



**IDENTIFICATION DE STATIONS HYDROMETRIQUES ET
PIEZOMETRES POUR L'EVALUATION DES
MODELISATIONS HYDROLOGIQUES ET
HYDROGEOLOGIQUES**

**Eric SAUQUET, INRAE
Jean-Pierre VERGNES, BRGM
Guillaume THIREL, INRAE
Laurent STROHMENGER, INRAE**

01/07/2022

Avec le soutien financier de :



Le projet Explore2, porté par INRAE et l'Office International de l'eau (OiEau), s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070 (2010-2012) grâce à laquelle les acteurs de la recherche, autour du Ministère de l'écologie, avaient établi des premiers scénarios prospectifs de disponibilités des ressources en eau à l'échelle de la France à horizon 2070. Officiellement lancé en juillet 2021, co-financé par les partenaires du projet, le Ministère de la transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB), le projet Explore2 a pour objectif, d'ici 2024, d'actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des publications du GIEC (CMIP5), mais aussi d'accompagner les acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau.

*Explore2 – Identification de stations hydrométriques et piézomètres
pour l'évaluation des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques*

Nom du projet	Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France
Nom du rapport	Identification de stations hydrométriques et piézomètres pour l'évaluation des modélisations hydrologiques
Auteur(s)	Eric SAUQUET, INRAE Jean-Pierre VERGNES, BRGM Guillaume THIREL, INRAE Laurent STROHMENGER, INRAE
Numéro de version	V1
Date contractuelle de remise du livrable	01/07/2022
Date effective de remise du livrable	04/07/2022
Statut du document	version provisoire /version finale
Accès en ligne	libre/ restreint /confidentiel
Mots-clés (5 maximum)	réseau de référence, BNPE, HYDRO, AQUASTAT, ADES

Table des matières

1. Introduction	8
2. Période d'évaluation et disponibilité des données	9
3. Constitution du réseau de stations hydrométriques de référence	10
3.1. Sélection selon les métadonnées	10
3.2. Sélection selon la disponibilité des forçages climatiques	12
3.3. Sélection selon les informations extraites de la banque BNPE	12
3.4. Sélection selon les informations extraites de la banque AQUASTAT	13
3.5. Altération des régimes naturels	13
3.6. Limites	15
3.7. Croisement des critères pour une qualification des données	15
3.8. Identification des données aberrantes ou d'influences manifestes dans les séries temporelles	18
3.9. Le réseau de stations hydrométriques de référence d'Explore2	22
4. Constitution du réseau de piézomètres de référence	24
5. Conclusion	27
6. Références	28
7. Remerciements	29

Résumé

Les modèles qui simulent des débits et des niveaux piézométriques en temps futur ont besoin d'être évalués en comparant de la manière la plus objective les données simulées en temps présent à des données observées sur un ensemble de points de mesure.

Tous les points de mesure ne peuvent pas contribuer à cette évaluation. Les modèles mobilisés dans Explore2 simulent une ressource naturelle : le contrôle doit s'opérer là où l'empreinte anthropique est faible.

Le rapport mentionne les modalités de sélection des séries journalières de débits et de niveaux piézométriques. Outre des critères de représentativité hydrologique, la sélection s'est appuyée sur des critères de longueur de chronique, des informations sur la qualité des mesures, des indicateurs de pression sur la ressource (prélèvements en eau) ou de potentielles perturbations (présence d'ouvrages hydrauliques en amont) et une expertise des usages sur les bassins versants ou à proximité de piézomètres. La sélection croise les informations disponibles dans les bases de données nationales (BNPE, HYDRO, ADES), internationale (AQUASTAT) ou constituées par les partenaires (EDF, INRAE). Les séries candidates de débits ont ensuite fait l'objet d'une ultime analyse de chaque série par deux individus (identification de données aberrantes par comparaison aux données de pluie et température, et aux sorties d'un modèle). Finalement, à la date du 1^{er} juillet 2022, 611 séries de débits et 227 séries de niveau piézométrique ont été retenues pour évaluer les modèles hydrologiques.

Acronymes

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

MTE : Ministère de la transition écologique

OiEau : Office international de l'eau

OFB : Office français de la biodiversité

ANR : Apports Naturels Reconstitués

Liste des figures

Figure 1 : Répartition spatiale et distribution statistique des caractéristiques des stations hydrométriques (surface, altitude et écoulement annuel moyen) des stations hydrométriques de la banque HYDRO et de la présélection de 880 stations hydrométriques (identifiées par leur origine).....	11
Figure 2 : Points de prélèvements par usage (source BNPE, période 2008-2019)	12
Figure 3 : Localisation et capacité des grands barrages en France métropolitaine selon AQUASTAT	13
Figure 4 : Répartition des stations par classe selon l'indicateur utilisé	17
Figure 5 : Identification des 674 stations candidates pour l'évaluation parmi le jeu initial de 880 stations hydrométriques.....	18
Figure 6 : Représentation support pour l'inspection visuelle des séries de débit.....	19
Figure 7 : Distributions des durées d'erreurs identifiées par chronique (%) et des longueurs des chroniques nettoyées (années) pour les 611 stations conservées.....	20
Figure 8 : Répartition des types d'anomalies (en %) des 680 années d'anomalies identifiées sur les 611 stations conservées (durée totale des séries initiales de 26840 années)	20
Figure 9 : Occurrences des types d'erreurs par année entre 1976 et 2019 pour les 611 stations conservées	21
Figure 10 : Occurrences des types d'erreur par mois de l'année (1 : janvier ; 12 : décembre).....	22
Figure 11 : Localisation des stations hydrométriques du réseau de référence pour l'hydrologie de surface	23
Figure 12 : Localisation des piézomètres disponibles sur les domaines modélisés	25
Figure 13 : Localisation des piézomètres de référence d'Explore2	25
Figure 14 : Fréquence de dépassement de nombre d'années pour les piézomètres de référence d'Explore2	26
Figure 15 : Evolution du nombre de mesures piézométriques quotidiennes disponibles de 1976 à 2019 sur le réseau de référence d'Explore2	26

Liste des tableaux

Tableau 1 : Prélèvements annuels en milliards de m ³ sur l'ensemble de points considérés ici et sur l'ensemble des points de la BNPE.....	13
Tableau 2 : Paramètres et formules utilisées pour le calcul de la consommation mensuelle en été	14
Tableau 3 : Paramètres et formules utilisées pour le calcul de la consommation annuelle	14
Tableau 4 : Typologie de stations hydrométriques selon des critères caractérisant la pression sur la ressource en eau (les valeurs entre crochets sont les nombres de stations répondant au critère pris isolément).....	16

1. Introduction

Dans le cadre du projet Explore2, plusieurs modèles hydrologiques et hydrogéologiques seront appliqués en temps présent et alimentés par les projections climatiques pour caractériser les futures ressources en eau. Le projet entend fournir une « hydrologie de référence » sur laquelle on peut bâtir ensuite des exercices prospectifs.

Les modèles ont besoin d'être contrôlés en temps présent dans des conditions qui répondent aux hypothèses de simulation sur un ensemble de points d'observation. Pour construire cet ensemble, le projet exploitera les séries hydrologiques disponibles dans les bases de données nationales HYDRO (<https://hydro.eaufrance.fr>, Leleu *et al.*, 2014) et ADES (<https://ades.eaufrance.fr>), et dans une base de données interne d'EDF. Tous les sites référencés dans ces bases de données ne peuvent pas contribuer à l'évaluation : ils seront conservés ou écartés en fonction du niveau d'altération du fonctionnement du cours d'eau ou de l'aquifère, de la longueur des enregistrements disponibles, et de la qualité des mesures. Les piézomètres et les stations hydrométriques aux mesures « peu ou pas influencées » ou corrigées des actions humaines (dites « renaturalisées » ou « désinfluencées » dans le jargon hydrologique) seront ainsi privilégiés dans l'exercice d'évaluation.

La constitution de cet ensemble de sites répond à la volonté d'appliquer un protocole commun d'évaluation (sujet d'un autre rapport) sur une même période de référence, dite « **période d'évaluation** ». Le processus de sélection de ces sites formant **deux réseaux de référence** l'un dédié à l'hydrologie de surface de référence (stations hydrométriques) et l'autre dédié à l'hydrologie souterraine (piézomètres) est décrit ici.

2. Période d'évaluation et disponibilité des données

Les exigences en termes de durées de série de données – hydrologiques ou climatiques – sont très variables selon l'usage qu'il en sera fait ou la phase du régime hydrologique. Ainsi, il est nécessaire de disposer de longues séries de débits d'étiage ou de niveaux piézométriques pour que l'évaluation soit la moins possible tributaire et sensible à des séquences climatiques particulières.

Il n'y a pas de réponse « définitive » pour fixer la longueur de la période d'évaluation. En pratique, la communauté du climat s'affranchit des variabilités décennales en privilégiant des séquences de 30 ans pour calculer les statistiques du climat (World Meteorological Organization, 2017).

Outre la longueur de la série, se pose la question des dates de début et de fin de la fenêtre temporelle. Une période ancienne garantit une période de climat quasi-stationnaire tandis qu'une période récente permet d'intégrer des premiers marqueurs du changement climatique sur l'hydrologie des cours d'eau (ex. évolution des étiages ou des contributions nivales).

D'autres arguments sont à examiner, propres au projet : ex. la période historique 1971-2005 est celle des simulations Euro-Cordex, source des projections climatiques DRIAS2020 dans Explore2 (Météo-France, 2020).

La sélection finale résulte d'un compromis entre scientifiques : **la période 1976-2019 est la période d'évaluation** finalement choisie car elle est propice à l'évaluation des capacités des modèles à représenter des changements récents dans les processus climatiques et hydrologiques.

Les stations hydrométriques pour l'évaluation partagée ne devront pas disposer de données sur la totalité de la fenêtre temporelle : elles devront présenter **plus de 27 ans de données** (tolérance de lacune de 10% sur 30 ans de données).

Le même critère de durée n'est pas applicable aux **séries piézométriques** car trop peu de stations présentent plus de 27 ans de suivi. Des piézomètres disposent de plus de 50 ans dans le Nord et l'Est de la France ; en revanche, le réseau de piézomètres est plus récent dans le centre et le sud de la France. L'exigence est donc ramenée à **plus de 20 ans de données quand le domaine modélisé dispose de piézomètres répondant à ce critère**.

3. Constitution du réseau de stations hydrométriques de référence

Deux types de données sont exploitées :

- des observations en rivière, issues de la mesure continue de hauteurs, puis transformées en débit à l'aide de courbes de tarage ; elles formeront l'essentiel de l'information hydrologique disponible dans la banque HYDRO et de celle exploitée ici ;
- des reconstitutions issues de bilans en eau au niveau des aménagements : les Apports Naturels Reconstitués (ANR), calculés par EDF. Ces reconstitutions fournissent les estimations des débits qui auraient été observés au droit du point, si les aménagements en amont n'avaient pas été construits. Ces débits s'appuient sur le bilan entrée-sortie d'un aménagement, c'est-à-dire la différence entre les débits amont et ceux sortant (turbinés, déversés, réservés ou évaporés), et la variation de volume stocké dans les barrages, et sur des débits en provenance d'un témoin naturel voisin. Les ANR ne corrigent pas des usages amont, autres que ceux liés à la gestion des ouvrages hydroélectriques sous la responsabilité d'EDF. Certains ANR sont présents dans la banque HYDRO. D'autres sont réservés à un usage interne au sein d'EDF et ont été mis à disposition pour ce projet (les séries ne seront pas disponibles au public).

