



HAL
open science

Identification de stations hydrométriques pour le diagnostic de modélisations hydrologiques à l'échelle nationale - Réflexions préparatoires au projet Explore2

Théo Quenouillère, Eric Sauquet

► To cite this version:

Théo Quenouillère, Eric Sauquet. 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. 2021. <hal-03286666>

HAL Id: hal-03286666

<https://hal.science/hal-03286666v1>

Submitted on 15 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

CONVENTION DE SUBVENTION
Programme 2019-2021 - Thème Gestion équilibrée de la ressource - Action n° 7

Identification de stations hydrométriques pour le diagnostic de modélisations hydrologiques à l'échelle nationale

Réflexions préparatoires au projet Explore 2

Rapport final

Théo QUENOILLERE (INRAE)
Eric SAUQUET (INRAE)

Avril 2021

- Auteurs

Théo QUENOILLERE, Ingénieur d'étude (INRAE)

Éric SAUQUET, Directeur de recherche (INRAE), eric.sauquet@inrae.fr

- Correspondants

OFB : Claire MAGAND, Direction de la recherche et de l'appui scientifique,
claire.magand@ofb.gouv.fr

MTE : Maud BEREL, Chargée de mission changement climatique (DGALN/DEB/ATAP1),
maud.berel@developpement-durable.gouv.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : France

Niveau de lecture : professionnels

- Résumé

Ce rapport présente l'analyse des données et des métadonnées disponibles dans la banque de données HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr>) dans le but de qualifier la pertinence des stations hydrométriques vis-à-vis d'un exercice de comparaison des débits observés à des sorties de modèles hydrologiques. Cet exercice s'inscrit dans le projet Explore 2 d'élaboration de projections hydro-climatiques pour le XXI^e siècle. Les modèles hydrologiques qui simulent des débits en temps futur ont en effet besoin d'être contrôlés en comparant de la manière la plus objective les données simulées sous temps présent à des données d'observation aux stations hydrométriques.

Le rapport mentionne les modalités de sélection des stations hydrométriques du précédent exercice Explore 2070, mais également d'autres jeux de stations établis par le Cemagref (devenu successivement Irstea et INRAE) en réponse à des besoins de recherche spécifiques. Des exemples de qualification de stations hydrométriques sont rappelés.

Des critères de disponibilité, de représentativité et de qualité de données ont finalement été choisis et ont conditionné la constitution de deux jeux de données sur les périodes 1980-2009 et 1990-2019 de plus de 600 stations en France Métropolitaine. Ils répondent notamment aux exigences d'un régime naturel ou peu modifié par les actions humaines et d'une bonne qualité des mesures. Le croisement avec des bases de données recensant les influences (prélèvements en eau et présence d'ouvrages hydrauliques) apparaît nécessaire pour confirmer les informations disponibles dans les métadonnées de la banque HYDRO.

Ce rapport propose une première typologie de contextes hydrologiques où les modèles peuvent être pris à défaut (ex. les bassins transfrontaliers du fait d'un accès hypothétique à des données climatiques en dehors de la France ou ceux fortement influencés par le karst qui peut induire des discontinuités et des variabilités fortes dans les séries de débits). A chaque bassin versant qu'il soit jaugé ou non est attribuée une note qui reflète *a priori* la bonne aptitude d'un modèle hydrologique classique à simuler les débits à son exutoire.

Le système de notation et le choix des stations où se fera le diagnostic des modèles hydrologiques, sera mis en débat dans le projet dans les prochaines étapes du projet Explore 2 et si possible avec les gestionnaires des stations hydrométriques.

- Mots clés : base de données, banque HYDRO, réseau de référence, France, notation

- Selecting benchmark gauging stations for the diagnosis of hydrological modelling at the national scale
- Abstract

This study is a first contribution to the project Explore 2, which aims at providing hydro-climatic projections for the 21st century. The hydrological models that will provide future river flows need to be controlled by comparing the simulated discharges under current conditions with observed data across a set of gauging stations. An analysis of flow data and metadata available in the French HYDRO database (<http://hydro.eaufrance.fr>) was carried out to assess the relevance of time series of gauged flows at stations for comparisons with discharge data simulated by hydrological models.

Various sets of gauging stations have already been developed by INRAE (formerly Irstea and Cemagref) for previous research projects (including the project Explore 2070 before Explore 2) with different objectives.

Criteria on data availability, representativeness and data quality were imposed here to select gauging stations with records available over the periods 1980-2009 and 1990-2019, leading to two sets of more than 600 gauging stations in Continental France. These gauging stations are recording river flows with no significant human influence and data providers highlight the high quality measurements in discharge. Cross-referencing with other databases (including water withdrawal data and characteristics of hydraulic structures) seems necessary to validate the information available in the metadata of the HYDRO database.

This report suggests a first classification of hydrological contexts regarding expected performance of models. For example, performance is likely poor for transboundary basins due to incomplete climatic data and basins strongly influenced by karst. A scoring approach is presented: a score is assigned to each basin, whether gauged or ungauged, to indicate the *a priori* suitability of hydrological models to simulate discharges at its outlet.

This scoring method and the selection of the benchmark gauging stations where models performance is assessed, will be discussed among partners involved in the Explore 2 project and, if possible, with data providers.

- Key words: database, HYDRO database, benchmark network, France, scoring

- Synthèse pour l'action opérationnelle

Ce rapport présente l'analyse des données et des métadonnées disponibles dans la banque de données HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr>) dans le but de qualifier la pertinence des stations hydrométriques vis-à-vis d'un exercice de comparaison des débits observés à des sorties de modèles hydrologiques. Cette analyse s'inscrit dans le projet baptisé Explore 2 d'élaboration de projections hydro-climatiques pour le XXI^e siècle. Les modèles hydrologiques qui simulent des débits en temps futur ont besoin d'être contrôlés en comparant de la manière la plus objective les données simulées sous temps présent à des données d'observation aux stations hydrométriques. Cette comparaison sera utile à l'appréciation des incertitudes des débits simulés sous changement climatique. La sélection des stations où s'effectue le diagnostic doit être minutieuse : les stations doivent répondre aux hypothèses de base de la modélisation. Les modèles représentent le cycle naturel de l'eau et, donc, comparer des débits simulés par ces modèles à des débits fortement influencés n'est pas pertinent.

Le rapport mentionne les modalités de sélection des stations hydrométriques du précédent exercice (Explore 2070) mais également d'autres jeux de stations établis par le Cemagref (devenu successivement Irstea et INRAE) en réponse à des questions de recherche spécifiques. Cet examen des jeux de données montre qu'aucun jeu de stations ne peut prétendre à une référence absolue : il répond en effet à des objectifs spécifiques (ex. pour une étude de stationnarité on privilégiera les chroniques longues ; pour comparer des comportements hydrologiques, on privilégiera une période commune de suivi).

Des critères de disponibilité, de représentativité et de qualité de données ont finalement été choisis et ont conditionné la constitution de deux jeux de données sur les périodes 1980-2009 et 1990-2019 de plus de 600 stations en France Métropolitaine. Ils répondent notamment aux exigences d'un régime naturel ou peu modifié par les actions humaines, d'une bonne qualité des mesures et de complétude. Le croisement avec des bases de données recensant les influences (prélèvements en eau et présence d'ouvrages hydrauliques) apparaît nécessaire pour confirmer les informations disponibles dans les métadonnées de la banque HYDRO. Le choix d'une fenêtre de 30 ans est conseillé pour s'abstraire des variabilités décennales et la sélection est peu modifiée selon que l'on considère 1980-2009 ou 1990-2019. C'est le critère de complétude sur la période (taux de lacunes autorisées) qui semble le plus sensible. Les critères de sélection appliqués ici conduisent à retenir 624 et 692 stations respectivement en imposant la fenêtre temporelle à 1980-2009 et à 1990-2019, soit 12 et 13% des stations présentes dans la banque HYDRO.

Des exemples de qualification de stations hydrométriques sont également rappelés. Sur cette base, une première typologie de contextes hydrologiques où les modèles peuvent être pris à défaut (ex. les bassins transfrontaliers du fait d'un accès hypothétique à des données climatiques en dehors de la France ou ceux fortement influencés par le karst qui peut induire des discontinuités et de fortes variabilités dans les séries de débits) est proposée. A chaque bassin versant, qu'il soit jaugé ou non, peut être attribuée une note qui reflète *a priori* la bonne aptitude d'un modèle hydrologique « classique » à simuler les débits à son exutoire. Ce système de notation et le choix de stations où le diagnostic sera effectué, seront mis en débat entre partenaires dans les prochaines étapes du projet Explore 2 et si possible avec les gestionnaires des stations hydrométriques. Cette note sera précisée dans les documents de synthèse qui présentent les résultats du projet Explore 2.

- Identification de stations hydrométriques pour le diagnostic de modélisations hydrologiques à l'échelle nationale - Réflexions préparatoires au projet Explore 2

1. Introduction

En 2019, Irstea et l'AFB ont lancé une initiative impliquant gestionnaires de l'eau et scientifiques et visant à terme la fourniture de projections hydro climatiques pour la France métropolitaine, baptisée « Explore 2 ». Ce projet doit réactualiser les résultats des volets « Hydrologie de surface » et « Hydrologie souterraine » d'une étude ancienne - Explore 2070 - pilotée par le Ministère en charge de l'écologie, <https://professionnels.afbiodiversite.fr/fr/node/44> sur des bases scientifiques renouvelées, en collaboration avec d'autres organismes actifs dans le domaine du climat et de l'eau. Les nouvelles simulations et données contribueront au Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) et aux projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE).

