



72 rue Riquet - Bat A
31000 Toulouse
Tél : 05 61 62 50 68
E-mail : eaucea@eaucea.fr
www.eaucea.fr



Le Vexin 1 - 8, place de la Fontaine
95000 CERGY
Tél : 01 30 32 33 30
E-mail : ecodecision@ecodecision.fr
www.ecodecision.fr



**SEINE
GRANDS
LACS**

Phase 1 :
caractérisation des étiages du bassin

Novembre 2022

*Etude globale sur l'incidence socio-économique et
environnementale des étiages sévères sur le bassin amont
de la Seine*



« Ce projet est cofinancé par le Fonds Européen du Développement Régional »

SOMMAIRE

1	CONTEXTE DE L'ETUDE	9
2	ANALYSE DES DONNEES EXISTANTES.....	10
2.1	LES DONNEES CARTOGRAPHIQUES D'OCCUPATION DU TERRITOIRE	10
2.2	DONNEES HYDROMETRIQUES MESUREES	10
2.3	DONNEES DE RECONSTITUTIONS ET REANALYSES DE DEBITS NATURALISES	11
2.3.1	Reconstitution hydrologique du bassin de la Seine – 1900-2009 – EPTB Seine Grands Lacs	11
2.3.2	Reconstitution hydrométéorologique du bassin de la Seine 1852 – 2008 – modèle Aqui-FR	17
2.3.3	Réanalyse hydrométéorologique à l'échelle de la France sur 150 années, donnée FYRE Hydro	23
2.3.4	Comparatif des données disponibles	26
2.4	LES DONNEES METEOROLOGIQUES MESUREES	28
2.5	DONNEES METEOROLOGIQUES DU CLIMAT FUTUR	30
2.6	DONNEES HYDROLOGIQUES DU CLIMAT FUTUR	31
2.7	LES DONNEES QUALITE.....	33
2.7.1	Les données température	33
2.7.2	Les données d'oxygène dissous.....	34
2.7.3	Autres paramètres physico-chimiques.....	35
3	ANALYSE DES ETIAGES : CARACTERISATION ET ETIAGES HISTORIQUES	37
3.1	LA COMPREHENSION DU TERRITOIRE	37
3.1.1	Le relief	37
3.1.2	Les précipitations – moyennes interannuelles & périodes d'étiage	38
3.1.3	La géologie.....	44
3.1.4	L'hydrogéologie	46
3.1.5	L'hydrologie	48
3.2	ANALYSE DES EVENEMENTS HISTORIQUES ET SELECTION DE 3 ETIAGES	51
3.2.1	Choix des indicateurs d'étiage	51
3.2.2	Les QMNA	53
3.2.3	Les VNC10	56
3.2.4	Les déficits.....	58
3.2.5	La durée des étiages	64
3.2.6	Les périodes de retour des étiages et tableau de synthèse.....	67
3.3	ANALYSE STATISTIQUE DES ETIAGES HISTORIQUES.....	69
3.3.1	L'étiage de 1921.....	69
3.3.2	L'étiage de 1949.....	70
3.3.3	L'étiage de 1976.....	71
3.3.4	L'étiage de 1991.....	72
3.4	RELATIONS NAPPE-RIVIERE ET DYNAMIQUE DE MISE EN PLACE DES ETIAGES HISTORIQUES	73
4	ANALYSE DU PANEL D'EVENEMENTS D'ETIAGE REPRESENTATIFS DU « TEMPS FUTUR » DANS LA PERSPECTIVE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	84
4.1	DONNEES CLIMATIQUES DES EPISODES DE SECHERESSE	84
4.2	INDICATEURS HYDROLOGIQUES D'ETIAGE DES EPISODES DE SECHERESSE	87
4.2.1	Généralités.....	87
4.2.2	Les QMNA	87
4.2.3	Les VCN10	91
4.2.4	Les déficits.....	94
4.2.5	La durée des étiages	97
4.3	TEMPERATURE DE L'EAU	100
4.3.1	Calage du modèle	100
4.3.2	Changement climatique.....	105

4.4	OXYGENE DISSOUS.....	115
4.4.1	Calage du modèle	115
4.4.2	Changement climatique.....	122
4.5	NITRATES ET PHOSPHORE.....	132
4.5.1	Origine des apports.....	132
4.5.2	Evolution future	138
5	CONSTRUCTION DES OUTILS DE MODELISATION	141
5.1	OBJECTIFS VISES ET PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	141
5.2	DONNEES D'ENTREE.....	142
5.2.1	Données	142
5.2.2	Impacts hydrologiques des prélèvements.....	143
5.2.3	Relations entre les stations de références	144
5.2.4	Propagation des effets hydrologiques	146
5.3	CALAGE DU MODELE	148
5.4	DONNEES DE SORTIE	148
6	CONCLUSION	149

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Objectifs et organisation de l'étude.....	9
Figure 2 : Points de reconstitution de l'étude Sogreah, 1988	12
Figure 3 : Méthodologie systématique employée pour la reconstitution des débits (Sogreah, 1988).....	13
Figure 4 : Nouvelle répartition des points de reconstitution des débits (Sogreah, 1995)	14
Figure 5 : Nouvelle répartition des points de reconstitution des débits (Sogreah, 1997)	15
Figure 6 : Répartition des points de reconstitution, Hydratec, 2011	16
Figure 7 : Principe de la structure Aquif-FR et extension des aquifères représentés (rapport final de 1 ^{ère} phase AQUIF-FR, 2016)	18
Figure 8 : Schématisation multicouches du modèle du modèle MODCOU (PIREN Seine).....	18
Figure 9 : Extension de la couche de surface du modèle MODCOU (PIREN Seine)	19
Figure 10 : Extension de la partie hydrogéologique du modèle EauDyssée (Viennot 2009)	19
Figure 11 : Rapport entre le débit moyen simulé et observé aux différents points de mesure pour les périodes de 1999 à 2005 (rapport final de 1 ^{ère} phase AQUIF-FR, 2016).....	20
Figure 12 : Cartes des stations d'observations mensuelles (SMR, Météo-France) des précipitations (gauche) et de la température (droite), disponibles sur le bassin versant de la Seine à Poses sur la période 1885-2005 sans valeurs manquantes (R. Bonnet, 2018).....	21
Figure 13 : Répartition des points extraits en 35 stations hydrométriques et 44 piézomètres du bassin de la reconstitution AQUIF-FR	22
Figure 14 : Emplacement des 662 stations hydrométriques de référence. Source A. DEVERS, 2019.....	24
Figure 15 : Carte des données FYRE Hydro sur bassin de la Seine (étude FYRE Hydro)	25
Figure 16 : Analyse des QMNA5 spécifiques des séries de données de débits « naturalisés »	27
Figure 17 : Localisation des stations Météo France (convention EPTB / Météo France)	28
Figure 18 : Evolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m ² sur la période 1850-2250 (meteofrance.fr).....	30
Figure 19 : Sélection des épisodes de sécheresse intense (Scénarios sécheresse sur le bassin Seine-Normandie, 2018) ..	32
Figure 20 : Localisation des stations d'enregistrement de la température du réseau Naïades.....	33
Figure 21 : Localisation des stations de mesure de l'oxygène dissous du réseau Naïades	34
Figure 22 : Localisation des stations de mesure des paramètres azotés du réseau Naïades.....	35
Figure 23 : Localisation des stations de mesure des paramètres phosphorés du réseau Naïades	36
Figure 24 : Relief du territoire.....	37
Figure 25 : Précipitations moyennes interannuelles (lame d'eau AURELHY).....	38
Figure 26 : évolution des précipitations mensuelles sur la période 1996-2019. Source des données : Météo France et EPTB Seine.....	39
Figure 27 : répartition spatiale des précipitations mensuelles. Mois de juillet. Moyenne sur la période 1996-2019.....	40
Figure 28 : répartition spatiale des précipitations mensuelles. Mois d'août. Moyenne sur la période 1996-2019.....	40
Figure 29 : répartition spatiale des précipitations mensuelles. Mois de septembre. Moyenne sur la période 1996-2019 ..	41
Figure 30 : cumuls mensuels des précipitations pour les mois de juillet, août et septembre (valeur moyenne sur la période 1981-2020) générés à partir des données ERA-Land	42
Figure 31 : Carte géologique générale de la France (source BRGM, modifiée)	44
Figure 32 : La géologie du territoire	45
Figure 33 : Coupe géologique du territoire (source BRGM modifiée)	46
Figure 34 : Coupe hydrogéologique interprétative (source BRGM modifiée)	46
Figure 35 : Masses d'eau souterraines de surface.....	48
Figure 36 : L'hydrogéologie en lien avec l'hydrologie.....	49
Figure 37 : Localisation des stations hydrométriques et des particularités du territoire.....	50
Figure 38 : Exemple du VCN3, VCN10, VCN30 et QMNA du Loing à Episy en 2019.....	52
Figure 39 : Les QMNA de la Seine à Paris Austerlitz (données AQUIF-FR).....	53
Figure 40 : Analyse des QMNA sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUIF-FR).....	55
Figure 41 : Les VCN10 de la Seine à Paris Austerlitz (données AQUIF-FR).....	56
Figure 42 : Analyse des VCN10 sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUIF-FR).....	57
Figure 43 : Analyse de la durée de l'étiage 1921 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUIF-FR).....	58
Figure 44 : Analyse des déficits de la Seine à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUIF-FR).....	59

Figure 45 : Analyse des déficits par rapport aux QMNA5 sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUI-FR)	60
Figure 46 : Analyse des déficits mensuels de la Seine à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR).....	61
Figure 47 : Analyse des déficits mensuels interannuels de la Seine à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR)	61
Figure 48 : Analyse des déficits mensuels interannuels par rapport aux QMNA5 sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUI-FR).....	63
Figure 49 : Analyse de la durée des étiages de la Seine à Paris Austerlitz (données AQUI-FR)	64
Figure 50 : Analyse des temps de retours des étiages à Paris Austerlitz (données AQUI-FR).....	67
Figure 51 : Analyse de la durée de l'étiage 1921 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR).....	69
Figure 52 : Comparaison des débits de l'année 1921 à Paris Austerlitz aux références statiques de la période 1900-2008 (données AQUI-FR).....	69
Figure 53 : Analyse de la durée de l'étiage 1949 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR).....	70
Figure 54 : Comparaison des débits de l'année 1949 à Paris Austerlitz aux références statiques de la période 1900-2008 (données AQUI-FR).....	70
Figure 55 : Analyse de la durée de l'étiage 1976 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR).....	71
Figure 56 : Comparaison des débits de l'année 1976 à Paris Austerlitz aux références statiques de la période 1900-2008 (données AQUI-FR).....	71
Figure 57 : Analyse de la durée de l'étiage 1991 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR).....	72
Figure 58 : Comparaison des débits de l'année 1991 à Paris Austerlitz aux références statiques de la période 1900-2008 (données AQUI-FR).....	72
Figure 59 : Sélection des points de reconstitution du modèle AQUI-FR pour l'analyse des relation nappe-rivière de la Seine (données AQUI-FR)	74
Figure 60 : Analyse des données des ouvrages de la nappe de la craie (données AQUI-FR)	74
Figure 61 : Synthèse des données du piézomètre 02982X0013/S1.....	75
Figure 62 : Analyse des relations nappe/rivière entre la Seine et la nappe de la Craie (période 1917-1926 – données AQUI-FR)	76
Figure 63 : Analyse des relations nappe/rivière entre la Seine et la nappe de la Craie (période 1944-1953 – données AQUI-FR)	78
Figure 64 : Analyse des relations nappe/rivière entre la Seine et la nappe de la Craie (période 1972-1981 – données AQUI-FR)	79
Figure 65 : Analyse des relations nappe/rivière entre la Seine et la nappe de la Craie (période 1986-1995 – données AQUI-FR)	79
Figure 66 : Sélection des points de reconstitution du modèle AQUI-FR pour l'analyse des relation nappe-rivière de l'Yonne et de la Marne (données AQUI-FR)	80
Figure 67 : Analyse des relations nappe/rivière entre l'Yonne et la nappe de la Craie (période 1944-1953 – données AQUI-FR)	80
Figure 68 : Analyse des relations nappe/rivière entre la Marne et la nappe de la Craie (période 1944-1953 – données AQUI-FR)	81
Figure 69 : Evolution temporelle de la contribution des nappes internes du bassin (Craie, Eocène, Oligocène) au débit de la Seine à Paris issue du modèle MODCOU (PIREN Seine)	81
Figure 70 : Apports relatifs des grands aquifères centraux du bassin au débit de la Seine à Paris issus du modèle MODCOU (PIREN Seine)	82
Figure 71 : Bilan des différentes zones productives et capacitives du périmètre de l'EPTB.....	83
Figure 72 : Cycle annuel moyen des précipitations (mm/j) en moyenne sur le bassin pour 4 épisodes de sécheresse. Scénario RCP8.5	85
Figure 73 : Cycle annuel moyen de l'évapotranspiration (mm/j) en moyenne sur le bassin pour 4 épisodes de sécheresse. Scénario RCP8.5	86
Figure 74 : Synthétique synthétique des données de débits futurs.....	87
Figure 75 : Evolution globale et moyenne des QMNA entre les périodes de référence passées et les périodes futures au niveau de la station de Paris-Austerlitz.....	88
Figure 76 : QMNA de la Seine à Paris Austerlitz selon les 4 scénarios (périodes de référence et futures)	90
Figure 77 : Evolution globale et moyenne des VCN10 entre les périodes de référence passées et les périodes futures au niveau de la station de Paris-Austerlitz.....	91
Figure 78 : VCN10 de la Seine à Paris Austerlitz selon les 4 scénarios (périodes de référence et futures)	93

Figure 79 : Evolution globale et moyenne des déficits par rapport aux QMNA5 des périodes de références, entre les périodes de référence passées et les périodes futures au niveau de la station de Paris-Austerlitz	94
Figure 80 : Analyse des périodes de déficit de la Seine à Paris Austerlitz selon les 4 scénarios (périodes de référence et futures).....	96
Figure 81 : Evolution globale et moyenne des durées des étiages par rapport aux QMNA5 des périodes de références, entre les périodes de référence passées et les périodes futures au niveau de la station de Paris-Austerlitz.	97
Figure 82 : Durée des étiages de la Seine à Paris Austerlitz selon les 4 scénarios (périodes de référence et futures)	99
Figure 83 : Calage du modèle de température de l'eau pour la station de la Seine à Saint-Fargeau-Ponthierry à partir des données de la station météorologique de Melun	102
Figure 84 : Calage du modèle de température de l'eau pour la station de la Seine à Saint-Fargeau-Ponthierry à partir des données de la station météorologique de Molesmes SAPC.....	103
Figure 85 : Calage du modèle de température de l'eau pour la station de la Seine à Poses 2 à partir des données de la station météorologique de Melun	104
Figure 86 : Localisation des points DRIAS mobilisées	105
Figure 87 : Evolution de la température de l'eau de la Seine Charrey-sur-Seine à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005.....	108
Figure 88 : Evolution de la température de l'eau de la Seine à Suresnes 2 à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005.....	109
Figure 89 : Evolution de la température de l'eau de la Seine à Poses 2 à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005.....	110
Figure 90 : Evolution de la température de l'eau de la Seine Charrey-sur-Seine à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005.....	112
Figure 91 : Evolution de la température de l'eau de la Seine à Suresnes 2 à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005.....	113
Figure 92 : Evolution de la température de l'eau de la Seine à Poses 2 à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005.....	114
Figure 93 : Comparaison entre les concentrations simulées théoriques en O2 dissous à saturation et les données mesurées pour la station de l'Yonne à Pregilbert1	117
Figure 94 : Comparaison entre les concentrations simulées théoriques en O2 dissous à saturation et les données mesurées pour la station de la Seine à Ablon-sur-Seine	118
Figure 95 : Etat écologique des eaux superficielles du bassin de la Seine selon les règles d'évaluation de 2019.....	119
Figure 96 : Variations de la qualité de l'eau observées au niveau de la station de Poses (J. Garnier et al., 2019).....	120
Figure 97 : Comparaison entre les concentrations simulées théoriques en O2 dissous à saturation et les données mesurées pour la station de la Seine à Poses.....	121
Figure 98 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Charrey-sur-Seine à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005	124
Figure 99 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Suresnes à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005.....	125
Figure 100 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Poses à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005.....	126
Figure 101 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Charrey-sur-Seine à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005	129
Figure 102 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Suresnes à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005.....	130
Figure 103 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Poses à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005.....	131
Figure 104 : Imports et exports des flux en azote et phosphores issus des pratiques agricoles du bassin de la Seine entre 1890 et 2015 (The Seine Watershed Water-Agro-Food System : Long-Term Trajectories of C, N and P Metabolism, G. Billen et al., 2019).....	132
Figure 105 : Evolution des volumes collectés et des capacités de traitement de l'agglomération parisienne de 1955 à 2015 (Ecological functioning of the Seine River : From Long-Term Modelling Approaches to High-Frequency data Analysis, J. Garnier et al., 2019).....	133
Figure 106 : Bilan des transferts d'azote et de phosphore pour la Seine (fascicule PIREN Seine « L'Eutrophisation des cours d'eau du bassin de la Seine », 2009)	134
Figure 107 : Simulation de la distribution en NH4+ de 2007 à 2011 de Paris à Poses (River Basin Visions : Tools and Approaches from Testerday to Tomorrow, C.Carré et al., 2020)	135

Figure 108 : Evolution des teneurs en NO_3^- des principaux cours d'eau du périmètre de l'EPTB de 2008 à 2020	136
Figure 109 : Evolution des teneurs en NO_3^- des principaux cours d'eau du périmètre de l'EPTB de 2016 à 2020	136
Figure 110 : Evolution des teneurs en PO_4 des principaux cours d'eau du périmètre de l'EPTB de 2008 à 2020	137
Figure 111 : Evolution des teneurs en PO_4 des principaux cours d'eau du périmètre de l'EPTB de 2016 à 2020	138
Figure 112 : réduction relative (en %) de la concentration sous-racinaire en azote liée à l'introduction de Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrates) (fascicule PIREN Seine « la pollution du bassin de la seine par les nitrates », 2009).....	139
Figure 113 : Trajectoires d'évolution en azote et phosphore des réponses aux intrants agricoles (The Seine Watershed Water-Agro-Food System : Long-Term Trajectories of C, N and P Metabolism, G. Billen et al., 2019).....	140
Figure 114 : Part de recyclage de l'azote et du phosphore dans les excréments humains pour le scénario futur de « circulation » (Past and future Trajectories of Human Excreta Management Systems : paris in the Nineteenth to Twenty-first Centuries, F. Esculier et al., 2019).....	140
Figure 115 : Localisation du modèle PGE dans la stratégie globale de l'étude.....	142
Figure 116 : Impacts des prélèvements en eau souterraines sur le débit de la rivière (BRGM, modifié).....	144
Figure 117 : Arbre de branchement entre les stations de référence.....	145
Figure 118 : Localisation des stations et des sous-bassins de référence.....	145
Figure 119 : Schéma de principe des impacts sur les sous-bassins et stations de référence	146
Figure 120 : Matrice des temps de transferts estimatifs en étiage	147

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparatif des données de naturalisation des débits disponibles	26
Tableau 2 : Date de début des données des stations météo France.....	29
Tableau 3 : Date de début des données des stations météo de l'EPTB.	29
Tableau 4 : Analyse des durées des étiages par rapport aux QMNA5 sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUI-FR).....	66
Tableau 5 : Synthèse des indicateurs d'étiages à Paris Austerlitz (données AQUI-FR)	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 6 : Paramètres de calage utilisés pour les modélisations températures air/températures eau	101
Tableau 7 : Bilan des évolutions de températures de l'eau simulées à l'horizon 2010-2040	107
Tableau 8 : Bilan des évolutions de températures de l'eau simulées à l'horizon 2040-2070	111
Tableau 9 : Bilan des évolutions des concentrations en O_2 dissous à saturation simulées à l'horizon 2010-2040.....	123
Tableau 10 : Bilan des évolutions des concentrations en O_2 dissous à saturation simulées à l'horizon 2040-2070.....	128

1 CONTEXTE DE L'ETUDE

« Dans le bassin parisien, les sécheresses frappent moins les esprits que les inondations. En effet, l'action déterminante des lacs-réservoirs de la Seine et de ses affluents, les barrages de navigation, maintiennent un plan d'eau relativement constant sur les cours d'eau régulés. Ils font oublier que dans le passé, et notamment au XIXe siècle, la Marne et la Seine pouvaient quelques fois se traverser à pied. »

Cet exergue du site de l'EPTB Seine Grands Lacs rappelle bien que la gestion des grands lacs-réservoirs est une gestion annuelle du grand cycle de l'eau avec les moyens hydrauliques les plus importants de France, à la hauteur des enjeux économiques qui en dépendent. Il rappelle aussi que l'hydrologie perçue par les populations ne rend pas compte de la réalité du fonctionnement naturel en étiage, qui a, plus encore que les crues, largement disparu des mémoires.

La question du manque d'eau est cependant une question prégnante pour aujourd'hui et pour demain, dans un contexte de changement climatique avéré. D'ores et déjà, la gestion « de stocks et de flux » s'analyse avec la nécessité d'intégrer des stratégies de gestion pluriannuelles, ce qui sera demain une nécessité très probable pour une large part du territoire national.

Les objectifs (cf. **figure 1**) de cette étude sont donc de caractériser les étiages sévères sur le territoire de l'EPTB Seine Grands Lacs correspondant à la partie amont du bassin de la Seine ainsi que d'évaluer l'incidence de plusieurs scénarios d'étiage, tout en prenant en compte les évolutions probables liées au changement climatique, sur les milieux et sur les activités socio-économiques. Ces analyses permettront ensuite d'apprécier la vulnérabilité du territoire face aux étiages et d'appréhender les pistes à explorer pour réduire cette vulnérabilité en particulier à partir du levier des lacs-réservoirs.

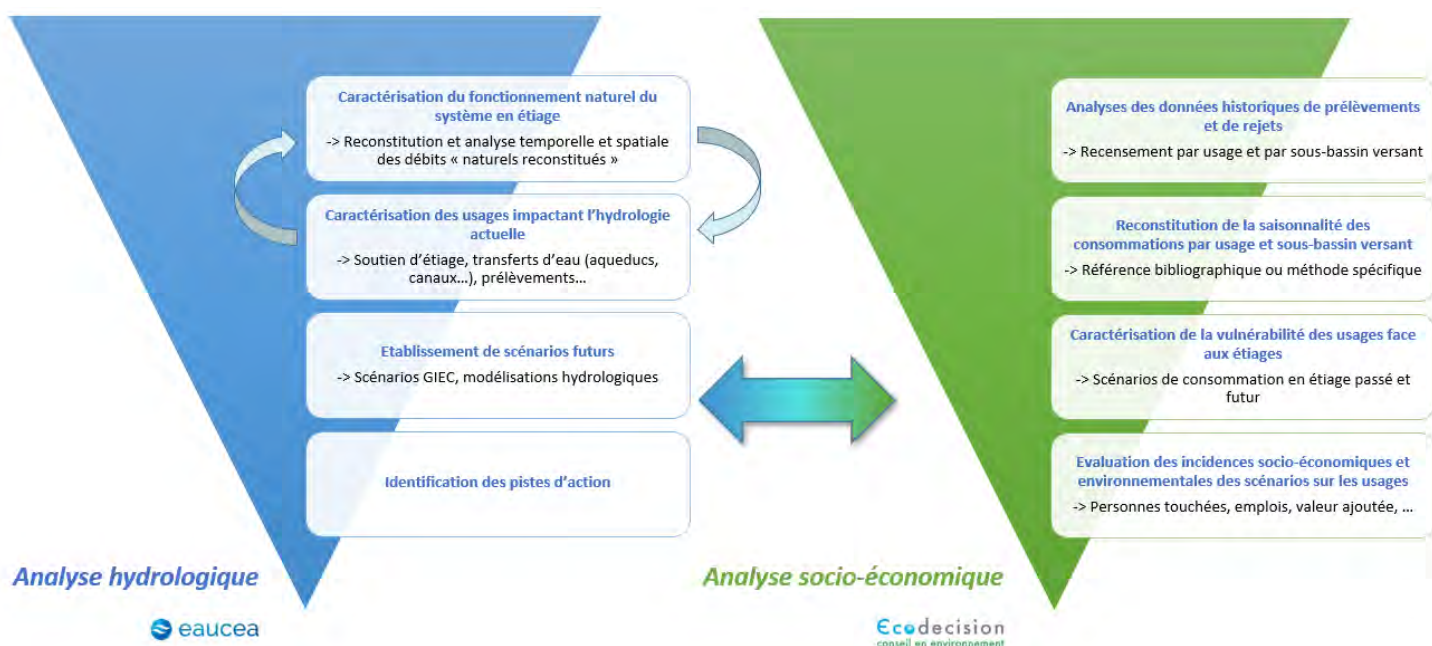


Figure 1 : Objectifs et organisation de l'étude

2 ANALYSE DES DONNEES EXISTANTES

Ce chapitre présente les données existantes, collectées et mobilisées dans le cadre de cette étude, en particulier les hypothèses associées à ces données et les techniques employées pour leur calcul le cas échéant.

Pour mémoire, les grands lacs du bassin de la Seine ont été mis en service en :

- 1949 pour le lac-réservoir de Pannecière sur l'Yonne ;
- 1966 pour le lac-réservoir de la Seine sur la Seine (prise d'eau par dérivation) ;
- 1974 pour le lac-réservoir de la Marne sur la Marne (prise d'eau par dérivation) ;
- 1990 pour le lac-réservoir de l'Aube sur l'Aube (prise d'eau par dérivation).

2.1 Les données cartographiques d'occupation du territoire

Les données cartographiques d'occupation du territoire mobilisées correspondent :

- aux cartes IGN issues des flux cartographiques WMS (Web Map Service) du site Géoportail ;
- aux cartes géologiques du BRGM à différentes échelles (1/1 000 000 et 1/ 250 000 notamment) issues des flux cartographiques WMS ;
- aux données altimétriques SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de l'USGS (United States Geological Survey).

2.2 Données hydrométriques mesurées

Les données mesurées sur les stations actuellement en service et les stations historiques sont disponibles sur la banque hydro¹. Pour le territoire de l'EPTB Seine Grands Lacs, les données mobilisables sont celles d'une cinquantaine de stations hydrométriques dont les données sont disponibles sur des périodes différentes selon chaque station.

Les paramètres utilisés sont les débits moyens journaliers, exprimés en m³/s, téléchargés sur la banque hydro sur la plus longue période disponible pour chaque station.

Ces données représentent les débits constatés mesurés en divers points du bassin versant de la Seine (sur le secteur d'étude).

Les données mesurées, disponibles en banque hydro ne représentent pas les écoulements journaliers naturels puisque de nombreux usages de l'eau impactent les débits des cours d'eau (prélèvements divers, présence de canaux court-circuitant certains secteurs, stockages et déstockages d'eau depuis les lacs réservoirs...).

¹ <http://hydro.eaufrance.fr/>

2.3 Données de reconstitutions et réanalyses de débits naturalisés

L'hydrologie « désinfluencée » et « naturalisée » du bassin de la Seine en amont de Paris a été reconstituée par plusieurs organismes selon différentes méthodes et hypothèses, aboutissant à plusieurs jeux de données bien distincts.

2.3.1 Reconstitution hydrologique du bassin de la Seine – 1900-2009 – EPTB Seine Grands Lacs

Cette série de données a été construite en plusieurs étapes et par plusieurs organismes différents :

- *Outil d'aide à la programmation des barrages-réservoirs du bassin de la Seine – volet hydrologie*, Sogreah, Agence de Bassin Seine-Normandie, **1988** ;
- *Actualisation de la base de données hydrologiques de la Seine, période 1900-1993*, Sogreah, Institution Interdépartementale des barrages-réservoirs, **1995** ;
- *Amélioration de la base de données hydrologiques de la Seine jusqu'à Paris*, Sogreah, Institution Interdépartementale des barrages-réservoirs, **1997** ;
- *Actualisation de la base de données des débits journaliers « naturalisés », phase 1 et phase 2*, Hydratec, Les grands lacs de Seine, **2011**

Le travail réalisé en **1988** a consisté à employer une approche systématique permettant la reconstitution des débits naturels aux stations amont (nommées « extrémités » dans l'étude) et aux stations intermédiaires situées en aval. La **figure 2** représente le découpage original réalisé dans le cadre de l'étude de 1988.

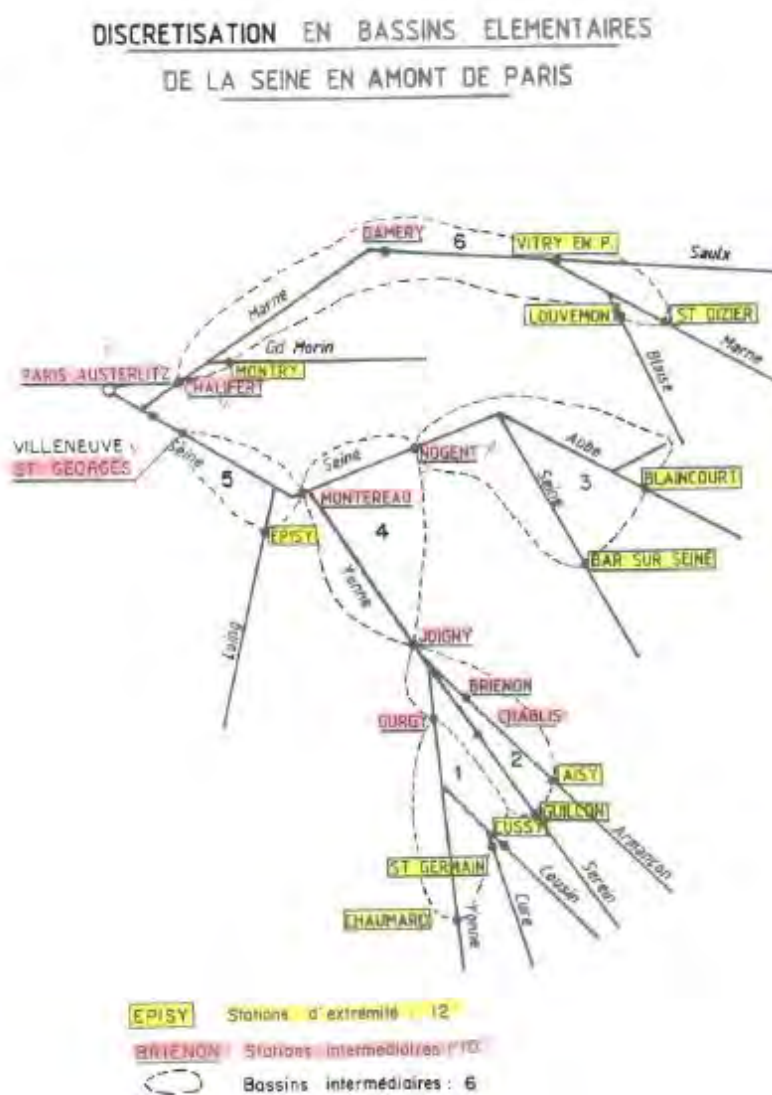


Figure 2 : Points de reconstitution de l'étude Sogreah, 1988

Cette méthode consiste en l'exploitation des données mesurées de hauteurs d'eau sur de longues périodes afin :

- d'y appliquer une courbe de tarage quand elle est considérée comme stable ;
- de contrôler le résultat obtenu par un modèle pluie-débit (modèle BILIK au pas de temps mensuel)
- d'éventuellement corriger la courbe de tarage utilisée.

Quand la courbe de tarage est instable ou que les données comportent trop de trous, c'est une méthode de rapprochement entre données mesurées (hauteurs ou débits) à partir des stations voisines qui est employée. Pour les stations intermédiaires situées en aval des extrémités, l'analyse des données des stations amont pour évaluer la somme des écoulements en aval a été réalisée.

Des débits hors stations ont aussi été reconstitués pour des bassins versant intermédiaires à partir d'une combinaison linéaire des débits reconstitués en amont avec des temps de transfert fixes pour chaque station amont.

Cette méthodologie peut être représentée par l'arbre de décision suivant (cf. figure 3).

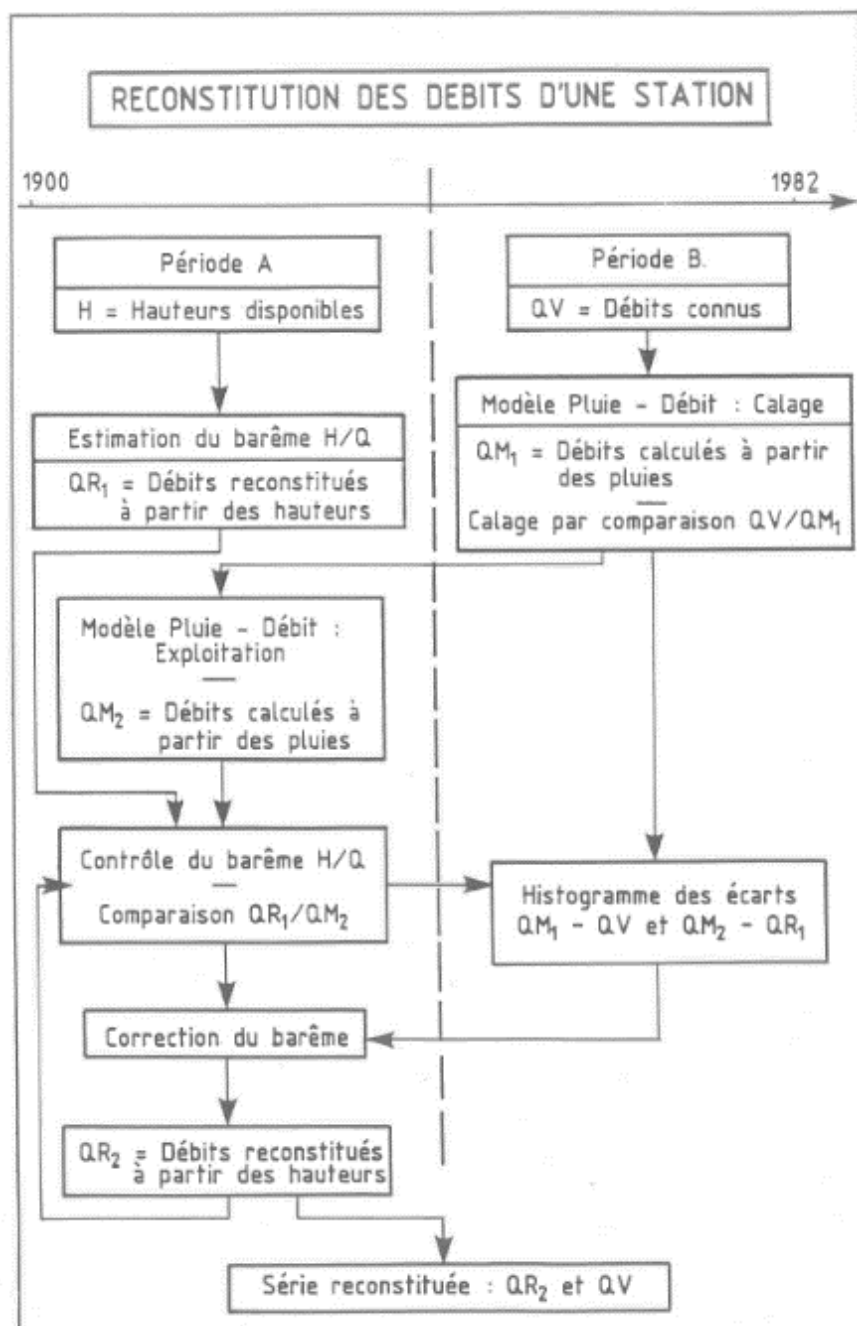


Figure 3 : Méthodologie systématique employée pour la reconstitution des débits (Sogreah, 1988)

Les débits obtenus par cette méthode sont des débits reconstitués « naturels », ce dernier terme n'étant pas exact car même si les principales influences anthropiques sont retirées (influences des lacs-réservoirs, consommations d'eau de la région parisienne), il reste de nombreuses d'autres influences locales comme des prises d'eau des canaux ou les besoins d'irrigation.

En **1995**, Sogreah réalise une actualisation des données sur la période 1900-1993 à partir d'une prolongation des données reconstituées sur deux années témoin 1992 et 1993. L'étude propose aussi un nouveau découpage du bassin de la Seine (**cf. figure 4**).

DISCRETISATION EN BASSINS ELEMENTAIRES DE LA SEINE EN AMONT DE PARIS

Actualisation 1900 – 1993

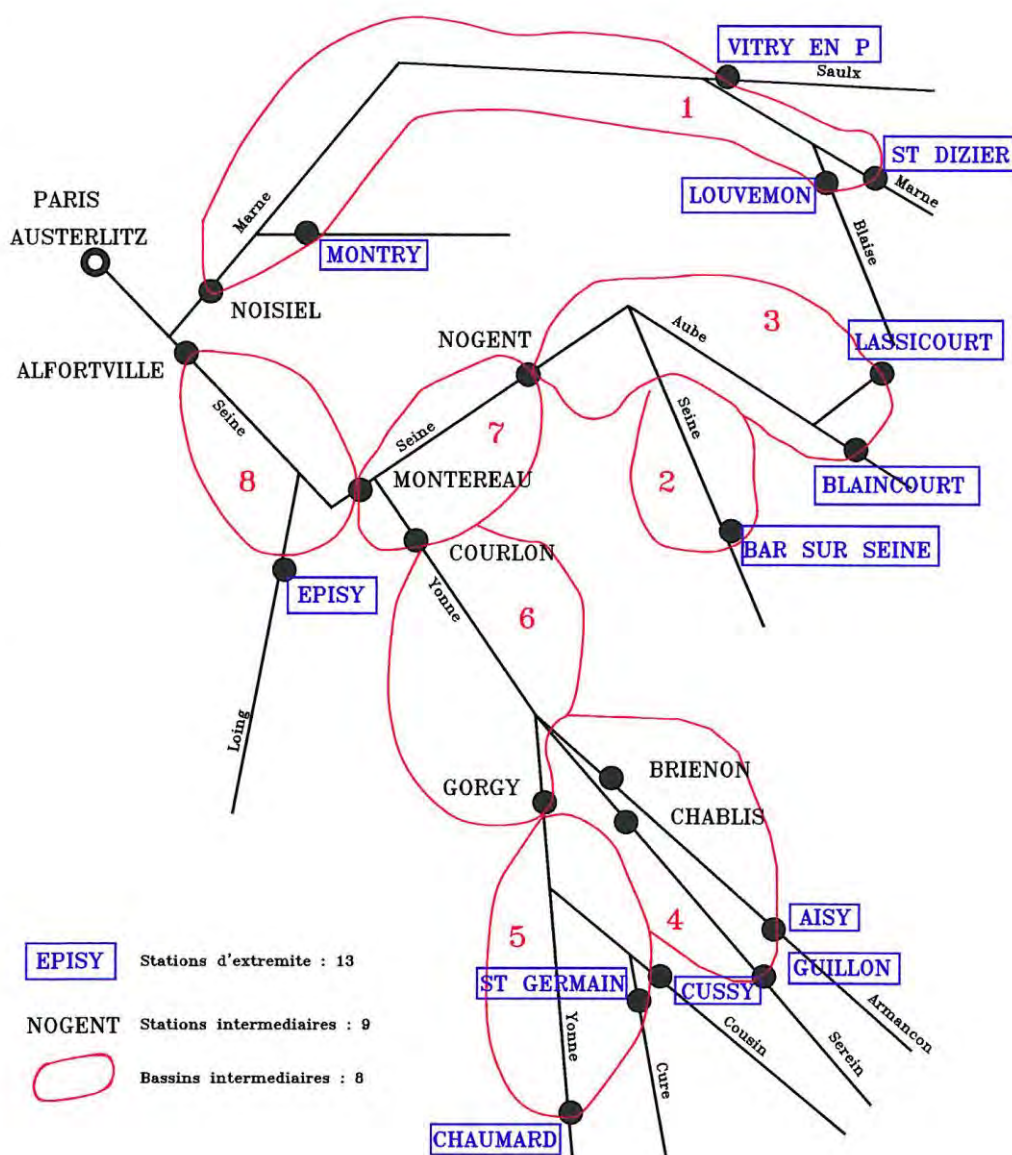


Figure 4 : Nouvelle répartition des points de reconstitution des débits (Sogreah, 1995)

Cette nouvelle répartition comporte une nouvelle station amont à Lassicourt et une station intermédiaire en moins sur l'Yonne à Joigny remplacée par l'Yonne aval à Courlon. La Marne est maintenant représentée en aval par la station de Noisiel (Daméry est supprimée). La Seine à Villeneuve St Georges est remplacée par la station d'Alfortville. Le rapport de Sogreah en 1995 précise en particulier que la cohérence entre les débits naturels reconstitués à Paris et la station hydrométrique d'Austerlitz est assez bonne de 1927 à 1973, avec des anomalies en 1948 et 1960, par contre elle est plus médiocre de 1900 à 1926. Il est aussi noté que l'effet du soutien d'étiage est visible à partir de 1981. Les incertitudes entre reconstitutions de débits

naturels et de débits observés sont en général trop importantes pour interpréter les écarts entre ces séries temporelles comme l'impact des usages.

En **1997** la base des données reconstituées sur la période 1900 – 1993 comprenant 38 fichiers stations de débits journaliers, dont 23 sont des débits naturels reconstitués, est améliorée. L'étude est de nouveau menée par Sogreah. La station de Blaincourt sur l'Aube amont est remplacée par celle de Trannes (la reconstitution sur la période antérieure à la disponibilité de Trannes est réalisée à partir de Blaincourt). Le nouveau découpage est illustré par la **figure 5**.

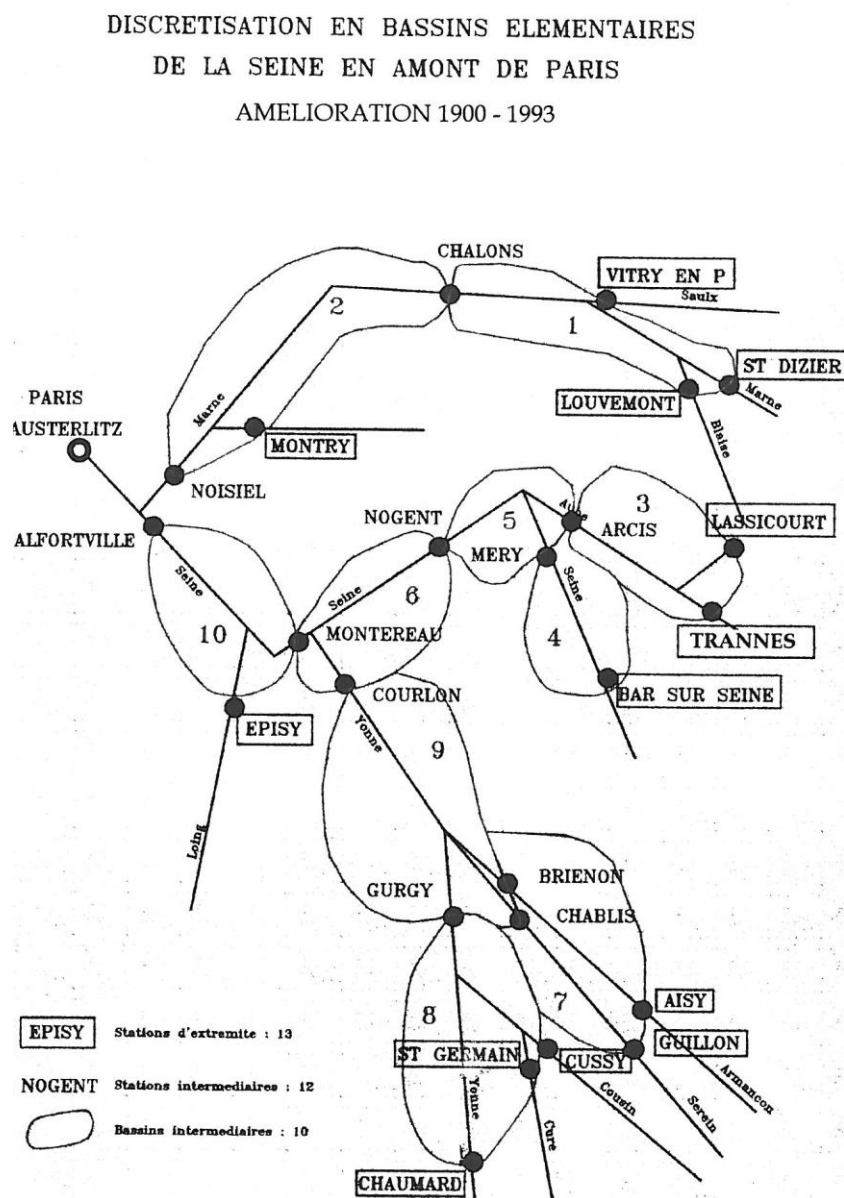


Figure 5 : Nouvelle répartition des points de reconstitution des débits (Sogreah, 1997)

L'amélioration est réalisée en comparant les données des bassins versants intermédiaires (10 bassins obtenus par combinaison / propagation des stations amont) avec les données reconstituées aux stations clés de Noisy, Courlon et Austerlitz.

Les régimes hydrologiques obtenus sont ainsi mis en cohérence, mais les incertitudes liées aux données reconstituées ne sont pas maîtrisées et les erreurs peuvent se maintenir sur les fichiers comparés.

En **2011**, l'actualisation de la base des données des débits journaliers naturalisés en 25 points est menée par Hydratec sur la période 1993 – 2009, ainsi que la reconstitution de débits journaliers naturalisés pour 8 stations du bassin de la Seine situées en aval de Paris (hors zone de cette étude). La **figure 6** ci-dessous présente les 25 stations de travail qui correspondent à 13 stations amont et 12 stations intermédiaires de la mise à jour précédente par Sogreah en 1997 (cf. **figure 5**).

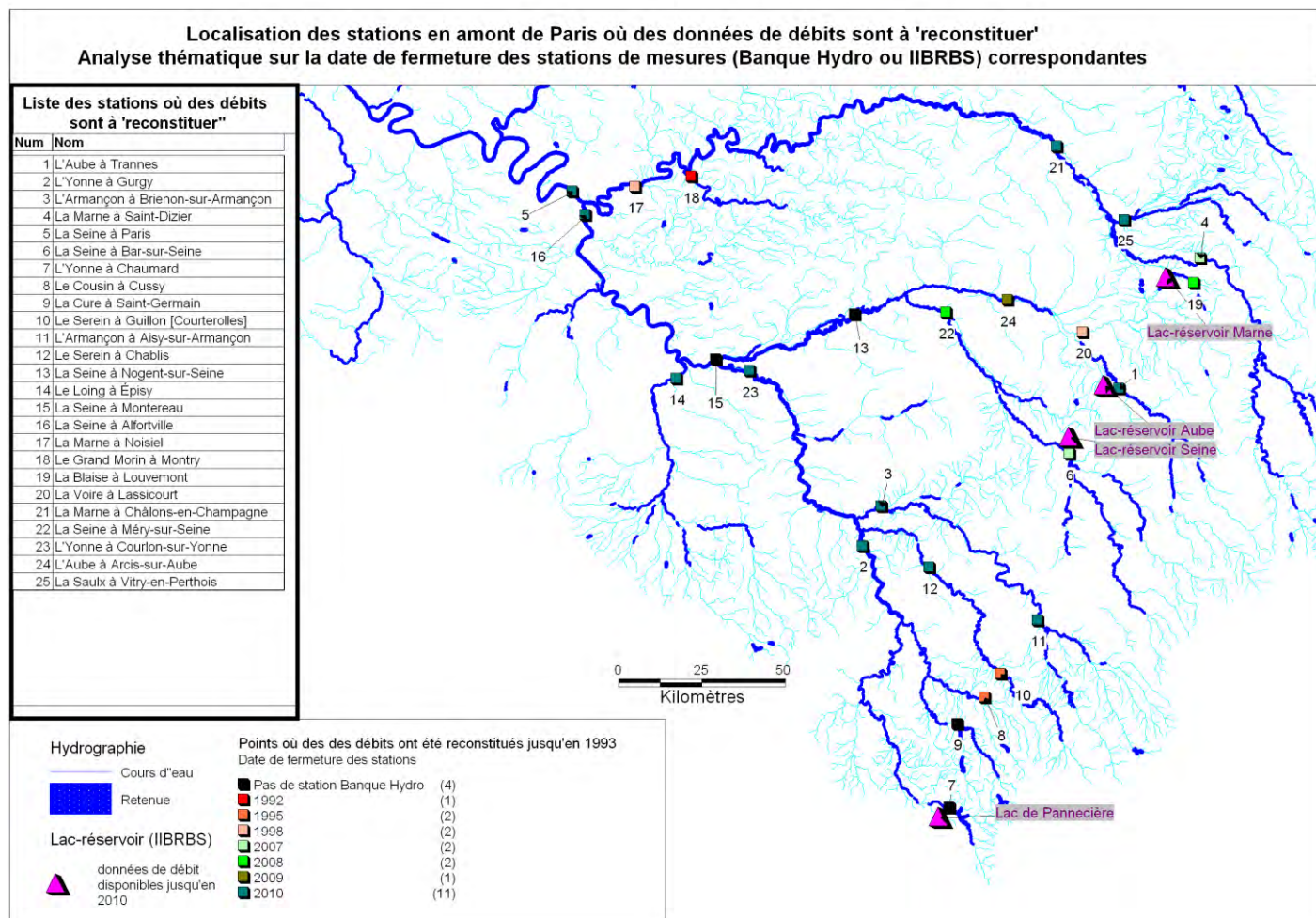


Figure 6 : Répartition des points de reconstitution, Hydratec, 2011

Cette étude de 2011 analyse la qualité de la base de données des débits reconstitués jusqu'en 1993 en regardant la cohérence amont-aval des débits reconstitués sur les axes Marne, Aube, Seine et Yonne en amont de leurs confluences respectives.

La reconstitution des débits journaliers naturalisés sur les stations amont est réalisée par ordre de priorité à partir :

- des mesures validées banque hydro combinées avec les données de prise des barrages si nécessaire ;
- par régression linéaire avec un bassin voisin non influencé par les barrages.

Plus en aval, les apports intermédiaires sont calculés à l'aide d'un modèle hydraulique de propagation des apports amont en tenant compte de l'impact des influences des barrages et des débits influencés aval. L'opération est répétée pour arriver jusqu'à la reconstitution des débits de la Seine à Paris.

Il est noté dans le rapport de 2011 que l'effet des prélèvements AEP de la Seine impactant le débit mesuré à Paris n'est pas fiabilisé car la mesure de débit à Paris est délicate et incertaine. En général, hors Seine à Paris, sur la période 1993-2009, les imprécisions notées dans le rapport de 2011 sont celles liées au lissage des débits (moyennes glissantes sur 3 et 10 jours consécutifs avant de calculer les apports via le modèle hydraulique de propagation) et aux incertitudes sur les mesures.

2.3.2 Reconstitution hydrométéorologique du bassin de la Seine 1852 – 2008 – modèle AQUI-FR

Cette série de données est issue de simulations réalisées dans le cadre des travaux de thèse de M. Rémy BONNET au Cerfacs (Centre Européen de Recherche Avancée en Calcul Scientifique). Mme Florence HABETS a réalisé les simulations avec la plateforme AQUI-FR (<http://www.geosciences.ens.fr/aqui-fr/>) à partir des reconstructions météorologiques issues de la thèse de Rémy BONNET. Les documents de référence sont les suivants :

- *Variations du cycle hydrologique continental en France des années 1850 à aujourd'hui*, R. Bonnet, **2018**
- *Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR, Rapport final de 1^{ère} phase*, Habets F., Amraoui N., Caballero Y., Thiéry D., Vergnes J.P., T. Morel, P. Le Moigne, N. Roux, J-R de Dreuzy, L. Longuevergne, Ackerer P., Fadji Maina, B., Besson, P., Etchevers, F. Regimbeau, et P. Viennot, **2017**
- *Influence of multidecadal variability on high and low flows: the case of the Seine basin*, R. Bonnet, J. Boé et F. Habets, *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 1611-1631, **2020**

Le projet AQUI-FR vise à mettre en place des prévisions de l'évolution des eaux souterraines en France à des échelles de temps allant de la dizaine de jours à la saison, jusqu'aux projections climatiques sur plusieurs décennies, en se basant sur les modélisations hydrogéologiques développées et utilisées par les gestionnaires de l'eau, lorsqu'elles existent, et à favoriser le développement de ces modélisations là où elles n'existent pas. En ce sens, le projet AQUI-FR est conçu comme un outil de valorisation des travaux de modélisation hydrogéologiques réalisés en France.

Cet outil correspond ainsi à un regroupement de de plusieurs modèles hydrogéologiques (modèles MARTHE, MODCOU/EauDyssée et GADENIA) sur lesquels sont introduits des données météorologiques issues d'une analyse SAFRAN (modèle d'analyse des variables atmosphériques près de la surface) ou des flux hydrogéologiques simulés par un modèle SURFEX (Surface externalisée) (cf. **figure 7**). Les données en sortie correspondent à des données piézométriques et hydrologiques.

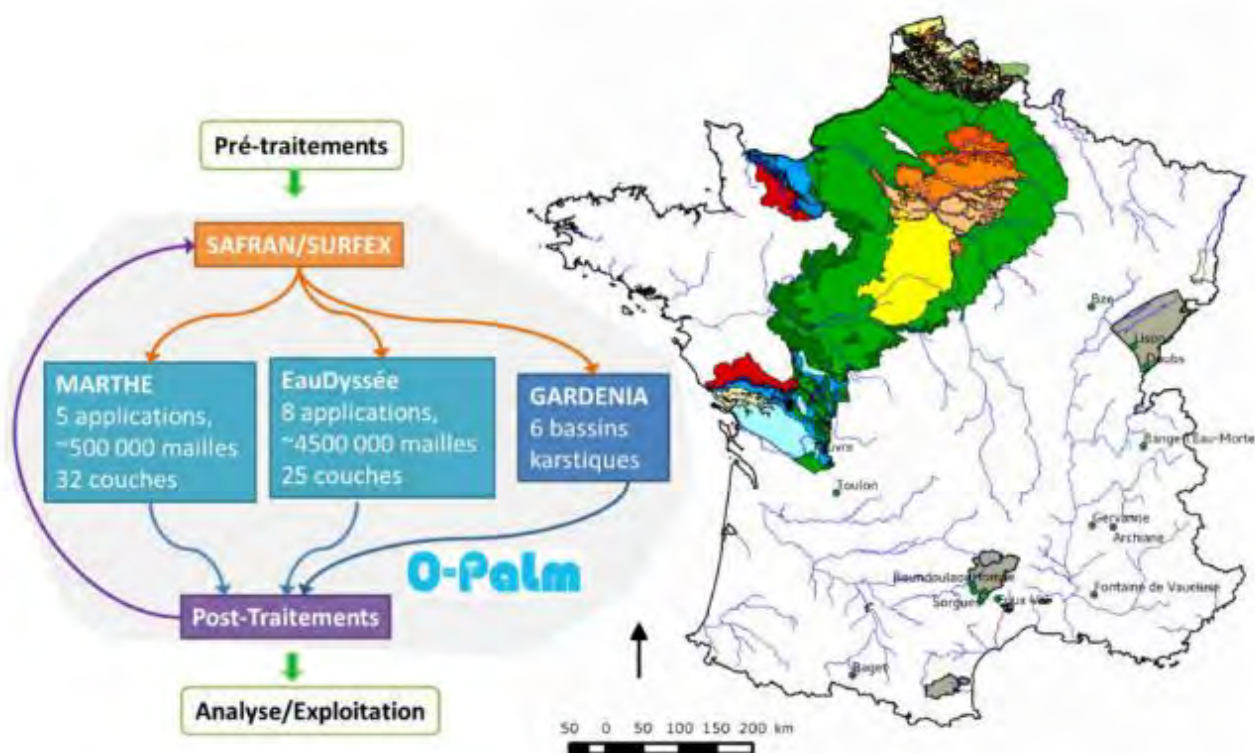


Figure 7 : Principe de la structure AQUI-FR et extension des aquifères représentés (rapport final de 1^{ère} phase AQUI-FR, 2016)

Concernant le bassin de la Seine, le modèle utilisé est le modèle hydrogéologique Modcou/EauDyssée développé par Viennot (2009) pour l'Agence de l'Eau Seine Normandie (cf. **figure 10**). Ce modèle comportant 6 couches a notamment été utilisé pour l'étude d'impact du changement climatique ReXHySS et Oracle (Habets et al., 2013, DE Noblet et al., 2017). Ce modèle couple une couche de surface et des couches aquifères (cf. **figures 8 à 10**).

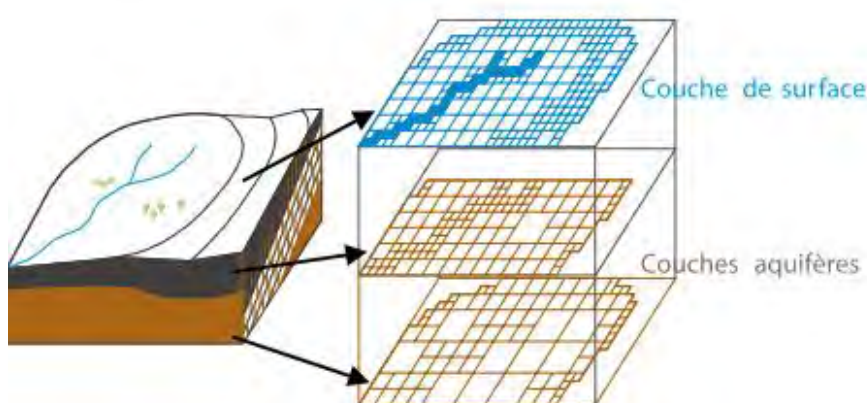


Figure 8 : Schématisation multicouches du modèle du modèle MODCOU (PIREN Seine)

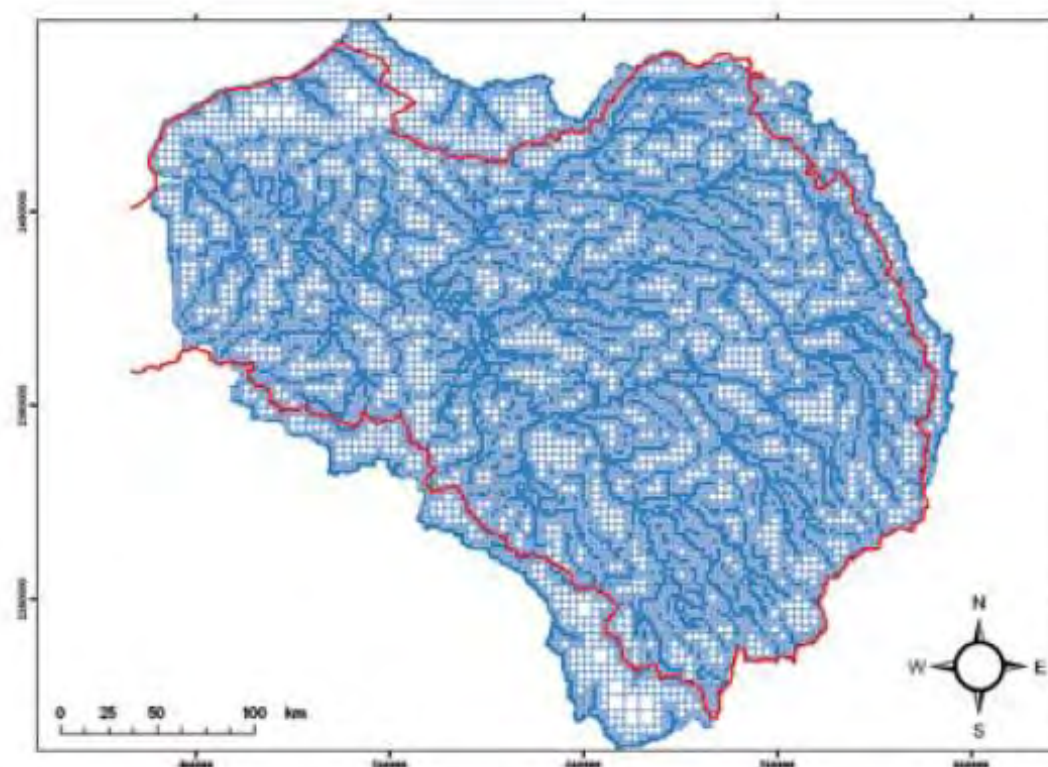


Figure 9 : Extension de la couche de surface du modèle MODCOU (PIREN Seine)

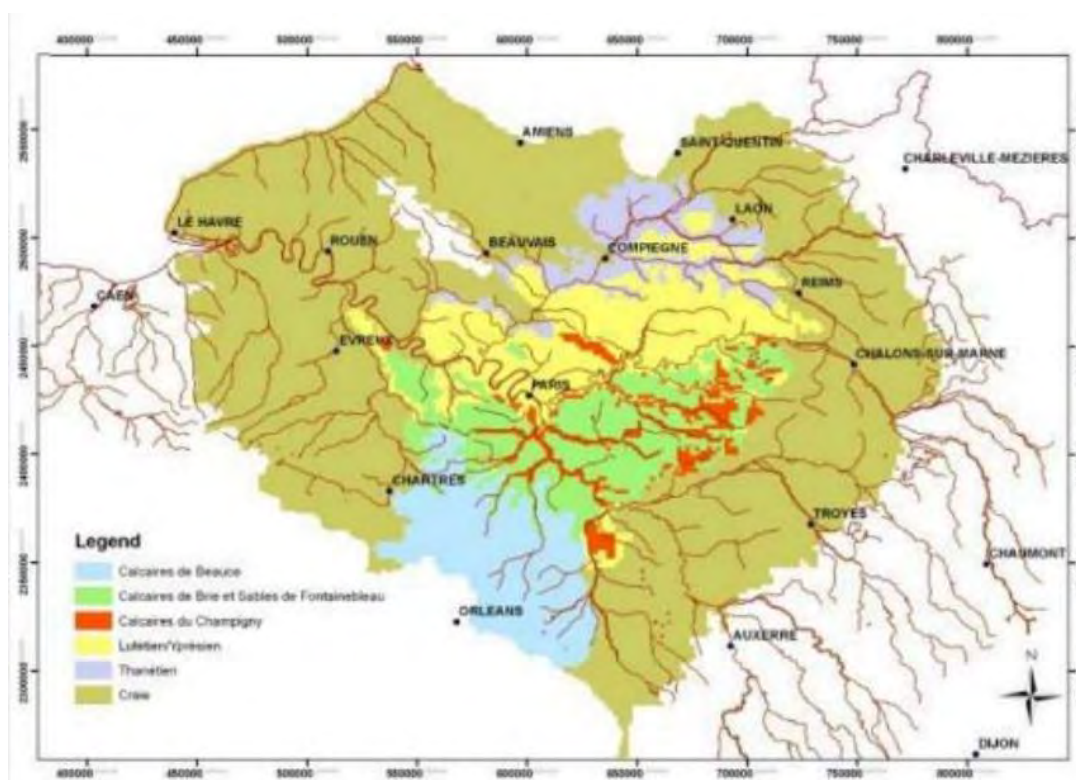


Figure 10 : Extension de la partie hydrogéologique du modèle EauDyssée (Viennot 2009)

A noter que l'extension géographique de la partie hydrogéologique du modèle est limitée en bordure est suivant un axe nord-ouest/sud-est passant par Troyes et Auxerre et ne couvre donc pas la totalité du périmètre de l'EPTB Seine Grands Lacs, à l'inverse de la couche de surface.

Les prélèvements pris en compte dans la modélisation correspondent aux prélèvements en nappe référencés par l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN) avec une incertitude forte sur les volumes issus des différentes bases de données de l'Agence de l'Eau. Ces données permettent le calage du modèle par rapport à des données mesurées sur des années récentes.

Le calage de l'ensemble du modèle AQUI-FR montre de fortes hétérogénéités avec pour le bassin de la Seine des débits relativement bien calés sur les parties amont et aval du modèle mais moins bien représentés sur la partie nord du bassin de la Marne et la partie centrale du modèle (cf. **figure 11**).

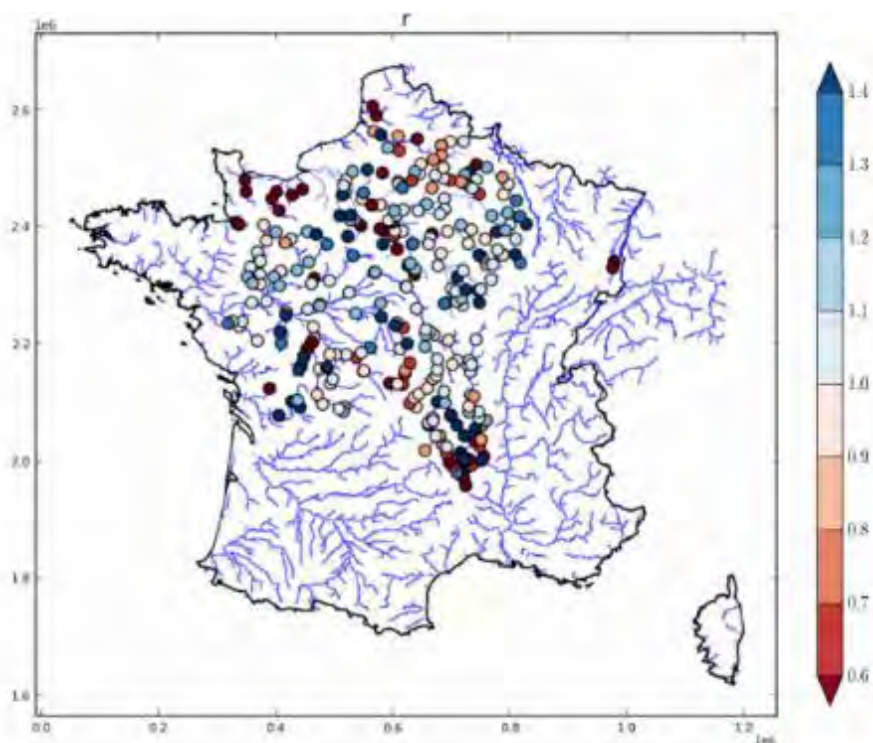


Figure 11 : Rapport entre le débit moyen simulé et observé aux différents points de mesure pour les périodes de 1999 à 2005 (rapport final de 1^{ère} phase AQUI-FR, 2016)

Les données météorologiques issues de la thèse de Rémy BONNET ont ensuite été appliquées au modèle existant. Dans sa thèse Rémy BONNET a proposé une méthode de descente d'échelle statistique au pas de temps journalier des données atmosphériques, combinée à des observations locales mensuelles et journalières. Afin de reconstituer les conditions atmosphériques entre 1852 et 2008 au pas de temps journalier sur le bassin de la Seine, la réanalyse atmosphérique grande échelle NOAA 20CRv2c est utilisée pour décrire l'état synoptique de l'atmosphère sur la période 1851-2010. Les variables météorologiques locales à reconstruire proviennent de l'analyse Safran disponibles à partir de 1959.

Ce principe de reconstitution repose sur l'hypothèse suivante : si l'état atmosphérique synoptique de deux jours est proche, alors les variables météorologiques locales de ces deux jours sont supposées être proches elles aussi. Pour chaque jour cible de la période à reconstruire, le jour analogue, qui correspond au jour de la période d'apprentissage avec l'état synoptique le plus proche du jour cible, est sélectionné. L'utilisation des données mesurées au pas de temps mensuel et journalier permet la sélection du meilleur analogue candidat au pas de temps journalier.

La période d'apprentissage permettant la comparaison entre les données synoptiques et les variables locales est 1959-2010. Des prédicteurs sont choisis et des critères d'analogie permettent de comparer les données synoptiques aux états correspondants dans les données locales.

Pour la mise en œuvre pratique de la reconstruction, à chaque situation synoptique journalière entre 1852 et 1959, 10 analogues sont choisis dans la période d'apprentissage. En combinant les 10 analogues de chaque jour, un grand nombre aléatoire de trajectoires atmosphériques possibles est généré (limité à 5000 dans la thèse).

L'étape suivante de la reconstruction consiste à partir des moyennes mensuelles de chaque trajectoire et l'estimation au niveau des quelques stations pluviométriques ponctuelles anciennes de choisir la trajectoire minimisant l'écart quadratique moyen par rapport aux observations (journalières et mensuelles).

Sur le bassin de la Seine, les observations locales sont issues des séries mensuelles de référence disponibles sur la période 1885 – 2005 (cf. **figure 12**).

