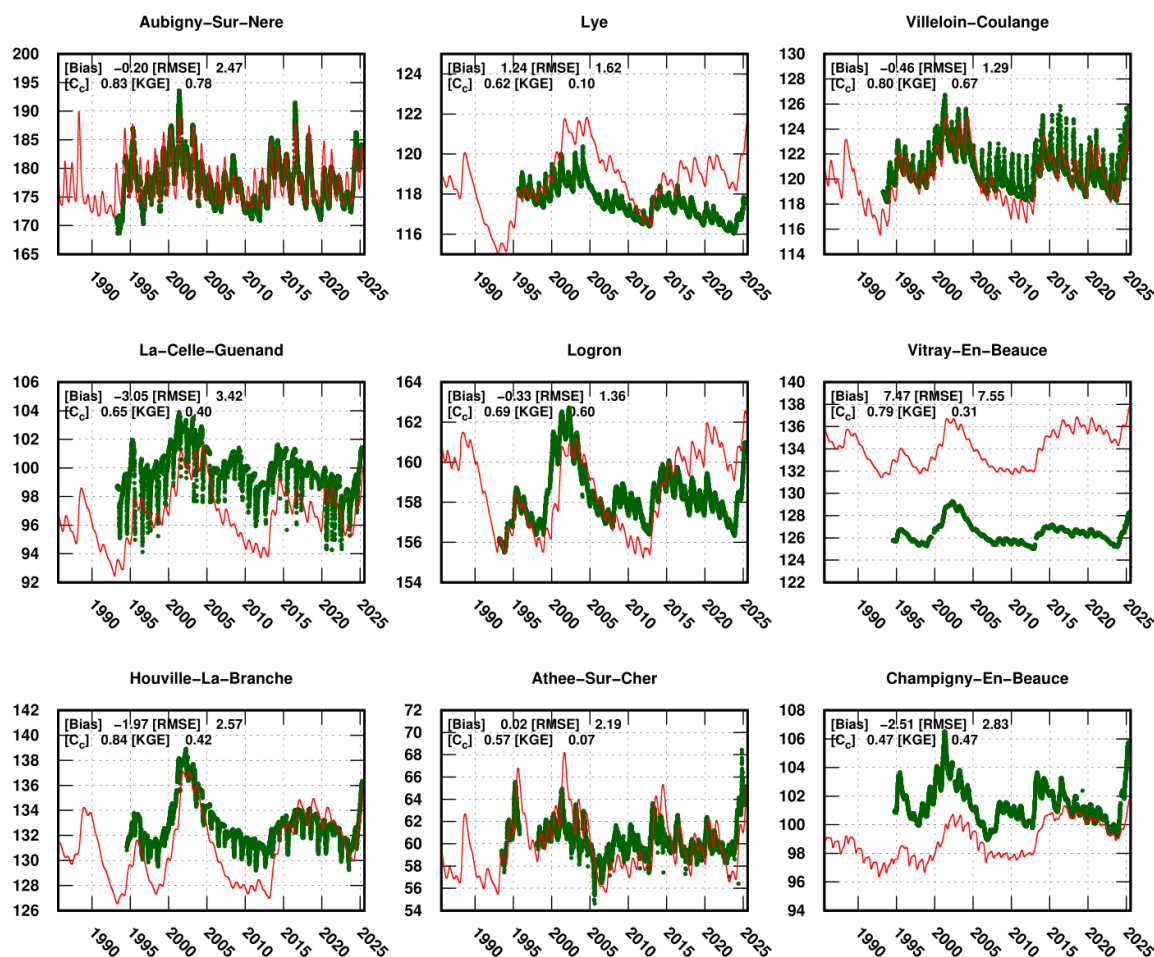


Fig. B.5 – Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages de la Craie séno-turonienne (2/2).