L'analyse a bénéficié également de la base de données constituée par INRAE HYCAR (Delaigue *et al.*, 2021) obtenue par extraction des données HYDRO et examen (et correction des métadonnées).

3.1. Sélection selon les métadonnées

Une première sélection a été effectuée en interrogeant les champs des métadonnées des stations extraites de la banque HYDRO :

- « Influence » qualifiée de « fortement en étiage », « fortement », « pas ou faiblement », « » (inconnu),
- Qualité des mesures par gamme de débit : pour les basses eaux « Qualite BE », les moyennes eaux « Qualite ME » et les hautes eaux « Qualite HE » qualifiée de « bonne », « douteuse » ou « » (inconnue),
- « Statut » renseigné par les appellations « station sans signification hydrologique » ou « station avec signification hydrologique ».

Cette présélection s'est appuyée sur les enregistrements disponibles dans la base de données HYDRO en janvier 2020, avant le basculement vers l'Hydroportail. Le choix des séries de débit mises à disposition par EDF relève d'une expertise collective interne.

Les contraintes suivantes ont été appliquées pour le choix des stations extraites de la banque HYDRO :

- Le régime hydrologique aux stations doit être « pas ou faiblement influencé » ou non qualifié « »,
- Les stations doivent avoir une « signification hydrologique » (sont donc exclues les mesures sur des canaux, des drains, des bras secondaires, etc.),
- La qualité des données annoncée par le gestionnaire de la station hydrométrique doit être « bonne » sur toute la gamme des débits : en hautes, moyennes et basses eaux. Par défaut, le qualificatif « » est accepté.

Quelle que soit l'origine des données :

- La longueur totale des séries des débits doit être supérieure à 27 ans entre le 1^{er} janvier 1976 et le 31 décembre 2019,
- La surface du bassin versant topographique des stations doit être supérieure à 64 km² (en l'absence d'information de surface, celle-ci est issue de <https://webgr.inrae.fr/activites/base-de-donnees/>),

Un jeu de 880 stations (Figure 1) a finalement été constitué. Il contient 36 séries mises à disposition par EDF qui permettent de densifier le nombre de points sur le bassin versant de la Loire en amont de Giens et ceux de la Durance et de l'Isère (là où les aménagements sont les plus nombreux).

Il est, du point de vue statistique, représentatif des stations de la banque HYDRO en termes de surface, d'altitude, et de module. Même si certains secteurs sont dépourvus de points d'évaluation, l'évaluation reposera sur des régimes hydrologiques similaires mais observés ailleurs.

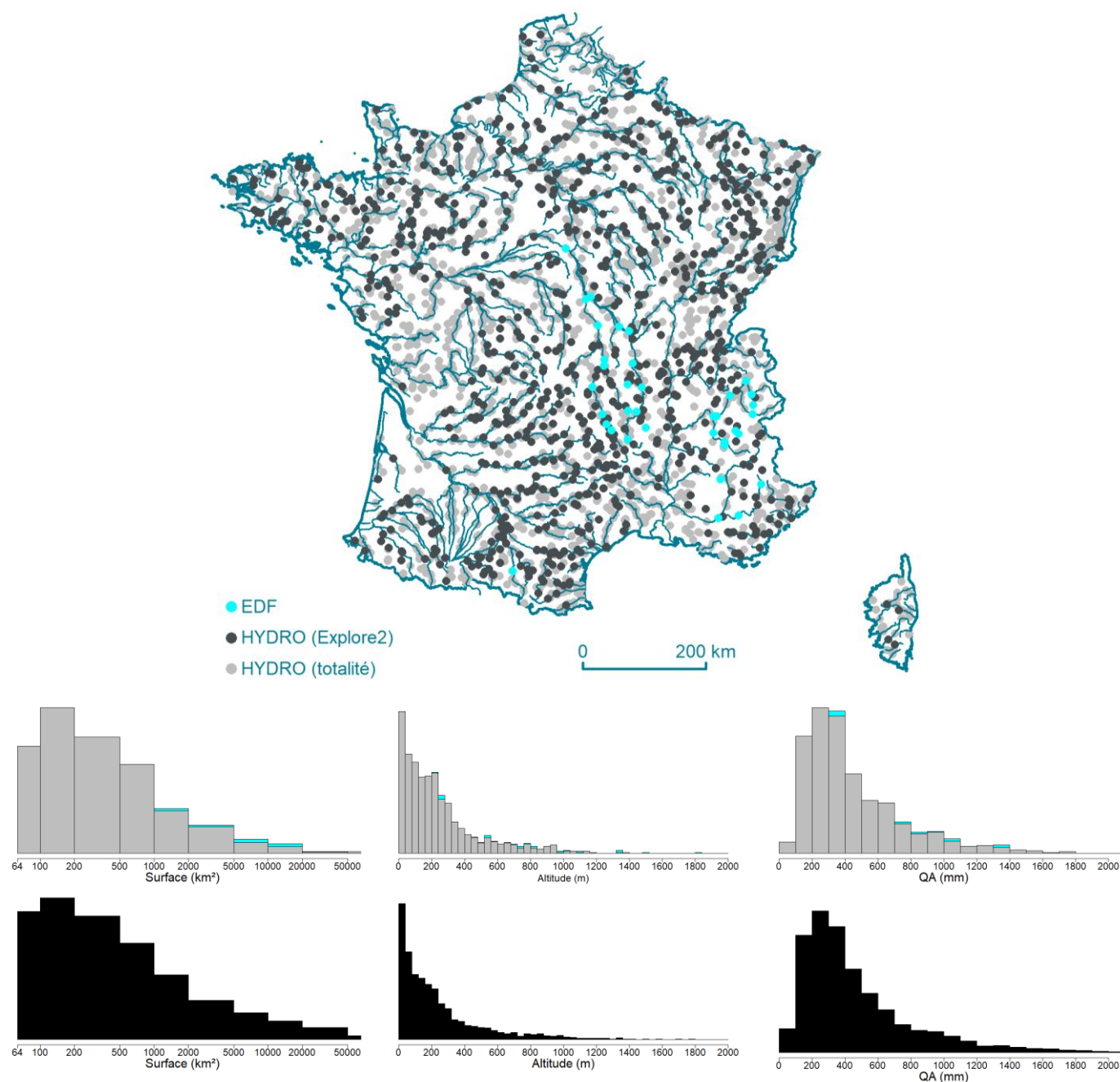


Figure 1 : Répartition spatiale et distribution statistique des caractéristiques des stations hydrométriques (surface, altitude et écoulement annuel moyen) des stations hydrométriques de la banque HYDRO et de la présélection de 880 stations hydrométriques (identifiées par leur origine)

3.2. Sélection selon la disponibilité des forçages climatiques

Les données d'entrée des modèles simulant des débits sont issues de SAFRAN dont les valeurs en dehors des frontières françaises sont sujettes à caution. Une contrainte doit s'appliquer sur la variable *PourcentFrance* définie comme la surface drainée en France divisée par la surface totale du bassin versant.

3.3. Sélection selon les informations extraites de la banque BNPE

Le caractère influencé renseigné dans la banque HYDRO s'appuie sur l'expertise du gestionnaire de la station et intègre des influences de natures diverses. L'analyse des influences est affinée par un examen des données de la banque nationale BNPE (<https://bnpe.eaufrance.fr>).

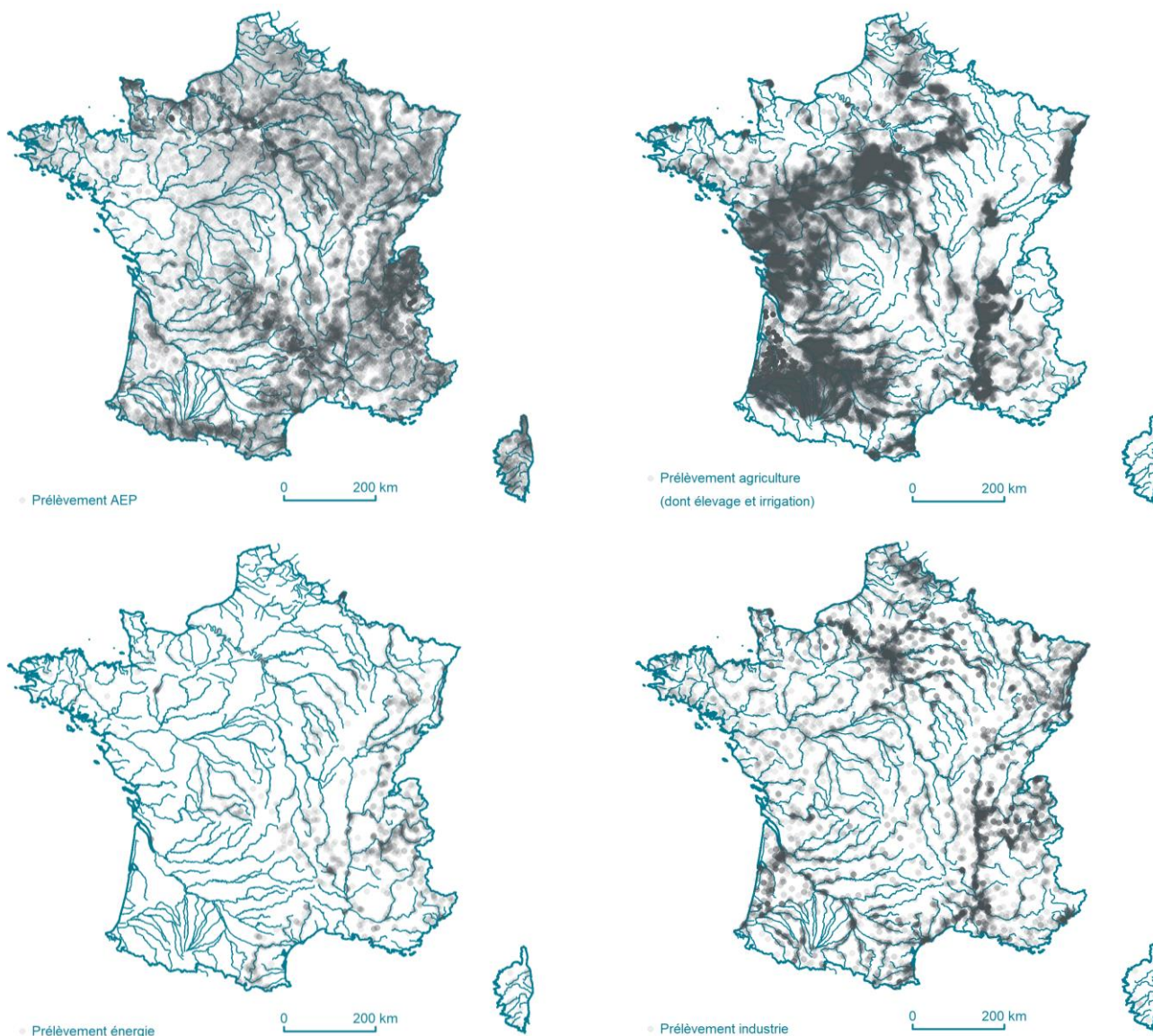


Figure 2 : Points de prélèvements par usage (source BNPE, période 2008-2019)

La Figure 2 représente l'ensemble des points de prélèvements de la BNPE sur la période 2008-2019 (avec une médiane des prélèvements annuels non nulle sur 2012-2019). Les données de prélèvement sont exploitées sur la période 2012-2018 (en dehors de cette période, l'inventaire n'était pas exhaustif à la date d'extraction). Les prélèvements sont fournis au pas de temps annuel. La **médiane sur la période 2012-2018** est, dans la suite, jugée **représentative des prélèvements au point considéré**. Les points de prélèvements

mobilisant les ressources superficielles et les ressources souterraines sont intégrés sans différenciation dans la comptabilité.

