

Principe

L'hydrologie est définie par le Comité national français de géodésie et de géophysiques (section 6 Sciences hydrologiques) comme l'étude de la distribution et de la circulation de l'eau dans la nature⁴¹.

À toutes les étapes d'une opération de restauration hydromorphologique (diagnostic, dimensionnement, suivi), l'hydrologie du site restauré et de son bassin versant est un élément clé à prendre en compte. La connaissance du régime hydrologique permet d'orienter les choix techniques et certains descripteurs hydrologiques entrent directement dans le calcul du dimensionnement de l'opération de restauration. Par ailleurs, la connaissance de l'hydrologie des sites restaurés durant la phase de suivi est un élément très important à prendre en compte en tant que facteur explicatif des biocénoses et de la morphologie observées.

Les objectifs de cette fiche sont de :

- dresser l'état des lieux des différents types de données hydrologiques facilement mobilisables ;
- proposer une méthode pour appréhender l'hydrologie du site restauré ;
- proposer des pistes de caractérisation de cette hydrologie et de son utilisation dans l'interprétation des résultats des suivis.

Les différents types de données hydrologiques mobilisables

<http://www.irstea.fr/fr/les-hydro-ecoregions-une-approche-fonctionnelle-de-la-typologie-des-rivieres>

HER 1 : <http://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search#/metadata/24284d4e-37fa-47a2-85fe-850b37abe5a7>

HER 2 : <http://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search#/metadata/40b17d2a-5d4a-48ed-acdd-0728c080598c>

<http://www.irstea.fr/sites/default/files/ckfinder/userfiles/files/RapHERfinal.pdf>

https://professionnels.afbiodiversite.fr/sites/default/files/pdf/Guide_Jaugeage.pdf

Cette première partie a vocation à rappeler quelques types et sources de données hydrologiques mobilisables pour pouvoir prendre en compte l'hydrologie lors de la phase d'interprétation des données de suivi.

Hydroécorégions et régimes hydrologiques

Le découpage des **hydroécorégions** (HER) a été effectué selon des critères topographiques, climatiques et géologiques qu'il est important de connaître afin de contextualiser l'opération de restauration.

Étape 1 - Déterminer dans quelle hydroécorégion de **type 1** et de **type 2** se situe le site de l'opération de restauration. Ces informations sont disponibles sur l'atlas-catalogue du Sandre.

Étape 2 - Retrouver les caractéristiques hydrologiques de l'hydroécorégion. Ces informations sont disponibles dans l'Annexe 5 (page 113) du **rapport final Irstea sur les HER**.

Étape 3 - Caractériser le type de régime hydrologique du cours d'eau⁴². Afin de caractériser le régime hydrologique on pourra par exemple se reporter à la Figure 3 p.11 du **Guide pour l'exploitation des jaugeages en hydrologie**.

⁴¹ Dictionnaire français d'hydrologie de la Commission de terminologie de la CNFSH <http://www.hydrologie.org/glu/indexdic.htm>.

⁴² Ensemble des variations, à toutes les échelles de temps, caractéristiques du débit d'un cours d'eau ou d'une source. Dictionnaire français d'hydrologie de la Commission de terminologie de la CNFSH <http://www.hydrologie.org/glu/indexdic.htm>

Réponse hydrologique d'un bassin versant et types d'écoulements (d'après le Cours d'hydrologie générale en ligne de l'École polytechnique fédérale de Lausanne du Pr André Musy)

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>

La réponse hydrologique d'un bassin versant est influencée par une multitude de facteurs tels que ceux liés :

- aux conditions climatiques du milieu ;
- à la pluviosité (répartition spatiale et temporelle, intensité et durée) ;
- à la morphologie du bassin versant (forme, dimension, altimétrie, orientation des versants) ;
- aux propriétés physiques du bassin (nature des sols, couverture végétale) ;
- à la structuration du réseau hydrographique (extension, dimension, propriétés hydrauliques) ;
- aux états antécédents d'humidité des sols.

La réponse hydrologique d'un bassin versant est composée de plusieurs types d'écoulements. Les principaux types d'écoulements sont :

- l'écoulement de surface ou ruissellement, constitué par la frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. L'importance de cet écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents, soient prépondérantes ;
- l'écoulement de subsurface ou écoulement hypodermique, qui comprend la contribution des horizons de surface partiellement ou totalement saturés en eau ou celle des nappes perchées temporairement au-dessus des horizons argileux. Ces éléments de subsurface ont une capacité de vidange plus lente que l'écoulement superficiel, mais plus rapide que l'écoulement différé des nappes profondes ;
- l'écoulement de base (ou débit de base) : l'eau transite à travers l'aquifère à une vitesse de quelques mètres par jour à quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d'eau. Cet écoulement, en provenance de la nappe phréatique, est également appelé écoulement souterrain. À cause des faibles vitesses de l'eau dans le sous-sol, l'écoulement de base n'intervient que pour une faible part dans l'écoulement de crue. De plus, il ne peut pas être toujours relié au même événement pluvieux que l'écoulement de surface et provient généralement des pluies antécédentes. L'écoulement de base assure en général le débit des rivières en l'absence de précipitations et soutient les débits d'étiage (l'écoulement souterrain des régions karstiques fait exception à cette règle).

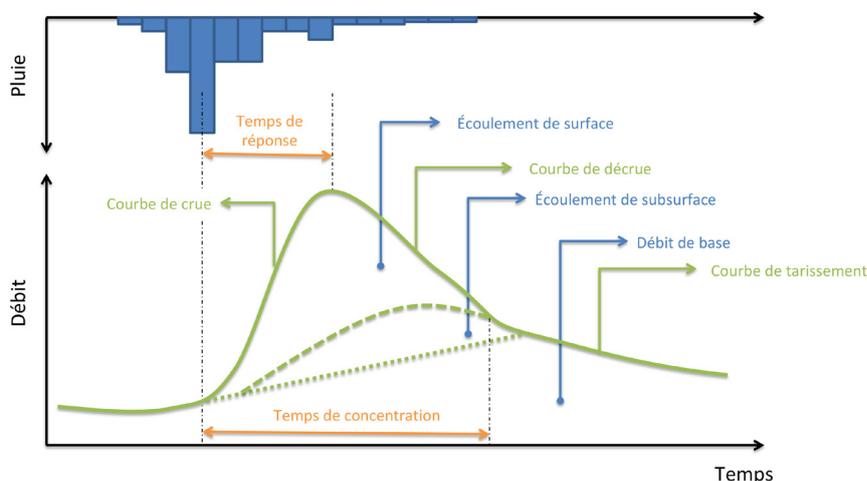


Figure 56 - Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un événement pluie-débit (d'après A. Musy)

Facteurs anthropiques influençant les régimes hydrologiques

L'hydrologie d'un cours d'eau varie de manière naturelle au cours du temps en fonction de facteurs climatiques et des caractéristiques du bassin versant (Encart 1 et Figure 56). Cette hydrologie peut également être soumise à différentes pressions anthropiques engendrées par des usages, par exemple :

- des prélèvements ;
- l'occupation du sol : selon 5 grands types (territoires agricoles, territoires artificialisés, forêts et milieux semi-naturels, zones humides et surfaces en eau) et 44 sous-types ;
- les infrastructures : réseau routier, ferré, transport d'énergie ;
- les barrages et seuils : interception des écoulements et prélèvements pour le remplissage, éclusées et dérivations...

Ces pressions peuvent affecter le débit en quantité et/ou en dynamique et la connexion du cours d'eau aux eaux souterraines (Encart 2 et Figure 57).

Les travaux menés dans le cadre du projet **Syrah** ont permis d'évaluer de manière indirecte le risque d'altération de l'hydrologie pour chaque tronçon hydromorphologique à partir des pressions s'exerçant sur les cours d'eau. L'examen de ces données pourra permettre d'anticiper d'éventuelles altérations des débits sur le bassin versant et sur le linéaire restauré et d'identifier les pressions menant à ces altérations.

Des méthodes complémentaires pour évaluer les pressions causées par les prélèvements, les dérivations et les éclusées ont été développées par les agences de l'eau Adour Garonne et Rhône Méditerranée Corse.

Banque Hydro

La banque Hydro stocke en différé les mesures de hauteur d'eau (à pas de temps variable) en provenance d'environ 5 000 stations de mesure (dont environ 3 200 sont actuellement en service) implantées sur les cours d'eau français et permet un accès aux données signalétiques des stations (finalité, localisation précise, qualité des mesures, historique, données disponibles...). Hydro calcule, sur une station donnée, les débits instantanés, journaliers, mensuels et autres, à partir des valeurs de hauteur d'eau et des courbes de tarage (relations entre les hauteurs et les débits). Ces valeurs sont actualisées à chaque mise à jour d'une hauteur ou d'une courbe de tarage (addition, précision supplémentaire, correction...). Hydro fournit les valeurs d'écoulement les plus exactes possibles compte tenu des informations que les gestionnaires des stations lui communiquent.

■ Accès à la banque Hydro

L'existence d'une station hydrométrique sur ou à proximité du linéaire restauré ou bien encore sur un bassin versant voisin (Encart 2 dans Lebecherel *et al.*, 2015 [51]) peut permettre d'extrapoler certains descripteurs hydrologiques par la méthode analogique ou d'avoir une idée de la dynamique des écoulements dans le cours d'eau restauré. La méthode analogique est la méthode la plus simple pour reconstituer un débit à l'exutoire⁴³ d'un bassin non jaugé, elle consiste en la transposition directe du débit d'une station voisine, avec un ajustement correspondant au ratio des surfaces respectives de bassin (voir le chapitre *Acquisition de chroniques de débits simulés* pour plus de détails sur la méthode analogique, son domaine d'application et ses avantages et inconvénients).

<https://bnpe.eaufrance.fr/>

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/atlas-regional-de-l'occupation-des-sols-en-france-clc>

<http://professionnels.ign.fr/bdtopo#-tab-1>

http://carmen.carmencarto.fr/66/ka_roe_current_metropole.map

<http://www.data.eaufrance.fr/jdd/9c86a5da-88f4-4819-a84e-c09a69394a34>

<http://hydro.eaufrance.fr/>

⁴³ Exutoire : section de cours d'eau par laquelle s'écoulent les eaux d'un bassin versant.

Encart n° 2

Exemple d'altération du régime hydrologique sous l'effet de l'urbanisation (d'après Dany, 2016 [14] et Le Pichon et al., 2016[52])

■ *Effets en période de pluie : l'urbanisation, qui s'accompagne d'une augmentation des surfaces imperméabilisées et des réseaux d'évacuation des eaux de pluie, génère de plus forts volumes ruisselés, et accélère les vitesses de ruissellement et les débits de pointe. Ces effets sont significatifs pour des pluies faibles à moyennes. Ces effets provoquent aussi une augmentation de la fréquence des crues courantes et morphogènes.*

■ *Effets sur les écoulements de base (hors période de pluie) : en dehors des périodes de pluie, les effets sur les écoulements persistants sont plus contrastés et non univoques. Il peut se produire une baisse de la recharge en eau du sol et du sous-sol, qui s'accompagne d'une baisse des débits des rivières. Mais, il a aussi été observé une augmentation de la recharge des réserves souterraines et une augmentation des débits des rivières en raison des fuites des réseaux d'eau potable, ou de l'arrosage d'espaces verts et jardins. Par ailleurs, les réseaux enterrés (gaz, électricité, eau...) provoquent des modifications du cheminement de l'eau en raison de leur pouvoir drainant.*

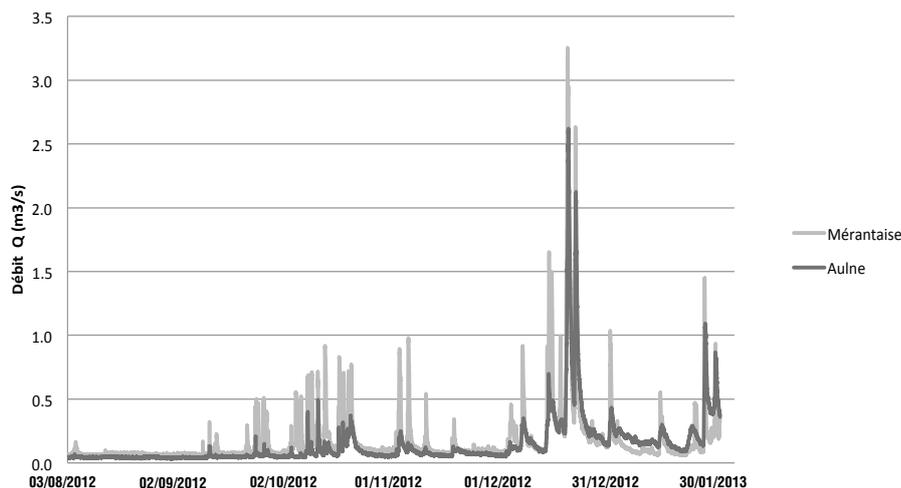


Figure 57 - Exemple de deux cours d'eau du Parc naturel régional de la Haute vallée de Chevreuse.