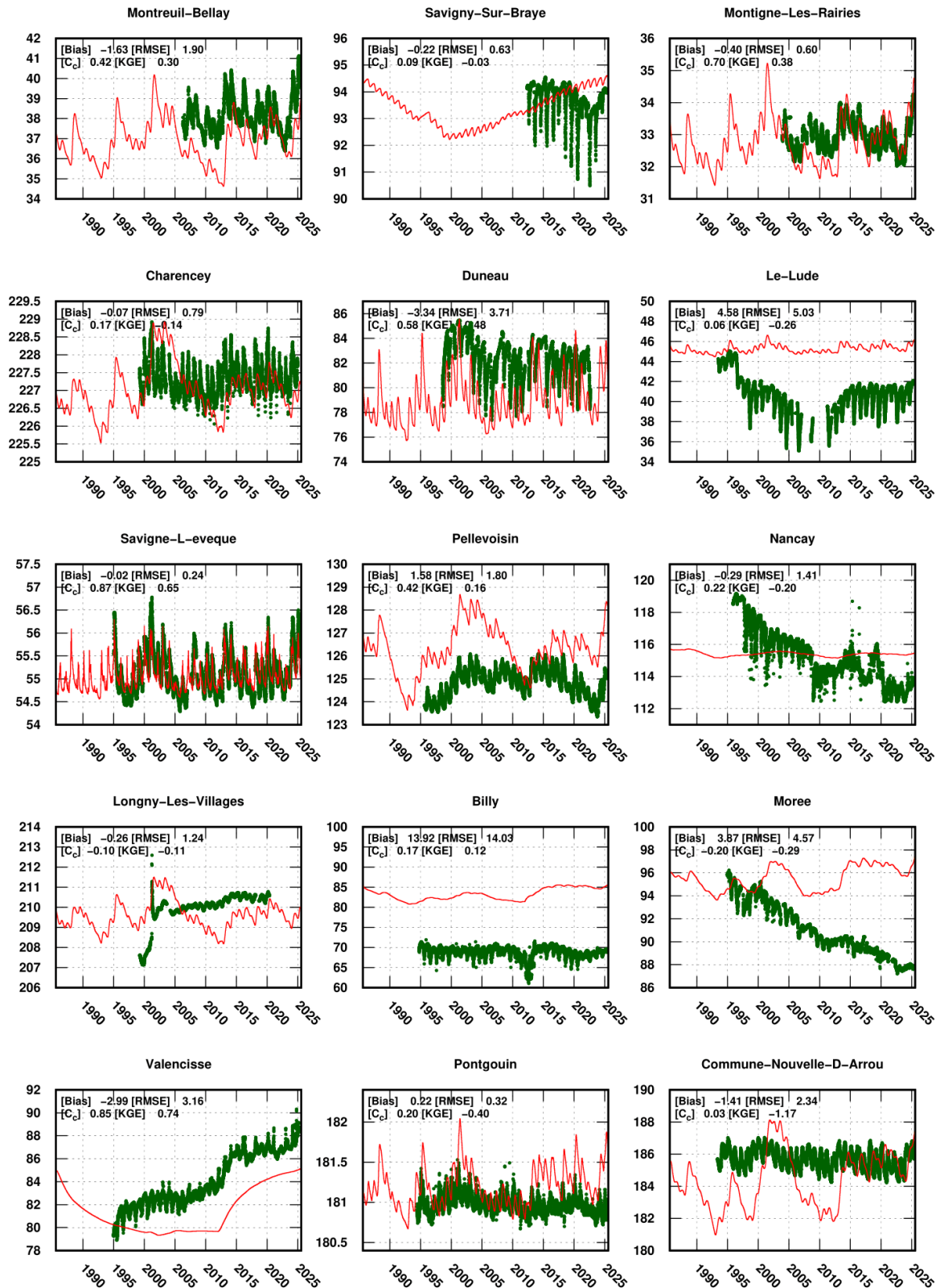


Fig. B.6 – Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages des sables cénomaniens (1/2).