Aucune critique des données de la BNPE n'a été engagée ; cependant, nous pouvons d'ores et déjà signaler que la localisation des points et les usages associés ne sont pas toujours renseignés avec la précision souhaitée (certains ouvrages avec prélèvement (captages AEP) sont ramenés au centroïde de la commune pour des raisons de sécurité nationale (lorsqu'ils sont renseignés sur des sites grand public)).

A titre indicatif, 117851 points prélevant 834 milliards de m³ en 2018 (Tableau 1) ont pu être exploités sur les 138198 identifiés dans la BNPE prélevant 839 milliards de m³. Les points intégrés dans l'analyse couvrent la quasi-totalité des prélèvements bancarisés, mais il faut garder à l'esprit que leur localisation n'est pas forcément exacte.

Tableau 1 : Prélèvements annuels en milliards de m³ sur l'ensemble de points considérés ici et sur l'ensemble des points de la BNPE

Année	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Données BNPE exploitées	898	1018	921	816	885	705	834
Ensemble BNPE	899	1019	921	817	885	705	839

3.4. Sélection selon les informations extraites de la banque AQUASTAT

La base de données AQUASTAT de la FAO (www.fao.org/aquastat/en/databases/dams) contient les données descriptives de 113 grands barrages localisés en France métropolitaine (localisation, capacité des réservoirs, fonctions, Figure 3).

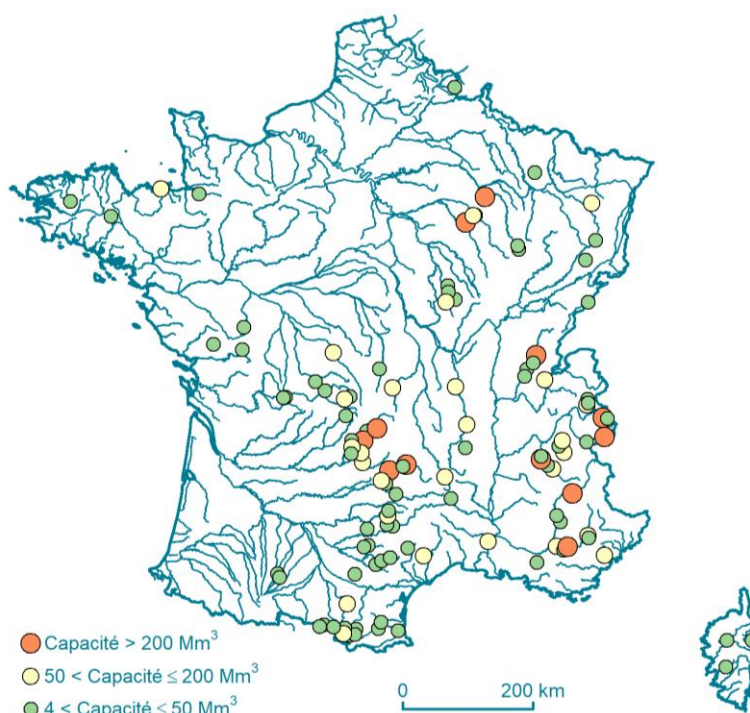


Figure 3 : Localisation et capacité des grands barrages en France métropolitaine selon AQUASTAT

3.5. Altération des régimes naturels

Le niveau d'altération du régime naturel des eaux est examiné en croisant les données de débit de la banque HYDRO, les statistiques de la BNPE et les capacités de stockage de la base de données AQUASTAT. Les indicateurs choisis reprennent pour partie ceux suggérés par Caruso et Arnaud (2019) et Coulibaly (2018) qui renseignent la confiance à accorder *a priori* aux sorties des modèles compte tenu des caractéristiques du bassin versant.

Les **prélèvements médians sur la période 2012-2018, qu'ils soient superficiels ou souterrains**, ont été **agregés à l'échelle du bassin versant** en exploitant un plan de drainage au kilomètre (Sauquet, 2006). **Les prélèvements pour l'irrigation ont été comptabilisés sans prise en compte des techniques utilisées** (code du critère d'identification = 5 dans la BNPE sans distinguer les types d'irrigation 2A « Irrigation par aspersion », 2B « Irrigation gravitaire », 2C « Irrigation au goutte à goutte », 2D « Irrigation par tout autre procédé », et 2E « Lutte antigel de cultures pérennes »), ce niveau de détail étant jugé de second ordre pour notre analyse.

Dans la suite, nous avons supposé que **l'hydroélectricité modifie la saisonnalité des écoulements sans induire de consommation et que son effet sur l'hydrologie naturelle se concentre en hiver et au printemps**. L'hydroélectricité est isolée des autres modes de production d'énergie et les prélèvements associés n'entrent pas dans la comptabilité des consommations des usages dans ce qui suit.

En étiage

Les volumes prélevés sont annuels. Nous supposons qu'ils se répartissent uniformément sur les 12 mois de l'année pour l'AEP, l'énergie et l'industrie, et sur les mois de juin, juillet, août et septembre pour l'irrigation et que les prélèvements sont convertis en consommation en appliquant un coefficient multiplicatif (Tableau 2).

Tableau 2 : Paramètres et formules utilisées pour le calcul de la consommation mensuelle en été

Usage	Coefficient de consommation	CONSOMMATION_MOIS_ETIAGE Consommation mensuelle en période d'étiage (juin, juillet, août et septembre)
AEP	20%	$0.2 \times VPrelAn/12$
Irrigation*	70%	$0.7 \times VPrelAn/4$
Industrie et énergie**	7%	$0.07 \times VPrelAn/12$

* : efficience moyenne théorique estimée entre 40 – 60% pour le gravitaire, 70 – 80% pour l'aspersion et 80 – 90% pour le goutte-à-goutte (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-dirrigation-agricole>) ; ** : l'hydroélectricité est exclue

Le niveau d'altération en étiage est mesuré par :

$$CONSOMMATION_MOIS_ETIAGE / (CONSOMMATION_MOIS_ETIAGE + QMNA5) \quad (1)$$

Le terme $(CONSOMMATION_MOIS_ETIAGE + QMNA5)$ est une estimation grossière d'un débit $QMNA5$ corrigé des pertes par une consommation médiane. Le débit $QMNA5$ est calculé sur tous les débits disponibles dans la banque HYDRO en janvier 2020.

A l'échelle annuelle

Les capacités de stockage des ouvrages sont agrégées à l'échelle du bassin versant. Le niveau d'altération induit par les actions des réservoirs est mesuré par le rapport $(CAPACITE_RESERVOIR)/QA$ où QA est le module interannuel observé du cours d'eau sur toute la période de disponibilité.

Les prélèvements sont convertis en consommation, comme précédemment, en appliquant un coefficient de consommation multiplicatif (

Tableau 3).

Tableau 3 : Paramètres et formules utilisées pour le calcul de la consommation annuelle

Usage	Coefficient de consommation	CONSOMMATION_ANNEE Consommation annuelle
AEP	20%	$0.2 \times VPrelAn$
Irrigation*	70%	$0.7 \times VPrelAn$
Industrie et énergie**	7%	$0.07 \times VPrelAn$

* : efficacité moyenne théorique estimée entre 40 – 60% pour le gravitaire, 70 – 80% pour l'aspersion et 80 – 90% pour le goutte-à-goutte (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-dirrigation-agricole>) ; ** : l'hydroélectricité est exclue

Le niveau d'altération à l'échelle annuelle lié aux prélèvements est mesuré par :

$$\text{CONSOMMATION_ANNEE} / (\text{CONSOMMATION_ANNEE} + \text{QA}) \quad (2)$$

Le terme ($\text{CONSOMMATION_ANNEE} + \text{QA}$) est une estimation grossière d'un module QA corrigé des pertes par consommation.

3.6. Limites

Les limites sont celles d'une approche purement statistique (de type bilan) avec des conclusions forcément dépendantes des indicateurs hydrologiques (QA et QMNA5) et une surestimation des prélèvements déclarés induits par le choix de la médiane. Les limites sont liées à l'information contenue dans la BNPE :

- Historique sur les prélèvements réduit (2012-2018),
- Imprécision sur la localisation des prélèvements et l'estimation de la consommation,
- Absence d'information sur les rejets (problématique pour le cas des dérivations ou de retour au milieu),
- Des usages référencés dans la BNPE non intégrés, faute d'en connaître les conséquences en termes de consommation : « USAGE INCONNU » (code BNPE : 0), « PAS D'USAGE » (code BNPE : 1), « AGRICULTURE-ELEVAGE (hors irrigation) » (code BNPE : 3), « LOISIRS (Bassin de natation, Baignade, Autres activités de loisir, Arrosage, Canon à neige) » (code BNPE : 7), « EMBOUTEILLAGE », « THERMALISME et THALASSOTHERAPIE » (code BNPE : 8), « DEFENSE CONTRE INCENDIE » (code BNPE : 9), « DE POLLUTION » (code BNPE : 11), « REALIMENTATION D'UNE RESSOURCE EN EAU (Soutien d'étiage, Compensation évaporation, Compensation irrigation, Compensation salubrité, Remplissage plan d'eau) » (code BNPE : 12), « CANAUX (Volume technique, Alimentation au soutien canal) » (code BNPE : 13), « SOUTIEN D'ETIAGE » (code BNPE : 14), « ENTRETIEN DE VOIRIES » (code BNPE : 15), « ALIMENTATION AU SOUTIEN CANAL » (code BNPE : 16), « USAGE DOMESTIQUE » (code BNPE : 17).

3.7. Croisement des critères pour une qualification des données

Les indicateurs relatifs à la pression sur la ressource en eau ont été calculés pour identifier les points les plus propices à une évaluation des modèles. Des seuils, jugés raisonnables pour l'exercice conduit ici, ont été considérés pour construire une typologie (

*Explore2 – Identification de stations hydrométriques et piézomètres
pour l'évaluation des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques*

Indicateur	Mode de calcul (« nom de variable dans le fichier excel Selection_stations_Total.xlsx »)	Classe			
		1	2	3	4
		Les débits ne permettent pas de juger de la performance des modèles pendant la période d'évaluation	De nombreuses précautions quant à une comparaison directe aux débits	Quelques précautions quant à une comparaison aux débits	La comparaison des débits à la station aux débits simulés sur la période d'évaluation est légitime
Capacité à modifier le régime par les actions de stockage et déstockage	Ratio entre la capacité des barrages amont et le module observé (CAPACITE_RESERVOIR/QA)	Strictement supérieur à 25% et débits non naturalisés [3]	Inférieur ou égal à 25% et supérieur strictement à 10% et débits non naturalisés [21]	Inférieur ou égal à 10% et supérieur strictement à 5% et débits non naturalisés [14]	Inférieur ou égal à 5% ou débits naturalisés [842]
Pression estivale sur la ressource	Rapport de la consommation médiane mensuelle estivale divisée par le débit réglementaire QMNA5 actuel (cf. Equation (1)) (PRESSION_MOIS_ETIAGE)	Strictement supérieur à 50% [84]	Inférieur ou égal à 50% et supérieur strictement à 25% [64]	Inférieur ou égal à 25% et supérieur strictement à 10% [128]	Inférieur ou égal à 10% [604]
Pression annuelle sur la ressource	Rapport de la consommation annuelle médiane divisée par le module (cf. Equation (2)) (PRESSION_ANNEE)	Strictement supérieur à 25% [2]	Inférieur ou égal à 25% et supérieur strictement à 10% [11]	Inférieur ou égal à 10% et supérieur strictement à 5% [35]	Inférieur ou égal à 5% [832]
Proportion du bassin en France	Rapport de la surface située en France divisé par la surface totale du bassin versant (POURCENT_FRANCE)	Strictement inférieur à 90% [22]			Supérieur ou égal à 90% [858]

Tableau 4, Figure 4).