Des sondes de mesure de pression (sondes Diver de Schlumberger) ont été installées au niveau du pré Bicheret sur la Mérantaise et au niveau du pont du moulin de Béchereau sur l'Aulne. Le graphe des débits sur les deux cours d'eau montre des amplitudes plus importantes sur la Mérantaise. Ceci peut s'expliquer en partie par la géologie et l'usage du sol du bassin versant. Le fond étant imperméable, il y a peu ou pas d'échange nappe/rivière et tout le débit transite de façon longitudinale. De plus, le bassin versant de la Mérantaise présente une urbanisation importante qui génère deux types de pressions augmentant le débit liquide : le rejet des eaux de l'agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines dans le ru Gironde, en confluence de la Mérantaise et en tête de bassin ; le ruissellement plus important des versants du fait de leur imperméabilisation (routes, parkings...). À l'inverse, l'Aulne est situé sur un substrat plus perméable où les échanges verticaux tamponnent l'effet des crues et restituent l'eau en période d'étiage. Le bassin versant est aussi beaucoup moins urbanisé, avec une tête de bassin très forestière.

Débits issus de modélisation en site non jaugeé (travaux Irstea)

Des chroniques hydrologiques journalières ont été reconstituées au droit de sites d'échantillonnage écologique et/ou de suivi de la qualité de l'eau. Sans prétendre se substituer à une mesure directe des débits, ces reconstitutions visent à fournir des ordres de grandeur concernant les débits journaliers et leur variabilité au cours des jours (et des années) qui ont précédé la mesure de qualité de l'eau ou du milieu. Elles s'appuient sur un modèle hydrologique simple et robuste, mais peuvent néanmoins comporter des erreurs d'origines diverses : imperfection du modèle, données d'entrée biaisées, complexité des hydrologies locales, perturbations anthropiques...

http://carmen.carmencarto.fr/66/AFB_Reconstitution-chroniques-hydrologiques.map

https://www.eaufrance.fr/IMG/zip/cartes_debits_caracteristiques.zip

Ce travail, réalisé par Irstea, est disponible sur le site du projet Carmen. Les fichiers fournissent à chaque station la chronique des débits journaliers de 1959 à 2016 avec son enveloppe d'incertitudes. Il est important de garder en tête que **ces reconstitutions doivent permettre d'évaluer la dynamique des débits journaliers et leur ordre de grandeur, mais les valeurs de débits, en particulier pour les bas débits, sont sujettes à d'importantes incertitudes**. Pour le calcul des valeurs de QMNA5, par exemple, mieux vaut se référer à la **carte de consensus** également issue des travaux de Irstea.

Jaugeages ponctuels réalisés sur le linéaire restauré ou à proximité

En dehors des jaugeages nécessaires à l'établissement des courbes de tarage des stations hydrométriques, différents opérateurs (DREAL, syndicats de rivières, instituts de recherche, conseils départementaux...) sont susceptibles d'avoir réalisé ponctuellement des jaugeages sur le cours d'eau restauré.

Données complémentaires

Laises de crues

Après une crue, des débris peuvent s'accumuler linéairement, marquant le niveau d'eau le plus haut atteint par la crue (Figure 58). La connaissance de la hauteur d'eau maximale atteinte lors du pic de crue donne par exemple **une indication de la connexion du cours d'eau avec son lit majeur**.



© Michel Bramard - AFB

Figure 58 - Exemple de laisse de crue en juin 2016 sur la Claise à Grand-Pressigny.

Témoignages

En l'absence de station hydrométrique, il peut être utile de faire appel aux témoignages de gestionnaires, riverains et d'usagers de la rivière pour obtenir des informations qualitatives sur l'hydrologie de la rivière : étiages, inondations, autant d'événements qui peuvent laisser des traces dans les mémoires.

Stations Onde

<https://onde.eaufrance.fr/>

L'Observatoire national des étiages caractérise les étiages estivaux par l'observation visuelle du niveau d'écoulement de certains cours d'eau métropolitains. Il poursuit le double objectif de constituer un réseau de connaissance stable sur les étiages estivaux et d'être un outil d'aide à l'anticipation et à la gestion des situations de crise.

Le déficit hydrique sur les milieux aquatiques peut être à l'origine d'une fragmentation des milieux, d'une élévation de la température, d'une modification de la qualité physico-chimique de l'eau, d'une modification de la végétation, d'assèchement d'annexes hydrauliques et par conséquent de mortalité de certains organismes peu mobiles (alevins, batraciens...).

La recherche d'une station Onde sur le bassin versant ou à proximité (même HER de type 2 et même type de cours d'eau) et l'examen des données collectées peuvent apporter des **renseignements sur les étiages et les risques d'intermittence du cours d'eau restauré.**

Végétation

La végétation riparienne (implantation, structure, composition) peut également apporter des informations indirectes sur les hauteurs d'eau et les durées d'exondation (Figure 59). En effet, les caractéristiques des cycles exondation/remise en eau telles que leur amplitude, leur rythmicité et leur durée peuvent mener à différentes réponses des communautés végétales en termes de dynamique, de composition et de richesse spécifique [53].

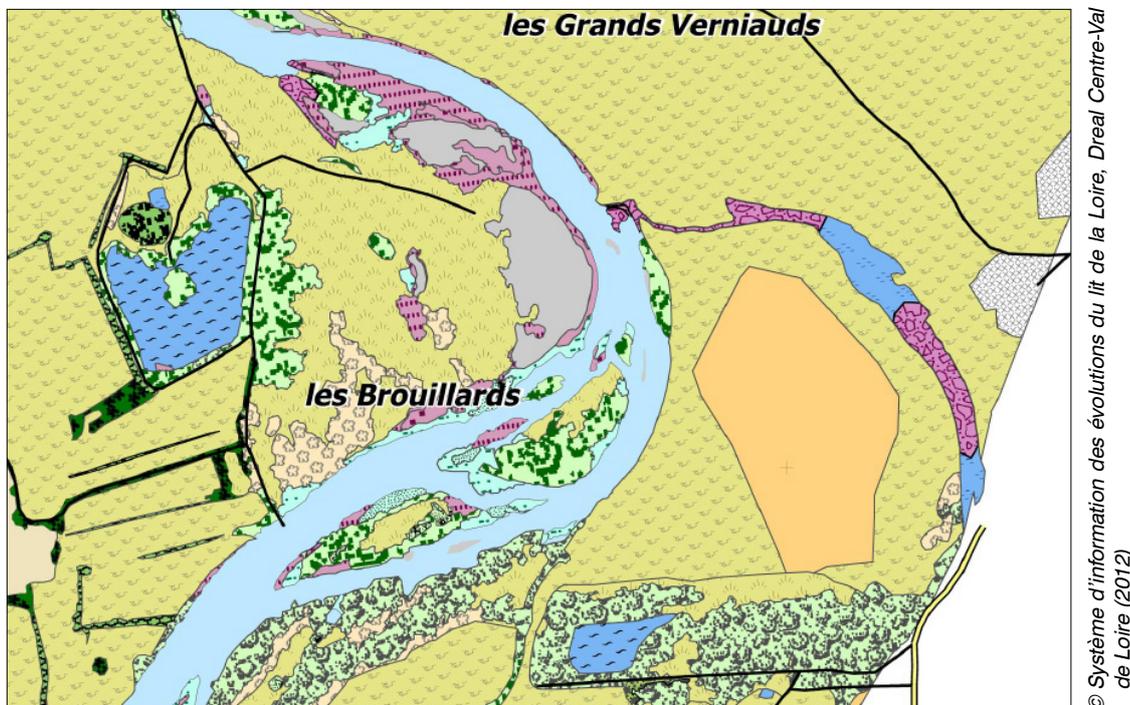


Figure 59 - Exemple de carte de végétation du système d'information des évolutions du lit de la Loire bourguignonne entre l'Allier (03) et la Saône et Loire (71).

Les différentes couleurs et figurés représentent les groupements-types définis dans la typologie simplifiée des communautés végétales du lit endigué de la Loire (Cornier, 1998)[54]. En violet par exemple, les végétations herbacées pionnières typiques du lit mineur. Le figuré vert clair parsemé de tâches vert plus foncé sur les îles de la Loire représente un couvert de bois tendre, ce qui peut être le signe d'une augmentation des durées d'exondation de ces îles.

Stratégie d'acquisition

L'objectif de cette partie est l'acquisition de chroniques hydrologiques et autres données hydrologiques complémentaires, avant et après travaux de restauration. Nous proposons ici un arbre de décision simplifié (Figure 60) permettant de déterminer la méthode *a priori* la plus adaptée en fonction du contexte de l'opération de restauration. À noter que, quel que soit le choix de la méthode, notamment pour l'obtention de chroniques de débits simulés, une confrontation des résultats avec des observations est nécessaire.

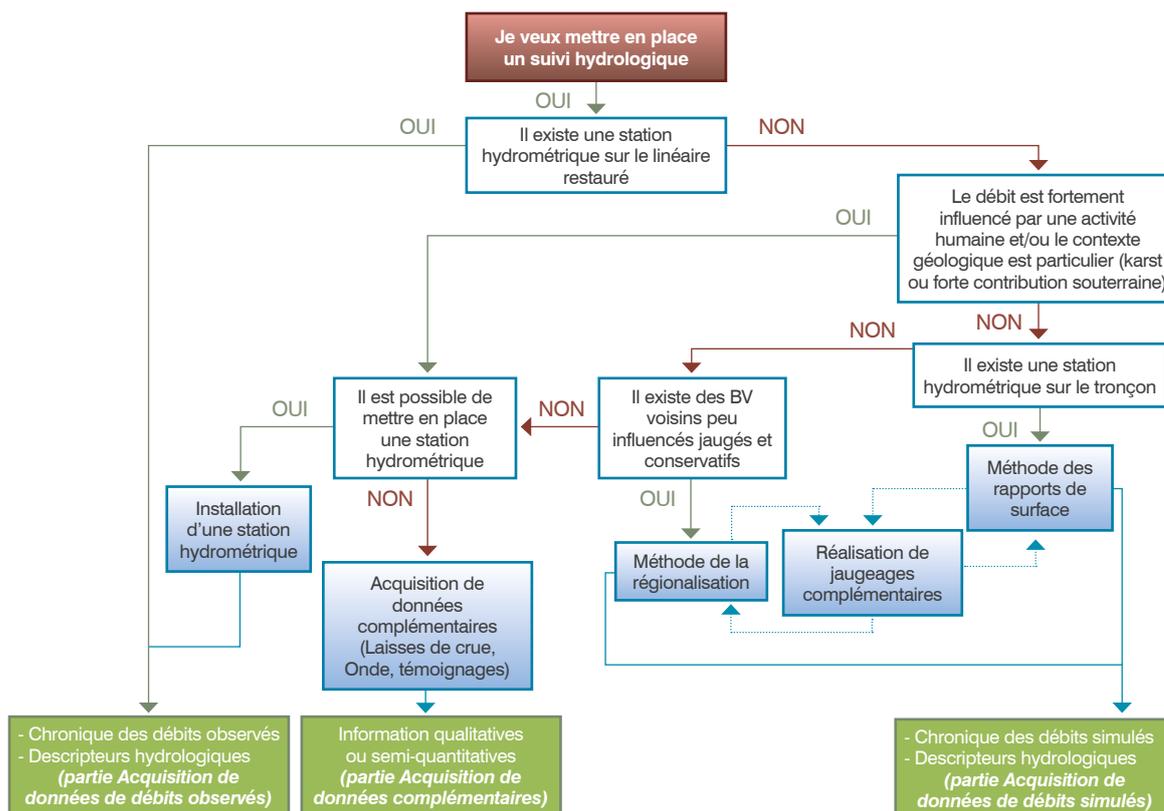


Figure 60 - Arbre de décision simplifié de la stratégie d'acquisition des données hydrologiques nécessaires au suivi des opérations de restauration hydromorphologique des cours d'eau.

Le tronçon considéré dans cette stratégie correspond à un tronçon hydrologiquement homogène, c'est-à-dire ne présentant pas de discontinuité hydrologique majeure d'amont en aval, qu'elle soit d'origine naturelle (confluence, perte karstique...) ou anthropique (prélèvements, dérivations...). En première approximation on pourra utiliser le découpage en tronçons hydromorphologiquement homogènes proposés par Syrah.

Un bassin conservatif (Figure 60) est défini par sa topographie. C'est un bassin sur lequel l'ensemble des pluies efficaces (précipitations diminuées de l'évapotranspiration) atteint l'exutoire, il n'y a pas de transfert souterrain vers d'autres bassins versants.