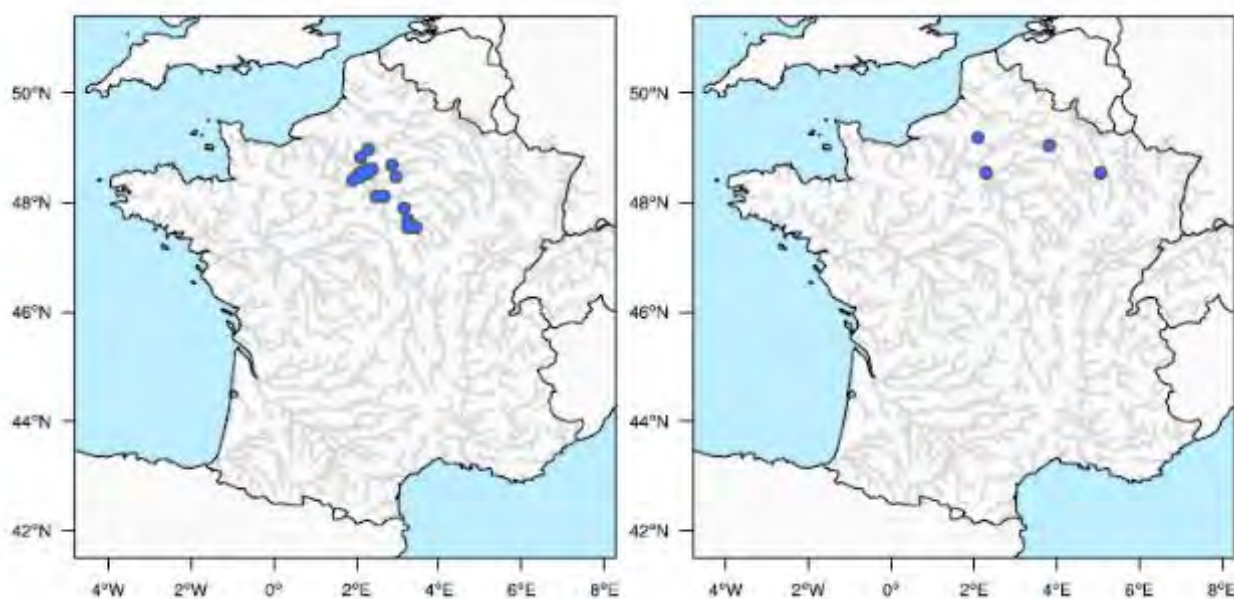


Figure 12 : Cartes des stations d'observations mensuelles (SMR, Météo-France) des précipitations (gauche) et de la température (droite), disponibles sur le bassin versant de la Seine à Poses sur la période 1885-2005 sans valeurs manquantes (R. Bonnet, 2018).

La série de longues précipitations mensuelles à Paris est utilisée pour la période 1851 – 1884, ainsi que 2005 – 2010. La série temporelle obtenue est un maillage spatial de résolution 8 km x 8 km du bassin versant de la Seine au pas de temps journalier décrivant les variables atmosphériques nécessaires à la simulation hydrologique employée dans la plateforme de modélisation AQUI-FR.

Il est important de noter, comme indiqué dans la thèse de Rémy BONNET, que la méthode de reconstruction n'est donc pas homogène dans le temps sur toute la période.

La simulation hydrogéologique résultante, issue du modèle AQUI-FR permet ainsi de restituer, sur l'emprise du modèle, au pas de temps journalier, en tout point du maillage, les paramètres de niveau piézométrique et de débits, ainsi qu'en dehors de l'emprise du modèle, les débits de ruissellement en surface (modèle SURFEX).

Le résultat de la simulation permet ainsi l'extraction des débits simulés en 35 points du bassin de la Seine positionnés au niveau de stations hydrométriques existantes, ainsi que de 44 points du niveau piézométrique, là encore positionnés au niveau d'ouvrages existants (cf. **figure 13**).

Par rapport à la reconstitution réalisée dans les études Sogreah 1997-1998 et l'actualisation Hydratech 2011, la simulation réalisée par la méthode AQUI-FR est cohérente de l'amont vers l'aval dans le temps et dans l'espace du fait de la méthode de constitution du modèle elle-même (méthode de modélisation uniforme sur l'ensemble du domaine).

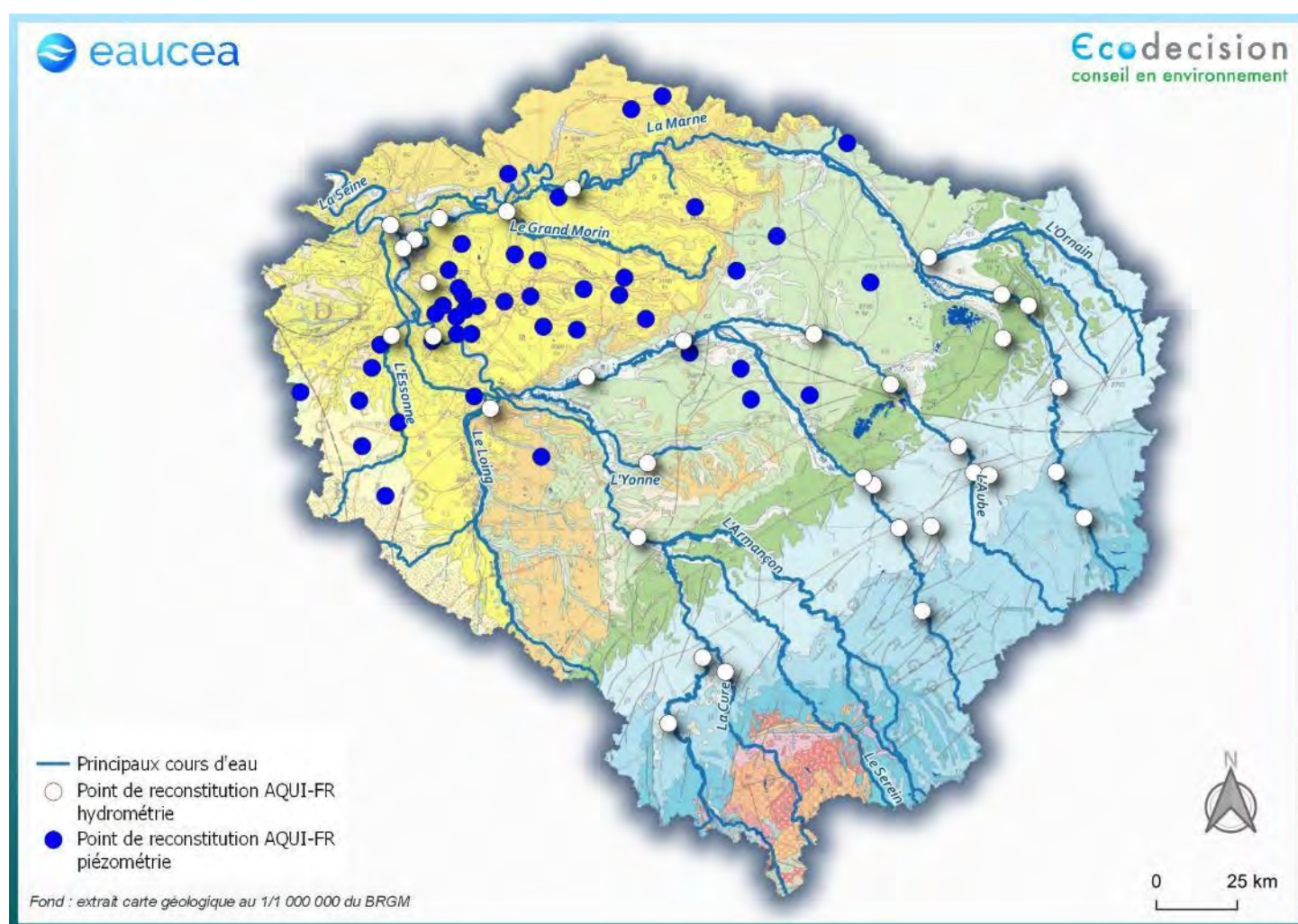


Figure 13 : Répartition des points extraits en 35 stations hydrométriques et 44 piézomètres du bassin de la reconstitution AQUI-FR

2.3.3 Réanalyse hydrométéorologique à l'échelle de la France sur 150 années, donnée FYRE Hydro

Cette série de données est issue des travaux de thèse d'Alexandre DEVERS à l'INRAE Lyon (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement) :

- *Vers une réanalyse hydrométéorologique à échelle de la France sur les 150 dernières années par assimilation de données dans des reconstructions ensemblistes*, A. Devers, **2019**

L'approche utilisée par A. DEVERS comme pour l'analyse AQUI-FR en deux parties :

- construire des données météorologiques sur une longue période (1871-2012) ;
- utiliser les données météorologiques comme forçage d'un modèle hydrologique pour obtenir des chroniques hydrologiques sur la même période.

La réanalyse des données atmosphériques se décompose de la façon suivante :

- la donnée d'entrée est la reconstruction ensembliste du climat (la méthode SCOPE Climate). La méthode consiste en l'application d'une technique d'assimilation de données statistiques à l'aide des stations d'observation longue durée de Météo France afin d'obtenir une réanalyse météorologique comprenant un ensemble de 25 trajectoires climatiques équiprobables ;
- la technique d'assimilation des données utilisée ici consiste à utiliser les observations pour corriger au pas de temps journalier chacune des 25 valeurs possibles pour les variables de précipitation, d'évapotranspiration et de température. Cette technique permet le contrôle de l'incertitude associée à toutes les variables produites. Le résultat n'est pas une chronique de paramètres météorologiques mais 25 chroniques toutes équiprobables, dont on peut calculer pour chaque jour des indicateurs statistiques (moyenne, médiane, écart-type) pour ces paramètres. A noter que sur la période d'analyse, 1871 – 2012, le nombre de données observées et le nombre de stations Météo France évolue, ce qui rend la technique d'assimilation de donnée inhomogène dans le temps.

La réanalyse des données hydrologiques est basée sur le principe de variables météorologiques employées comme forçage du modèle hydrologique GR6J développé à l'INRAE. Le modèle GR6J est un modèle conceptuel global permettant la simulation des débits à l'exutoire d'un bassin versant (les principes des modèles GR sont exposés sur <https://webgr.inrae.fr>). A. Devers a réalisé les simulations sur 662 bassins versants de référence, sur le territoire métropolitain, comportant une station hydrométrique dont l'hydrologie est faiblement anthropisée (**cf. figure 14**).

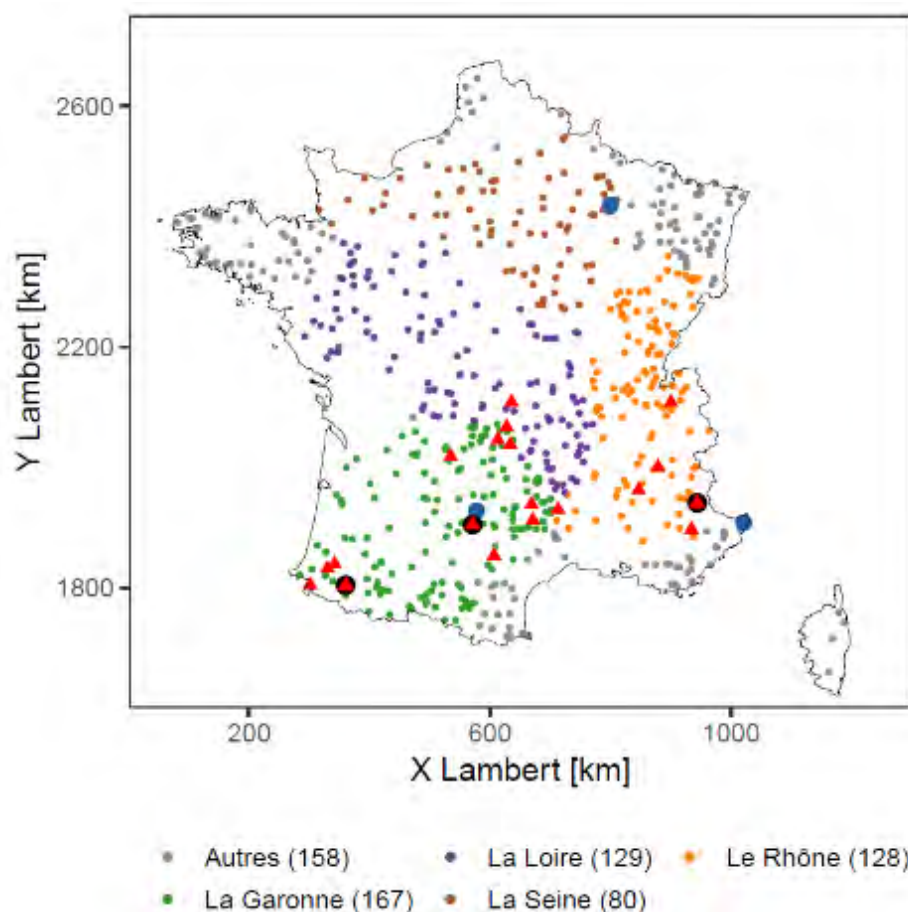


Figure 14 : Emplacement des 662 stations hydrométriques de référence. Source A. DEVERS, 2019

Pour chacun de ces bassins versants, les 25 simulations sont réalisées au pas de temps journalier sur la période 1871 – 2012. Ensuite une technique d’assimilation de données est employée permettant le calcul des 25 débits réanalysés en s’appuyant sur les débits mesurés à ces stations.

Cette technique permet le contrôle et la minimisation des incertitudes apportées par chacune des composantes utilisées (erreurs de la réanalyse climatique, liées au modèle et liées à la mesure des débits). L’ensemble des données obtenues par cette réanalyse est appelée FYRE Hydro.

La carte ci-dessous représente les points de simulation sur la zone d’étude ainsi que les bassins versants associés qui ont bénéficié des simulation FYRE Hydro².

Sur le territoire de l’EPTB Seine (cf. **figure 15**), ces bassins versants sont assez petits et en dehors de la zone d’influence des barrages réservoirs de la Seine, excepté celui de Pannecière. Par construction, cette méthode ne permet pas l’évaluation directe des débits naturalisés de la Seine et de la Marne.

² La source des données provient de : Delaigue, O., Génot, B., Lebecherel, L., Brigode, P., Bourgin, P.Y. (2020). Base de données hydroclimatique à l’échelle de la France. IRSTEA, UR HYCAR, Équipe Hydrologie des bassins versants, Antony, URL: <https://webgr.irstea.fr/base-de-donnees>.

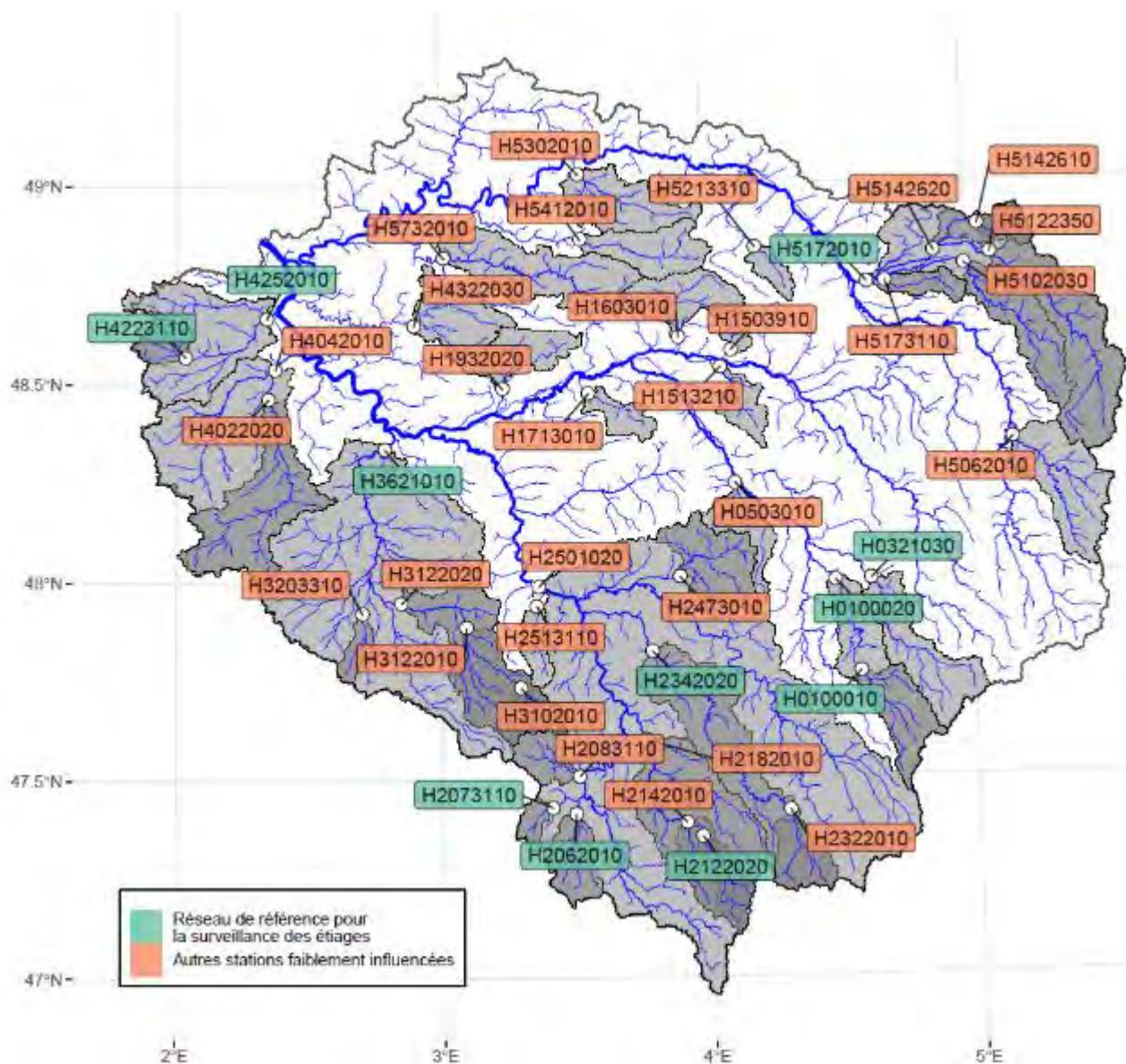


Figure 15 : Carte des données FYRE Hydro sur bassin de la Seine (étude FYRE Hydro)

2.3.4 Comparatif des données disponibles

Le tableau suivant présente une comparaison succincte des séries de données disponibles pour l'étude :

SOURCE	PERIODE	NB POINTS	HYPOTHESES
DONNEE EPTB	1900-2009	25	Débits naturalisés, désinfluencés des lacs-réservoirs et des influences AEP Paris mais pas les influences locales. Succession de travaux basés sur l'évolution des données disponibles et de modèles variés.
AQUI-FR CERFACS	1852-2008	35 (superficiels) 44 (souterrains)	Débits naturalisés reconstitués à partir d'une réanalyse météorologique et d'un modèle hydrogéologique. Reconstitution des niveaux piézométriques en lien avec les débits simulés. Cohérence dans le temps et l'espace.
INRAE	1871-2012	41	Débits naturalisés ou faiblement influencés (attention pour l'Yonne – influence de Pannecière). Résultats uniquement sur des petits bassins hors stations Seine et Marne.

Tableau 1 : Comparatif des données de naturalisation des débits disponibles

Pour chaque station des différents jeux de données, une analyse des QMNA5 (débits minimums mensuels annuels d'une fréquence de retour de 5 ans) spécifiques (divisés par la surface du bassin versant entre deux stations) a été réalisée (cf. **figure 16**). Cette analyse met en évidence :

- pour la reconstitution EPTB, des variations de productivités importantes entre les sous-bassins avec une globale augmentation de l'amont vers l'aval. Ces variations peuvent s'expliquer notamment par des influences locales parfois importantes (dérivations de canaux et aqueducs, prélèvements agricoles) non prises en compte dans l'analyse et pouvant influencer fortement les débits spécifiques en étiage ;
- pour la reconstitution AQUI-FR, une faible productivité des sous-bassins amont liée d'une part aux caractéristiques des données météorologiques employées (cf. § 2.4) et d'autre part l'analyse SURFEX hors périmètre du modèle AQUI-FR ne permet pas la prise en compte des apports des systèmes karstiques et de socles situés à l'amont du bassin. La productivité augmente ensuite fortement vers l'aval et de manière cohérente entre les différents sous-bassins ;
- pour la reconstitution FYRE Hydro, des variations importantes de débits spécifiques entre les différents sous-bassin modélisés.

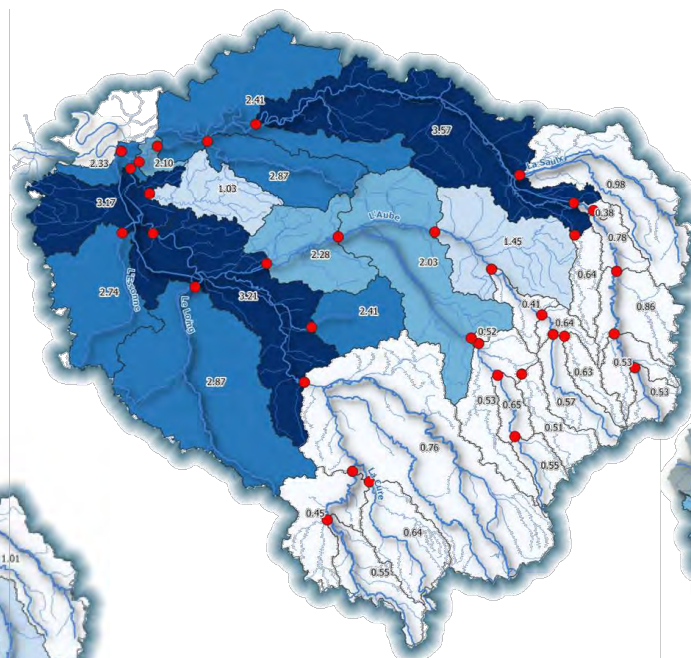
Ainsi, les données de la reconstitution AQUI-FR ont été retenues pour la suite de l'étude, du fait :

- de la simulation de débits sur l'ensemble des axes Seine, Aube, Yonne et Marne ;
- de la cohérence globale liée à la méthode de reconstitution ;
- de l'absence totale de prise en compte d'influences superficielles et souterraines (prélèvements, canaux, lacs-réservoirs) ;
- du nombre de points hydrologiques de sortie le plus élevé (35) ;
- de sorties de données piézométriques sur de nombreux points (44).

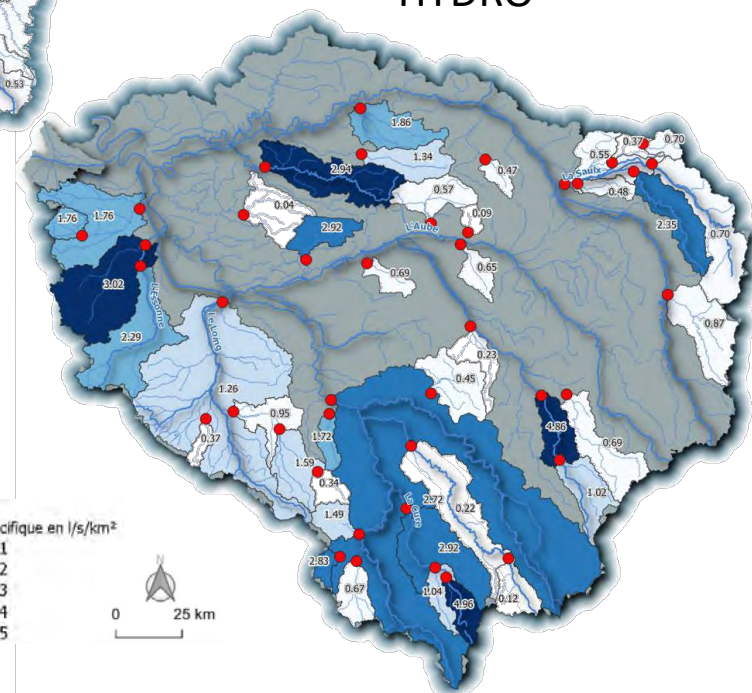
Reconstitution
EPTB



Reconstitution
Aqui-FR



Réanalyse FYRE-
HYDRO



QMNA 5
Débit spécifique en l/s/km²

0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5

0 25 km

Figure 16 : Analyse des QMNA5 spécifiques des séries de données de débits « naturalisés »

2.4 Les données météorologiques mesurées

De nombreuses données météorologiques mesurées (précipitations, températures, évapotranspiration) ont été mise à disposition dans le cadre de cette étude. Ces données sont issues (cf. figure 17) :

- de 11 stations météo France dans le cadre d'une convention EPTB Seine Grands Lacs/ météo France ;
- de pluviomètres gérés par l'EPTB Seine Grands Lacs situés au niveau des grands lacs réservoirs ou en amont ;

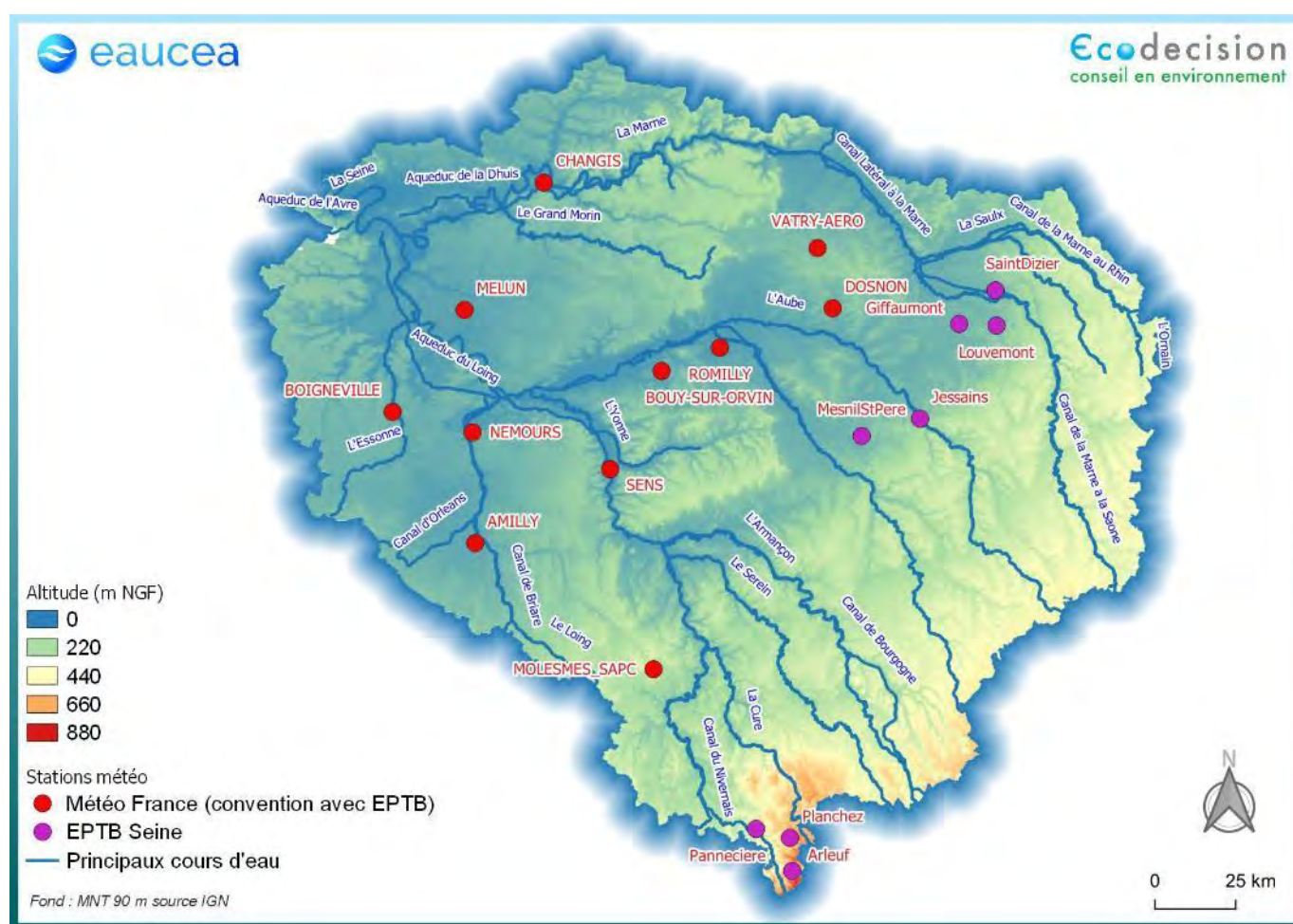


Figure 17 : Localisation des stations Météo France (convention EPTB / Météo France)

Ces données seront mobilisées pour :

- analyser la répartition spatiale des précipitation en étiage et le lien avec les débits naturels reconstitués ;
- être une donnée d'entrée de la modélisation des prélèvements pour l'irrigation sur le secteur d'étude.

Le tableau ci-dessous représente la liste des stations Météo France et la date de début des données :

NUMERO	NOM	Date de début de mise à disposition
45004001	AMILLY	01/06/1965
10057001	BOUY-SUR-ORVIN	01/08/1948
77084001	CHANGIS	01/06/1998
10130001	DOSNON	01/11/1949
77306001	MELUN	01/02/1947
89260001	MOLESMES	01/01/1981
77333003	NEMOURS	01/10/1990
10323001	ROMILLY	01/01/1947
89387002	SENS	01/01/1956
51595002	VATRY-AERO	01/09/2005
91069001	BOIGNEVILLE	01/01/1970

Tableau 2 : Date de début des données des stations météo France

Les pluviomètres de l'EPTB ont des données disponibles à partir des dates suivantes :

NOM	Date de début
JESSAINS	23/11/1990
SAINT-DIZIER	01/11/1987
GIFFAUMONT	01/11/1987
LOUVEMONT	01/11/1987
PANNECIERE	01/11/1995
ARLEUF	31/10/1990
PLANCHEZ*	01/11/1995
MESNIL-ST-PERE	31/10/1990

Tableau 3 : Date de début des données des stations météo de l'EPTB.

*le pluviomètre de Planchez s'arrête en 2017

Il a été signalé par l'EPTB Seine Grands Lacs que le pluviomètre de Pannecière n'était pas certifié, il est donc retiré de l'analyse et ses données ne seront pas exploitées dans la suite de l'étude.

2.5 Données météorologiques du climat futur

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) produit régulièrement des rapports d'évaluation sur les risques que pourrait engendrer le changement climatique.

Le 5^{ème} rapport paru en 2013 est le dernier en date. Dans celui-ci plusieurs types de projections climatiques sont proposées. Ce sont les « Representative Concentration Pathways » ou scénarios RCP. Ils sont au nombre de 4 (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP6.0 et RCP 8.5) et correspondent à différentes trajectoires d'émission et de concertation de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation du sol. Ces scénarios ont ensuite été traduits en termes de forçage radiatif (**cf. figure 18**), c'est-à-dire de modification du bilan radiatif de la planète (différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la planète).

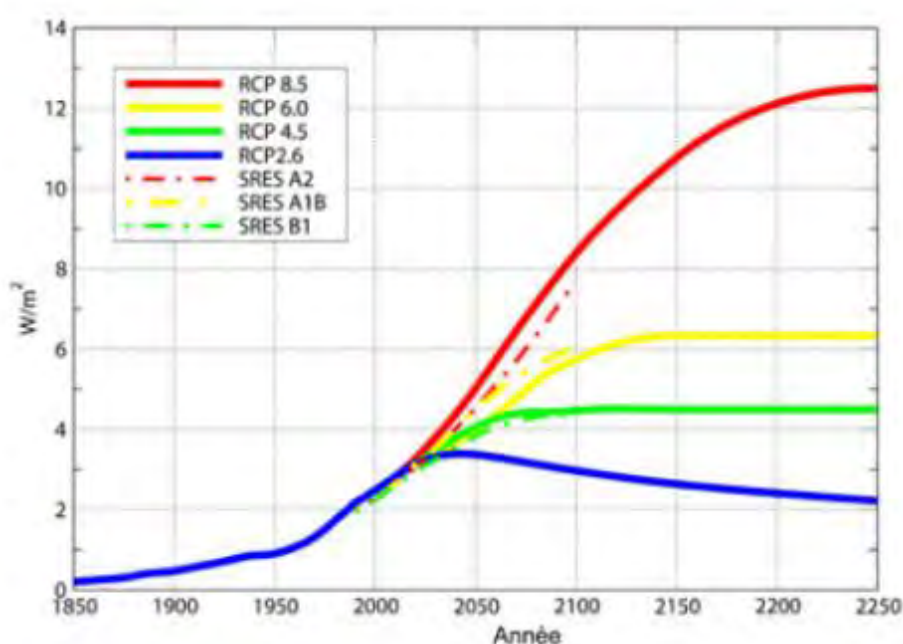


Figure 18 : Evolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m^2 sur la période 1850-2250
(meteofrance.fr)

Les données mobilisées pour cette étude correspondent aux données de simulations de 3 scénarios RCP, les 2.6, 4.5 et 8.5 réalisées par le modèle ALADIN63-CNRM-CM5 (MétéoFrance) et mises à disposition sur le site DRIAS (www.drias-climat.fr). Le modèle ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) est utilisé depuis le début des années 2000 au CNRM (Centre National de recherches Météorologiques) comme modèle régional du climat. ALADIN et ses déclinaisons sont actuellement opérationnelles dans 16 pays. Il est conçu pour tourner jusqu'à une résolution de 7 à 10 km et peut également être utilisé dans un système de descente d'échelle entre des modèles globaux et des modèles à aire limitée à très haute résolution. Les données climatiques disponibles depuis le site DRIAS correspondent à des données journalières sur :

- la période de référence 1951-2005 ;
- les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 de 2006 à 2100.

2.6 Données hydrologiques du climat futur

Les données mises à disposition de l'EPTB Seine Grands Lacs proviennent de l'étude de description des « scénarios sécheresse » plausibles du bassin Seine-Normandie réalisée en 2018. Les documents de références décrivant l'étude sont :

- *Scénarios sécheresse sur le bassin Seine-Normandie*, Julien Boé, Milka Radojevic, Rémy Bonnet et Gildas Dayon, **2018**
- *Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties*, Gildas Dayon, Julien Boé, Eric Martin, Joel Gailhard, C.R. Géoscience 350 pp 141-153, **2018**

Dans leur étude, ces données sont des épisodes de sécheresse sélectionnés parmi les résultats des projections hydrologiques réalisées par Gildas Dayon lors de sa thèse (2015). Afin d'estimer des données hydrologiques d'un climat futur, il est nécessaire d'estimer les variables météorologiques nécessaires aux modélisations hydrologiques. La résolution spatiale du modèle hydro-météorologique ISBA-MODCOU utilisé est de 8 km par 8 km. Le pas de temps journalier est employé. Pour obtenir ces données météorologiques, une méthode de descente d'échelle statistique a été employée à partir des projections climatiques de 8 modèles climatiques globaux selon le scénario RCP 8.5. Chacun de ces modèles fournit même plusieurs projections climatiques en partant de conditions initiales différentes. Les données hydrologiques obtenues sont autant de possibilités de débit pour chaque jour simulé. A partir des débits simulés, 4 épisodes de sécheresses plausibles ont été proposés. Ils ont été recherchés sur la période 2031-2060 et chaque jeu de données sélectionné est un épisode de 6 ans permettant de considérer la répétition des conditions de sécheresses. Cette durée de 6 ans est aussi choisie car elle correspond à la durée d'un cycle du SDAGE.

Les débits ont été calculés selon le procédé exposé dans la thèse de Gildas Dayon (2018). Les principales étapes de calcul sont les suivantes :

- les projections climatiques utilisées sont le résultat d'un ensemble de modélisations climatiques globales (8 ou 9 modèles par scénario) selon des scénarios d'évolution des émissions des gaz à effet de serre ;
- une méthode de descente d'échelle statistique a été employée pour produire une analyse des paramètres climatiques selon ces scénarios au pas de temps journalier et sur une maille plus fine (8km X 8km) permettant le lancement du modèle hydro-météorologique à l'échelle de la France ;
- le modèle hydro-météorologique ISBA-MODCOU a ensuite été employé pour simuler les variables hydrologiques selon chaque scénario ;
- les projections hydrologiques fournies à l'EPTB Seine Grands Lacs sont les résultats de simulations pour deux scénarios, le scénario de référence représentant **statistiquement** l'hydrologie actuelle (période 1951-2005) et le scénario RCP8.5 représentant des émissions de gaz à effet de serre continuant à un rythme très soutenu durant le 21^{ème} siècle sans mise en œuvre de mesures d'atténuation de grande ampleur. Pour ce scénario RCP8.5, les débits ont été extraits aux mailles du modèle situées aux stations hydrométriques pour 4 épisodes de 6 ans dans un futur proche (période 2031-2060).

Ces données de débits sont le résultat de simulations de l'hydrologie naturelle sans forçage par des effets anthropiques tels que la gestion des barrages, les prises d'eau et les rejets...

Les données de débits ainsi obtenues sur les deux scénarios pourront être utilisées dans la suite de cette étude pour analyser l'effet de scénarios de gestion de manière relative, c'est-à-dire par comparaison de l'hydrologie de référence avec celle du scénario RCP8.5.

Les données correspondent aux 4 épisodes suivants :

- 3 épisodes (notés a,b et c) correspondant à des conditions de sécheresses agricoles et hydrologiques sévères. Ce sont les résultats issus de 3 modélisations (respectivement ACC1, CSI1 et MIR3) ;
- 1 épisode (noté d) correspondant à des conditions de sécheresse futures modérées, et donc plus fréquente, résultat de la modélisation CAN4.

La génération de ces épisodes correspond à une recherche parmi les moyennes glissantes sur 6 années pour les paramètres de sécheresse agricole et hydrologique, la figure ci-dessous illustrant ce choix.

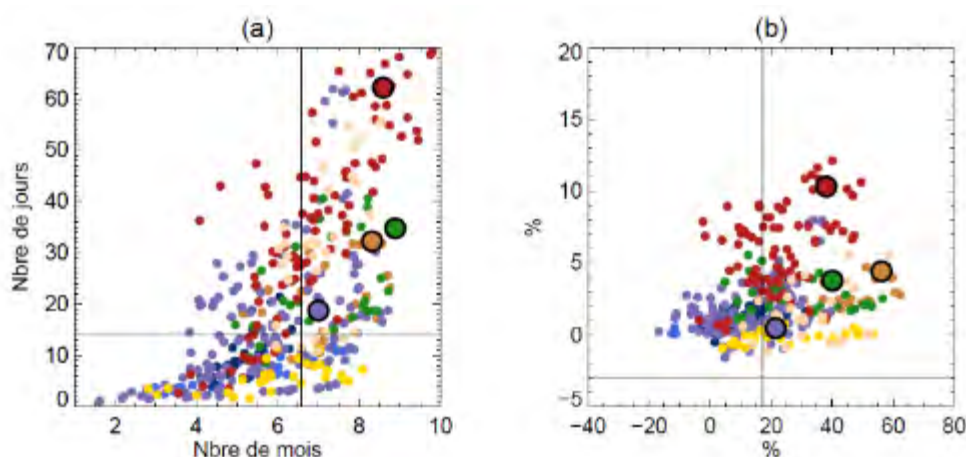


FIGURE 16 – Nombre de jours par an passés en sécheresse hydrologique versus nombre de mois par an passés en sécheresse agricole, sur le bassin Seine-Normandie et en moyenne glissante sur 6 ans pour le scénario RCP8.5. Chaque couleur correspond à un modèle, et chaque point montre une période de 6 ans entre 2031 et 2060. (b) Même chose pour la sévérité. Les gros cercles correspondent aux épisodes sélectionnés. Les barres verticales et horizontales correspondent à la période 1944-1949 de la reconstruction longue décrite dans la section 2.

Figure 19 : Sélection des épisodes de sécheresse intense (Scénarios sécheresse sur le bassin Seine-Normandie, 2018)

Les auteurs de ces sélections rappellent aussi les incertitudes et les biais liés aux différentes étapes de génération de ces données. La sévérité des étiages en particulier est très sensible aux conditions initiales choisies pour les différentes modélisations, et ce malgré des décennies plus tard. **L'analyse ne peut se faire que par comparaison avec les simulations réalisées en condition climatique actuelle et non par rapport à des observations.**

Les auteurs précisent que ces 4 événements de sécheresse ont des caractéristiques compatibles avec les conditions rencontrées dans le scénario RCP4.5.

2.7 Les données qualité

Les données qualité, présentées dans les paragraphes suivants proviennent de la base nationale Naiades (naiades.eaufrance.fr)

2.7.1 Les données température

Les stations du réseau Naïade présentant, depuis 2000, des enregistrements de températures ont été recherchées sur le territoire de l'EPTB. Au total 47 stations d'enregistrement sont présentes sur les différents cours d'eau du territoire de l'EPTB (cf. **figure 20**).

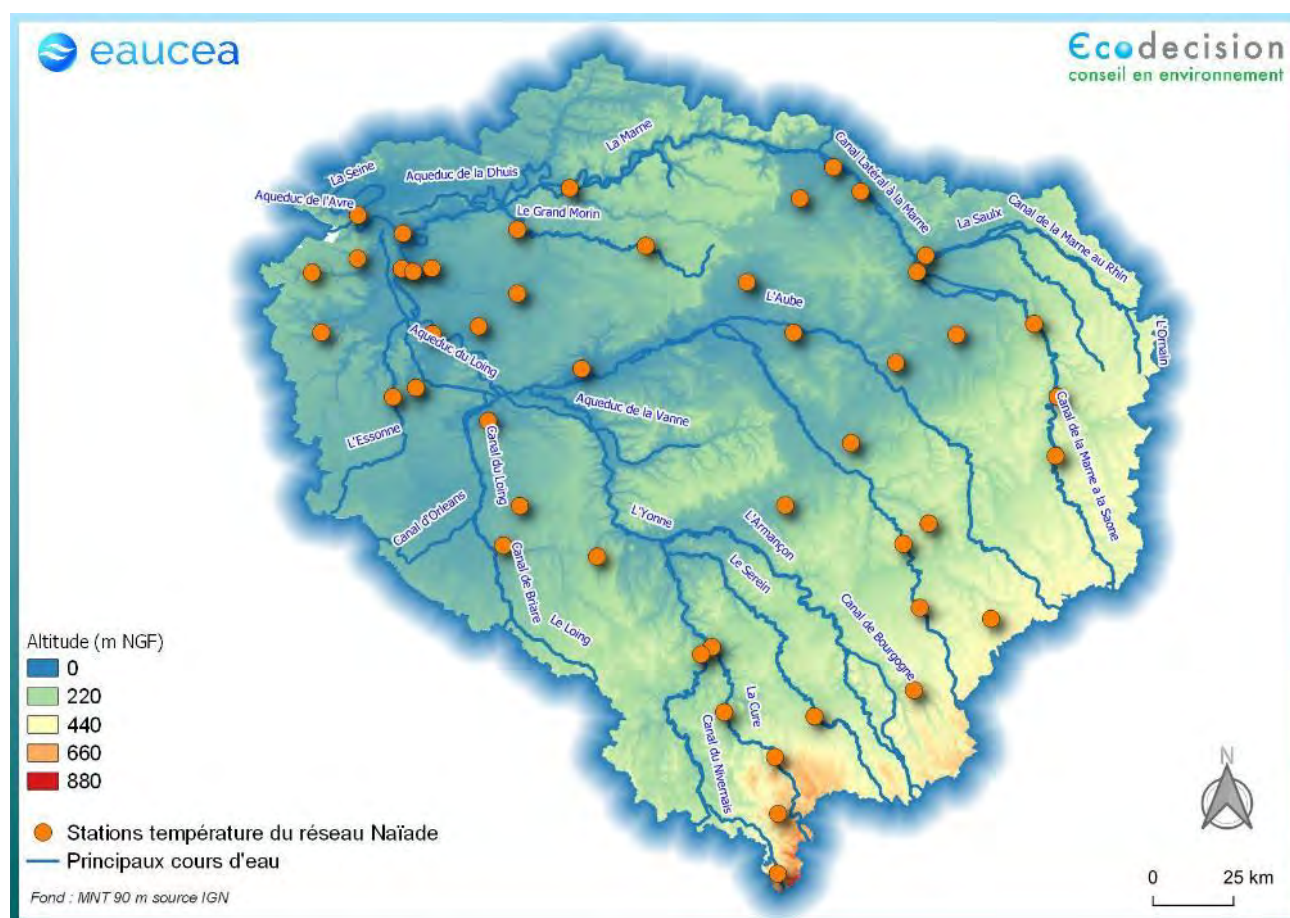


Figure 20 : Localisation des stations d'enregistrement de la température du réseau Naiades

2.7.2 Les données d'oxygène dissous

Les stations du réseau Naiade présentant, depuis 2000, des données relatives à l'oxygène dissous ont été recherchée sur le territoire de l'EPTB. Au total, 1244 stations sont présentes sur les différents cours d'eau du territoire de l'EPTB (**cf. figure 21**). A noter que contrairement aux stations températures, il ne s'agit non pas d'enregistrements mais de données ponctuelles.

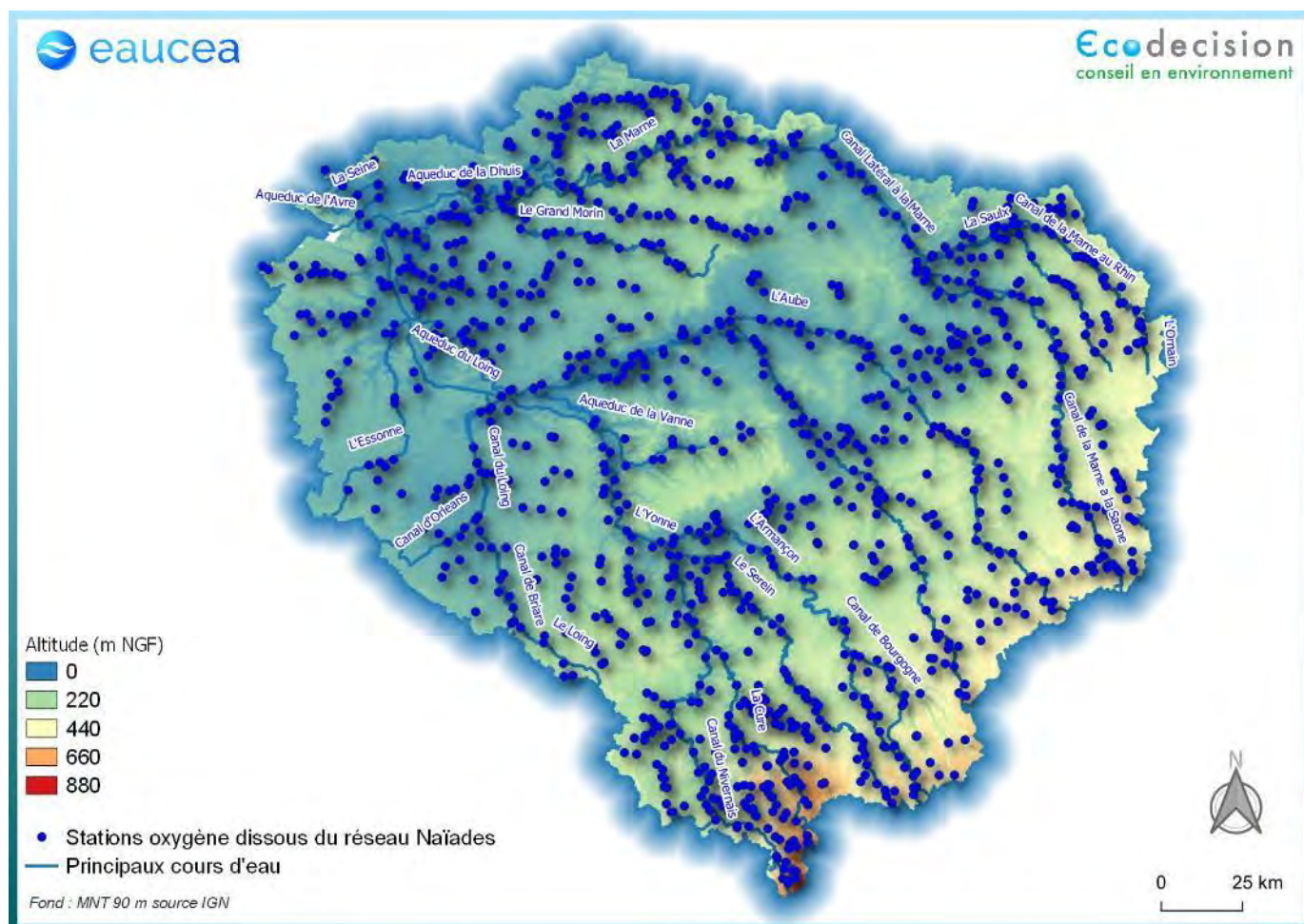


Figure 21 : Localisation des stations de mesure de l'oxygène dissous du réseau Naiades

2.7.3 Autres paramètres physico-chimiques

2.7.3.1 L'azote

Les stations du réseau Naiade présentant, depuis 2008, des données relatives aux paramètres azotés ont été recherchée sur le territoire de l'EPTB. Au total, 1851 stations sont présentes sur les différents cours d'eau du territoire de l'EPTB (cf. **figure 22**). A noter que contrairement aux stations températures, il ne s'agit non pas d'enregistrements mais de données ponctuelles.

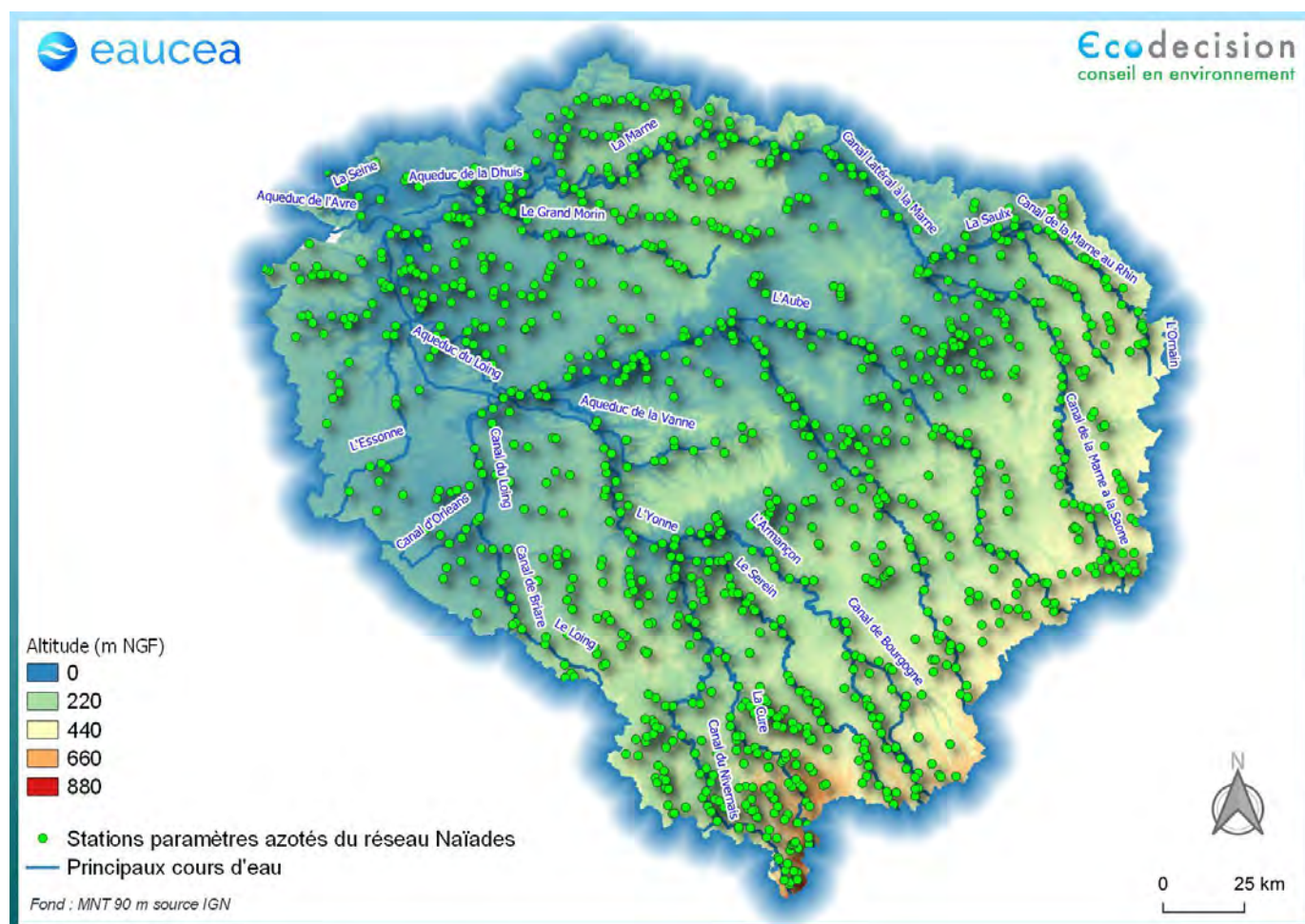


Figure 22 : Localisation des stations de mesure des paramètres azotés du réseau Naiades

2.7.3.2 Le phosphore

Les stations du réseau Naïade présentant, depuis 2008, des données relatives aux paramètres phosphorés ont été recherchée sur le territoire de l'EPTB. Au total, 1851 stations sont présentes sur les différents cours d'eau du territoire de l'EPTB (cf. **figure 22**). A noter que contrairement aux stations températures, il ne s'agit non pas d'enregistrements mais de données ponctuelles.

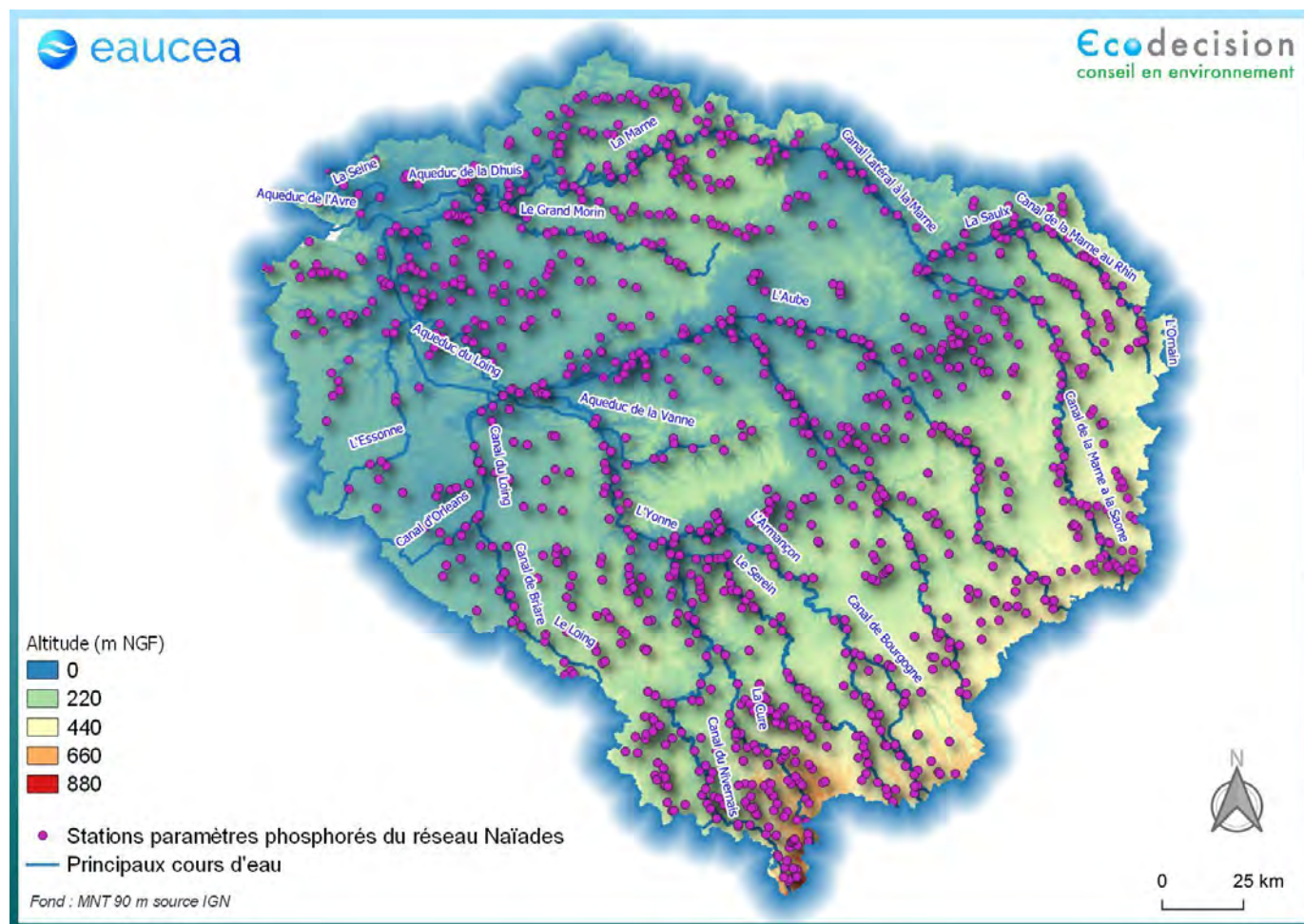


Figure 23 : Localisation des stations de mesure des paramètres phosphorés du réseau Naïades

3 ANALYSE DES ETIAGES : CARACTERISATION ET ETIAGES HISTORIQUES

3.1 La compréhension du territoire

3.1.1 Le relief

Le relief du territoire de l'EPTB est peu accidenté (cf. **figure 24**), avec des altitudes dépassant rarement les 500 m excepté, en limite amont du bassin, dans le Morvan ou elles culminent à 900 m.

Ces altitudes modérées expliquent les faibles pentes des cours d'eau qui coulent globalement vers l'ouest.

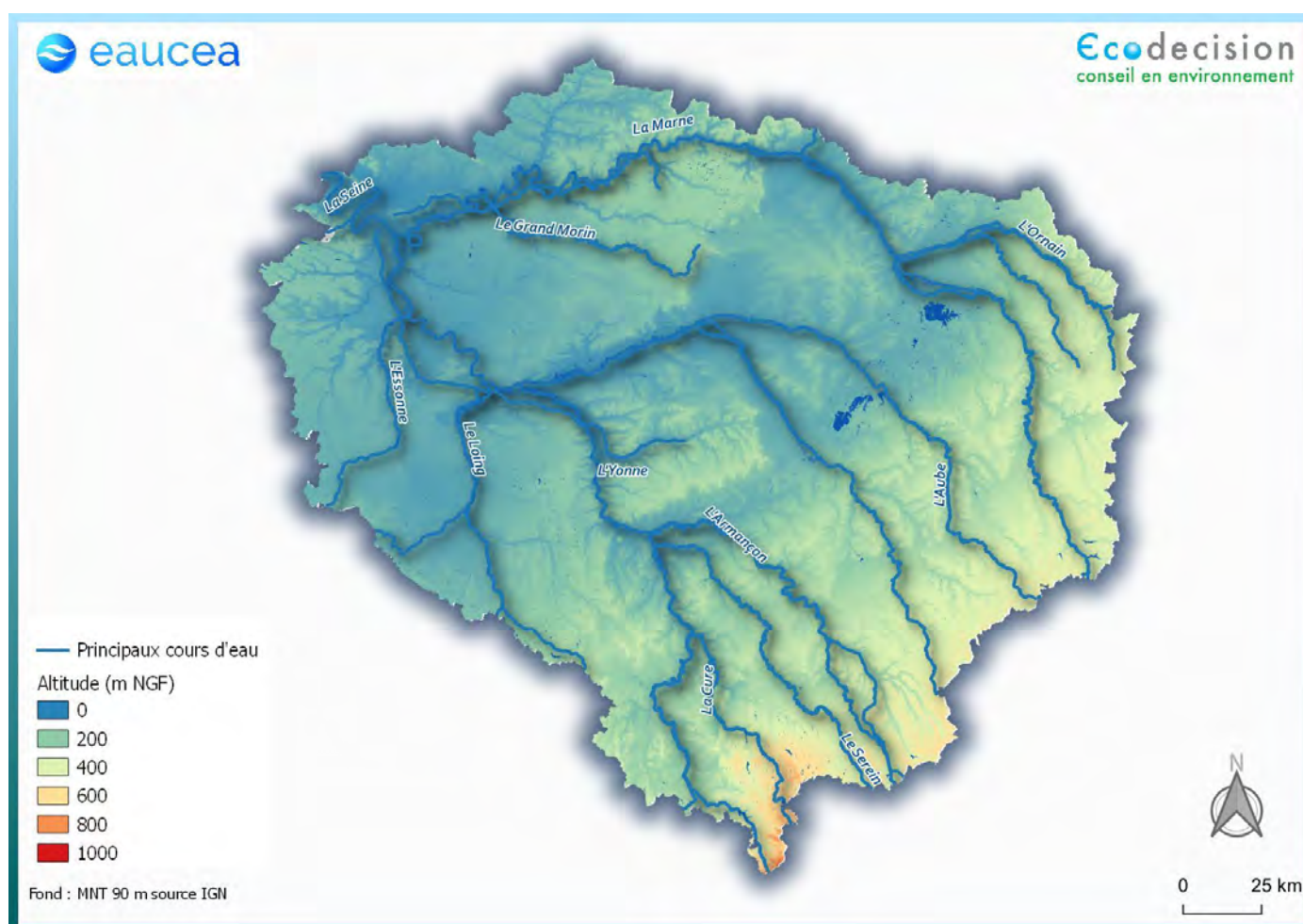


Figure 24 : Relief du territoire

3.1.2 Les précipitations – moyennes interannuelles & périodes d'étiage

La pluviométrie du bassin est dépendante d'un apport relativement constant d'humidité sous l'influence dominante des vents d'ouest, en provenance de l'océan Atlantique. Ainsi, les précipitations mesurées sur le périmètre du territoire de l'EPTB sont très variables de l'amont vers l'aval. La moyenne interannuelle (lame d'eau AURELHY, cf. **figure 25**) atteint 1400 mm en extrême limite amont correspondant aux zones de reliefs sur lesquelles les flux atlantiques viennent butter. Cette pluviométrie décroît fortement (autour de 800 mm) sur la partie centrale et vers l'aval (autour de 700 mm), secteur sur lesquels les vents d'ouest ne rencontrent pas d'obstacle.

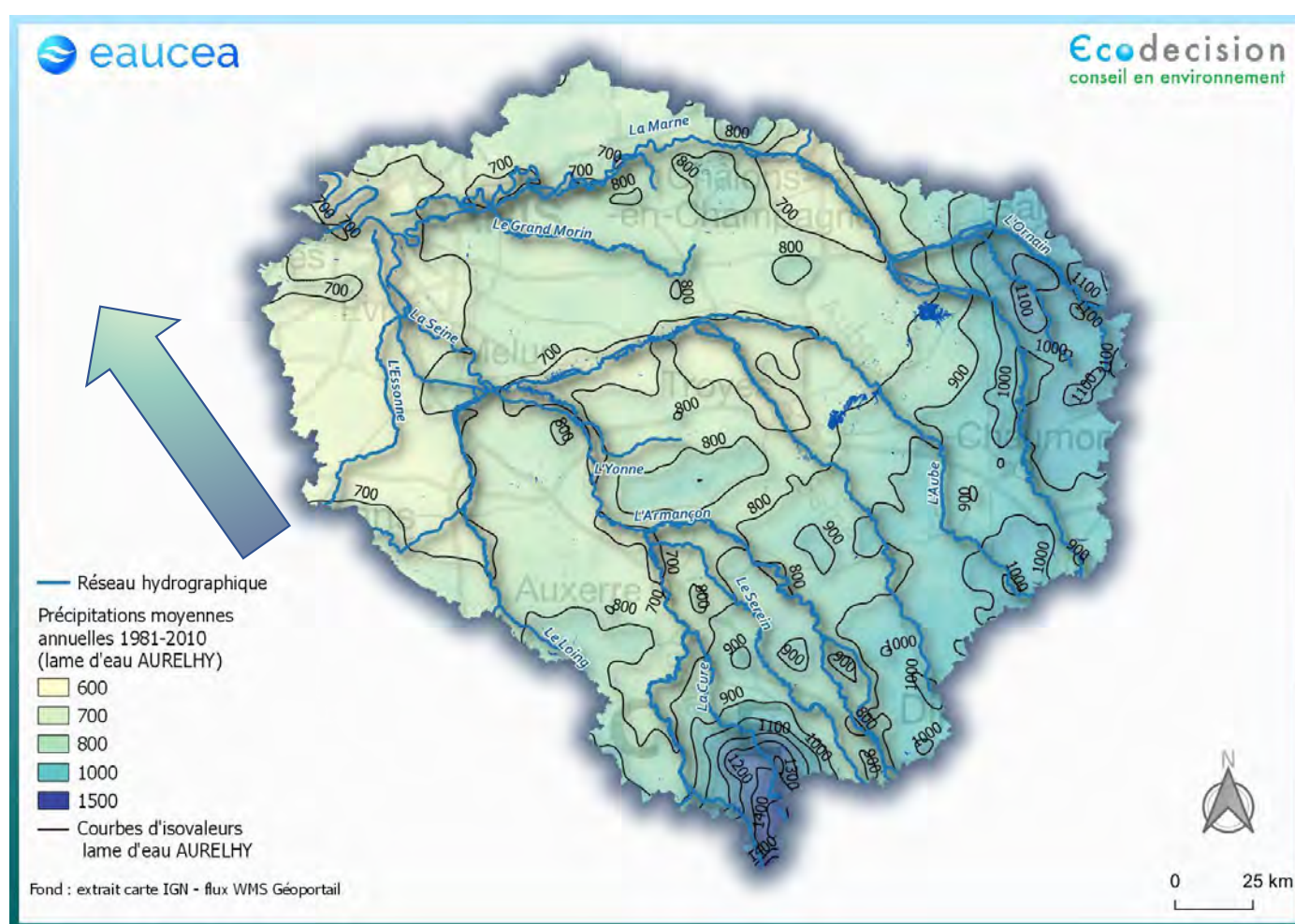


Figure 25 : Précipitations moyennes interannuelles (lame d'eau AURELHY)

Les régimes annuels moyens de précipitations sont présentés ci-après pour quelques pluviomètres. **La disponibilité des données étant très hétérogène d'un pluviomètre à l'autre, l'analyse est restreinte sur la période 1996-2019.**

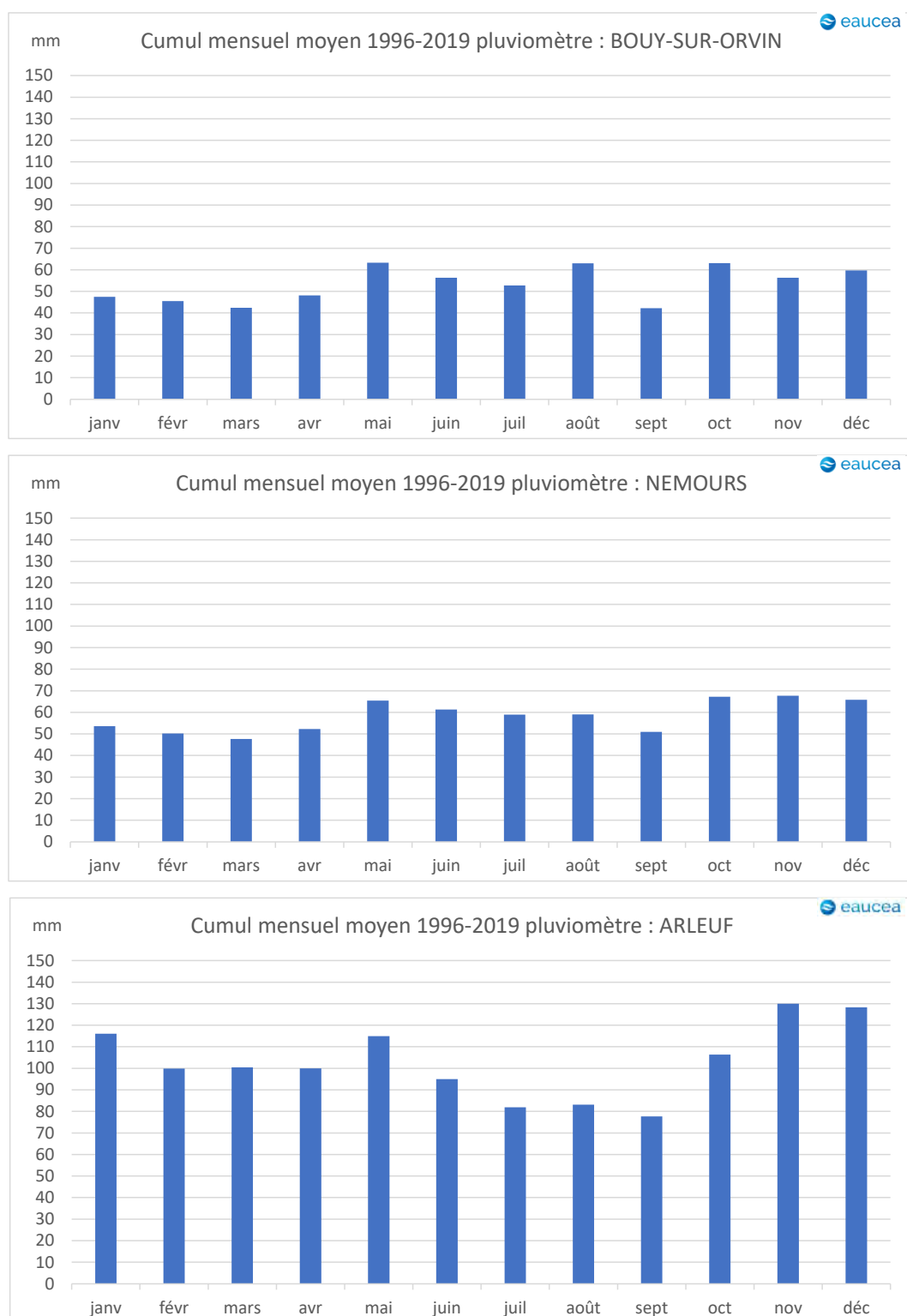


Figure 26 : évolution des précipitations mensuelles sur la période 1996-2019. Source des données : Météo France et EPTB Seine

Le régime annuel des précipitations est relativement homogène sur l'année, l'écart entre le mois le plus humide et le moins humide étant de l'ordre de 20 mm sauf pour le pluviomètre d'Arleuf situé dans le massif du Morvan.