*Explore2 – Identification de stations hydrométriques et piézomètres
pour l'évaluation des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques*

Indicateur	Mode de calcul (« nom de variable dans le fichier excel Selection_stations_Total.xlsx »)	Classe			
		1	2	3	4
		Les débits ne permettent pas de juger de la performance des modèles pendant la période d'évaluation	De nombreuses précautions quant à une comparaison directe aux débits	Quelques précautions quant à une comparaison aux débits	La comparaison des débits à la station aux débits simulés sur la période d'évaluation est légitime
Capacité à modifier le régime par les actions de stockage et déstockage	Ratio entre la capacité des barrages amont et le module observé (CAPACITE_RESERVOIR/QA)	Strictement supérieur à 25% et débits non naturalisés [3]	Inférieur ou égal à 25% et supérieur strictement à 10% et débits non naturalisés [21]	Inférieur ou égal à 10% et supérieur strictement à 5% et débits non naturalisés [14]	Inférieur ou égal à 5% ou débits naturalisés [842]
Pression estivale sur la ressource	Rapport de la consommation médiane mensuelle estivale divisée par le débit réglementaire QMNA5 actuel (cf. Equation (1)) (PRESSION_MOIS_ETIAGE)	Strictement supérieur à 50% [84]	Inférieur ou égal à 50% et supérieur strictement à 25% [64]	Inférieur ou égal à 25% et supérieur strictement à 10% [128]	Inférieur ou égal à 10% [604]
Pression annuelle sur la ressource	Rapport de la consommation annuelle médiane divisée par le module (cf. Equation (2)) (PRESSION_ANNEE)	Strictement supérieur à 25% [2]	Inférieur ou égal à 25% et supérieur strictement à 10% [11]	Inférieur ou égal à 10% et supérieur strictement à 5% [35]	Inférieur ou égal à 5% [832]
Proportion du bassin en France	Rapport de la surface située en France divisé par la surface totale du bassin versant (POURCENT_FRANCE)	Strictement inférieur à 90% [22]			Supérieur ou égal à 90% [858]

Tableau 4 : Typologie de stations hydrométriques selon des critères caractérisant la pression sur la ressource en eau (les valeurs entre crochets sont les nombres de stations répondant au critère pris isolément)

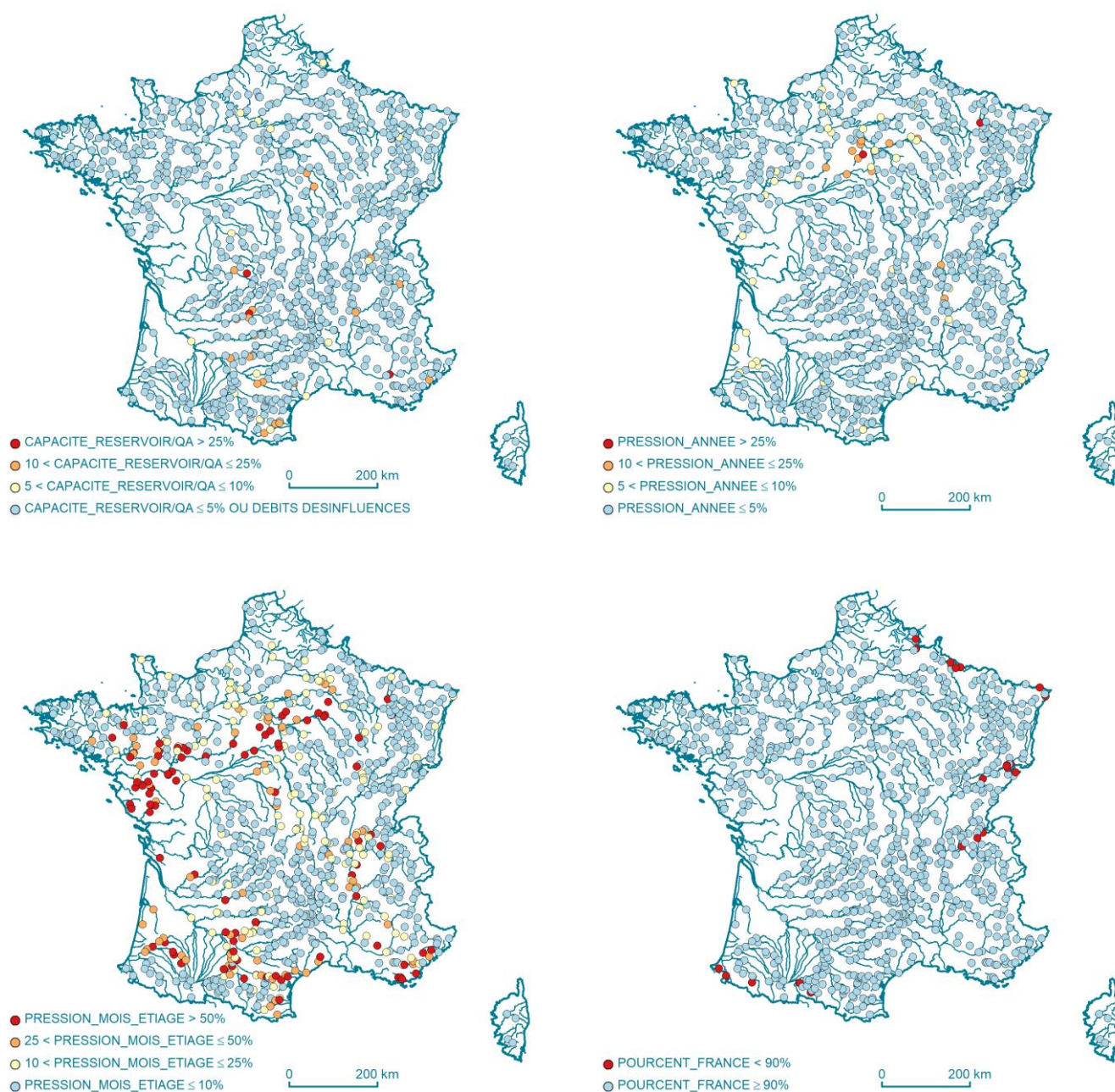


Figure 4 : Répartition des stations par classe selon l'indicateur utilisé

La contrainte pesant sur la pression estivale est la plus discriminante. Sans surprise, la répartition par classe des niveaux de pression estivale est corrélée à la densité de points de prélèvements pour l'agriculture (Figure 2).

L'impact potentiel de certains réservoirs présents sur la Figure 3 est masqué car certaines stations hydrométriques à leur aval présentent des débits désinfluencés par EDF.

Finalement en croisant toutes les métriques, nous avons identifié 880 stations dont **674 qui répondent aux exigences suivantes** :

- CAPACITE_RESERVOIR/QA < 5%,
- PRESSION_ANNEE < 5%,
- PRESSION_MOIS_ETIAGE < 25%,

- **POURCENT_FRANCE $\geq 90\%$**

et qui sont candidates à l'évaluation des modèles hydrologiques (Figure 5). Les stations hydrométriques parmi les 674 candidates ne satisfaisant pas le critère sur les étiages $\text{PRESSION_MOIS_ETIAGE} \leq 10\%$ seront exploitées pour le diagnostic sur les crues et les moyennes eaux.

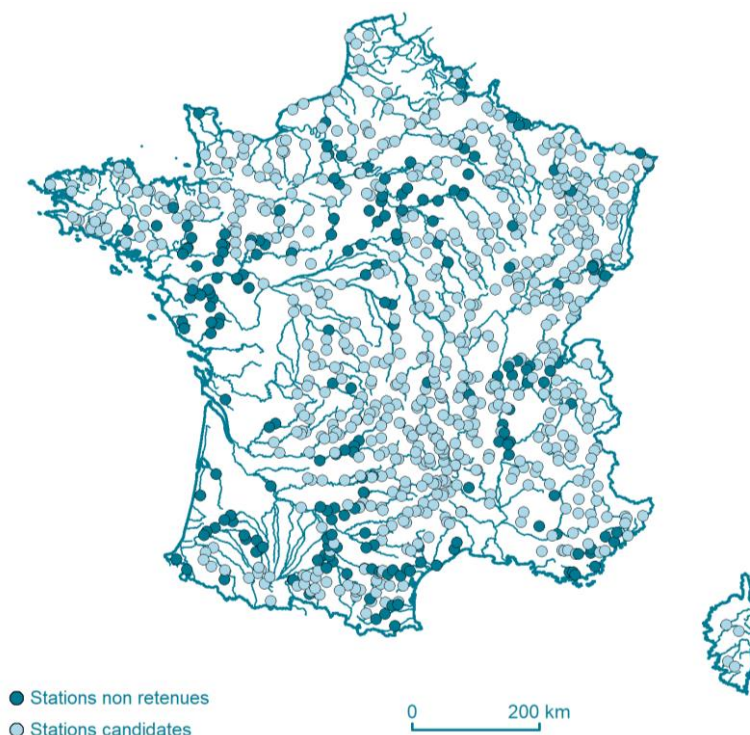


Figure 5 : Identification des 674 stations candidates pour l'évaluation parmi le jeu initial de 880 stations hydrométriques

3.8. Identification des données aberrantes ou d'influences manifestes dans les séries temporelles

La dernière phase de constitution du jeu de référence s'est appuyée sur un exercice collectif de critique des débits observés, coordonné par INRAE Antony. Cet exercice vise à identifier par analyse visuelle (*i.e.* sans mise en œuvre d'analyse statistique) des périodes pendant lesquelles les données de débits paraissent douteuses. Par données douteuses, on entend des données de débits ne semblant pas refléter un comportement hydrologique naturel d'un bassin versant. Cette absence de cohérence hydrologique apparente peut résulter d'influences sur le bassin (par exemple, un ouvrage de régulation ou des prélèvements/rejets importants à l'amont), d'influences hydrauliques locales en amont de la station de mesure, ou encore de dysfonctionnement des capteurs ou d'erreurs de traitement des mesures (par exemple, un mauvais report des lacunes).

Des fiches html ont été mises à disposition (Figure 6), elles représentent des séries chronologiques des variables hydrométéorologiques (dont les débits observés) au pas de temps journalier. Ces fiches sont dynamiques et ont donc permis de zoomer sur différentes périodes et les dates pour lesquelles des anomalies de débits douteux ont été identifiées par les participants à cet exercice. L'œil humain n'est pas parfait et la sensibilité à des erreurs est propre à chaque individu. Ainsi, selon les personnes faisant l'analyse, il est peu probable que les mêmes erreurs soient identifiées. Aussi, chaque série a été inspectée par deux personnes.