Acquisition de chroniques de débits simulés

Lorsqu'il n'existe pas de station hydrométrique sur le linéaire restauré ou qu'il est impossible d'en installer une, les débits peuvent, dans certains cas, être simulés par différentes méthodes. Dans le cadre du Suivi scientifique minimal, nous proposons deux méthodes de simulation des débits. Ces méthodes s'appuient sur les données hydrologiques acquises en dehors du linéaire restauré et il faudra garder en mémoire les incertitudes plus ou moins importantes liées à ces méthodes.

<http://www.data.eaufrance.fr/jdd/9c86a5da-88f4-4819-a84e-c09a69394a34>

Méthode du rapport des surfaces de bassin versant (ou méthode analogique)

Lorsqu'il existe une station hydrométrique sur le même tronçon hydromorphologique (référentiel Syrah) que le site de restauration, il est possible d'utiliser la méthode du rapport des surfaces de bassin versant pour extrapoler le débit du linéaire restauré. La méthode du rapport des surfaces de bassin versant, ou encore appelée méthode analogique, est la méthode la plus simple pour reconstituer un débit à l'exutoire d'un bassin non jaugé (Encart 2 dans Lebecherel *et al.*, 2015 [51]). Elle consiste en la transposition directe du débit d'une station voisine jaugée, du même tronçon hydromorphologique par exemple, avec un ajustement au ratio des surfaces respectives de bassin :

$$Q_{\text{non jaugé}} = Q_{\text{jaugé}} \times \frac{S_{\text{non jaugé}}}{S_{\text{jaugé}}}$$

Avec Q en m³.s⁻¹ et S la surface de bassin versant en km².

On parle alors de modèle débit-débit, qui, dès lors que les exutoires sont sur le même tronçon, voire éventuellement des bassins proches, et qu'ils réagissent aux pluies de façon similaire, peut donner des résultats très satisfaisants.

Cependant, cette méthode :

- fait implicitement l'hypothèse que les pluies diffèrent peu entre les sites étudiés ;
- néglige notamment le fait que lorsque le bassin versant augmente, les pointes de crue peuvent être atténuées ou décalées (le rapport des surfaces n'ajuste que les volumes d'eau).

Il est possible et fortement conseillé, afin de valider le choix de la station jaugée, de réaliser des jaugeages ponctuels sur la station non jaugée (voir le chapitre *Utilisation de jaugeages ponctuels pour évaluer et améliorer les débits simulés*).

Méthode de régionalisation

Principe

Il existe une multitude de méthodes de régionalisation et de modèles hydrologiques. Ici, nous proposons une méthode de régionalisation basée sur la proximité géographique car elle est plus facile à mettre en œuvre et montre de bons résultats. Elle est basée sur l'utilisation du modèle GR4J disponible en libre accès sur R. Cette méthode nécessite des compétences pour l'utilisation et l'application des modèles sous R.

L'installation du logiciel R via la [plateforme du projet R](https://cran.r-project.org/) est également requise. Le modèle et les fonctions de calibrations sont disponibles en tapant *install.packages* (« airGR »).

Cette méthode consiste à modéliser le fonctionnement d'un bassin versant non-jaugé à partir d'informations d'autres bassins versants jaugés situés à proximité. Plus précisément, elle repose sur le transfert des paramètres de GR4J de bassins jaugés (bassins donneurs) vers un bassin non jaugé (bassin receveur).

Le modèle GR4J est un modèle pluie-débit [55] à 4 paramètres (X1, X2, X3 et X4), prenant en entrée des chroniques journalières de précipitations et de températures moyennées sur la surface du bassin versant et présentant en sortie des valeurs de débits journaliers.

Cette méthode peut également être utilisée pour prolonger jusqu'à la période actuelle les chroniques hydrologiques reconstituées mentionnées dans le paragraphe *Débits issus de modélisation en site non jaugé (travaux Irstea)*, à condition de disposer des données météorologiques.

<https://webgr.irstea.fr/logiciels/airgr/>

<https://cran.r-project.org/>

Domaine d'application

Le modèle GR4J a été testé sur de larges échantillons de plusieurs centaines de bassins, particulièrement en France mais également aux États-Unis, en Australie, au Brésil, au Mexique ou encore en Algérie. Il peut être utilisé sur des bassins de toutes tailles et dans des contextes variés. Cependant, certains systèmes hydrologiques sont plus difficiles à modéliser car les processus en jeu sont complexes et la structure simple du modèle ne permet pas de les prendre en compte. Il s'agit notamment des karsts, des systèmes avec de forts apports souterrains et des systèmes influencés par des activités anthropiques. Dans ces cas-là, les performances du modèle sont fortement dégradées.

Dans le cas des bassins avec influence nivale, définis comme ayant une part de précipitations solides supérieure à 10 %, il est nécessaire d'activer le module de neige Cemaneige, deux paramètres doivent alors également être régionalisés. Pour plus d'informations, le lecteur pourra se référer au rapport de Brigode *et al.* [56].

Données nécessaires

Les données nécessaires et leurs caractéristiques sont résumées dans le Tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 - Description des variables nécessaires à la mise en place du modèle GR4J

Données nécessaires	Résolution	Pas de temps	Accès - Liens
Précipitations	BV contributif + BV contributifs aux stations voisines	Journalier	Réanalyses SAFRAN - 8km x 8km - Météo-France
Températures ou évapotranspiration potentielle			Réanalyses SAFRAN - 8km x 8km - Météo-France
Débits	Stations voisines		Banque hydro (http://hydro.eaufrance.fr/)

À court terme, un catalogue de paramètres utilisés pour la simulation de bassins jaugés sera disponible au sein du package « airGR ».

Description des étapes

Cinq étapes sont nécessaires afin d'obtenir la chronique de débits simulés pour un bassin non jaugé (Figure 61).

- Étape 1 - Sélection d'au moins cinq bassins versants jaugés « donneurs »
- Étape 2 - Calage du modèle à partir des bassins donneurs
- Étape 3 - Recalcul du paramètre X4
- Étape 4 - Réalisation des simulations à partir des paramètres des bassins donneurs
- Étape 5 - Réalisation de la moyenne des simulations en fonction de leur distance au bassin receveur

Pour une description détaillée de ces étapes, se reporter à l'Annexe 1 de cette fiche.

La publication par Irstea du catalogue de paramètres des bassins jaugés est programmée. Par conséquent, l'étape 2, la plus fastidieuse, pourra être supprimée et la démarche en sera facilitée. Dans le cas d'une prolongation des chroniques hydrologiques reconstituées mentionnées dans le paragraphe *Débits issus de modélisation en site non jaugé (travaux Irstea)*, les bassins « donneurs » sont définis en en-tête des fichiers de chroniques, l'utilisateur peut ainsi directement passer à l'étape 3.

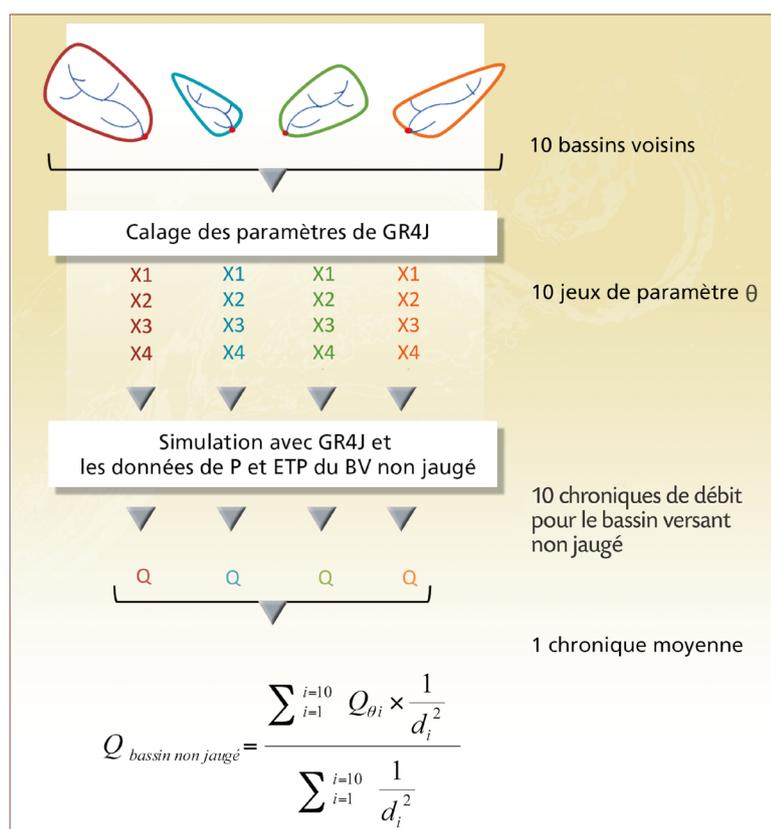


Figure 61 - Schéma explicatif de la méthode de régionalisation basée sur la proximité géographique. (LeBecherel et al. [51])

Utilisation de jaugeages ponctuels pour évaluer et améliorer les débits simulés.

Acquisition de jaugeages ponctuels : réalisation de jaugeages.

Il existe quatre grandes catégories de méthodes pour réaliser un jaugeage : les méthodes « d'exploration du champ des vitesses », les méthodes « volumétriques », les méthodes par dilution d'un traceur et les méthodes hydrauliques. Les méthodes d'exploration du champ des vitesses sont les plus utilisées et font appel à un panel de nouvelles techniques reposant sur diverses technologies (acoustique, électromagnétique, méthodes non intrusives type radar et vidéo). Le matériel nécessaire, sa mise en place et l'exploitation des résultats pour déterminer le débit d'une rivière sont décrits en détail dans le chapitre 4 de la [charte hydrométrique](#).

Le choix de la section de mesure se fera en suivant les préconisations du guide Carhyce [19]. L'utilisation de données de jaugeages ponctuelles permet d'acquérir une vision critique des données issues des modèles et peut améliorer leurs performances. Dans le cas de la méthode de régionalisation par exemple, une vingtaine de jaugeages ponctuels correspond à un optimum à réaliser pour estimer les débits lorsqu'il n'y a pas de stations de mesure [51]. Cela permet en effet d'améliorer significativement les performances du modèle. On conseille par exemple de réaliser avant travaux au moins deux jaugeages dans des conditions hydrauliques différentes puis, après travaux, deux ou trois jaugeages par an dans des conditions hydrauliques diversifiées et ce tout au long de la durée du suivi.

http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/ACCIDR/doc/IFD/IFD_REFDOC_0536936

Acquisition de jaugeages ponctuels : jaugeages issus de Carhyce.

Dans le cadre du suivi hydromorphologique et de la mise en œuvre du protocole Carhyce (voir *Fiche 1 [Hydromorphologie (échelle station)]* et le *guide Carhyce [19]*), des jaugeages sont réalisés aux différentes stations de suivi.

En suivant les préconisations du Suivi scientifique minimal, durant le suivi, le protocole Carhyce est mis en œuvre au moins 5 fois, donc 5 jaugeages en période d'étiage doivent être réalisés. Si l'on choisit de réaliser une simulation de l'hydrologie et que l'on souhaite améliorer les performances de cette simulation et réduire les incertitudes, il est conseillé de réaliser une quinzaine de jaugeages supplémentaires dans des conditions hydrauliques diversifiées tout au long de la durée du suivi. Avant travaux, on conseille notamment de réaliser au moins un jaugeage supplémentaire au jaugeage issu de Carhyce, dans des conditions de débit supérieur. Le reste des jaugeages sera réparti tout au long de la durée du suivi dans des conditions hydrauliques diversifiées.

Évaluation et amélioration des débits simulés

Les jaugeages ponctuels peuvent tout d'abord permettre de donner une indication sur la qualité des chroniques de débits simulés. En positionnant les jaugeages ponctuels sur la chronique, il est possible d'évaluer si le modèle tend à sous-estimer ou à surestimer les observations.

Une fois cette évaluation réalisée, il est possible d'améliorer les performances des simulations par régionalisation en utilisant ces jaugeages ponctuels (voir annexe 2 de cette fiche).

Acquisition de données de débits observés

Utilisation d'une station hydrométrique existante

Lorsqu'une station hydrométrique existe sur le linéaire restauré, il faut récupérer les données acquises par cette station afin de pouvoir disposer des chroniques des débits observés durant la durée du suivi.

Les données des 3 200 stations hydrométriques en service gérées par l'État sont accessibles sur le site de la [banque Hydro](#).

Outre les stations hydrométriques gérées par l'État, il peut également exister des stations hydrométriques gérées par d'autres opérateurs (syndicats de rivières, instituts de recherche...).