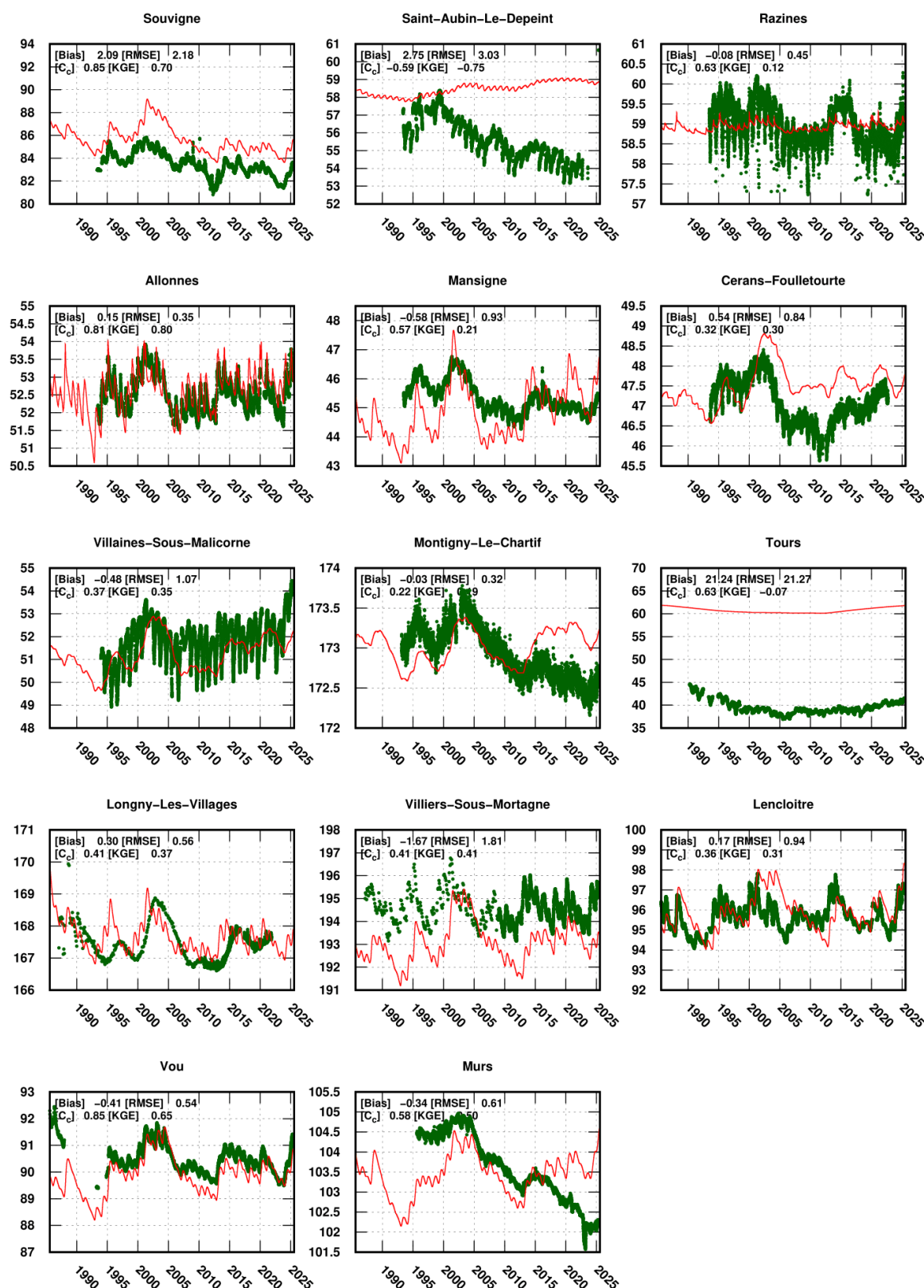


Fig. B.7 – Comparaisons des chroniques piézométriques simulées et mesurées pour les ouvrages des sables cénomaniens (2/2).