Devenus respectivement OFB et INRAE depuis 2020, l'AFB et Irstea poursuivent les travaux préparatoires à ce projet au travers de cette étude. Il s'agit de jeter les principes de construction d'un ensemble de stations hydrométriques pour les exercices de simulation d'une hydrologie naturelle sous changement futur. Parmi ces stations, certaines seront des points d'analyse de performance des outils de simulation en temps présent.

D'autres stations hydrométriques feront l'objet de simulations et l'utilisateur sera averti des précautions d'usage concernant l'exploitation des données simulées et les biais possibles de modélisation (ex. performance impossible à évaluer sur des données observées du fait de problèmes métrologiques ou d'actions humaines sur la ressource en eau qui perturbent le fonctionnement naturel de la rivière). Chaque station pourra être qualifiée *a priori* étant données les caractéristiques du bassin versant, les activités humaines connues impactant le régime hydrologique et la métrologie au droit de la station hydrométrique.

Toutes les stations sont des sites d'observation présents dans la base de données nationale HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>). L'analyse des influences sera réalisée en examinant les prélèvements déclarés dans la banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau BNPE (<https://bnpe.eaufrance.fr/>).

Cette étude a pour objectif de jeter les bases de ce réseau et d'une qualification des stations hydrométriques vis-à-vis du caractère influencé des débits pouvant être étendue aux sites non jaugés. Elle s'appuiera sur les enseignements du projet Explore 2070 et de projets à l'échelle nationale conduits par les partenaires scientifiques du projet Explore 2 (EDF, Météo France, Sorbonne Université, IGE, LSCE, BRGM, INRAE).

2. Le réseau de stations hydrométriques du projet Explore 2070

Le volet « Hydrologie de surface » (Chauveau *et al.*, 2013) s'est attaché à évaluer les évolutions possibles quant aux débits des cours d'eau à l'aide de chaînes de modélisations permettant des projections entre 2046 et 2065 pour plus de 1522 bassins versants métropolitains (Figure 1). Afin d'appréhender au mieux l'incertitude inhérente à l'exercice de modélisation, deux modèles hydrologiques avaient été mobilisés : GR4J développé par INRAE (ex-Irstea) et Isba-Modcou (IM) développé par Météo France.

Les résultats du modèle IM étaient déjà disponibles en amont du projet Explore 2070 en 1163 points correspondant à 907 stations hydrométriques et 256 exutoires maritimes. Le choix des stations pour IM était figé. Le choix de points de sortie a donc été engagé uniquement pour le modèle GR4J en s'appuyant sur la base de données HYDRO selon différents critères de positionnement sur le réseau hydrographique et des critères sur la donnée elle-même. Sont finalement sélectionnées les stations :

- correspondant aux points nodaux définis dans les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux des grands bassins hydrographiques,
- considérées comme de bonne qualité pour le suivi des étiages et intégrées dans le « Réseau de Référence pour la Surveillance des Etiages » (RRSE, <https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/29819c27c73f29ee1a962450da7c2d49f6e11c15>) défini pour l'étude de stationnarité des débits d'étiage,
- appartenant au réseau national de vigilance sur les crues VIGICRUES,
- situées sur des cours d'eau traversant les quinze grandes métropoles françaises,

ayant :

- une bonne qualité des données hydrométriques,
- des débits peu influencés par la présence d'ouvrages hydrauliques,
- des données disponibles au minimum sur une période de 10 ans,
- un taux de lacunes mensuelles inférieur à 50%.

Au final, 902 points ont été sélectionnés pour le modèle GR4J dont 543 partagés avec le modèle IM. Ces points de sortie de modélisation ont permis l'évaluation de la performance des deux modèles sur la période 1961-1990. L'ensemble des 1522 points de calcul constitue un échantillon représentatif des contextes hydro-climatiques et des enjeux rencontrés sur le territoire métropolitain avec une couverture relativement homogène.

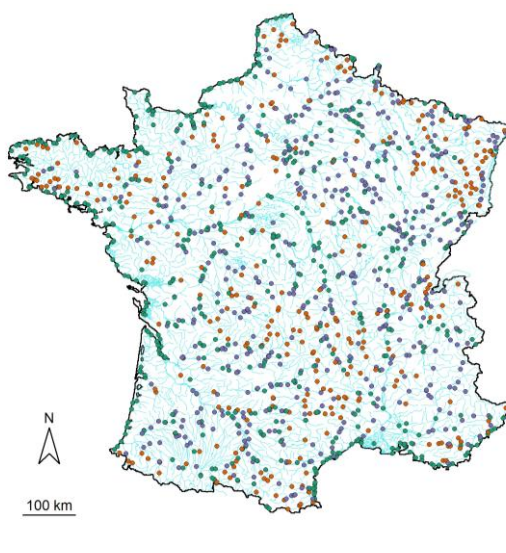


Figure 1 : Localisation des 1522 points de calcul retenus dans Explore 2070, distingués en fonction des modèles hydrologiques appliqués (vert : Isba Modcou uniquement, orange : GR4J uniquement, violet : points doubles avec GR4J et Isba-Modcou appliqués)

3. Constitution d'un jeu de stations hydrométriques pour l'évaluation et la comparaison des modèles en temps présent

Les échanges avec les différents modélisateurs du projet Explore 2 ont tout d'abord permis d'identifier des référentiels construits à partir des stations hydrométriques disponibles dans la banque nationale HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr>) à différentes dates et pour différents objectifs. Le premier travail a consisté à comparer les référentiels de l'UR RiverLy (centre INRAE de Lyon-Grenoble), de l'UR HYCAR (centre INRAE d'Antony) et du SANDRE (axé sur les stations hydrométriques publiques du référentiel SIG du SANDRE) : <https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search#/metadata/13f9ce88-7764-494e-ae8f-2d737b5eaaf8>).

Au final, un référentiel unifié de 5120 stations identifiés par le code de la station, un nom et des coordonnées géographiques uniques (éventuellement corrigées) sur le territoire métropolitain a pu être créé. Les métadonnées relatives à ces stations ont été de préférence choisies dans le référentiel d'HYCAR car les localisations des stations de celui-ci ont fait l'objet d'un travail de validation récent. A partir de ce référentiel, une mise à jour par extraction des séries de débits journaliers depuis la banque nationale HYDRO en novembre 2020 a pu être réalisé pour 4946 stations métropolitaines. Pour les 174 stations restantes, les données n'ont pas pu être récupérées car les stations associées sont aujourd'hui absentes de la banque HYDRO (remplacées ou définitivement supprimées). Ces 174 stations se trouvent réparties dans les référentiels d'HYCAR, de RiverLy et du SANDRE et leur statut sera à discuter.

3.1. Exemples de jeux de stations qualifiés

De nombreuses études à portée nationale ont ressenti le besoin (1) d'identifier des ensembles de bassins jaugés répondant au cadre d'application de modèles et (2) de caractériser les bassins versants pour mettre en perspective les résultats de modélisation. Dans ces deux cas, étant donnée l'échelle nationale, les sources d'informations mobilisées sont celles disponibles facilement et publiquement (métadonnées) et pouvant faire l'objet d'un traitement automatique (peu d'expertise dans la chaîne de traitement) parfois complétées d'un avis du producteur de données.

Dans le cas (1), il s'agit le plus souvent d'isoler des bassins peu influencés par les actions humaines, de bonne qualité de mesure et disposant d'enregistrements longs. Ainsi, Catalogne *et al.* (2014) ont construit un jeu de 632 bassins jaugés répartis sur l'ensemble du territoire français pour l'interpolation de caractéristiques d'étiage. Les chroniques correspondantes, extraites de la banque HYDRO, comprennent au moins 26 années complètes

de débits moyens journaliers sur la période 1970-2005, considérés comme peu ou pas influencés et de bonne qualité vis-à-vis de la mesure en basses eaux, selon l'avis des gestionnaires présents dans les métadonnées de la banque HYDRO. La durée de 26 années permettait d'estimer avec une faible incertitude la statistique d'étiage QMNA5 aux sites instrumentés. La sélection de stations peu influencées permettait d'identifier des facteurs de contrôle naturels des étiages.

Giuntoli *et al.* (2012, 2013) ont été plus exigeants en termes de données disponibles pour autoriser l'analyse de stationnarité, en imposant au moins 40 ans de données. Les gestionnaires des stations ont été interrogés notamment lorsque des singularités (ex. ruptures ou tendance) ont été détectées dans les séries pour en comprendre les origines (déplacement d'une station, construction d'un seuil, mise en eau d'un aménagement, etc.). Une sélection de 236 stations ainsi constituée forme le réseau RRSE, cité précédemment, utilisé pour détecter des non stationnarités dans les caractéristiques d'étiage. Giuntoli *et al.* (2012) proposent également un ensemble de 209 stations hydrométriques pour leur analyse des évolutions du régime des crues.