En période d'étiage les cartes ci-dessous illustrent la répartition spatiale des précipitations pour les mois de juillet, août et septembre,

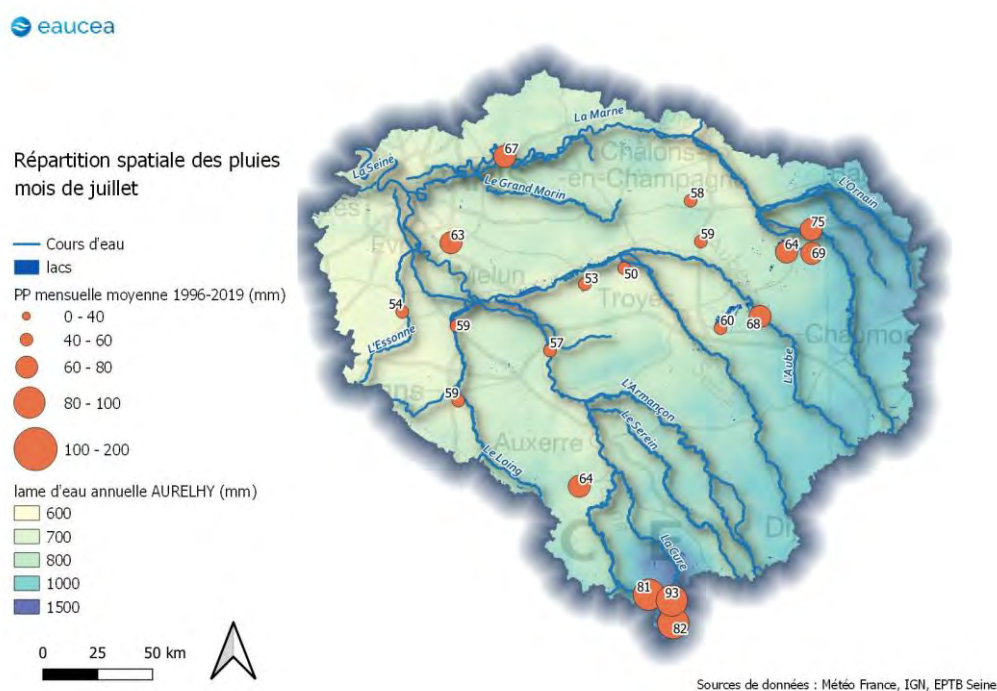


Figure 27 : répartition spatiale des précipitations mensuelles. Mois de juillet. Moyenne sur la période 1996-2019

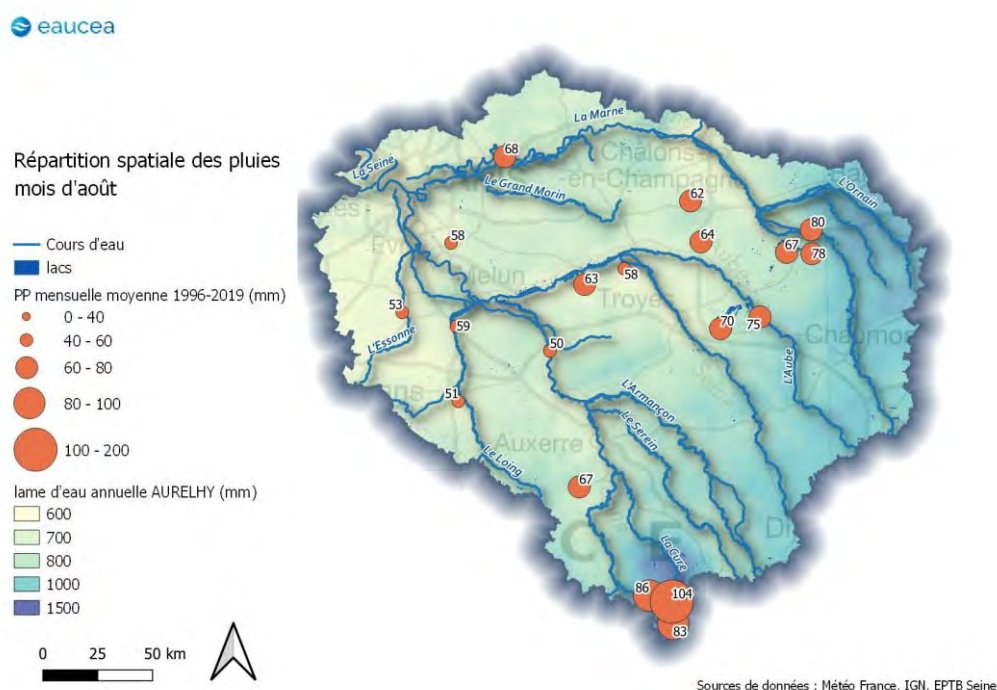


Figure 28 : répartition spatiale des précipitations mensuelles. Mois d'août. Moyenne sur la période 1996-2019

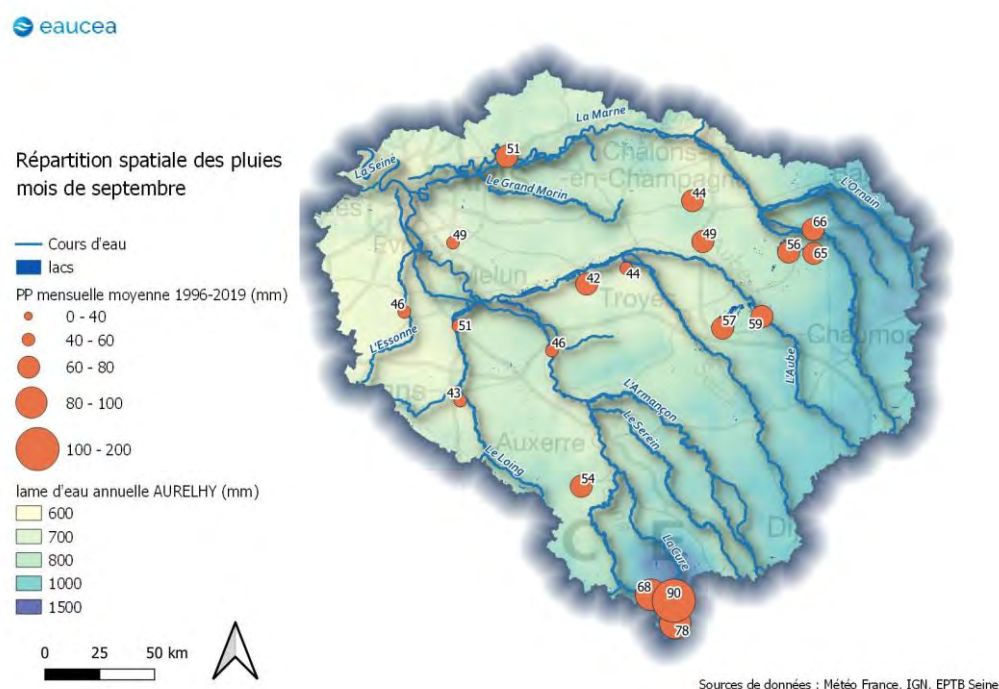


Figure 29 : répartition spatiale des précipitations mensuelles. Mois de septembre. Moyenne sur la période 1996-2019

Ces cartes montrent que les précipitations estivales sont nettement plus importantes sur le sud du bassin, situé dans le massif du Morvan avec un relief plus favorable à l'occurrence de pluies orographiques.

Afin de renforcer cette analyse sur les pluviomètres de la répartition spatiale des précipitations, les cumuls mensuels de précipitations générées à partir des données ERA5-Land du Service de Surveillance de l'Atmosphère Copernicus³ (2021) sont représentées pour les mois de juillet, août et septembre sur les cartes de la **Figure 30** (valeur moyenne mensuelle sur la période 1981-2020).

Ces cartes montrent aussi que l'intensité des précipitations est nettement plus importante sur le massif du Morvan et le plateau de Haute-Marne. Ces données de réanalyse combinent modélisation et données mesurées sur toute la période 1981-2020 au pas de temps horaire.

³ <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land>

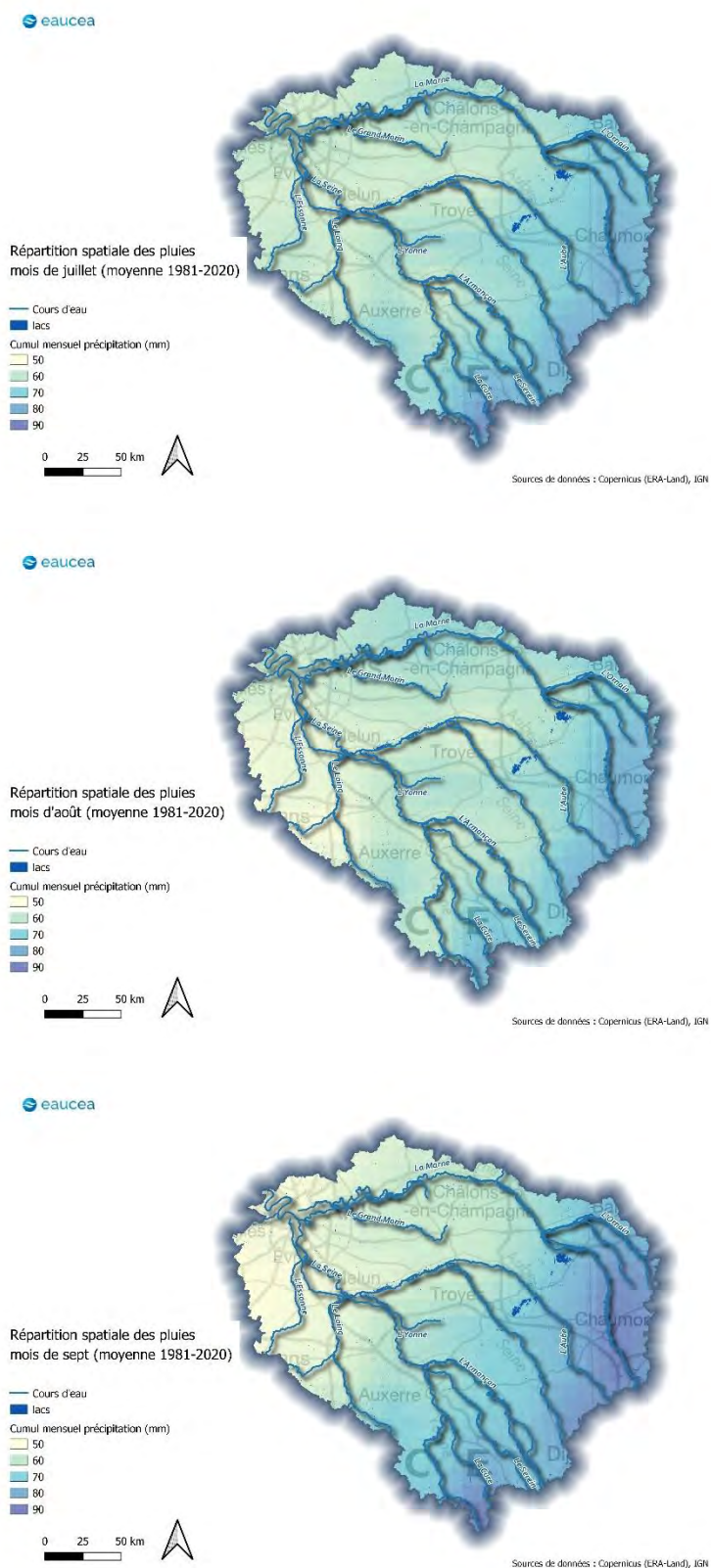


Figure 30 : cumuls mensuels des précipitations pour les mois de juillet, août et septembre (valeur moyenne sur la période 1981-2020) générés à partir des données ERA-Land

Les données hydrologiques ne reflètent cependant pas toutes l'effet de ces précipitations comme il a été montré dans le § 2.3.4. En effet les valeurs de QMNA5 spécifiques sont très variables d'une analyse à l'autre (cf. **figure 16**). La modélisation hydrologique dépendant fortement des précipitations, l'analyse des étiages sévères comporte donc beaucoup plus d'incertitudes que le régime moyen. La réaction des modèles et l'analyse de la productivité des bassins (débits spécifiques) semble parfois, sur les sous-bassins amont, peu cohérente avec les précipitations mesurées en étiage.

Rémy Bonnet dans sa thèse, met aussi en avant un biais concernant la réanalyse des précipitations sur une longue période avec en particulier une sous-estimation des précipitations en étiage (chap. 4.3, pp 95). Il applique un filtre de correction des biais repérés par rapport à la simulation SIM, et vérifie qu'à l'échelle du bassin (la Seine à Poses) ce filtre est efficace. L'efficacité du filtre appliqué globalement sur des sous-bassins est inconnue et non mentionnée dans la thèse. **A noter cependant que cela impacte peu les analyses présentées dans les paragraphes suivants, qui sont réalisées sur les stations de grands axes hydrologiques et non sur les petits-sous-bassins amont.**

3.1.3 La géologie

Le territoire de l'EPTB Seine Grands Lacs est situé sur le « Bassin Parisien » (cf. **figure 31**). Il s'agit d'une vaste entité géologique caractérisée par une structure en « auréoles concentriques » correspondant à un empilement de formation (géométrie dite « en pile d'assiettes ») allant du Secondaire (Jurassique inférieur) au Tertiaire (Eocène) et reposant sur les formations granitiques et métamorphiques du socle (cf. **figure 32**). Dans les vallées alluviales et à proximité de Paris, des formations superficielles correspondant aux terrasses alluviales des cours d'eau sont aussi présentes.



Figure 31 : Carte géologique générale de la France (source BRGM, modifiée)

Il y a environ 300 Ma, le massif Hercynien se forme, composé de roches éruptives, plutoniques et métamorphiques. Ce massif s'érode progressivement pour donner naissance à des massifs granitiques anciens qui ceinturent le bassin Parisien et forment l'assise géologique du bassin (massifs Armoricaïn, Central et des Ardennes). Ces formations sont présentes à l'affleurement en limite nord-est du territoire de l'EPTB (cf. figures 32 et 33).

Au Trias (-245 Ma), le bassin est envahi par la mer sous un climat chaud et humide et son remplissage sédimentaire commence alors. Durant l'ère secondaire, (-245 à -65 Ma), des phases de transgression (remontée du niveau marin) et de régression (descente du niveau marin) ont lieu entraînant une alternance de dépôts calcaires et marneux au Jurassique, et calcaires au Crétacé (cf. figures 32 et 33). La nature des matériaux rencontrés dépend alors de la profondeur du niveau marin et des apports continentaux. Les calcaires du Jurassique correspondent à des dépôts marins de profondeurs importantes, les marnes à des profondeurs plus faibles marquées par des apports de matières fines issues de l'érosion des continents et les calcaires du Crétacé à des dépôts dans d'immenses lagunes. Au Tertiaire, ces phases de transgression et régressions se poursuivent avec des alternances de dépôts plus côtiers de sables et de marnes. Le bassin se retrouve ensuite complètement émergé, l'érosion commence alors formant l'actuel relief du bassin et les grands cours d'eau d'aujourd'hui creusent progressivement le paysage et leurs vallées alluviales.

L'enfoncement progressif du bassin (phénomène de subsidence) a permis l'empilement de ces couches sédimentaires et la mise en place de la géologie actuelle.

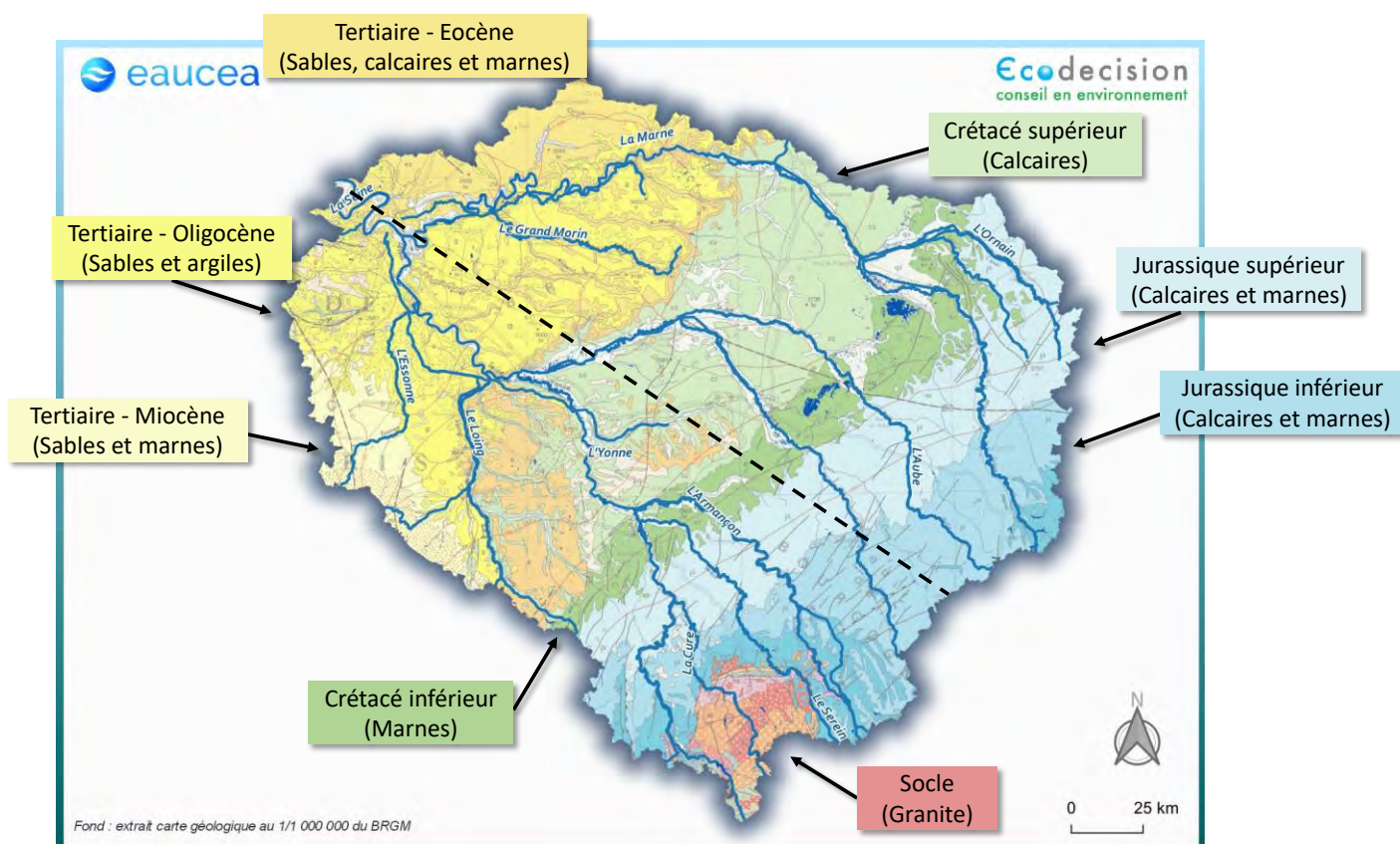


Figure 32 : La géologie du territoire

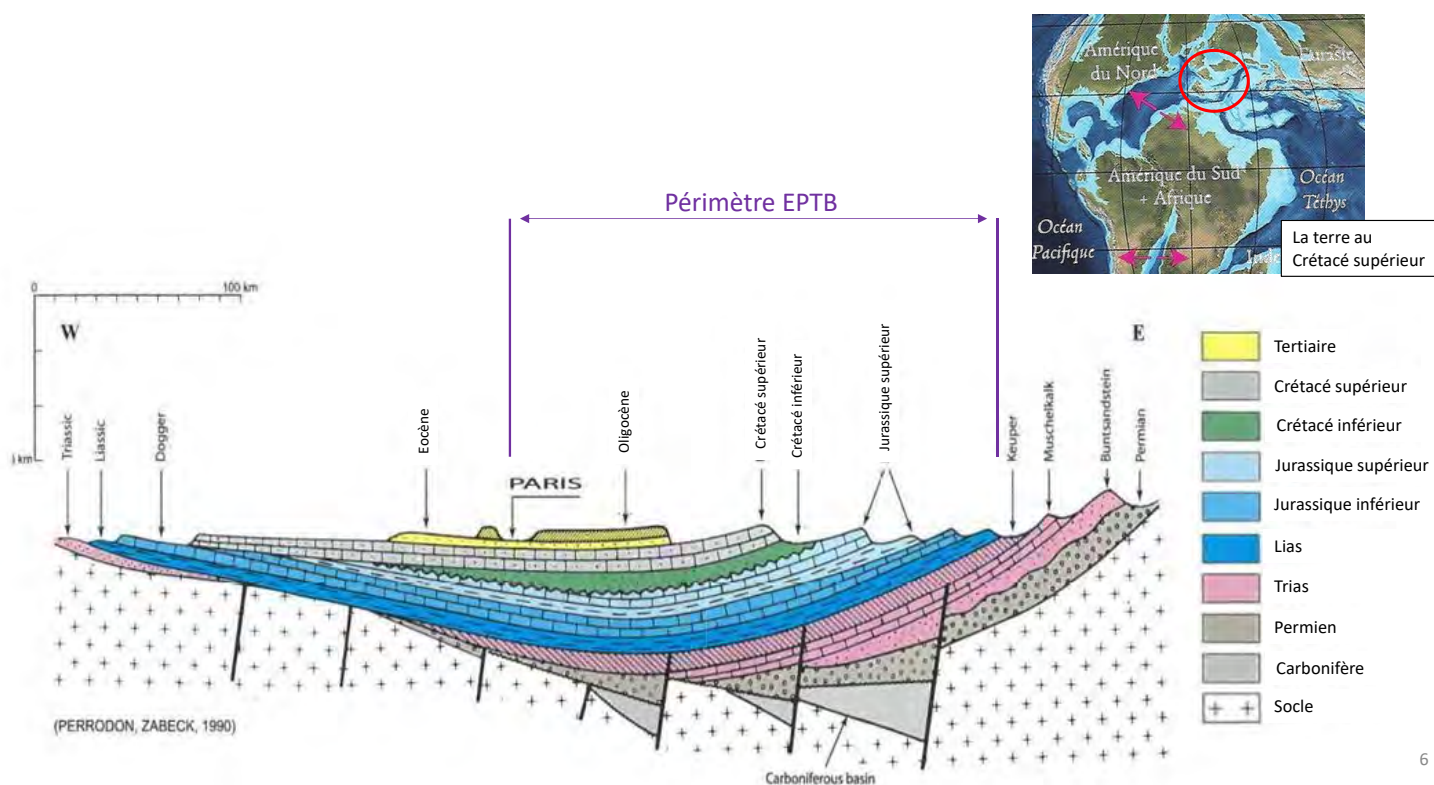


Figure 33 : Coupe géologique du territoire (source BRGM modifiée)

3.1.4 L'hydrogéologie

D'un point de vue de l'hydrogéologie, les formations marneuses Lias et du Crétacé inférieur peu perméables ne contiennent pas d'aquifère notable et isolent les autres formations les unes des autres (cf. figure 34).

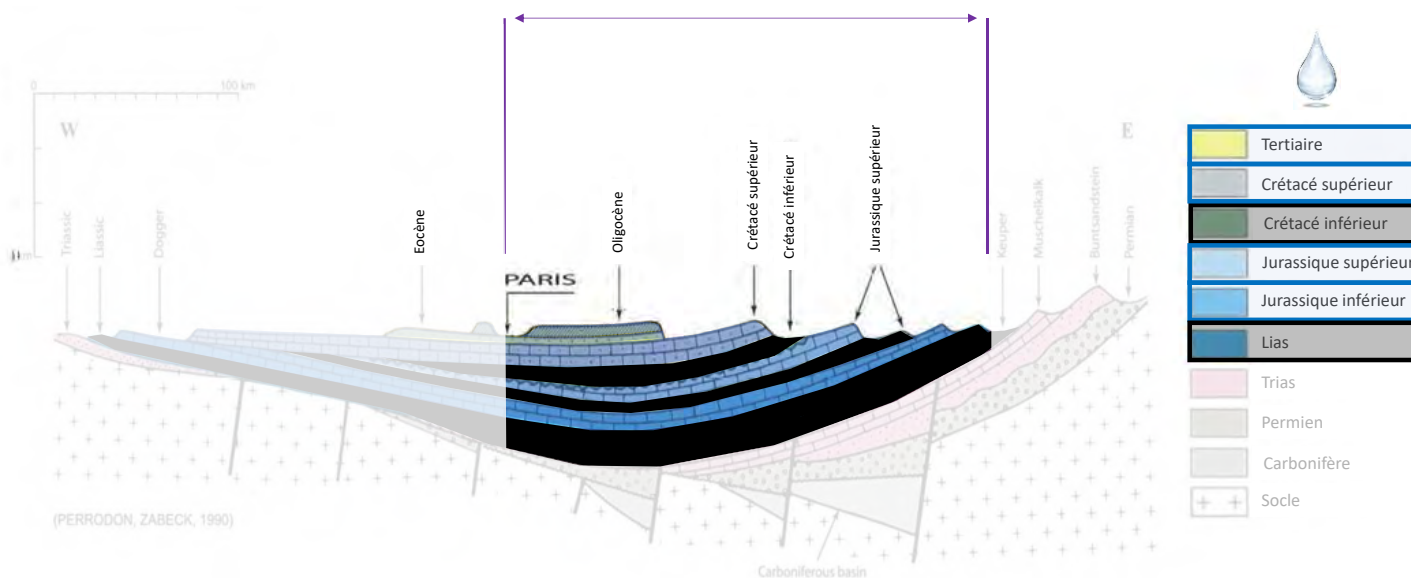


Figure 34 : Coupe hydrogéologique interprétative (source BRGM modifiée)

Les principales formations aquifères rencontrées sur le territoire correspondent ainsi des plus anciennes au plus récentes (**cf. figures 34 et figure 35**) :

- aux formations du socle du Morvan. Il s'agit d'aquifères d'altération de la couche de surface avec des écoulements dans les réseaux de fractures et de fissures. Ces aquifères sont de faibles extensions géographiques avec des débits exploitables faibles et de nombreuses sources ;
- aux formations karstiques des calcaires du Jurassique (Dogger, Kimméridgien-Oxfordien). Les écoulements dans ce type d'aquifère s'effectuent par l'intermédiaire de chenaux et conduits parfois de grandes dimensions. Il s'agit en général d'écoulements rapides. La fonction capacitive du milieu est assurée par les fissures du système et accessoirement par des cavités ;
- aux formations des calcaires du Crétacé supérieur, communément appelée « nappe de la craie ». Il s'agit d'un aquifère majeur correspondant à un des plus grand d'Europe et alimentant une partie de la Belgique, du grand nord de la France et du bassin Parisien. Il occupe une surface de près de 65 000 km² et ses ressources sont estimées à près de 12 Mm³ d'eau par an. Les calcaires présents sont « crayeux », friables et présentent une porosité importante faisant de cette formation un aquifère aux capacités de stockage importantes ;
- aux formations du Tertiaire formant des aquifères multicouches plus ou moins bien différenciés (aquifères du Soissonnais, nappe du Champigny et nappe de Beauce notamment) et présentant localement de fortes potentialités aquifères pouvant être très exploitées.

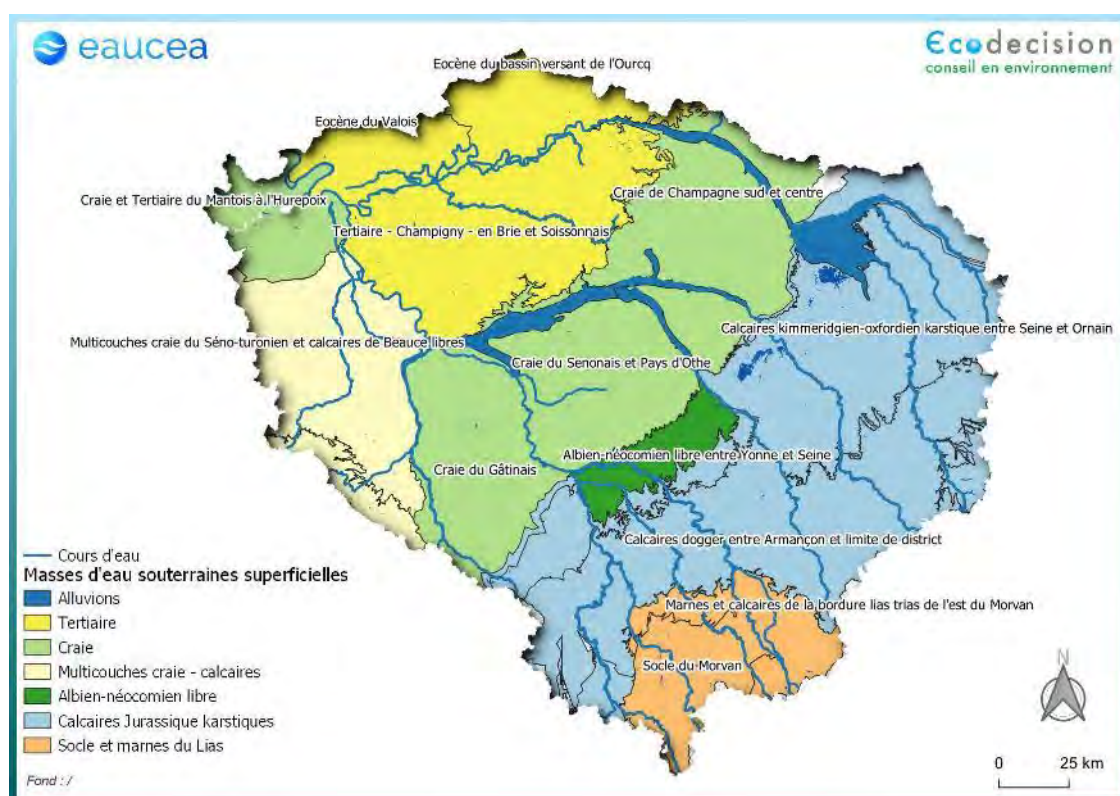


Figure 35 : Masses d'eau souterraines de surface

3.1.5 L'hydrologie

Les caractéristiques des formations géologiques rencontrées et notamment leurs capacités à infiltrer de l'eau ou au contraire au ruissellement influent fortement sur l'hydrographie de surface et l'occupation des sols. En effet, au niveau des formations calcaires ou sableuses présentant de fortes capacités d'infiltrations (calcaires du Jurassique, calcaires du Crétacé supérieur, sables du Miocène), le réseau hydrographique est peu dense (**cf. figure 36**). A l'inverse, quand des formations de socle ou marneuses sont à l'affleurement (affleurement du socle à l'amont du bassin, marnes du Crétacé inférieur, marnes des formations Eocène et Oligocène), le réseau hydrographique forme un chevelu très dense.

Ainsi, la présence ou non de grands cours d'eau et de zones avec des disponibilités en eau superficielle importantes ou non, a depuis tout temps façonné l'occupation du sol par l'homme pour arriver à celle que l'on connaît aujourd'hui. La tectonique des plaques et la dynamique de mise en place des formations géologiques ainsi que leur caractéristiques aquifères ou imperméables est donc le principal moteur de l'hydrographie et de l'hydrologie actuelles, ainsi que de l'occupation humaine du territoire.

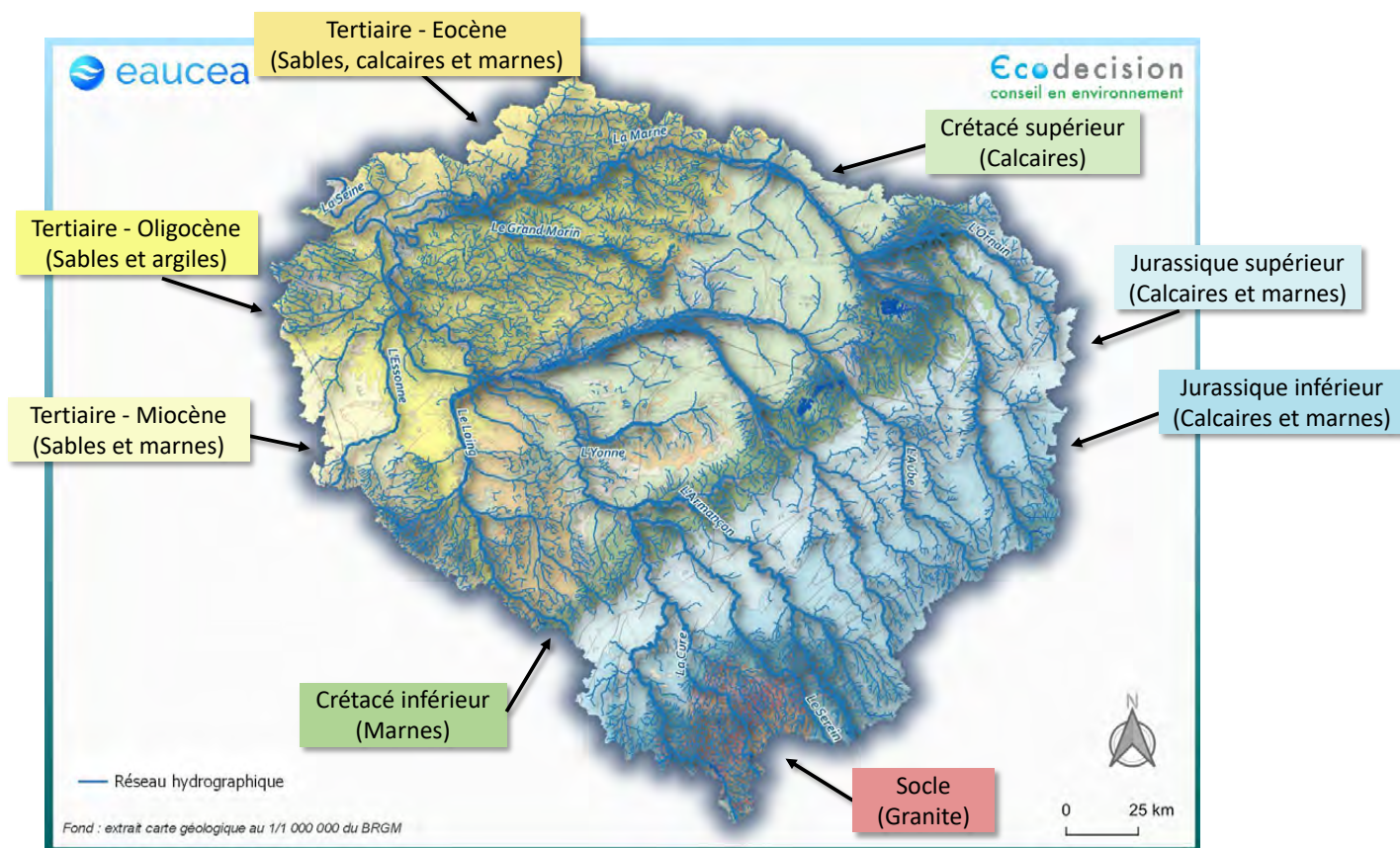


Figure 36 : L'hydrogéologie en lien avec l'hydrologie

L'hydrologie actuelle du territoire est ainsi la résultante de multiples phénomènes (cf. **figure 37**) qui sont détaillés en phase 2 de cette étude :

- des phénomènes naturels dus à la géologie (reliefs, réseau hydrographique, niveaux aquifères...) et à la climatologie (variabilités locale des précipitations, cycles climatologiques...) ;
- des phénomènes anthropiques (présence de canaux, d'aqueducs, effets des lacs réservoirs, prélèvements et rejets d'eau...).

Les débits des cours d'eau du territoire sont suivis au niveau de nombreuses stations (cf. **figure 37**) qui sont gérées localement par :

- la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Bourgogne ;
- la DREAL Champagne-Ardenne ;
- la Direction Régionale Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie (DRIEE) Ile-de-France.



Figure 37 : Localisation des stations hydrométriques et des particularités du territoire

3.2 Analyse des événements historiques et sélection de 3 étiages

L'analyse des étiages historique a été réalisée sur la base des données du modèle AQUI-FR à partir de la chronique des débits « naturalisés ». La période d'analyse retenue est de 1900 à 2008. Les fiches descriptives des différentes stations hydrométriques et piézométriques reconstituées sont présentées en **annexe 1**. Le régime des cours d'eau peut être décrit au travers de différents indicateurs et au niveau de chacun des points de reconstitution.

3.2.1 Choix des indicateurs d'étiage

Les événements historiques d'étiage, et de manière générale la caractérisation des étiages, diffèrent grandement de l'analyse des crues :

- les crues sont des événements extrêmes brefs et de courte durée s'étalant sur une période allant de quelques heures pour les bassins versants les plus réactifs, jusqu'à plusieurs jours pour les bassins versants les plus lents ;
- les étiages sont quant à eux des événements assez lents comparés aux crues. Un événement d'étiage dans le temps dure en général plusieurs mois.

La dynamique temporelle des étiages incite à choisir un indicateur représentatif par rapport à leurs durées. Dans les analyses hydrologiques plusieurs indicateurs annuels sont utilisés fréquemment, parmi eux :

- VCN3 : minimum annuel des moyennes glissantes sur 3 jours consécutifs du débit moyen journalier ;
- VCN10 : minimum annuel des moyennes glissantes sur 10 jours consécutifs du débit moyen journalier ;
- VCN30 : minimum annuel des moyennes glissantes sur 30 jours consécutifs du débit moyen journalier ;
- QMNA : minimum annuel du débit moyen mensuel calendaire (débit moyen de chaque mois, allant de janvier à décembre).

La période d'étiage étant centrée sur l'été, il est pratique et possible de réaliser ces analyses annuelles en considérant l'année calendaire à partir du 1^{er} janvier jusqu'au 31 décembre.

Par construction la relation entre ces indicateurs pour une même année est la suivante :

$$VCN3 < VCN10 < VCN30 < QMNA$$

Différentes actions de gestion reposent sur les indicateurs suivants :

- VCN3 de période de retour 2 ans, 5 ans et 10 ans. Ces valeurs sont utilisées pour définir les seuils de vigilance, d'alerte et de crise pour l'arrêté cadre sécheresse, établi en 2015 sur le bassin de la Seine-Normandie. Sur certains cours d'eau soumis à des débits minimum biologiques, l'indicateur QMNA5 pour les débits naturels reconstitués est une valeur de référence ;
- QMNA5 (QMNA de période de retour 5 ans). Dans le cadre du SDAGE de l'Agence de l'eau Seine-Normandie, la valeur de QMNA5 est utilisée pour évaluer l'état des masses d'eau en

particulier les pressions anthropiques liées aux prélèvements (le rapport entre débit de prélèvement et QMNA5 est utilisé). Il est aussi utilisé par les services de la Police de l'Eau dans le cadre du traitement des dossiers de rejets et de prélèvement des eaux superficielles ou dans les nappes d'accompagnement.

La figure ci-dessous illustre pour la station hydrométrique du Loing à Épisy les indicateurs d'étiage de l'année 2019 : VCN3, VCN10, VCN30 et QMNA.

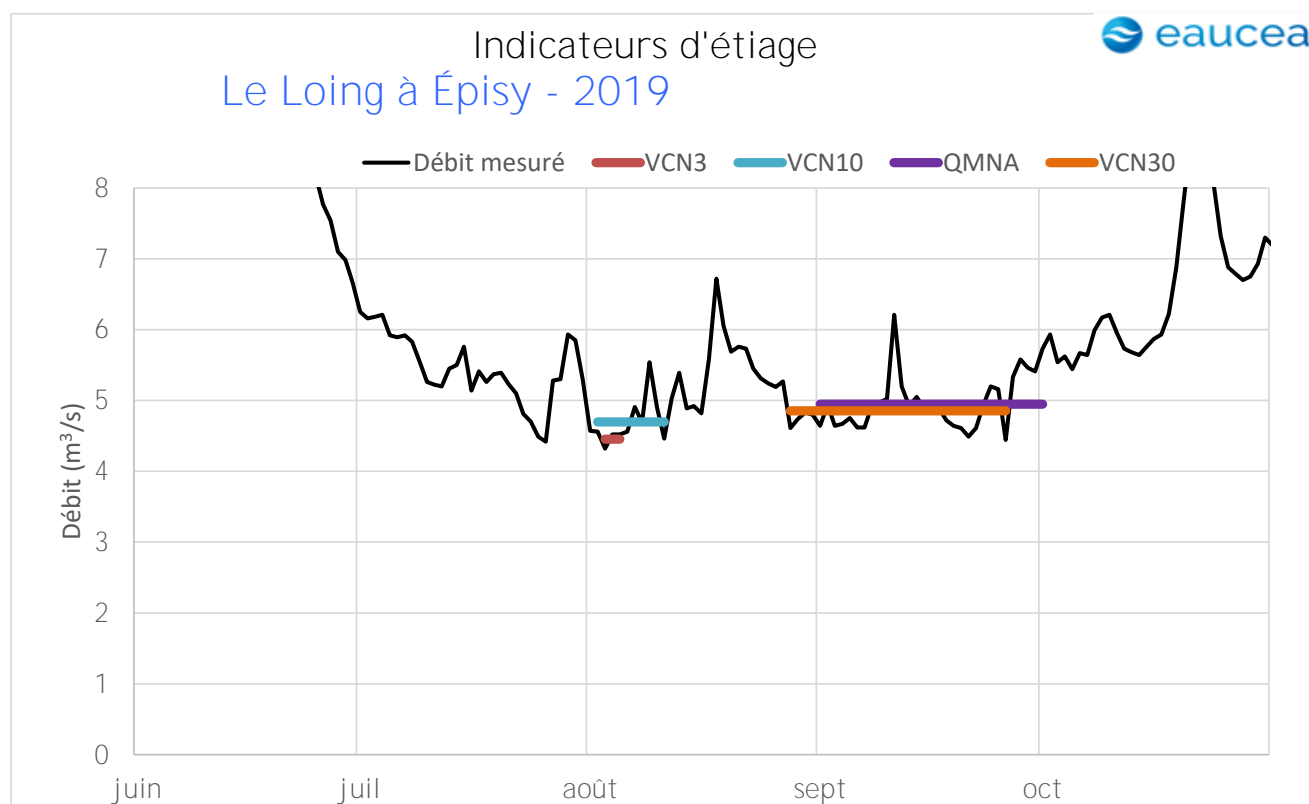


Figure 38 : Exemple du VCN3, VCN10, VCN30 et QMNA du Loing à Épisy en 2019

En 2019, il est intéressant de noter que le VCN3 et le VCN10 ont été atteints début août alors que le VCN30 se situe entre fin août et fin septembre et que le mois d'étiage le plus bas correspond à celui de septembre.

Les valeurs statistiques de chaque indicateur d'étiage sont calculées sur la base d'une chronique de valeurs annuelles sur plusieurs décennies. Par exemple le QMNA5 est calculé comme la probabilité d'occurrence du QMNA annuel de 0,2 (c'est-à-dire 1 année sur 5) sur une chronique pluri-décennale. Cette probabilité est calculée par un ajustement statistique avec la loi de Galton (méthode des moments).

Dans le cadre de l'analyse menée dans cette étude, les indicateurs pertinents sont ceux qui réagissent de manière cohérente avec les modes de gestion des usages de l'eau et de la ressource en eau pour la période de l'étiage. Le VCN3 est ainsi un indicateur trop « versatile » pour être contrôlable par des actions de gestion de l'eau alors que le VCN10, le VCN30 ou QMNA paraissent plus pertinents. Les indicateurs retenus pour l'analyse présentées dans les paragraphes suivants correspondent donc aux QMNA (indicateur réglementaire) et au VCN10 (second indicateur classiquement utilisé pour la description des étiages).

3.2.2 Les QMNA

Une première analyse des QMNA (débit mensuel minimum d'une année) réalisée au niveau de la station de Paris Austerlitz (station de reconstitution la plus en aval) (cf. **figure 39**) montre des étiages présentant des valeurs de QMNA inférieures au QMNA10 (temps de retour de 10 ans) pour :

- l'année 1921. Cet étiage sévère apparaît de façon ponctuelle dans un cycle d'étiages humides à très humides (cette analyse est montrée par Rémy Bonnet dans sa thèse à l'origine de la réanalyse ayant produit cette hydrologie) ;
- les années 1947 à 1969. Durant cette période, de multiples étiages sévères ont lieu (1947, 1949, 1954, 1959, 1964, 1969), entrecoupés d'étiages plus humides (1956-1958, 1968) ;
- l'année 1976. Il s'agit de l'étiage le plus marqué de la chronique avec un QMNA à 56 m³/s. Cet étiage intervient à la suite de la chronique 1949-1969 comportant les étiages sévères sus mentionnés ;
- les années 1990 et 1991 qui présentent toutes deux des étiages marqués se succédant.

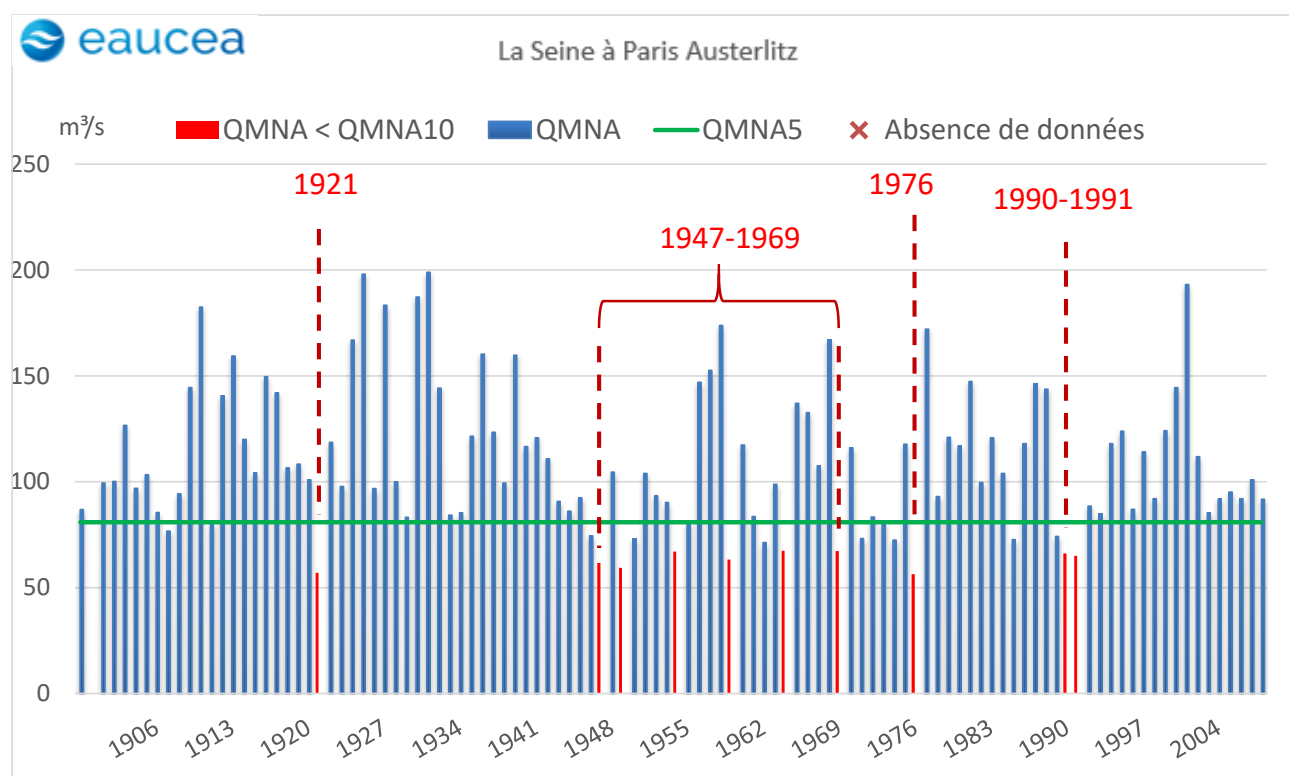


Figure 39 : Les QMNA de la Seine à Paris Austerlitz (données AQUI-FR)

Cette même analyse portée sur les stations aval des principaux cours d'eau (**cf. figure 40**) montre :

- une année 1921 très sèche pour l'ensemble des stations prises en compte ;
- une période 1947-1969 présente, comme à Paris Austerlitz, une succession d'année sèches entrecoupées d'année humides ;
- l'année 1976 correspond à des records secs de QMNA sur l'ensemble des stations mesurées ;
- l'année 1990 qui présente des valeurs faibles sur l'ensemble des stations prises en compte alors que l'année 1991 n'est pas aussi marquée sur l'Yonne. Cependant les années suivantes de 1990 restent avec des valeurs basses sur le Loing.

Cette analyse permet non seulement de mettre en évidence les années présentant des étiages sévères mais aussi un phénomène généralisé. C'est-à-dire que les étiages sévères correspondent à des étiages « de bassin ». Cette analyse est concordante avec les données météorologiques (**cf. paragraphe 3.1.2**) et qui montrent des précipitations globalement homogènes sur l'ensemble du bassin (à l'exception des parties les plus en amont) du fait de l'absence de relief susceptible de bloquer les flux océaniques.

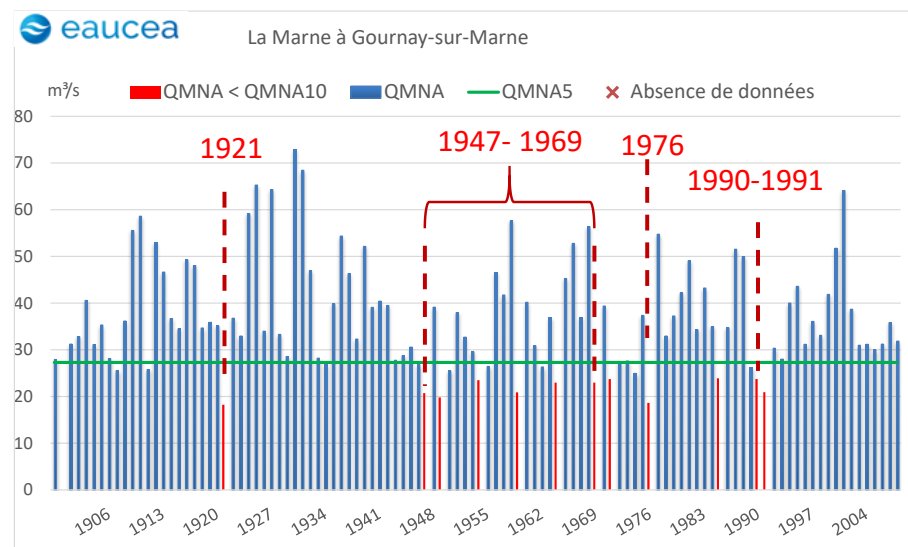
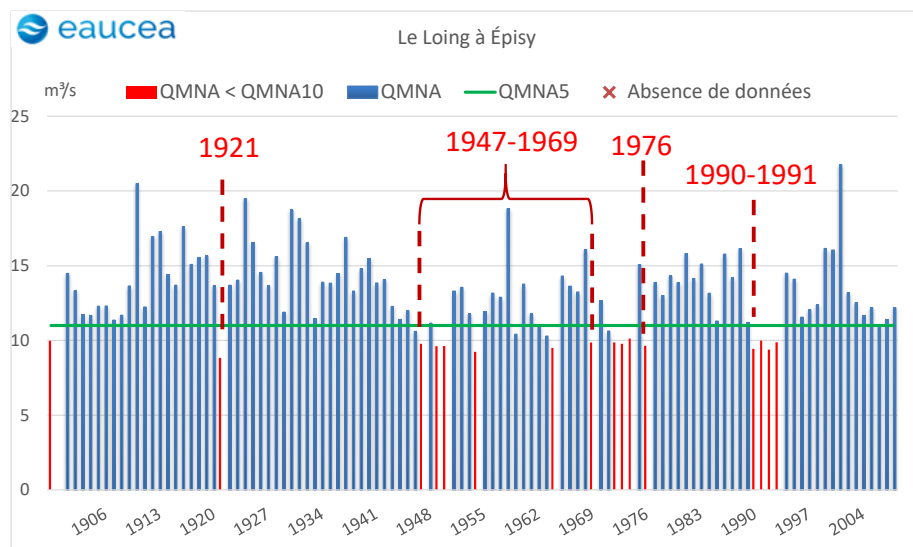
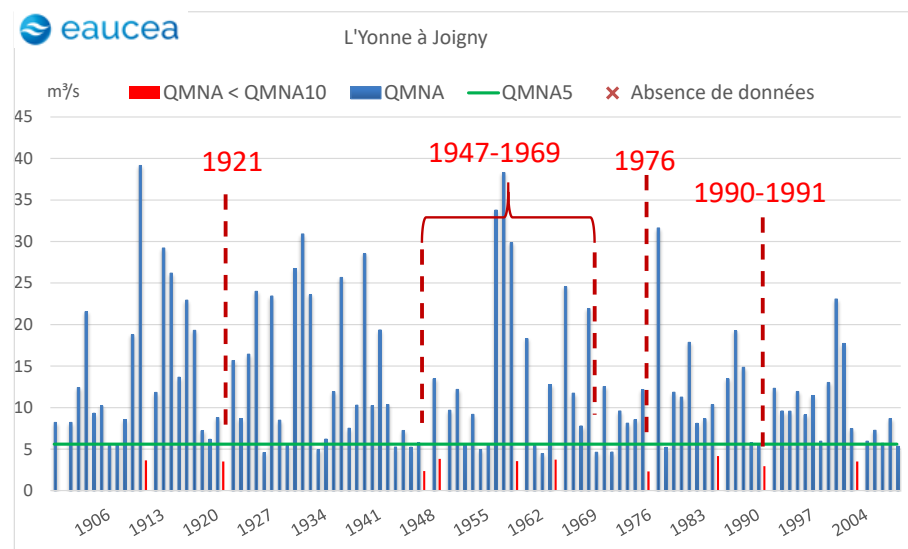
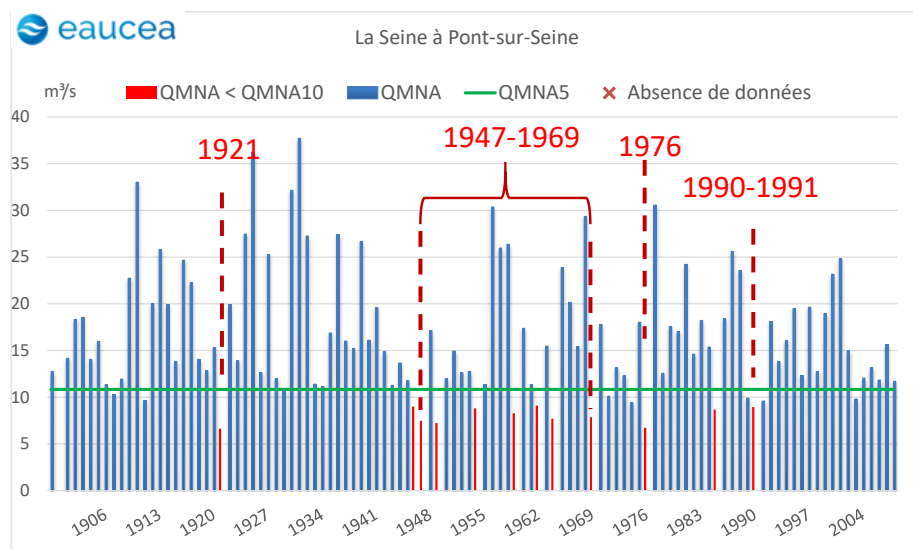


Figure 40 : Analyse des QMNA sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUI-FR)

3.2.3 Les VNC10

Les VNC10 correspondent, pour chaque année au débit minimum sur 10 jours consécutifs de chaque année. L'analyse de ces VCN10 sur la chronique des débits naturalisés à Paris Austerlitz montre :

- des périodes avec des tendances variables semblant globalement présenter une certaine baisse au sens où par exemple, le nombre de VCN10 supérieurs à une valeur de 100 m³/s est plus important avant 1950 qu'après (9 valeurs contre 5 valeurs) ;
- des années 1921, 1949, 1976 et 1990-91 présentant les valeurs les plus basses avec 52 m³/s en 1921 ;
- un plancher minimal autour des 50 m³/s.

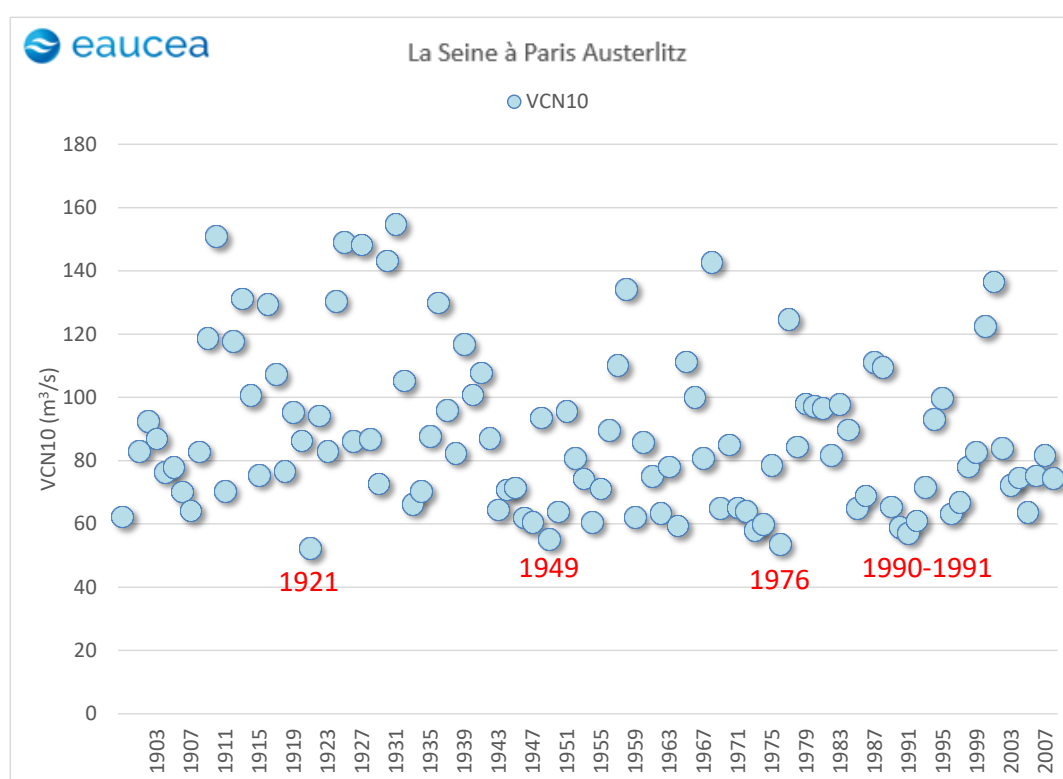


Figure 41 : Les VCN10 de la Seine à Paris Austerlitz (données AQUI-FR)

Cette même analyse portée sur les parties aval des principaux cours d'eau montre (cf. figure 42) :

- une tendance variables selon les périodes et semblant présenter une certaine baisse globale sur l'ensemble des principaux cours d'eau ;
- des années 1921, 1949, 1976 et 1990-91 présentant les valeurs les plus basses ;
- un plancher minimum correspondant globalement aux valeurs des étiages cités précédemment.

Cette analyse confirme les étiages sévères identifiés au paragraphe précédent, la tendance globale, de bassin de l'observation des phénomènes hydrologiques mais aussi une **tendance à la diminution des débits d'étiages « naturalisés » sur l'ensemble des cours d'eau du bassin depuis le début des années 1900.**

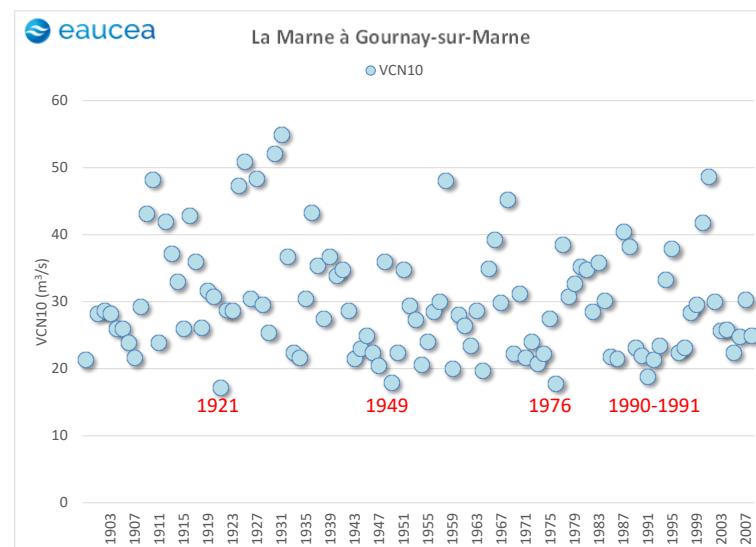
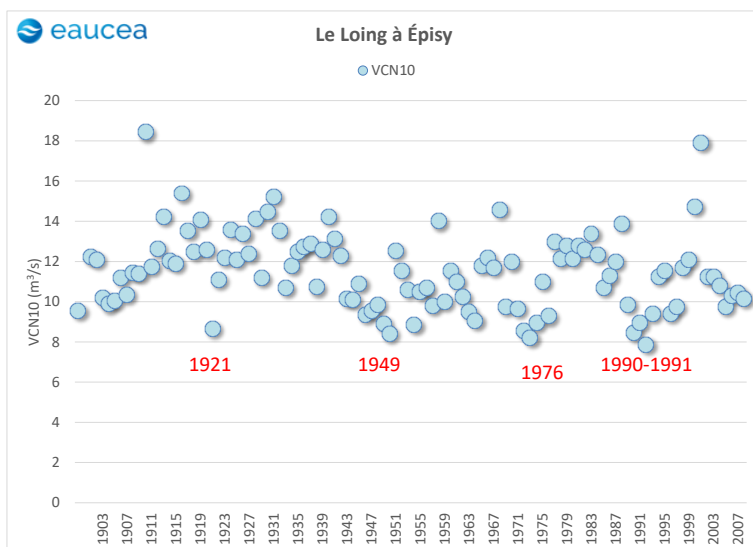
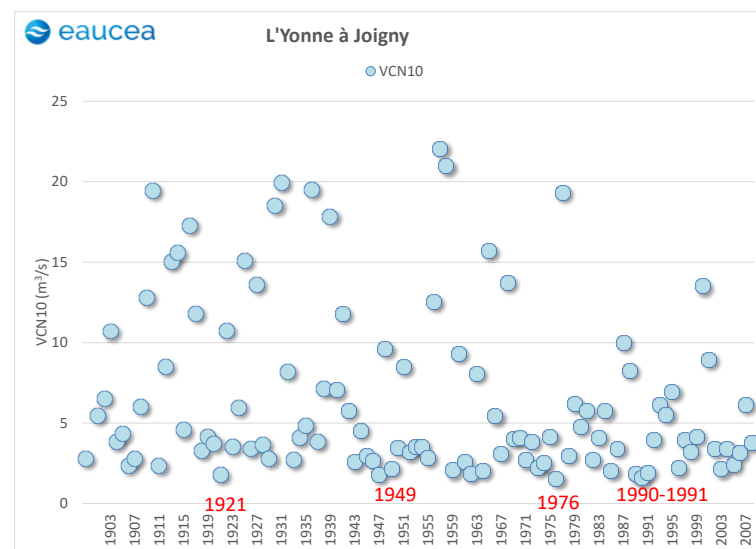
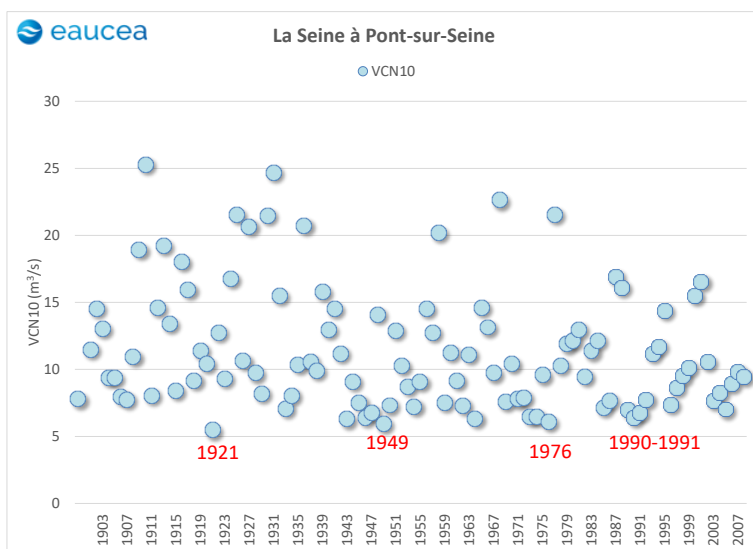


Figure 42 : Analyse des VCN10 sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUI-FR)

3.2.4 Les déficits

3.2.4.1 Les déficits annuels

En comparaison des QMNA, les déficits peuvent aussi être analysés. Il s'agit du volume manquant pour la tenue d'un objectif défini (**cf. figure 43**).

Ici cet objectif a arbitrairement été choisi comme égal au QMNA5 (débit minimum moyen mensuel d'une période de retour de 5 ans), seuil réglementaire pour l'évaluation de l'état des masses d'eau.

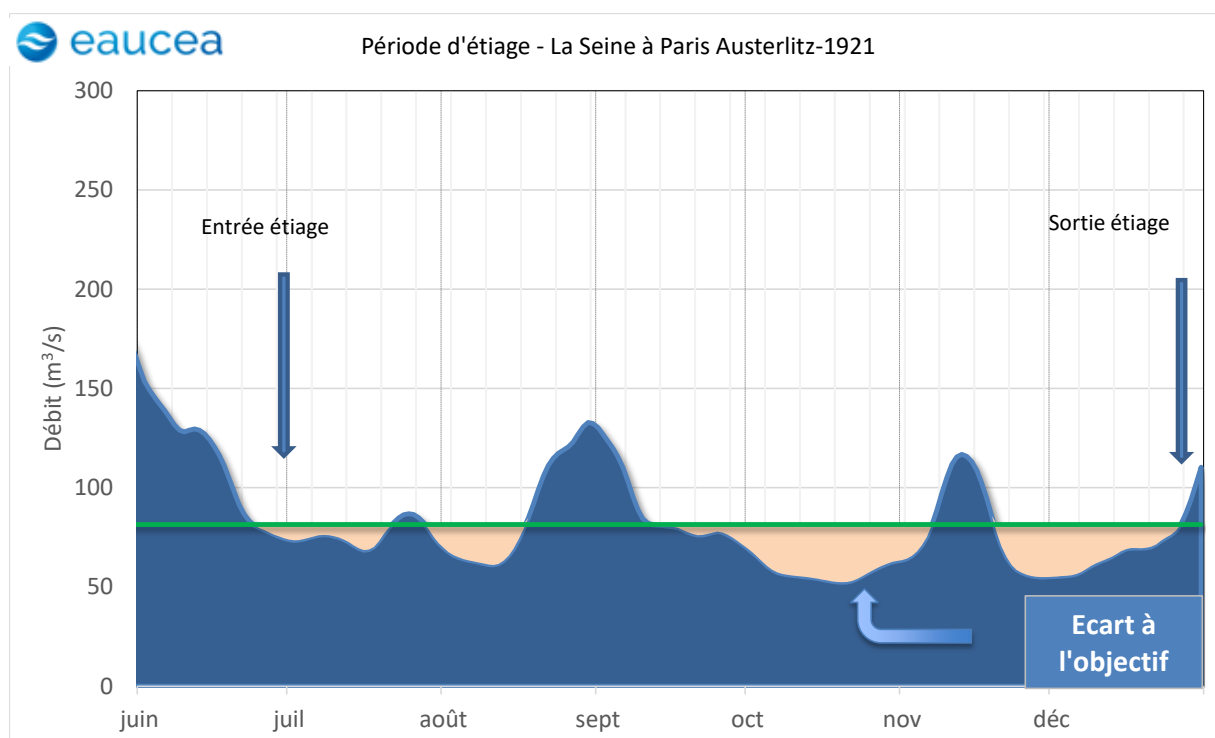


Figure 43 : Analyse de la durée de l'étiage 1921 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR)

L'analyse des déficits au niveau de la station de Paris Austerlitz (**cf. figure 44**) montre :

- un déficit important pour l'année 1921 du même ordre de grandeur que pour l'année 1976 (environ 130 Mm³). Ces deux années présentent ainsi non seulement des QMNA mais aussi des déficits similaires ;
- un déficit maximal atteint en 1949 de 180 Mm³. Malgré un QMNA plus élevé pour l'année 1949 que pour les années 1921 et 1976, le déficit est plus important indiquant des débits instantanés très faibles qui creusent le déficit mais qui sont compensés sur la moyenne mensuelle par des débits plus élevés ;
- des déficits importants en 1990 et 1991 mais du même ordre de grandeur que ceux de 1947, 1959 et 1964 qui présentent des QMNA plus élevés.