<http://hydro.eaufrance.fr/>

Installation d'une station hydrométrique

L'installation d'une station hydrométrique sur le linéaire restauré reste la meilleure option pour obtenir des données de suivi de l'hydrologie de qualité. Sur certains bassins versants (débit fortement influencé par les activités humaines, karst, forte contribution des eaux souterraines...), l'installation d'une station hydrométrique est la seule solution pour obtenir des chroniques de débits suffisamment fiables permettant d'aider à l'interprétation des données du suivi biologique et hydromorphologique.

Dans le cadre du réseau hydrométrique français, on estime que la création d'une station hydrométrique coûte initialement environ 25 000 € et que son coût annuel de fonctionnement (maintenance, téléphone, alimentation électrique...) revient à environ 1 000 € [51]. Des solutions beaucoup moins coûteuses et plus légères peuvent également être mises en œuvre comme la pose de sondes de pression, qui permettent d'acquérir des données à des pas de temps infra-horaires (Figure 57). Elles nécessitent cependant une certaine expertise lors de la mise en place, un entretien régulier et du recul par rapport aux données brutes qui en sont issues. Par ailleurs, les sondes de pression mesurent une pression absolue soit celle de la colonne d'eau à laquelle s'ajoute la pression atmosphérique, il faut donc impérativement mettre en œuvre une sonde barométrique en parallèle, pour pouvoir obtenir par soustraction des valeurs de hauteurs d'eau correctes (non influencées par les variations météorologiques).

La charte **qualité de l'hydrométrie** est un guide des bonnes pratiques et donne notamment des éléments concernant le choix du site à instrumenter ou les différents types de matériels disponibles.

http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/ACCIDR/doc/IFD/IFD_REFDOC_0536936

Acquisition de données complémentaires

Mise en place du protocole Onde/En quête d'eau

Sur les cours d'eau aux étiages naturellement sévères ou soumis à des pressions de prélèvements importantes, ou plus généralement si un risque d'intermittence est suspecté, il est préconisé de mettre en place le **protocole d'observation des étiages** précédemment cité. En fonction du linéaire restauré et des observations réalisées, une ou plusieurs stations pourront être positionnées sur le site.

La bancarisation des données s'effectuera dans l'application web **En quête d'eau**.

<http://enquetedeau.eaufrance.fr>

<http://www.reseau.eaufrance.fr/ressource/tutoriel-en-quete-eau>

<http://www.reseau.eaufrance.fr/projet/observatoire-national-etiages>

Laisse de crues

Après une crue, des débris peuvent s'accumuler linéairement, marquant le niveau d'eau le plus haut atteint par la crue (Figure 58 page 141). La connaissance de la hauteur d'eau maximale atteinte lors du pic de crue donne par exemple **une indication de la connexion du cours d'eau avec son lit majeur**.

Dans le cadre d'un suivi, il peut être intéressant d'aller repérer d'éventuelles laisses de crue le long du linéaire restauré et de renseigner leur localisation et leur altitude.

Utilisation d'outils de sciences participatives

De nouveaux outils de sciences participatives peuvent permettre d'acquérir des informations sur les débits des cours d'eau, tels que :

- Crowdwater. Cette application Suisse gratuite pour smartphones, mise au point dans le cadre d'un doctorat, permet de collecter 4 types de données :
 - la hauteur d'eau,
 - le débit,
 - l'humidité du sol,
 - les conditions d'écoulement des cours d'eau temporaires ;
- Discharge.ch. Cette application pour smartphone est disponible en différentes versions dont une gratuite et basée sur la détermination de la vitesse du courant pour une section donnée et permettant d'appréhender la hauteur de l'eau et le débit.

Ces outils peuvent être intéressants car leur mise en œuvre se fait depuis le haut de la berge. Ils peuvent fournir des éléments complémentaires d'informations sur les débits. Ils nécessitent cependant une certaine habitude afin d'être utilisés correctement et leurs résultats sont à manier avec précautions car les sources d'incertitudes sont nombreuses (mesure sur le terrain, hypothèses retenues, choix techniques...). Par ailleurs, ces outils ne bénéficient pas de nombreux retours d'expériences.

Contextualisation hydrologique des données de suivi des opérations de restauration

La connaissance de l'hydrologie des sites restaurés est un élément très important à prendre en compte, que ce soit lors de la phase diagnostic pour aider à prédire les effets probables de la restauration, ou durant la phase de suivi pour aider à comprendre les effets observés de l'opération de restauration.

Les chroniques de débits, qu'elles soient mesurées ou reconstituées, doivent donc être prises en compte lors de l'interprétation des données collectées sur les autres compartiments. En effet, les variations de débits sont un des facteurs explicatifs majeurs des peuplements en place et de l'hydromorphologie observée.

Concernant la biologie, la période à laquelle se produisent les crues, leur importance et leur fréquence influent sur le succès reproducteur des différentes espèces, se répercutant ainsi sur les peuplements observés de l'année voire des années suivantes. Par ailleurs, l'intensité et la durée de l'étiage influenceront sur les hauteurs d'eau, la température de l'eau et la physico-chimie, ce qui impactera aussi les communautés.

Les variations de débits peuvent aussi être à l'origine d'un biais dans l'échantillonnage des peuplements, si une crue s'est produite peu de temps avant les prélèvements (espèces ayant dérivé en aval ou s'étant déplacées vers des zones refuge).

Il faudra également être attentif aux chroniques de débits observées lors de la phase travaux : une crue durant les opérations de terrassement peut entraîner de grandes quantités de particules fines et provoquer des phénomènes de colmatage à l'aval.

Les chapitres ci-après proposent des éléments de méthode pour la contextualisation hydrologique des données de suivi des opérations de restauration.

Afin de faciliter la mobilisation des données et la mise en graphique des résultats, cette fiche est accompagnée d'un classeur Excel permettant d'importer des données hydrologiques issues d'observation ou simulées (chroniques ou jaugeages ponctuels), des données de pluviométrie et de température, ainsi que de visualiser les dates des opérations de prélèvement (biologie, physico-chimie et hydromorphologie) dans les chroniques de débits. Le manuel d'utilisation de ce classeur Excel est disponible en annexe 3 de cette fiche.

À titre d'information, le temps initial de prise en main de l'outil Excel est d'environ 1 h à 1 h 30.

Caractérisation de l'hydrologie

À toutes les étapes d'une opération de restauration (de la phase diagnostic au suivi, en passant par sa conception et son dimensionnement), il est important de réussir à comprendre la réponse hydrologique d'un bassin versant car cela permet :

- d'estimer les événements hydrologiques (crues et étiages) susceptibles d'influencer les réponses hydromorphologiques et biologiques ;
- d'estimer la dynamique saisonnière du bassin versant ;
- de déterminer les facteurs influençant cette dynamique.

Pour cela, il est proposé de produire des graphiques qui permettent de replacer les dates des opérations de suivi dans le contexte hydrologique annuel et pluriannuel, ou en focalisant sur la période d'étiage.

Pour chacun de ces graphiques, des indicateurs statistiques différents sont proposés.

- À l'échelle annuelle et pluriannuelle :
 - le **module** : débit moyen pluriannuel,
 - le **débit moyen mensuel** donne une idée du régime moyen du cours d'eau,
 - la **crue biennale** (Q_2) est utilisée comme valeur approchée du débit de plein bord⁴⁴,
 - la **crue décennale** (Q_{10}) de période de retour 10 ans ou crue débordante, qui représente une crue assez conséquente mais qui reste relativement fréquente⁴⁴ ;
- À l'étiage :
 - le **VCN10 quinquennal sec** (débit minimal sur 10 jours consécutifs de fréquence une année sur 5) permet de caractériser des situations d'étiage plus sévères que le QMNA5. Il représente un bon descripteur des risques environnementaux estivaux (moyenne sur une durée plus courte que le QMNA5),
 - le **QMNA5** (débit moyen mensuel minimum de fréquence quinquennal sec) est défini dans le code de l'environnement (article R 214-1) comme le débit de référence d'étiage. C'est un débit statistique qui donne une information sur la sévérité de l'étiage.

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.o?idArticle=LEGIAR-TI000025800815&cidTexte=LE-GITEXT000006074220>

Le QMNA5 est notamment utilisé pour le traitement des dossiers réglementaires sur les rejets et les prélèvements dans les eaux de surface (IOTA) ou pour la détermination des pressions des usages sur les masses d'eau dans le cadre de la DCE.

Contextualisation hydrologique pluriannuelle

La visualisation de l'ensemble de la chronique disponible permet d'identifier les événements hydrologiques marquants, en particulier les crues.

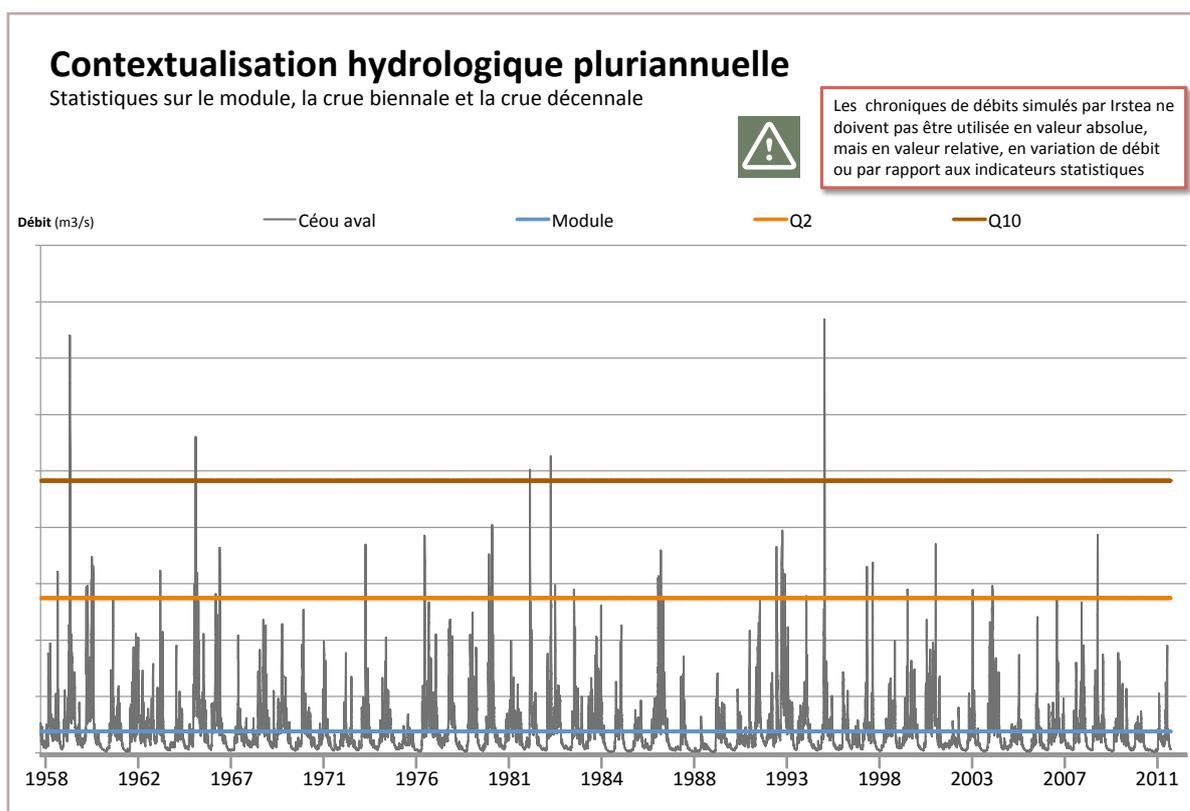


Figure 62 - Exemple de chronique hydrologique pluriannuelle sur le Céou aval (source des données : reconstitution de chroniques hydrologiques Irstea sur le site du projet Carmen http://carmen.carmencarto.fr/66/AFB_Reconstitution-chroniques-hydrologiques.map)

Contextualisation hydrologique annuelle et à l'étiage

Dans l'exemple ci-après (Figure 63, le Cher à Châteauneuf en 2006), l'opération de suivi de mars (rond vert) a été réalisée quelques jours après une crue décennale. Ce contexte peut aider à comprendre les résultats du suivi qui aura été réalisé ce jour-là.

⁴⁴ Le débit de plein bords est celui ayant la plus forte influence sur l'hydromorphologie du cours d'eau (transport solide, forces tractrices, débit de mise en mouvement des particules...). Il se situe généralement entre la crue annuelle et la crue biennale. Le Q2 (crue biennale) utilisé dans le tableur excel représente le débit de crue journalier de période de retour deux ans et le Q10 (crue décennale) utilisé dans le tableur excel le débit de crue journalier de période de retour dix ans, estimés à partir de la loi de Gumbel.

La Figure 64 permet de visualiser que l'opération réalisée en août a eu lieu au cœur de l'étiage, mais avec un débit situé au-dessus du QMNA5. L'étiage n'était donc pas particulièrement sévère.