Kochanek *et al.* (2014) sélectionnent 1076 séries peu influencées d'au moins 20 ans de données (20–39 années : 535 stations (49.7 %) ; 40–59 années : 476 stations (44.2 %) ; plus de 60 années : 65 stations (6.1 %)) après avoir effectué un contrôle de la qualité des mesures. La durée des enregistrements a conditionné la participation de la station à des exercices de comparaison de méthodes de régionalisation.

L'UR HYPAR (Brigode *et al.*, 2020) propose des fiches descriptives de l'hydrologie, du climat, de l'occupation du sol et de la topographie pour 4000 stations hydrométriques de la banque HYDRO. Cette vision synthétique permet notamment d'identifier des bassins aux débits *a priori* fortement influencés par les activités agricoles, sans quantifier les influences.

Dans le cas (2), l'enjeu est de fournir les informations synthétiques sur le bassin versant qui doivent alerter l'utilisateur sur la fiabilité des résultats fournis par la méthode appliquée. Caruso et Arnaud (2019) et Coulibaly (2018) ont proposé différents indices de confiance associés aux résultats des méthodes SHYREG et LoiEau, développés au centre INRAE d'Aix-en-Provence (UMR RECOVER). Ces indices sont présentés sous forme de classe et de code couleur dans des fiches de synthèse (exemple pour LoiEau en Figure 2). Ils renseignent la confiance à accorder *a priori* aux sorties des modèles lorsque la méthode est appliquée en site non jaugé (sans contrôle possible faute de données de débit). Compte tenu de l'expérience des modélisateurs, les sources possibles de biais de modélisation sont l'existence au sein du bassin versant :

- d'ouvrages hydrauliques ;
- de prélèvements pour l'irrigation ;
- de zones karstiques ;
- de processus liés à la neige actifs ;
- de zones d'expansion de crue ;
- d'une portion de bassin versant hors France et
- d'une forte contribution de l'écoulement de base aux crues.

Dans leurs versions actuelles, SHYREG, comme LoiEau, ne représentent en effet pas les actions de l'homme sur les débits en rivière et n'intègrent que des données météorologiques disponibles sur le territoire français. Les phénomènes hydrauliques de type laminage par débordement en lit majeur en crue ne sont pas pris en compte dans SHYREG. Les contributions souterraines et la dynamique du manteau neigeux restent des composantes perfectibles dans les deux modèles.

Finalement, six indicateurs liés aux origines des biais ont été retenus pour qualifier les sorties de SHYREG (Tableau 1) suite à des interactions avec une communauté d'experts chercheurs et opérationnels (Arnaud *et al.*, 2013). Les valeurs de ces indices calculés en chaque point se répartissent en quatre classes de confiance reflétant l'adéquation entre hypothèses de modélisation et contexte du bassin versant. Les indices proposés par Coulibaly (2018) pour LoiEau mesurent la pression sur la ressource induite par l'irrigation (Tableau 2), dont l'effet est particulièrement sensible en étiage estival. Les facteurs de contrôle spécifiques aux crues ne sont donc pas renseignés (« zone plate »). Coulibaly (2018) montre des incohérences entre le qualificatif renseigné sur le caractère influencé des bassins versants dans les métadonnées de la banque HYDRO et le niveau de pression sur la ressource, ce qui souligne l'absence de regard croisé entre bases de données HYDRO et BNPE.

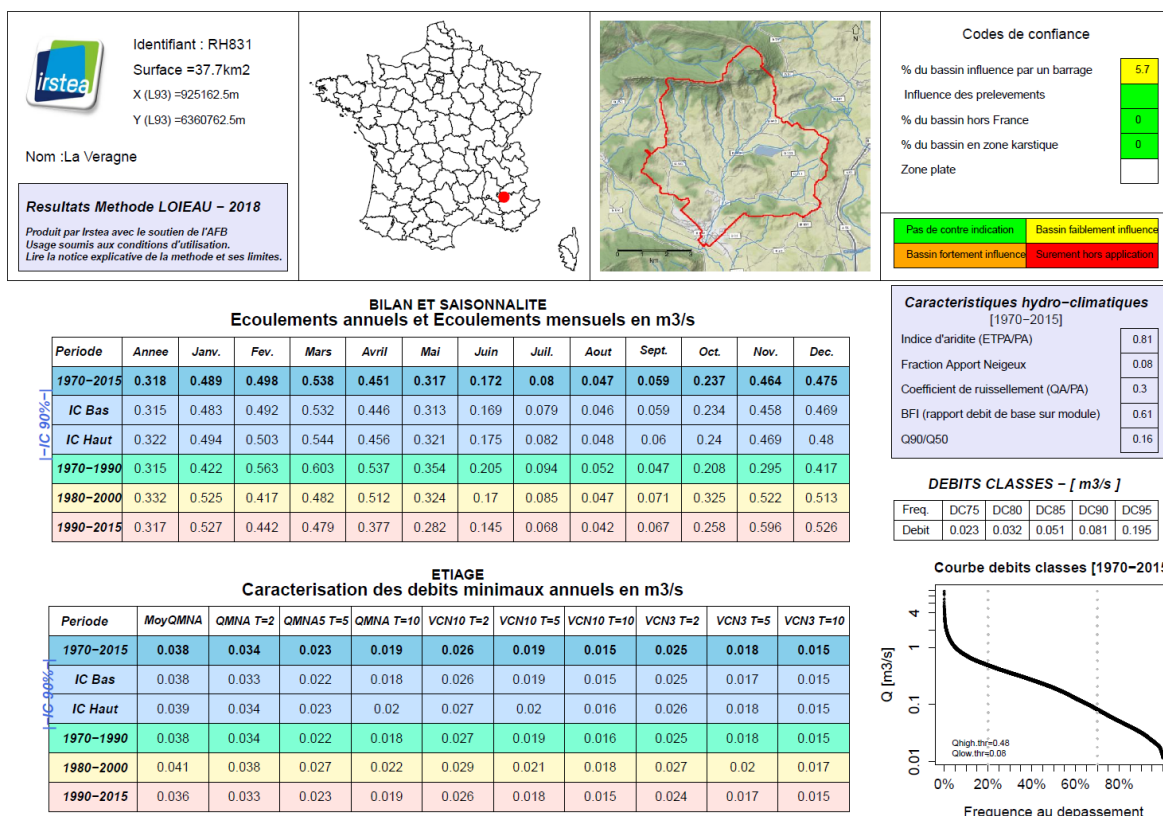


Figure 2 : Exemple de fiche de restitution du portail web LOIEAU (<https://loieau.inrae.fr/>)

Tableau 1 : Indices de confiance définis pour SHYREG-débit, d'après Caruso et Arnaud (2019)

Indicateur	Mode de calcul	Code			
		1	2	3	4
		Bassin probablement en dehors du champ d'application de la méthode	Une grande partie du bassin est influencée par une des limites de la méthode	Une faible partie du bassin est influencée par une des limites de la méthode	Pas de contre-indication
Proportion du bassin contrôlé par un barrage	Rapport de la surface contrôlée par les barrages divisée par la surface totale du bassin versant (source BD SIOUH)	Plus de 50%	De 20 à 50%	De 5 à 20%	Moins de 5%
Proportion du bassin en zone karstique	Rapport de la surface en secteur karstique divisée par la surface totale du bassin versant (source BDLISA)	Plus de 50%	De 20 à 50%	De 5 à 20%	Moins de 5%
Différence moyenne d'altitude	Minimum et maximum d'altitude sur les mailles d'un MNT de résolution 50 m	Moins de 0.5 m	De 0.5 à 1 m	De 1 à 3 m	Plus de 3 m
Proportion du bassin hors France	Rapport de la surface située hors France divisée par la surface totale du bassin versant	Plus de 50%	De 25 à 50%	De 10 à 25%	Moins de 10%
Proportion d'apport de neige	Rapport des précipitations solides annuelles divisées par les précipitations annuelles totales	Plus de 50%	De 25 à 50%	De 10 à 25%	Moins de 10%
Rapport des débits QJ2/QA	Rapport du quantile QJA, débit journalier maximal annuel de période de retour 2 ans, divisé par le module QA	Moins de 2	De 2 à 5	De 5 à 10	Plus de 10

Tableau 2 : Indices de confiance définis pour LoiEau, d'après Coulibaly (2018)

Indicateur	Mode de calcul	Code			
		1	2	3	4
		Très forte influence	Forte influence	Faible influence	Pas d'influence
Pression annuelle sur la ressource induite par l'irrigation	Rapport du prélèvement annuel dans les eaux de surface destiné à l'irrigation divisé par le volume annuel simulé selon LoiEau	Plus de 80%	De 30 à 80%	De 10 à 30%	Moins de 10%
Pression estivale sur la ressource induite par l'irrigation	Rapport du prélèvement entre mai et août dans les eaux de surface destiné à l'irrigation divisé par le volume simulé selon LoiEau sur la même période de l'année	Plus de 80%	De 30 à 80%	De 10 à 30%	Moins de 10%

Bertrand et Coquemont (2019) ont, pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométrie et d'Appui à la Prévision des Inondations), recensé des études antérieures réalisées par Irstea en exploitant un échantillon étendu de stations hydrométriques

L'UR HYCAR a recensé vingt échantillons principalement élaborés entre 2008 et 2019 pour ses besoins de recherche comprenant entre 15 et 1170 bassins versants instrumentés. Ils ont mentionnés et décrits sur le site <https://sunshine.irstea.fr/app/basinSample>. L'analyse des modes de construction fait apparaître huit types de critère qui ont guidé le choix des stations :

- l'existence d'influences anthropiques sur le régime hydrologique ;
- la variété des conditions climatiques et hydrologiques ;
- l'influence nivale sur les écoulements ;
- la diversité topographique et géologique ;
- la disponibilité des données ;
- le taux de lacunes dans les séries ;
- la qualité des mesures et
- le pas de temps.