C Courbes classées détaillées des critères statistiques de calibration

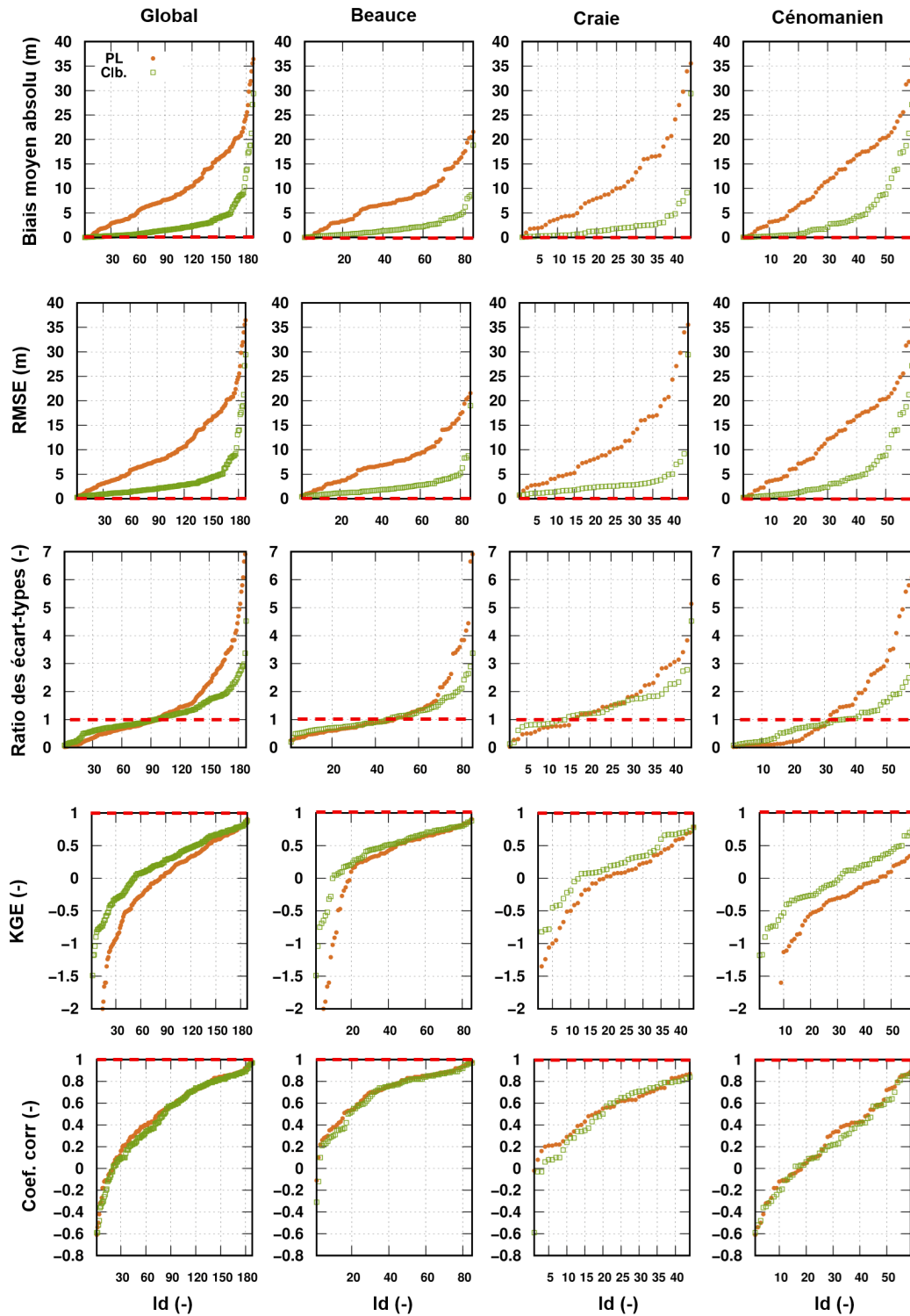


Fig. C.1 – Courbes classées comparées des critères statistiques aux niveaux des 188 piézomètres sur la période de calage avant ("PL", courbes oranges) et après calibration ("Cib.", courbes vertes). De haut en bas : biais moyen absolu, RMSE, Ratio des écarts-types, KGE et coefficients de corrélation. Agrégation sur l'ensemble du système aquifère ("Global") et distinction par couche modèle.

Références

- Calligee** (2004). Réalisation de la carte piézométrique de la nappe de Beauce du Val de Loire et de Sologne en périodes de hautes eaux - Mars 2004. Rapport technique d'étude Gest'Eau 04-45180, Calligee. 15
- Flipo, N., Gallois, N. et Schuite, J.** (2023). Regional coupled surface-subsurface hydrological model fitting based on a spatially distributed minimalist reduction of frequency domain discharge data. *Geoscientific Model Development*, 16(1):353–381, [doi:10.5194/gmd-16-353-2023](https://doi.org/10.5194/gmd-16-353-2023). 4
- HydroExpert** (2004). Reprise du modèle de gestion de la nappe de Beauce. Phase I - Calage en régime permanent et transitoire. Rapport technique d'étude RPP04M026b, Agence de l'eau Loire-Bretagne. 6
- Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D. et Rousset-Regimbeau, F.** (2020). The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran–Isba–Modcou hydrometeorological model for France. *Geoscientific Model Development*, 13(9):3925–3946, [doi:10.5194/gmd-13-3925-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020). 1
- Monteil, C.** (2011). *Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage*. Thèse de doctorat, Paris, ENMP. ii, 1, 2, 4, 5, 6, 10, 11, 14
- Sogreah** (2006). Programme d'étude et de modélisation pour la gestion de la nappe du Cénomanien - Rapport de fin de phase 4. Rapport technique d'étude 273 0117-R4V4, Sogreah. 6
- Vergnes, J.-P., Roux, N., Habets, F., Ackerer, P., Amraoui, N., Besson, F., Caballero, Y., Courtois, Q., de Dreuzy, J.-R., Etchevers, P., Gallois, N., Leroux, D. J., Longuevergne, L., Le Moigne, P., Morel, T., Munier, S., Regimbeau, F., Thiéry, D. et Viennot, P.** (2020). The AquifR hydrometeorological modeling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France : evaluation over a 60-year period. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(2):633–654, [doi:10.5194/hess-24-633-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-633-2020). 1

Verley, F., Brunson, F., Verjus, P. et Cholez, M. (2003). Nappe de Beauce - Piézométrie hautes eaux 2002. Rapport d'étude technique, DIREN Centre. [15](#)

Version provisoire

Version provisoire