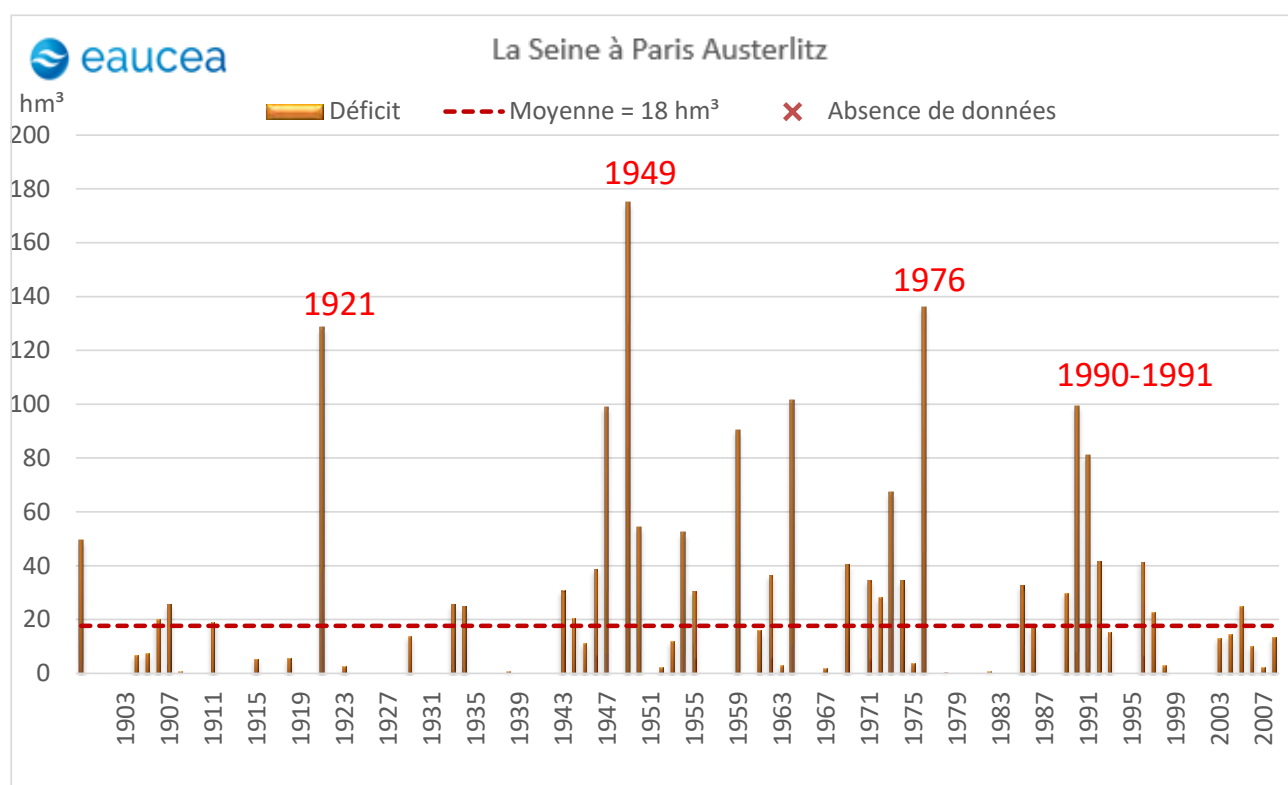


Figure 44 : Analyse des déficits de la Seine à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR)

Cette même analyse portée sur les parties aval des principaux cours d'eau montre (cf. figure 45) :

- des tendances similaires sur la Seine, l'Yonne et la Marne avec un déficit maximal en 1949, des déficits importants en 1921 et 1976 et plus atténués en 1990-1991 ;
- pour le Loing un déficit le plus important pour l'année 1921, du même ordre de grandeur que ceux de 1990 et 1993. Les déficits des années 1949 et 1976 sont plus faibles mais restent élevés.

Cette analyse confirme la tendance observée à partir des QMNA et des VNC10, c'est-à-dire que les étiages correspondent à des étiages de bassin bien que des tendances peuvent apparaître localement.

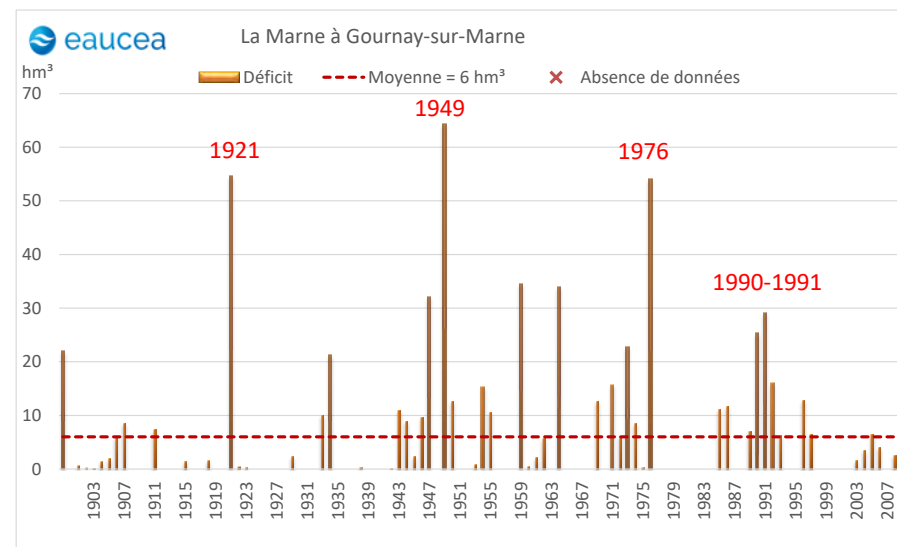
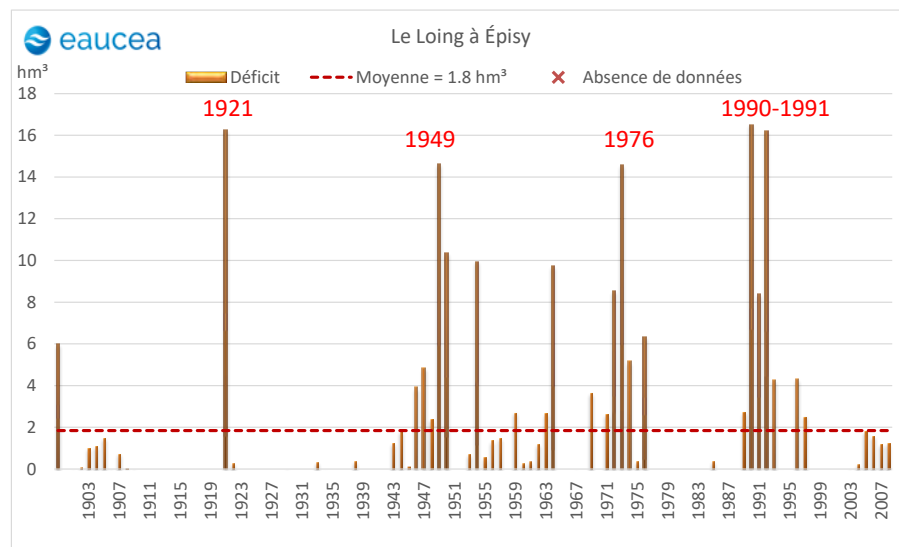
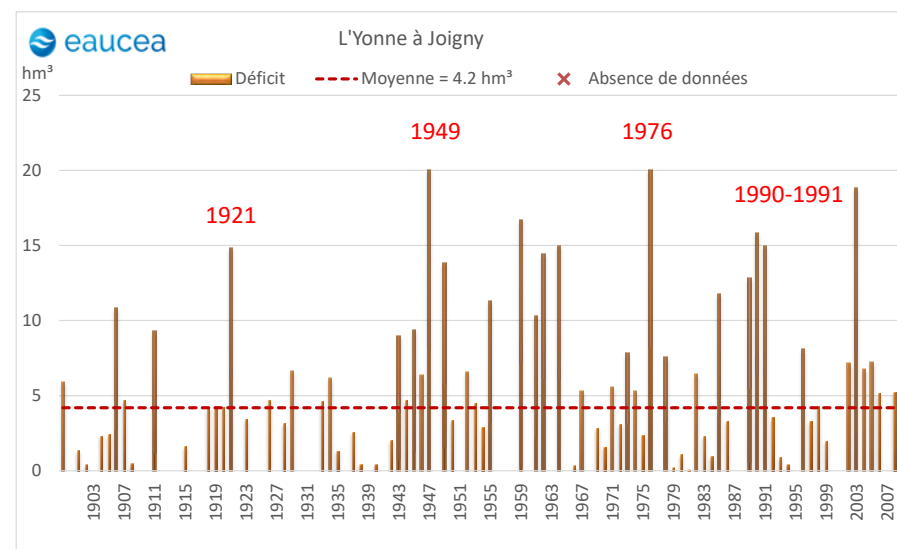
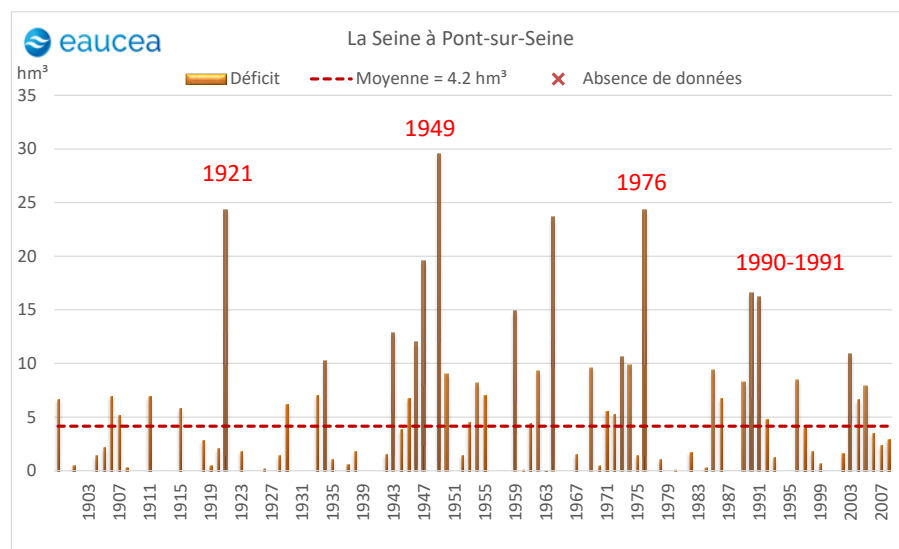


Figure 45 : Analyse des déficits par rapport aux QMNA5 sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUI-FR)

3.2.4.2 Les déficits mensuels

L'analyse mensuelle de la répartition des déficits montre à Paris Austerlitz, un déficit s'exprimant de façon variable selon les années (cf. **figure 46**) avec un maximum généralement atteint septembre (cf. **figure 47**). Les mois d'août et d'octobre viennent ensuite, puis dans une moindre mesure ceux de juillet novembre. A noter que le déficit moyen mensuel interannuel est légèrement plus important en novembre qu'en juillet.

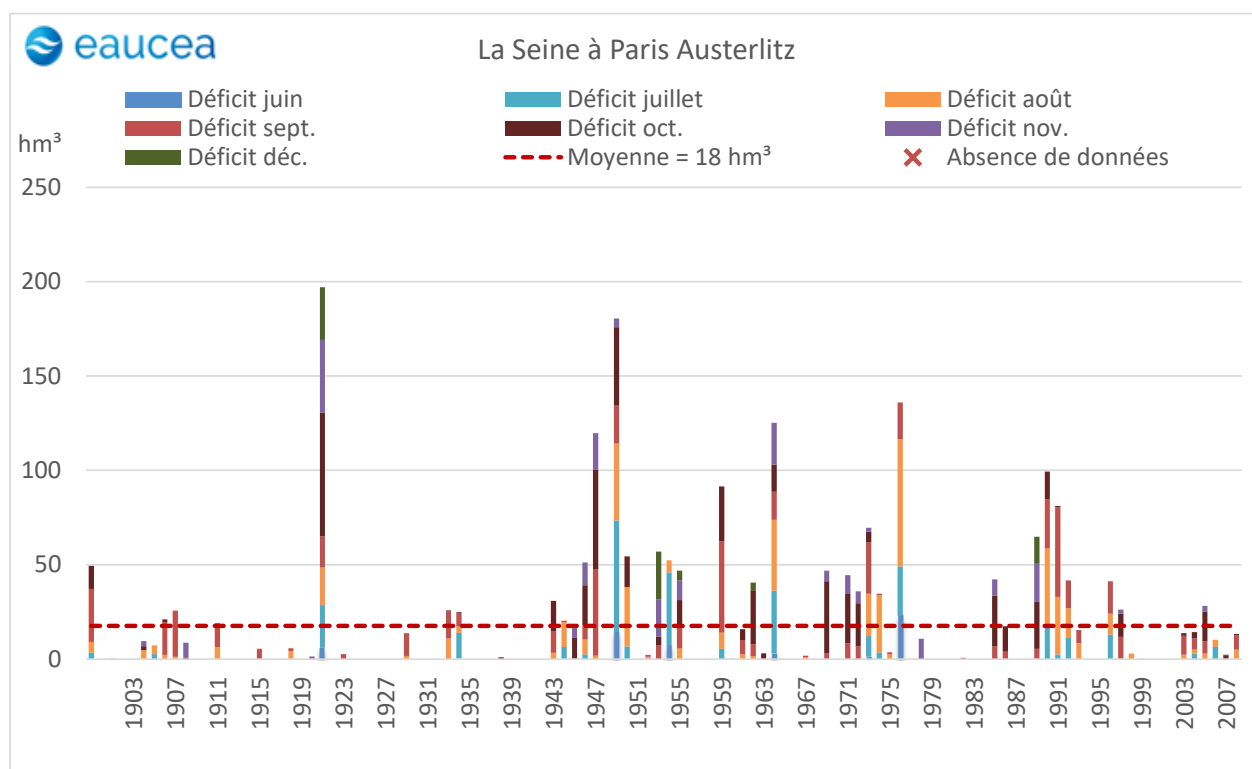


Figure 46 : Analyse des déficits mensuels de la Seine à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR)

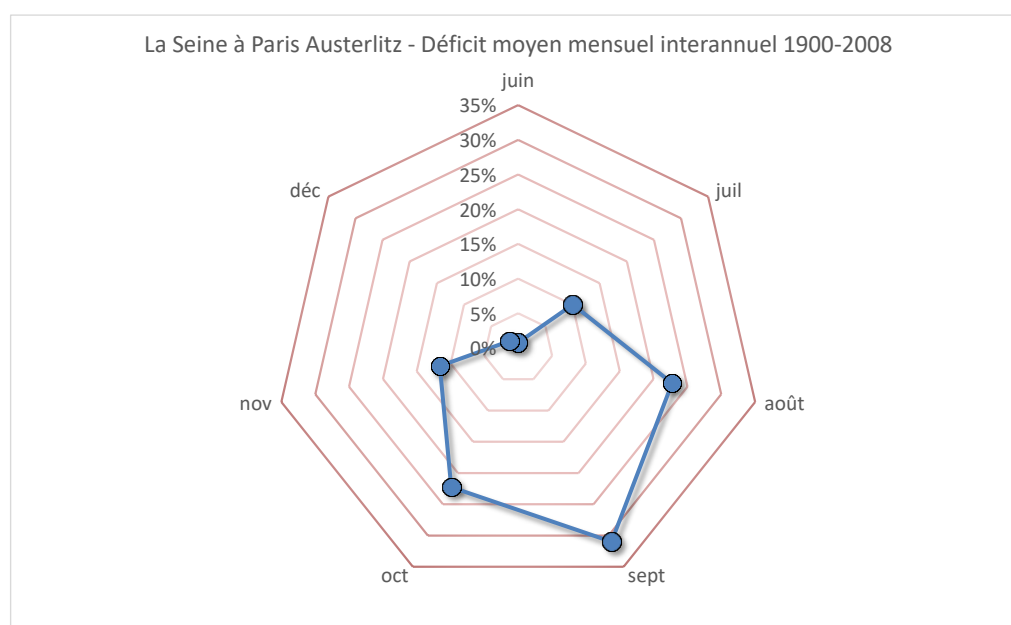


Figure 47 : Analyse des déficits mensuels interannuels de la Seine à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR)

Cette même analyse portée sur les parties aval des principaux cours d'eau montre (**cf. figure 48**) :

- des tendances similaires sur la Seine, et la Marne ;
- un déficit s'exprimant plus tôt dans l'année sur l'Yonne avec des mois d'août et septembre majoritaires ;
- un déficit s'exprimant plus tard dans l'année sur le Loing avec un mois d'octobre majoritaire, suivis des mois de septembre et novembre. Des déficits non négligeables (10 % du déficit moyen mensuel interannuels) s'expriment aussi en décembre.

Cette analyse confirme la tendance observée à l'échelle annuelle, c'est-à-dire que les étiages correspondent à des étiages de bassin bien que des tendances peuvent apparaître localement. A noter que pour certains étiages des déficits tardifs peuvent avoir lieu.

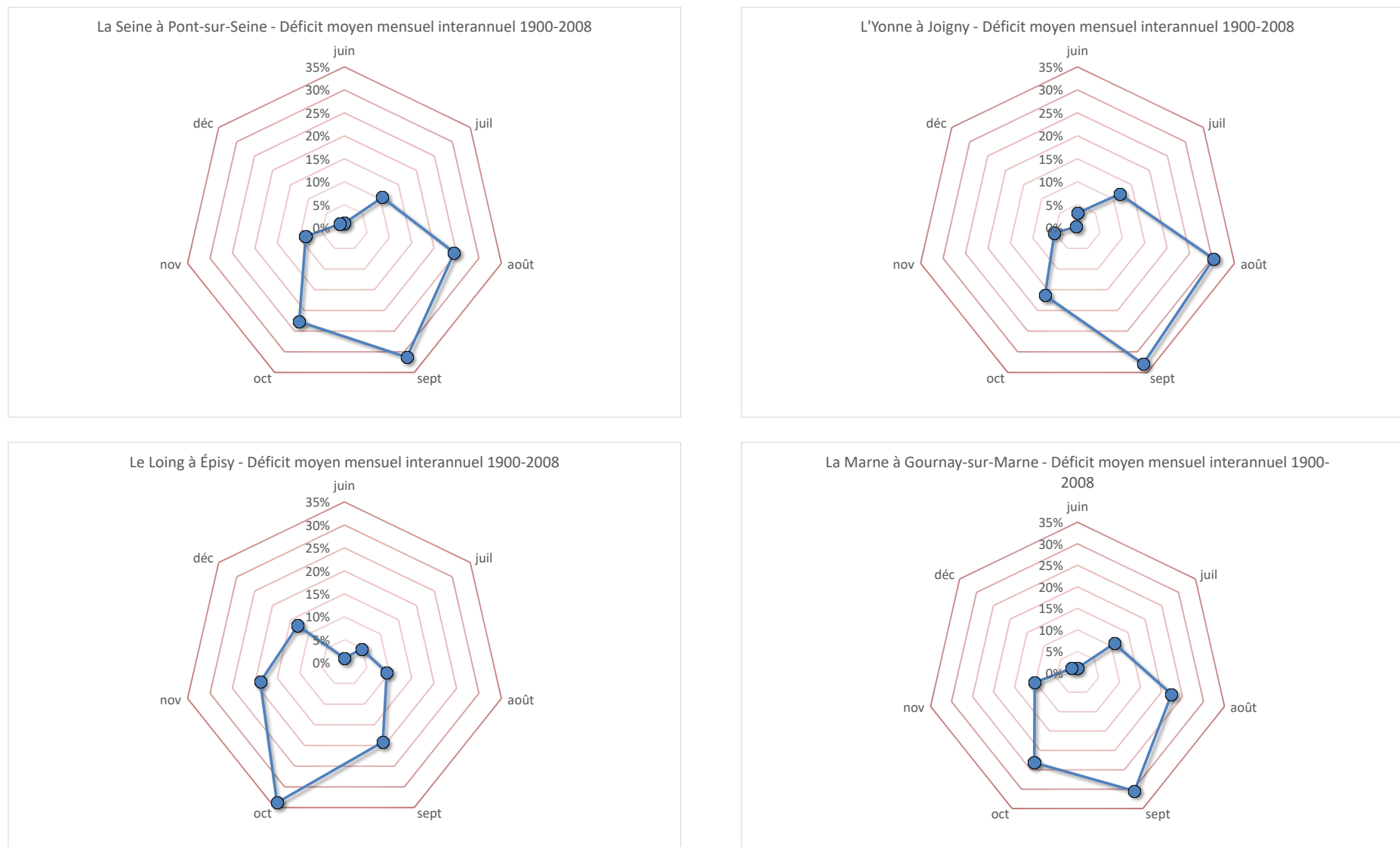


Figure 48 : Analyse des déficits mensuels interannuels par rapport aux QMNA5 sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUI-FR)

3.2.5 La durée des étiages

Un autre indicateur global correspondant à la durée des étiages peut aussi être analysé. **Il s'agit de la durée sous laquelle le débit reste inférieur à un seuil déterminé sans remontée durable (cf. figure 43).** Ainsi les événements ponctuels orageux entraînant des hausses temporaires ne permettent pas une sortie d'étiage.

Pour cette analyse, le seuil d'entrée et de sortie pris en compte correspond arbitrairement au QMNA5.

Concernant la station la plus en aval de la Seine, à Paris Austerlitz, l'analyse de la durée des étiages montre (cf. figure 49) :

- pour l'année 1921, l'étiage le plus long de la série de donnée s'étendant (cf. figure 43) de fin juin à fin décembre soit sur près de 7 mois ;
- des étiages plus ou moins longs pour la série 1947-1969 et s'étendant de fin juin à fin décembre ;
- un étiage 1976 précoce (à partir de la mi-juin) et relativement peu étendu (jusqu'à mi-septembre) comparativement à d'autres étiages sévères ;
- des étiages 1990-1991 présentant des durées relativement courtes comprises entre fin juillet et fin octobre.

Ainsi, l'intensité de l'étiage n'est pas forcément corrélée avec sa durée. Les étiages les plus intenses de 1949 et 1976 ne sont pas, de loin, les plus longs. L'étiage de 1921 cependant est quant à lui long mais aussi intense.

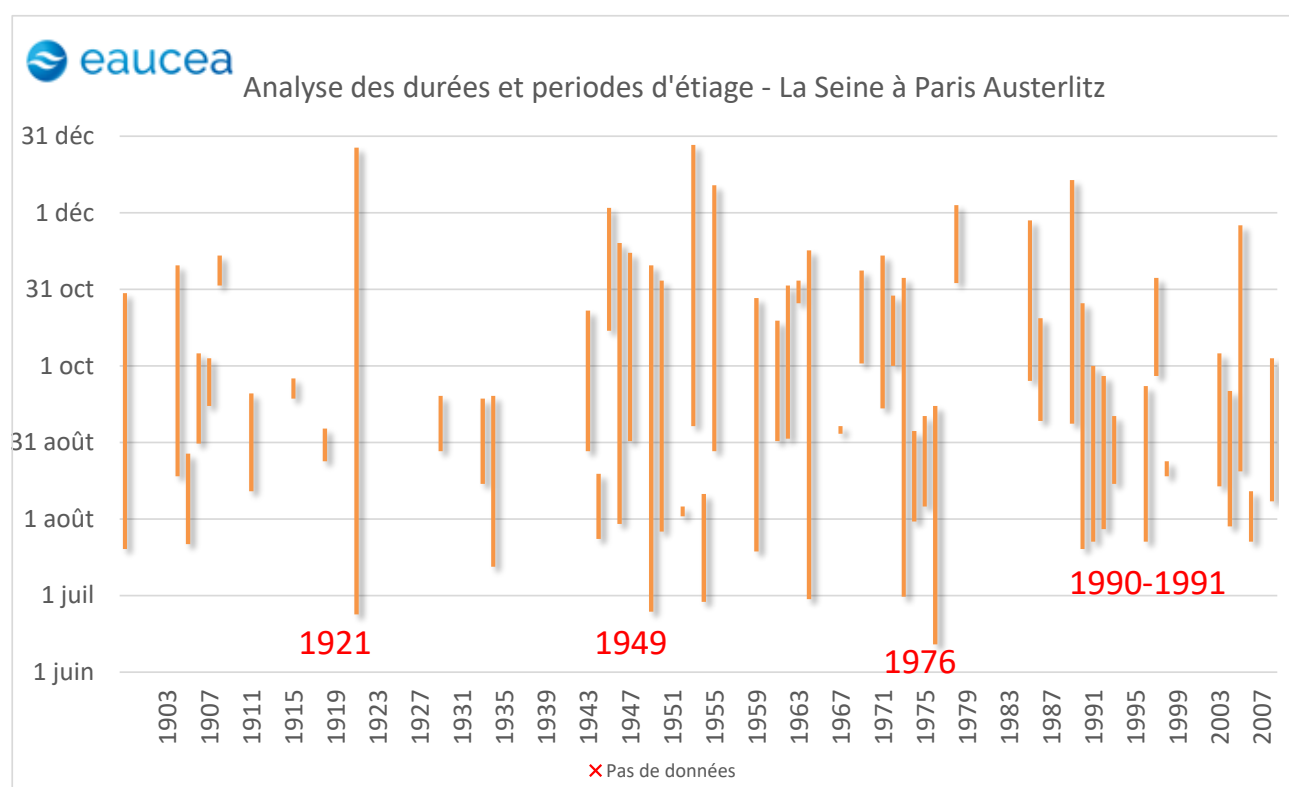


Figure 49 : Analyse de la durée des étiages de la Seine à Paris Austerlitz (données AQUI-FR)

Cette même analyse portée sur les parties aval des principaux cours d'eau montre (cf. figure 45) :

- pour l'ensemble des cours d'eau une année 1921 présentant l'étiage le plus long ;
- des durées et des dates d'étiage plus ou moins longs pour la série 1947-1969 et s'étendant de début juin à fin décembre ;
- une année 1976 avec un étiage précoce et plus ou moins long selon les cours d'eau ;
- des étiages 1990-1991 relativement courts et plus ou moins précoces selon les cours d'eau.

Ces observations corroborent les précédentes sur les étiages de bassin avec toutefois des particularités locales.

Ainsi, et en accord avec les membres du COTECH (comité technique), **les 3 étiages retenus correspondent aux années 1921 (étiage intense et long), 1976 (étiage précoce, court et intense) et 1991 (étiage intense, court et récent). L'année 1949 et période 1947-1969 restent cependant elles aussi remarquables et seront détaillées dans la suite du document.**

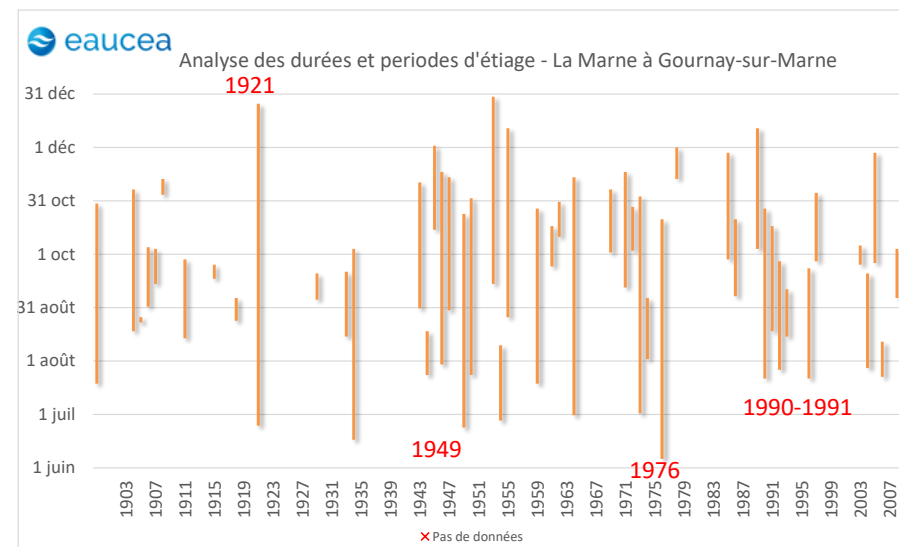
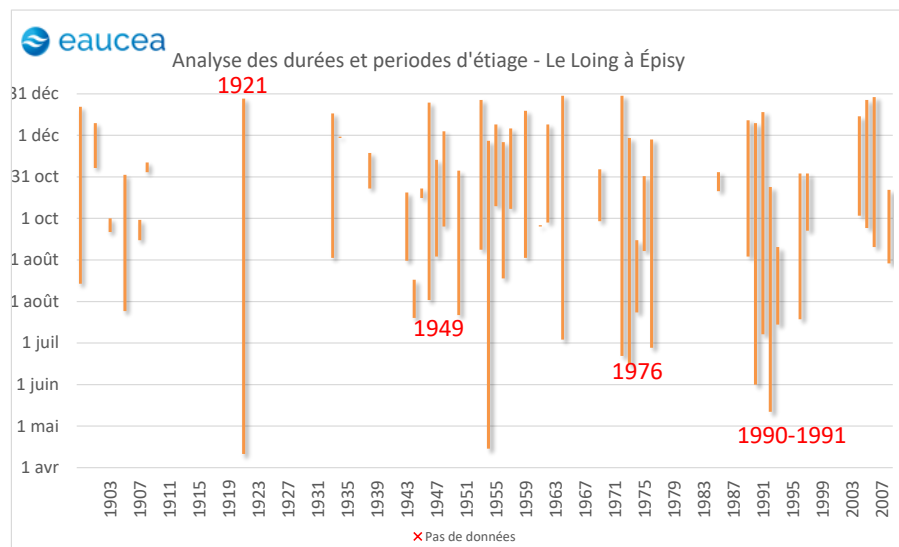
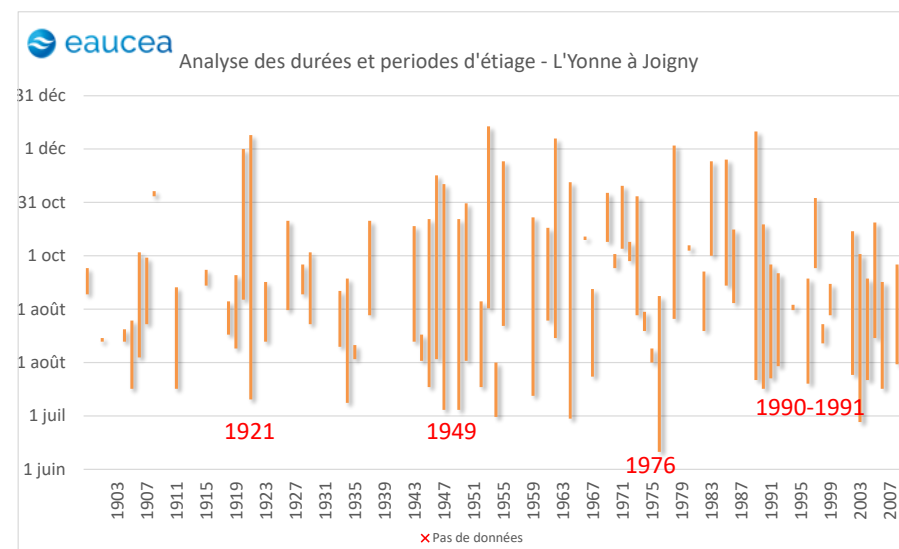
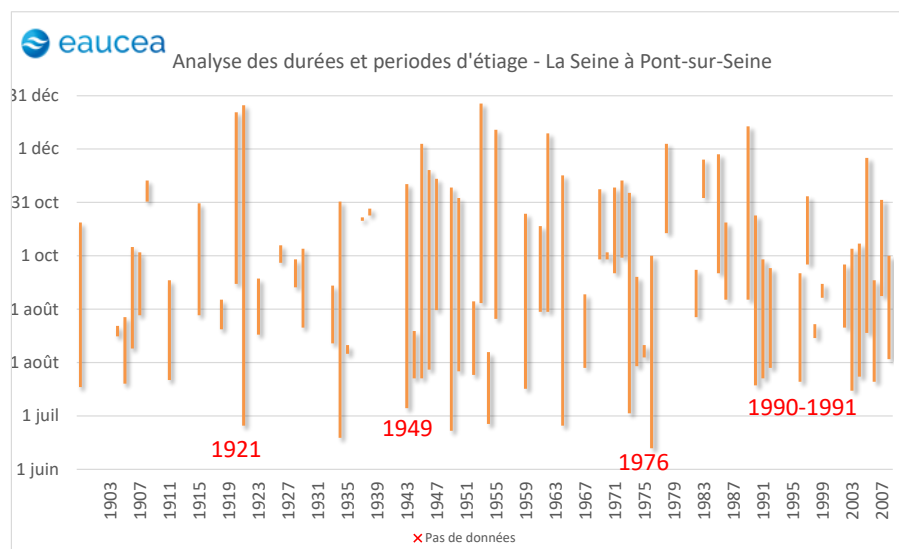


Tableau 4 : Analyse des durées des étiages par rapport aux QMNA5 sur les parties aval des principaux cours d'eau (données AQUI-FR)

3.2.6 Les périodes de retour des étiages et tableau de synthèse

Sur la base des indicateurs de VCN10, les périodes de retour ont été calculées à partir de la loi de Galton. Il s'agit d'une loi de probabilité fréquemment utilisée en hydrologie pour l'analyse des temps de retour de différents événements. Les incertitudes sont qualifiées par une méthode de rééchantillonnage des VCN10 en analysant les quantiles 5% et 95% obtenus.

Ainsi, pour les étiages retenus (cf. figure 50) :

- l'étiage de 1921 présente un VCN10 de temps de retour d'environ 28 ans (entre 20 et 46 ans);
- l'étiage de 1949, un VCN10 de temps de retour d'environ 23 ans (entre 17 et 36 ans) ;
- l'étiage de 1976, un VCN10 de temps de retour d'environ 18 ans (entre 14 et 27 ans) ;
- l'étiage de 1991, un VCN10 de temps de retour d'environ 15 ans (entre 11 et 21 ans).

A noter que dans des gammes de périodes de retours les étiages, ceux retenus correspondent aux années présentant les VCN10 observés les plus faibles.

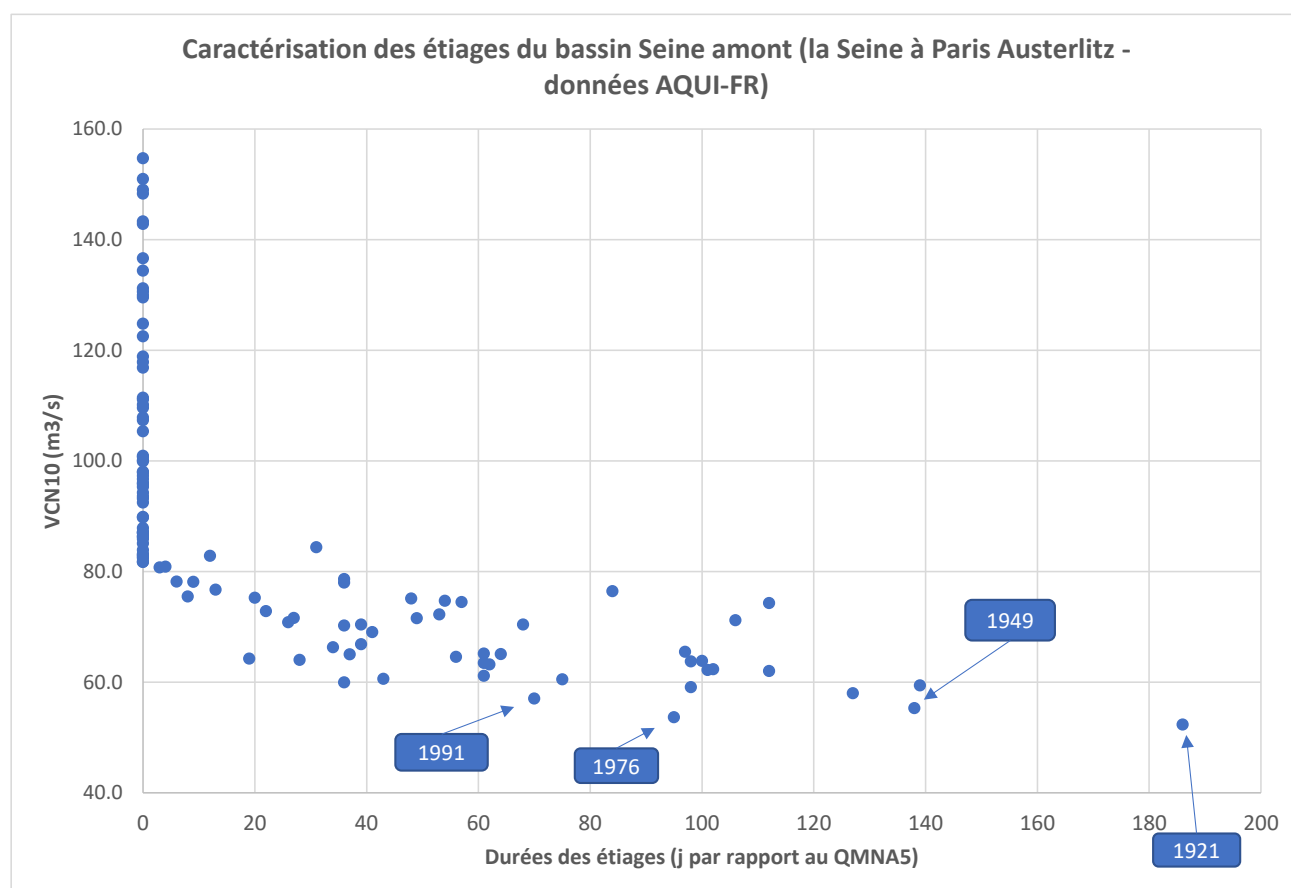


Figure 50 : Distribution des étiages à Paris Austerlitz (données AQUI-FR)

La synthèse des indicateurs précédemment présentés pour ces 4 étiages est présentée dans le Tableau 5 ci-dessous

Etiage	VCN10 (m3/s)	Période retour [intervalle de confiance] (années)	QMNA (m3/s)	Déficit / QMNA5 (hm3)	Durée de l'étiage (jours)
1921	52.3	28 [20;44]	57.0	128.4	186.0
1949	55.3	23 [17;35]	59.4	174.9	138.0
1976	53.7	19 [14;27]	56.4	136.0	95.0
1991	57.1	15 [11;21]	65.0	81.2	70.0

Tableau 5 : Synthèse des indicateurs d'étiages à Paris Austerlitz (données AQUI-FR – extrait du rapport de phase 1)

La fréquence de retour est calculée sur le VCN10 qui mesure l'intensité de l'étiage, sachant que les valeurs mensuelles du QMNA apportent une information complémentaire fréquemment utilisée ; la durée de l'étiage a été évaluée par convention en regard du franchissement durable du QMNA5. Avec ce critère, 1921 et 1949 sont aussi les deux étiages les plus longs de la chronique.

3.3 Analyse statistique des étiages historiques

3.3.1 L'étiage de 1921

Comme vu au paragraphe 3.2.4.2, l'étiage de 1921 correspond à un étiage particulièrement long et commence dès le 20 juin (par rapport à une référence correspondant au QMNA5), pour se finir fin décembre (cf. **figure 43** rappelée en **figure 51** ci-dessous).

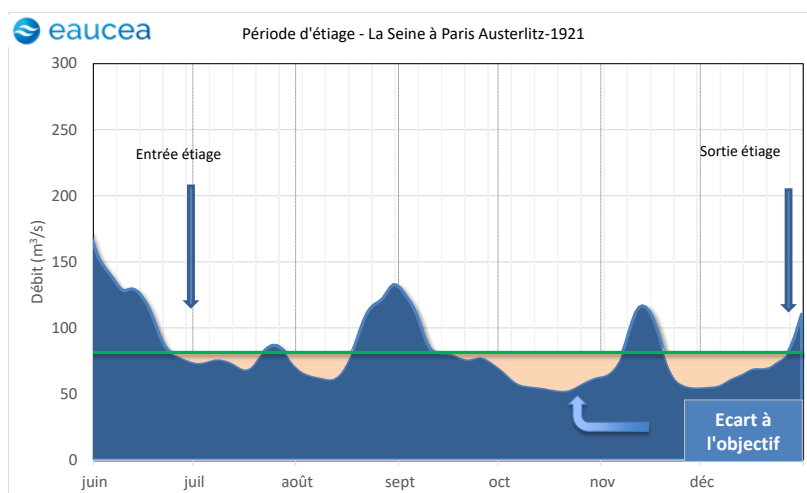


Figure 51 : Analyse de la durée de l'étiage 1921 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR)

En 1921, les débits simulés du début d'année présentaient des valeurs très basses de l'ordre du décennal sec en janvier et février puis au niveau des records secs jusqu'à la fin de l'année (cf. **figure 52**) malgré des courtes périodes de remontées ponctuelles autour de la mi-mai, de fin août et de début novembre. Il s'agit ainsi d'un étiage particulièrement exceptionnel comme en témoignent les indicateurs présentés dans les paragraphes précédents.

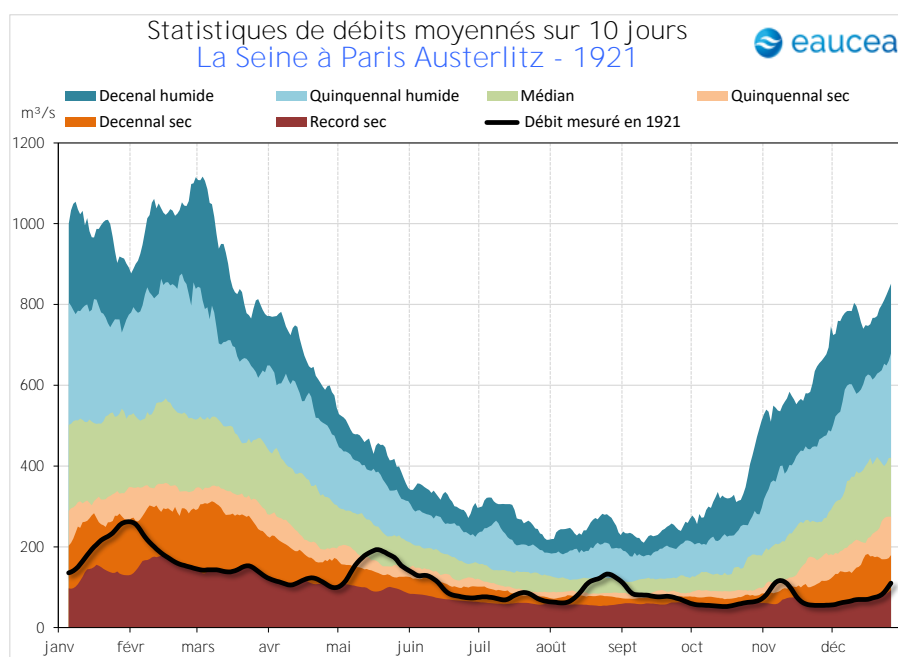


Figure 52 : Comparaison des débits de l'année 1921 à Paris Austerlitz aux références statiques de la période 1900-2008 (données AQUI-FR)

3.3.2 L'étiage de 1949

L'étiage de 1949 est lui aussi assez long avec des débits sous le QMNA5 à partir du 25 juin et jusqu'au 10 novembre (cf. figure 53).

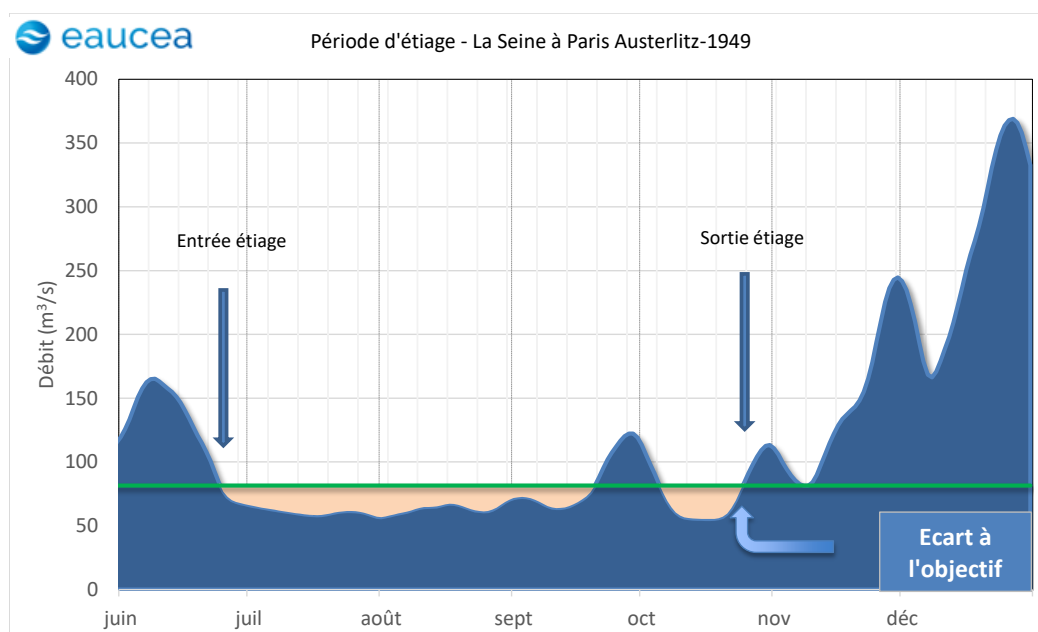


Figure 53 : Analyse de la durée de l'étiage 1949 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR)

Le début d'année présente des débits bas, de l'ordre du quinquennal au décennal sec avec une diminution progressive jusqu'aux records secs dès mi-avril et des débits qui ne commencent à remonter qu'à partir de mi-septembre (cf. figure 54). A l'inverse de 1921 aucune remontée n'est simulée entre mi-juin et mi-septembre, période pour laquelle les débits restent au niveau du record sec, d'où un déficit très marqué (cf. paragraphe 3.2.4).

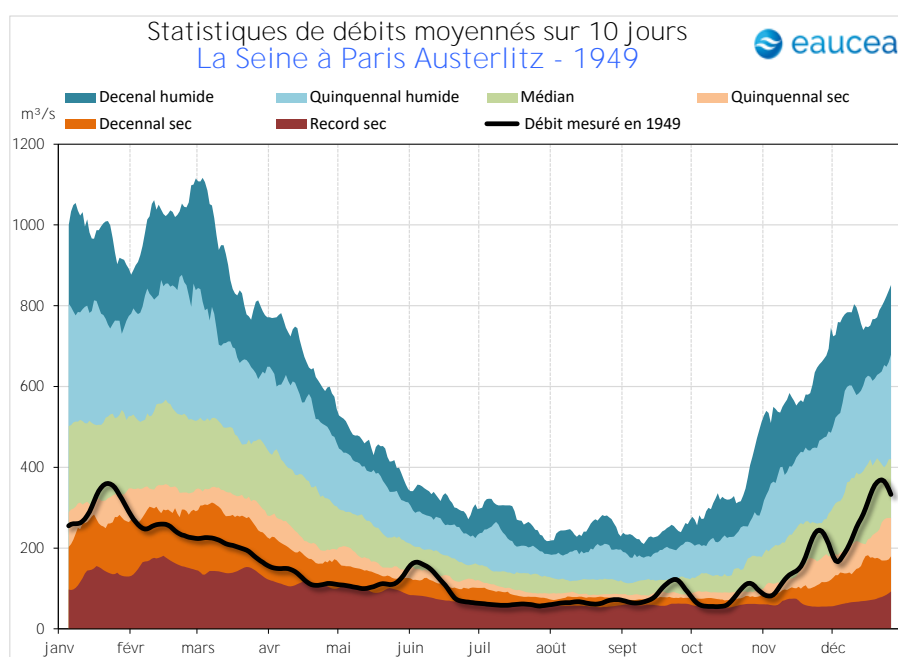


Figure 54 : Comparaison des débits de l'année 1949 à Paris Austerlitz aux références statiques de la période 1900-2008 (données AQUI-FR)

3.3.3 L'étiage de 1976

Concernant l'année 1976, il s'agit d'un étiage précoce avec une entrée en étiage dès le 9 juin et une sortie au 15 septembre (cf. figure 55).

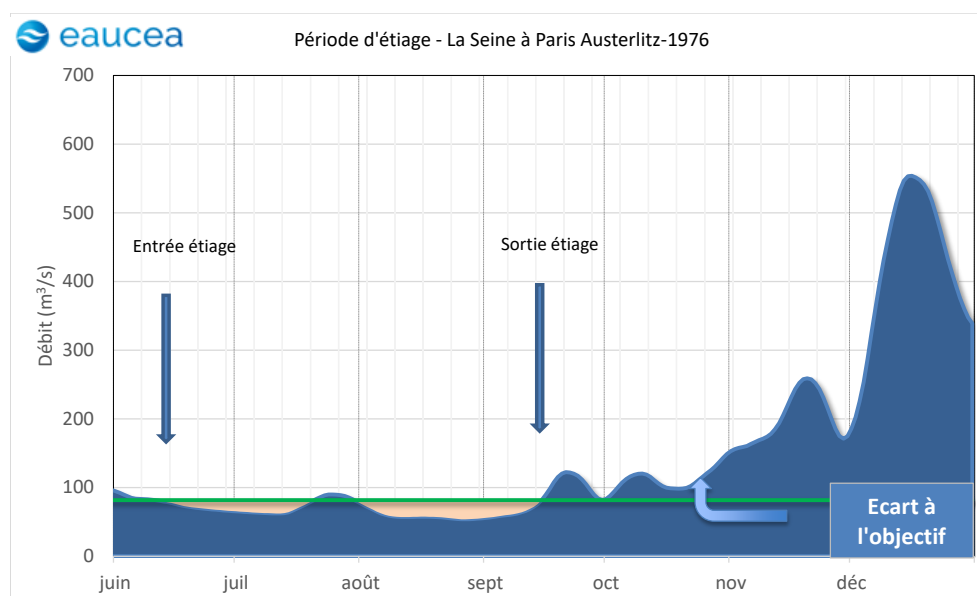


Figure 55 : Analyse de la durée de l'étiage 1976 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR)

Le début de l'année 1921 présente des débits médians qui diminuent ensuite pour atteindre dès mi-mars des débits de l'ordre du décennal sec puis du record sec à partir de début mai. De début mai jusqu'à fin septembre, seule une légère remontée est simulée autour de la mi-juillet, limitant ainsi quelque peu le déficit estival (cf. figure 56).

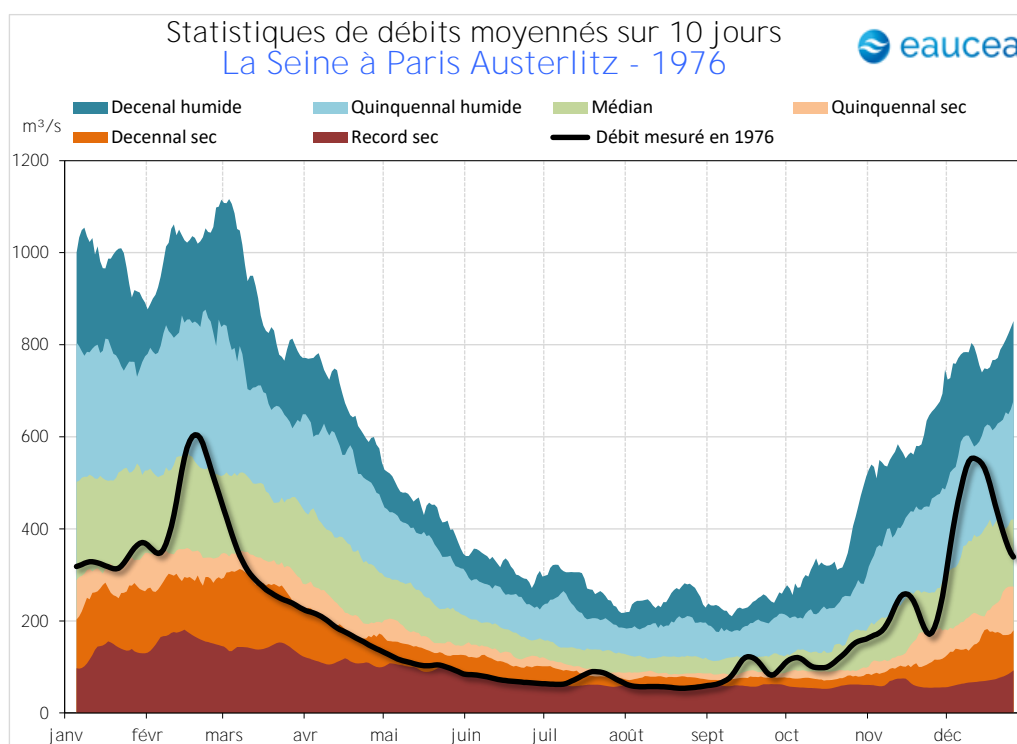


Figure 56 : Comparaison des débits de l'année 1976 à Paris Austerlitz aux références statiques de la période 1900-2008 (données AQUI-FR)

3.3.4 L'étiage de 1991

L'année 1991 présente un étiage court, avec des débits sous le QMNA5 du 19 août au 1^{er} octobre (cf. figure 57).

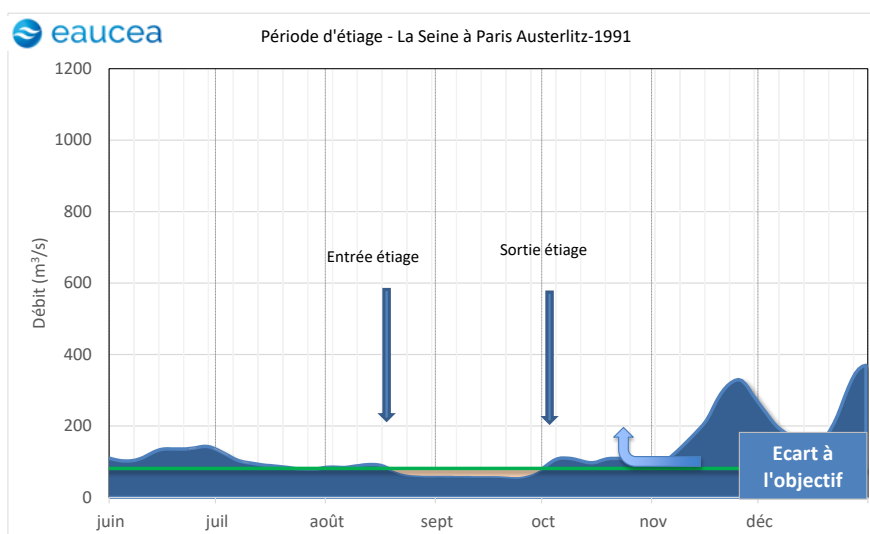


Figure 57 : Analyse de la durée de l'étiage 1991 à Paris Austerlitz (référence du QMNA5 - données AQUI-FR)

Cette année-là, les débits d'hivers étaient particulièrement élevés (cf. figure 58) atteignant des valeurs décennales humides en janvier. Ils diminuent ensuite fortement jusqu'à l'étiage pour atteindre progressivement le décennal sec puis les records secs de mi-août à mi-septembre. A l'inverse des autres étiages présentés dans les paragraphes précédents, cet étiage récent avait bénéficié d'une bonne recharge hivernale d'où une entrée en étiage relativement tardive malgré l'atteinte à partir de mi-août de valeurs minimales basses d'où les VNC10 mesurées (cf. paragraphe 3.2.3). Le déficit est cependant moindre que les autres années exceptionnelles (cf. paragraphe 3.2.4) du fait d'une durée à des bas débits plus courte.

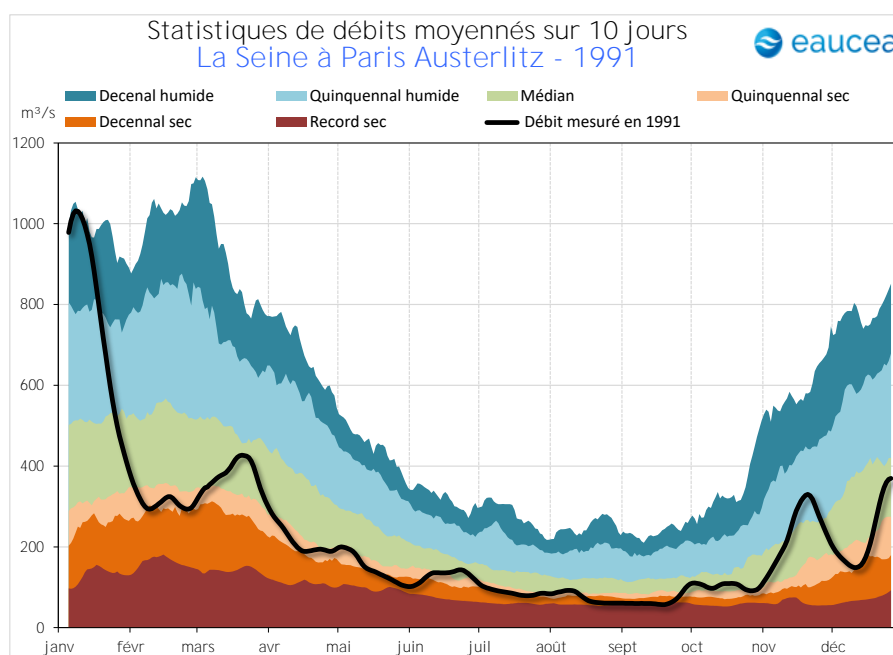


Figure 58 : Comparaison des débits de l'année 1991 à Paris Austerlitz aux références statiques de la période 1900-2008 (données AQUI-FR)

3.4 Relations nappe-rivière et dynamique de mise en place des étiages historiques

3.4.1.1 Périmètre concerné

La partie amont du périmètre de l'EPTB concernée par la reconstitution du modèle AQUI-FR présente des QMNA5 spécifiques anormalement faibles (**cf. figure 16**) au vu de la pluviométrie estivale et des caractéristiques géologiques des formations présentes. Ces débits spécifiques faibles s'expliquent notamment par une absence de couverture hydrogéologique du modèle MODCOU / EauDyssée dans ce secteur (**cf. paragraphe 2.3.2**).

Ainsi, nous nous intéresserons plus spécifiquement dans ce paragraphe aux relations nappes/rivières issues des données AQUI-FR dans la partie centrale du périmètre de l'EPTB, c'est-à-dire la nappe de la craie qui correspond au principal stock d'eau souterrain du secteur (**cf. paragraphe 3.1.4**).

3.4.1.2 Analyse des données piézométriques

Les données de sortie du modèle AQUI-FR comprennent non seulement des données hydrologiques au niveau des principales stations (dont l'analyse est détaillée dans les paragraphes précédents), mais aussi de nombreuses données piézométriques. Concernant l'aquifère de la craie, 8 ouvrages disposent d'une reconstitution des niveaux de nappe (**cf. figure 59**). L'analyse des données de ces ouvrages montre (**cf. figure 60**) :

- des grands cycles globalement similaires entre tous les ouvrages avec :
 - une période de niveaux bas de 1900 à 1909,
 - une période de niveaux élevés de 1910 à 1942 avec deux sous-périodes très basses en 1922 et 1935,
 - une période de niveaux bas avec 3 sous-périodes très basses en 1951, 1965 et 1974,
 - une période de niveaux modérés avec une sous-période basse en 1993 et une tendance à la baisse à partir de 2005,
- des amplitudes de variations variables selon les ouvrages comprises entre 4 et 40 m.

Ainsi, les données du piézomètre 02982X0013/S1 ont été retenues comme représentatives de l'ensemble des données simulées pour la nappe de la craie du fait :

- de sa localisation centrale ;
- de ces amplitudes de variations intermédiaires (maximum de 25,4 m).

L'analyse plus fine des données de cet ouvrage montre (**cf. figure 61**) :

- des niveaux bas entre juin et septembre ;
- des niveaux hauts entre octobre et janvier

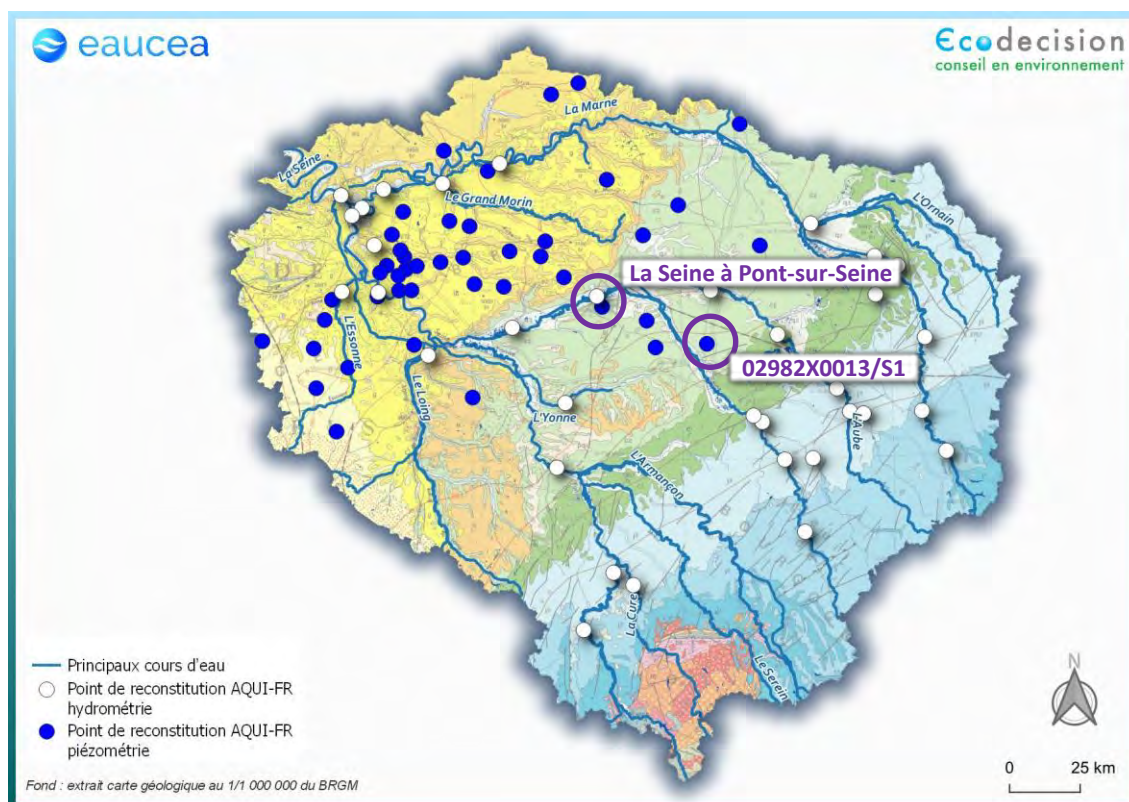


Figure 59 : Sélection des points de reconstitution du modèle AQUI-FR pour l'analyse des relation nappe-rivière de la Seine (données AQUI-FR)

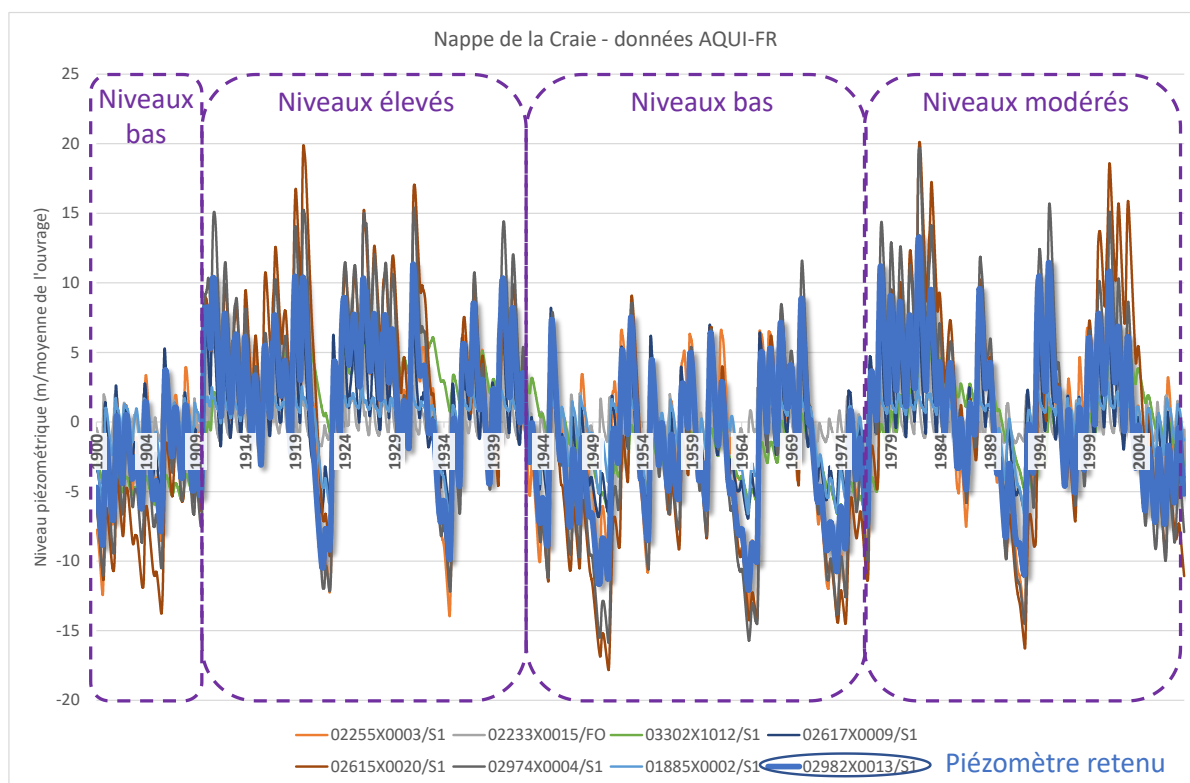


Figure 60 : Analyse des données des ouvrages de la nappe de la craie (données AQUI-FR)

Niveaux moyens mensuels interannuels

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Année
Minimum	110.87	110.49	110.03	109.58	109.17	108.91	108.37	107.95	107.93	108.29	109.09	110.18	107.93
Moyenne	122.25	121.57	120.67	119.69	118.72	117.87	117.45	117.83	119.07	120.71	122.05	122.56	120.03
Maximum	131.67	130.78	129.64	128.17	127.26	126.12	127.03	129.57	132.73	133.29	133.32	133.02	133.32
Amplitude maximale	20.80	20.29	19.61	18.59	18.09	17.21	18.66	21.62	24.80	25.00	24.23	22.84	25.39

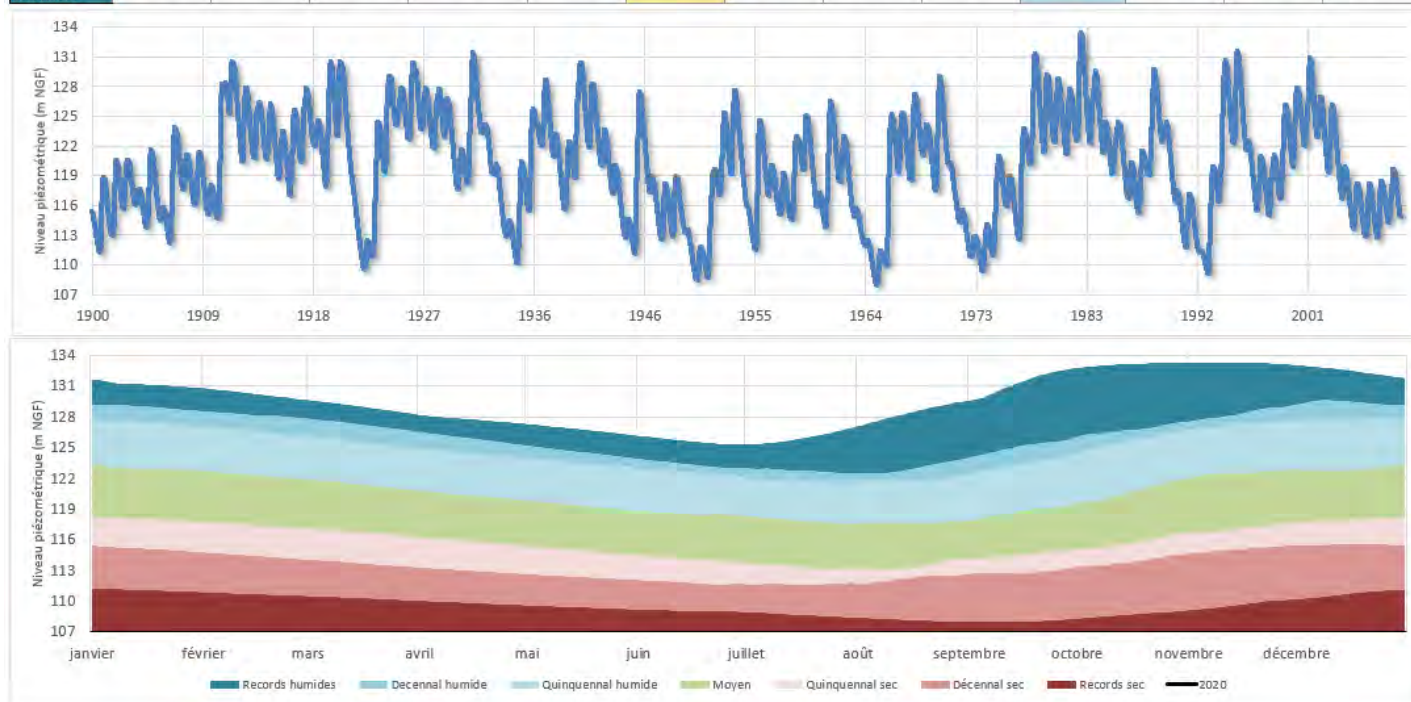


Figure 61 : Synthèse des données du piézomètre 02982X0013/S1

Les données de cet ouvrage ont ainsi été comparées aux données simulées de la Seine à Pont-sur-Seine (cf. figure 59). Les résultats obtenus pour la période 1917-1926 (cf. figure 62) mettent en évidence :

- une amplitude des débits importante (éléments de légende en bleu), et sans lien avec les variations du niveau piézométrique de la nappe de la craie. Les forts débits proviennent en effet du ruissellement et des apports des sous-bassins amont peu perméables (zone de socle) ou à circulations souterraines rapides (aquifères karstiques) lors d'évènements pluvieux importants (secteurs de plus fortes pluviométries). Les niveaux piézométriques de la nappe de la craie ne réagissent quant à eux que de manière atténuée et lissée à ces fortes augmentations hivernales. **Ces apports de l'amont correspondent ainsi à la fonction de production du bassin ;**
- une corrélation visuelle entre la recharge hivernale (se traduisant par une forte augmentation des débits) de l'année N-1 et le niveau piézométrique de l'année N (éléments de légende en orange) ;
- une corrélation entre le débit de fin d'étiage et le niveau piézométrique de la nappe de la craie (éléments de légende en vert). Cette relation est d'autant plus vraie que les étiages sont longs (supérieurs à 200 jours). Pour les étiages courts ou bénéficiant d'apports pluviométriques ponctuels durant la période estivale, cette relation n'est plus valable (exemple de l'année 1922). Ainsi, pour les étiages longs, un soutien des débits par l'aquifère de la craie est mis en évidence. **C'est la fonction de capacité du bassin.**

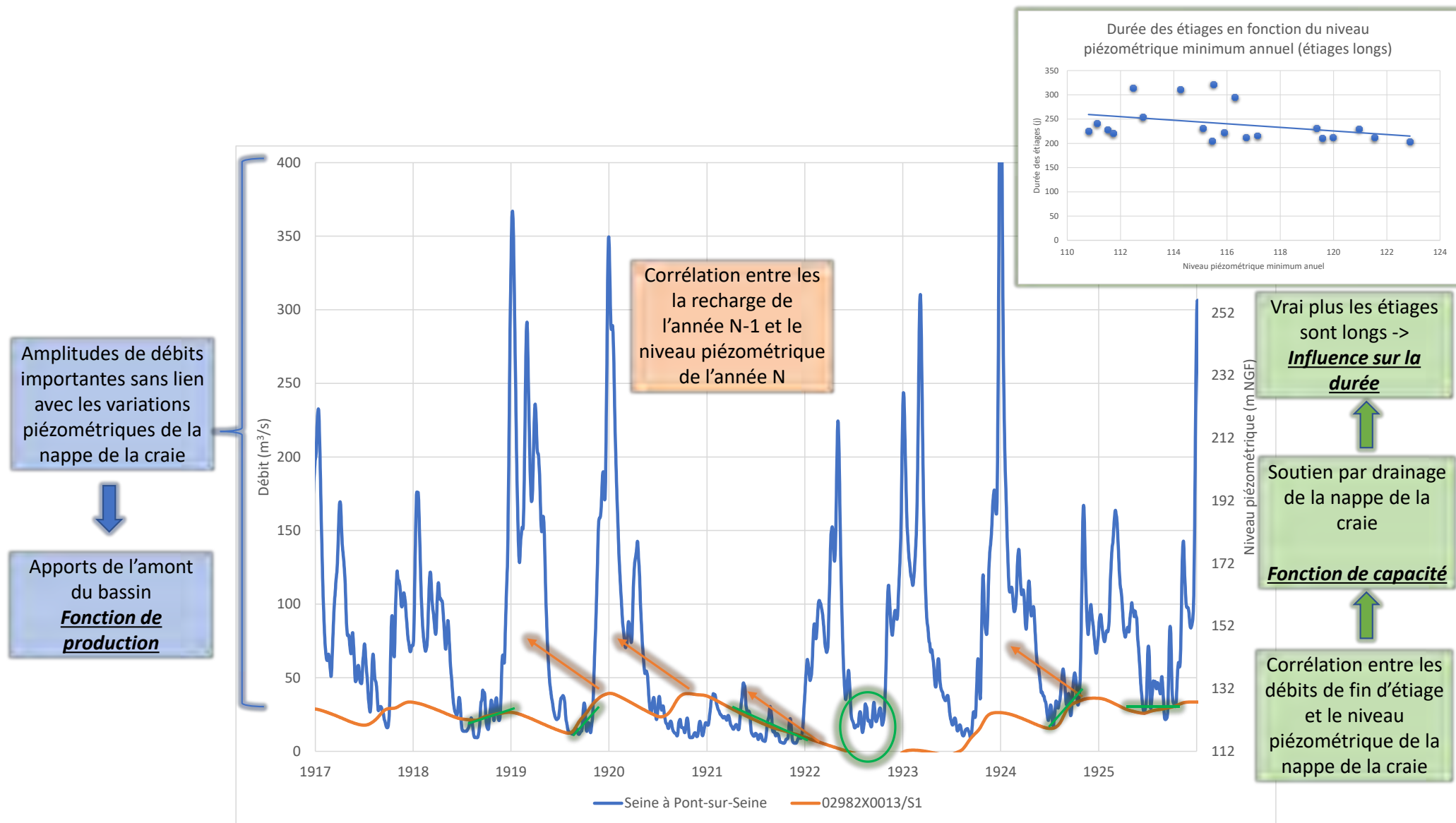


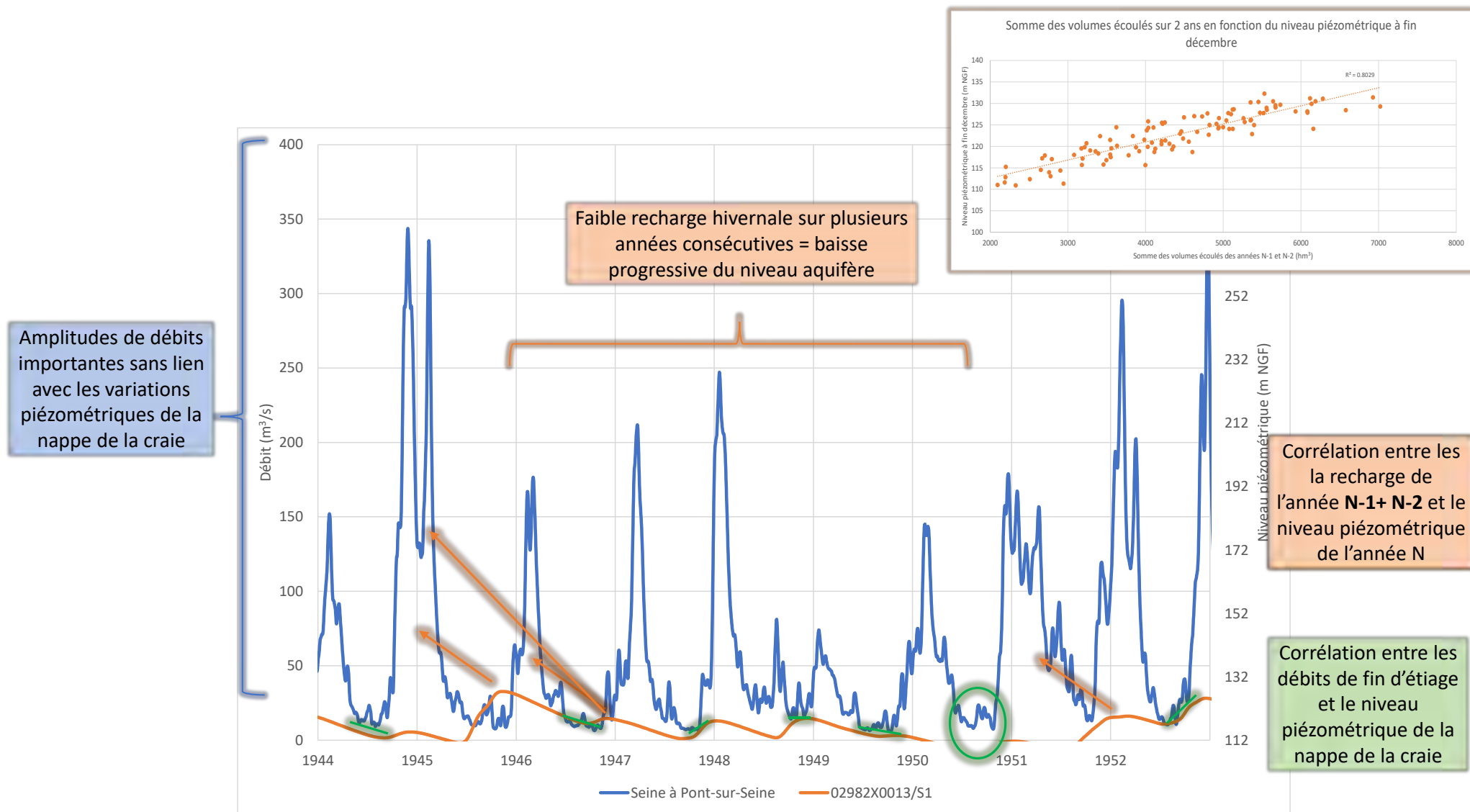
Figure 62 : Analyse des relations nappe/rivière entre la Seine et la nappe de la Craie (période 1917-1926 – données AQUI-FR)

Cette même analyse prolongée dans le temps, par exemple pour la période 1944-1953, montre (cf. **figure 63**) :

- comme pour la période précédente, de fortes amplitudes de débits liées aux précipitations hivernales sans lien apparent avec les niveaux piézométriques de la nappe de la craie (éléments de légende en bleu) ;
- de 1946 à 1951, de faibles recharges hivernales sur plusieurs années consécutives entraînant une baisse progressive des niveaux aquifères (éléments de légende en orange). La corrélation des débits écoulés sur X années et les niveaux piézométriques à fin décembre met en évidence une corrélation la plus forte entre les niveaux piézométriques de fin d'année et les volumes écoulés sur les deux années précédentes. Ainsi le niveau piézométrique en étiage ne dépend pas seulement de la recharge de l'hiver précédent (année N-1), mais aussi de celle de l'année N-2. Cette corrélation diminue ensuite avec l'ajout d'années antérieures.