Les critères diffèrent selon la finalité de l'étude (gestion des ouvrages, étiage, crue, hydrométrie). Les critères majeurs qui ont conduit aux échantillons sont ceux intégrés dans la plateforme *Shiny*. Ils pourraient faciliter la constitution de jeux de données pour des études à venir : superficie du bassin-versant, altitude, pente, précipitations annuelles moyennes, débit moyen annuel (module), taux de lacunes dans la série de débits, nombre d'années disponibles, capacité de stockage dans des retenues en amont, et type d'influence.

Un travail d'inventaire et d'évaluation des stations hydrométriques a été réalisé récemment à la demande du SCHAPI (Lang, *communication personnelle*) dans le cadre du diagnostic et optimisation du réseau national d'hydrométrie réalisé en 2019 (<https://professionnels.ofb.fr/node/38>), afin de rationaliser le réseau de mesure. La méthodologie suivie sur proposition d'un bureau d'étude s'est appuyée sur différents critères pour attribuer une note à une station hydrométrique qui ont été ensuite combinés (coefficients de pondération) pour en déduire un score global. Ces notes ont été examinées ensuite par les services hydrométriques des DREAL, qui ont eu la possibilité de « repêcher » certaines stations ou de nuancer la conclusion issue de la méthodologie de notation déployée uniformément à l'échelle nationale. L'idée de « sanctuariser » un réseau de longues séries de qualité ayant valeur patrimoniale, en s'appuyant sur les échantillons de stations expertisés conjointement doit encore faire son chemin.

3.2. Critères de sélection

Lors d'entretiens, les hydrologues et hydrogéologues impliqués dans le projet Explore 2 ont partagé leurs expériences antérieures de constitution de jeux de données nationaux et ont fait connaître d'éventuelles exigences spécifiques aux modèles hydrologiques qu'ils appliquent. L'objectif d'un diagnostic coordonné entre partenaires a été rappelé avec la volonté d'utiliser les données issues d'un jeu de stations national spécifique. Une première liste de critères de sélection de ces stations pour le diagnostic des modèles a été établie sur cette base.

Le premier point de questionnaire concerne la période d'évaluation pendant laquelle les stations hydrométriques doivent disposer de données : sa durée et son positionnement entre les années 1961 et 2020. Cette fenêtre temporelle d'analyse doit être commune pour ne pas biaiser les diagnostics par des conditions

climatiques différentes auxquelles seront soumis les modèles hydrologiques.

Les exigences des hydrologues en termes de durées de série de débits sont très variées et dépendent de la phase du régime hydrologique examinée (compte tenu de l'inertie de la composante souterraine, il est nécessaire de disposer de longues séries de débits d'étiage pour se conformer aux exigences d'une variable indépendante identiquement distribuée (*i.i.d.*) requise pour un traitement statistique tandis que les débits de crue sont moins sujets à l'autocorrélation) et de leur utilisation (les hydrologues de RECOVER se satisfont de 20 ans de données pour caler le modèle conceptuel SHYREG et examiner les statistiques sur les crues tandis que les hydrologues de RiverLy sélectionnent des séries de plus de 40 ans pour examiner les tendances sur le long terme). Une durée de 30 ans est la durée standard pour le calcul des statistiques du climat, fixée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM). Ces éléments incitent au choix d'une fenêtre temporelle de 30 ans, pour s'affranchir des variabilités décennales.

A noter que :

- Le projet Explore 2070 avait retenu la période de 30 ans 1961-1990 comme référence pour examiner les performances des modèles et pour mesurer l'effet du changement climatique sur les variables hydrologiques ;
- La période 1991-2020 sera bientôt celle utilisée par Météo-France pour calculer les normales climatiques en réponse aux règles définies par l'OMM (<https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/la-une/2021-de-nouvelles-normales-pour-qualifier-le-climat-en>) ;
- Les deux périodes les plus récentes permettent d'intégrer des premiers marqueurs du changement climatique sur l'hydrologie des cours d'eau (ex. étiage, contributions nivales) et donc les capacités des modèles à représenter des changements dans les processus ;
- Pour certaines stations, le versement des données dans la banque HYDRO n'est pas effectué en temps réel, le temps d'expertiser les mesures. L'accès à des données récentes est possible avec un décalage temporel d'une voire de deux années. De ce fait l'extraction réalisée en 2020 donne une vision temporaire des données disponibles à terme pour 2019 et 2020 ;
- D'autres arguments seront à examiner (ex. la période historique 1971-2005 des simulations Euro-Cordex qui seront la base des projections climatiques dans Explore 2 (Météo-France, 2020)).

Deux sélections ont été réalisées pour examiner les conséquences du choix de la fenêtre sur la sélection de données et seront détaillées dans ce rapport : 1980-2009 et 1990-2019.

Outre la contrainte de disponibilité sur la fenêtre temporelle, les caractéristiques des stations doivent également être compatibles avec les hypothèses de modélisation (résolution spatiale des forçages météorologiques, représentation des processus naturels). Pour cela, de nouveaux critères de sélection sont utilisés :

- La surface du bassin versant topographique des stations doit être supérieure à 64 km². C'est en effet la résolution spatiale à laquelle sont fournies les données hydro-climatiques issues de la réanalyse SAFRAN ;
- Le régime hydrologique aux stations doit être « *pas ou faiblement influencé* » selon la nomenclature de la banque HYDRO (est accepté le qualificatif « *inconnu* », par défaut) ;
- Les stations doivent avoir une « *signification hydrologique* » (sont exclues les mesures sur des canaux, des drains, des bras secondaires, etc.) ;
- La qualité des données avancée par le gestionnaire de la station doit être « *bonne* » en hautes, moyennes et basses eaux (est accepté le qualificatif « *inconnu* », par défaut) ;
- La proportion de données absentes ou non validées sur la période choisie doit être inférieure à 10%, soit jusqu'à trois ans (1095 jours) sur 30 ans.

Les informations sont extraites des métadonnées des stations hydrométriques mises à disposition dans la banque HYDRO. Les sélections s'appuient sur les métadonnées téléchargées en novembre 2020.

3.3. Résultats de sélection

Les critères de sélection appliqués aux stations du référentiel conduisent à retenir 624 et 692 stations respectivement en imposant la fenêtre temporelle à 1980-2009 et à 1990-2019, soit 12 et 13% des stations présentes dans la banque HYDRO.

La Figure 3 montre que le choix de la fenêtre temporelle a peu d'influence sur la répartition des stations hydrométriques sélectionnés. Les emprises totales des stations sont de 325 000 km² pour le réseau de 624 stations et de 328 000 km² pour le réseau de 692 stations, soit une couverture respective de 59% et de 60% de la France. Certains secteurs sont peu instrumentés (secteur aval de la Garonne, nord de la France, Beauce) du fait d'un réseau de surface peu développé et quels que soient les critères de sélection, les points sélectionnés y seront peu nombreux. Les deux sélections retiennent peu de stations hydrométriques dans les secteurs côtiers atlantiques et du bassin charentais (régions hydrographiques identifiées par N, R, S et Z dans

le code SANDRE dans la Figure 3). Dans ces secteurs, une grande majorité des stations hydrométriques est influencée par des prélèvements agricoles ainsi que par des canaux. La répartition géographique des stations sélectionnées reprend globalement celle constatée sur l'intégralité des stations présentes dans la banque HYDRO.

La Figure 4 montre également la représentativité des sélections en termes de caractéristiques des bassins versants pour l'altitude aux stations hydrométriques, les modules et les régimes hydrologiques (cf. typologie de Sauquet *et al.*, 2008). Concernant les surfaces des bassins versants, la sous-représentation des petits bassins versants (< 100 km²) s'explique par le critère de sélection imposé sur une surface de bassin versant (supérieure à 64 km²). Les bassins aux régimes nival ou glaciaire sont peu présents sur le territoire (circonscrits aux Alpes et Pyrénées). Peu présents dans la banque HYDRO, ils le sont sans surprise dans les deux sélections.

Globalement, les caractéristiques des deux ensembles de stations hydrométriques sélectionnées sont similaires à celles sur l'ensemble des stations de la banque HYDRO, à quelques exceptions près liées aux activités humaines.