La Figure 6 contient :

- En en-tête, les informations relatives à la station (lieu et rivière, coordonnées, altitude) et au bassin (surface). Il comprend la légende concernant les codes de validité extraits de la banque HYDRO ainsi qu'un lien vers la fiche station de l'Hydroportail et la légende des débits tracés (en bleu foncé, les débits observés à analyser et, en vert, les débits simulés par un modèle hydrologique GR5J couplé à CemaNeige calé sur la période d'intérêt (1976-2019)) ;
- Dans le panel du haut, les séries temporelles journalières de fraction de précipitation neigeuse issue de SAFRAN (en bleu, échelle inversée, allant de 0 à 1) et température de l'air issue de SAFRAN (en rouge). Les pointillés indiquent le seuil de température 0°C ;
- Dans le panel du milieu, les séries temporelles journalières de précipitation issue de SAFRAN (en bleu clair, échelle inversée), de débits observés en échelle linéaire (en bleu foncé) et de débits simulés (en vert) ;
- Dans le panel du bas, les débits comme le panel du milieu, mais en échelle logarithmique pour mieux mettre en évidence des anomalies en étiage.

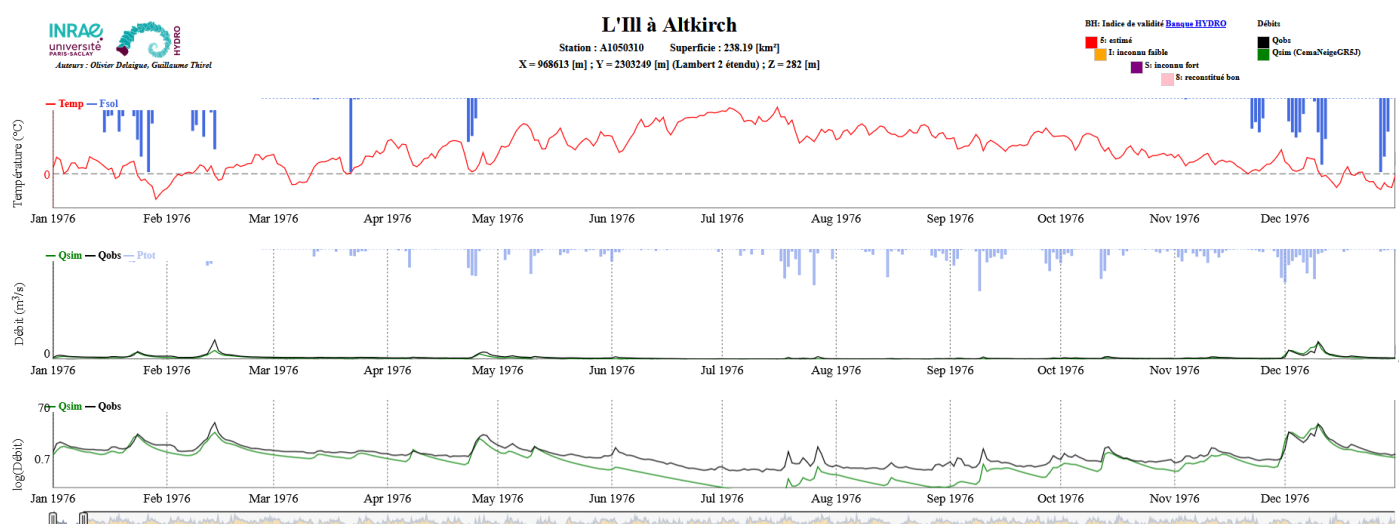


Figure 6 : Représentation support pour l'inspection visuelle des séries de débit

Les anomalies sont classées en quatre catégories :

- « Erreur ponctuelle aberrante » ;
- « Interpolation linéaire » entre points espacés de plusieurs jours ;
- « Bruit » qui désigne des oscillations/variabilités des débits suspects ;
- « Décrochement » qui désigne une rupture (saut brutal) entre deux valeurs consécutives ;
- « Autre (précisez) ».

L'analyse des 674 chroniques de débits mesurés a mobilisé 43 personnes en provenance de plusieurs organismes (ACTeon, Aquasys, BRGM, Cereg, DREAL Occitanie, EDF DTG, EPIDOR, HSM, INRAE, Météo-France, OFB, Chambre d'Agriculture Vaucluse, Sorbonne Université, Suez, Université de Limoges), dont 17 sont des partenaires du projet Explore2 et 26 sont externes.

L'exercice s'est déroulé sur une période de quatre mois pour collecter l'ensemble des retours de chaque participant. Enfin, une agrégation des résultats en concertation (Laurent Strohmenger, Eric Sauquet et Guillaume Thirel) a été menée en intégrant des commentaires reçus des Comités des Utilisateurs (cf. « Action A1 : Niveau d'altération des points constituant les deux réseaux de référence d'Explore2 » du volet Accompagnement des acteurs) et des DREALs. Il en résulte la décision de conserver 611 stations, et d'écarter

63 stations du jeu d'évaluation pour des raisons d'influences anthropiques ou d'erreurs de mesure trop nombreuses.

A de rares exceptions près, toutes les stations conservées présentent des périodes d'erreur limitées (2.4 % de la durée des chroniques en moyenne,

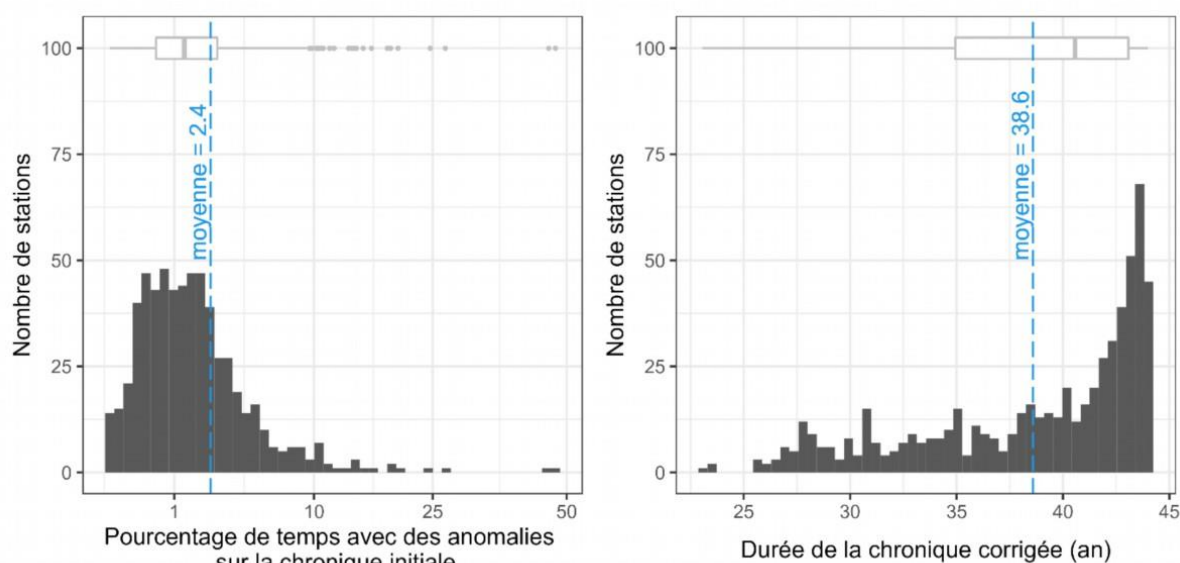


Figure 7). Les durées de chroniques disponibles, une fois nettoyées des erreurs identifiées, s'élèvent en moyenne à 38.6 années (

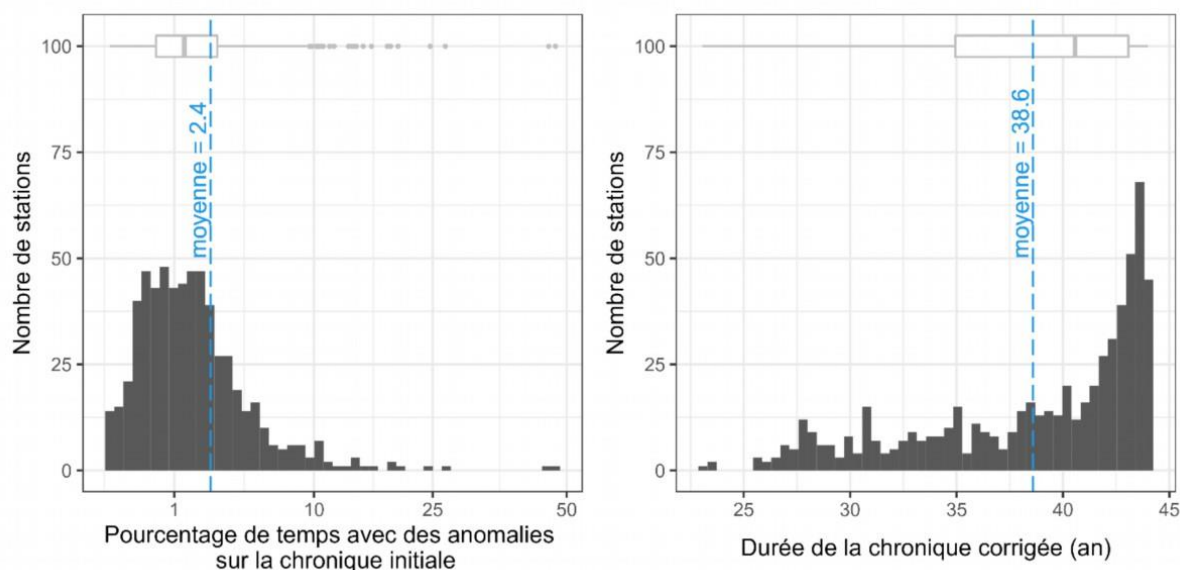


Figure 7). Les types d'erreur les plus fréquemment identifiés en termes de longueur de chronique sont les interpolations linéaires (34%), suivi par le bruit (26%), puis autres (20%), les désaccords (deux types d'erreur différents identifiés pour une même date, 10%), les décrochements (8%) et enfin les erreurs ponctuelles (3%, Figure 8).