Ainsi :

- l'étiage de 1921 (cf. **figure 62**) résulte principalement d'une recharge pluviométrique hivernale faible d'où des débits hivernaux faibles et une entrée en étiage précoce. Les niveaux piézométriques restent cependant relativement élevés du fait de recharges importantes les deux hivers précédents. A noter qu'en l'absence de recharge hivernale importante, les années 1922 et 1923 auraient pu présenter des étiages bien plus sévères. En effet, les niveaux piézométriques de la nappe de la craie influencés par la très faible recharge de 1921 étaient alors au plus bas ;
- ce cas de figure est rencontré pour l'étiage 1949 (cf. **figure 63**) qui fait suite à plusieurs années de faibles recharges hivernales ainsi que des débits de début d'année relativement bas entraînant alors un étiage précoce et soutenu par une nappe de la craie présentant des niveaux peu élevés ;
- l'étiage de 1976 (cf. **figure 64**) fait suite quant à lui, comme 1949, à une succession d'années avec de faibles recharges hivernales et une entrée en étiage précoce associée à des niveaux piézométriques bas ;
- en 1991, (cf. **figure 65**) la faible durée de l'étiage ne semble pas indiquer de relations claires avec les niveaux piézométriques de la nappe de la craie. Les niveaux piézométriques à cette période faisaient cependant suite à deux années de faible recharge hivernale.



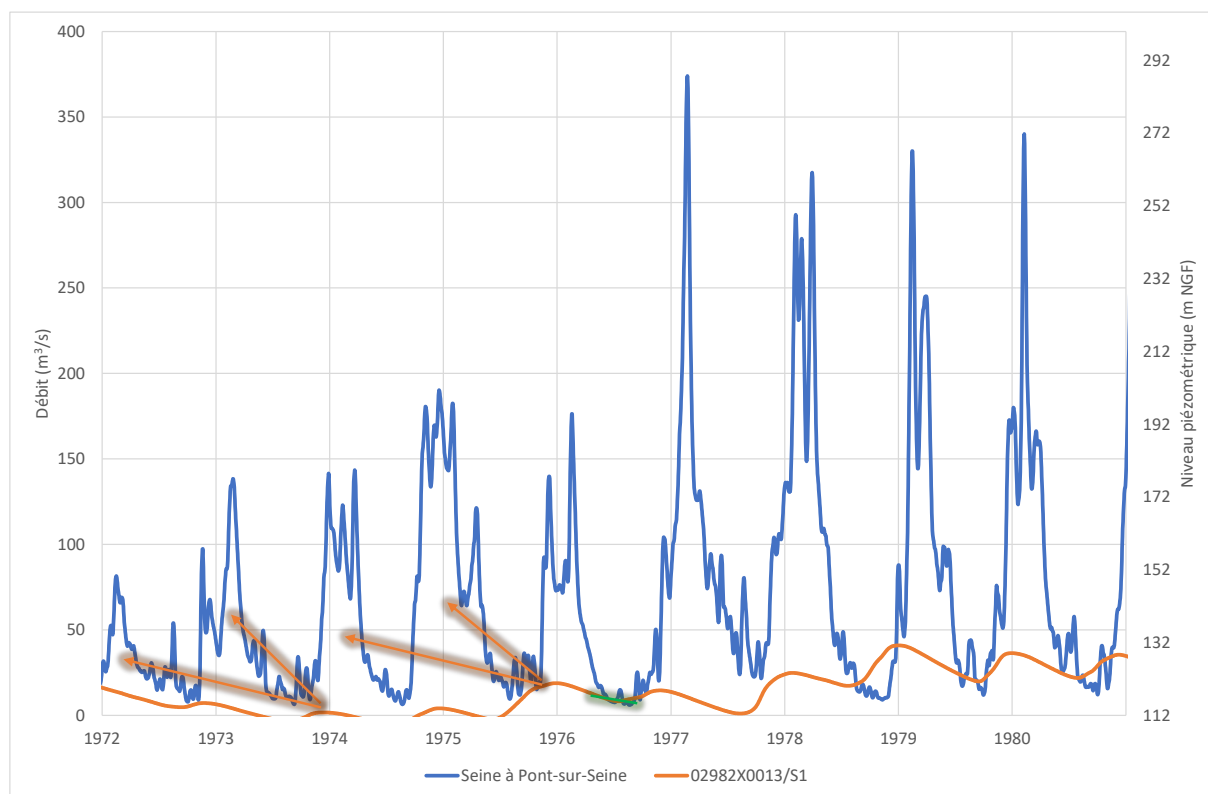


Figure 64 : Analyse des relations nappe/rivière entre la Seine et la nappe de la Craie (période 1972-1981 – données AQUI-FR)

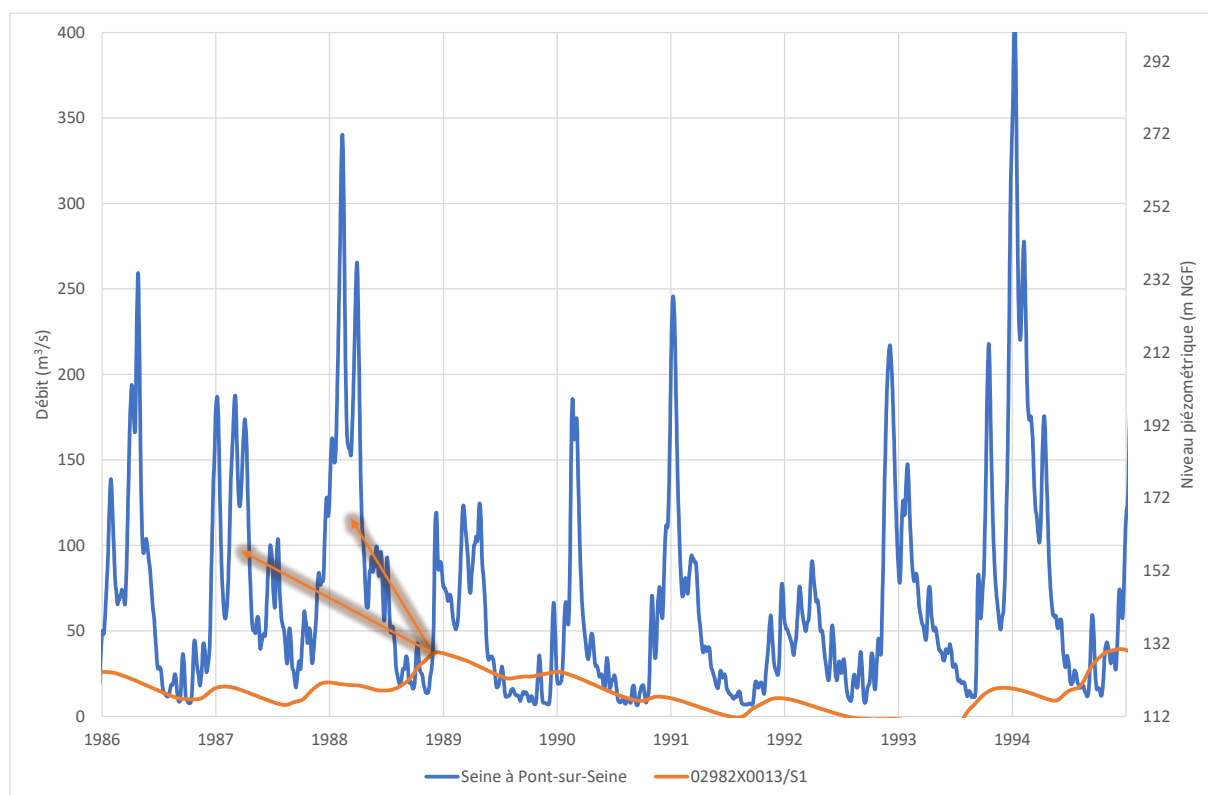


Figure 65 : Analyse des relations nappe/rivière entre la Seine et la nappe de la Craie (période 1986-1995 – données AQUI-FR)

L'analyse des données de ce même piézomètre comparativement aux débits simulés sur les stations de l'Yonne à Joigny et de la Marne à Gournay-sur-Marne (cf. figures 66 à 68) montrent des relations similaires confirmant bien le caractère des étiages « de bassin ».

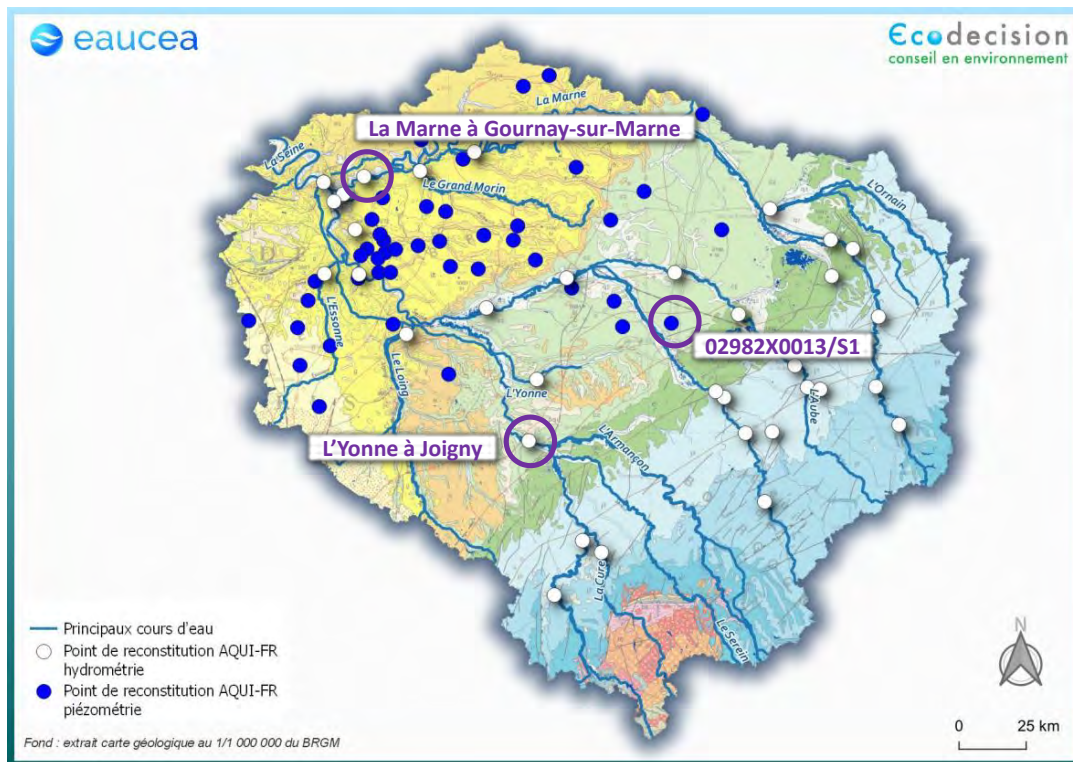


Figure 66 : Sélection des points de reconstitution du modèle AQUI-FR pour l'analyse des relation nappe-rivière de l'Yonne et de la Marne (données AQUI-FR)

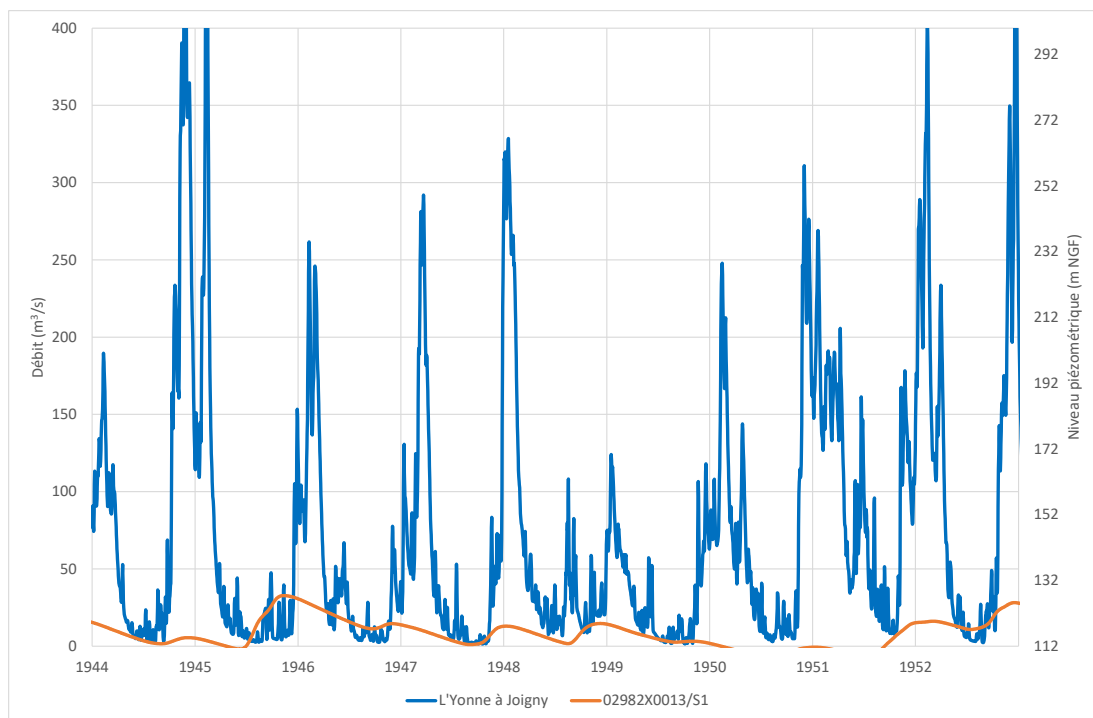


Figure 67 : Analyse des relations nappe/rivière entre l'Yonne et la nappe de la Craie (période 1944-1953 – données AQUI-FR)

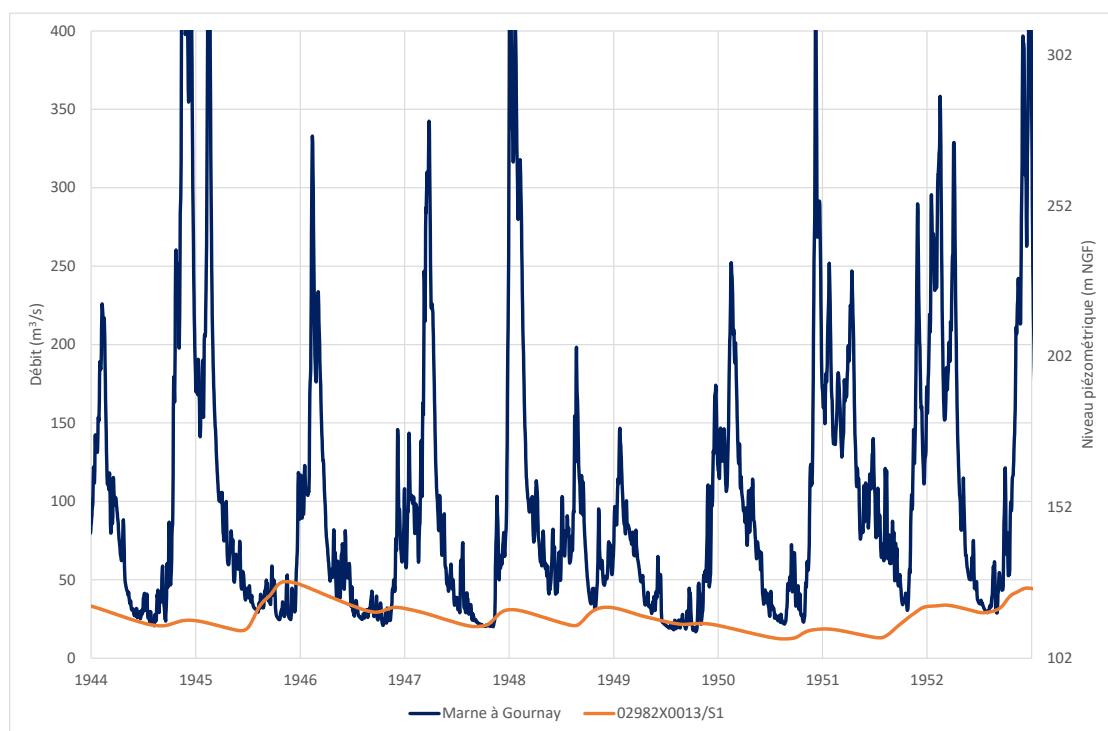


Figure 68 : Analyse des relations nappe/rivière entre la Marne et la nappe de la Craie (période 1944-1953 – données AQUI-FR)

Les observations sont cohérentes avec les analyses réalisées par le PIREN Seine sur la base du modèle MODCOU (fascicule PIREN Seine sur l'hydrogéologie du bassin) (cf. **figure 68**) qui montrent une contribution importante des nappes internes au bassin (Craie, Eocène et Oligocène) au débit global de la Seine à Paris avec un apport minimum de l'ordre de 60 m³/s. A noter que cette valeur correspond aux valeurs de VCN10 minimum à Paris présentées au **paragraphe 3.2.3** montrant ainsi, comme illustré par ailleurs par le PIREN Seine (cf. **figure 69**) un débit d'apport des aquifères et principalement de la nappe de la craie atteignant en étiage près de 100 % du débit naturel reconstitué.

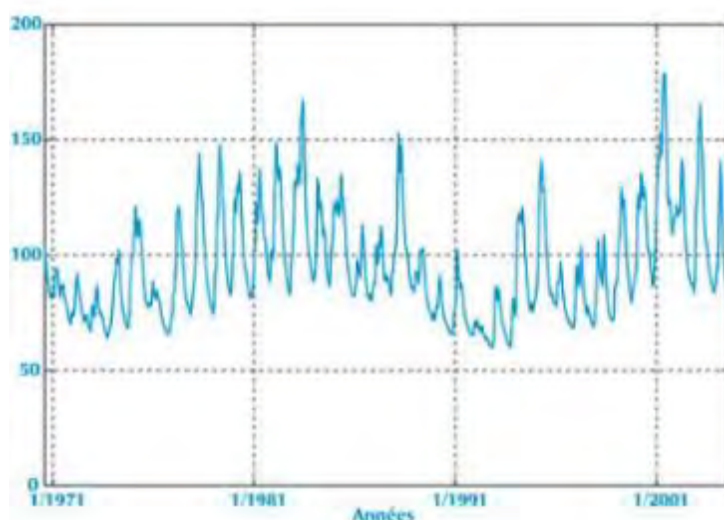


Figure 69 : Evolution temporelle de la contribution des nappes internes du bassin (Craie, Eocène, Oligocène) au débit de la Seine à Paris issue du modèle MODCOU (PIREN Seine)

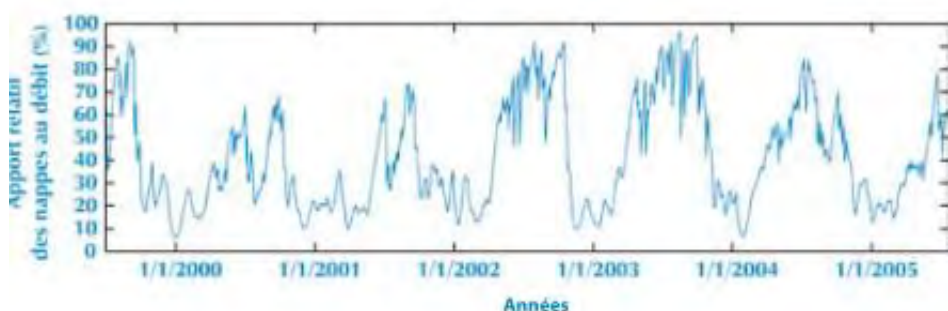


Figure 70 : Apports relatifs des grands aquifères centraux du bassin au débit de la Seine à Paris issu du modèle MODCOU (PIREN Seine)

Ainsi, la dynamique « naturelle » de mise en place des étiages sévères du bassin dépend (cf. figure 71) :

1. des précipitations sur l'amont du bassin (zone productive) ;
2. de la durée de l'étiage ;
3. du niveau piézométrique de la zone centrale correspondant à la nappe de la craie (zone capacitive), qui est lui-même fonction :
 - de la recharge hivernale des années N-1 et N-2 ;
 - de la recharge hivernale des années précédentes.

Les relations nappe/rivière avec la partie plus en aval des aquifères du Tertiaire sont difficilement étudiables du fait notamment de l'influence des parties amont et de la diversité des niveaux aquifères rencontrés dans ces secteurs et ne sont donc pas présentées ici. L'hydrographie de surface semble cependant indiquer :

1. pour l'aquifère multicouche de la Beauce une infiltration prédominante et donc une fonction capacitive (en lien avec les nombreux points de prélèvements agricoles souterrains) ;
2. pour les formations de l'Oligocène et de l'Eocène, un ruissellement majoritaire et donc une fonction préférentielle de production.

A cette dynamique naturelle s'ajoute bien entendu les effets anthropiques (prélèvements, canaux...) détaillés dans la phase 2 de cette étude.

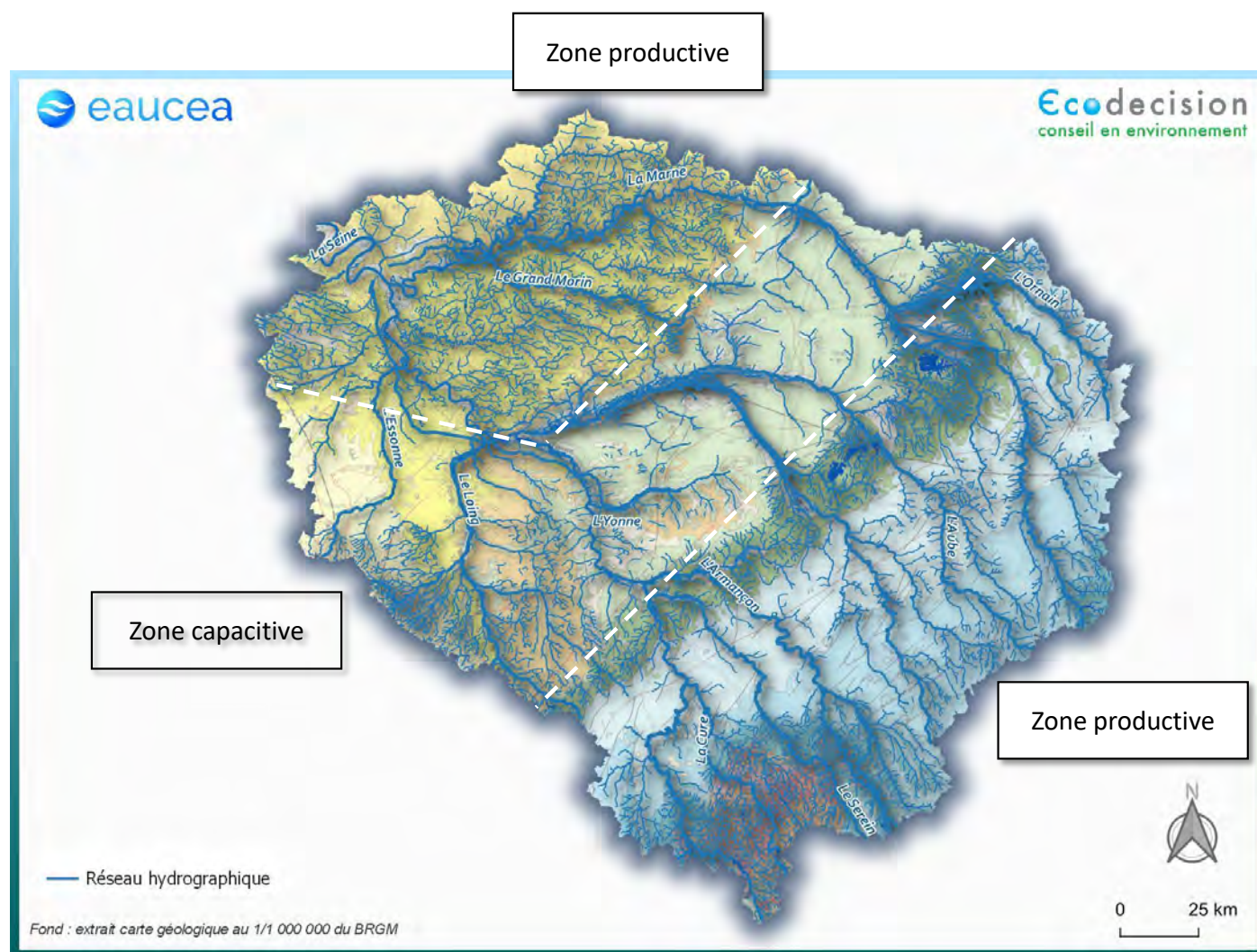


Figure 71 : Bilan des différentes zones productives et capacitives du périmètre de l'EPTB

4 ANALYSE DU PANEL D'ÉVÉNEMENTS D'ÉTIAGE REPRESENTATIFS DU « TEMPS FUTUR » DANS LA PERSPECTIVE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les données hydrologiques mobilisées dans cette étude sont issues des simulations réalisées à l'aide du modèle MODCOU à partir des réanalyses présentées dans le § 2.6. Les données mises à disposition de l'EPTB Seine Grands Lacs sont celles relatives au scénario **RCP8.5**, correspondant à une hypothèse de maintien des émissions de gaz à effet de serre sans atténuation.

4.1 Données climatiques des épisodes de sécheresse

Les caractéristiques climatiques des 4 épisodes de sécheresse future (choisis comme indicateurs de périodes de sécheresse sévère, cf. § 2.6) sélectionnés pour le scénario RCP8.5 sont rappelées ci-dessous (source « *Scénarios sécheresse sur le bassin Seine-Normandie*, Julien Boé, Milka Radojevic, Rémy Bonnet et Gildas Dayon, 2018 »).

La **figure 72** présente le cycle annuel moyen des précipitations (mm/j) en moyenne sur le bassin Seine-Normandie pour chacun des épisodes. L'explication des légendes est la suivante :

- légende « 6 ans » représentant l'épisode considéré sur le graphique ;
- légende « 1961-1990 » représentant Le climat actuel ;
- légende « 2031-2060 » représentant le climat moyen futur.

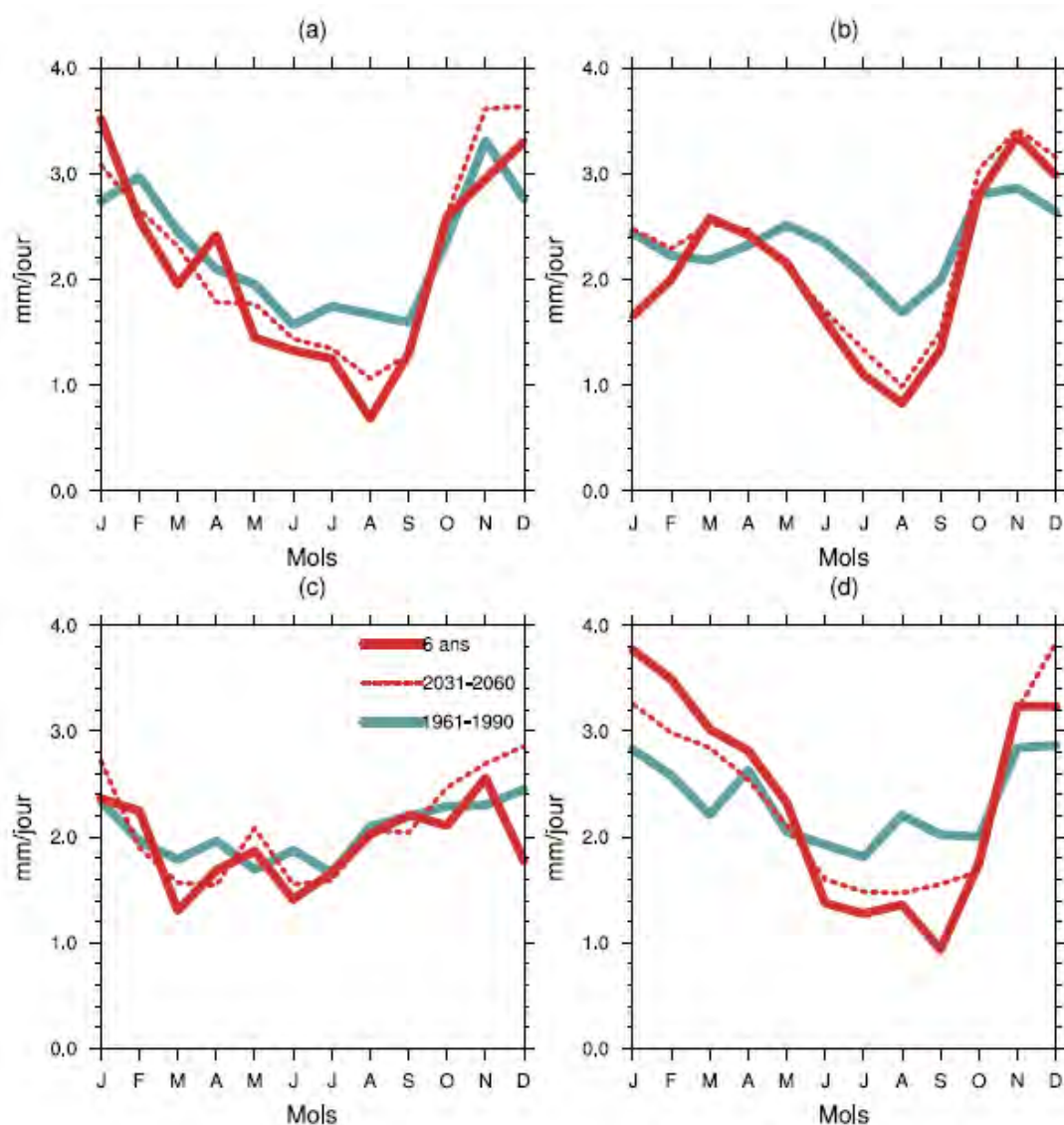


FIGURE 26 – Cycle annuel moyen des précipitations en moyenne sur le bassin Seine-Normandie (mm/jour) sur (bleu) la période 1961-1990, sur (rouge pointillé) la période 2031-2060 et (rouge) pendant les épisodes de 6 ans sélectionnés. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

Figure 72 : Cycle annuel moyen des précipitations (mm/j) en moyenne sur le bassin pour 4 épisodes de sécheresse. Scénario RCP8.5.

La **figure 73** présente le cycle annuel moyen de l'évapotranspiration (mm/j) en moyenne sur le bassin Seine-Normandie pour chacun des épisodes.

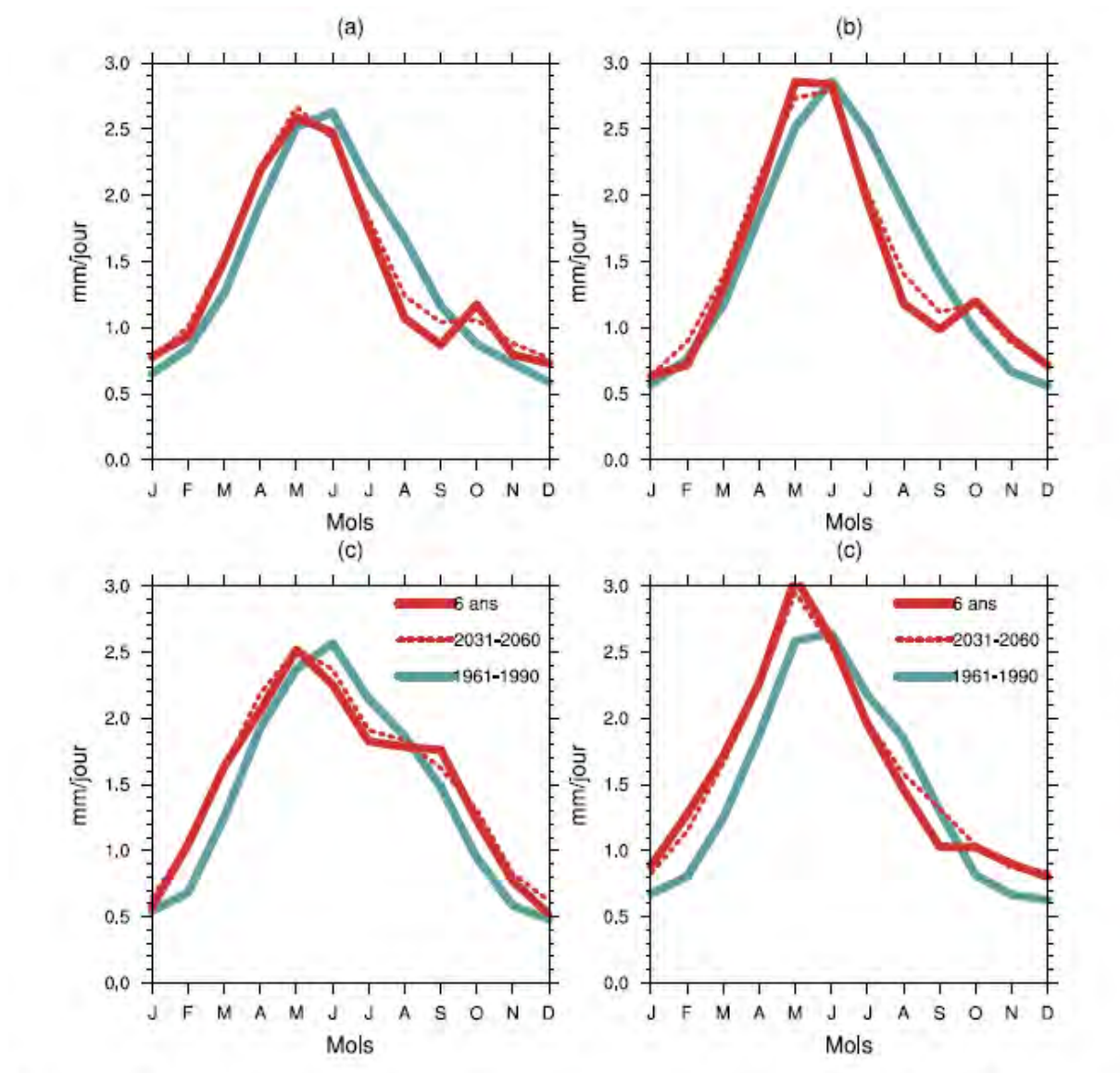


FIGURE 27 – Cycle annuel moyen de l'évapotranspiration sur le bassin Seine-Normandie (mm/jour) sur (bleu) la période 1961-1990, sur (rouge pointillé) la période 2031-2060 et (rouge) pendant les épisodes de 6 ans sélectionnés. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

Figure 73 : Cycle annuel moyen de l'évapotranspiration (mm/j) en moyenne sur le bassin pour 4 épisodes de sécheresse. Scénario RCP8.5

Ces données montrent une diminution allant jusqu'à la moitié des précipitations moyennes en période d'étiage par rapport au climat sur la période 1960-1990 et une augmentation de l'évapotranspiration durant l'automne et l'hiver. La thèse de Rémy Bonnet présente aussi des résultats allant dans le même sens.

4.2 Indicateurs hydrologiques d'étiage des épisodes de sécheresse

4.2.1 Généralités

Les conditions hydrologiques futures des 4 épisodes (a) à (d) sont comparées à leurs conditions hydrologiques de références niveau de la station de Paris Austerlitz. En effet chacune des simulations est réalisée pour sa période de référence, puis pour la situation future (cf. figure 74).

A noter que ces courtes périodes futures comparativement à des périodes longues passées issues de différents modèles limitent la représentativité statistique à des comparaisons relatives et les évolutions présentées présentent de nombreux biais statistiques. Ainsi, seules les analyses au niveau de la station de Paris Austerlitz sont présentées. Elles prennent en effet en compte l'ensemble du périmètre de l'EPTB Seine Grand Lacs et permettent de présenter des ordres de grandeurs sur la base des données disponibles. Cette représentation n'est pas étendue aux autres stations du fait de la non validité statistique de la méthode.

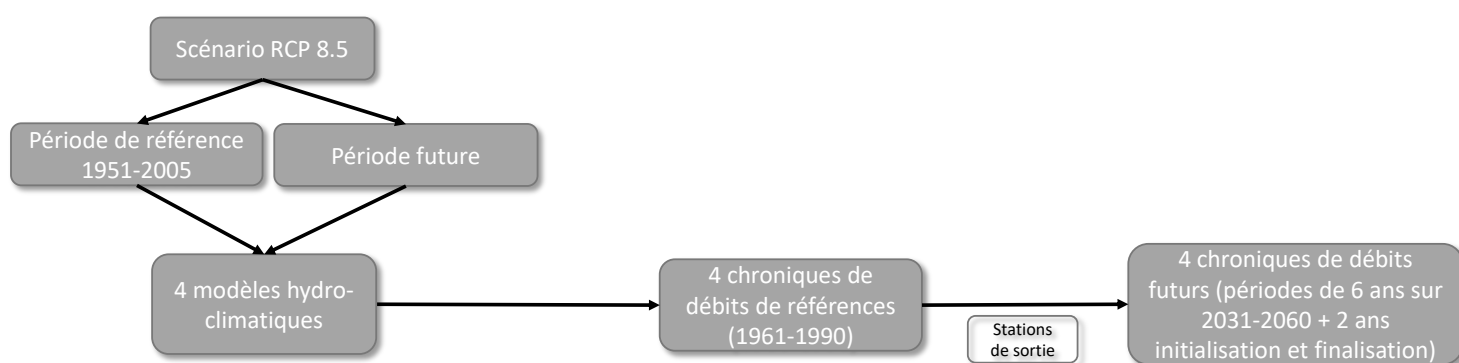


Figure 74 : Synoptique synthétique des données de débits futurs

4.2.2 Les QMNA

La figure 75 présente l'évolution globale et moyenne des QMNA entre les périodes de référence passées et les périodes futures au niveau de la station de Paris Austerlitz.

La première colonne de la figure 76 représente les QMNA de la Seine à Paris pour les 4 simulations d'épisodes sécheresse sur la période de référence 1961-1990.

Les valeurs de QMNA5 calculées sur la période de référence sont respectivement de :

- épisode (a) : 160 m³/s ;
- épisode (b) : 176 m³/s ;
- épisode (c) : 145 m³/s ;
- épisode (d) : 179 m³/s.

Les mêmes représentations sont présentées sur la seconde colonne pour les 4 épisodes futurs calculés sur des périodes de 8 ans (les épisodes de 6 ans comportent en fait 8 années de données). La valeur de QMNA5 affichée est celle calculée pour chaque épisode sur la période de référence.

Pour les 4 épisodes les QMNA simulés n'atteignent pas la valeur du QMNA5 calculés sur la période de référence pour chacun de ces modèles indiquant une baisse globale des débits d'étiage de l'ordre de 20 %. Il n'est cependant pas possible sur des périodes de 8 ans de calculer des QMNA5 (QMNA de période de retour 5 ans) ou des QMNA médians (QMNA de période de retour 2 ans) fiables et ainsi de quantifier la baisse de cet indicateur.

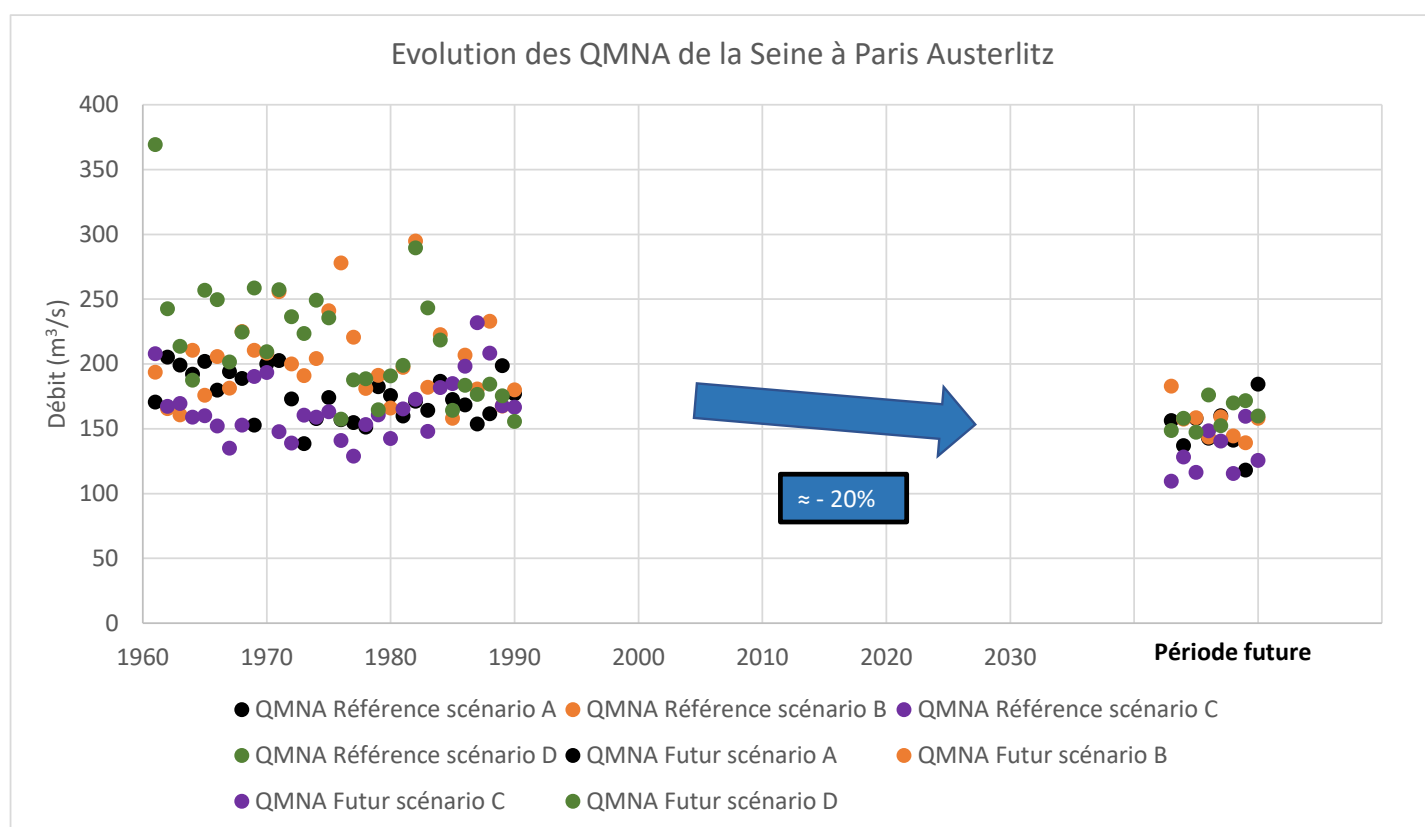
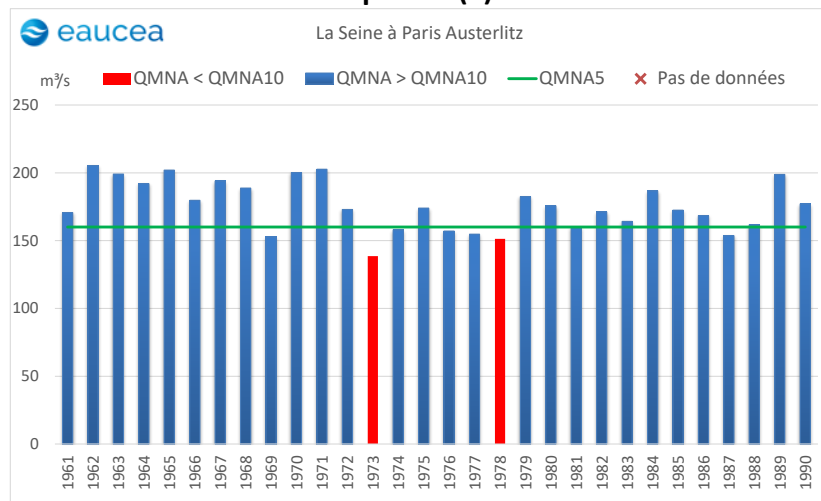


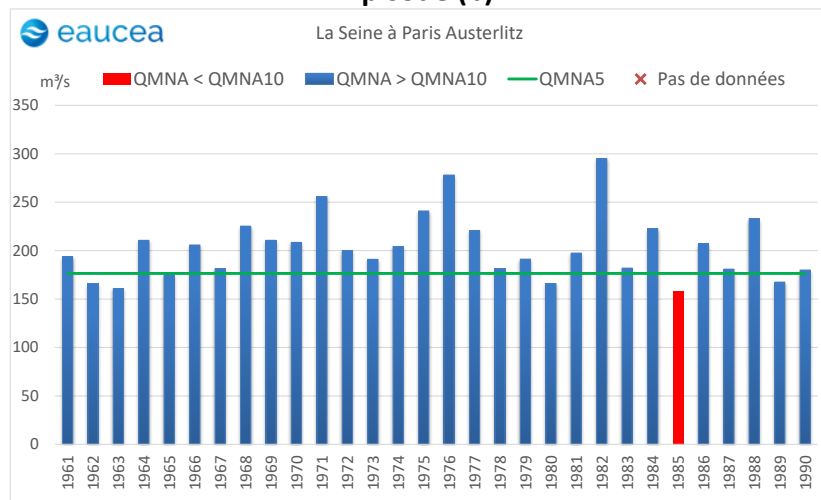
Figure 75 : Evolution globale et moyenne des QMNA entre les périodes de référence passées et les périodes futures au niveau de la station de Paris-Austerlitz

Episode (a)

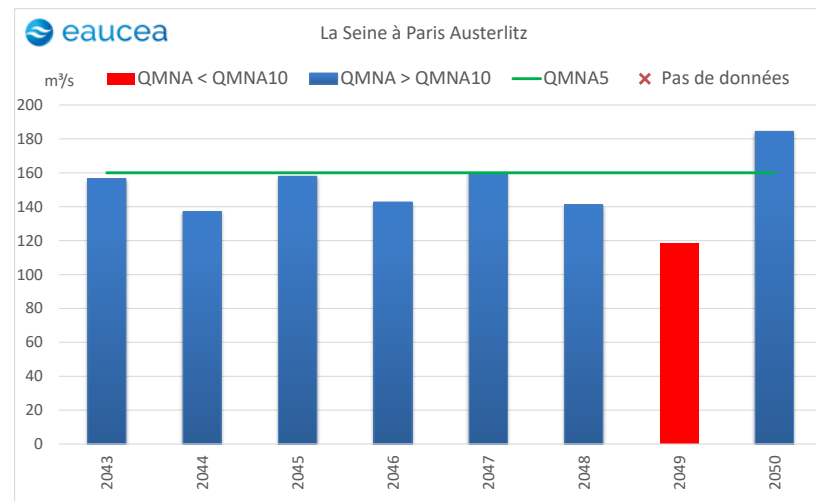


Période de référence

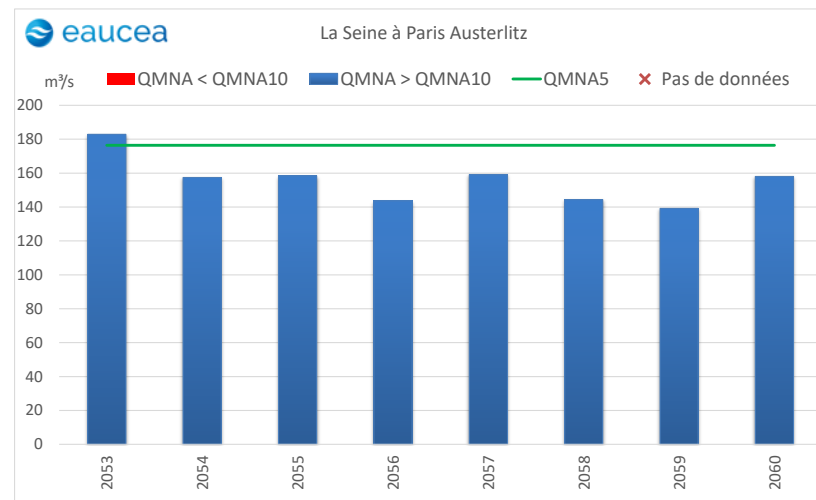
Episode (b)



Période de référence

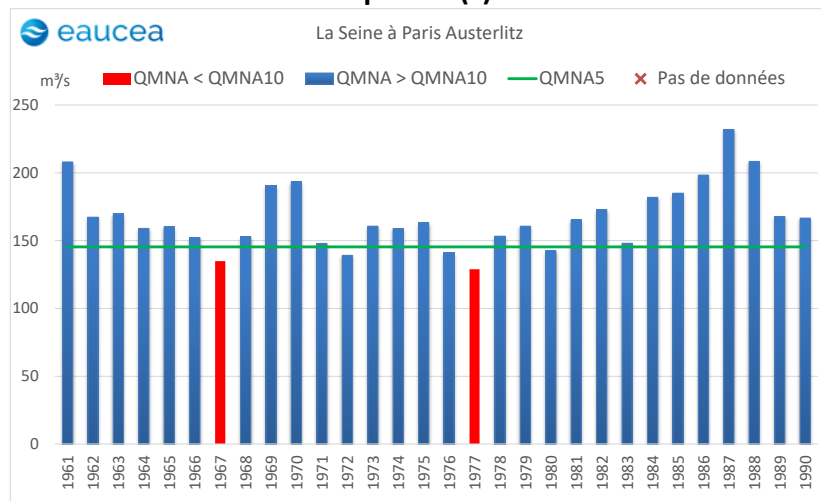


Période future



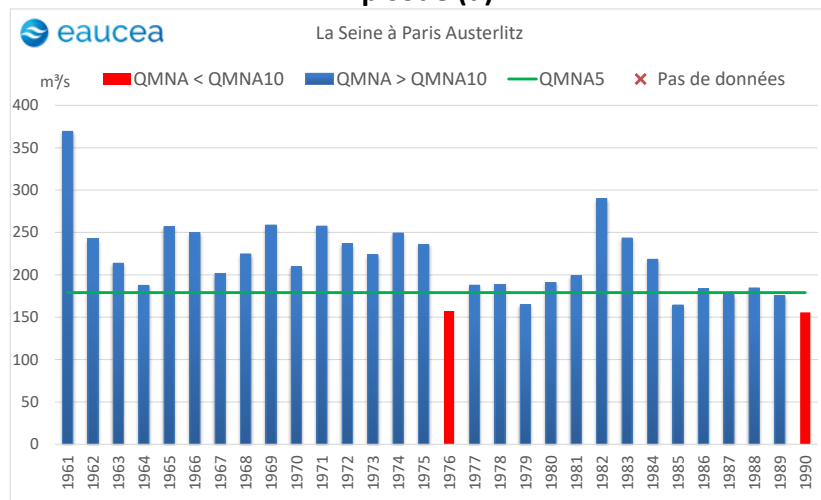
Période future

Episode (c)

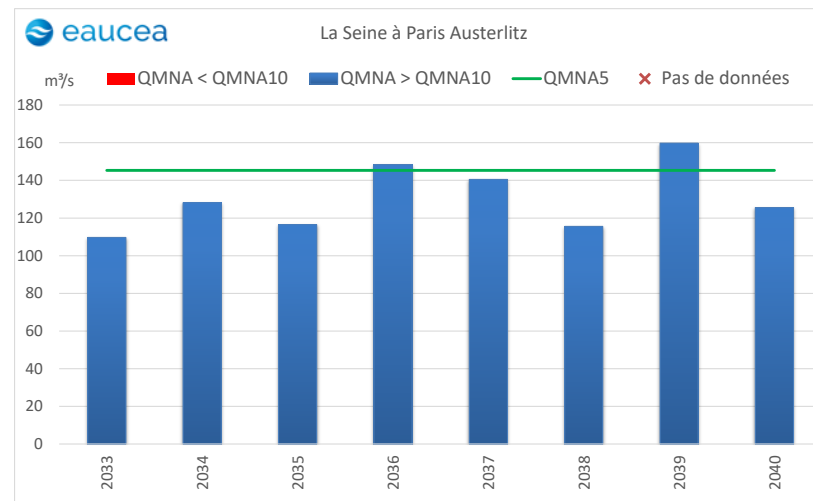


Période de référence

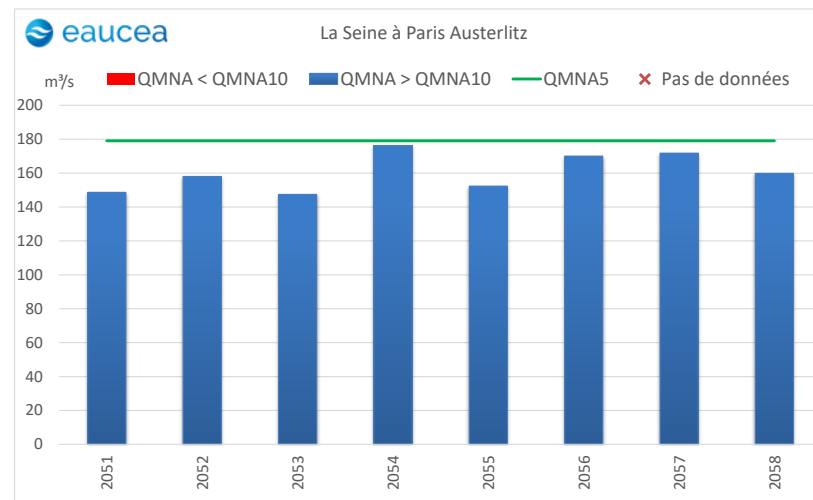
Episode (d)



Période de référence



Période future



Période future

Figure 76 : QMNA de la Seine à Paris Austerlitz selon les 4 scénarios (périodes de référence et futures)

4.2.3 Les VCN10

Comme pour les QMNA, l'analyse des VCN10 au niveau de la station de Paris Austerlitz et pour chacune des simulations ne peut être comparée qu'à sa période de référence. Ainsi la première colonne de la **figure 78** présente les VCN10 de la période de référence 1961-1990 et la seconde les VCN10 des périodes futures. La valeur du QMNA5 des périodes de référence est aussi indiquée sur les graphiques pour plus de lisibilité de ces derniers.

Pour chacune des simulations, les VCN10 sont en diminution indiquant par le futur des étiages de plus en plus sévères avec une baisse globale de l'ordre de 20 % (cf. **figure 77**).

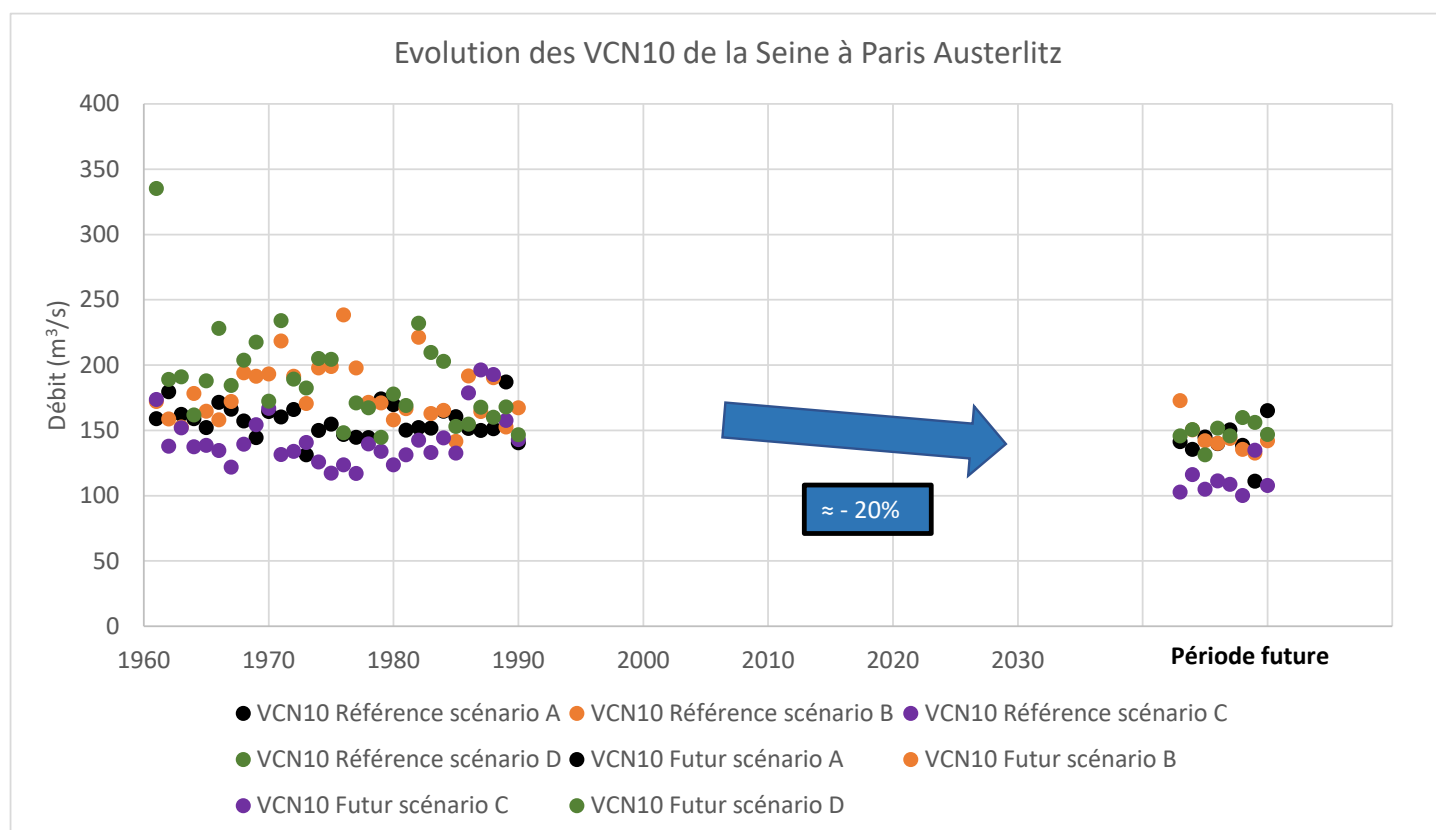
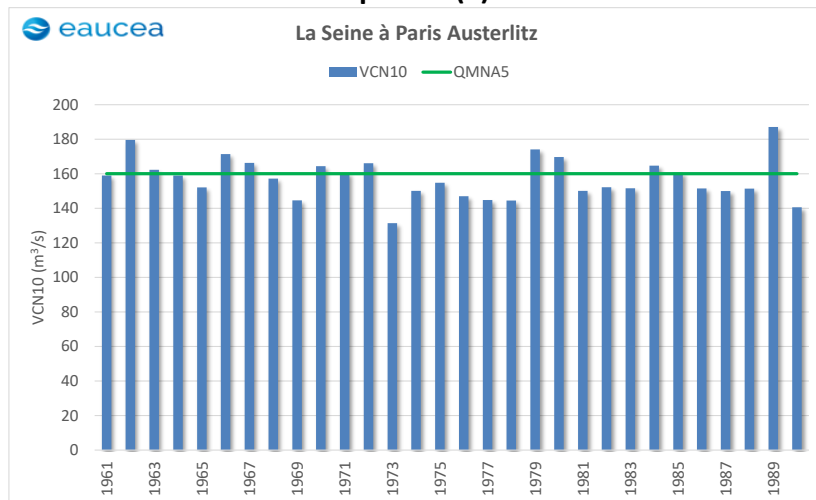


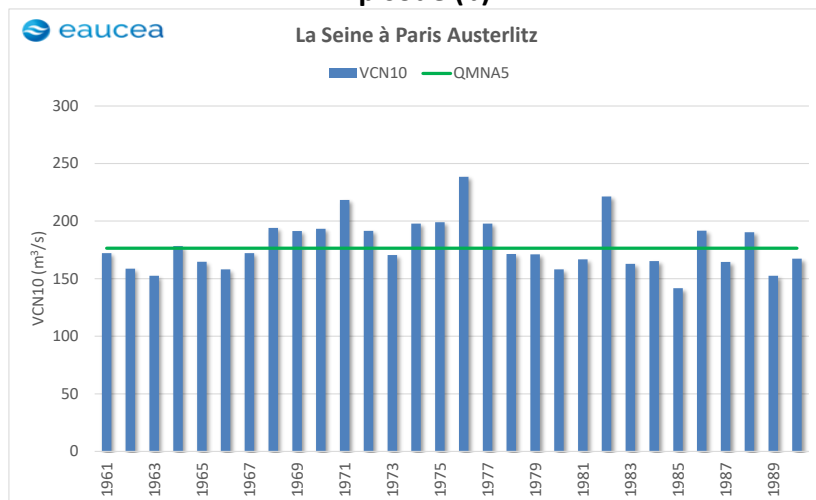
Figure 77 : Evolution globale et moyenne des VCN10 entre les périodes de référence passées et les périodes futures au niveau de la station de Paris-Austerlitz

Episode (a)

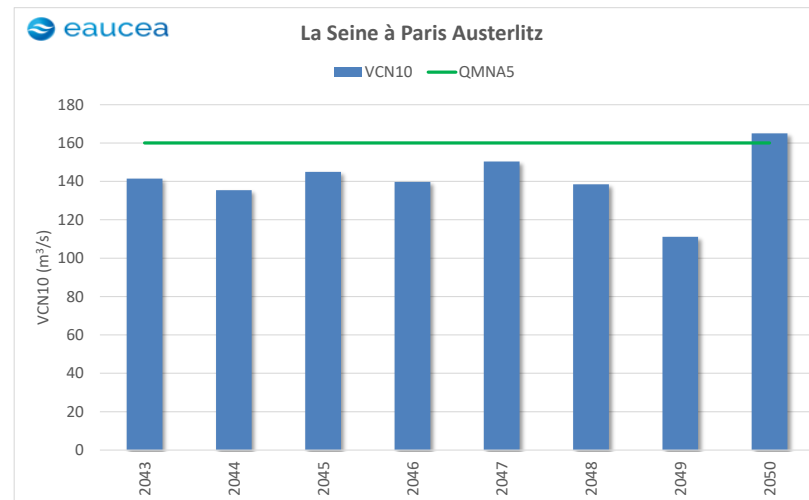


Période de référence

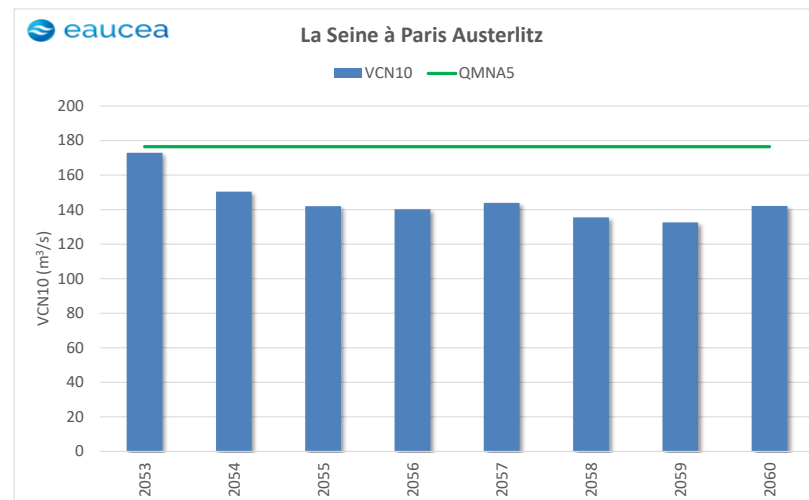
Episode (b)



Période de référence

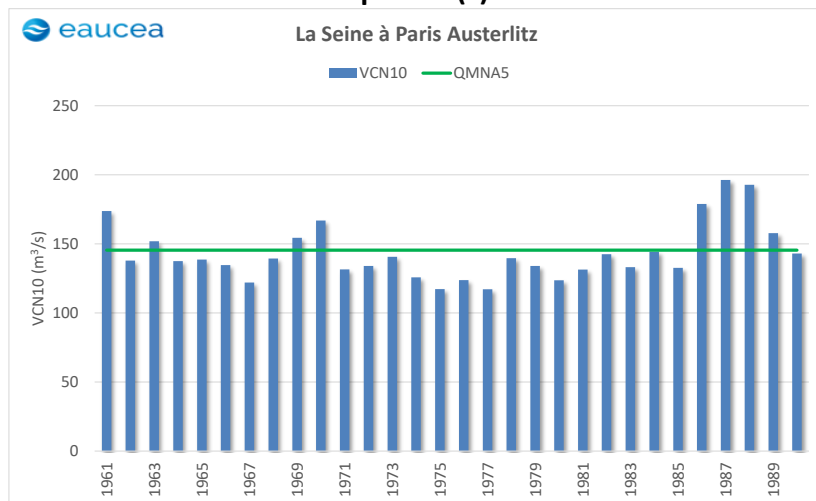


Période future

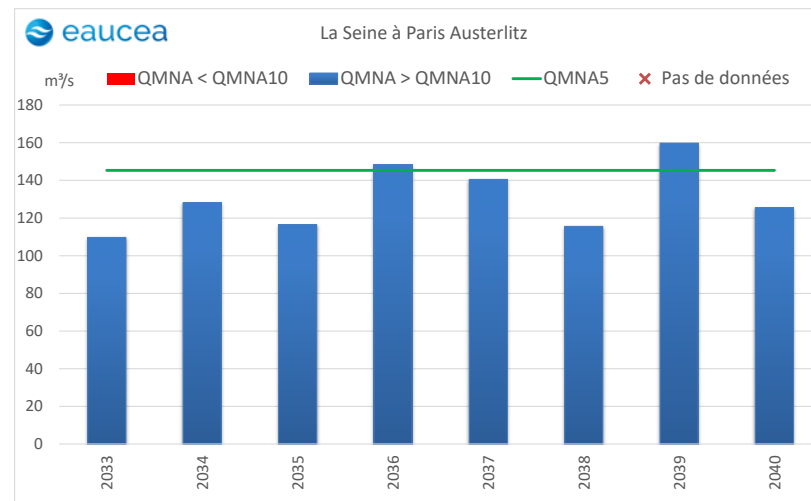


Période future

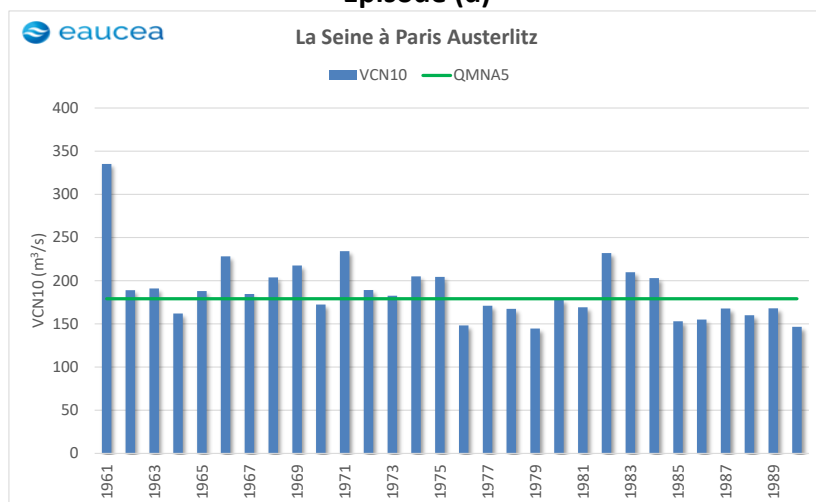
Episode (c)



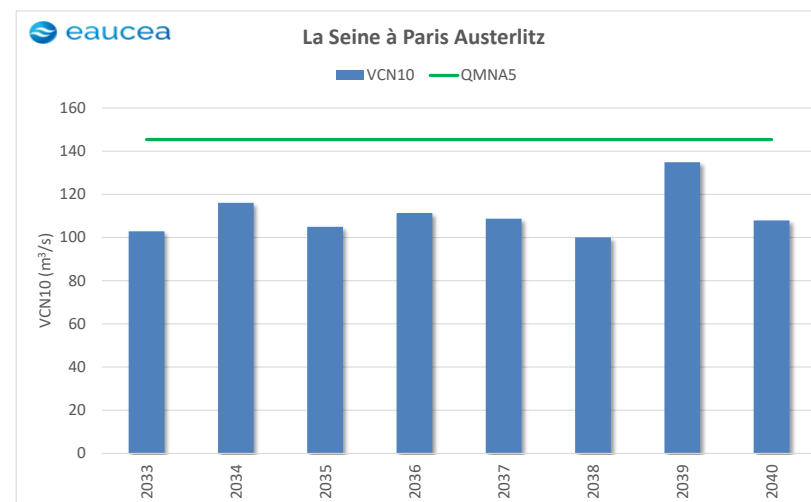
Période de référence



Période future



Période de référence



Période future

Figure 78 : VCN10 de la Seine à Paris Austerlitz selon les 4 scénarios (périodes de référence et futures)

4.2.4 Les déficits

Comme pour les indicateurs précédents, les déficits ne peuvent être comparés pour les simulations futures qu'à leurs données de référence (cf. **figure 79**). Ainsi la première colonne de la **figure 80** présente les périodes moyennes mensuelles de déficit de la période de référence 1961-1990, par rapport à son QMNA5 pour chaque simulation, périodes moyennes mensuelle futures par rapport au QMNA5 de la période de référence.