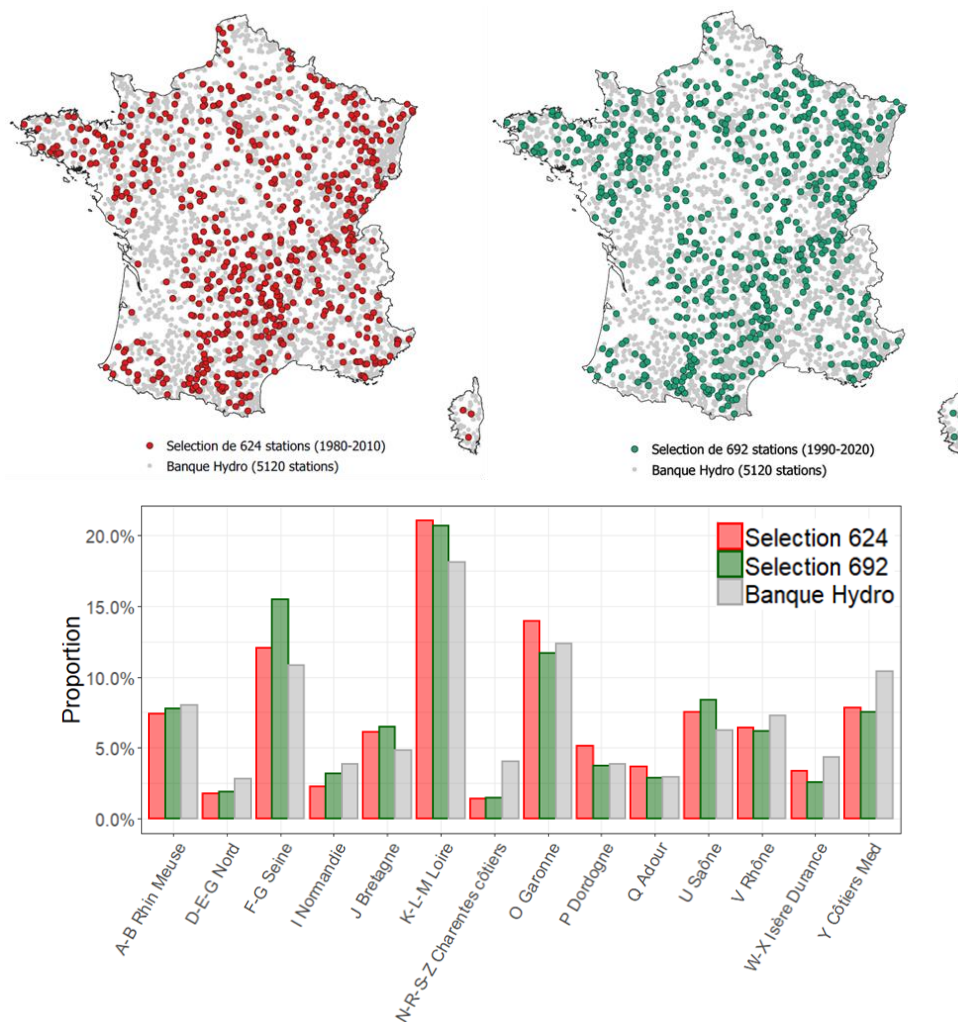


Figure 3: Répartition spatiale des stations sélectionnées

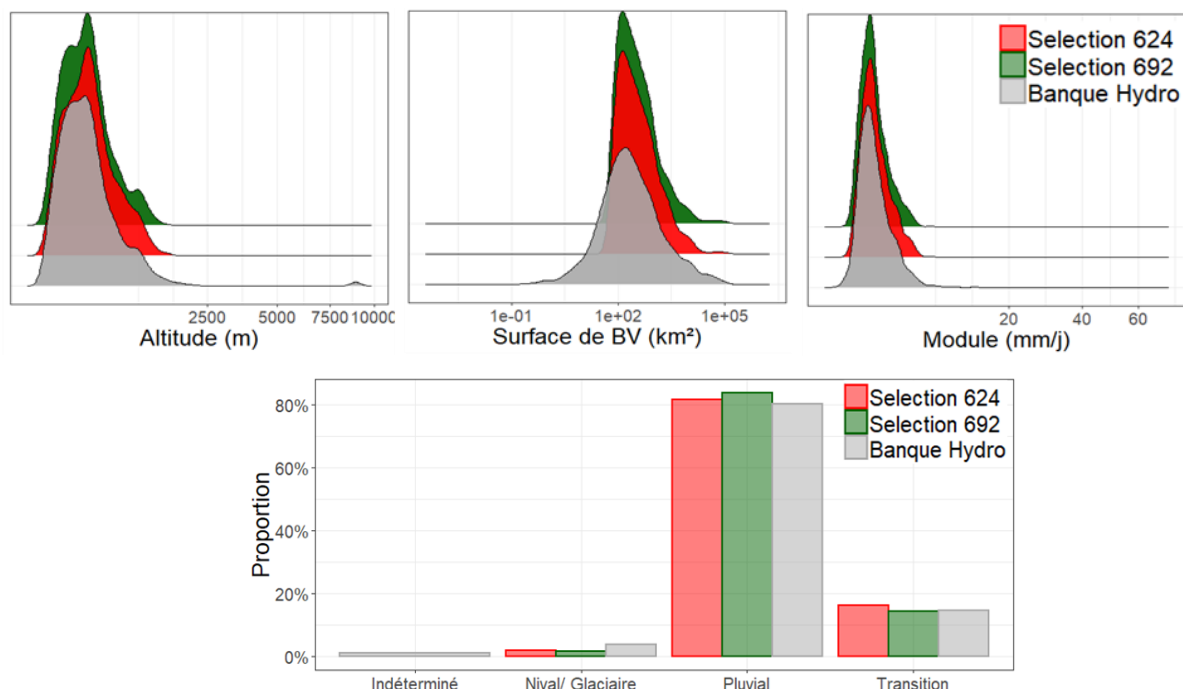


Figure 4 : Distribution des caractéristiques des stations sélectionnées et des bassins versants associés

3.4. Adaptations possibles des critères de sélection

Sur la période 1980-2009, 70% des stations (3586) présentes dans la banque HYDRO disposent de données, et seulement 19% (1012) ont également un taux de lacunes inférieur à 10% sur cette période. Sur la période 1990-2019, 68% des stations (3484) disposent de données et 22% (1145) ont également un taux de lacunes inférieur à 10%. De tous les critères utilisés, le taux de lacunes autorisées est celui ayant le plus d'impact sur le nombre de stations sélectionnées. En comparaison, pour les stations ayant des données disponibles sur la période 1990-2019, plus de 50% d'entre elles respectent indépendamment un des quatre autres critères de sélection.

Ce seuil de taux de lacunes autorisées, fixé arbitrairement à 10%, permet d'obtenir une sélection de stations avec un volume de données suffisant pour évaluer les modèles avec le plus de confiance possible. Il est cependant imaginable de relever ce seuil afin d'obtenir un effectif de stations plus important. Ainsi, pour la période 1990-2019, un seuil de lacune de 20% permettrait de sélectionner 826 stations (16% de la banque HYDRO) et 935 stations (18% de la banque HYDRO) avec un seuil de lacunes de 30%.

D'autres points pourraient également être abordés afin d'améliorer la sélection des stations grâce à l'expertise des producteurs de données.

Certaines stations, bien que présentant des données de bonne qualité, sont qualifiées d'« influencées » dans les métadonnées. C'est le cas notamment des bassins versants sous influence karstique ou des bassins versants instrumentés pour lesquels les facteurs contrôlant l'hydrologie sont encore incertains. L'expertise peut également permettre de retenir ou d'exclure des stations sur des considérations météorologiques plus précises (déplacement des sections de mesure, courbes de tarage instable, etc.). Elle pourrait expliquer la présence de zéros ou de lacunes dans les séries de débits afin de savoir si ceux-ci font référence à une rupture d'écoulement (cours d'eau à caractère intermittent) ou à une défaillance du système de mesure.

4. Caractérisation de l'influence sur les débits mesurés aux stations hydrométriques

Pour poursuivre l'examen du caractère « naturel » ou « atypique » des écoulements le long du réseau hydrographique, trois variables descriptives de l'influence des activités humaines sur le régime hydrologique (prélèvement et présence d'ouvrages de stockage) et de l'influence d'une géologie karstique ont été calculées. Elles sont illustrées sur les stations hydrométriques des deux ensembles de stations identifiées dans la section précédente.

4.1. Influence des prélèvements

Les données publiques de la BNPE ont été ici mobilisées. Ces données disponibles librement au téléchargement sont issues des redevances perçues par les différentes agences de l'eau et décrivent la localisation, le type d'usage ainsi que les volumes déclarés prélevés par an depuis 2008 pour les plus anciennes. Les prélèvements déclarés font référence à divers usages de l'eau dont les principaux sont :

- L'irrigation ;
- L'alimentation en Eau Potable ;
- L'énergie (barrages hydroélectriques, géothermie, refroidissement des centrales nucléaire, etc.) ;
- L'alimentation de canaux.

Avec plus de 120 000 points de prélèvements déclarés en métropole, la répartition de ceux-ci n'est pas homogène avec comme enjeu principal l'irrigation (plus de 75 000 points déclarés, Figure 5).

Les prélèvements se concentrent ainsi sur des secteurs aux forts enjeux agricoles et industriels : la Beauce, le Val de Loire ainsi que le bassin charentais, le bassin aquitain, la vallée du Rhône, du Rhin et le pourtour méditerranéen. La répartition de ces points de prélèvement et l'importance de l'irrigation dans certaines régions expliquent en partie la sous-représentation de celles-ci dans les jeux de stations sélectionnées.