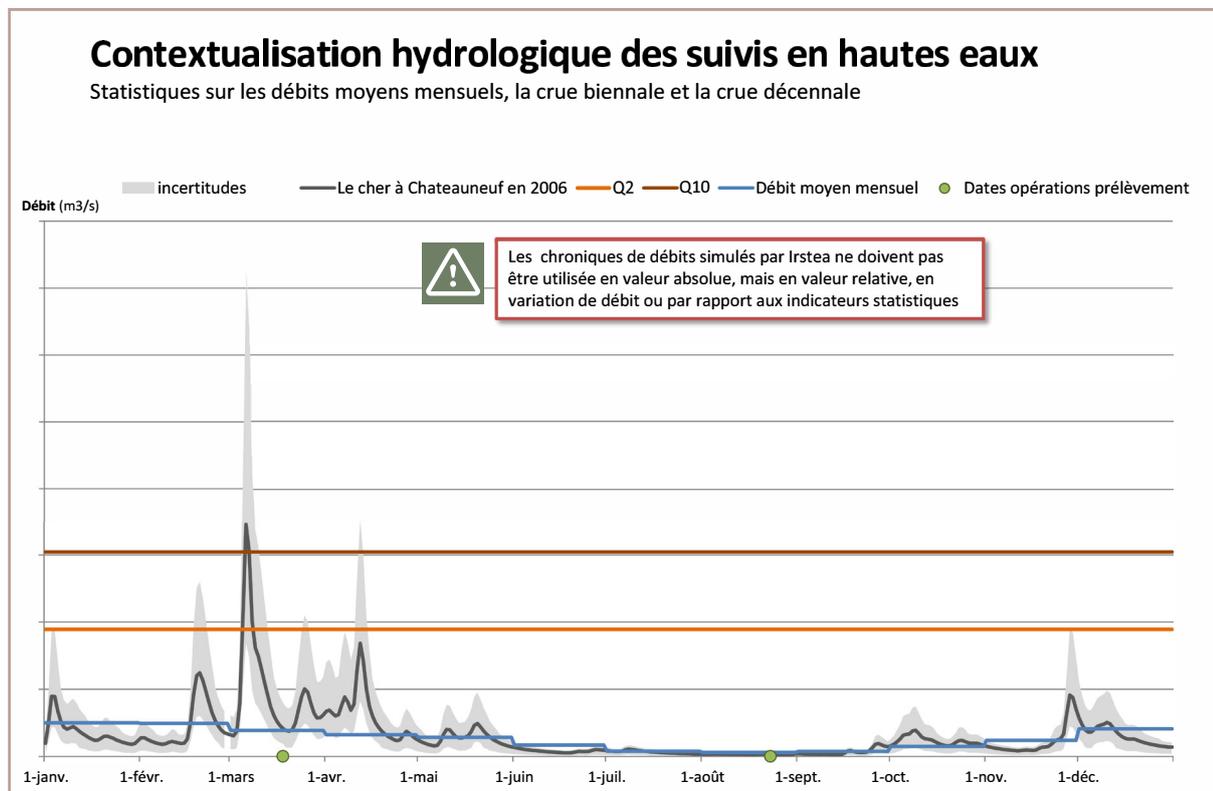


Figure 63 - Exemple de contextualisation hydrologique des suivis en hautes eaux sur le Cher à Châteauneuf en 2006 (source des données : Reconstitution de chroniques hydrologiques Irstea sur le site du projet Carmen http://carmen.carmencarto.fr/66/AFB_Reconstitution-chroniques-hydrologiques.map)

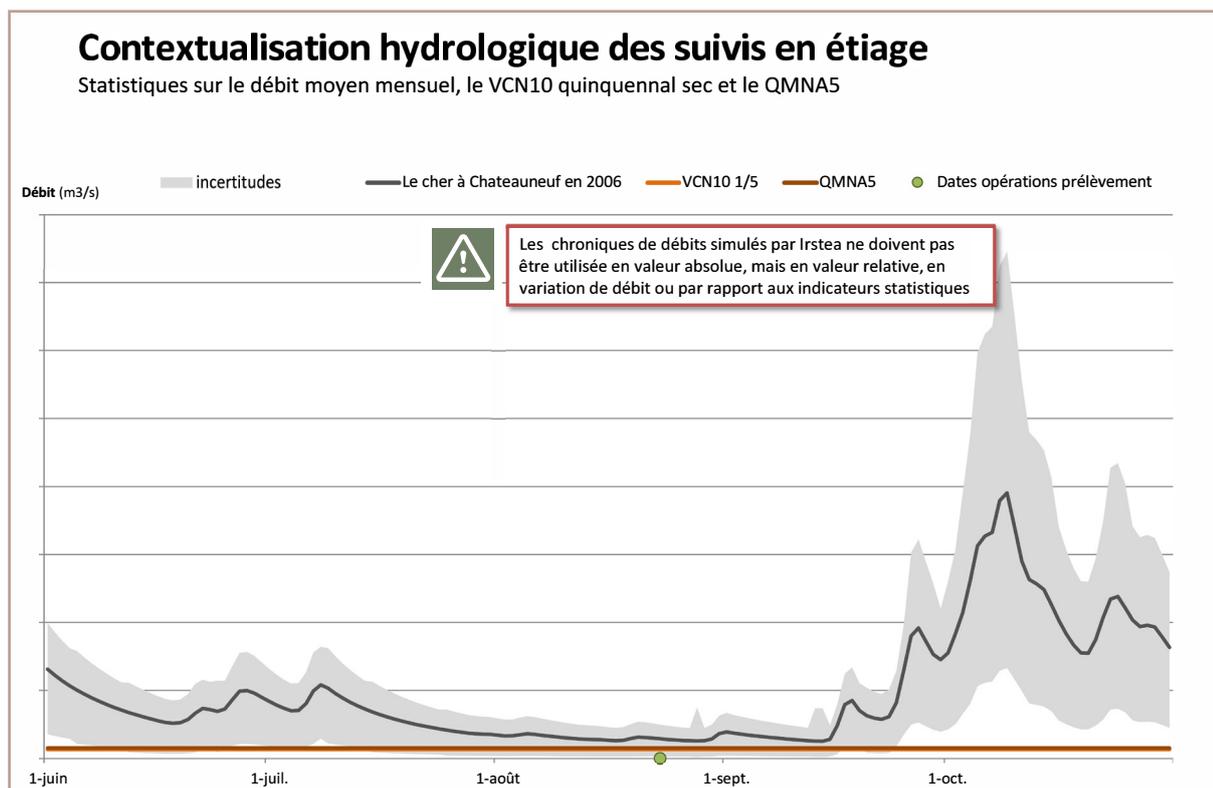


Figure 64 - Exemple de contextualisation hydrologique des suivis en étiage sur le Cher à Châteauneuf en 2006 (source des données : Reconstitution de chroniques hydrologiques Irstea sur le site du projet Carmen http://carmen.carmencarto.fr/66/AFB_Reconstitution-chroniques-hydrologiques.map)

14. Dany, Aude, 2016. *Accompagner la politique de restauration physique des cours d'eau : éléments de connaissance*. Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. 304 pages.
51. Lebecherel, Laure, Vazken Andréassian, Bénédicte Augeard, Eric Sauquet, et Clotilde Catalogne, 2015. *Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ?* Comprendre pour agir. Onema. 28 pages.
52. Le Pichon, Céline, et al., 2016. *Suivi de l'efficacité de restauration de la continuité écologique, Cas des rivières du Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse*. Irstea. 114 pages.
53. De Wilde, Mélissa, 2014. *Consequences of dewatering for aquatic plant communities and the functioning of riverine wetlands*. Thèse de doctorat, Biodiversité et Ecologie. Université Claude Bernard - Lyon I, 2014. NNT : 2014LYO10275.
54. Cornier, Thierry, 1998. *Essai de typologie écologique des communautés végétales du lit de la Loire*. Université François Rabelais, DIREN Centre, Orléans. 47 pages.
55. Perrin, Charles, Claude Michel, et Vazken Andréassian, 2003. *Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation*. Journal of Hydrology, 279(1): p. 275-289.
56. Brigode, Pierre, Vazken Andréassian, François Bourgin, et Florent Lobligeois, 2014. *Reconstitution ponctuelle de chroniques hydrologiques incomplètes ou manquantes par modèle pluie-débit*. Irstea. 25 pages.
19. Baudoin, Jean-Marc, et al., 2015. *CARHYCE : CARactérisation HYdromorphologique des Cours d'Eau - Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur des cours d'eau prospectables à pied*. Guides et protocoles. Agence française pour la biodiversité.
57. Nash, J. E. et J. V. Sutcliffe, 1970. *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*. Journal of Hydrology, 10(3): p. 282-290.
58. Rojas Serna, Claudia, Laure Lebecherel, Charles Perrin, Vazken Andréassian, et Ludovic Oudin, 2016. *How should a rainfall runoff model be parameterized in an almost ungauged catchment? A methodology tested on 609 catchments*. Water Resources Research, 52(6): p. 4765-4784.

Méthode de régionalisation

- **Étape 1** - Sélectionner un *pool* d'au moins cinq bassins versants jaugés (N), qui seront dits « donneurs », situés à proximité du bassin versant non-jaugé, dit « receveur ». Cette proximité est définie par une distance pondérée entre les barycentres des bassins versants obtenus à l'aide d'un outil SIG et les exutoires de ces derniers :

$$d = 0,2 \times d_{exutoire} + 0,8 \times d_{barycentre}$$

Cette distance permet d'éviter une différence de taille trop importante entre le bassin « donneur » et le bassin « receveur ». Par exemple, la distance obtenue pour la régionalisation de 12 225 stations est inférieure à 13 km pour 50 % des bassins et peut aller jusqu'à 40 km pour les grands bassins (Rhône, Loire, Rhin [56]). Les bassins versants « donneurs » doivent être conservatifs et les données de débits disponibles doivent être fournies au pas de temps journalier sur une durée d'au moins 6 années hydrologiques avec peu de lacunes.

- **Étape 2** - Caler le modèle sur le *pool* des N bassins « donneurs » sélectionnés, sur au moins 10 ans à partir d'un critère objectif. Nous proposons de prendre le critère de Nash et Sutcliffe (1970)[57] calculé sur les racines carrées des débits :

$$NS = 1 - \frac{\sum(\sqrt{Q_{sim}} - \sqrt{Q_{obs}})^2}{\sum(\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{obs}})^2}$$

avec Q_{sim} , les débits simulés journaliers et Q_{obs} , les débits observés journaliers.

- **Étape 3** - Le paramètre X4 (temps de base de l'hydrogramme unitaire, exprimé en jours) doit être modifié avant d'être utilisé pour simuler les débits du bassin « receveur », du fait de la dépendance significative entre la valeur de ce paramètre et la surface du bassin versant considéré. La valeur du paramètre X4 est donc recalculée en fonction du rapport entre la surface du bassin receveur ($S_{receveur}$) et la surface du bassin donneur ($S_{donneur}$), selon la formule suivante :

$$X4_{receveur} = X4_{donneur} \times \frac{S_{receveur}^{0.3}}{S_{donneur}}$$

- **Étape 4** - Réaliser N simulations utilisant les paramètres obtenus sur chacun des bassins « donneurs » et prenant en entrée les chroniques journalières de précipitations et de températures du bassin versant « receveur » (Figure 61).

- **Étape 5** - Ces N simulations sont alors moyennées en fonction de leur distance au bassin receveur selon la formule suivante :

$$Q_{receveur} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{\theta i} \times \frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}}$$

Une chronique de débits journaliers est ainsi obtenue au site voulu.

Dès la parution du catalogue de paramètres des bassins jaugés dans la banque hydro, l'étape 2, la plus fastidieuse, pourra être supprimée et la démarche sera ainsi facilitée. Dans le cas d'une prolongation des chroniques hydrologiques reconstituées mentionnées dans le paragraphe *Débits issus de modélisation en site non jaugé (travaux Irstea)*, les bassins « donneurs » sont définis en en-tête des fichiers de chroniques, l'utilisateur peut ainsi directement passer à l'étape 3.

Amélioration des simulations par utilisation de jaugeages ponctuels

Les jaugeages ponctuels peuvent tout d'abord permettre de donner une indication sur la qualité des chroniques de débits simulés. En positionnant les jaugeages ponctuels sur la chronique, il est possible d'évaluer si le modèle tend à sous-estimer ou à surestimer les observations.

Une fois cette évaluation réalisée, il est possible d'améliorer les performances des simulations par régionalisation en utilisant ces jaugeages ponctuels.

La méthode proposée ici consiste à combiner une information partielle, fournie par les quelques mesures de débit, avec une information régionale, fournie par la méthode de régionalisation décrite dans la fiche. En particulier, une quantification du poids relatif de l'information locale et de l'information régionale suivant le nombre de jaugeages disponibles sur toute l'année pour l'estimation des débits moyens est proposée.

