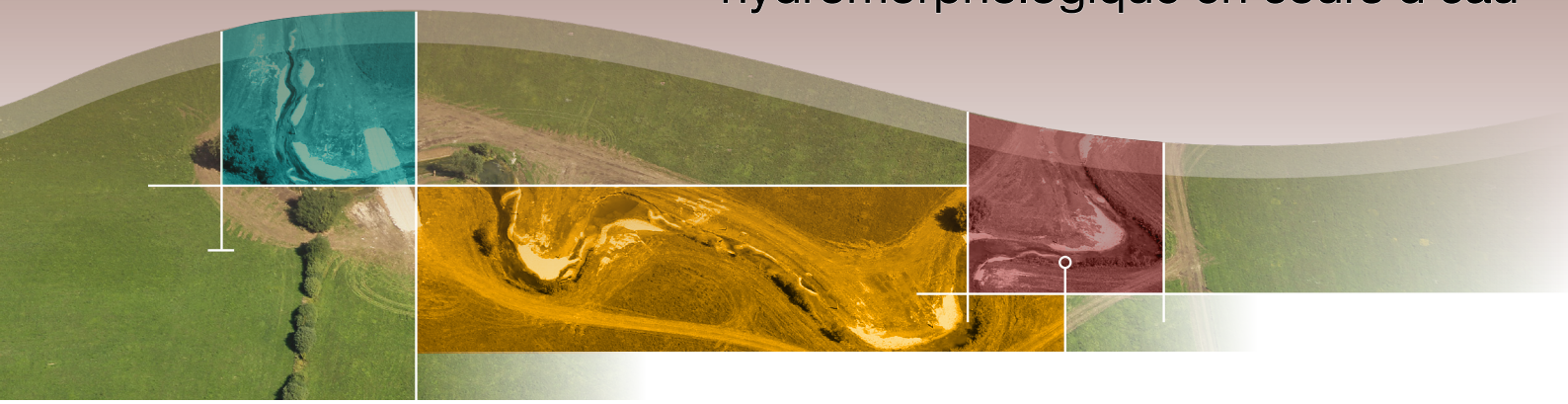
PARTIE C

Fiches suivis

Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau



Fiche 01 Hydromorphologie (échelle station) 91
Fiche 02 Faune piscicole 97
Fiche 03 Macro-invertébrés benthiques 101
Fiche 04 Autres compartiments biologiques 103
Fiche 05 Température 105
Fiche 06 Physico-chimie 113
Fiche 07 Photos 121
Fiche 08 Profil en long et faciès d'écoulements 133
Fiche 09 Hydrologie 141
Fiche 10 Connexions avec la nappe 167
Fiche 11 Fiche reconnaissance terrain 173
Fiche 12 Exemple de fiche pour un site de restauration 175

01 Hydromorphologie (échelle station)

Protocole à mettre en œuvre

- Carhyce : protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied [19].

Fichiers de saisie et bancarisation

Saisir les données sur la fiche spécifique Carhyce proposée dans le guide technique y afférent [19], puis bancariser les données dans l'application Carhyce-Web (voir aussi *Déclaration, bancarisation, consultation des données du suivi scientifique minimal*).