Les résultats obtenus sont très variables d'une simulation à l'autre illustrant bien la variabilité de la méthode et les limites de l'analyse d'une période de 8 ans. La tendance est à la nette augmentation, en lien direct avec la baisse des débits mise en évidence aux paragraphes précédents.

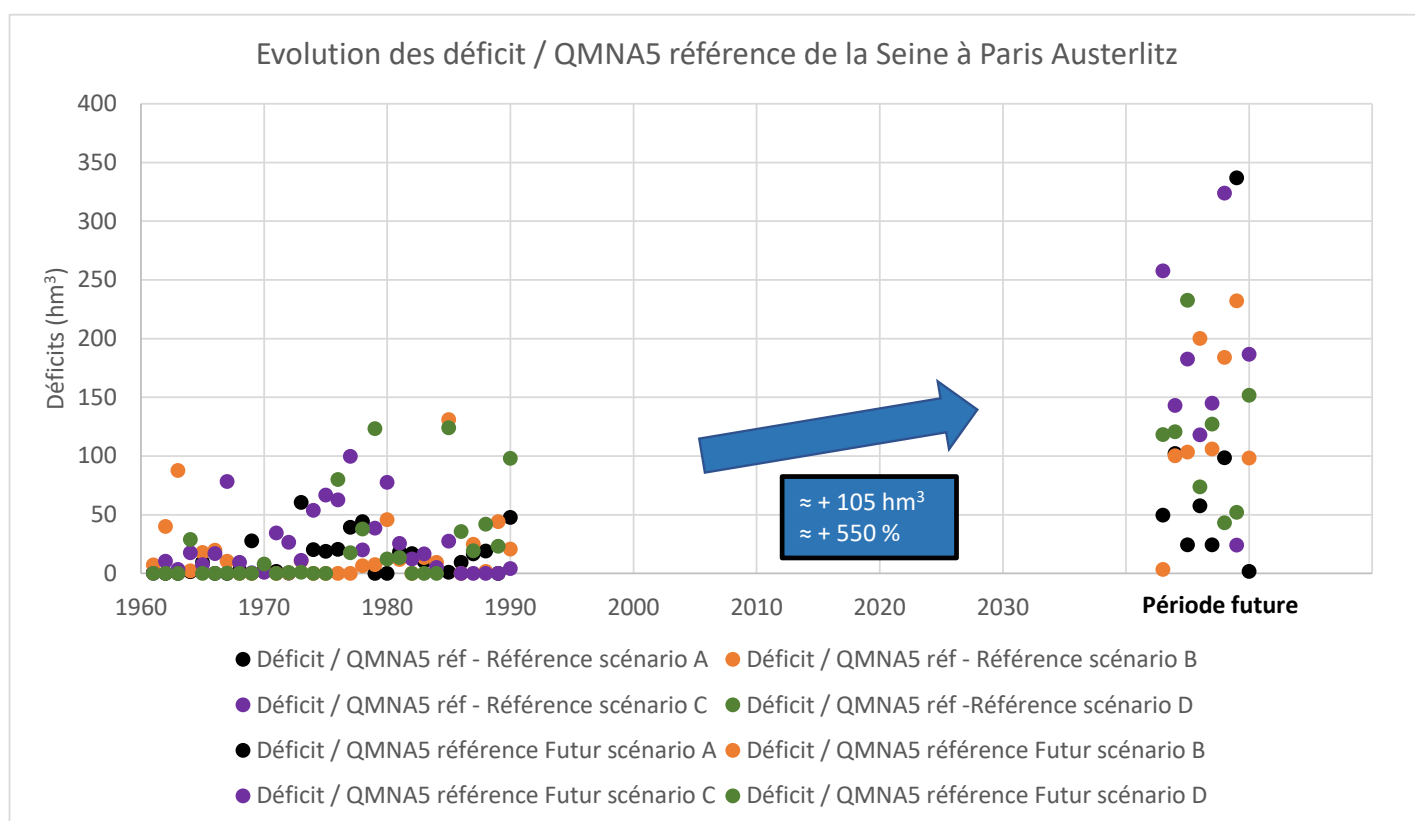
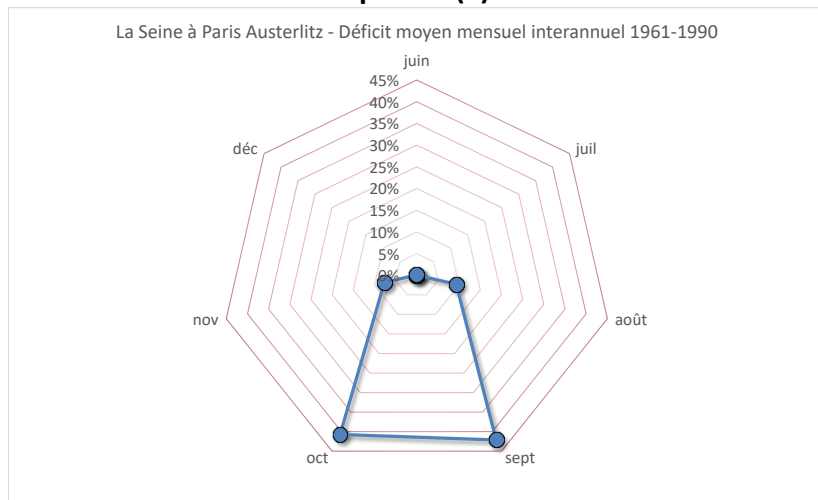


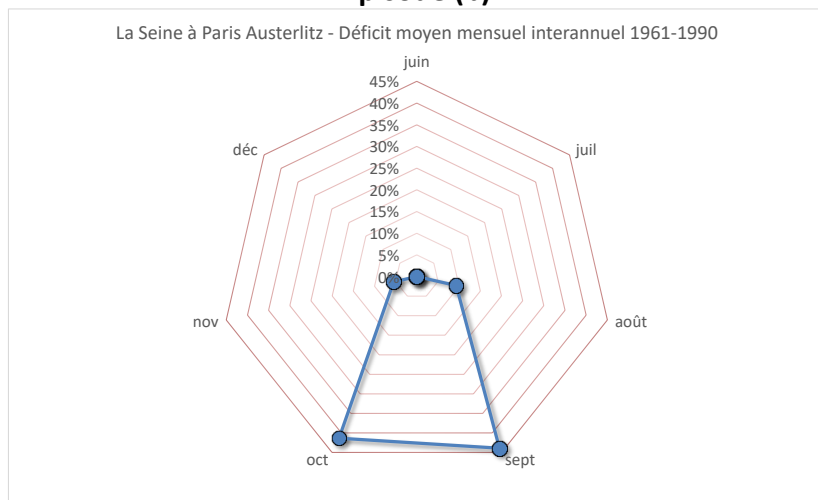
Figure 79 : Evolution globale et moyenne des déficits par rapport aux QMNA5 des périodes de références, entre les périodes de référence passées et les périodes futures au niveau de la station de Paris-Austerlitz

Episode (a)



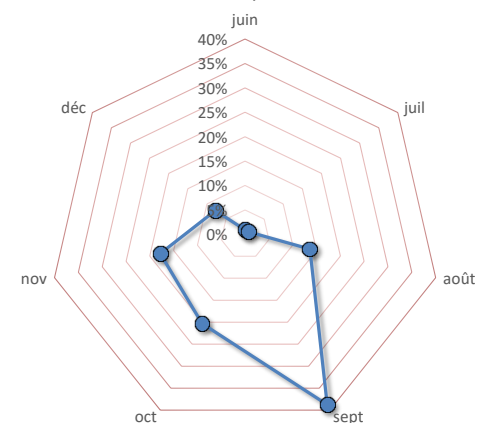
Période de référence

Episode (b)



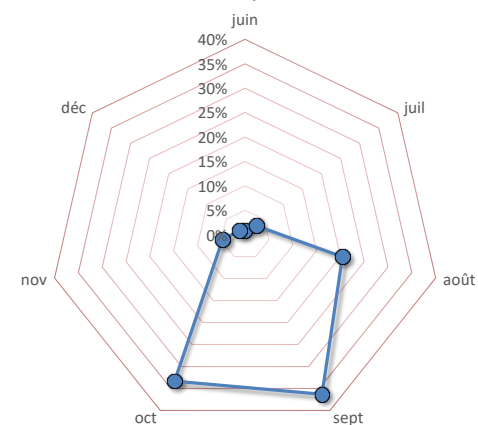
Période de référence

La Seine à Paris Austerlitz - Déficit moyen mensuel interannuel 2043-2050



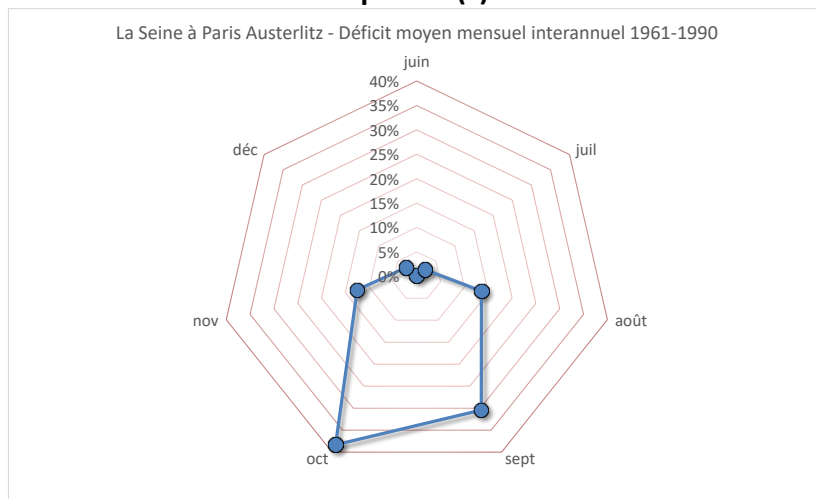
Période future

La Seine à Paris Austerlitz - Déficit moyen mensuel interannuel 2053-2060

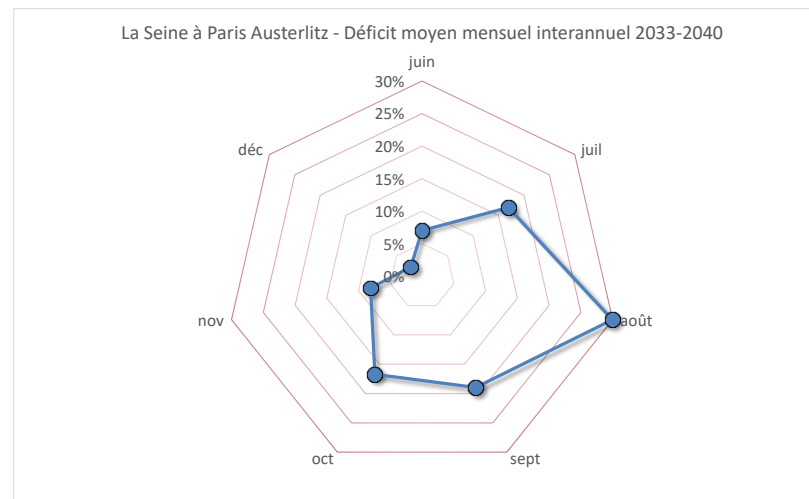


Période future

Episode (c)

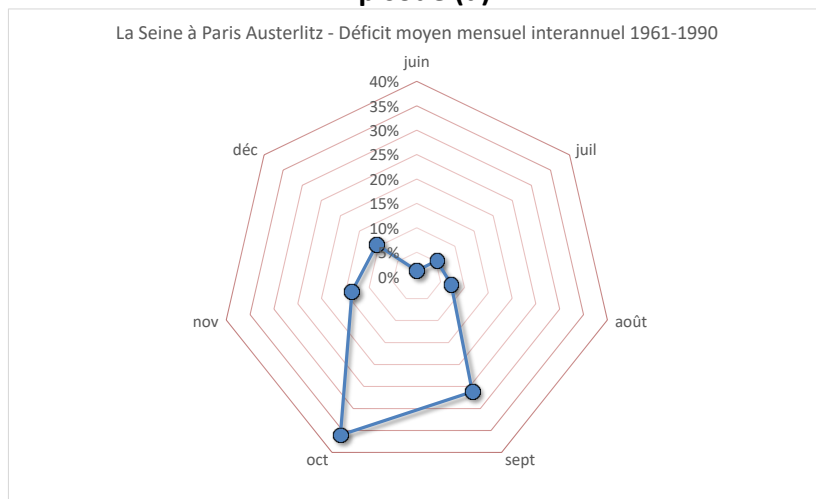


Période de référence

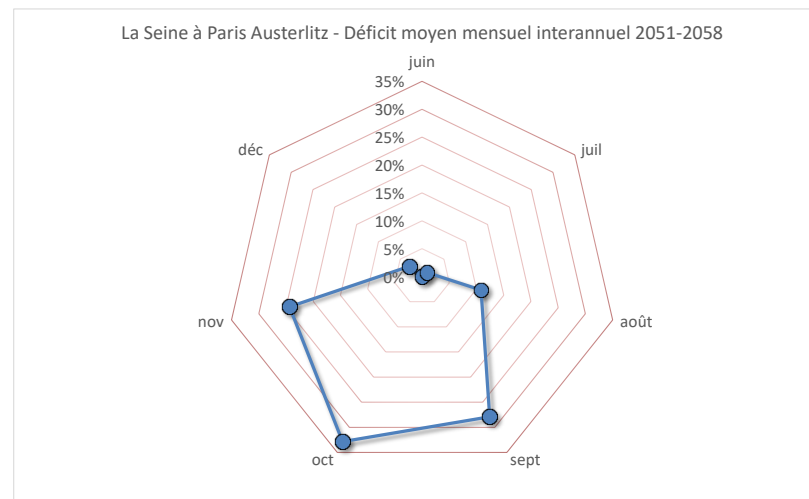


Période future

Episode (d)



Période de référence



Période future

Figure 80 : Analyse des périodes de déficit de la Seine à Paris Austerlitz selon les 4 scénarios (périodes de référence et futures)

4.2.5 La durée des étiages

Comme pour les indicateurs précédents, la durée des étiages ne peut être comparée pour les simulations futures qu'à leurs données de référence. Ainsi la première colonne de la **figure 82** présente les durées des étiages de la période de référence 1961-1990, par rapport à son QMNA5 pour chaque simulation, et la seconde colonne les durées des étiages futurs simulées par rapport au QMNA5 de la période de référence.

Pour chacune des simulations, les étiages semblent apparaître de façon plus précoce et s'étaler sur des durées plus longues avec des fin d'étiages plus tardives, elles semblent ainsi rallongées de façon significatives (cf. figure 81). **Cependant, les résultats obtenus sont très variables d'une simulation à l'autre illustrant bien la variabilité de la méthode et les limites de l'analyse d'une période de 8 ans.**

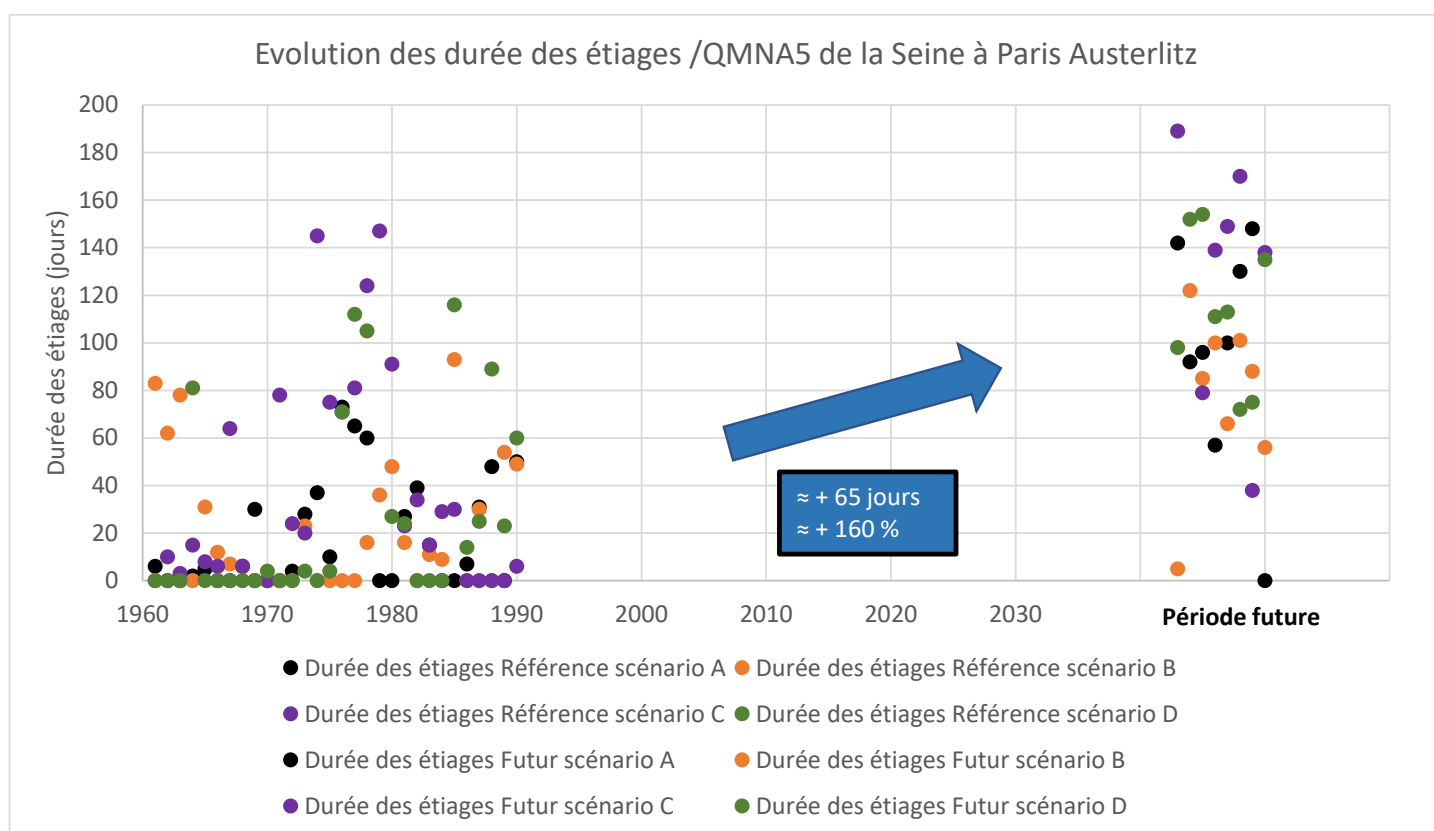
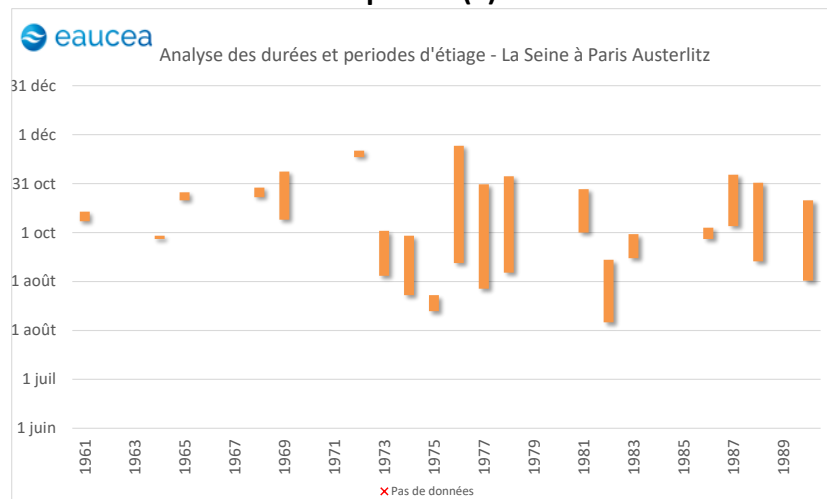


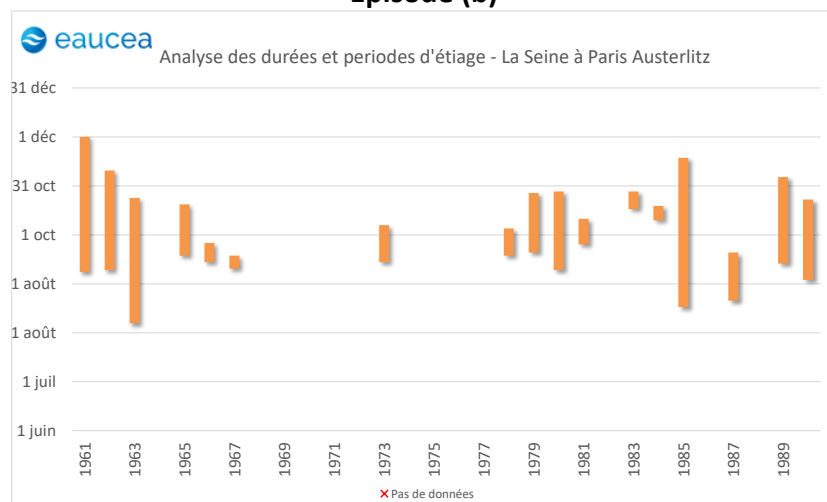
Figure 81 : Evolution globale et moyenne des durées des étiages par rapport aux QMNA5 des périodes de références, entre les périodes de référence passées et les périodes futures au niveau de la station de Paris-Austerlitz

Episode (a)

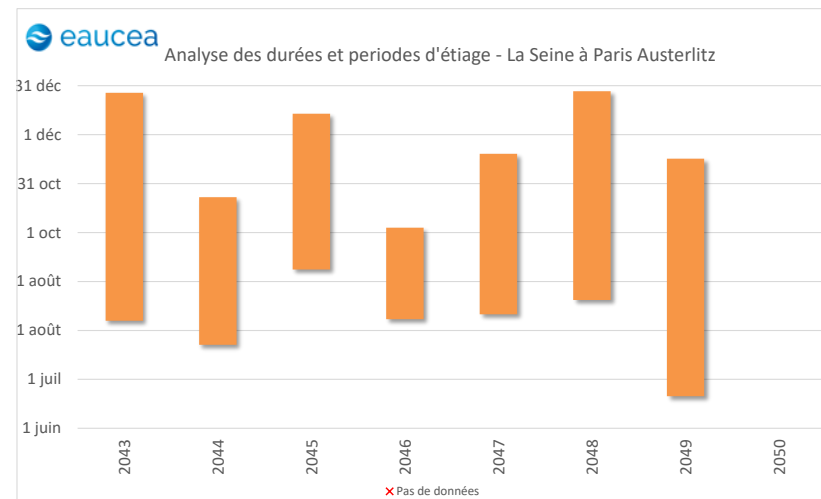


Période de référence

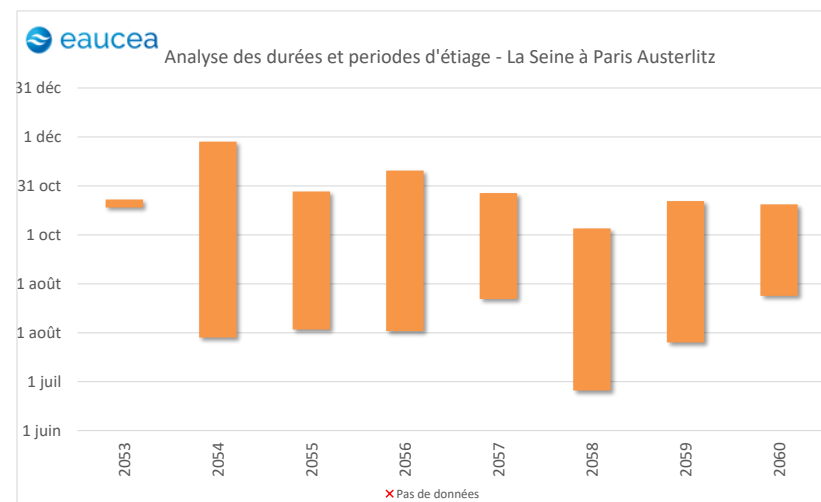
Episode (b)



Période de référence

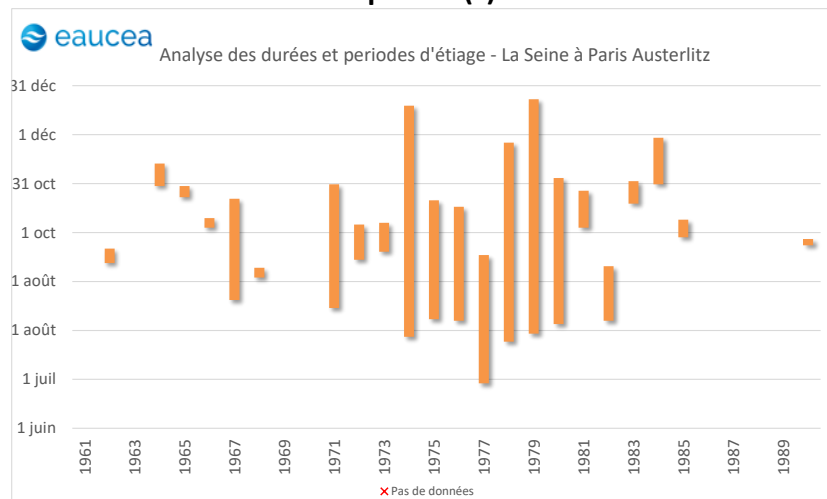


Période future



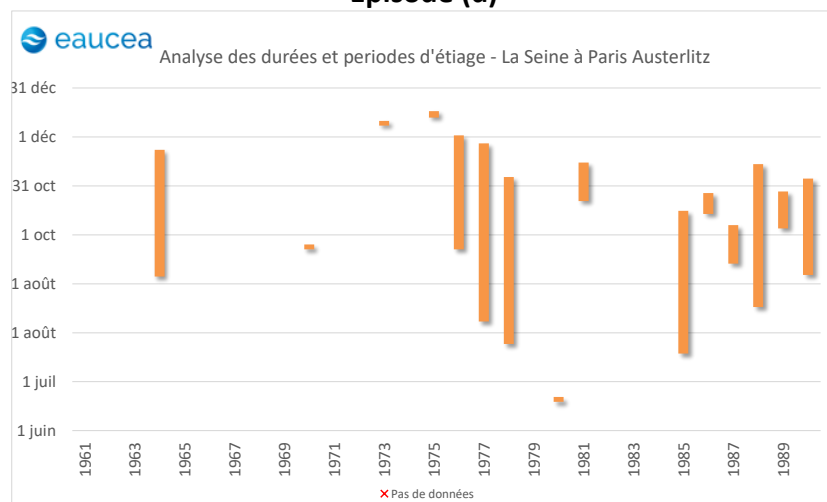
Période future

Episode (c)

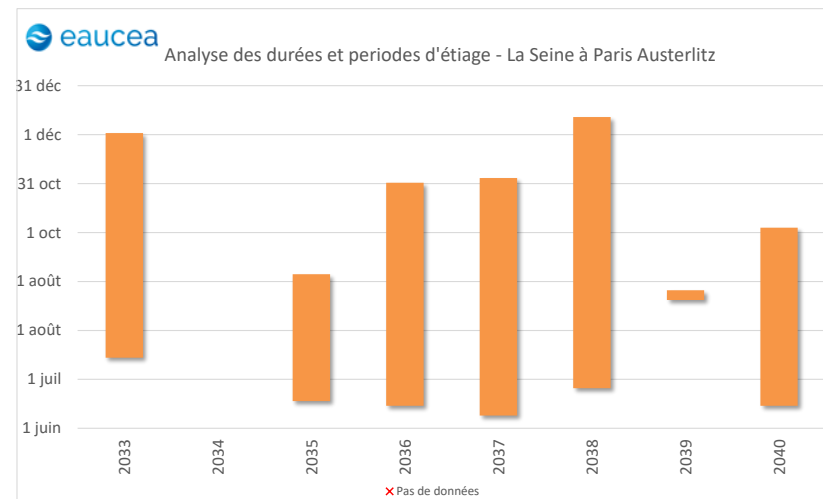


Période de référence

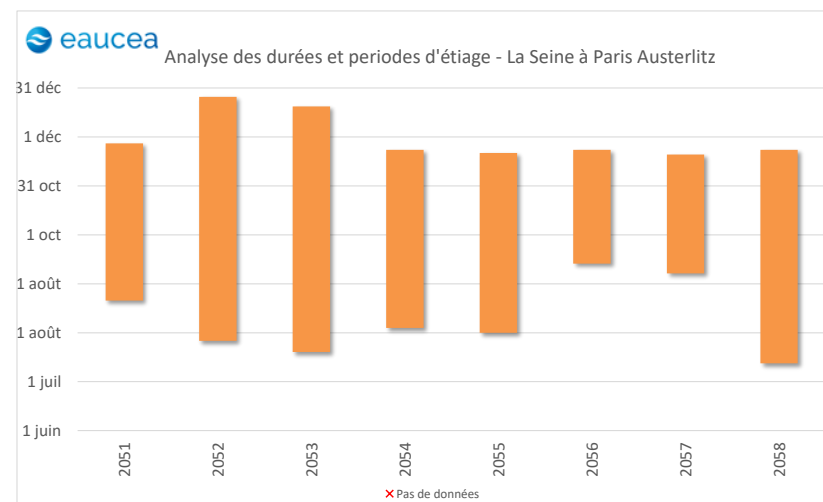
Episode (d)



Période de référence



Période future



Période future

Figure 82 : Durée des étiages de la Seine à Paris Austerlitz selon les 4 scénarios (périodes de référence et futures)

4.3 Température de l'eau

4.3.1 Calage du modèle

La température de l'eau en régime naturel est influencée par deux séries de facteur :

- les facteurs météorologiques :
 - la température de l'air,
 - l'intensité des radiations solaires,
 - la vitesse du vent,
 - la pression de vapeur d'eau dans l'air,
- les facteurs physiques :
 - les dimensions de la surface libre,
 - la profondeur d'eau,
 - Le degrés de turbulence (mélange),
 - le débit,
 - la température des apports souterrains et superficiels.

Parmi tous ces facteurs le principal correspond à la température de l'air, les autres facteurs influençant à la marge la température de l'eau.

Sur une eau de rivière, la relation température de l'air / température de l'eau est la suivante :

$\text{moyenne } (T_{\text{eau}} \text{ sur } M \text{ éléments}) = a \times \text{moyenne } (T_{\text{air}} \text{ sur } N \text{ éléments}) + b$
--

Il est ainsi possible, à partir des données de température de l'air d'une station météorologique de restituer fidèlement les variations de température de l'eau au niveau de stations de mesure situées à proximité (**cf. figure 83**). Les stations de référence prises en compte correspondent aux stations météorologiques présentées au **paragraphe 2.4** et aux stations de suivi de la température présentées au **paragraphe 2.7.1**.

Les paramètres de calage varient pour chaque couple stations météorologique/température pris en compte. Il existe ainsi autant de paramètres que de combinaisons de stations possibles. Les paramètres de calages utilisés pour les modélisations détaillées dans les paragraphes qui suivent sont présentés dans le **tableau 6**. Le calage s'effectue sur la période de disponibilité des données de température mesurées pour chaque station.

Station Teau	Station Tair	a	b	M	N	Coefficient de corrélation
L'YONNE A CHATEAU-CHINON(CAMPAGNE) 3	MOLESMES_SAPC	0.591	3.191	5	12	0.975
L'YONNE A PREGILBERT 1	MOLESMES_SAPC	0.879	3.386			0.979
LA SEINE A NOD-SUR-SEINE 1	MOLESMES_SAPC	0.626	4.988			0.970
LA SEINE A CHARREY-SUR-SEINE 1	MOLESMES_SAPC	0.312	7.824			0.937
LA MARNE A RIAUCOURT 1	MOLESMES_SAPC	0.708	3.943			0.974
LA MARNE A BAYARD-SUR-MARNE 3	DOSNON	0.667	4.840			0.974
LA MARNE A FRIGNICOURT 1	DOSNON	0.879	3.360			0.981
LA MARNE A MATOUGUES 1	VATRY-AERO	0.881	3.459			0.982
LA MARNE A LA FERTE-SOUS-JOUARRE 1	CHANGIS	0.981	1.940			0.967
LA SEINE A SAINT-FARCEAU-PONTHIERRY 1	MELUN	1.008	2.226			0.966
LA SEINE A ABLON-SUR-SEINE 2	MELUN	0.979	2.605			0.966
LA MARNE A CHARENTON-LE-PONT 2	MELUN	0.994	2.087			0.974
LA SEINE A SURESNES 2	MELUN	0.978	2.915			0.967
LA SEINE A MERICOURT 4	MELUN	0.966	3.034			0.967
LA SEINE A POSES 2	MELUN	0.989	2.681			0.968

Tableau 6 : Paramètres de calage utilisés pour les modélisations températures air/températures eau

Du fait de la faible variabilité climatique du bassin, cette relation est aussi valable pour les stations température ne disposant pas de données météorologiques proches à condition que les températures de l'air prise en compte proviennent de stations météorologiques présentant des conditions atmosphériques similaires aux conditions locales (pluviométrie, relief...) (cf. **figure 84**). Il est possible d'extrapoler cette relation à d'autres stations de mesure de la température situées en aval du périmètre de l'EPTB à partir de stations météorologiques localisées dans ce périmètre (cf. **figure 85**).

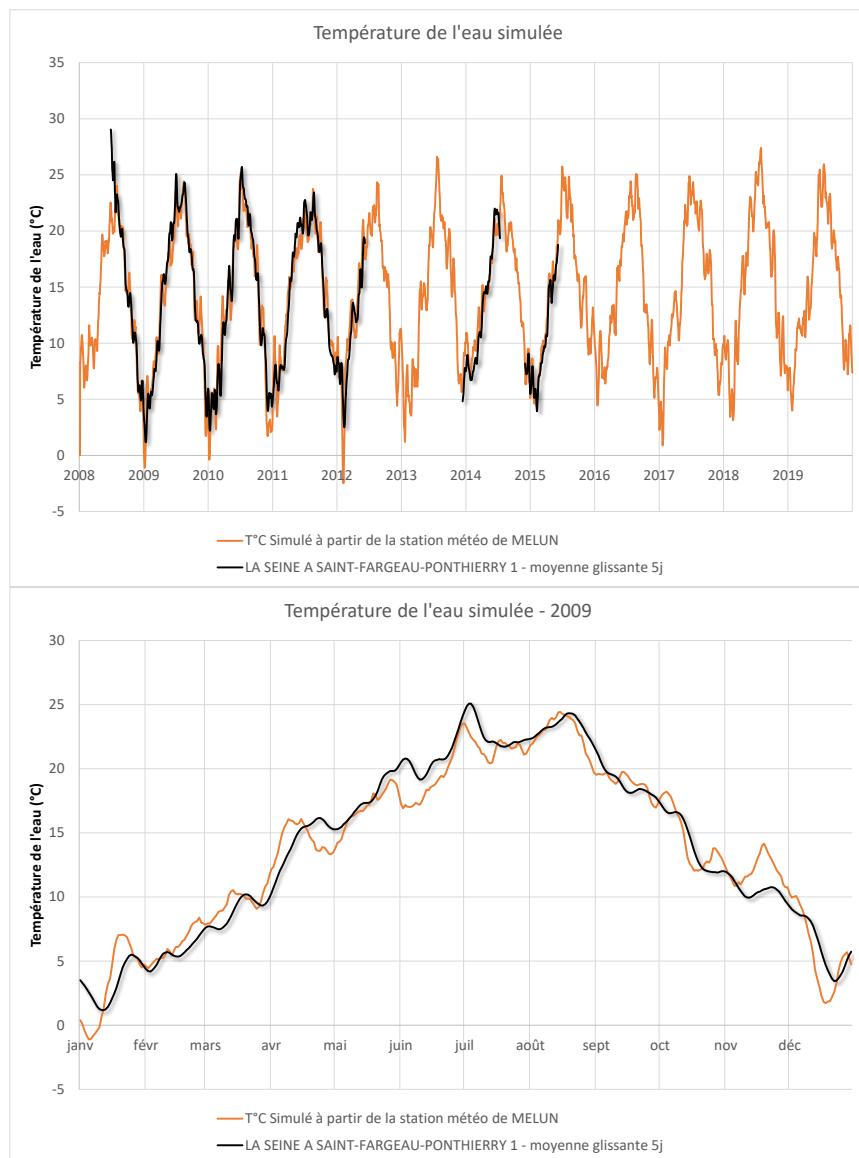


Figure 83 : Calage du modèle de température de l'eau pour la station de la Seine à Saint-Fargeau-Ponthierry à partir des données de la station météorologique de Melun

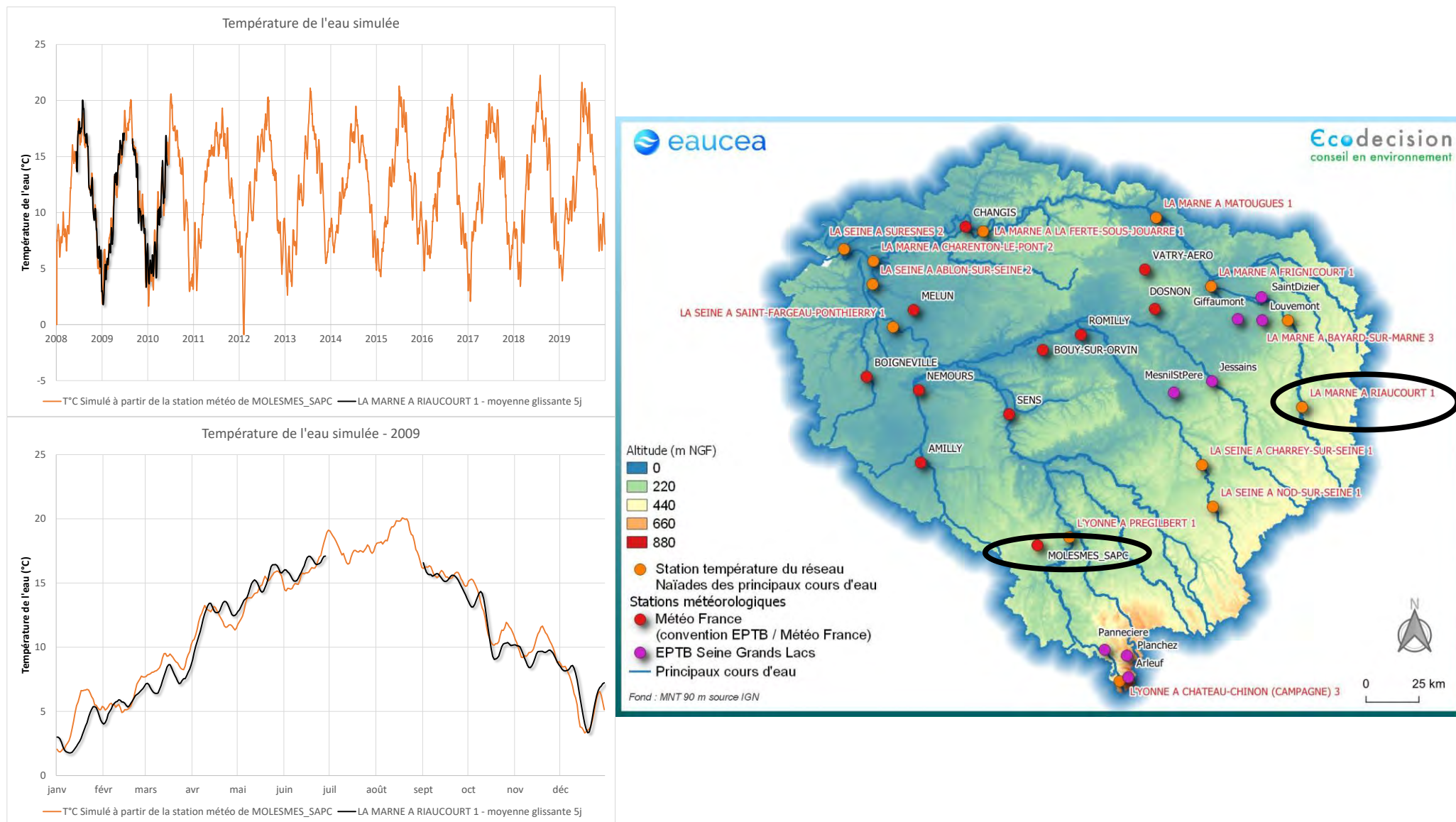


Figure 84 : Calage du modèle de température de l'eau pour la station de la Seine à Saint-Fargeau-Ponthierry à partir des données de la station météorologique de Molesmes SAPC

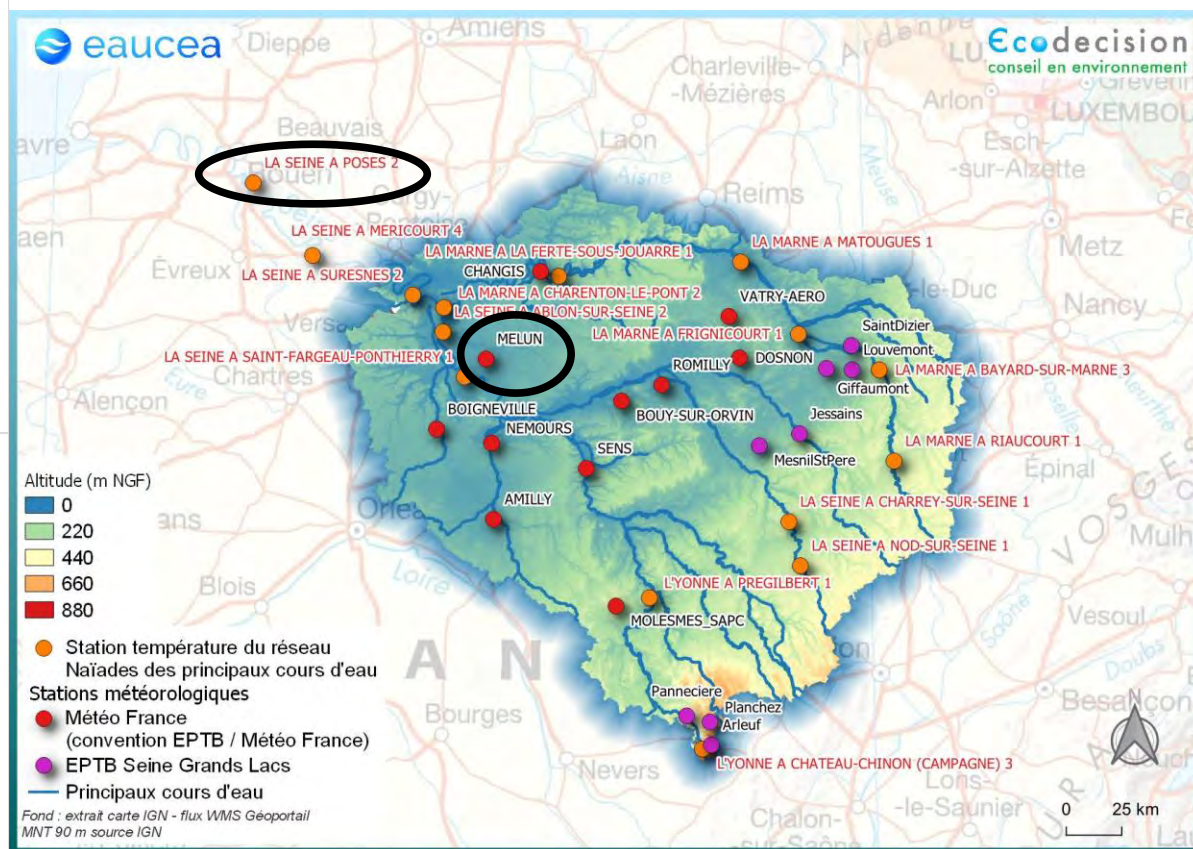
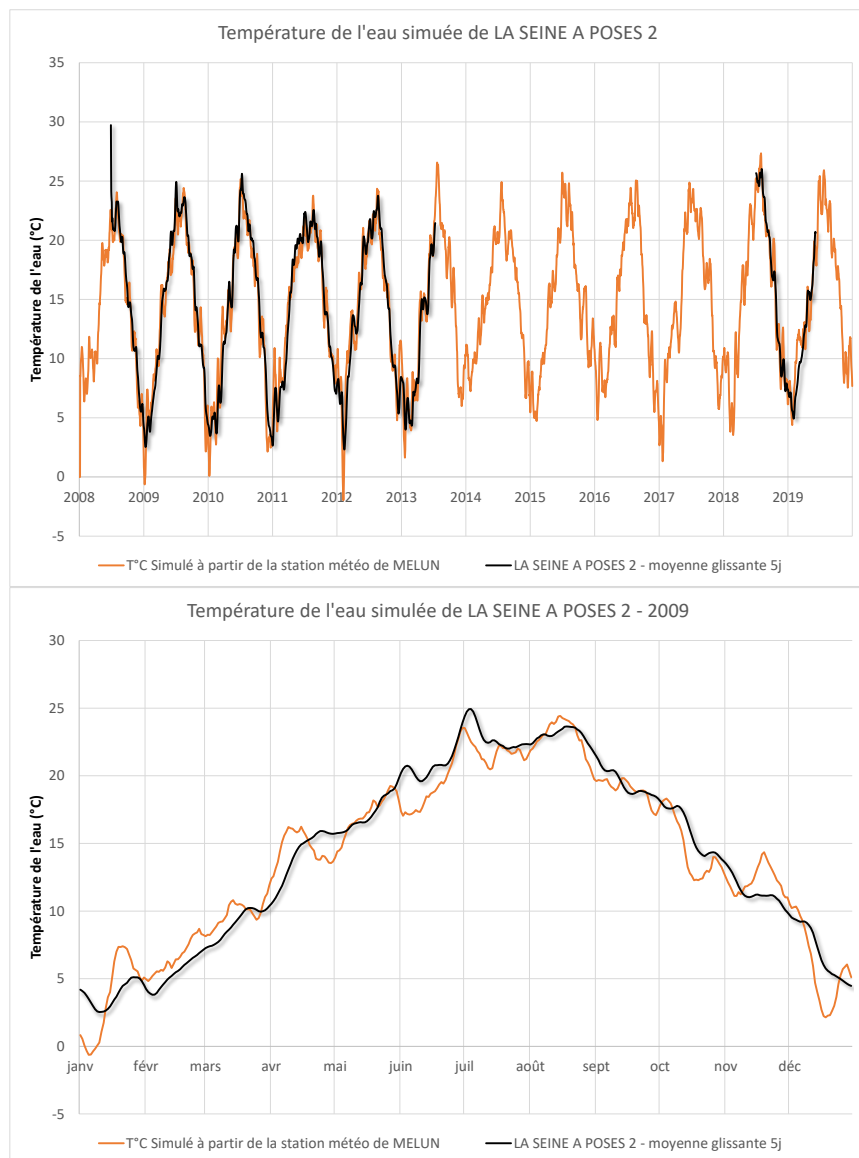


Figure 85 : Calage du modèle de température de l'eau pour la station de la Seine à Poses 2 à partir des données de la station météorologique de Melun

4.3.2 Changement climatique

4.3.2.1 Scénarios de référence

Cette très forte relation entre température de l'air et température de l'eau permet par ailleurs l'utilisation des données journalière de la température de l'air des différents scénarios DRIAS du changement climatique (cf. **paragraphe 2.5**).

Afin d'obtenir une donnée de température représentative du périmètre de l'EPTB, les données journalières de 126 points du modèle correspondant à un rayon de 50 km (cf. **figure 86**) localisé au centre du périmètre ont été collectées puis moyennées (soit pour chaque scénario une moyenne pour chaque jour de 126 points), nécessitant ainsi la mobilisation d'un peu plus de 15 millions de données de température.

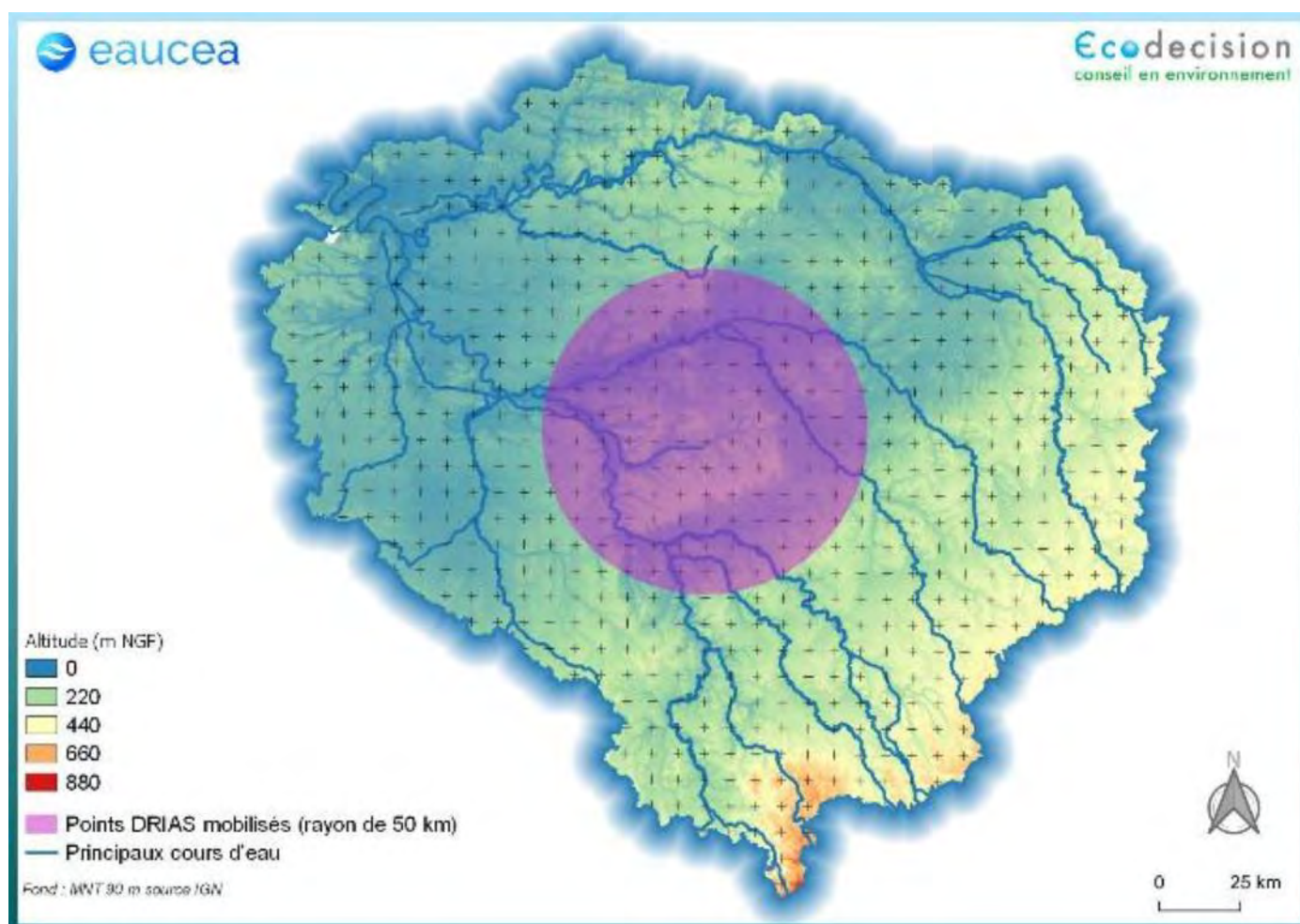


Figure 86 : Localisation des points DRIAS mobilisés

Les coefficients déterminés précédemment pour le calage du modèle de température de l'eau pour chaque couple de station température de l'air / température de l'eau (**cf. tableau 6**) ont été appliqués aux séries de données des différents scénarios RCP du modèle Aladin (période 2006-2100), ainsi qu'au données de référence de calage du modèle (période 1951-2005). A noter que ce modèle a subi une actualisation des simulations en 2016 sur la base des retours de pratiques actuelles.

Il est ainsi possible de simuler l'évolution future de la température de l'eau pour les différentes stations présentes à différents horizons. Afin de garder une cohérence avec les données de débits futurs, les comparaisons présentées ci-dessous ont été effectuées pour des périodes de 30 ans :

- **1985-2005** : situation dite contemporaine (données de référence des scénarios DRIAS) ;
- **2010-2040** : futur proche ;
- **2040-2070** : encadrement 2050.

4.3.2.2 Période 2010-2040

Pour la période 2010-2040, il est simulé (**cf. figures 87 à 89 et tableau 7**) :

- pour la partie amont du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Charrey-sur-Seine, **cf. figure 87**) :
 - une augmentation moyenne de la température de l'eau comprise entre +0,2 et +0,3°C, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette augmentation s'exprimerait majoritairement pour les mois de mai à juillet avec des augmentations pouvant atteindre de +0,2 à +0,6°C selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 (cas le plus défavorable) des températures de l'eau en juillet et août pouvant atteindre près de 16 °C pour des périodes décennales chaudes (temps de retour de 10 ans) ;
- pour la partie aval du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Suresnes, **cf. figure 88**) :
 - une augmentation moyenne de la température de l'eau comprise entre +0,6 et +0,9°C, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette augmentation s'exprimerait majoritairement pour les mois de mai à juillet avec des augmentations pouvant atteindre de +0,8 à +1,8°C selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 des températures de l'eau en juillet et août supérieures à 25°C pour des périodes quinquennale et décennale chaudes ;

- pour la partie à l'aval du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Poses, cf. figure 89) :
 - des augmentations similaires à la station de Suresnes ;
 - une augmentation moyenne de la température de l'eau comprise entre +0,6 et +0,9°C, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette augmentation s'exprimerait majoritairement pour les mois de mai à juillet avec des augmentations pouvant atteindre de +0,8 à +1,8°C selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 des températures de l'eau en juillet et août supérieures à 25°C pour des périodes quinquennale et décennale chaudes.

2010-2040			
Partie du bassin	Amont périmètre EPTB	Aval périmètre EPTB	Aval hors périmètre EPTB
Augmentation moyenne annuelle (°C)	+0,2 à +0,3	+0,6 à +0,9	
Augmentation maximale mensuelle (°C)	Mai à juillet	Mai à juillet	
	+0,8 à +1,8	+0,8 à +1,8	
Périodes de températures maximales	Près de 16°C en juillet et août decennal chaud	Supérieure à 25°C en juillet et août quinquennal et decennal chaud	

Tableau 7 : Bilan des évolutions de températures de l'eau simulées à l'horizon 2010-2040

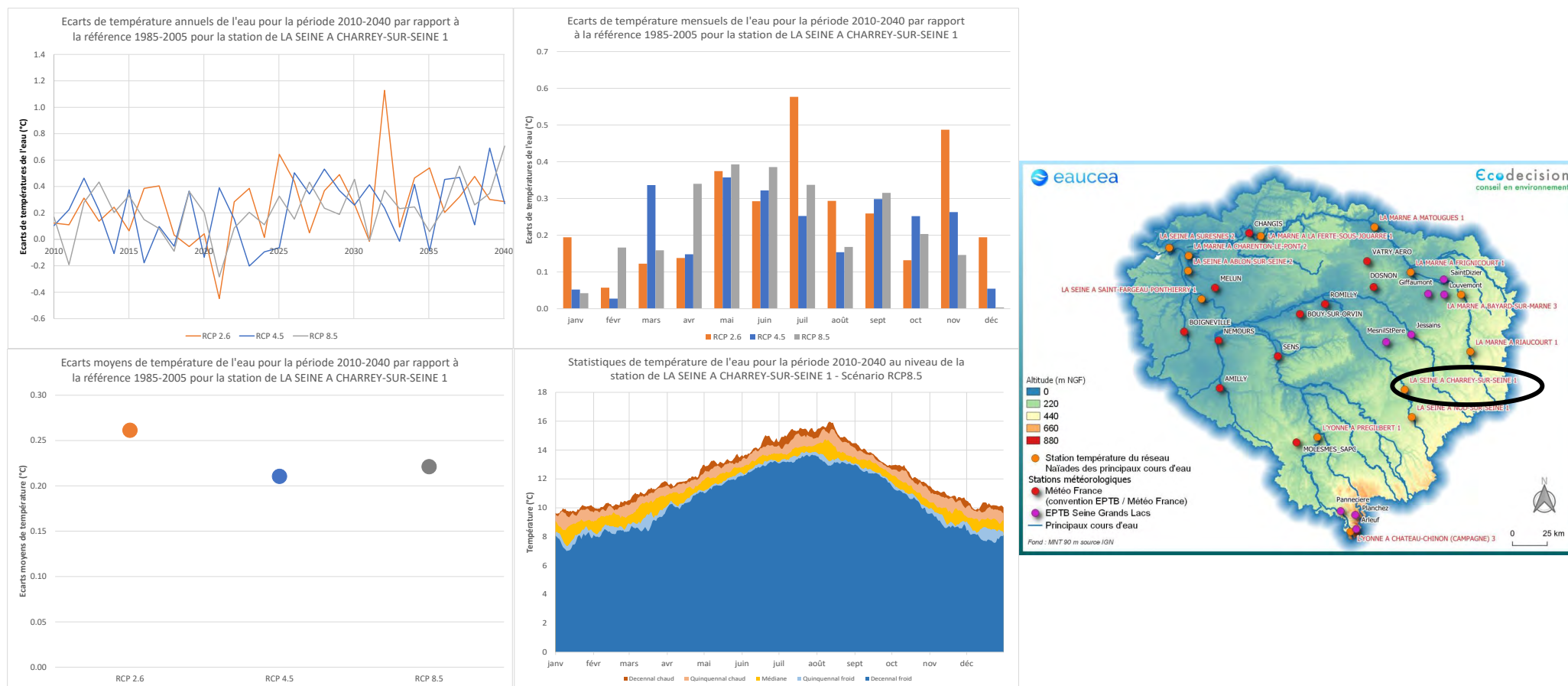


Figure 87 : Evolution de la température de l'eau de la Seine Charrey-sur-Seine à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005

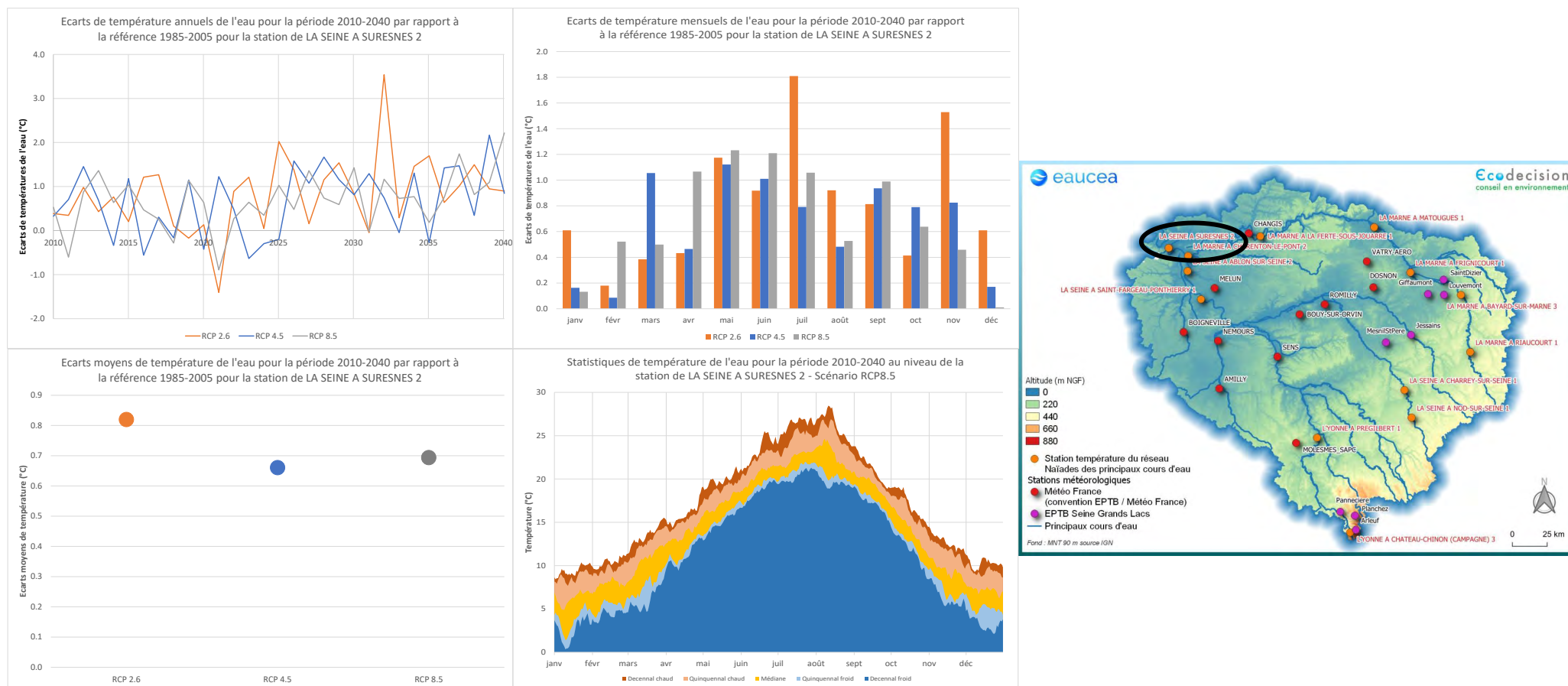


Figure 88 : Evolution de la température de l'eau de la Seine à Suresnes 2 à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005

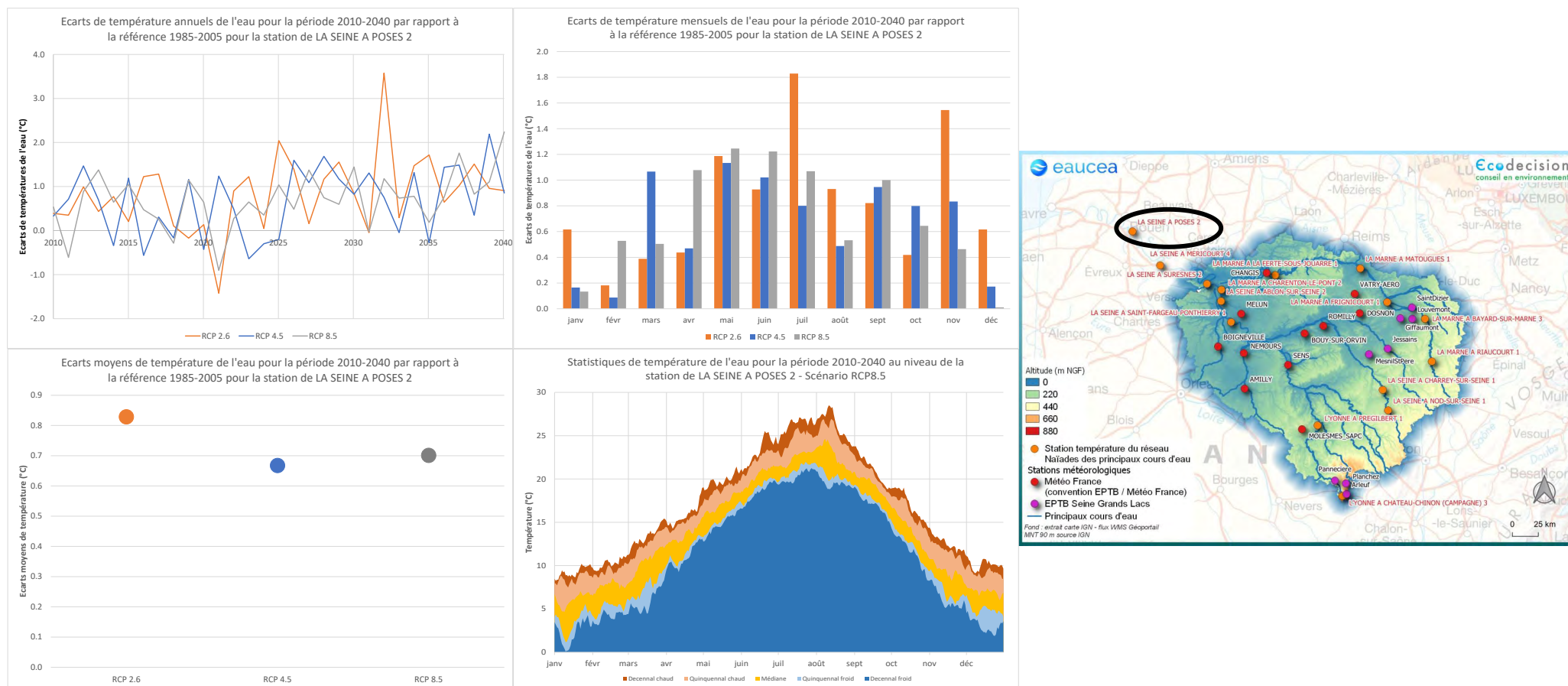


Figure 89 : Evolution de la température de l'eau de la Seine à Poses 2 à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005

4.3.2.3 Période 2040-2070

Pour la période 2040-2070, il est simulé (cf. figures 90 à 92 et tableau 8) :

- pour la partie amont du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Charrey-sur-Seine, cf. figure 90) :
 - une augmentation moyenne de la température de l'eau comprise entre +0,4 et +0,6°C, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette augmentation s'exprimerait majoritairement pour les mois de mai à novembre avec des augmentations pouvant atteindre de +0,4 à +0,7°C selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 (cas le plus défavorable) des températures de l'eau en juillet et août pouvant atteindre près 16 °C vers pour des périodes décennales chaudes (temps de retour de 10 ans) ;
- pour la partie aval du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Suresnes, cf. figure 91) :
 - une augmentation moyenne de la température de l'eau comprise entre +1,2 et +1,9°C, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette augmentation s'exprimerait majoritairement pour les mois de mai à novembre avec des augmentations pouvant atteindre de +1,5 à +2,3°C selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 des températures de l'eau en juillet et août supérieures à 25°C pour des périodes quinquennale et décennale chaudes ;
- pour la partie à l'aval du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Poses, cf. figure 92) :
 - des augmentations similaires à la station de Suresnes ;
 - une augmentation moyenne de la température de l'eau comprise entre +1,2 et +1,9°C, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette augmentation s'exprimerait majoritairement pour les mois de mai à novembre avec des augmentations pouvant atteindre de +1,5 à +2,3°C selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 des températures de l'eau en juillet et août supérieures à 25°C pour des périodes quinquennale et décennale chaudes.