- **Étape 1** - Classer les jeux de paramètres des N bassins « donneurs » utilisés dans la méthode de régionalisation en fonction de leur proximité géographique. Dans ce cas, on attribue le rang 1 au jeu de paramètres issu du bassin le plus proche et le rang N au jeu de paramètres issu du bassin le plus éloigné. On note r_j^{reg} le rang obtenu pour chaque jeu de paramètre, noté θ_j .
- **Étape 2** - Classer les jeux de paramètres en fonction de l'erreur faite par rapport aux quelques observations existantes sur le bassin. Dans ce cas, le jeu de paramètres présentant la plus petite erreur aura le rang 1, et la plus grande erreur aura le rang N . On note r_j^{loc} le rang obtenu pour chaque jeu de paramètre θ_j .
- **Étape 3** - Combiner les rangs obtenus aux deux premières étapes. Ainsi, on calcule le rang tel que $r_j = \alpha \cdot r_j^{reg} + (1 - \alpha) \cdot r_j^{loc}$
 α est un coefficient pondérateur variant entre 0 et 1 et dépend essentiellement du nombre de jaugeages existants (voir la figure 18 du guide Lebecherel [51]). Une étude sur 609 bassins [58] a montré qu'à partir d'une vingtaine de jaugeages disponibles, l'information de ces jaugeages devient prépondérante par rapport à l'information issue des stations voisines et α est alors nul.
- **Étape 4** - Sélectionner ensuite les p jeux de paramètres présentant les meilleurs rangs r_j . Les simulations avec ces p jeux de paramètres doivent être réalisées puis moyennées pour obtenir la chronique journalière de débits au point voulu.

Cette méthode est plus complexe qu'un simple re-calage des paramètres, qui minimiserait l'erreur faite par rapport aux jaugeages ponctuels, mais elle offre l'avantage d'être beaucoup plus robuste, avec une dépendance moindre à l'erreur de mesure de débit.

Manuel d'utilisation du fichier de contextualisation hydrologique des suivis de restauration hydromorphologique

Le fichier, fourni en annexe du guide, se nomme « Contextualisation-hydro-V2.xlsx ».

Objectif du fichier

Faciliter la mobilisation des données hydrologiques et la production de graphiques pour l'interprétation des résultats des suivis d'opérations de restauration hydromorphologique des cours d'eau.

Le fichier est proposé sous Excel pour permettre aux utilisateurs de le faire évoluer facilement en fonction de leurs besoins.

Structuration du fichier

Le fichier se compose de 3 types d'onglets, différenciés selon 3 couleurs :

- **Bleu** : données brutes, à renseigner par l'utilisateur ;
- **Violet** : graphiques produits automatiquement ;
- **Orange** : onglets de calcul.

Remplissage des données

Le fichier permet d'accueillir différents types de données :

- hydrologie : chroniques simulées par Irstea (voir *Débits issus de modélisation en site non jaugé [travaux Irstea]*), exports de la Banque Hydro, suivis locaux (jaugeages ou chroniques continues) ;
- pluviométrie et température de l'eau ;
- dates des opérations de suivis à contextualiser.

À noter qu'il n'est pas nécessaire que l'utilisateur renseigne tous les onglets visés ci-dessus. Il faut simplement remplir les onglets pour lesquels l'utilisateur dispose de données pertinentes pour l'analyse.

Éléments préalables sur les critères de choix de données hydrologiques pertinentes pour l'analyse

Pour pouvoir être utilisées pour la contextualisation hydrologique des suivis de restauration, les données mobilisées (chroniques simulées par Irstea, chroniques issues de la banque Hydro, jaugages locaux...) doivent être « comparables » à l'hydrologie du secteur restauré.

Ainsi, il est nécessaire de vérifier que les éléments suivants sont comparables :

- le contexte hydrogéologique (dont la présence ou non de pertes karstiques) ;
- les prélèvements (irrigation, industrie, eau potable) ;
- les influences de grands aménagements hydrauliques (barrages, grands canaux...).

L'utilisateur doit donc évaluer si les données peuvent être ou non mobilisées pour la contextualisation, avant de les intégrer dans le fichier « Contextualisation-hydro-V2.xlsx ».

 Pour que la production automatique des graphiques fonctionne, il est nécessaire de bien suivre les instructions du manuel, en particulier lorsqu'il y a le symbole : 

 Les onglets de calcul sont modifiables pour permettre aux utilisateurs de faire évoluer le fichier. Pour autant, les utilisateurs sont mis en garde sur le fait que des modifications dans ces onglets peuvent provoquer des erreurs dans les formules existantes.

 Le fichier fonctionne avec un séparateur décimal « , » et non « . »

En cas de doute sur la pertinence de mobiliser les données d'une station, il est conseillé aux utilisateurs de renseigner les données de cette station dans le fichier « Contextualisation-hydro-V2.xlsx », sachant que l'onglet « **Graph comparaison stations** » (voir *Comparaison des stations*) permet justement de comparer les différentes données disponibles et de juger de leur pertinence. Il est ainsi possible de tester différentes stations (processus itératif) avant de choisir celle qui est la plus pertinente pour l'analyse.

Débits simulés par Irstea

Le fichier peut accueillir les données de deux stations simulées par Irstea (voir la partie *Débits issus de modélisation en site non jaugé [travaux Irstea]* de la Fiche 9 [Hydrologie]). Cela permet à l'utilisateur de comparer ces deux stations (voir également partie ci-après sur l'interprétation du graphique « comparaison des stations ») dans le cas où l'utilisateur hésite sur le choix entre 2 stations.

Procédure de récupération des données :

- aller sur le [site du projet Carmen](#) ;
- sélectionner les stations en utilisant l'outil « i » + sélection rectangulaire (voir la Figure 65 ci-après) ;

http://carmen.carmencarto.fr/66/AFB_Reconstitution-chroniques-hydrologiques.map

⚠ Pour une bonne utilisation de ces données, il est nécessaire de lire l'avertissement téléchargeable sur cette page du projet Carmen.

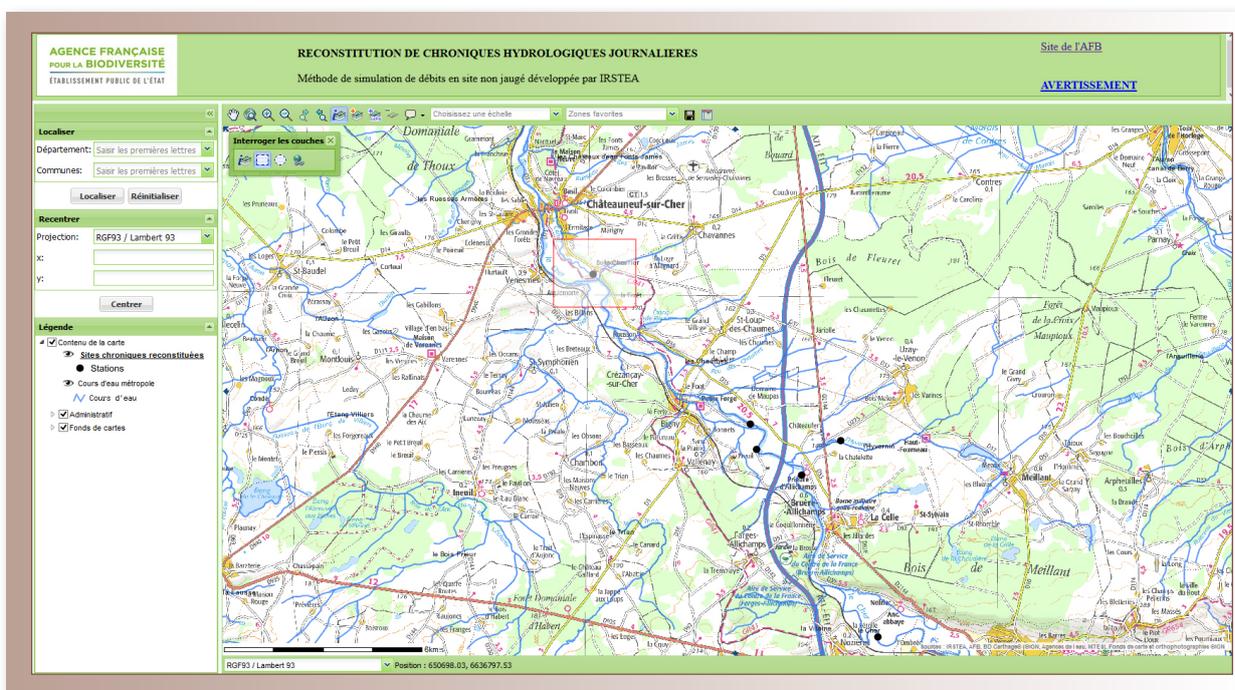


Figure 65 - Sélection des stations sur l'outil cartographique du projet Carmen.

- ouvrir le fichier « .csv » avec Excel ;
- tout sélectionner en cliquant dans le coin en haut à gauche de la feuille de calcul (Figure 66) et copier le contenu ;
- dans le fichier « Contextualisation-hydro-V2.xlsx », cliquer sur la cellule A1 (en vert) de l'onglet bleu « **Station simulée Irstea 1** » ;
- faire « collage spécial - valeur » ;
- donner un nom à la station en remplissant les cases C2 et C3 de l'onglet « liste stations » (cellules en vert). En effet, les stations Irstea n'ont pas de nom explicite (par exemple « La Loire à Orléans ») ni de code Sandre. Il est nécessaire de renseigner le nom des stations pour qu'ils apparaissent dans le menu déroulant des graphiques ;
- répéter si besoin l'opération pour une autre station dans l'onglet bleu « **Station simulée Irstea 2** ».

	A	B	C	D
1	#			
2	#	Créateur	IRSTEA - UR HBAN - Antony	
3	#	Données de	Livraison SAFRAN Octobre 2016	
4	#	Fournisseur	Météo-France	
5	#	Données de	Simulations GR4J	
6	#	Fournisseur	IRSTEA - UR HBAN - Antony	
7	#			
8	#			
9	#	Code station	4030035	
10	#	Surface [km²]	2390.35	
11	#	Coordonné	NULL	NULL
12	#	Coordonné	NULL	NULL
13	#	Quantiles	Zmin	Z10 Z20
14	#		237	357 432
15	#			

Figure 66 - Procédure de copie du contenu des stations sélectionnées.

Données de la Banque hydro

Procédure de récupération des données :

- se connecter à la **banque hydro** ;
- sélectionner une station de la banque hydro ;
- cliquer sur « exporter », choisir « Trame sandre » dans le format de données, puis cliquer sur QJM (Figure 67) ;
- choisir la période (attention le fichier est prévu pour accueillir des données à partir de 1999) puis valider ;
- télécharger le fichier « .zip » disponible dans la page d'accueil de la banque Hydro ;
- l'ouvrir avec le « bloc-note », tout sélectionner, copier et coller dans la cellule A1 de l'onglet bleu « **MesureBanqueHydro** » du fichier de contextualisation hydro ;
- dans le menu « Données » d'Excel, cliquer sur « Convertir » en choisissant les options « type de données délimitée » et « séparateurs point-virgule ».

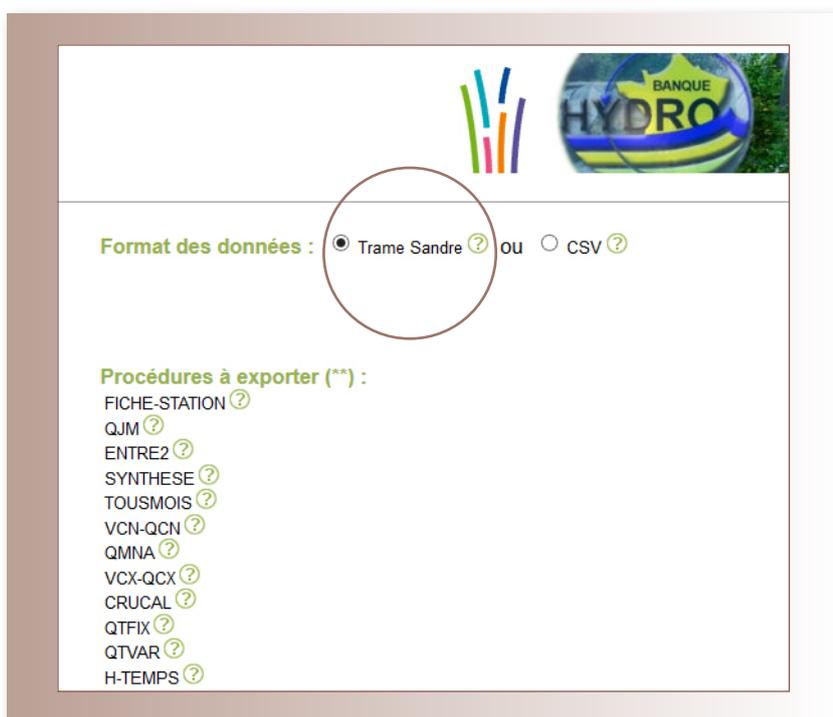


Figure 67 - Banque hydro - sélection des formats d'export

Une fois les débits journaliers renseignés dans le fichier « Contextualisation-hydro-V2.xlsx », il est proposé de renseigner également les principaux indicateurs statistiques de la station. Ces indicateurs serviront par la suite pour l'analyse des débits aux dates des opérations de prélèvements.