Éléments d'interprétation

Présentation de l'interface IED

http://www.lgp.cnrs.fr/carhyce/

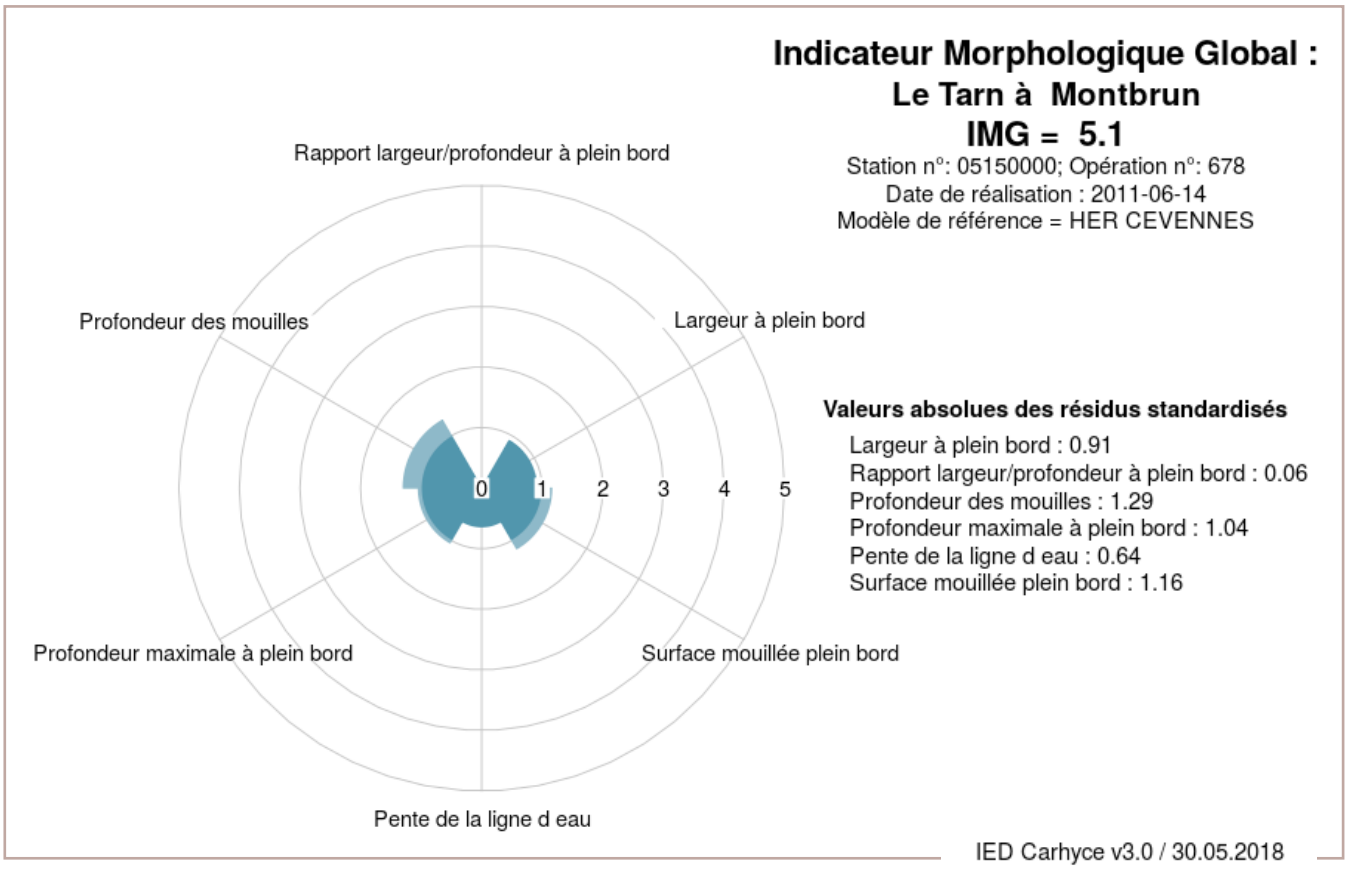
Le diagnostic hydromorphologique, à l'échelle stationnelle, peut s'appuyer sur l'interface web d'exploitation des données (« IED Carhyce »)[30], mise en place par le CNRS, qui permet un accès simplifié aux données et résultats (travaux de Tamisier *et al.*, 2017)[30]. Cette interface exploite les données issues des relevés Carhyce.