2040-2070			
Partie du bassin	Amont périmètre EPTB	Aval périmètre EPTB	Aval hors périmètre EPTB
Augmentation moyenne annuelle (°C)	+0,4 à +0,6	+1,2 à +1,9	
Augmentation maximale mensuelle (°C)	Mai à novembre +0,4 à +0,7	Mai à novembre +1,5 à +2,3	
Périodes de températures maximales	Près de 16°C en juillet et août decennal chaud	Supérieure à 25°C en juillet et août quinquennal et decennal chaud	

Tableau 8 : Bilan des évolutions de températures de l'eau simulées à l'horizon 2040-2070

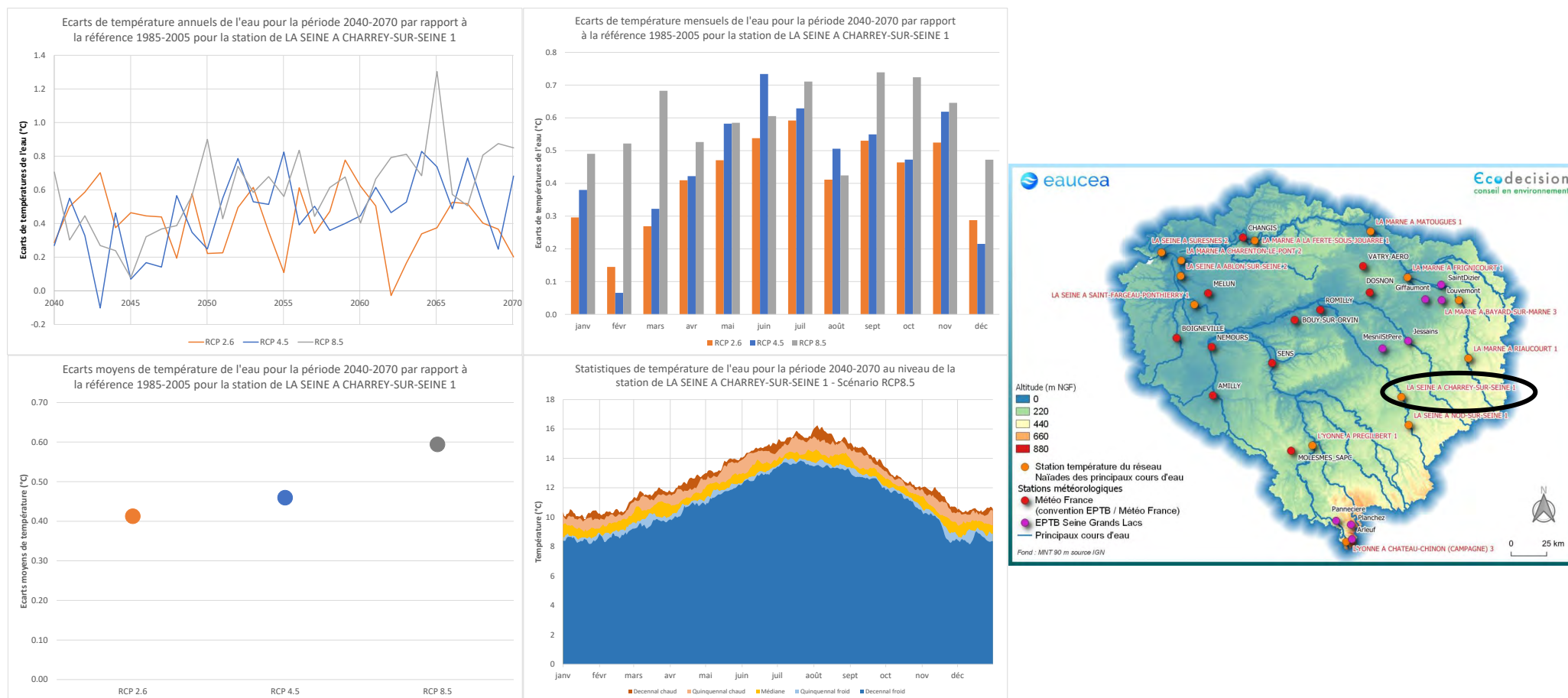


Figure 90 : Evolution de la température de l'eau de la Seine Charrey-sur-Seine à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005

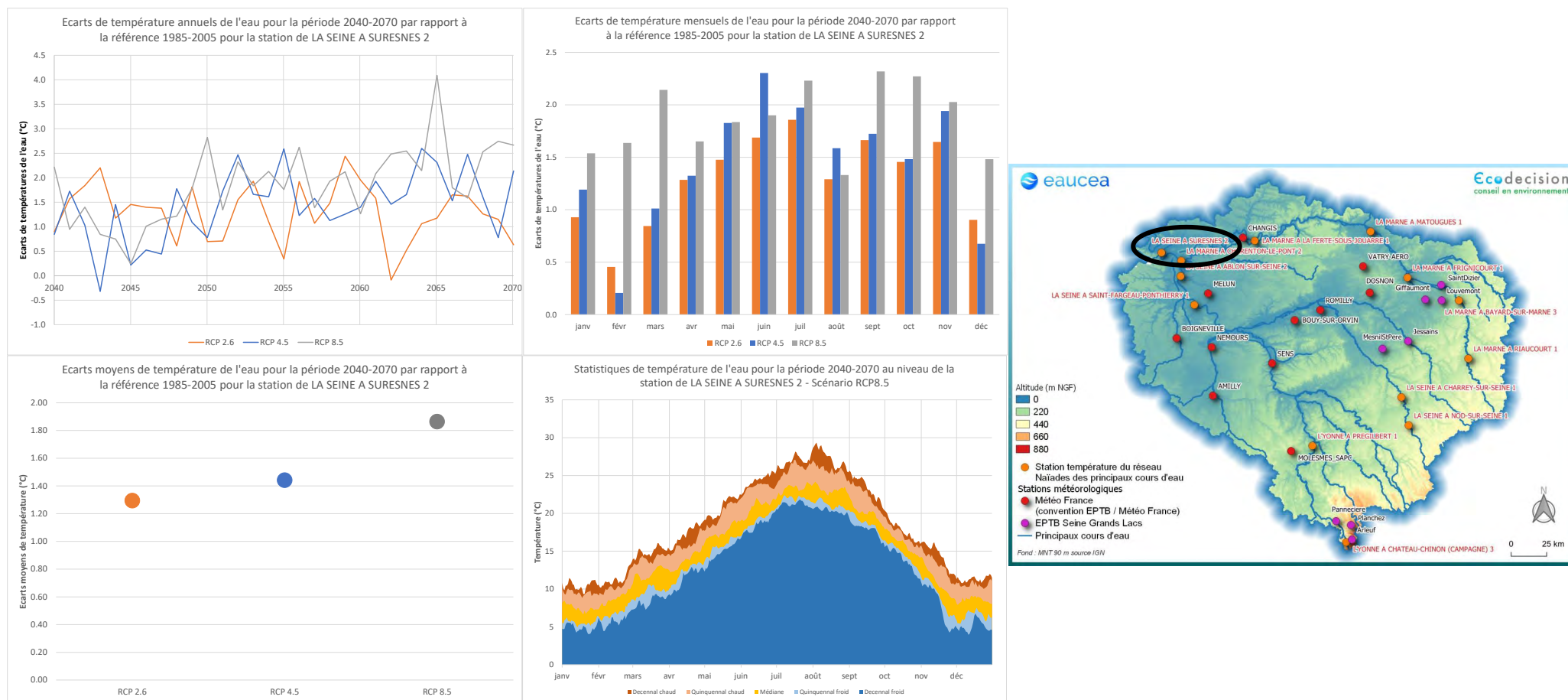


Figure 91 : Evolution de la température de l'eau de la Seine à Suresnes 2 à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005

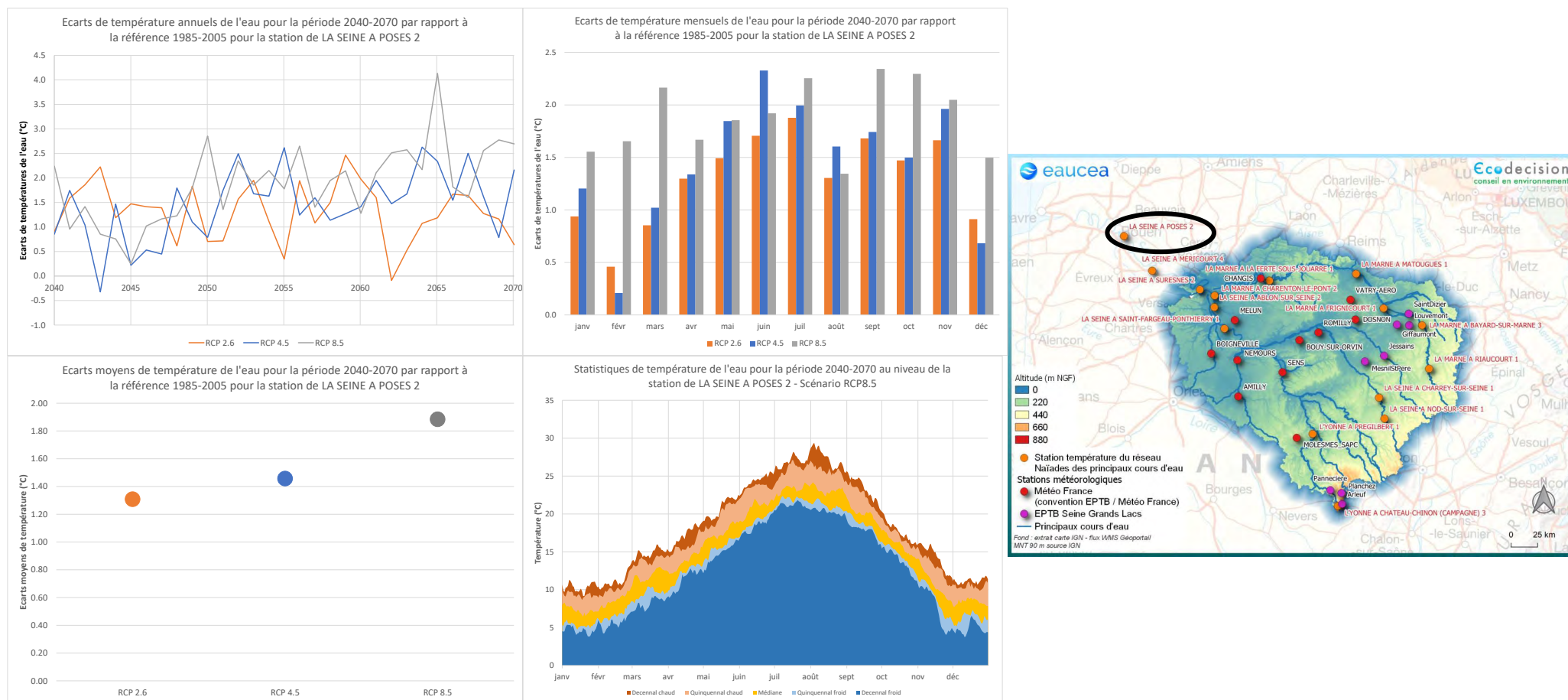


Figure 92 : Evolution de la température de l'eau de la Seine à Poses 2 à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005

4.4 Oxygène dissous

4.4.1 Calage du modèle

La concentration en oxygène dissous de l'eau constitue l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques.

La concentration en oxygène dissous varie de manière journalière et saisonnière. Elle dépend de nombreux facteurs physiques et chimiques tels que :

- la pression partielle en oxygène de l'atmosphère ;
- la température de l'eau ;
- la salinité ;
- la pénétration de la lumière ;
- l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriments.

Cette concentration en oxygène dissous est également fonction de la vitesse d'appauvrissement du milieu en oxygène par l'activité des organismes aquatiques (respiration/photosynthèse) et les processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans l'eau.

Globalement, plus la concentration en oxygène dissous (OD) est proche de la saturation, plus l'aptitude de la rivière à absorber la pollution est grande :

- une valeur inférieure à 1 mg d'O₂ par litre indique un état proche de l'anaérobie. Cet état se produit lorsque les processus d'oxydation des déchets minéraux, de la matière organique et des nutriments consomment plus d'oxygène que celui disponible. Une faible teneur en oxygène dissous provoque une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui se libèrent des sédiments ;
- une valeur de 1 à 2 mg d'O₂ par litre indique une rivière fortement polluée mais de manière réversible ;
- une teneur de 4 à 6 mg d'O₂ par litre caractérise une eau de bonne qualité ;
- des teneurs supérieures à la teneur naturelle de saturation en oxygène indiquent une eutrophisation⁴ du milieu se traduisant par une activité photosynthétique intense.

Les espèces de poissons sensibles peuvent être perturbées par une teneur en oxygène inférieure à 4 mg/l. La concentration en oxygène dissous peut être exprimée en mg d'O₂ par litre ou en % de saturation en oxygène.

⁴ L'eutrophisation est une forme de pollution qui se produit lorsqu'un milieu aquatique reçoit trop de matières nutritives assimilables par les algues et que celles-ci prolifèrent. Cette eutrophisation peut être naturelle ou peut aussi être le résultat des activités humaines (apport d'effluents domestiques, industriels et/ou agricoles). On parle alors de dystrophisation.

Ainsi, un déséquilibre des mesures par rapport à l'état de saturation indique un déséquilibre du système, en général lié aux activités anthropiques (rejets de station d'épuration, apports par lessivage des sols...).

Sur le territoire de l'EPTB Seine et en l'absence de conditions chimiques particulières, comme celles pouvant par exemple être rencontrées au niveau de l'estuaire avec des fortes valeurs de turbidité et de salinité, le principal paramètre conditionnant la concentration à saturation correspond à la température de l'eau.

Les valeurs de solubilité de l'oxygène dissous ($Cs(t)$) à 1013 mbar, à turbidité et salinité nulle peuvent être obtenues avec une erreur très inférieure à 1 % au moyen de la formule suivante (source Sandre) :

$$Cs(t) = 14,64 - 0,4227 \times t(eau) + 0,009937 \times t(eau)^2 - 0,0001575 \times t(eau)^3 + 0,000001125 \times t(eau)^4$$

Le taux de saturation à proprement dit est obtenu en fonction de cette solubilité $Cs(t)$ et de la teneur en oxygène dissous réellement mesurée par la formule suivante :

$$Taux\ de\ saturation = \frac{O_2\ dissous \times 100}{Cs(t)}$$

Ainsi la teneur à saturation de l'eau en oxygène dissous sur le territoire de l'EPTB est très fortement liée à la température de l'eau et donc indirectement à la température de l'air comme présenté au paragraphe 4.2.3. Sur la base des simulations de températures de l'eau effectuées précédemment, il est donc possible de déterminer avec précision de façon journalière et pour les différentes stations de suivi de la température de l'eau, les valeurs actuelles d'oxygène à saturation et d'identifier d'éventuels dysfonctionnements (écarts par rapport à cette valeur) mais aussi d'apprécier l'évolution future du taux d'oxygène dissous.

Les résultats obtenus montrent :

- pour les stations de mesures localisées en amont du territoire de l'EPTB (cf. **figure 93**) et en amont des lacs réservoirs des situations contrastées avec localement des déséquilibres importants pouvant avoir été corrigés ou non. A noter aussi que ce secteur amont correspond à un secteur karstique avec de nombreuses pertes et résurgences et donc une alternance de l'eau en milieu superficiel et souterrain, pouvant entraîner des modifications locales importantes de l'équilibre théorique à saturation ;
- pour les stations de mesures localisées en aval du territoire de l'EPTB et en aval des lacs réservoirs, des situations majoritairement à l'équilibre avec cependant quelques déséquilibres ponctuels pouvant avoir lieu en période estivale.

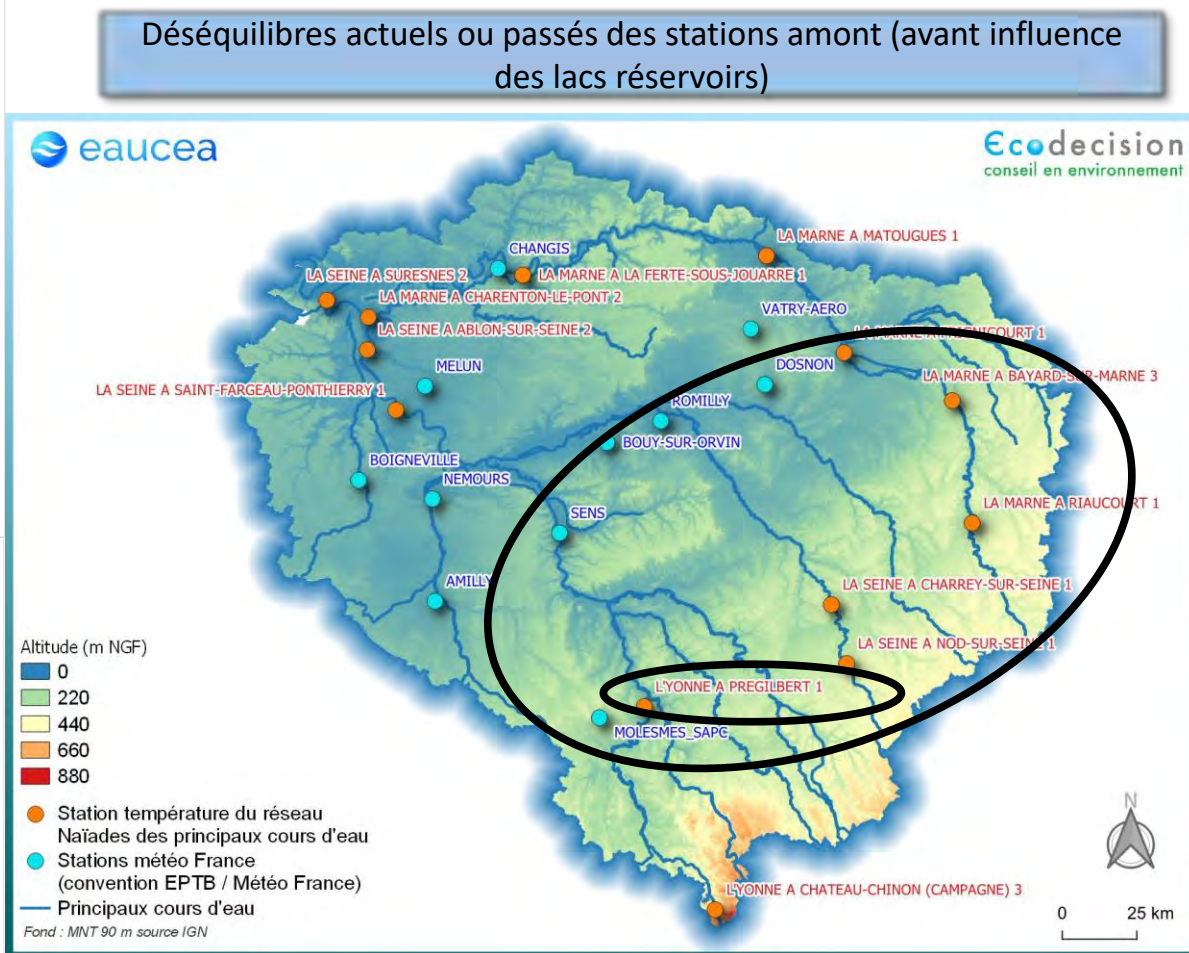
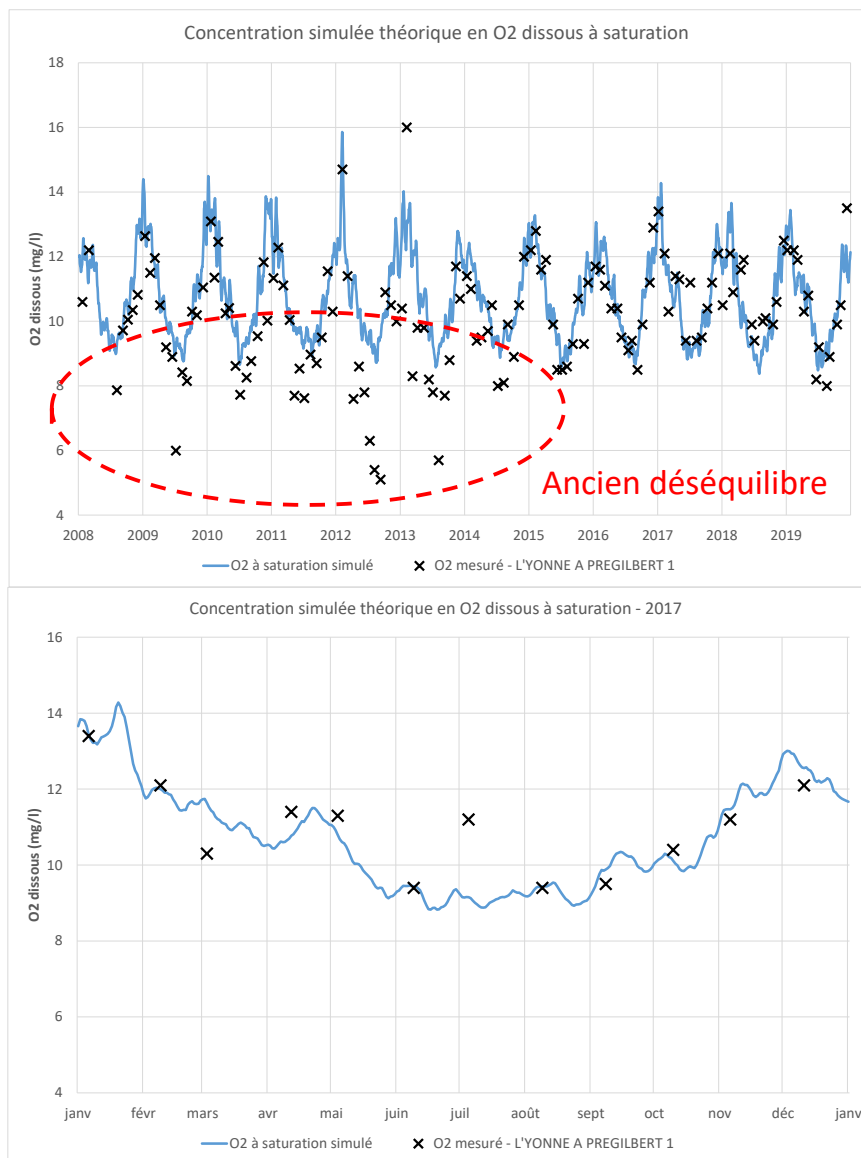


Figure 93 : Comparaison entre les concentrations simulées théoriques en O2 dissous à saturation et les données mesurées pour la station de l'Yonne à Pregilbert1

Equilibre à saturation des stations aval (sous influence des lacs réservoirs)
ou déséquilibres ponctuels

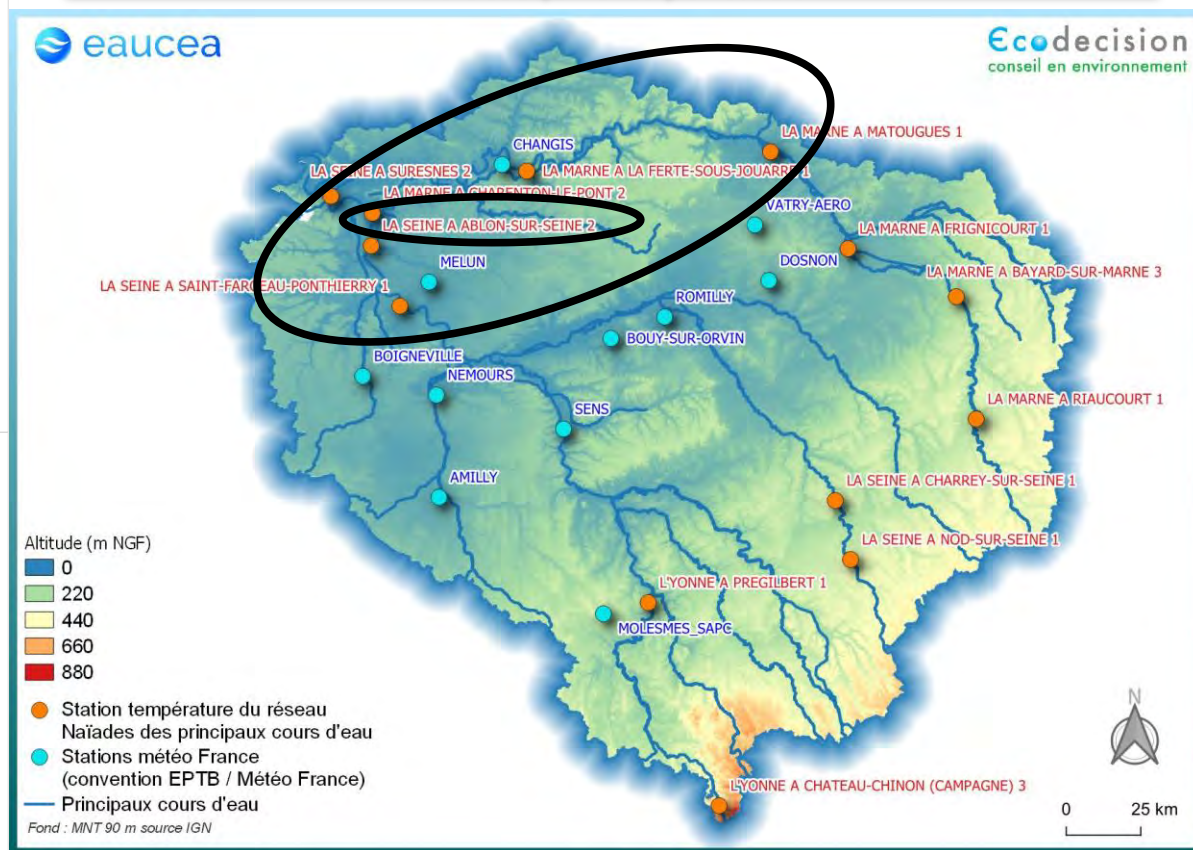
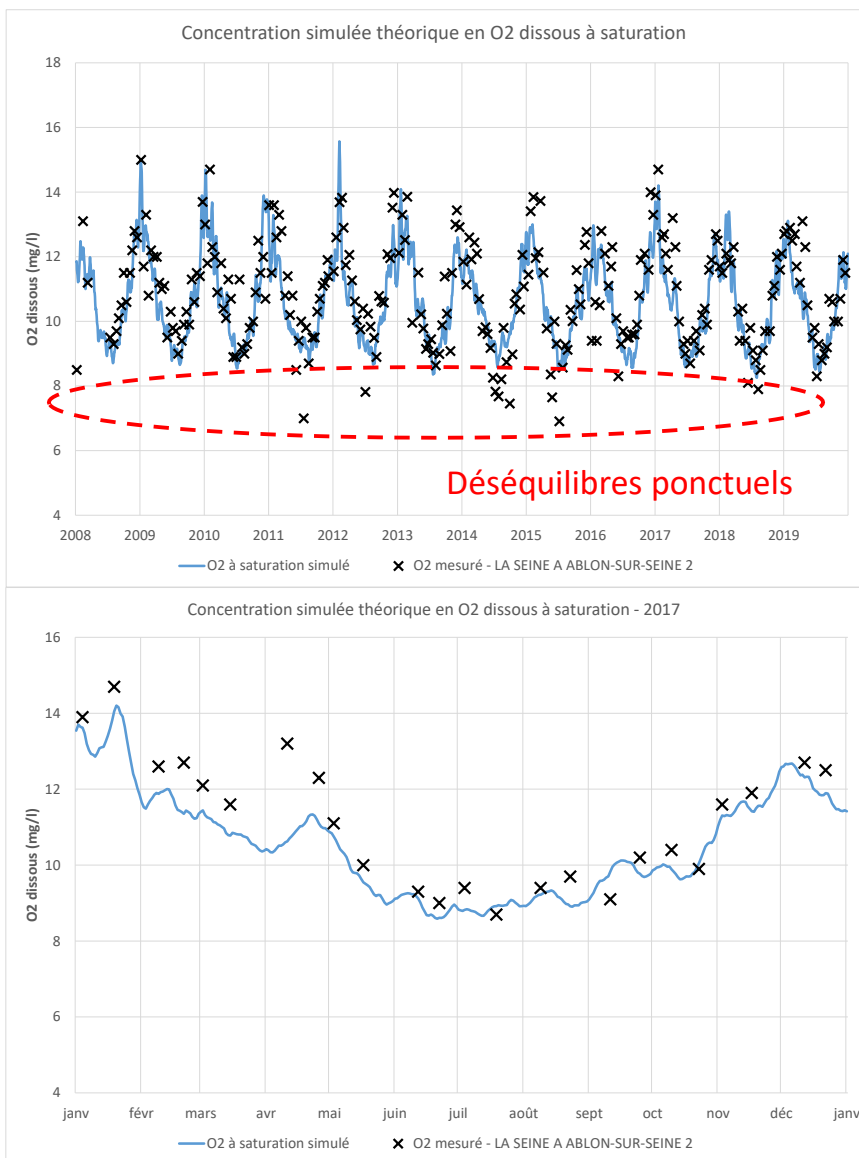


Figure 94 : Comparaison entre les concentrations simulées théoriques en O2 dissous à saturation et les données mesurées pour la station de la Seine à Ablon-sur-Seine

La cartographie de l'état écologique des eaux superficielles du bassin de la Seine en 2019 montre, sur les axes réalimentés par les lacs réservoirs du périmètre de l'EPTB Seine Grands Lacs, des états globalement bons à moyens pouvant ponctuellement atteindre un niveau médiocre. Sur partie aval du périmètre de l'EPTB, une zone importante de mauvais état est présente au niveau de la Ville de Rouen, correspondant à la station qualité de Poses 2.

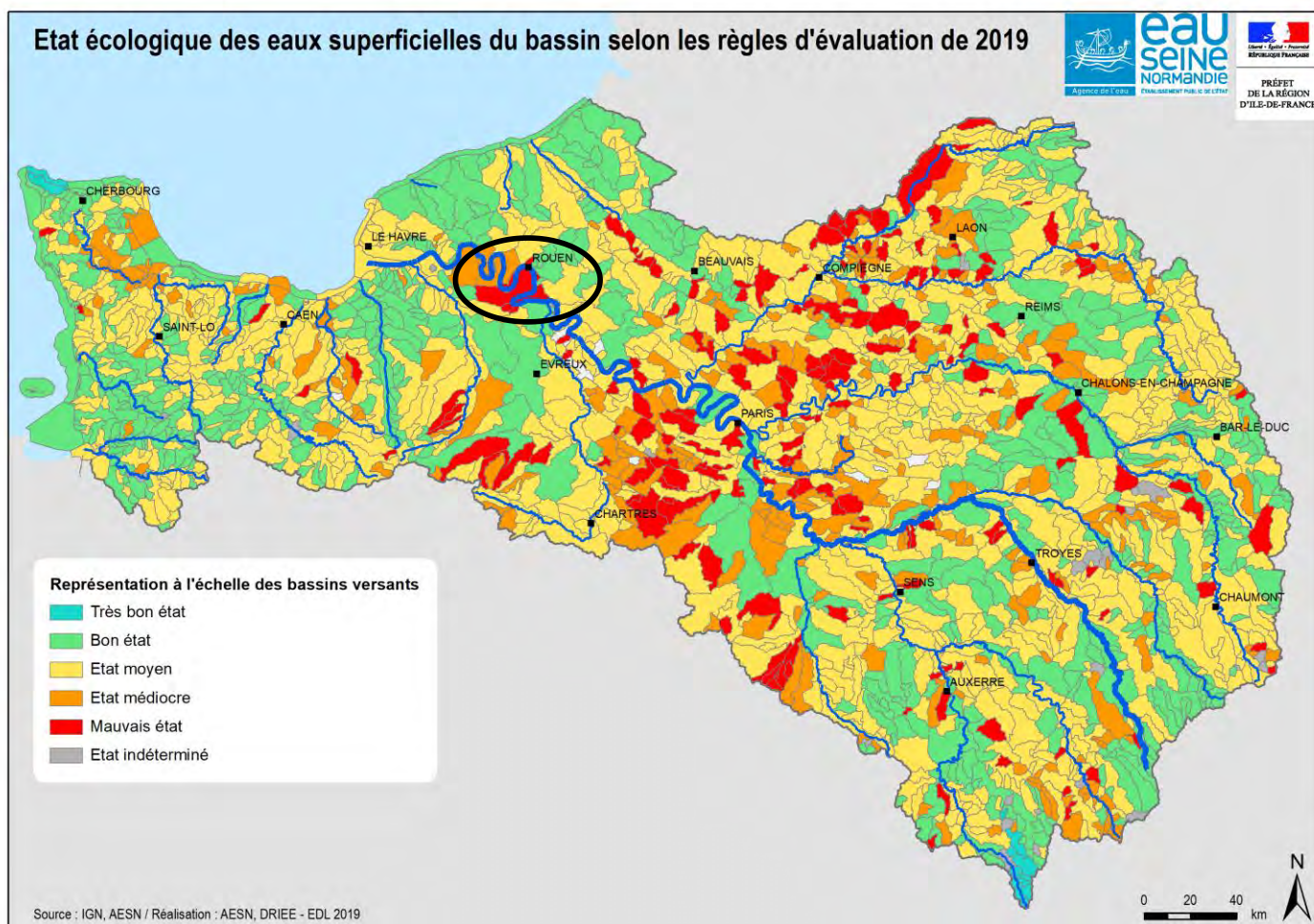


Figure 95 : Etat écologique des eaux superficielles du bassin de la Seine selon les règles d'évaluation de 2019

Une étude réalisée par le PIREN Seine en 2019 (*Ecological Functioning of the Seine River : From Long-Term modelling Approaches to High-Frequency Data Analysis*, J. Garnier et al., **2019**) précise l'évolution de la qualité de ce point de mesure.

Les variations observées (cf. **figure 96**) montrent une augmentation progressive du taux d'oxygène dissous depuis 1971 en lien avec une diminution progressive des teneurs en azote ammoniacal (N-NH_4^+) et en phosphore (P-PO_4) et donc en chlorophylle a. Ces variations s'expliquent par une baisse des apports anthropiques en nutriments (azote et phosphore) entraînant une baisse de la prolifération phytoplanctonique et donc une baisse de la consommation en oxygène dissous par décomposition de la matière organique. Les taux en silice, liés aux apports naturels de bassin, restent globalement stables (sauf fortes diminution ponctuelles lors des pics de consommation du phytoplancton) et les teneurs en nitrates (N-NO_3^-) montrent quant à elle une augmentation progressive.

J. Garnier et al.

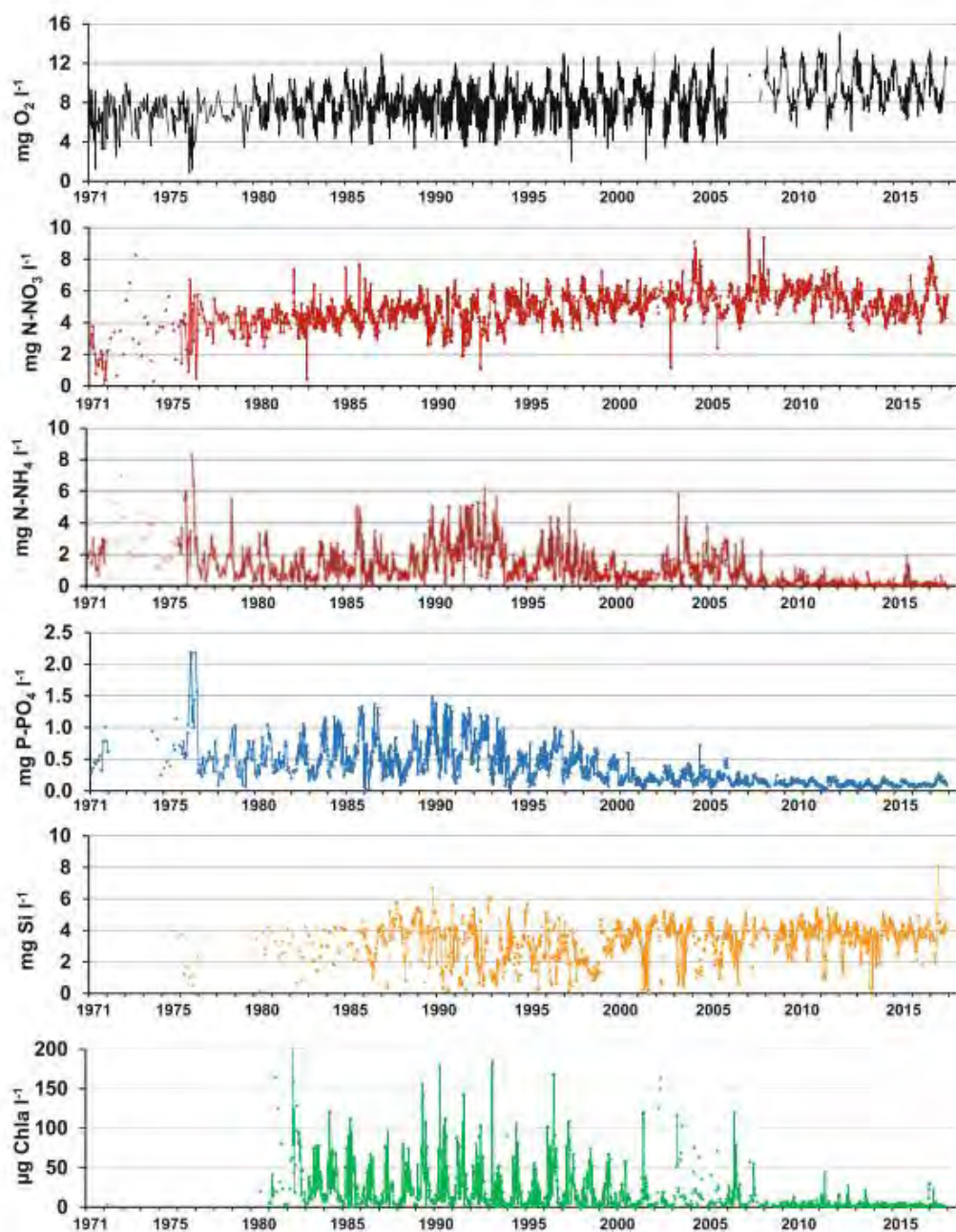


Fig. 5 Long-term variations in observed concentrations of water quality (1971–2017) at the outlet of the Seine basin (Poses): oxygen, nitrate, ammonium, phosphates, dissolved silica, phytoplankton biomass (in chlorophyll a, Chla)

Figure 96 : Variations de la qualité de l'eau observées au niveau de la station de Poses (J. Garnier et al., 2019)

Sur la période récente, bien que le taux d'oxygène dissous présente une augmentation progressive, la comparaison entre la simulation de la concentration à saturation et les mesures de terrain, montre encore de nombreux déséquilibres en période estivale en lien avec le mauvais état écologique de ce secteur (cf. figure 95).

Déséquilibres passés et actuels en aval du périmètre de l'EPTB (sous influence des lacs réservoirs)

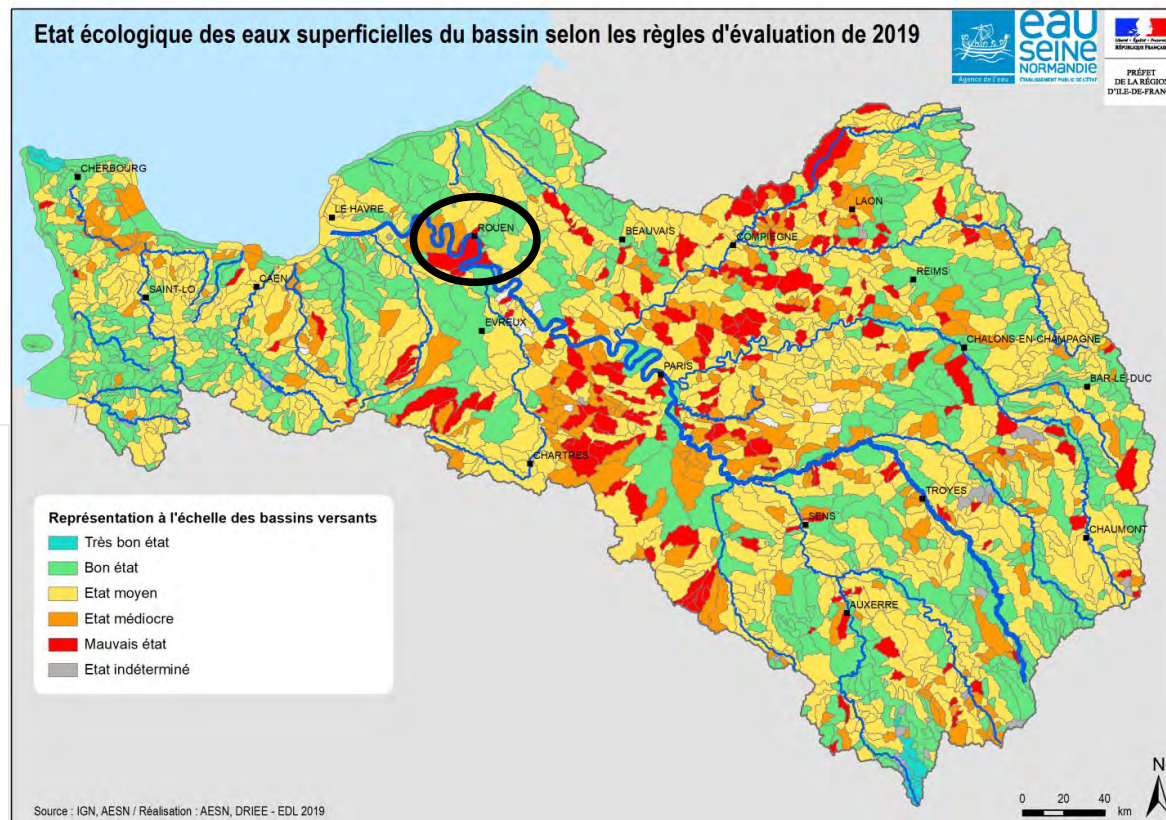
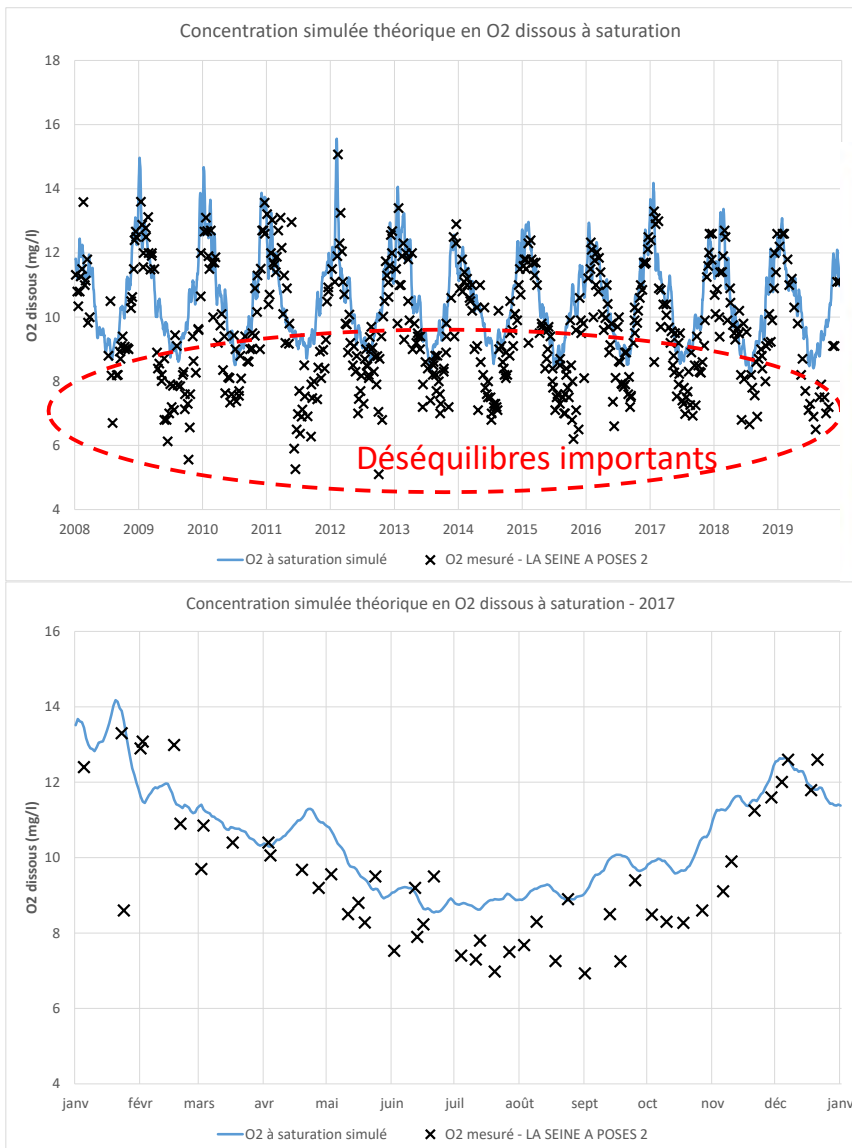


Figure 97 : Comparaison entre les concentrations simulées théoriques en O2 dissous à saturation et les données mesurées pour la station de la Seine à Poses

4.4.2 Changement climatique

4.4.2.1 Scénarios de référence

Les données de température de l'eau de référence pour l'appréciation des changements climatiques sur le taux d'oxygène à saturation correspondent à celle présentées au paragraphe 4.3.2 issues du traitement des scénarios RCP du modèle Aladin.

Il est ainsi possible de simuler l'évolution future de la teneur en oxygène dissous, à saturation, de l'eau pour les différentes stations présentes à différents horizons. Afin de garder une cohérence avec les données présentées précédemment, les comparaisons présentées ci-dessous ont été effectuées pour des périodes de 30 ans :

- **1985-2005** : situation dite contemporaine (données de référence des scénarios DRIAS) ;
- **2010-2040** : futur proche ;
- **2040-2070** : encadrement 2050.

4.4.2.2 Période 2010-2040

Pour la période 2010-2040, il est simulé (cf. figures 98 à 100 et tableau 9) :

- pour la partie amont du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Charrey-sur-Seine, cf. figure 98) :
 - une diminution moyenne de la concentration en oxygène dissous à saturation comprise entre -0,05 et -0,07 mg/l, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette diminution s'exprimerait majoritairement pour les mois de mai à juillet et novembre avec des diminutions pouvant atteindre -0,06 à -0,12 mg/l selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 (cas le plus défavorable) des concentration en oxygène dissous à saturation de l'eau en août pouvant atteindre près de 10 mg/l pour des périodes décennales chaudes (temps de retour de 10 ans) ;
- pour la partie aval du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Suresnes, cf. figure 99) :
 - une diminution moyenne de la concentration en oxygène dissous à saturation comprise entre -0,12 et -0,18 mg/l, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette diminution s'exprimerait majoritairement pour les mois de mai à juillet et novembre avec des diminutions pouvant atteindre -0,1 à -0,4 mg/l selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 des concentration en oxygène dissous à saturation de l'eau en août pouvant atteindre près de 8 mg/l pour des périodes décennales chaudes ;

- pour la partie à l'aval du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Poses, cf. figure 100) :
 - des diminutions similaires à la station de Suresnes ;
 - une diminution moyenne de la concentration en oxygène dissous à saturation comprise entre -0,12 et -0,18 mg/l, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette diminution s'exprimerait majoritairement pour les mois de mai à juillet et novembre avec des diminutions pouvant atteindre -0,1 à -0,4 mg/l selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 des concentration en oxygène dissous à saturation de l'eau en août pouvant atteindre près de 8 mg/l pour des périodes décennales chaudes.

2010-2040			
Partie du bassin	Amont périmètre EPTB	Aval périmètre EPTB	Aval hors périmètre EPTB
Baisse moyenne annuelle (mg/l)	-0,05 à -0,07	-0,12 à -0,18	
Augmentation maximale mensuelle (mg/l)	Mai à juillet -0,06 à -0,12	Mai à juillet -0,1 à -0,4	
Périodes d'O ₂ dissous minimales	Près de 10 mg/l en août decennal chaud	Près de 8 mg/l en août decennal chaud	

Tableau 9 : Bilan des évolutions des concentrations en O₂ dissous à saturation simulées à l'horizon 2010-2040

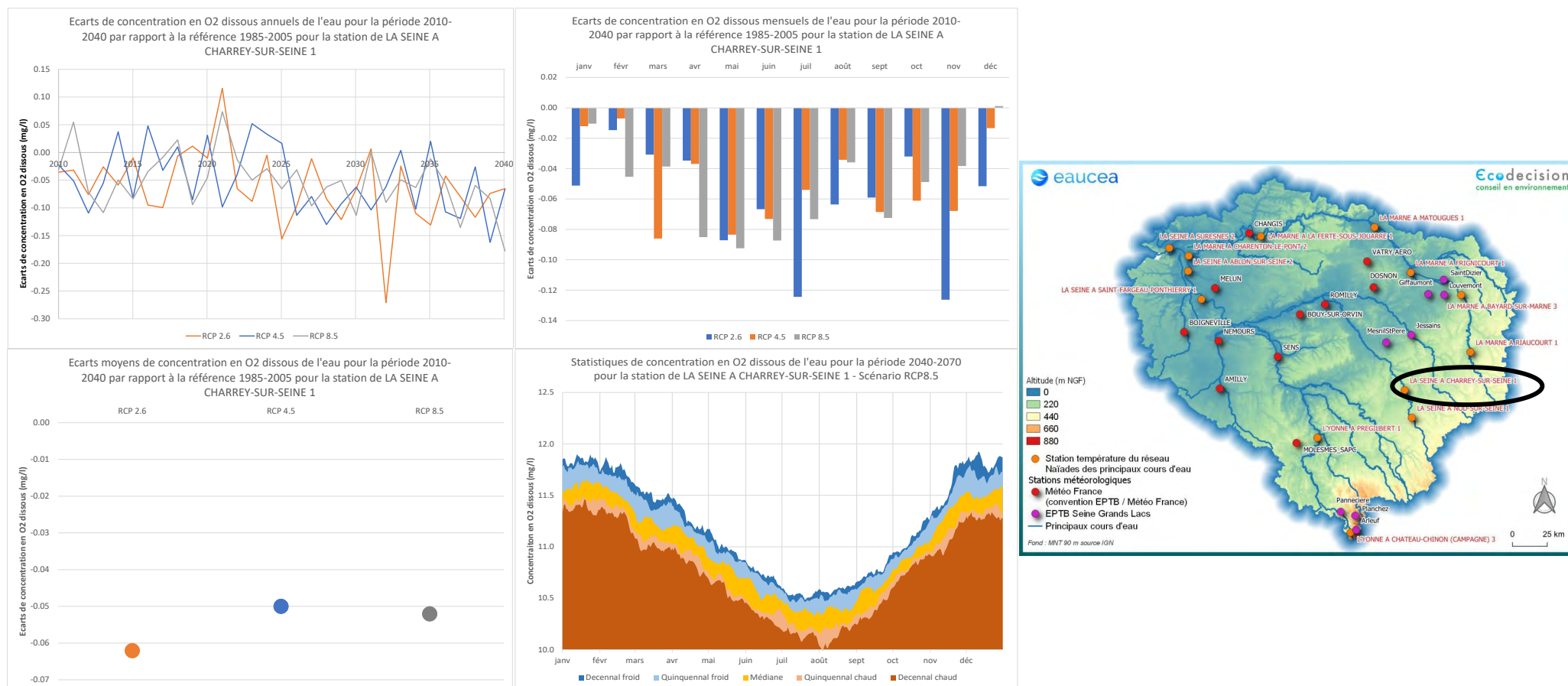


Figure 98 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Charrey-sur-Seine à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005

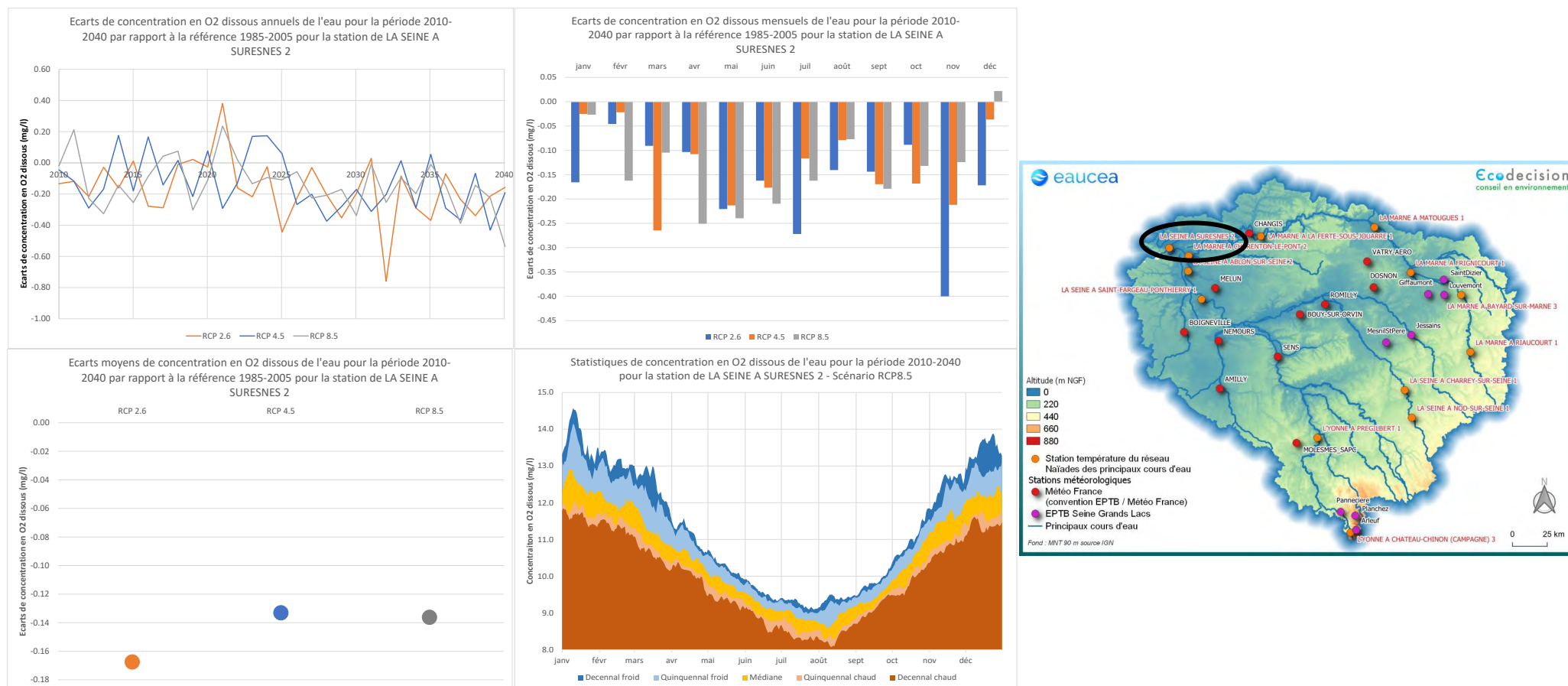


Figure 99 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Suresnes à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005

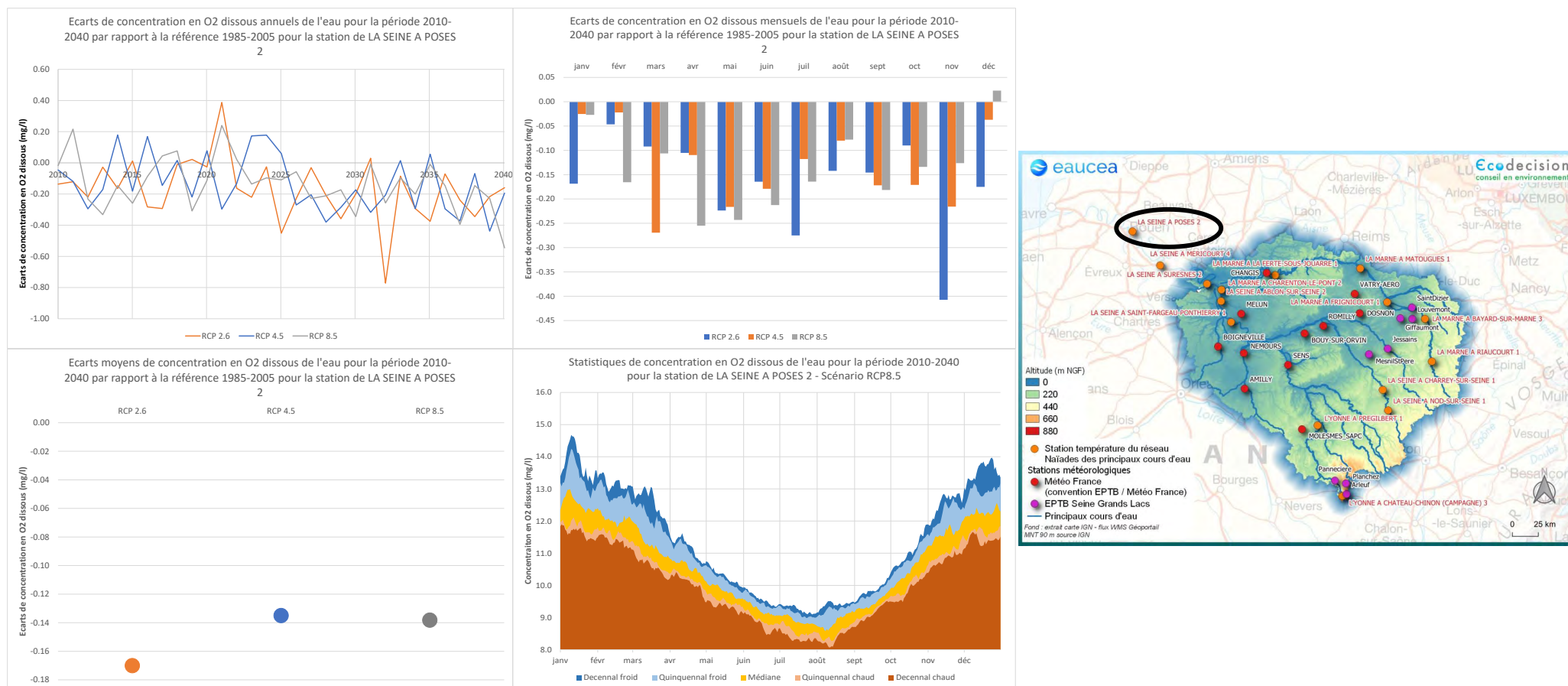


Figure 100 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Poses à l'horizon 2010-2040 comparativement à la période 1985-2005

4.4.2.3 Période 2040-2070

Pour la période 2040-2070, il est simulé (cf. figures 101 à 103 et tableau 10) :

- pour la partie amont du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Charrey-sur-Seine, cf. figure 101) :
 - une diminution moyenne de la concentration en oxygène dissous à saturation comprise entre -0,10 et -0,16 mg/l, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette diminution s'exprimerait majoritairement pour les mois d'avril à novembre avec des diminutions pouvant atteindre -0,10 à -0,18 mg/l selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 (cas le plus défavorable) des concentration en oxygène dissous à saturation de l'eau en août pouvant atteindre près de 10 mg/l pour des périodes décennales chaudes (temps de retour de 10 ans) ;
- pour la partie aval du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Suresnes, cf. figure 102) :
 - une diminution moyenne de la concentration en oxygène dissous à saturation comprise entre -0,25 et -0,45 mg/l, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette diminution s'exprimerait de façon hétérogène sur l'année avec des diminutions pouvant atteindre -0,2 à -0,5 mg/l selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 des concentration en oxygène dissous à saturation de l'eau en août pouvant atteindre près de 8 mg/l pour des périodes décennales chaudes ;
- pour la partie à l'aval du périmètre de l'EPTB (exemple de la Seine à Poses, cf. figure 103) :
 - des diminutions similaires à la station de Suresnes ;
 - une diminution moyenne de la concentration en oxygène dissous à saturation comprise entre -0,25 et -0,45 mg/l, toutes saisons confondues, selon les scénarios pris en compte,
 - cette diminution s'exprimerait de façon hétérogène sur l'année avec des diminutions pouvant atteindre -0,2 à -0,5 mg/l selon les scénarios,
 - pour le scénario RCP8.5 des concentration en oxygène dissous à saturation de l'eau en août pouvant atteindre près de 8 mg/l pour des périodes décennales chaudes.

2040-2070			
Partie du bassin	Amont périmètre EPTB	Aval périmètre EPTB	Aval hors périmètre EPTB
Baisse moyenne annuelle (mg/l)	-0,10 à -0,16	-0,25 à -0,45	
Augmentation maximale mensuelle (mg/l)	Avril à novembre -0,10 à -0,18	Hétérogène sur l'année -0,2 à -0,5	
Périodes d'O ₂ dissous minimales	Près de 10 mg/l en août decennal chaud	Près de 8 mg/l en août decennal chaud	

Tableau 10 : Bilan des évolutions des concentrations en O₂ dissous à saturation simulées à l'horizon 2040-2070

Ces baisses prévisionnelles pour la Seine à Poses (maximum mensuel de -0,5 mg/l pour la période 2040-2070) restent faibles par rapports aux baisse liées aux effets anthropiques directs qui peuvent atteindre plus de 2 à 3 mg/l malgré des teneurs en nutriments en fortes baisses (cf. figures 96 et 97).