Procédure :

- aller sur la **recherche de stations** de la banque hydro ;
- cliquer sur « SYNTHESE » pour accéder aux principaux indicateurs statistiques de la station ;
- remplir les cases G4 à W4 de l'onglet « **Liste stations** » du fichier Excel à partir des données de la « fiche de synthèse » de la station (voir les figures 68 à 71 ci-après).

⚠ Pour accéder à ces données, il est nécessaire d'avoir un compte sur la Banque hydro. Pour s'inscrire sur la Banque hydro, aller sur la page dédiée http://hydro.eaufrance.fr/formulaire_saisie.php et choisir l'option « sans le CD ».

<http://hydro.eaufrance.fr/indexd.php?connect=1>

<http://hydro.eaufrance.fr/selection.php?consulte=rechercher>

<http://hydro.eaufrance.fr/indexd.php>

⚠ Une fois les données intégrées, vous pouvez visualiser quelle est la « validité » associée aux données dans l'onglet « BanqueHydro ». Les valeurs de débit sont surlignées en couleur si la validité est différente de « Bon ». Cette évaluation de la qualité est produite et fournie par la Banque hydro.

<http://www.hydro.eaufrance.fr/selection.php>

Pour les débits moyens mensuels : valeurs indiquées Figure 68, sans les « # »

Ecoulements mensuels (naturels) - données calculées sur 67 ans												
	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Débits (m ³ /s)	28.00 #	29.50	21.50	19.50 #	17.30 #	10.50 #	4.410 #	2.980 #	4.330 #	8.170 #	13.20 #	22.10

Figure 68 - Débits moyens mensuels de la fiche synthèse.

Dans l'exemple Figure 68, les « # » signifient que les données sont jugées « douteuses » par la banque hydro.

Les codes de validité utilisés par la banque hydro pour les débits moyens mensuels sont :

- + : au moins une valeur d'une station antérieure a été utilisée ;
- P : le code de validité de l'année-station est provisoire ;
- # : le code de validité de l'année-station est validé douteux ;
- ? : le code de validité de l'année-station est invalidé ;
- (espace) : le code de validité de l'année-station est validé bon.

Pour le module :

Modules interannuels (naturels) - données calculées sur 67 ans				
MOY (moyenne)	Fréquence	Quinquennale sèche	Médiane	Quinquennale humide
15.00 [3.90;16.20]	Débits (m ³ /s)	10.00 [8.800;12.00]	15.00 [13.00;18.00]	20.00 [19.00;21.00]

Figure 69 - Module de la fiche synthèse

Pour les indicateurs d'étiage (ligne « Quinquennale sèche ») :

Basses eaux (loi de Galton - janvier à décembre) - données calculées sur 67 ans			
Fréquence	VCN3 (m ³ /s)	VCN10 (m ³ /s)	QMNA (m ³ /s)
Biennale	0.350 [0.290;0.430]	0.480 [0.400;0.590]	0.920 [0.730;1.200]
Quinquennale sèche	0.160 [0.130;0.200]	0.230 [0.190;0.280]	0.350 [0.270;0.450]

Figure 70 - Indicateurs d'étiage de la fiche synthèse.

Pour les crues (ligne « Biennale » et « Décennale ») :

Crues (loi de Gumbel - septembre à août) - données calculées sur 66 ans		
Fréquence	QJ (m ³ /s)	
Xo	119.000	
Gradex	158.800	
Biennale	140.0 [120.0;160.0]	
Quinquennale	220.0 [190.0;250.0]	
Décennale	270.0 [230.0;310.0]	

Figure 71 - Statistiques des crues de la fiche synthèse.

Le résultat dans l'onglet « Liste stations » du fichier Excel « Contextualisation-hydro-V2.xlsx » est :

BV (km ²)	Nb années	Producteur	VCN10 1/5	QMNA5	Q2	Q10	Module	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
4091,97	55	IRSTEA - UR HBAN - Antony																	
58,16	55	IRSTEA - UR HBAN - Antony																	
3490	19	DREAL Centre	0.23	0.35	140	220	15	28,00	29,50	21,50	19,50	17,30	10,50	4,41	2,98	4,33	8,17	13,20	22,10
100		Station du syndicat XX																	
30		SPE																	

Figure 72 - Résultat dans l'onglet « liste stations ».

Autres données hydrologiques

Remplir directement les valeurs de débit moyen journalier dans les cellules surlignées en vert des onglets « [MesureHydro1](#) » et « [MesureHydro2](#) » du fichier Excel. De préférence, pour des questions de mise en forme des graphiques, saisir les données sur des chroniques continues dans l'onglet « [MesureHydro1](#) » et les jaugeages dans l'onglet « [MesureHydro2](#) ».

Une fois les données remplies dans les onglets « [MesureHydro1](#) » et « [MesureHydro2](#) », remplir les cellules E5, E6, F5, F6 (surlignées en vert) de l'onglet « [liste stations](#) » pour renseigner la période sur laquelle des données sont disponibles pour les stations considérées.

Température

Le fichier est prévu pour accueillir deux types de données :

- les stations téléchargeables sur le site [Naiade](#) ;
- les données d'enregistreurs Hobo.

Pour le site Naiades :

- aller sur le site [Naiades](#) ;
- sélectionner la station (ne sélectionner qu'une seule station à la fois) et télécharger les données en .csv ;
- ouvrir le fichier « [naiades_export.zip](#) », puis ouvrir le fichier « [Analyses temperature.csv](#) », copier toutes les données en sélectionnant le coin en haut à gauche de la feuille, faire un « collage spécial valeur » dans la case A1 de l'onglet « [TempEauNaiade](#) » du fichier de contextualisation hydro.

Pour les enregistreurs Hobo :

- ouvrir le logiciel HOBOWare Pro ;

 Les débits doivent être saisis en m³/s. Il est nécessaire de remplir la surface du bassin versant de la station en km² en haut de page.

<http://www.naiades.eaufrance.fr/acces-donnees#/temperature>

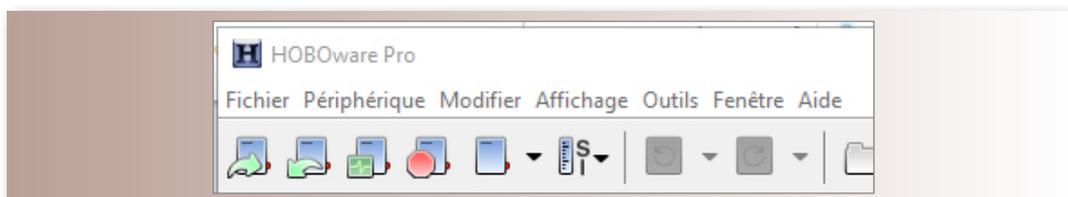


Figure 73 - Accueil du logiciel HOBOWare Pro.

- configurer les préférences dans le logiciel HOBOWare Pro.

Cliquer sur Fichier puis sur Préférences puis sur Généralités. Vérifier que la configuration correspond bien à celle de la Figure 74 ci-dessous.

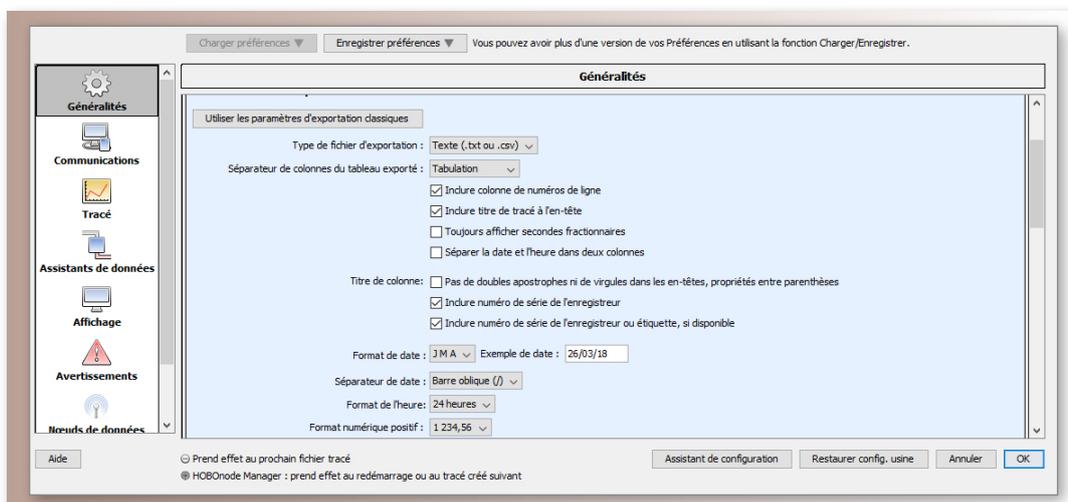


Figure 74 - Gestion des préférences du logiciel HOBOWare.

Puis cliquer sur Affichage. Vérifier que la configuration correspond bien à celle de la Figure 75 ci-dessous.

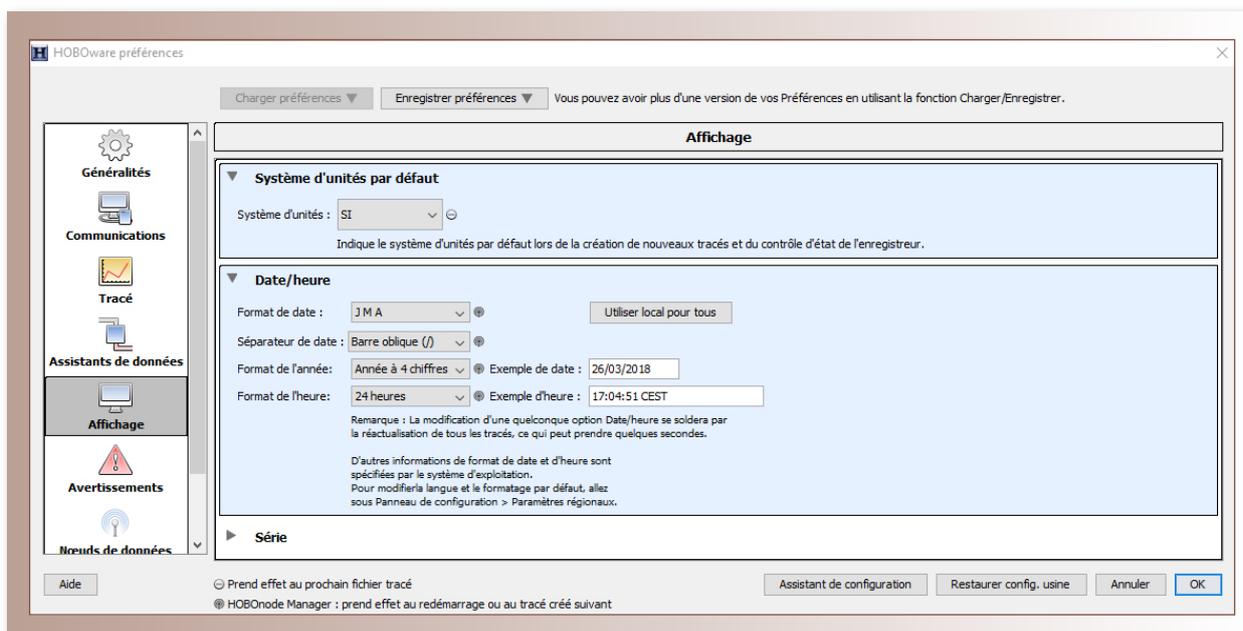


Figure 75 - Vérification de la configuration dans le logiciel HOBOWare.