Pour chaque station caractérisée via le protocole de terrain Carhyce, l'IED se propose de fournir un cadre diagnostic local et régional appuyant la gestion, le suivi et l'évaluation du cours d'eau. Pour cela, l'interface met à disposition, pour chaque station, plusieurs dizaines de caractéristiques hydromorphologiques calculées, dont certaines sont confrontées à différents modèles d'évaluation de l'hydromorphologie.

Sont ainsi accessibles sur l'IED :

1) les données collectées permettant de rendre compte de la topographie de la station et de calculer divers paramètres, indices ou indicateurs hydromorphologiques, notamment : largeurs ou profondeurs moyennes/maximales à pleins bords, rapport largeur/profondeur en lien avec la surface du bassin versant, indices granulométriques, indices sur la ripisylve, indices représentatifs du type d'écoulement, de la rugosité ou encore calcul de pente topographique, etc ;
2) des données complémentaires, notamment géographiques, introduites pour permettre la prise en compte des caractéristiques descriptives du bassin versant (par exemple, sa surface) ou les spécificités éco-régionales (par exemple, les hydroécorégions représentatives de secteurs homogènes en matière de climat, de géologie et de relief) ;
3) une série de modèles de références régionaux, au sens du fonctionnement hydromorphologique, construits à partir d'un jeu de stations présentant peu voire pas de pressions en lien avec les activités humaines ;
4) la situation de la station testée et caractérisée avec le protocole par rapport aux références régionales, aux modèles et aux données présentées ci-dessus, paramètre par paramètre ou de manière globale grâce notamment à un indice global de morphologie (IMG) ; l'ensemble étant présenté sous forme de diagrammes, de courbes cumulées, etc.

[30] *Interface développée en collaboration entre les laboratoires de géographie physique (LGP) et « dynamiques sociales et recomposition des espaces » (LADYSS) du CNRS, « géomatique et foncier » (GEF) du CNAM-ESGT, et l'Agence française pour la biodiversité (AFB). Cette interface est à ce jour une version-prototype.*