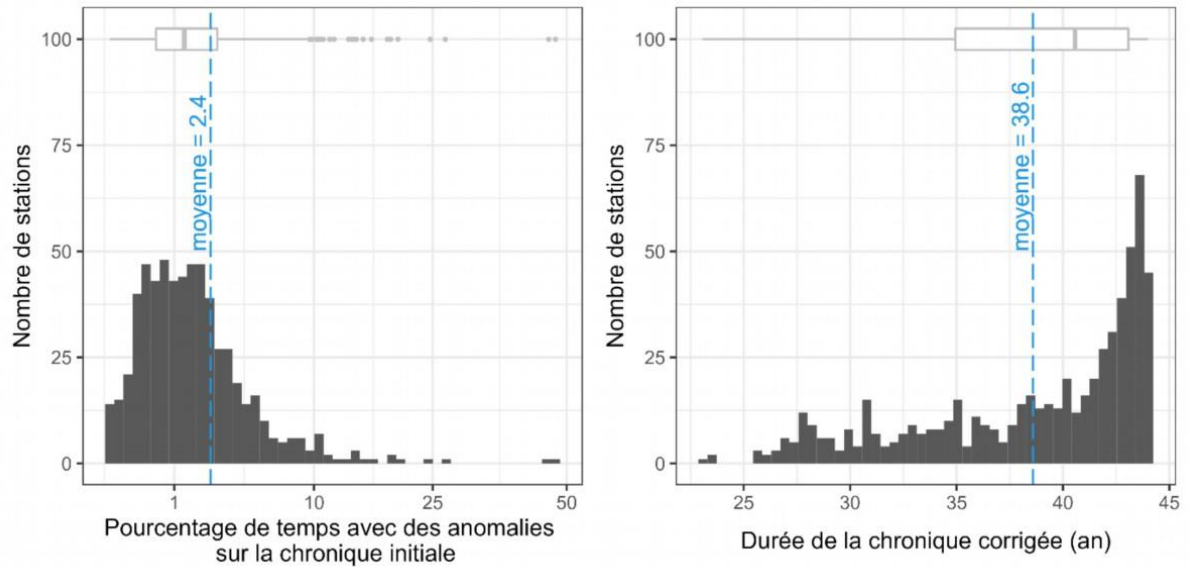


Figure 7 : Distributions des durées d'erreurs identifiées par chronique (%) et des longueurs des chroniques nettoyées (années) pour les 611 stations conservées

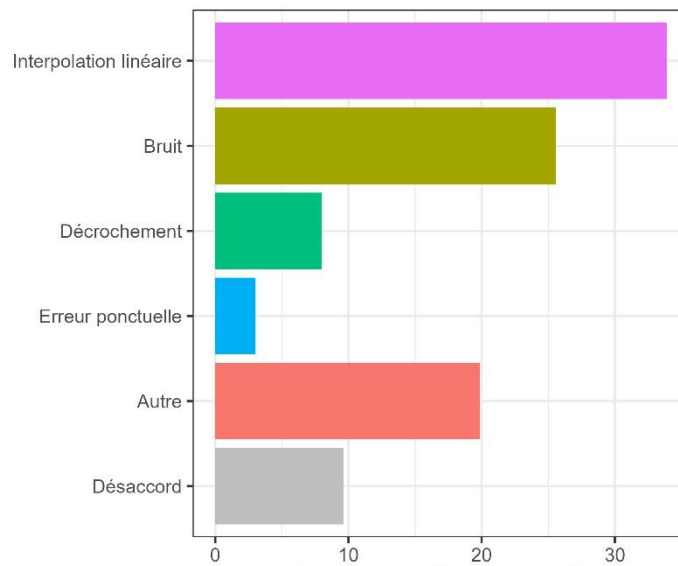


Figure 8 : Répartition des types d'anomalies (en %) des 680 années d'anomalies identifiées sur les 611 stations conservées (durée totale des séries initiales de 26840 années)

Le nombre d'erreurs identifiées diminue dans le temps entre 1976 et 2019 (

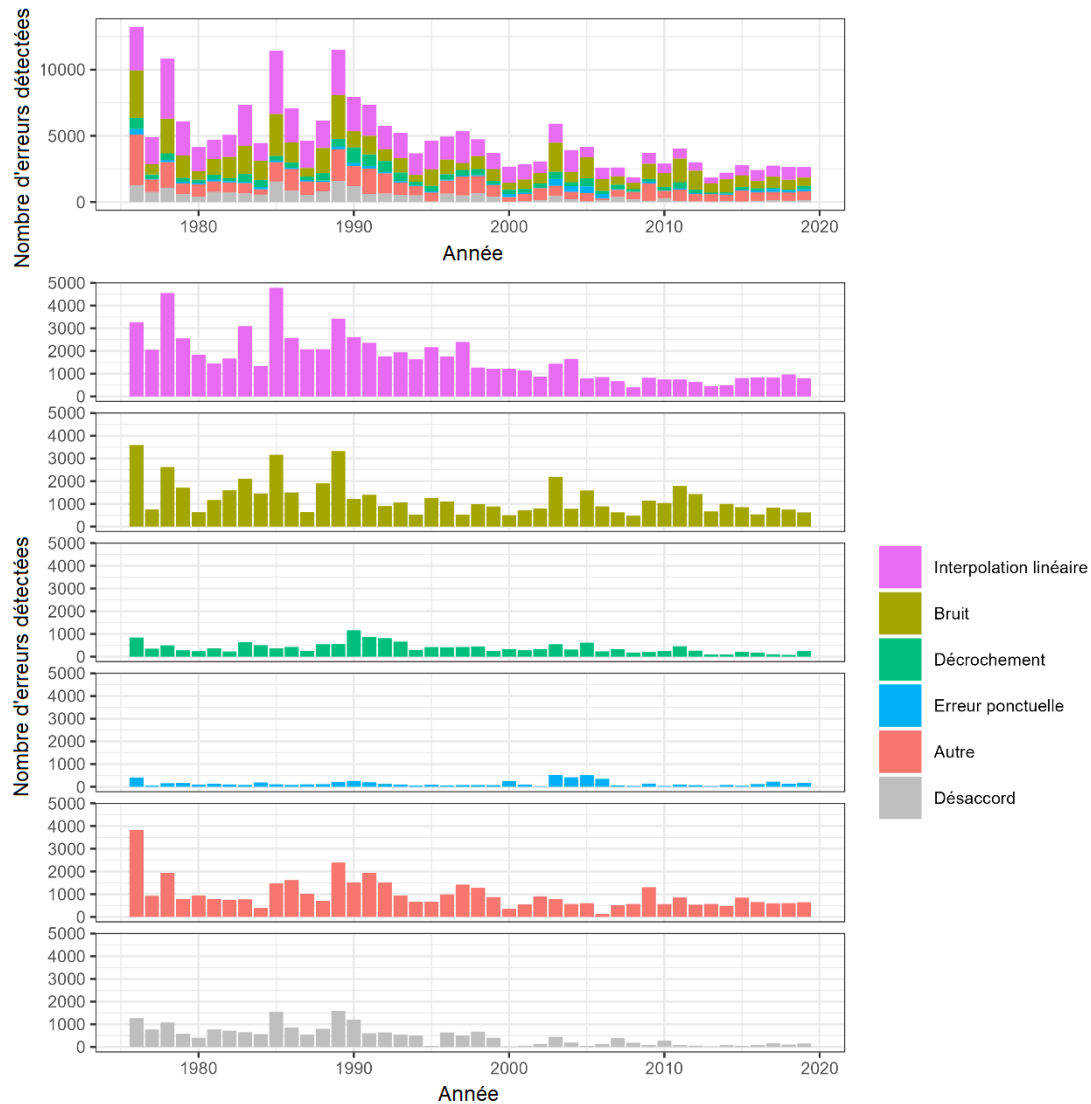


Figure 9), probablement en raison de l'amélioration de la qualité du suivi des stations hydrologiques. Cette diminution du nombre d'erreurs au long terme est particulièrement visible pour les interpolations linéaires et le bruit.

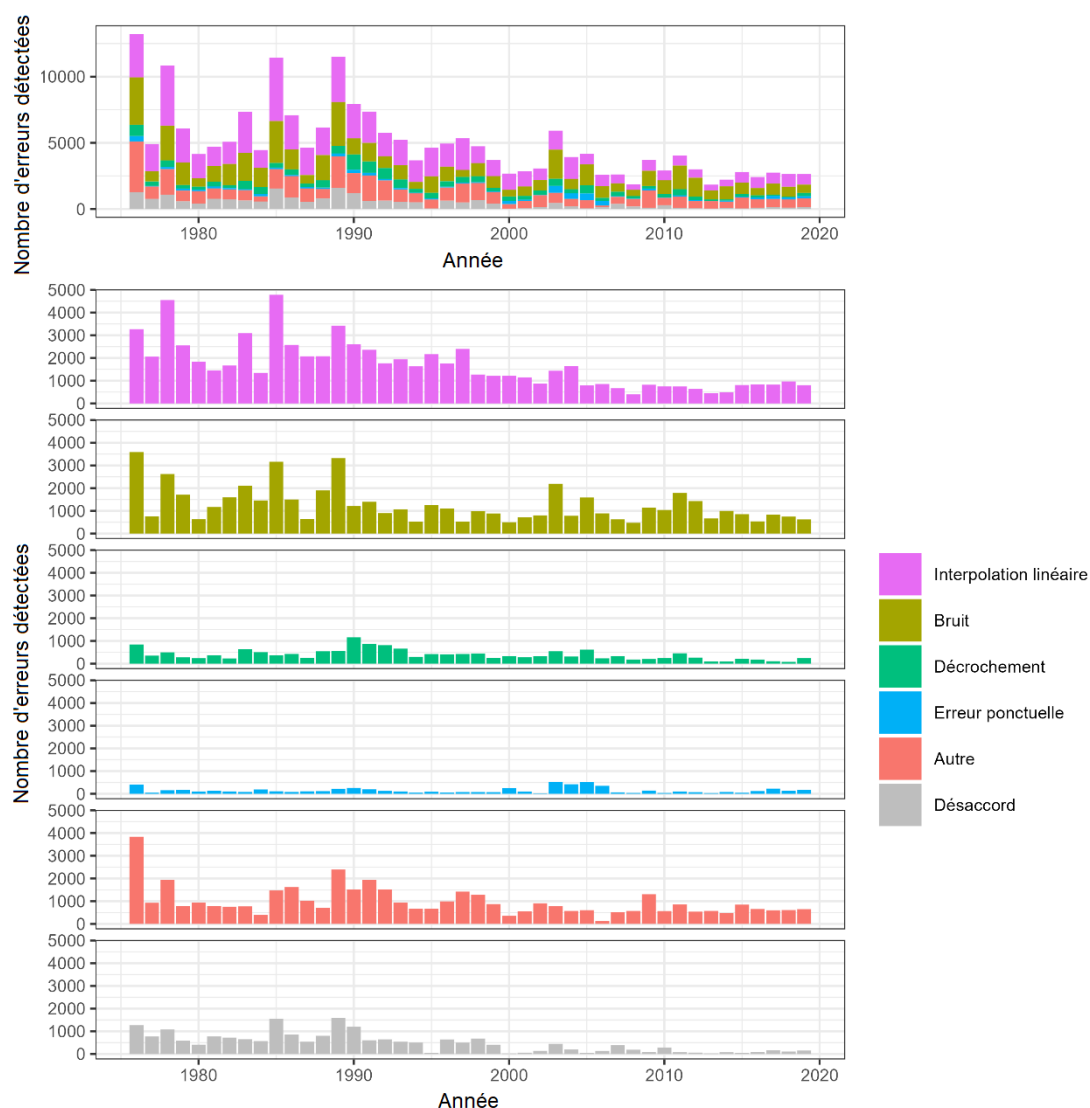


Figure 9 : Occurrences des types d'erreurs par année entre 1976 et 2019 pour les 611 stations conservées

La période de l'année la plus sujette aux erreurs est l'été, particulièrement les mois d'août et de septembre, pendant la période d'étiage des cours d'eau (Figure 10), ce qui reflète la difficulté de mesurer les bas débits, des marqueurs anthropiques plus faciles à détecter, ou un suivi moins assidu des dispositifs de mesures de débits en période de congés. Cette saisonnalité des erreurs est particulièrement visible pour les interpolations linéaires, le bruit, et dans une moindre mesure pour les décrochements (Figure 10).