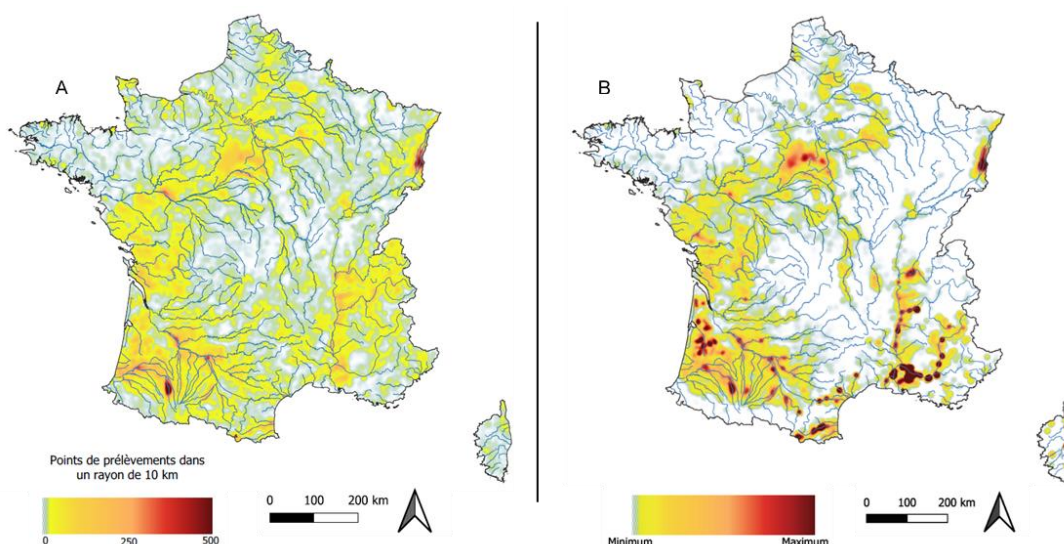


Figure 5 : Densité des points de prélèvement dans un rayon de 10 km (A) et densité pondérée par les volumes moyens annuels prélevés pour l'irrigation (B)

Coulibaly (2018) a proposé une méthode pour le calcul d'un indice de confiance du modèle LoiEau défini comme le ratio entre les volumes prélevés pour l'irrigation et les volumes écoulés à une échelle annuelle et estivale. L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse a également développé un indice « pression de prélèvement » basé sur la comparaison entre les volumes consommés par trois types d'usages (AEP, irrigation, industrie) avec un débit caractéristique d'étiage QMNA5 (Secrétariat technique du SDAGE RMC, <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion/sdage2022/etapes-delaboration-du-sdage-2022-2027>, https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sites/siirm/files/content/2018-08/NotesMethodes_p-i-rnaoe2027.zip).

L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse se fonde sur des coefficients de consommation moyens issus de multiples études menées au début des années 2000 et synthétisés dans un rapport technique de l'ONEMA (https://rapportage.eaufrance.fr/sites/default/files/DCE/2016/documents/FRN_Recueil_caracterisation_Pressions_20120723.pdf, 2012). Les coefficients de consommation sont des coefficients multiplicateurs appliqués aux volumes annuels prélevés :

Usage	Coefficient de consommation
AEP	20%
Irrigation	100 % Gravitaire : 18% (2% des points de prélèvement déclarés)
Industrie	7%

Des indices permettent de synthétiser trois situations à partir de l'estimation des volumes consommés V_{conso} et des débits d'étiage QMNA5 :

- 1 : Impact faible : $0 < V_{conso}/QMNA5 < 5\%$
- 2 : Impact moyen non déclassant à lui seul $5\% < V_{conso}/QMNA5 < 20\%$
- 3 : Impact fort : $20\% < V_{conso}/QMNA5$

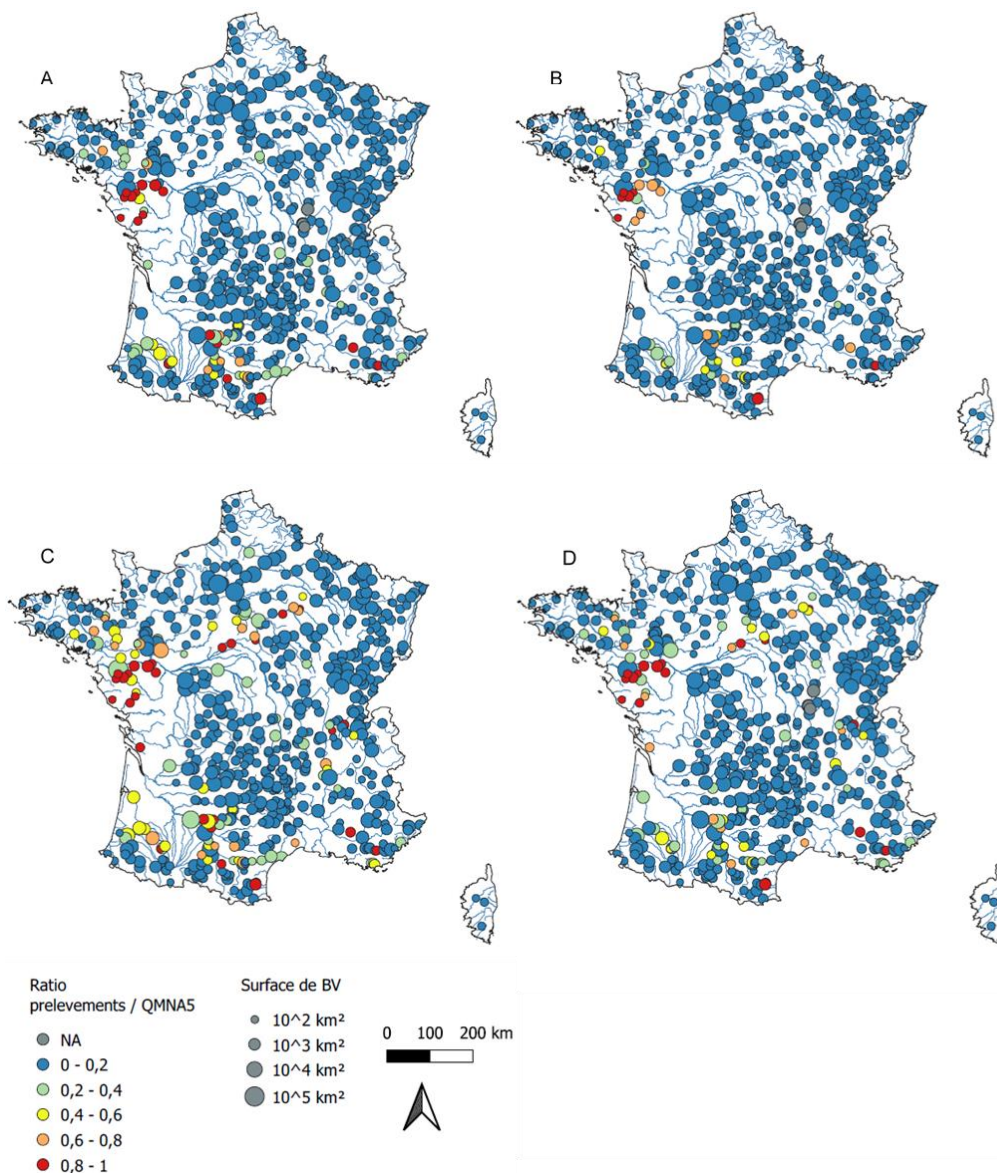


Figure 6 : Indicateur de pression pour la sélection sur la période 1980 -2009 obtenu en considérant des prélèvements de surface pour l'irrigation répartis sur 4 mois (A) et sur 12 mois (B), et en considérant les prélèvements de surface et souterrains pour l'irrigation répartis sur 4 mois (C) et sur 12 mois (D)

Nous avons privilégié cet indicateur à celui présenté dans les fiches de synthèse de LoiEau, même s'il n'est pas garanti que le prélèvement et la restitution au milieu s'effectuent aux mêmes points. Le choix a été fait d'utiliser les valeurs de QMNA5 proposées dans la banque HYDRO, et cela même si la période de disponibilité des débits n'est concomitante avec celle des prélèvements disponibles sur la BNPE.

Les prélèvements sont fournis uniquement à l'échelle annuelle. Deux méthodes ont été appliquées avec deux hypothèses de répartition du volume annuel prélevé sur les mois d'été :

- Les volumes prélevés pour l'irrigation sont répartis équitablement sur l'année, donc la consommation V_{conso} est égale au cumul annuel divisé par 12 ;
- Les volumes prélevés pour l'irrigation se concentrent une période de quatre mois entre juin et septembre, donc la consommation V_{conso} est égale au cumul annuel divisée par 4.

Enfin, la valeur du QMNA5 est corrigée de manière très grossière de l'irrigation. L'indicateur de pression est donc égal à $V_{conso}/(QMNA5+V_{conso})$. Il n'y a pas de distinction dans les modalités de calcul de consommation

selon l'origine de l'eau (en surface ou souterrain).