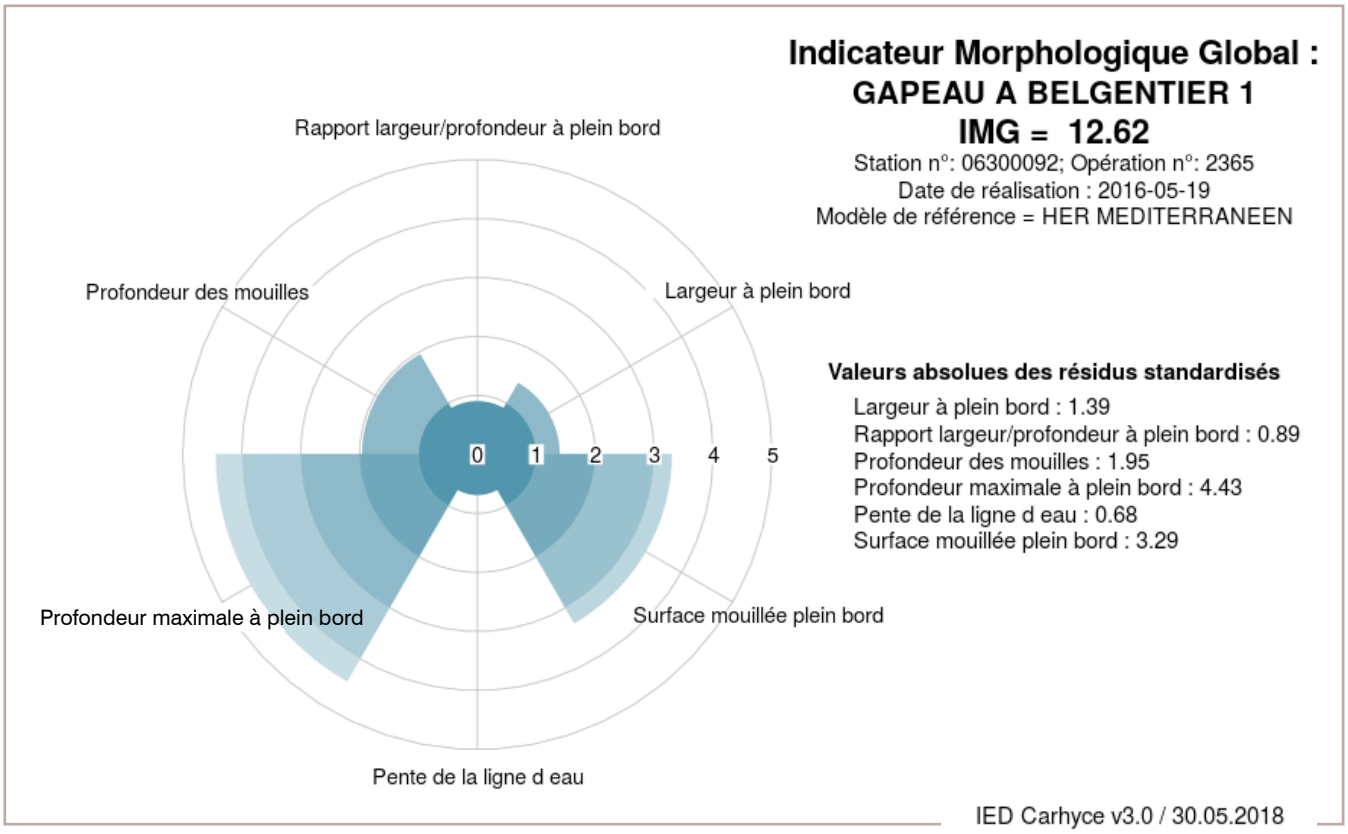


Figure 45 - *Représentations graphiques de l'Indicateur morphologique global (IMG) de deux opérations : le Tarn à Montbrun (2011) et le Gapeau à Belgentier (2016)[30]. Plus la projection sur les axes est réduite et centrée sur 0 (zéro), plus l'indicateur est faible pour les 6 paramètres qui le composent ; alors la situation supposée de la station est proche des tendances naturelles (sans ou avec peu de pressions liées aux activités humaines) régionales.*

Remarque

D'une manière générale, la restauration hydromorphologique vise à minimiser l'écart observé entre une situation dégradée et une situation naturelle telle qu'elle aurait dû être en l'absence de pression anthropique, en termes de morphologie (ici appréhendée par les modèles de référence). L'interprétation s'appuiera donc ici sur l'analyse de l'évolution des écarts aux références régionales pour les différentes caractéristiques hydromorphologiques. Comme tout indicateur, ces éléments doivent être considérés avec attention et ne doivent pas aboutir à une uniformisation des cours d'eau ou à la normalisation de la forme de leur lit. Ils ne doivent donc pas être utilisés comme des abaques sur lequel s'appuyer systématiquement pour dessiner les lits des rivières à restaurer ; ceux-ci seraient alors « calibrés » selon un modèle unique quand la diversité des contextes impliquerait une diversité des formes. Ils peuvent au mieux donner une image des gammes de dimensionnement de cours d'eau en situation naturelle et dans des contextes donnés présents au niveau régional utile, par exemple, si aucune station étalon n'a pu être définie en référence pour la restauration. L'opérateur restera donc vigilant et gardera un sens critique dans l'analyse des résultats ainsi que dans les propositions qu'il formulera.

Exemple d'interprétation

Des exemples de résultats et d'application de ces indicateurs sont présentés dans Tamisier *et al.* (2017)[30]. Repris de ce document, l'exemple du suivi du reméandrage de la Veyre dans le Puy de Dôme est présenté ici.