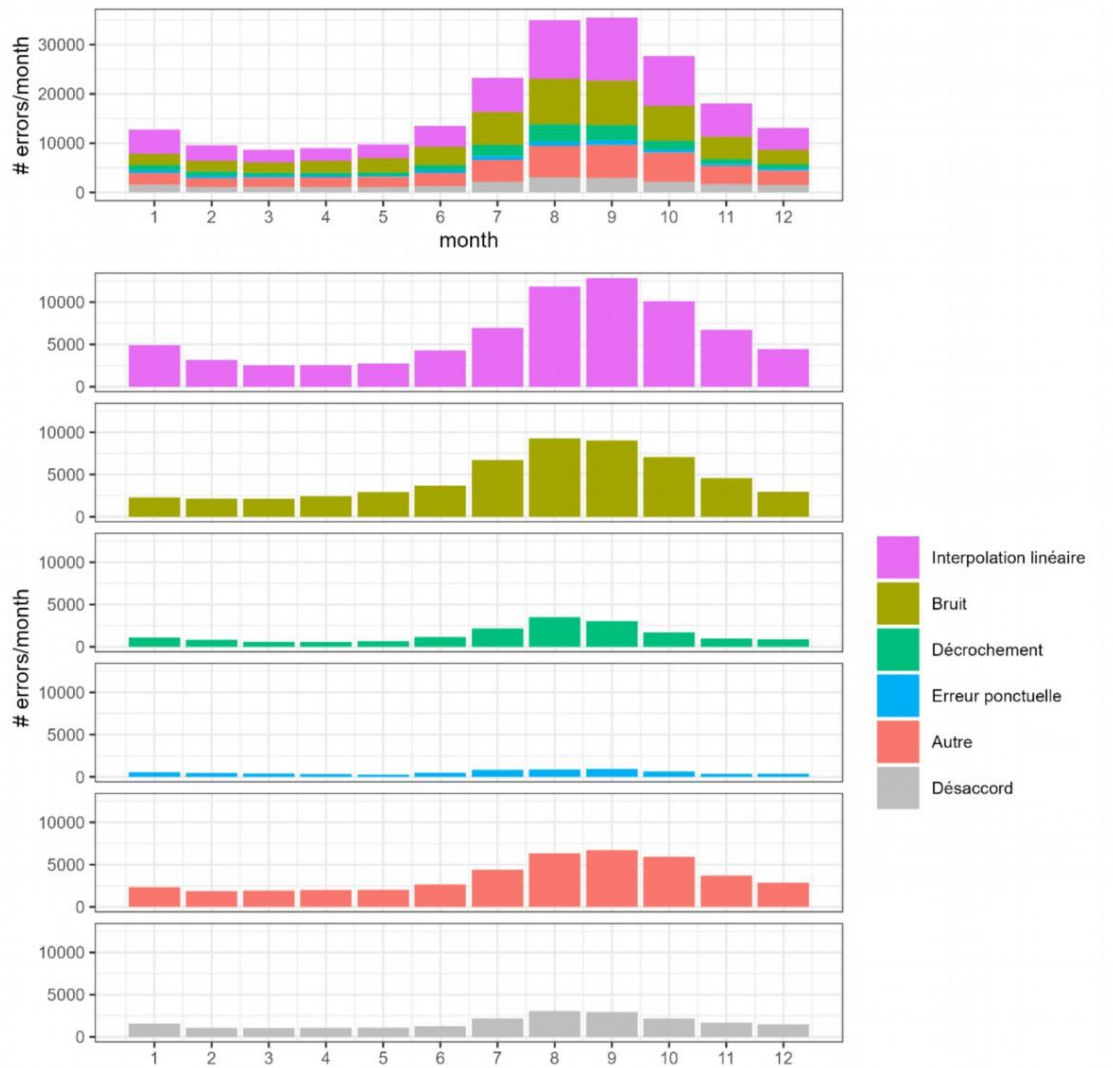


Figure 10 : Occurrences des types d'erreur par mois de l'année (1 : janvier ; 12 : décembre)

3.9. Le réseau de stations hydrométriques de référence d'Explore2

L'ensemble des stations hydrométriques formant le réseau de référence pour l'hydrologie de surface est reporté sur la Figure 11.

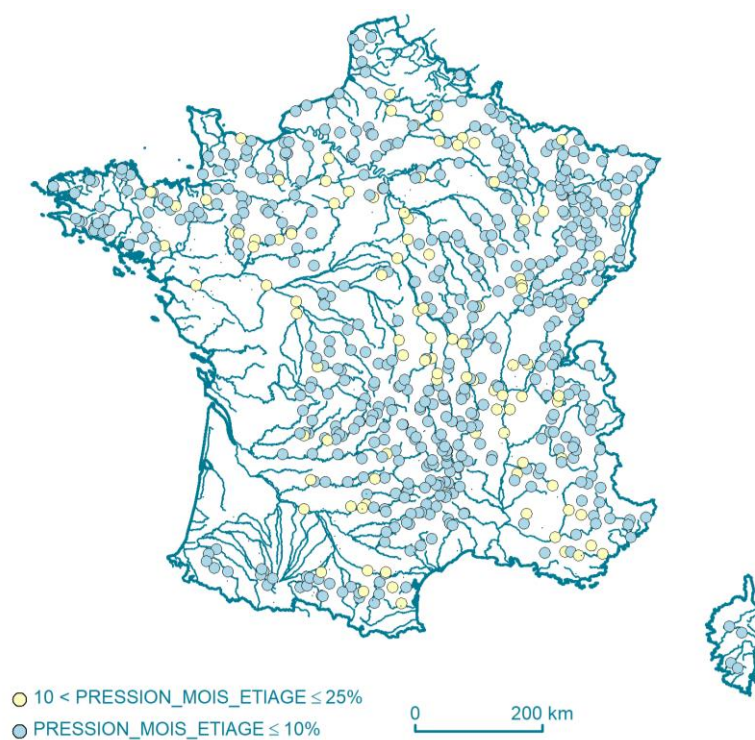


Figure 11 : Localisation des stations hydrométriques du réseau de référence pour l'hydrologie de surface

4. Constitution du réseau de piézomètres de référence

La source de données exploitée est le portail national d'Accès aux Données des Eaux Souterraines (ADES, <https://ades.eaufrance.fr>) qui recense des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines. Le travail d'identification des sites peu influencés par les activités humaines avec des mesures de bonne qualité est similaire à celui suivi pour la constitution du jeu de stations hydrométriques. Cependant, le processus de sélection n'est pas identique (métadonnées spécifiques au souterrain dans ADES, absence de série piézométriques désinfluencée...).

Le premier critère de sélection de piézomètres est relatif à la contrainte qu'impose la couverture spatiale des modèles utilisés dans Explore2 à savoir la plate-forme de modélisation hydrogéologique AquiFR (Vergnes *et al.*, 2020), le modèle spatialisé Nord-Aquitain des nappes profondes (MONA), et le modèle semi-distribué EROS appliqué à la Bretagne. Ces modèles reposent sur une large sélection de 1138 piézomètres répartis à l'échelle du territoire selon la Figure 12 et disponibles pour leur calibration et leur évaluation. Les 635 points rouges correspondent au Réseau de Contrôle et de Surveillance (<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/282>) mis en place dans le cadre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (circulaires DCE 2006/18 et directive 2000/60/DCE) relative à la surveillance des eaux souterraines.

Dans Explore2, le choix a été fait de valoriser trois jeux de piézomètres déjà constitués et expertisés pour constituer un ensemble de référence :

- Le jeu de piézomètres utilisé pour produire le Bulletin de Situation Hydrologique (BSH, <https://www.eaufrance.fr/publications/bsh>) à l'échelle nationale (Vigouroux, 2011). Le BSH, constitué de cartes et d'informations sur l'évolution des ressources en eau en France, est réalisé depuis plusieurs années par le BRGM, à la demande du Ministère de la Transition Ecologique. Il décrit la situation quantitative des hydrosystèmes en termes de pluie efficace, de débit des cours d'eau, de niveau des nappes d'eau souterraine, et de remplissage des barrages-réservoirs pour chaque mois de l'année. Il fournit une information synthétique utilisée par les arrêtés préfectoraux pour limiter les usages de l'eau durant les périodes critiques de sécheresse. Le BSH s'appuie sur environ 250 piézomètres à l'échelle de la France ;
- L'ensemble de 254 piézomètres identifiés par Baulon *et al.* (2021) pour examiner les modes de variabilité des niveaux piézométriques à l'échelle de la France. Cette sélection a poursuivi un objectif similaire à celui visé ici : identifier des piézomètres peu ou pas influencés par les actions humaines. Elle résulte d'une démarche itérative sur la base de critères numériques (la durée de suivi, la fréquence de mesures, la longueur d'interruption des enregistrements) et d'expertise (visualisation des séries temporelles, croisement avec les captages recensés dans la BNPE et avec les zones irriguées déclarées dans le Recensement Général Agricole, redondance entre deux piézomètres voisins, interrogation des hydrogéologues locaux et gestionnaires de réseau) ;
- Le réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (Vernoux, 2015). Ce réseau a été défini pour un nombre limité d'aquifères (39) sur la base de critères hydrogéologiques, de critères d'usage et d'un critère de sensibilité au changement climatique. Au final, 37 ouvrages (5 sources et 32 piézomètres) à l'échelle de la France ont été sélectionnés pour constituer ce réseau. Ces ouvrages sont en nappe libre et sont peu influencés par les pompages.

En complément, 11 piézomètres sélectionnés à dire d'expert sur le territoire du MONA viennent compléter ces jeux de données.