■ Puis ouvrir le fichier hobo (Figure 76) ;

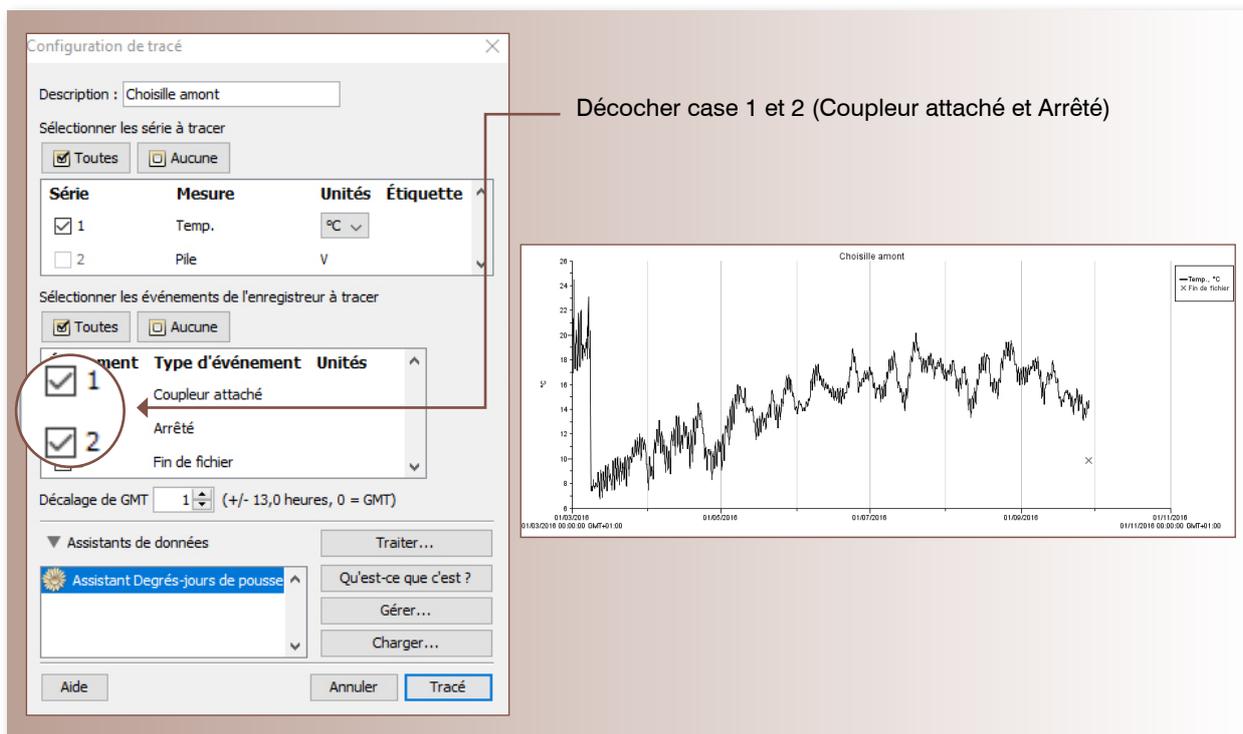


Figure 76 - Procédure et visualisation du fichier issu du logiciel HOBOWare (exemple sur la Choisille de Beaumont).

■ Passage au format .txt ;

Cliquer sur Fichier puis sur Données de Tableau d'exportation. On atteint ainsi le masque suivant, Figure 77.

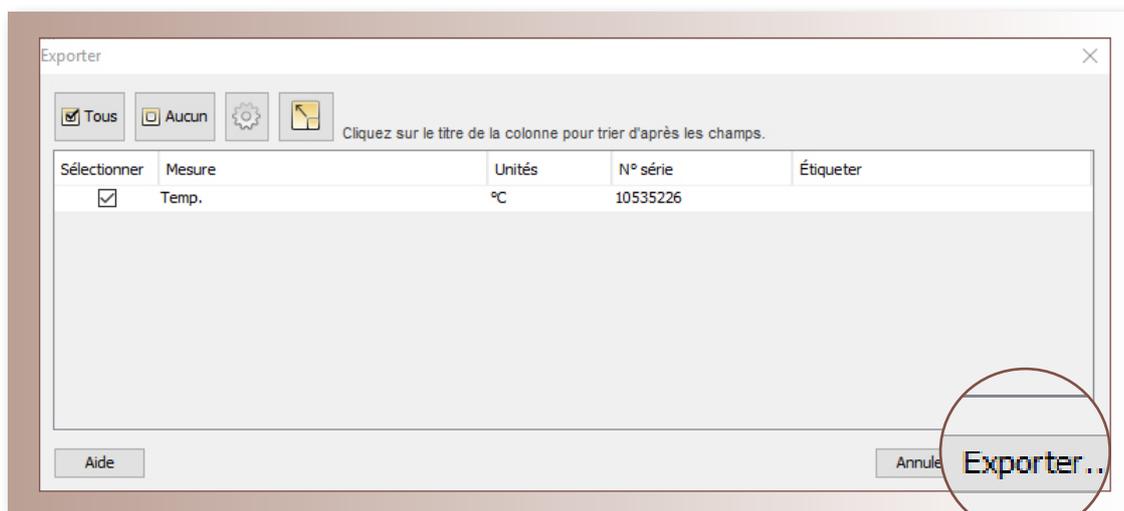


Figure 77 - Fenêtre d'export au format .txt du logiciel HOBOWare.

- Intégration dans le fichier « Contextualisation-hydro-V2.xlsx » ;
- ouvrir le fichier .txt, tout sélectionner et copier le contenu,
- se placer sur la cellule A1 de l'onglet « **TempEauHobo1** » ou de l'onglet « **TempEauHobo2** » du fichier « Contextualisation-hydro-V1.xlsx »,
- faire un collage spécial valeur,
- remplir les cellules C15 et/ou C16 de l'onglet « **Liste station** ».

Pluviométrie

Remplir directement les données de pluviométrie (en mm) en fonction des données à votre disposition. Remplir également les cellules E1 et F15 (surlignées en vert) de l'onglet « liste stations ».

Ces données sont « facultatives ». Elles sont utilisées pour aider l'utilisateur dans la critique des données hydrologiques disponibles (voir *Comparaison des stations*).

Dates des opérations de prélèvement

Il s'agit des dates où des relevés de terrain (physico-chimie, pêche électrique, relevé hydromorphologique du cours d'eau...) ont été réalisés dans le cadre du suivi de l'opération de restauration. Ce sont justement ces dates que l'on souhaite contextualiser avec les données hydrologiques.

Pour renseigner cet onglet, il faut mettre un « X » les jours où des opérations de suivi ont été réalisées sur le cours d'eau.

Utilisation des graphiques

Comparaison des stations

Ce premier onglet « **Graph comparaison stations** » permet de **comparer les différentes données hydrologiques disponibles**. Il permet par exemple de comparer :

- deux chroniques simulées Irstea entres elles ;
- une chronique simulée Irstea avec quelques points de jaugeages pour voir si la station Irstea est bien cohérente avec les mesures locales disponibles.

L'objectif de cet onglet est d'aider l'utilisateur à **choisir la station la plus pertinente qui servira pour la contextualisation hydrologique des opérations de suivi** dans les graphiques suivants.

⚠ Les données sont exprimées en lame d'eau écoulée (mm/j) pour pouvoir être comparées entre elles, d'où la nécessité de renseigner les surfaces des bassins versant amont des données renseignées dans les onglets « *MesureHydro1* » et « *MesureHydro2* ».

Cet onglet permet de :

- balayer les différentes années disponibles avec le menu déroulant ou via le « bouton d'incrémentation » (Figure 78) ;
- visualiser des données sur la pluviométrie et évaluer la cohérence avec le signal hydrologique des stations disponibles, sur le graphique.

Il sera utile voire nécessaire de faire varier l'échelle de l'axe des ordonnées des graphiques pour trouver la bonne échelle de zoom pour la visualisation des données.

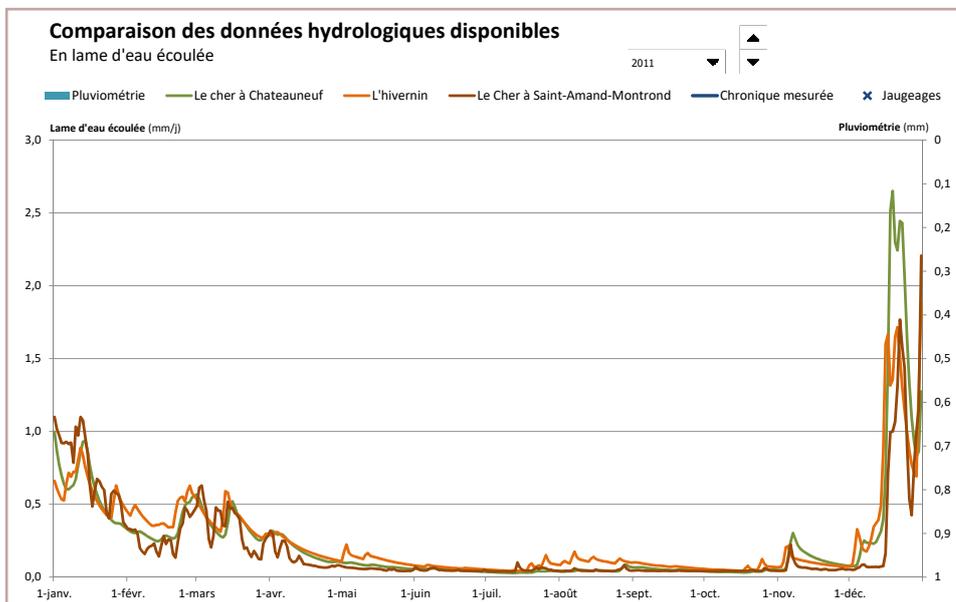


Figure 78 - Visualisation de l'onglet « Graph comparaison stations » (exemple sur le Cher).

Contexte hydrologique pluriannuel, annuel et en étiage

Les onglets « Graph contexte hydro PLURIANNUEL », « Graph contexte hydro ANNUEL » et « Graph contexte hydro ETIAGE » permettent de replacer les dates des opérations de suivi :

- dans le contexte hydrologique annuel et pluriannuel ;
- ou en zoomant sur la période d'étiage.

Contexte thermique

L'onglet « Graph température » permet d'apporter une information supplémentaire sur la température de l'eau au moment des opérations de prélèvements.

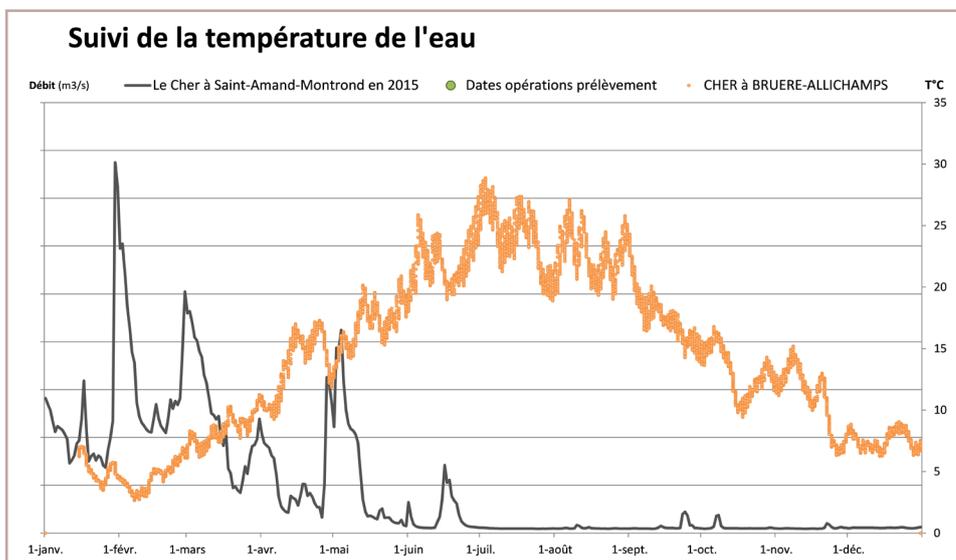


Figure 79 - Visualisation de l'onglet « Graph température » (exemple sur le Cher).

⚠ Si les données hydrologiques utilisées pour la contextualisation proviennent des stations simulées par Irstea, il est important de lire le fichier d'avertissement et le chapitre Débits issus de modélisation en site non jaugé (travaux Irstea) de la fiche hydrologie pour comprendre les limites d'utilisation de ces données.

En résumé, il faut retenir que ces données ne doivent pas être utilisées en valeur absolue, c'est-à-dire qu'il ne faut pas les utiliser pour affirmer qu'à une date donnée, le débit était de 3 m³/s par exemple. C'est pour cette raison que les valeurs de débit ne sont pas affichées sur l'axe des ordonnées.

Elles doivent être utilisées en relatif, c'est-à-dire que l'on s'intéressera à la forme de la courbe plutôt qu'aux valeurs, qui permettra de visualiser les amplitudes de variation de débit. Cette forme pourra également être comparée aux indicateurs statistiques qui sont calculés automatiquement dans les graphiques, à savoir : le débit moyen mensuel, la crue biennale, la crue décennale.

De plus, il est nécessaire de prendre en compte le nuage d'incertitude lié à la modélisation (enveloppe en grisé sur le graphique).