Les valeurs sont présentées en Figure 6 en considérant uniquement les prélèvements en eau de surface (A-B) et en intégrant tous les prélèvements (C-D). Il peut exister une forte influence des prélèvements de surface sur le régime des étiages (A-B). La variation des couleurs des points permet d'apprécier l'importance de cet usage de l'eau dans certains bassins. Notons que les prélèvements représentent une part importante de volumes d'étiage pour les bassins de taille réduite et dans les secteurs où, sans surprise, l'irrigation est très développée. En considérant les prélèvements à la fois les eaux de surface et souterraines (C-D), des stations potentiellement influencées par les volumes prélevés apparaissent notamment en Beauce et sur le bassin versant de la Seine.

Le calcul de cet indicateur peut être étendu aux sites non jaugés, sous réserve de disposer de valeurs de QMNA5 issues de simulations et du contour de la surface drainée associée.

4.2. Influence d'une géologie karstique

Les géologies karstiques sont également un facteur de contrôle de l'hydrologie d'un cours d'eau et dont les effets sont difficilement modélisables à grande échelle et à anticiper en sites non jaugés. Depuis 2015, la base de donnée des Limites des Systèmes Aquifères BDLisa (<https://bdlisa.eaufrance.fr/>) est le référentiel développé par le BRGM pour les études hydrogéologiques en France. Un croisement a donc été réalisé entre les zones karstiques et les découpages des bassins versants sélectionnés.

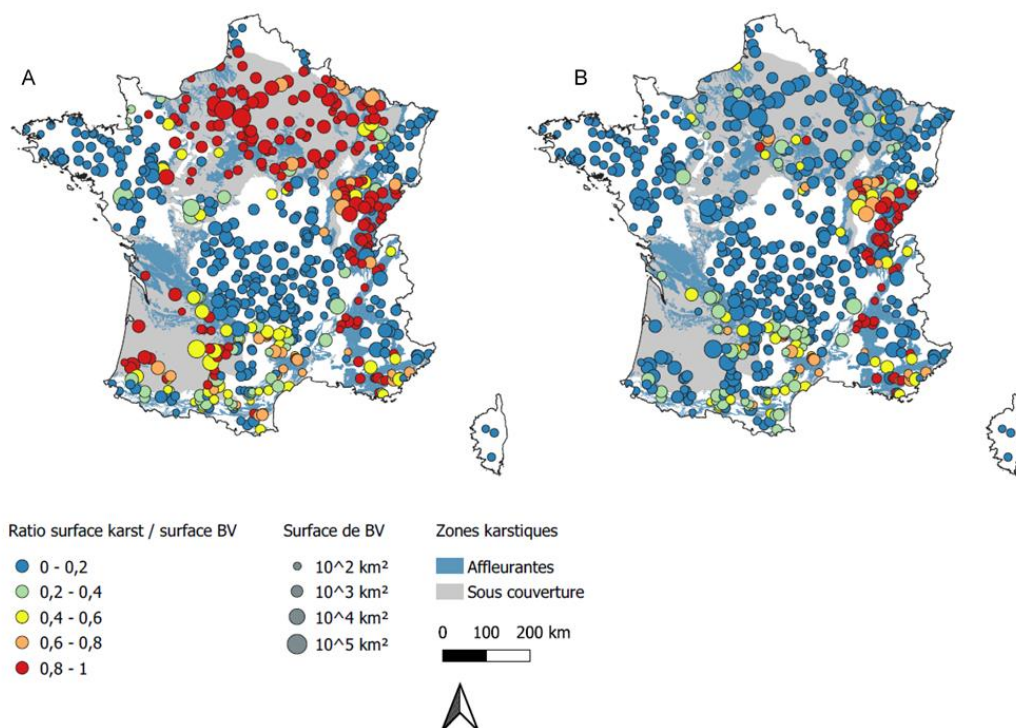


Figure 7 : Ratio des surfaces karstiques (A) et des surfaces karstiques de surface (B) sur les surfaces des bassins versants drainés par les 624 stations sélectionnées sur la période 1980-2009

La Figure 7 présente la fraction de surface contrôlée par des structures karstiques par les stations sélectionnées pour la période 1980-2009. L'influence de géologies karstiques sur l'hydrologie de surface peut donc être sensible pour les stations sélectionnées notamment dans le secteur du Jura et des massifs préalpins. En considérant toutes les géologies karstiques même sous couverture (A), cette influence devient également manifeste pour les stations du bassin parisien et aquitain et touche quasiment tous les territoires sauf les massifs montagneux et granitiques. L'interprétation des données qualifiant les karsts dans BDLisa reste à approfondir car la Figure 7 montre une sensibilité au choix de la variable décrivant le karst (analyse restreinte à la surface ou non).

Le calcul de cet indicateur peut être étendu aux sites non jaugés, sous réserve de disposer du contour de la surface drainée associée.

4.3. Autres données contextuelles

D'autres données contextuelles permettent de fournir des clefs de lecture. Parmi celles-ci, les données relatives aux barrages (surfaces captées par les barrages et volumes prélevés ou turbinés) disponibles via la BNPE et la base SIOUH (Système d'Information sur les Ouvrages Hydrauliques) peuvent permettre de caractériser des influences à la fois sur les régimes de crue (écrêtement ou laminage) et les régimes d'étiage (soutien, débits réservés, etc.). La base de données SIOUH n'étant pas accessible pendant la durée de cette étude, l'analyse a été effectuée à partir des données descriptives des capacités de stockage pour 113 grands barrages métropolitains. Les informations traitées (localisation, capacité des réservoirs, fonctions) sont issues de la base de données AQUASTAT de la FAO (www.fao.org/aquastat/en/databases/dams). Les volumes stockables ont été comparés aux volumes annuels moyens écoulés obtenus à partir des modules fournis par la banque HYDRO.

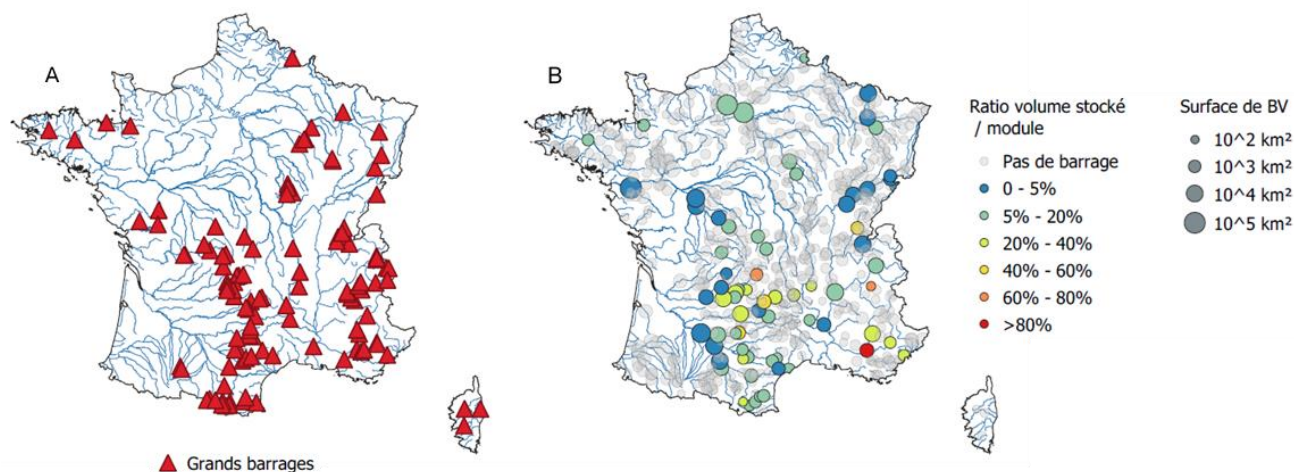


Figure 8 Barrages de la base de données AQUASTAT (A) et ratio entre volume stocké / module pour les 624 stations sélectionnées sur 1980 – 2009 (B) (Données FAO, banque HYDRO)

Les valeurs calculées sont présentées sur la Figure 8. Cette analyse permet de montrer que la majorité des stations sélectionnées sur la période 1980-2009 n'est pas concernée par les ouvrages référencés dans AQUASTAT (552 sur 624). Pour les 72 stations hydrométriques concernées par la présence de grands ouvrages hydrauliques sur leur bassin versant, nous remarquons que pour la majorité d'entre elles le volume stocké représente moins de 20% du volume moyen annuel écoulé. Enfin, l'analyse des ratios a permis de s'assurer que les stations sélectionnées avec un ratio conséquent disposaient de débits naturalisés.

Le calcul de cet indicateur peut être étendu aux sites non jaugés, sous réserve de disposer de valeurs de module issues de simulations et du contour de la surface drainée associée.

5. Vers une classification des stations

Compte tenu des objectifs du projet Explore 2 (extrapolation en dehors des sites jaugés), une classification est nécessaire pour qualifier les points de simulation et devra apparaître explicitement sur les documents de synthèse (ex. fiche aux points de simulation) et les supports cartographiques à destination des utilisateurs de données.