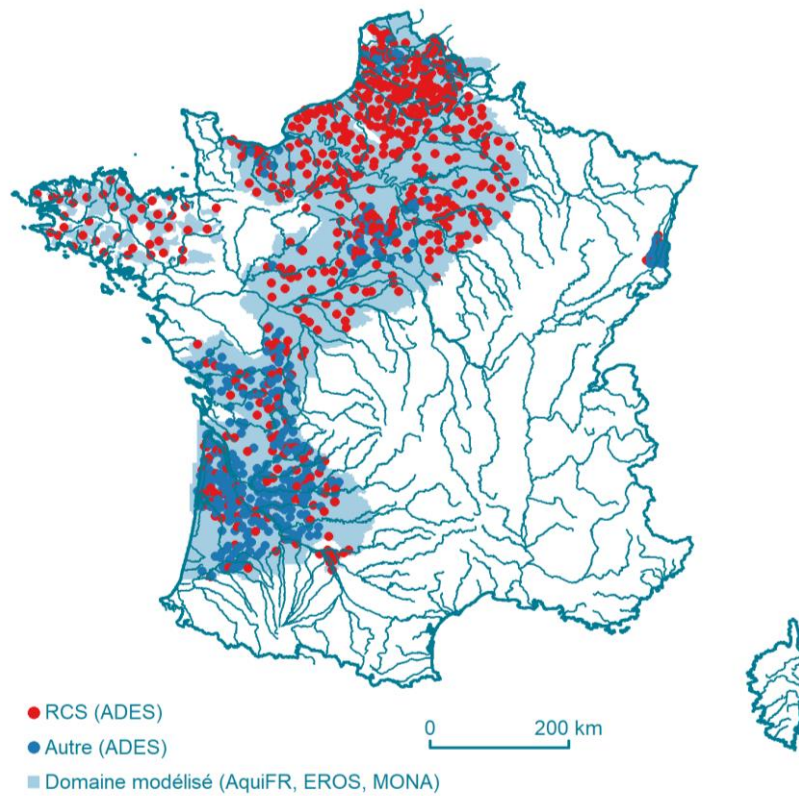


Figure 12 : Localisation des piézomètres disponibles sur les domaines modélisés

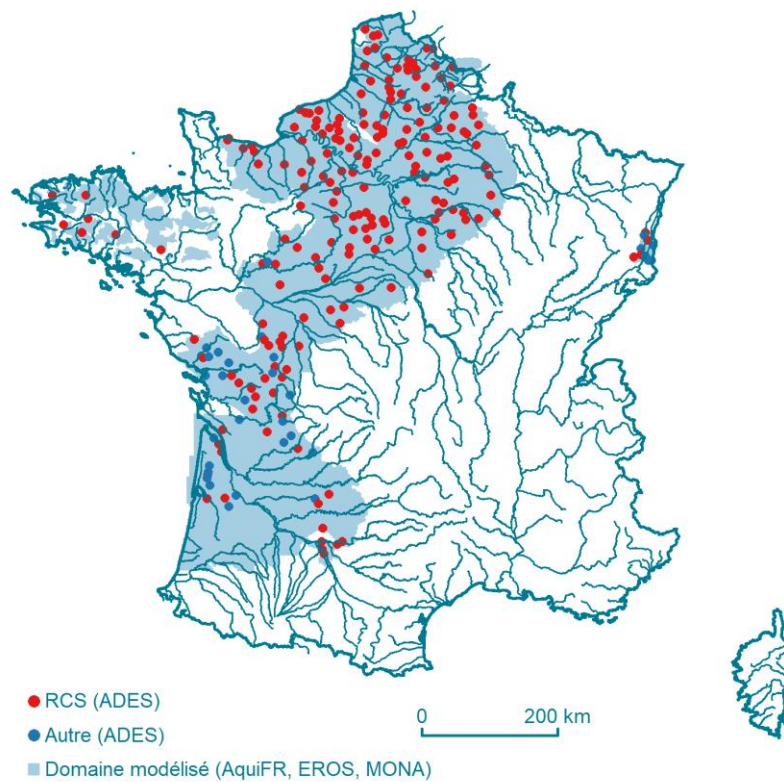


Figure 13 : Localisation des piézomètres de référence d'Explore2

Le croisement de ces réseaux de piézomètres et la discussion avec des gestionnaires ou acteurs locaux, notamment la DREAL et le BRGM Hauts-de-France, aboutit à **un jeu de piézomètres de référence comprenant au total 227 piézomètres** dont la distribution spatiale est présentée sur la Figure 13. Les piézomètres retenus se situent dans les formations alluviales de la Garonne ou du Rhin dans la plaine d'Alsace, les formations de socle du Massif Armoricain, et les bassins sédimentaires (craie du nord de la France, aquifères multicouches du Bassin Parisien, nappes profondes du Bassin Aquitain). Cette répartition répond aux enjeux de modélisation de l'hydrologie souterraine.

En complément, la Figure 14 présente la disponibilité des mesures exprimée en nombre d'années pour l'ensemble des piézomètres de référence. Ainsi, la totalité des piézomètres (100%) ont au moins 10 ans de données, 97% 20 ans de données, et 71% 27 ans de données. La Figure 15 montre l'évolution du nombre de mesures journalières disponibles au cours du temps. La disponibilité des données augmente à partir de la fin des années 1980 pour se stabiliser à partir de 2010. A partir d'août 2010, le nombre de mesures quotidiennes disponibles dépasse systématiquement 200 et est proche du nombre de piézomètres du jeu de référence (227).

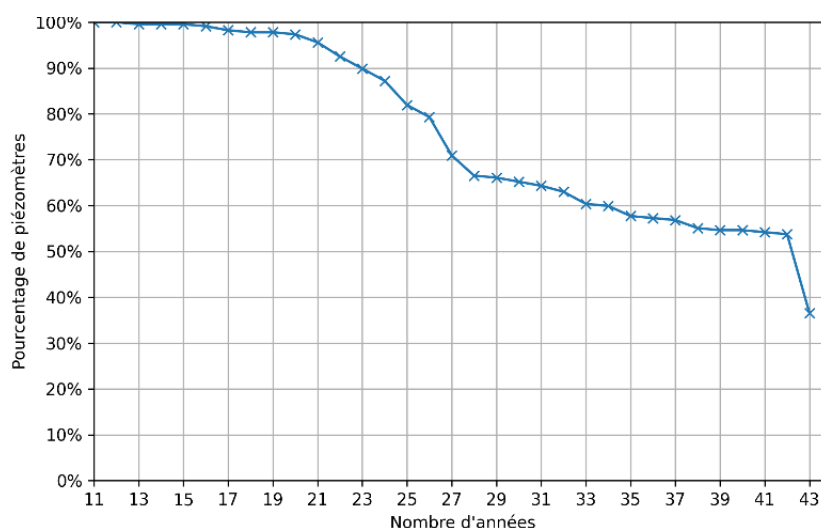


Figure 14 : Fréquence de dépassement de nombre d'années pour les piézomètres de référence d'Explore2

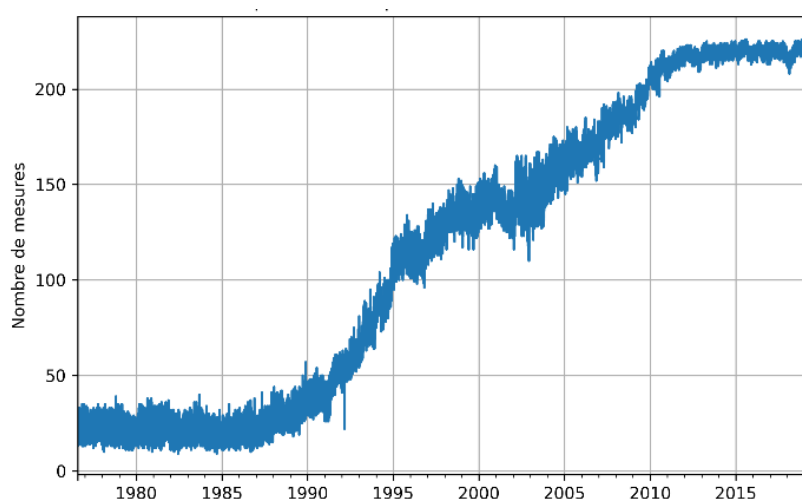


Figure 15 : Évolution du nombre de mesures piézométriques quotidiennes disponibles de 1976 à 2019 sur le réseau de référence d'Explore2

5. Conclusion

Cette étude a jeté les bases pour l'élaboration d'un ensemble de stations hydrométriques et de piézomètres, dit « de référence », qui seront les points choisis dans l'évaluation des modèles hydrologiques et hydrogéologiques appliqués dans le projet Explore2. La notion de points « de référence » est rattachée à un objectif spécifique : celui d'une évaluation de la qualité de modèles appliqués à l'échelle de la France métropolitaine. L'objectif étant de simuler les ressources naturelles, ce sont les sites pas ou peu influencés qui ont été privilégiés. D'autres jeux de référence existent et sont pertinents pour des objectifs autres (cf. Quenouillère et Sauquet (2021) pour un inventaire de jeux de stations hydrométriques déjà constitués mais pour des objectifs autres).

Une procédure automatique a permis d'identifier les stations hydrométriques en croisant des informations sur les données de débits et les sources possibles d'altération du régime hydrologique par les activités humaines. Une analyse visuelle des séries de débits a été engagée ensuite pour détecter des points aberrants, des lacunes non renseignées, des influences non renseignées, etc. Cette analyse a conduit à éliminer une portion de chronique ou à écarter de manière définitive une station hydrométrique. L'effort de critique des données a permis d'exclure des données jugées aberrantes ; ceci devrait faciliter l'ajustement des modèles aux points de référence.

Cette action non envisagée dans le programme de travail a notamment mobilisé les partenaires du projet, les DREALs et les membres des Comités des Utilisateurs du projet Explore2 (~ 30 jours). Les conclusions seront valorisées en dehors de ce présent projet pour bénéficier à la communauté des utilisateurs de données hydrologiques et des hydromètres (les remarques sur les séries doivent être portées à connaissance des gestionnaires des stations).

Les points des réseaux de référence seront également des points de simulation, c'est-à-dire là où des séries temporelles de débits et de niveaux piézométriques sous changement climatique seront fournies.

6. Références

- Baulon, L., Allier, D., Massei, N., Bessière, H., Fournier, M., Bault, V. (2020). Influence de la variabilité basse-fréquence des niveaux piézométriques sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes. *Géologues, Société Géologique de France*.
- Caruso, A., Arnaud, P. (2019). Notice sur les indices de confiance de la méthode SHYREG-débit – Définitions et calculs, 16 pages.
- Coulibaly, K. K. (2018). Caractérisation des bassins versants français influencés par les prélèvements en eau superficielle et calcul d'un indice de confiance. Rapport de master « Sciences de l'Eau et de l'Environnement », Université de Tours, 31 page.
- Delaigue, O., Génot, B., Lebecherel, L., Brigode, P., Bourgin, P.Y. (2021). Database of watershed-scale hydroclimatic observations in France. Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR Research Unit, Hydrology group, Antony. URL: <https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees>.
- Leleu, I., Tonnelier, I., Puechberty, R., Gouin, P., Viquendi, I., Cobos, L., Foray, A., Baillon, M., Ndimba, P.O. (2014). La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques. *La Houille Blanche*, (1), 25-32, doi: 10.1051/lhb/2014004.
- Quenouillère, T., Sauquet, E. (2021). Identification de stations hydrométriques pour le diagnostic de modélisations hydrologiques à l'échelle nationale - Réflexions préparatoires au projet Explore2. Rapport de recherche, INRAE UR-RiverLy. (hal-03286666)
- Sauquet, E. (2006). Mapping mean annual river discharges: geostatistical developments for incorporating river network dependencies. *J. Hydrol.*, 331(1–2), 300–314.
- Vergnes, J.-P., Roux, N., Habets, F., Ackerer, P., Amraoui, N., Besson, F., Caballero, Y., Courtois, Q., de Dreuz, J.-R., Etchevers, P., Gallois, N., Leroux, D. J., Longuevergne, L., Le Moigne, P., Morel, T., Munier, S., Regimbeau, F., Thiéry, D., and Viennot, P. (2020). The AquiFR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France: evaluation over a 60-year period, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 633–654, <https://doi.org/10.5194/hess-24-633-2020>
- Vernoux, J.-F. (2015). Réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Rapport final. BRGM/RP-64858-FR, Orléans
- Vigouroux, P. (2011). Bulletin de Situation Hydrologique des nappes (BSH nappes). Nouveau cadrage 2012. BRGM/RP-60538-FR, Orléans
- World Meteorological Organization (2017). Guidelines on the Calculation of Climate Normals (WMO-No. 1203). Geneva.

7. Remerciements

Outre les auteurs de ce rapport, ont contribué à l'analyse visuelle des chroniques de débits : Charles Perrin, Claire Magand, Flora Branger, François Colleoni, Guillaume Evin, Jean-Philippe Vidal, Jérémie Bonneau, Joël Gailhard, Maïté Fournier, Patrick Arnaud, Sandra Lanini, Simon Munier, Yvan Caballero, Yves Trambly, Alban De-Lavenne, Alexandre Devers, Amélie Bresson, Anne-Lise Veron, Arlette Robert-Vassy, Audrey Bayle, Baptiste Lévêque, Claire Bernard, Enola Henrotin, François Bourgin, François Tilmant, Gaëlle Tallec, Guilherme Guimaraes, Léo Rouchy, Malak Sadki, Max Mentha, Michael Savary, Myriam Soutif-Bellenger, Olivier Delaigue, Paul Royer-Gaspard, Pierre Brigode, Rémy Buzier, Shu-Chen Hsu, Thibault Hallouin, Thibault Lemaitre-Basset, et Tristan Podechard, qu'ils soient remerciés pour le temps consacré à l'analyse visuelle des séries temporelles de débit.