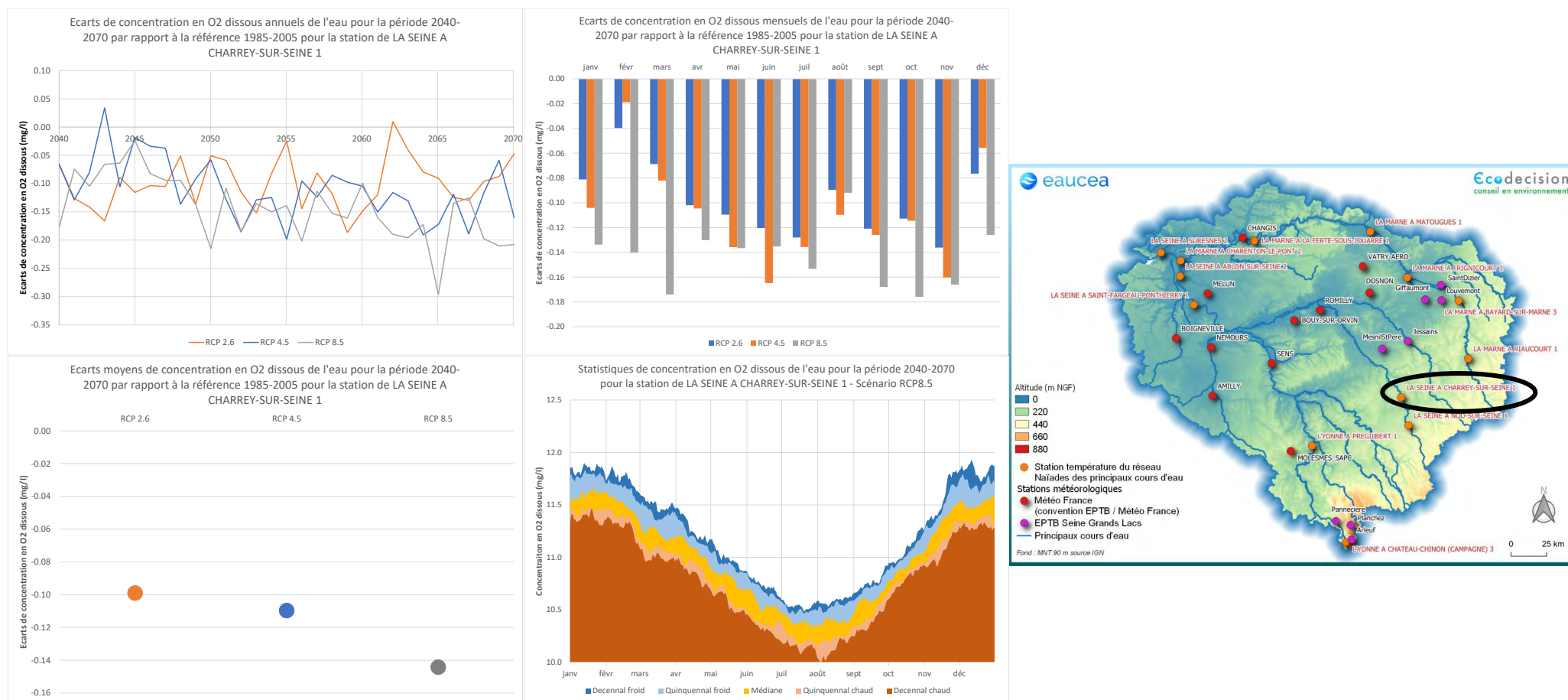


Figure 101 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Charrey-sur-Seine à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005

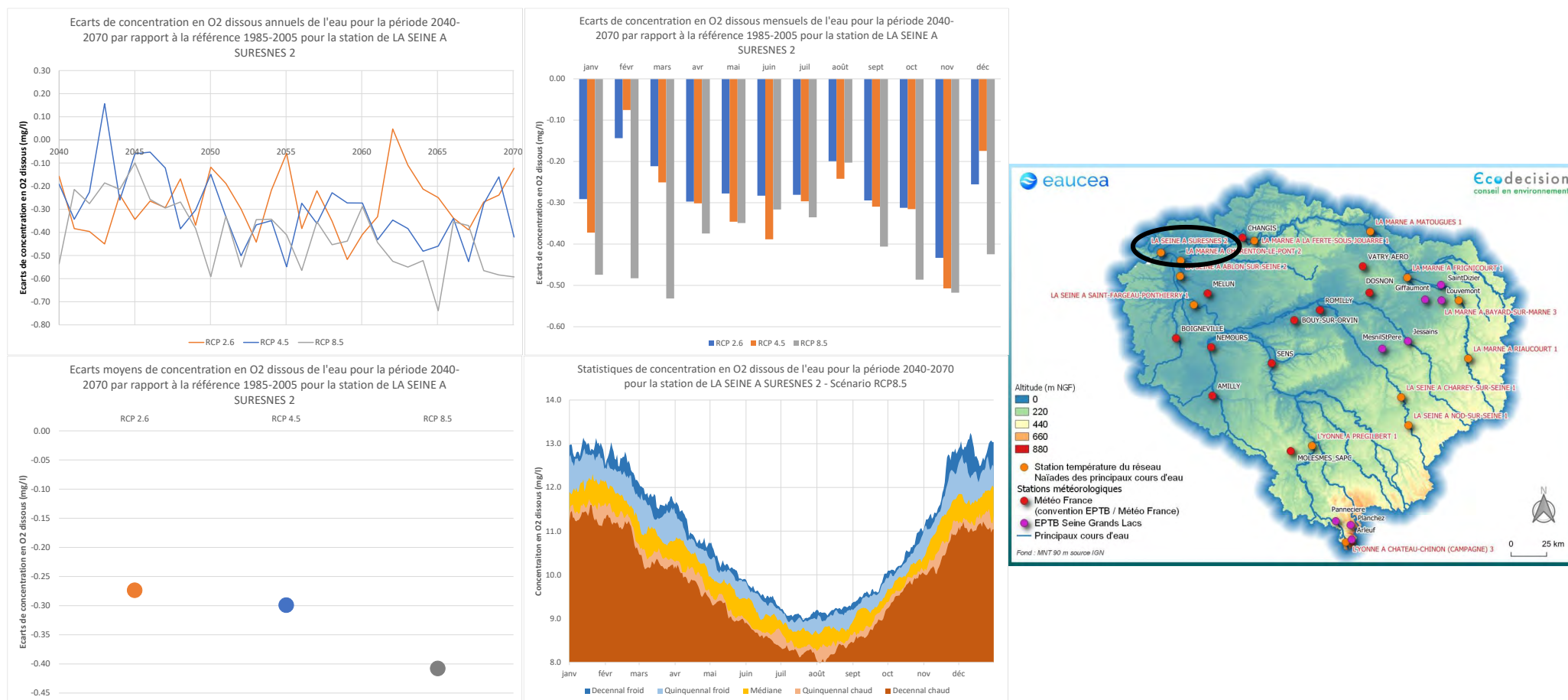


Figure 102 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Suresnes à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005

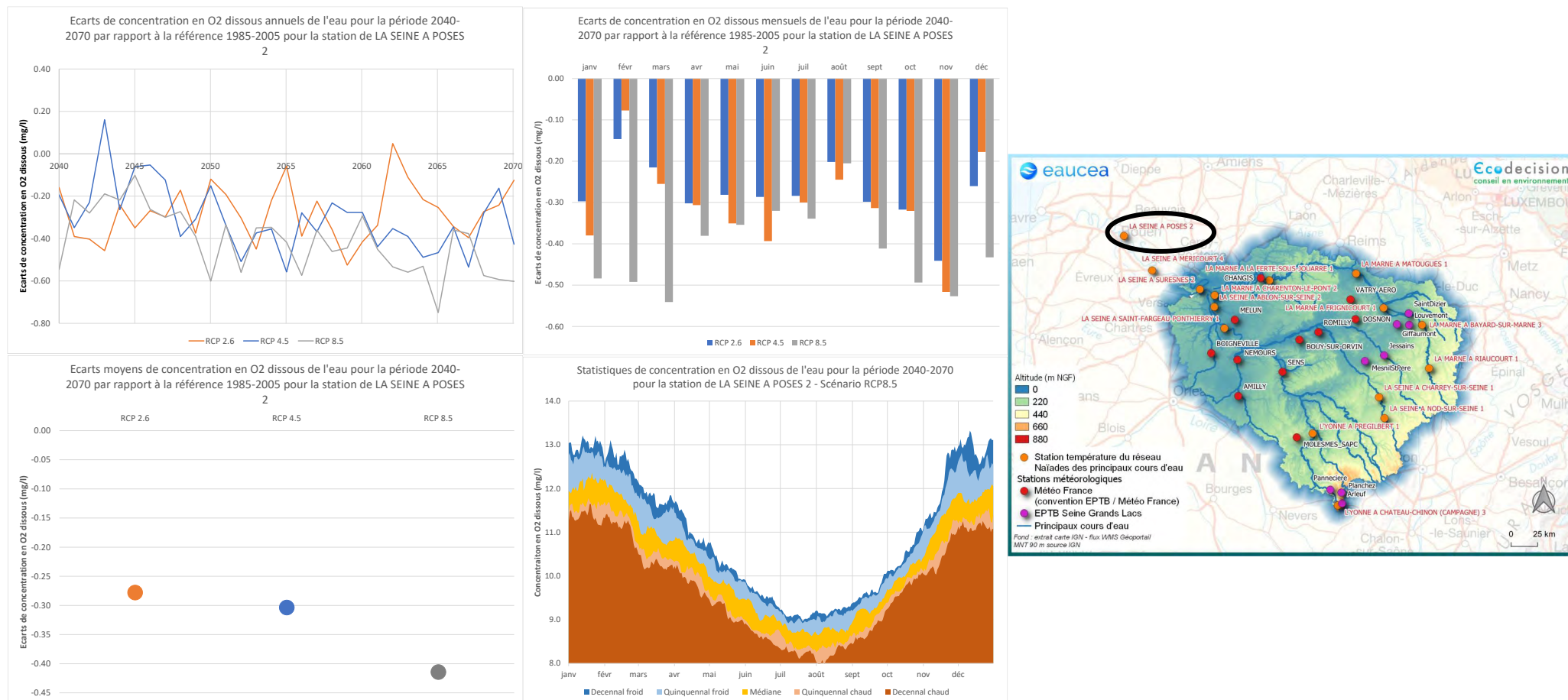


Figure 103 : Evolution de la concentration en O2 dissous à saturation de l'eau de la Seine Poses à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période 1985-2005

4.5 Nitrates et phosphore

4.5.1 Origine des apports

Le bassin versant de la Seine est quasi-totalité, localisé sur une des zones les plus fertiles de l'Europe de l'ouest, « le Bassin Parisien ».

Jusqu'au début du 20^{ème} siècle, la polyculture et l'élevage dominaient partout en France. Les seules sources d'apports en fertilisants correspondaient alors aux apports par le fumier et la fixation symbiotique des prairies et les légumineuses utilisées dans les systèmes de rotation des cultures. L'industrialisation des apports en azote et phosphore se développe en Ile-de-France vers le milieu du XX^e siècle du fait de la proximité de Paris et du développement des infrastructures de transport.

Après la seconde guerre mondiale, une politique de modernisation de l'agriculture est mise en place entraînant une augmentation de la taille des exploitations et une croissance rapide de l'utilisation d'engrais industriels. Cependant depuis les années 1990 une hausse progressive des prix des engrais associée à la mise en place de mesures agro-environnementales ont entraîné une inversion de la tendance des apports en fertilisants. Ainsi, les bilans en azote et phosphore du sol ont diminué devenant même négatifs pour le phosphore dans les terres arables (cf. figure 104).

The Seine Watershed Water-Agro-Food System: Long-Term Trajectories of C. ...

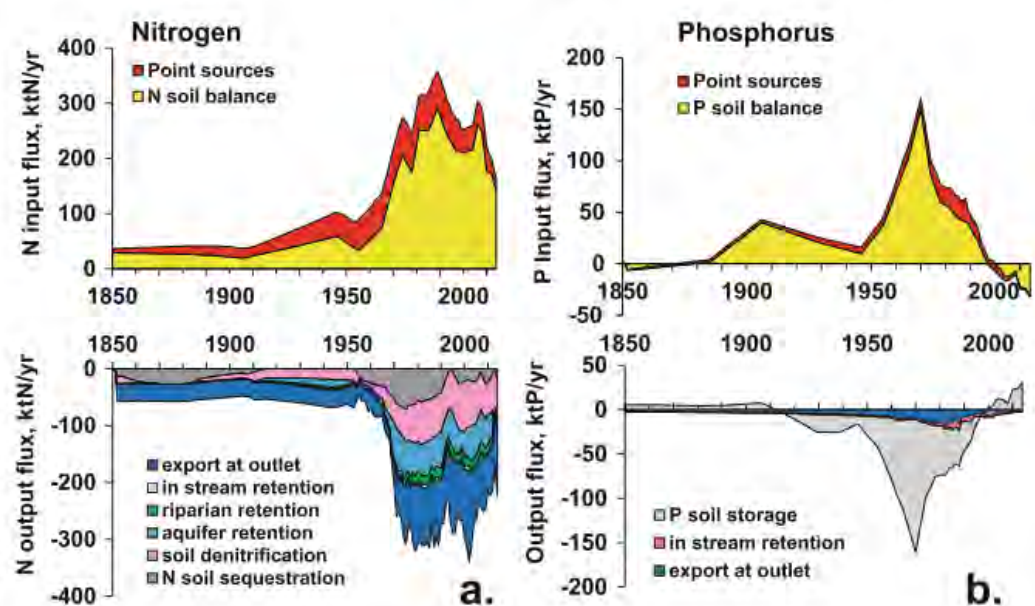


Fig. 13 Inputs and outputs of N (a) and P (b) fluxes from agricultural soils to the river network over the 1850–2015 period. The upper panels distinguish point sources and soil balance (excess inputs to harvest export); the lower panels show the fate of these inputs as export to the outlet of the watershed or retention/elimination processes in the soils, aquifers, riparian zones and streams

Figure 104 : Imports et exports des flux en azote et phosphores issus des pratiques agricoles du bassin de la Seine entre 1890 et 2015 (The Seine Watershed Water-Agro-Food System : Long-Term Trajectories of C, N and P Metabolism, G. Billen et al., 2019)

Une autre source d'apports important notamment pour le phosphore correspond aux rejets des effluents urbains et particulièrement de l'agglomération parisienne.

Depuis le début du XX^e siècle, l'histoire de la gestion des eaux usées domestiques parisienne est marquée par la course entre l'augmentation de la production d'eaux usées et les capacités de traitement. Vers la fin des années 60, environ 60 % des eaux usées collectées étaient rejetées au milieu naturel sans traitement entraînant de fortes consommations en oxygène dissous et des mortalités piscicoles importantes (associée à une baisse importante de la diversité écologique). La première station d'épuration biologique, mise en service en 1940 correspond à celle d'Achères, à 70 km en aval de Paris. Depuis, cette station s'est développée pour devenir la plus grande station d'épuration européenne (aujourd'hui appelée Seine aval, SAV). D'autres stations ont ensuite été créées et des nouveaux procédés de traitement déployés pour atteindre une élimination complète non seulement du carbone, mais aussi de l'azote et du phosphore (cf. **figure 105**).

J. Garnier et al.

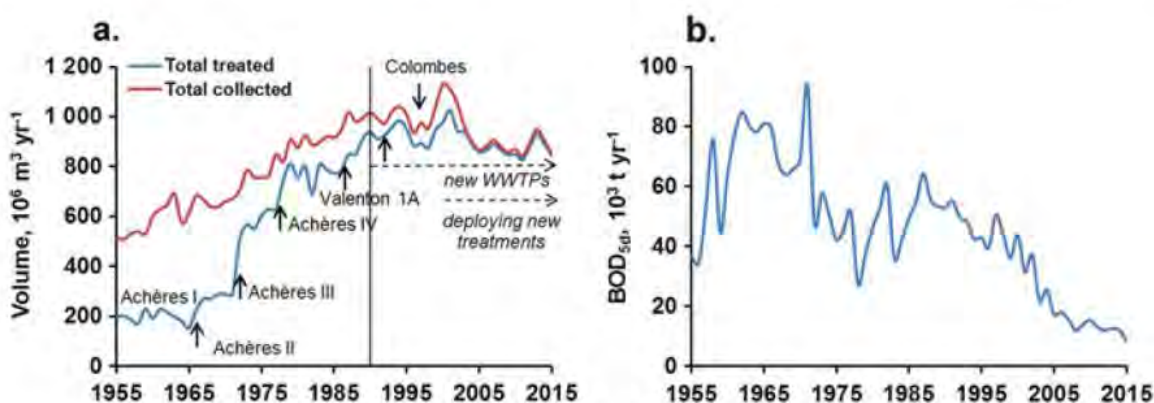
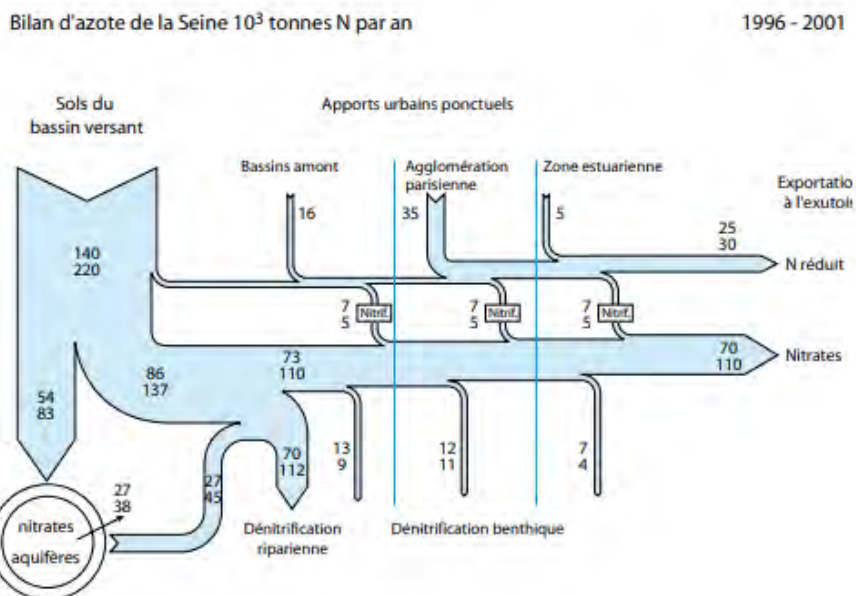


Fig. 3 Long-term trajectories 1955–2015: (a) of collected and treated volumes in the SIAAP stations of the Paris conurbation, (b) of BOD load for the volume treated (source; SIAAP). NB the decrease in collected wastewater (after 2005 in (a)) stems from a decrease in domestic water use

Figure 105 : Evolution des volumes collectés et des capacités de traitement de l'agglomération parisienne de 1955 à 2015 (Ecological functioning of the Seine River : From Long-Term Modelling Approaches to High-Frequency data Analysis, J. Garnier et al., 2019)

Les études menées par le PIREN Seine montrent que les apports à la Seine en azote proviennent principalement des sols des bassins versants amont et sont donc d'origine agricole. A l'inverse, les apports en phosphore sont majoritairement issus des rejets urbains et plus spécifiquement de l'agglomération Parisienne.

Figures 10 b : Bilan des transferts d'azote pour la Seine en année sèche (1996, chiffres au-dessus) et humide (2001, chiffres en dessous).



Figures 10 c : Bilan des transferts de phosphore pour la Seine en année sèche (1996, chiffres au-dessus) et humide (2001, chiffres en dessous).

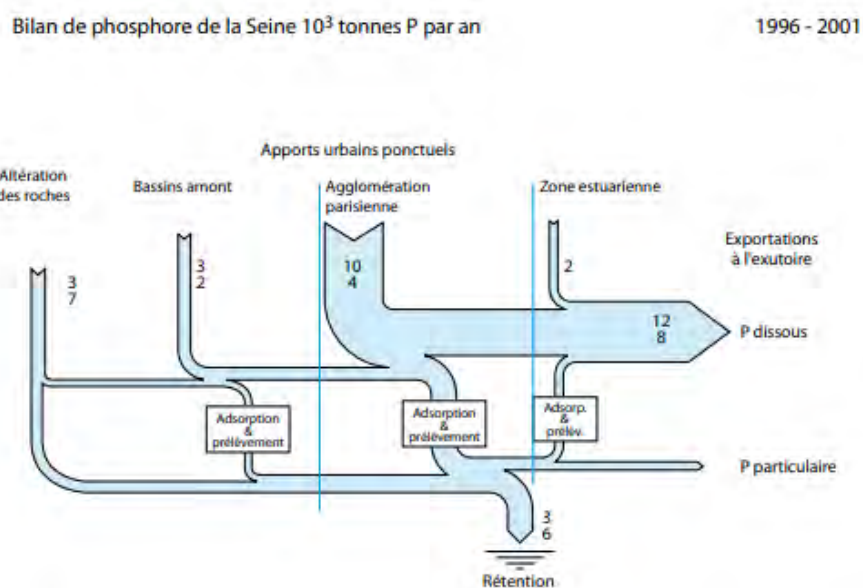


Figure 106 : Bilan des transferts d'azote et de phosphore pour la Seine (fascicule PIREN Seine « l'Eutrophisation des cours d'eau du bassin de la Seine », 2009)

Malgré les évolutions récentes importantes des systèmes d'assainissement du territoire, des déséquilibres physico-chimiques importants sont encore présents se traduisant par des écarts entre les taux d'oxygène dissous à saturation à l'équilibre et ceux mesurés (cf. **paragraphe 4.4**). Ces derniers restent faibles sur la partie amont du bassin qui correspond au périmètre de l'EPTB et sont bien visibles en aval des stations d'épuration de l'agglomération Parisienne. La simulation du modèle ProSE développé par le PIREN Seine des concentrations en NH_4^+ comparativement aux seuils de la Directive Cadre Européenne, présentée en **figure 107**, illustre bien ce phénomène.

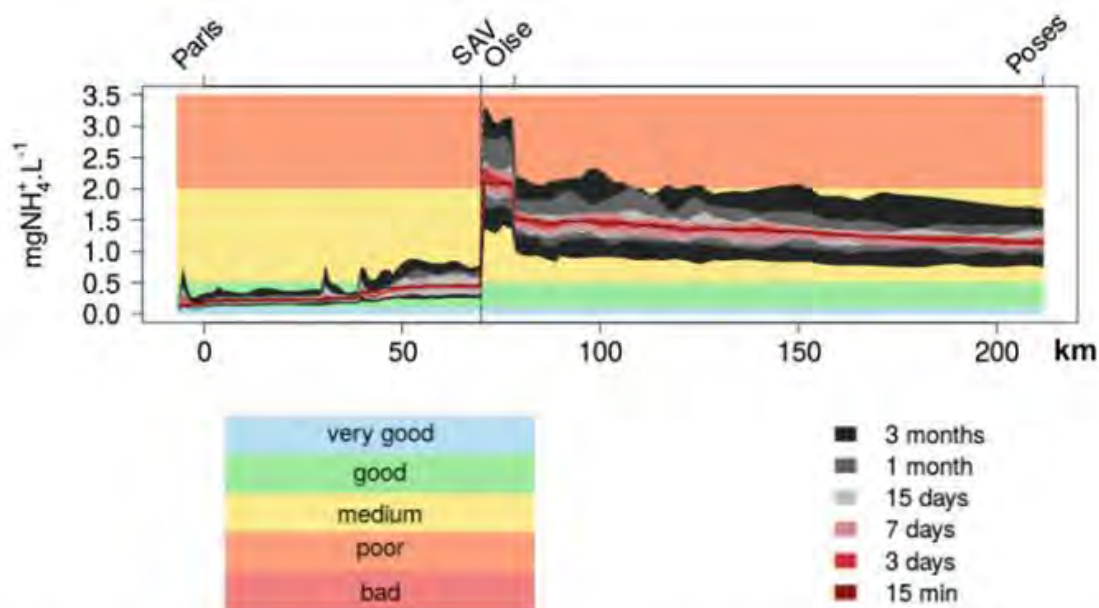


Fig. 2 Simulation of NH_4^+ distribution for the 2007–2011 period over 200 km from Paris to Poses, according to several measurement frequencies from 15 min; 3, 7 and 15 days; to 1 and 3 months (from Vilmin et al. [10])

Figure 107 : Simulation de la distribution en NH_4^+ de 2007 à 2011 de Paris à Poses (River Basin Visions : Tools and Approaches from Testerday to Tomorrow, C.Carré et al., 2020)

Sur le périmètre de l'EPTB, l'analyse des données du réseau Nâïades montre (cf. **figures 108 et 109**) :

- pour les paramètres azotés, des teneurs en nitrates (NO_3^-) en phase aqueuse :
 - variables selon les cours d'eau ;
 - pouvant localement atteindre près de 40 mg/l ;
 - plus importantes à l'amont (couleurs claires) qu'à l'aval (couleurs sombres) ;
 - présentant des variations saisonnières marquées avec des valeurs fortes en hiver et faibles en été ;
 - ces variations illustrent bien l'origine des apports issue majoritairement du lessivage des sols agricoles (cf. **figure 106**), en période hivernale c'est à dire de faible couvert végétal et provenant majoritairement de la partie amont du bassin (pentes importantes, épaisseurs de sols faibles, aquifères avec des circulations rapides et des phénomènes « d'effets pistons »).

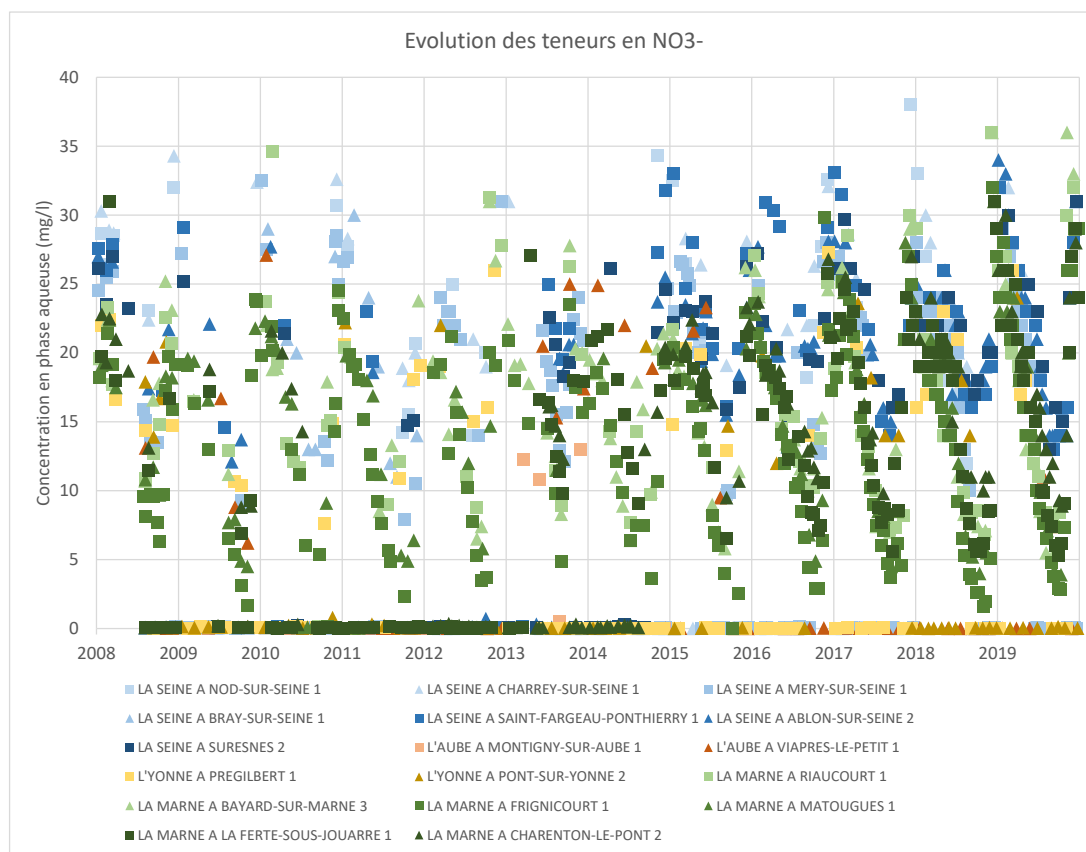


Figure 108 : Evolution des teneurs en NO₃⁻ des principaux cours d'eau du périmètre de l'EPTB de 2008 à 2020

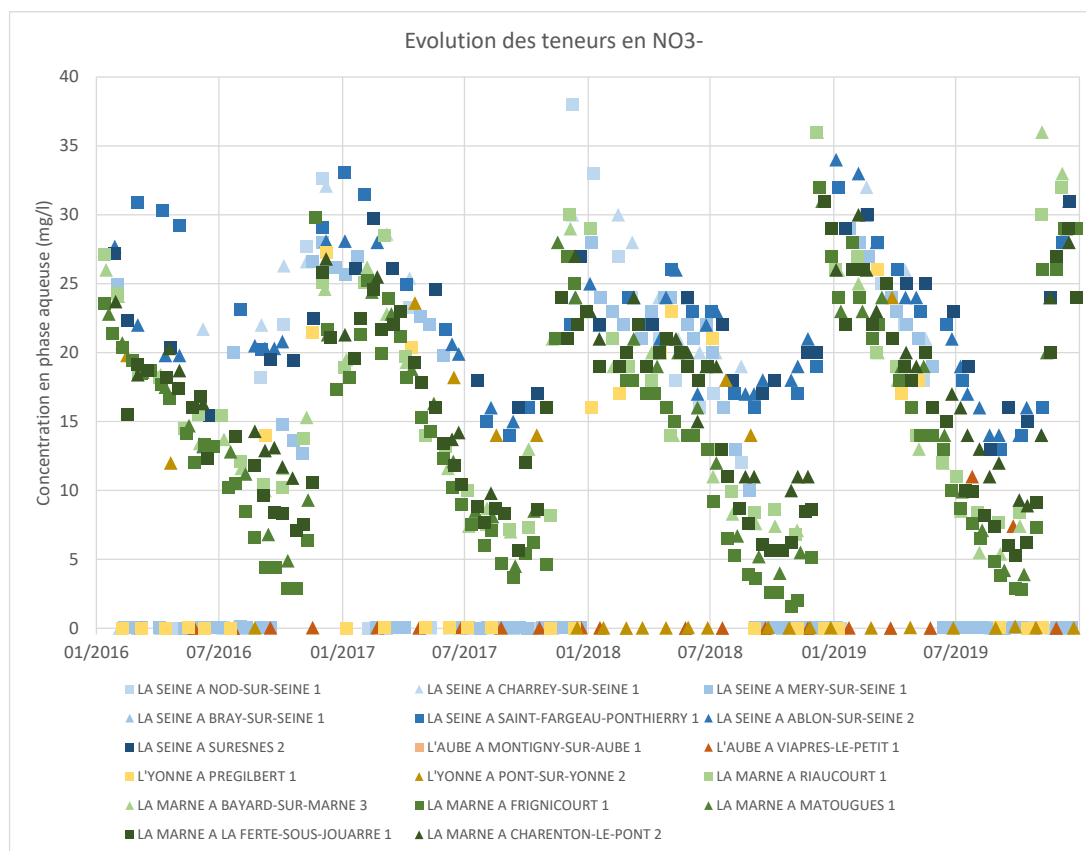


Figure 109 : Evolution des teneurs en NO₃⁻ des principaux cours d'eau du périmètre de l'EPTB de 2016 à 2020

- pour les paramètres phosphorés des teneurs en orthophosphates (PO₄) en phase aqueuse (cf. figures 110 et 111) :
 - variables selon les cours d'eau ;
 - dépassant très exceptionnellement 0,5 mg/l (bon état de la DCE, cf. figure 107) ;
 - plus importantes à l'aval (couleurs sombres) qu'à l'amont (couleurs claires) ;
 - ne présentant pas de variations saisonnières marquées ;
 - ces teneurs relativement faibles et constantes au cours de l'année illustrent bien l'origine des apports correspondant pour le territoire de l'EPTB à des rejets des stations de traitement et à l'altération des roches présentes.

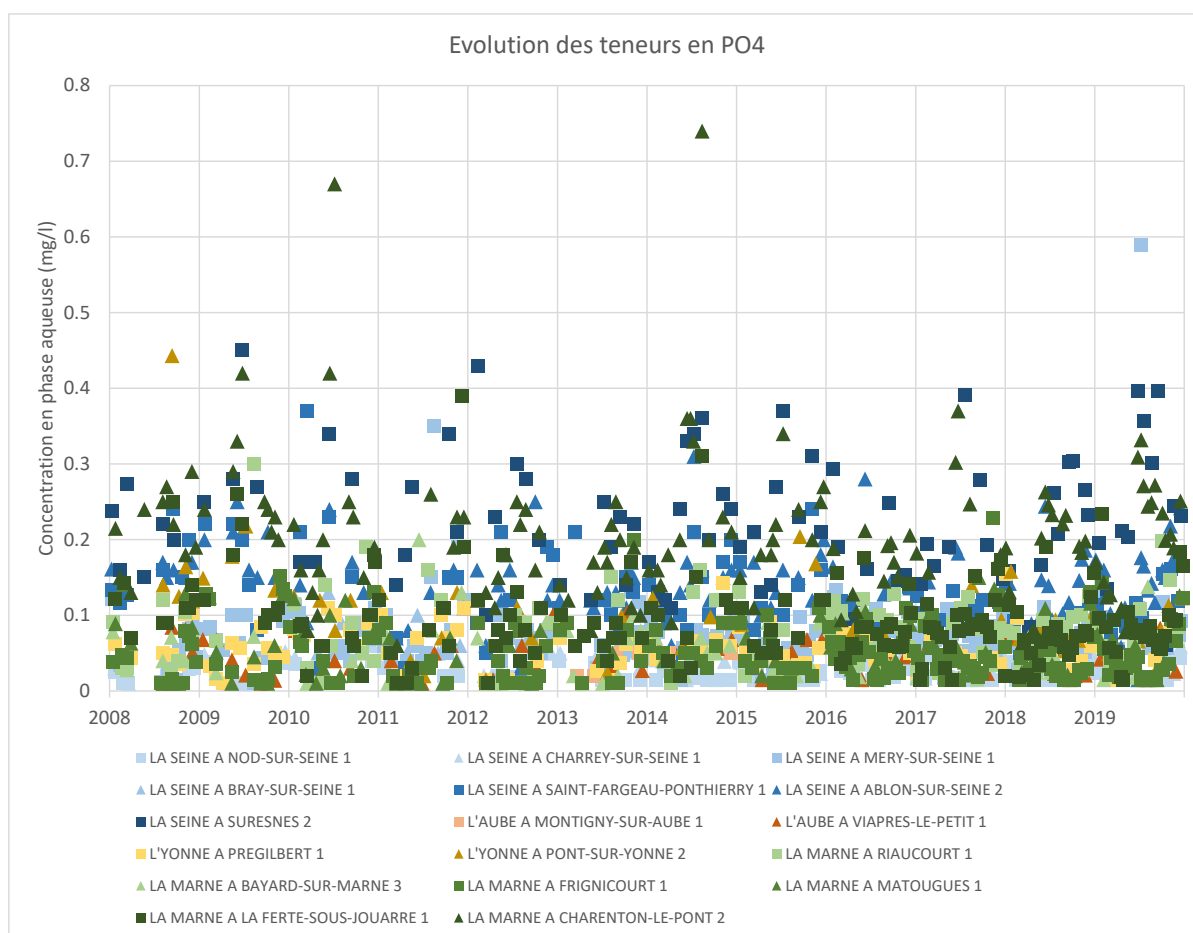


Figure 110 : Evolution des teneurs en PO₄ des principaux cours d'eau du périmètre de l'EPTB de 2008 à 2020

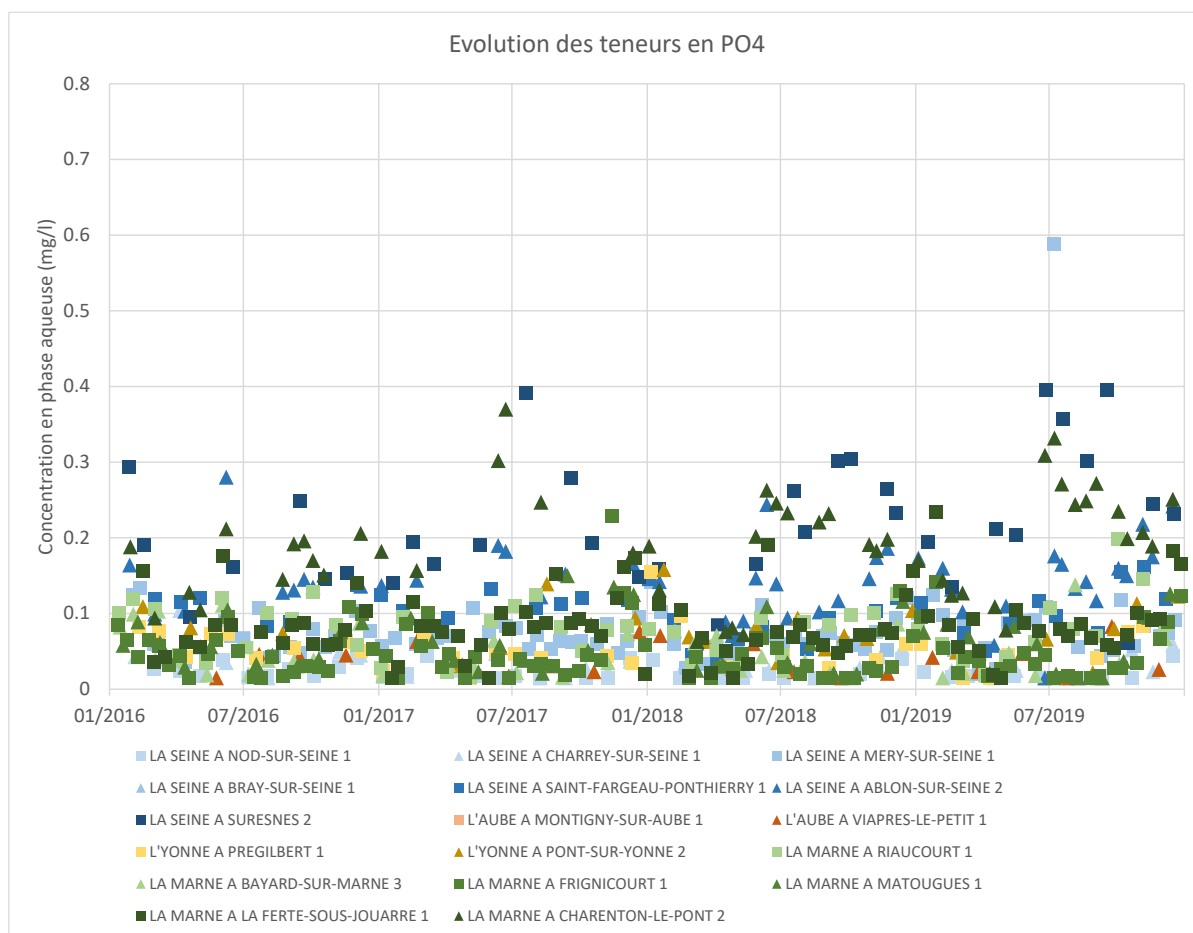


Figure 111 : Evolution des teneurs en PO_4 des principaux cours d'eau du périmètre de l'EPTB de 2016 à 2020

4.5.2 Evolution future

Des outils de modélisation ont été déployés sur ces thématiques afin de modéliser et simuler les évolutions futures de ces paramètres ainsi que les apports potentiels d'actions d'évolution des pratiques, aussi bien dans les eaux superficielles que souterraines. Nous pouvons par exemple citer pour les eaux souterraines le modèle MODCOU, utilisé non seulement dans le cadre du projet AQUI-FR (cf. **paragraphe 2.3.2**) mais aussi pour la modélisation de paramètres de qualité.

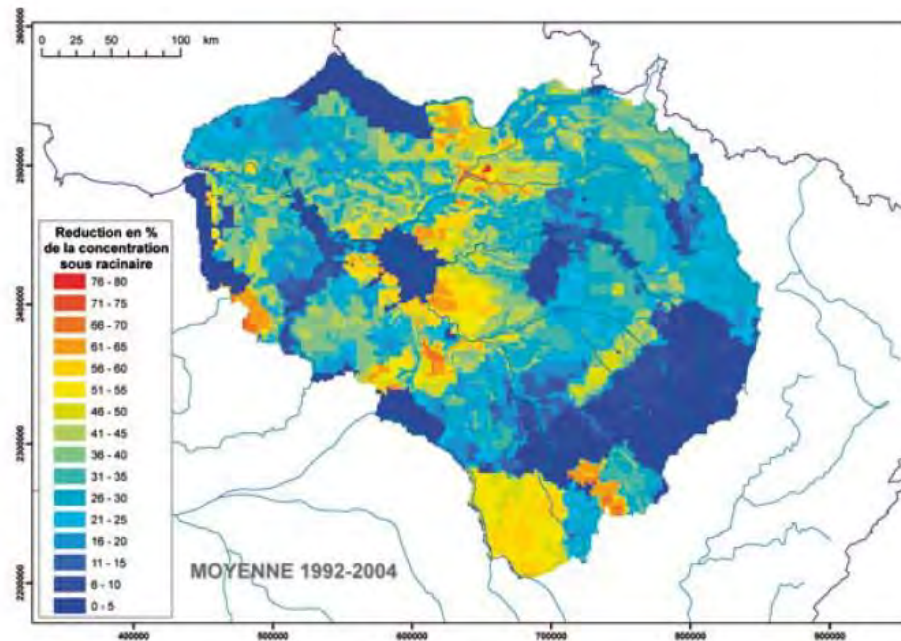


Figure 27 : Réduction relative (en %) de la concentration sous racinaire liée à l'introduction de CIPAN (à l'échelle de l'ensemble du territoire). Ce résultat tient compte de la proportion de SAU sur chaque maille du maillage de surface du modèle hydrogéologique et prend donc en compte la « dilution » par les surfaces non cultivées (zones urbanisées, routes, forêts, ...).

Figure 112 : réduction relative (en %) de la concentration sous-racinaire en azote liée à l'introduction de Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrates) (fascicule PIREN Seine « la pollution du bassin de la seine par les nitrates », 2009)

D'une manière générale l'évolution la quantification de l'évolution future de ces paramètres reste complexe à appréhender.

Concernant les pratiques agricoles, les tentatives antérieures de reconstitution de l'état chimique passé de la Seine reposaient sur le l'hypothèse implicite d'une relation directe et à court terme entre l'utilisation des terres (et des pratiques agricoles) et les sources diffuses de nutriments dans le réseau hydrographique. Cette approche n'avait cependant pas tenue compte des retards liés au stockage des nutriments dans le sol, la zone non saturée et les aquifères. Compte tenu de la durée de ces délais, la prise en compte des variations historiques à longs termes des apports et pratiques agricoles est nécessaire pour comprendre l'évolution des concentrations actuelles et futures (effet mémoire).

Ainsi, 3 phases peuvent être envisagées (cf. figure 113) :

- une phase I, du milieu du XIX au début du XXe siècle correspondant à une augmentation modérée des intrants et une absorption par les processus de rétention ;
- la phase II, courte de 1950 à 1975 caractérisée par une augmentation importante des apports en nutriments avec une réponse visible au niveau du fleuve ;
- la phase III, de réduction des intrants, avec une réponse, fortement tamponnée pour l'azote du fait de l'importance des sources diffuses, et retardée pour le phosphore dans la mesure où les sources ponctuelles sont réduites aux apports d'engrais bien qu'un potentiel stock soient encore présent dans les sédiments des cours d'eau.

Ces mécanismes empêchent une amélioration rapide des concentrations dans les cours d'eau. Les réponses aux changements des pratiques agricoles peuvent ainsi être retardées de plusieurs décennies.

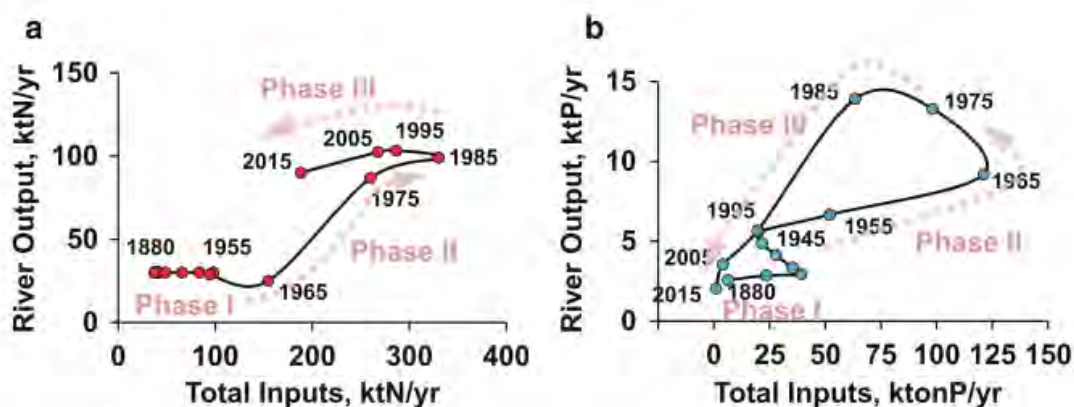


Fig. 14 Trajectory of the Seine River N (a) and P (b) delivery in response to total inputs to the water-agro-food system from 1850 to 2015 (the data shown represent an average over a 10-year period)

Figure 113 : Trajectoires d'évolution en azote et phosphore des réponses aux intrants agricoles (The Seine Watershed Water-Agro-Food System : Long-Term Trajectories of C, N and P Metabolism, G. Billen et al., 2019)

Concernant les rejets sur le périmètre de l'EPTB, mais aussi au niveau de l'agglomération Parisienne, ainsi que l'efficacité des filières de traitement. Là encore l'évolution future dépendra fortement des modifications des pratiques. Différents scénarios sont envisagés. La **figure 114** représente cette évolution pour le scénario dit de « circularité » correspondant à une combinaison de solutions de séparation de sources (généralisation de systèmes de toilettes avec séparation des urines et des matières fécales) et de recyclage des boues des boues d'épuration permettant la réduction forte des quantités et des concentrations des rejets au milieu naturel.

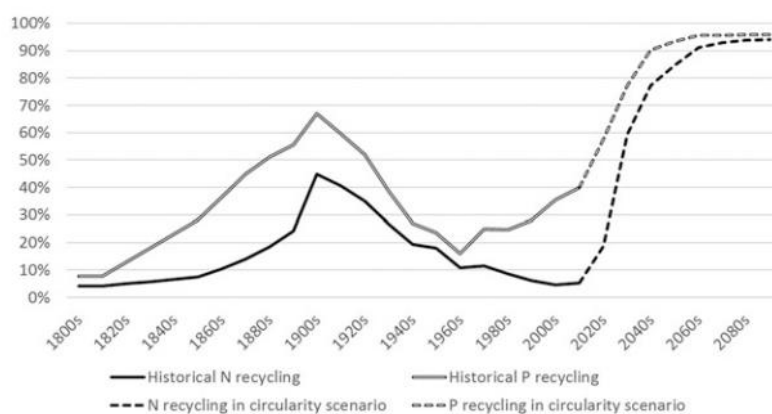


Fig. 15 Past N and P circularity of human excreta in the Paris conurbation and future N and P circularity in the "Circularity" scenario (see text for data sources)

Figure 114 : Part de recyclage de l'azote et du phosphore dans les excréments humains pour le scénario futur de « circulation » (Past and future Trajectories of Human Excreta Management Systems : paris in the Nineteenth to Twenty-first Centuries, F. Esculier et al., 2019)

5 CONSTRUCTION DES OUTILS DE MODELISATION

5.1 Objectifs visés et principes de fonctionnement

Les chapitres précédents ont permis :

- sur la base de données de débits et de piézométries naturelles reconstituées, la caractérisation de la dynamique de mise en place des étiages sévères ainsi que leurs caractéristiques (durées, déficits par rapport à une référence, valeurs minimales sur un intervalle de temps donné...)
- sur la base des événements climatiques représentatifs du temps futurs et des données de débits prévisionnelles, la caractérisation des potentiels étiages du futur (durées et déficits par rapport à une référence définie notamment) ;
- sur la base des données de température de l'air, de l'eau et de concentrations en oxygène dissous, la simulation des températures actuelles et futures de l'eau, mais aussi du taux d'oxygène dissous à saturation.

La phase 2 de cette étude décrit précisément les différents usages de la ressource en eau et plus spécifiquement en période d'étiage, pour la situation actuelle, mais aussi pour des scénarios du « temps futur ». Ainsi, sur la base des données de la phase 2, l'objectif du modèle présenté ici appelé « modèle PGE (plan de gestion des étiages) » consiste en la caractérisation détaillée du poids de ces usages actuels et futurs sur la ressource en eau, comparativement et en complément des données de « débits naturels pseudo-reconstitués » des étiages historiques du modèle AQUI-FR :

- quelle part du déficit par rapport à une référence donnée est attribuable aux usages anthropiques comparativement à des déficits naturels passés et futurs ?
- avec quelle périodicité et avec quelle intensité s'expriment ces usages actuels et futurs sur la ressource en eau naturelle du système ?
- quelles implications sont à attendre des modifications des usages et des prélèvements ?
- les stratégies de gestion actuellement en place sur la base des aménagements existants sont-elles adaptées ?
- quelles modifications ou aménagement sont à prévoir ?
- ...

L'ensemble de cette étude a vocation à proposer et définir collectivement la gestion du futur des lacs réservoirs pour la période d'étiage.

Ainsi, le modèle PGE consiste en la dernière « pièce du puzzle » (cf. **figure 115**) permettant la caractérisation des usages anthropiques actuels et futurs sur l'hydrosystème à partir des données présentées dans les paragraphes précédents de la phase 1 ainsi qu'en phase 2. Les paragraphes suivants décrivent donc les modalités de construction et les principes de ce modèle. Les résultats et calages issus des phases précédentes et la comparaison avec les données du modèle AQUI-FR sont présentées en phase 3 et les pistes d'actions résultantes en phase 4.

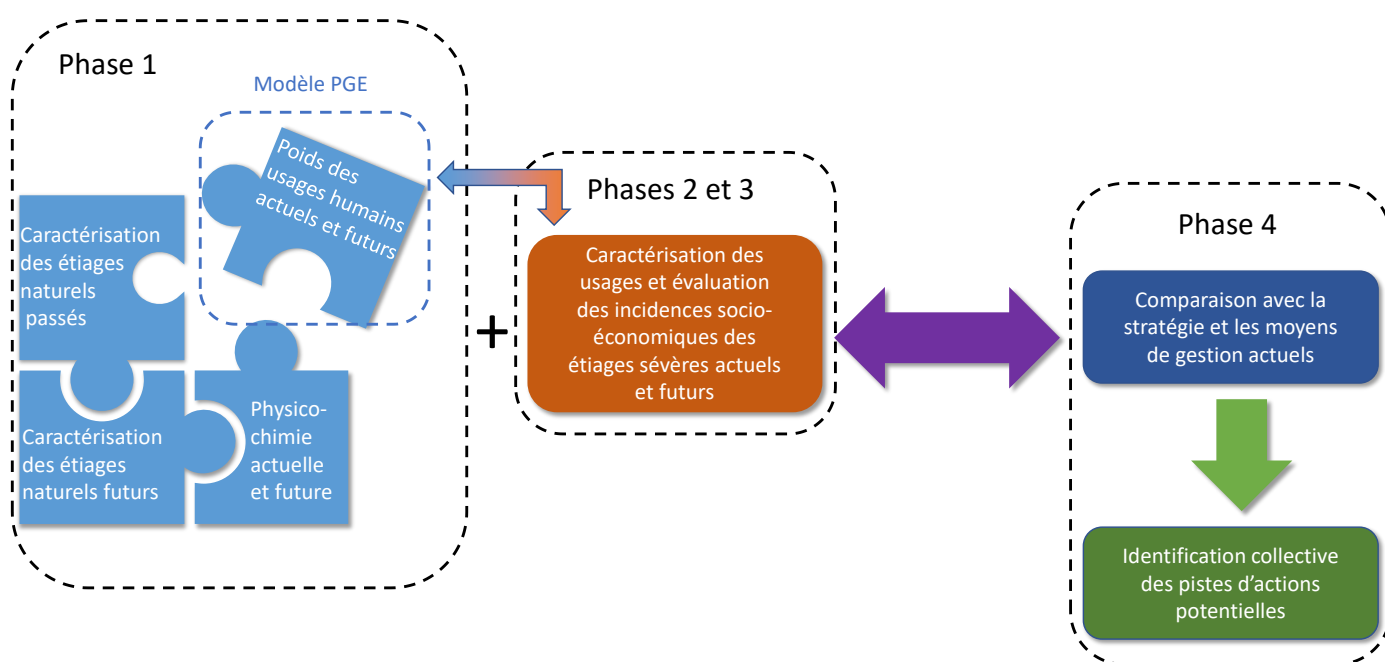


Figure 115 : Localisation du modèle PGE dans la stratégie globale de l'étude

5.2 Données d'entrée

5.2.1 Données

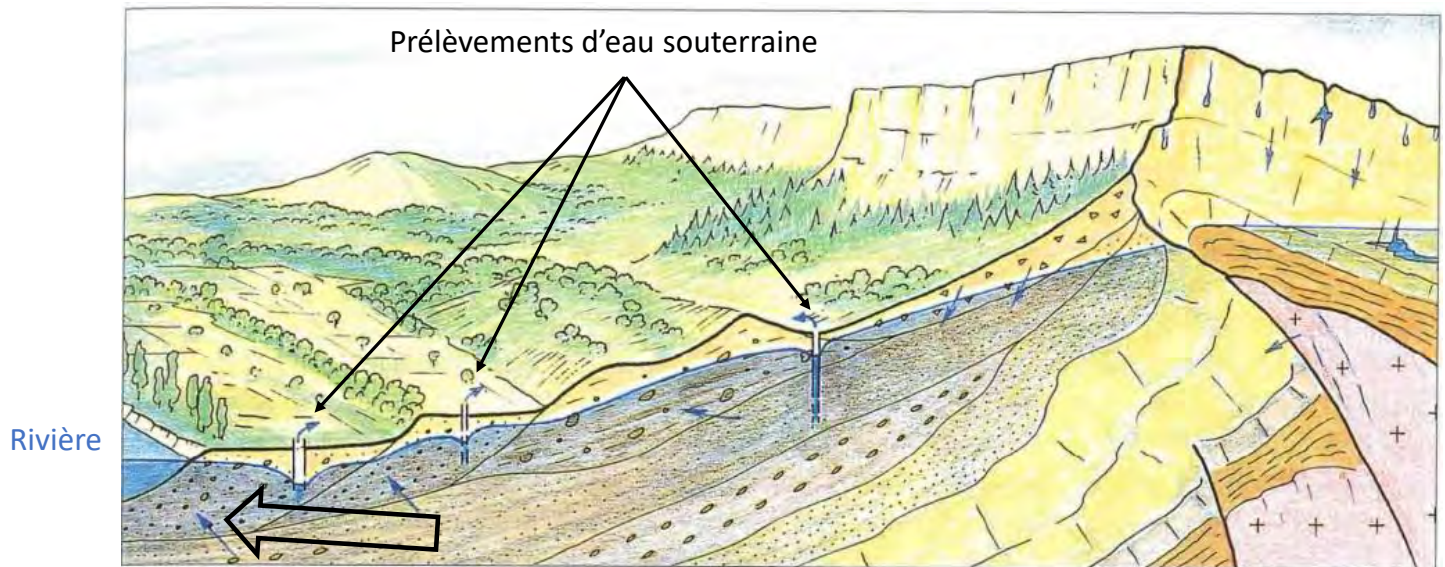
Les données d'entrée du modèle PGE correspondent :

- aux débits actuellement mesurés ;
- aux données de gestion des lacs-réservoirs ;
- aux données des usages détaillées en phase 2 concernant :
 - l'alimentation en eau destinée à la consommation humaine (EDCH) ou eau potable (AEP),
 - l'irrigation,
 - l'industrie.

5.2.2 Impacts hydrologiques des prélèvements

Pour chacun des usages, il est important de différencier les prélèvements de la consommation nette, mais aussi la ressource sollicitée. Il est ainsi possible de distinguer 2 niveaux d'effets :

- l'impact quantitatif d'un prélèvement va être tamponné par le rejet lié à ce même usage quand ce dernier existe. Par exemple un prélèvement pour de l'irrigation va servir à la production de biomasse qui sera ensuite récoltée et va donc sortir en totalité de l'hydrosystème. On parlera donc d'une consommation nette de 100 %. A l'inverse, pour un prélèvement d'eau potable, la plupart de l'eau consommée est ensuite restituée au milieu naturel par le biais des stations d'épuration. De même l'eau prélevée pour un usage industriel va être en majeure partie restituée au milieu naturel après traitement, à l'issue de son utilisation sanitaire ou de process (**cf. rapport de phase 2**) ;
- une consommation nette issue d'un prélèvement en eau superficielle va avoir un impact total et direct sur le débit du cours d'eau. C'est-à-dire que 1 m³/s consommé à partir d'un prélèvement en eau superficielle va avoir un impact instantané sur le débit du cours d'eau de 1 m³/s (100 % du débit consommé). A l'inverse un prélèvement dans un niveau aquifère (nappe) va entraîner une baisse locale de niveau (niveau « piézométrique ») qui sera compensée par les apports du stock en eau souterraine. Ce déficit de stock limitera en période d'étiage les apports de la nappe au cours d'eau de façon indirecte et déphasée dans le temps (**cf. figure 116**). L'impact d'un prélèvement en eau souterraine au débit du cours d'eau sera donc « directement » moindre que pour un prélèvement en eau superficielle. Il est cependant important de garder à l'esprit qu'à terme les deux ensembles étant intimement liés tout déficit dans l'un des compartiments entraînera un effet plus ou moins conséquent sur le second. A l'échelle du périmètre de l'EPTB, les données permettant l'identification et la localisation de chaque point de prélèvement en fonction de son usage, de sa ressource ainsi que la caractérisation détaillée de cette ressource (paramètres hydrodynamiques de nappe) ne sont pas disponibles. Leur détermination nécessitant un travail colossal, une estimation sur la base d'une formule de Theiss variable selon les principales formations aquifères rencontrées de l'impact d'un prélèvement en nappe sera prise en compte. La nécessité de ce coefficient s'explique par la présence de prélèvements dans les sous-bassins, hors système alluvial et parfois sur des ressources peu connectées à ces derniers. Il s'agit de plus d'une estimation approximative, et probablement maximaliste, de possibles impacts à courts termes de ces prélèvements.



Impacts des prélèvements sur la rivière
atténués et différés dans le temps

Figure 116 : Impacts des prélèvements en eau souterraines sur le débit de la rivière (BRGM, modifié)

5.2.3 Relations entre les stations de références

Les débits aux différentes stations ainsi que les impacts des prélèvements sur les différents sous bassins d'expriment selon une logique hydrologique qui est reproduit dans le modèle PGE, selon un arbre de branchement entre les différentes stations de référence (**cf. figures 117 et 118**). Chaque station de référence représente ainsi les débits à l'exutoire des sous-bassins de référence présentant une hydrologie naturelle sur laquelle s'exercent des pressions de prélèvements (**cf. figure 119**).

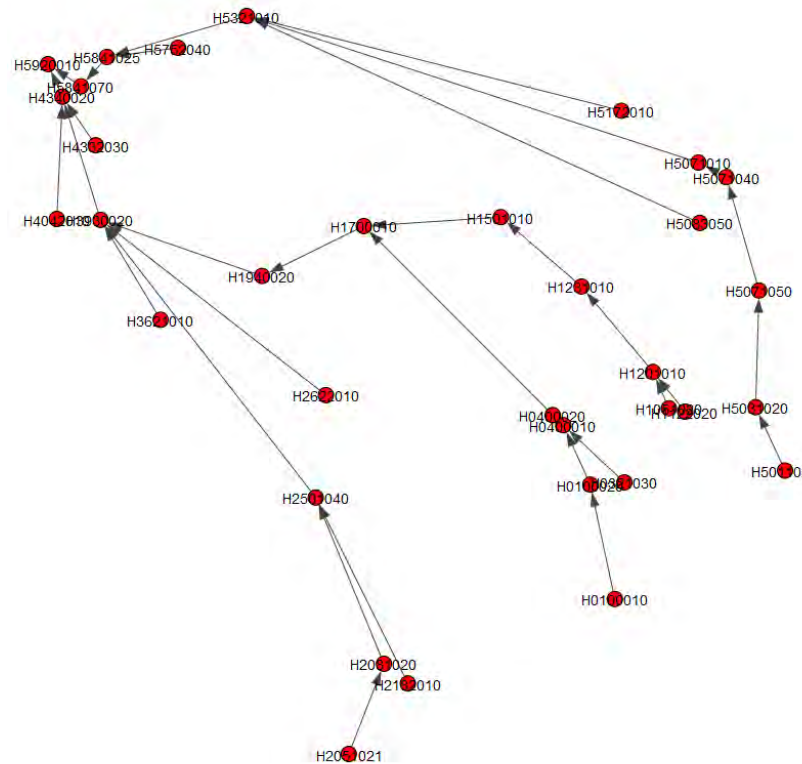


Figure 117 : Arbre de branchement entre les stations de référence

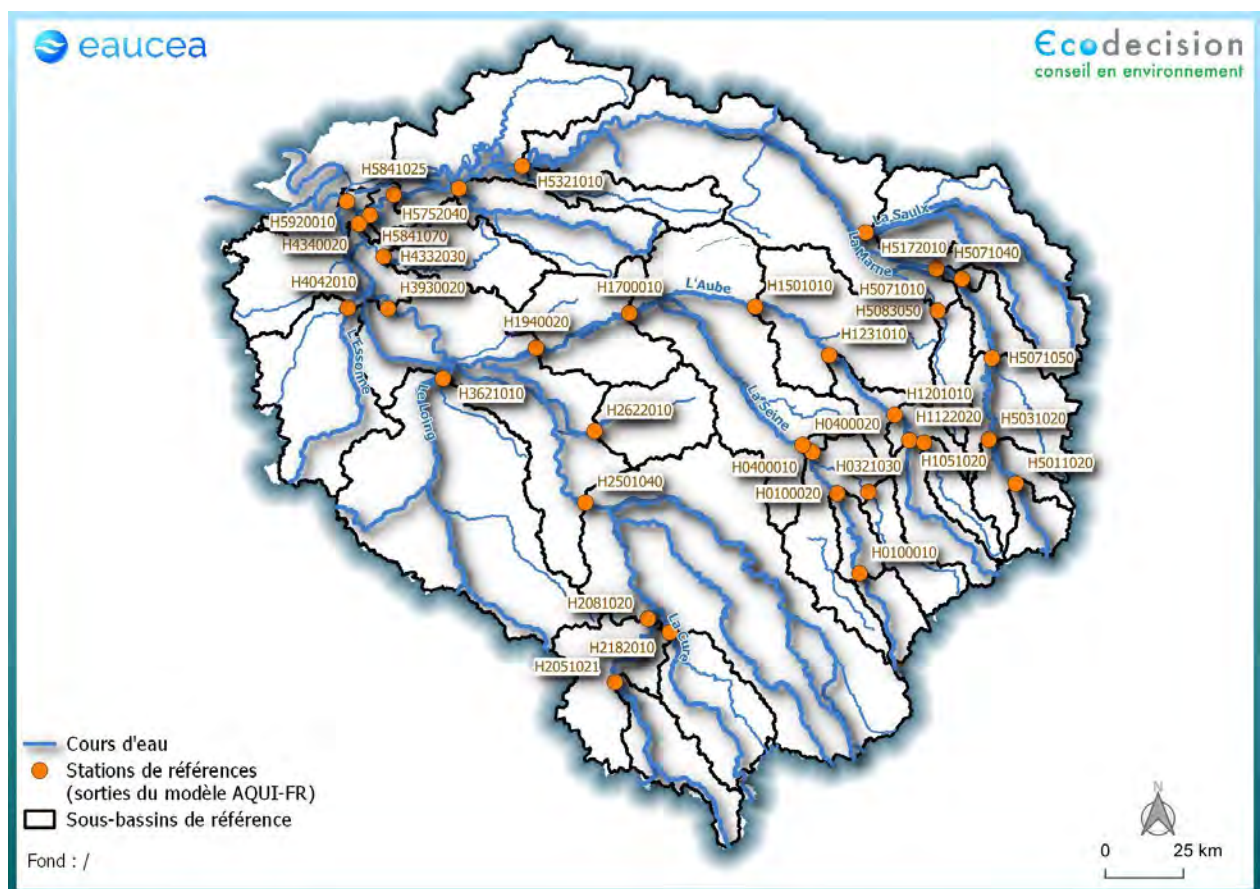


Figure 118 : Localisation des stations et des sous-bassins de référence

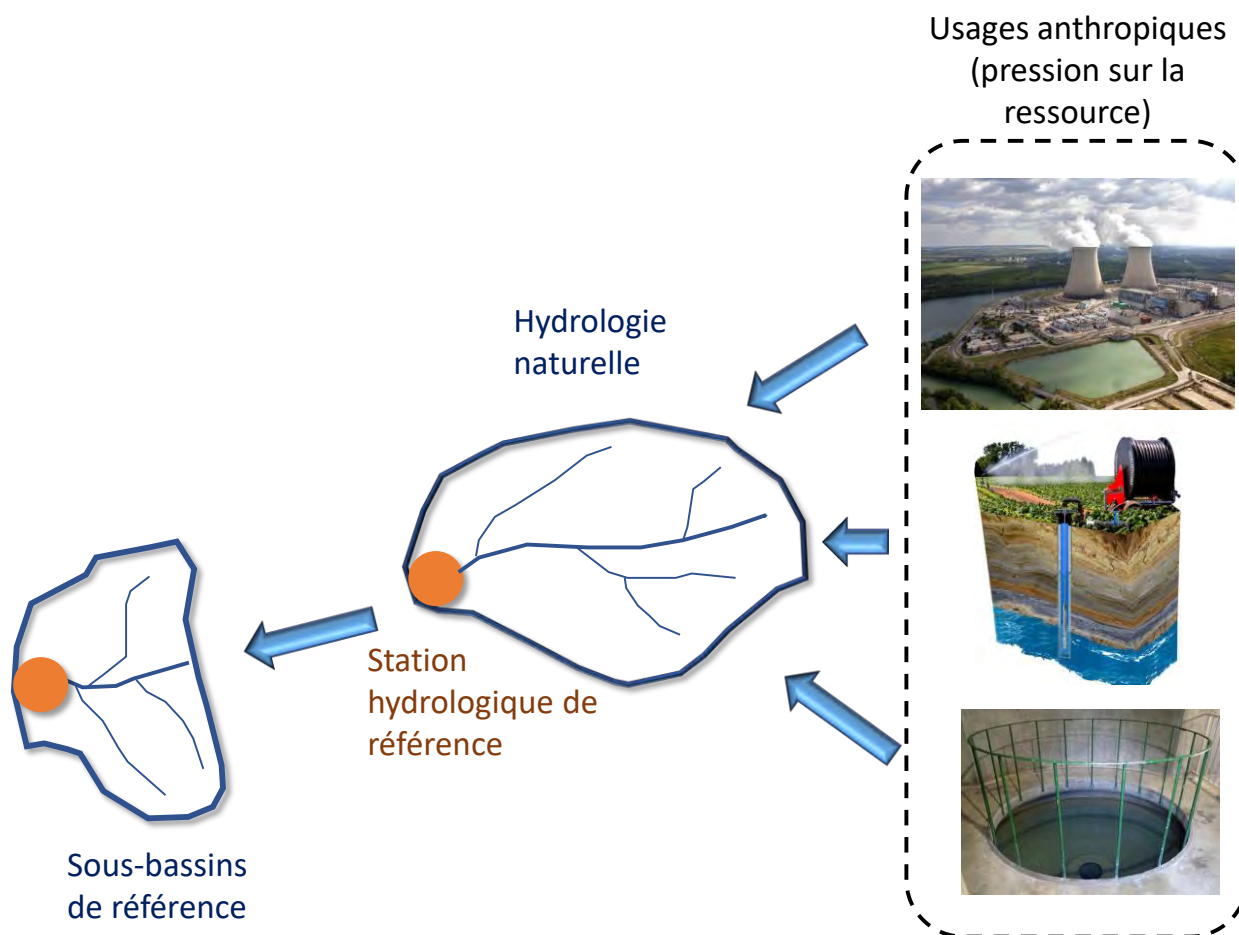


Figure 119 : Schéma de principe des impacts sur les sous-bassins et stations de référence

5.2.4 Propagation des effets hydrologiques

Le temps nécessaire pour que le signal hydrologique ou l'impact d'un prélèvement (sous-entendu en rivière) se transmette jusqu'aux stations hydrométriques de référence peut être important et constitue une donnée d'entrée importante du modèle.

Ce temps augmente avec la distance. En période d'étiage, cela reste cependant difficile à évaluer car le signal hydrologique ne se propage pas à la même vitesse en fonction du débit et peut s'amortir. Néanmoins sur la base des données des lâchers actuels depuis les lacs réservoirs et dans la mesure où les variations de consigne de lâchers sont peu fréquentes, le régime hydrologique s'installe en quelques heures ou quelques jours à son débit nominal.

Sur la base des différentes variations observées ces dernières années et des temps de transit déjà connus, une matrice des temps de transfert estimatifs entre les différentes stations a été réalisée par Eaucea (cf. **figure 120**). Ces temps pourront ainsi être précisés et étendus dans le cadre de l'exploitation des outils déjà en place au sein de l'EPTB Seine.

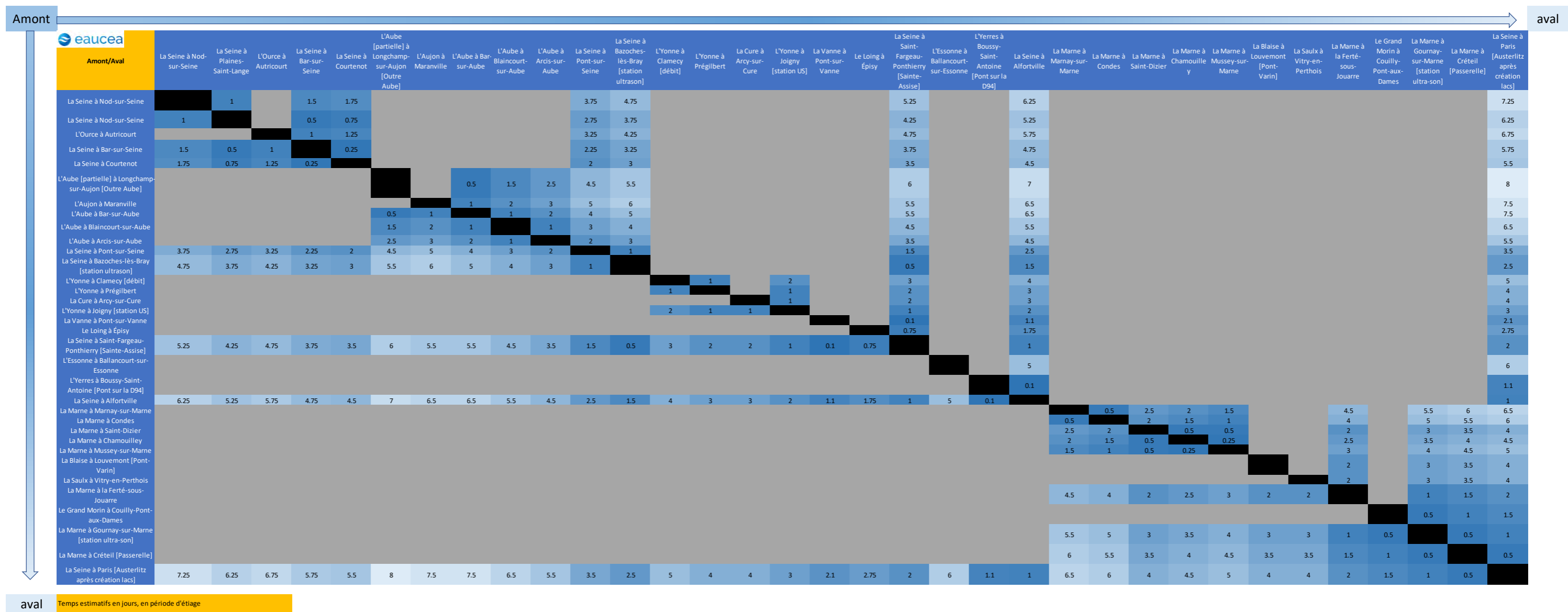


Figure 120 : Matrice des temps de transferts estimatifs en étiage

5.3 Calage du modèle

Les résultats du calage du modèle sont présentés en phase 3, à l'issue de la description détaillée des usages présentée en phase 2.

5.4 Données de sortie

Les données de sortie correspondent :

- aux poids des différents usages sur la ressource en eau superficielle (en débits et en proportions relatives) ;
- à la saisonnalité du poids de ces usages sur la ressource en eau superficielle.

Ces résultats du calage sont présentés en phase 3, à l'issue de la description détaillée des usages présentée en phase 2. Ces derniers seront comparés pour les années de recoupement avec les données du modèle AQUI-FR.

6 CONCLUSION

La phase 1 de cette étude a permis sur la base des données scientifiques disponibles sur le périmètre de l'EPTB :

- leur présentation détaillée ;
- leur analyse critique ;
- l'extraction et l'utilisation des données nécessaires à la caractérisation des étiages et la construction des différents outils de modélisation.

Ces données ont ainsi été utilisées pour caractériser les dynamiques de mise en place des étiages sévères ainsi que leurs caractérisations pour les temps passés et pour le futur.

Cette caractérisation a concerné non seulement l'aspect quantitatif, mais aussi qualitatif faisant apparaître des enjeux potentiels en aval du périmètre de l'EPTB, sous influence des lacs réservoirs.

Les résultats des travaux et des modèles déployés dans cette phase 1 sont complétés par les données présentées dans les phases 2 et 3 afin de permettre en phase 4 le croisement de l'ensemble :

- des phénomènes de réaction naturelle quantitative et qualitative du système pour les périodes d'étiages ;
- des besoins humains et des enjeux socio-économiques présents sur le territoire.

Le croisement de ces deux ensembles pour les périodes actuelle et future, comparativement aux moyens et à la stratégie de gestion actuellement en place, permettra d'identifier les pistes d'actions potentielles. Ces pistes permettront ainsi de faire face collectivement, non seulement aux changements futurs attendus sur le périmètre de l'EPTB Seine Grands Lacs, mais aussi plus globalement à l'échelle du bassin de la Seine, et de garantir une gestion optimale de la ressource en eau actuelle et de l'« or bleu » du futur.

Annexe 1 : Fiches descriptives des stations hydrométriques et piézométriques AQUI-FR