A l'image de celles déjà mises en place dans les fiches de synthèse de LoiEau et de SHYREG, cette nomenclature sera toute relative (cf. hypothèses des modèles utilisés dans le projet) mais objectivée par des facteurs de contrôle des processus hydrologiques agissant sur le bassin versant. Pour reprendre les termes du rapport (Caruso et Arnaud, 2019) en les adaptant au contexte du projet Explore 2 : « L'indice de confiance et le code de confiance associé, sont proposés pour qualifier **le degré d'applicabilité des modèles**. Ils servent à signaler les zones particulières pour lesquelles les **débits sous changement climatique** ont tout de même été calculés, mais sur lesquelles **le fonctionnement actuel du bassin versant et les spécificités locales ne sont pas tout à fait compatibles avec le cadre de modélisation choisi pour Explore 2 (notamment hypothèse de restitution de débits naturels)**. Des premiers critères quantitatifs sont proposés ici, inspirés des travaux de l'UMR RECOVER et de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (Tableau 3).

S'ajoutera un code attribué aux stations hydrométriques (à discuter avec les gestionnaires des stations) intégrant la qualité métrologique, la disponibilité, etc. pour éviter une comparaison hâtive des débits journaliers présents dans la banque HYDRO à ceux à ceux simulés sur la même période. Ce code devra identifier

clairement les stations où un diagnostic de la performance des modèles est légitimé.

Tableau 3 : Propositions d'indices de confiance

Indicateur		Code			
		1	2	3	4
Mode de calcul		Bassin probablement en dehors du champ d'application des modèles	Une grande partie du bassin est en dehors du champ d'application des modèles	Une faible partie du bassin est en dehors du champ d'application des modèles	Pas de contre-indication
Proportion du bassin contrôlé par un barrage	Rapport de la surface contrôlée par les barrages divisée par la surface totale du bassin versant	Plus de 50%	De 20 à 50%	De 5 à 20%	Moins de 5%
Pression estivale sur la ressource induite par l'irrigation	Rapport de la consommation mensuelle moyenne estivale divisé par le débit réglementaire QMNA5 actuel (observé aux stations, simulé ailleurs)	Plus de 20%	Plus de 20%	De 5 à 20%	Moins de 5%
Proportion du bassin en zone karstique	Rapport de la surface en secteur karstique divisée par la surface totale du bassin versant (source BDLISA)	Plus de 50%	De 20 à 50%	De 5 à 20%	Moins de 5%
Proportion du bassin hors France	Rapport de la surface située hors France divisé par la surface totale du bassin versant	Plus de 50%	De 25 à 50%	De 10 à 25%	Moins de 10%
<i>Aux stations hydrométriques :</i>					
		Les débits de la banque HYDRO 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 de la banque HYDRO	Quelques précautions quant à une comparaison aux débits de la banque HYDRO	La comparaison aux débits de la banque HYDRO aux débits simulés sur la période d'évaluation est légitime
Complétude de la période d'évaluation	Taux de lacune sur la période d'évaluation	Plus de 50%	De 25 à 50%	De 10 à 25%	Moins de 10%
Qualité des données	Analyse des métadonnées de la banque HYDRO et avis des producteurs de données	Toutes les données sont jugées douteuses	Deux catégories (basses, moyennes ou hautes eaux) sont douteuse	Une catégorie (basses, moyennes ou hautes eaux) est douteuse	Bonne qualité des données

6. Conclusion

La définition d'un seul jeu de stations hydrométriques semble difficile du fait d'objectifs divers, le nombre d'échantillons constitués par INRAE (ex-Irstea) dans le cadre d'étude nationale en témoigne.

Cette étude a jeté les bases pour l'élaboration d'un ensemble de stations hydrométriques, dit « de contrôle », qui seront les points choisis dans le diagnostic des modèles hydrologiques appliqués dans le projet Explore 2. L'objectif étant de simuler les ressources naturelles, ce sont les stations pas ou peu influencées qui seront privilégiées.

Une période de 30 ans est nécessaire pour calculer des statistiques robustes. Le choix du positionnement de cette séquence de 30 ans entre 1980 et 2019 ne modifie pas sensiblement les propriétés de l'ensemble des stations sélectionnées en termes de répartition spatiale et de contextes hydro-climatiques. L'analyse des métadonnées avec les critères imposés - ici sur la surface drainée minimale, le taux de lacunes autorisées, la qualité des données souhaitée, l'influence réduite des activités humaines sur les écoulements - montre que plus de 600 stations hydrométriques pourraient servir *a priori* de sites de diagnostic des modèles hydrologiques.

Les travaux cités précédemment engagés par INRAE (UR HYCAR, UR Riverly, UMR RECOVER) se sont appuyés sur l'avis des producteurs de données ; il est envisagé d'informer et d'associer les gestionnaires des stations hydrométriques dans le processus de sélection. A noter : la notion de station « de référence » est rattachée à un objectif : celui d'un diagnostic de performance de modèles appliqués à l'échelle de la France

métropolitaine, et, de fait, cette référence est donc toute relative.

La liste des indicateurs associés aux facteurs de contrôle mettant en défaut les modèles est également à finaliser avec les modélisateurs dans le cadre du projet. La note attribuée sera précisée dans les documents de synthèse qui présentent les résultats du projet Explore 2.

La présente étude s'est intéressée aux débits. La réflexion n'a pas encore été engagée pour l'hydrogéologie. Il est à noter qu'une base de données de piézomètres peu influencés a été constituée par le BRGM dans le cadre d'une thèse (Baulon, *communication personnelle*). Elle pourra être mobilisée par le projet Explore 2.

7. Bibliographie

- Arnaud P., Eglin Y., Janet B., Payrastre O. (2013). Bases de données SHYREG-débit : méthode, performances et limites. Notice utilisateurs. Rapport de recherche Irstea, 35 pages, hal-02598987.
- Bertrand R., Coquemont L. (2019). Etablissement d'un échantillon de bassins versants de référence en France métropolitaine. Rapport de stage, Irstea, 20 pages.
- Brigode P., Génot B., Lobligois F., Delaigue O. (2020). Summary sheets of watershed-scale hydroclimatic observed data for France, Portail Data INRAE, <https://doi.org/10.15454/UV01P1>.
- Caruso A., Arnaud P. (2019). Notice sur les indices de confiance de la méthode SHYREG-débit – Définitions et calculs, 16 pages.
- Catalogne C., Sauquet E., Lang M. (2014). Valorisation des données de jaugeages épisodiques pour l'estimation du débit de référence d'étiage QMNA5. *La Houille Blanche*, 4, 78-87, DOI 10.1051/lhb/2014042
- Chauveau M., Chazot S., Perrin C., Bourgin P.-Y., Sauquet E., Vidal J.-P., Rouchy N., Martin E., David J., Norotte T., Maugis P., De Lacaze X. (2013). Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, (4), 5-15.
- 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 », Univ. de Tours, 31 page.
- Giuntoli I., Renard B., Lang M. (2012). Floods in France, dans Kundzewicz, Z.W. (Ed.), « Changes in Flood Risk in Europe », IAHS Special Publication 10, 199–211.
- Giuntoli I., Renard B., Vidal J.-P., Bard A. (2013). Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *J. Hydrol.*, 482, 105-118.
- Kochanek K., Renard B., Arnaud P., Aubert Y., Lang M., Cipriani T., Sauquet E. (2014). A data-based comparison of flood frequency analysis methods used in France. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 295–308, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-295-2014>.
- Sauquet E., Gottschalk L., Krasovskaia I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France. *Hydrology Research*, 39 (5-6), 403-423.

8. Table des illustrations

Figure 1 : Localisation des 1522 points de calcul retenus dans Explore 2070, distingués en fonction des modèles hydrologiques appliqués (vert : Isba Modcou uniquement, orange : GR4J uniquement, violet : points doubles avec GR4J et Isba-Modcou appliqués)	6
Figure 2 : Exemple de fiche de restitution du portail web LOIEAU (https://loieau.inrae.fr/)	8
Figure 3: Répartition spatiale des stations sélectionnées	11
Figure 4 : Distribution des caractéristiques des stations sélectionnées et des bassins versants associés.....	12
Figure 5 : Densité des points de prélèvement dans un rayon de 10 km (A) et densité pondérée par les volumes moyens annuels prélevés pour l'irrigation (B).....	13
Figure 6 : Indicateur de pression pour la sélection sur la période 1980 -2009 obtenu en considérant des prélèvements de surface pour l'irrigation répartis sur 4 mois (A) et sur 12 mois (B), et en considérant les prélèvements de surface et souterrains pour l'irrigation répartis sur 4 mois (C) et sur 12 mois (D).....	14
Figure 7 : Ratio des surfaces karstiques (A) et des surfaces karstiques de surface (B) sur les surfaces des bassins versants drainés par les 624 stations sélectionnées sur la période 1980-2009	15
Figure 8 Barrages de la base de données AQUASTAT (A) et ratio entre volume stocké / module pour les 624 stations sélectionnées sur 1980 – 2009 (B) (Données FAO, banque HYDRO).....	16
Tableau 1 : Indices de confiance définis pour SHYREG-débit, d'après Caruso et Arnaud (2019).....	8
Tableau 2 : Indices de confiance définis pour LoiEau, d'après Coulibaly (2018)	9
Tableau 3 : Propositions d'indices de confiance	17

INRAE
Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes
5, rue de la Doua - CS 20244
69625 Villeurbanne Cedex
04 72 20 87 87
www.inrae.fr

Office Français pour la Biodiversité
Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.ofb.gouv.fr