Contexte

Diagnostic pré-travaux

- Rectification du tracé dans les années 70-80 (1100m)

Objectifs de la restauration

- Restaurer un fonctionnement hydromorphologique naturel
- Améliorer la qualité de l'eau
- Créer des connexions latérales (zones humides)
- Recréer des zones d'expansion de crues

Les travaux de restauration (sept. 2010 – avr. 2011)

- Reprise des anciens méandres (500 mètres de linéaire recréé)
- Recharges sédimentaires ponctuelles
- Plantation de ripisylve

Pour le suivi de cette restauration qui a eu lieu entre septembre 2010 et avril 2011, quatre relevés d'observations Carhyce sont à disposition : l'un réalisé en 2010, avant le début des travaux ; les trois autres mis en œuvre suite aux travaux en 2011, 2012 et 2013.

Sur la Figure 46, les photographies avant-après montrent les changements apportés par la restauration qui transforme un lit étroit et rectiligne en un cours sinueux et élargi. L'indicateur morphologique global de Carhyce de l'opération réalisée en pré-travaux (IMG = 15,36) confirme qu'avant cette restauration, le lit de la Veyre ne correspond pas aux références régionales. On observe effectivement alors un lit bien moins large qu'attendu pour cette taille de bassin et cette région (HER *Massif central sud*).

En 2011, peu de temps après les travaux, si l'IMG demeure élevé (13,34) et le lit plus large qu'attendu, les travaux ont tout de même permis de faire tendre la géométrie du lit vers les standards régionaux. Il est alors intéressant de remarquer qu'une fois les travaux terminés, la rivière continue à évoluer et à ajuster son lit. Les relevés indiquent en effet que le lit s'élargit progressivement d'une largeur à pleins bords de 2,6 m juste après travaux à plus de 3 m deux ans après.

Figure 46 - *Suivi de l'évolution du lit de la Veyre à partir de photographies et des indicateurs morphologiques globaux (IMG) de Carhyce. Les photos sont issues de la fiche sur la Veyre dans le classeur des retours d'expériences sur l'hydromorphologie de l'AFB [29].*

La taille des matériaux qui composent le lit a également évolué (Figure 47). Suite aux recharges sédimentaires ponctuelles effectuées lors de l'opération de restauration, le radier sur lequel la granulométrie a été relevée a vu le diamètre médian de ses particules augmenter de 6 à 12 mm.

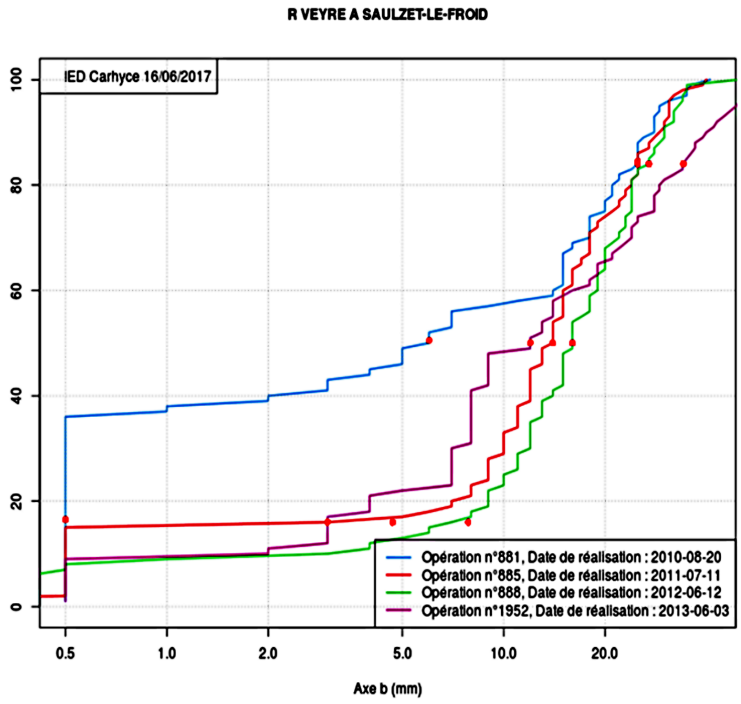
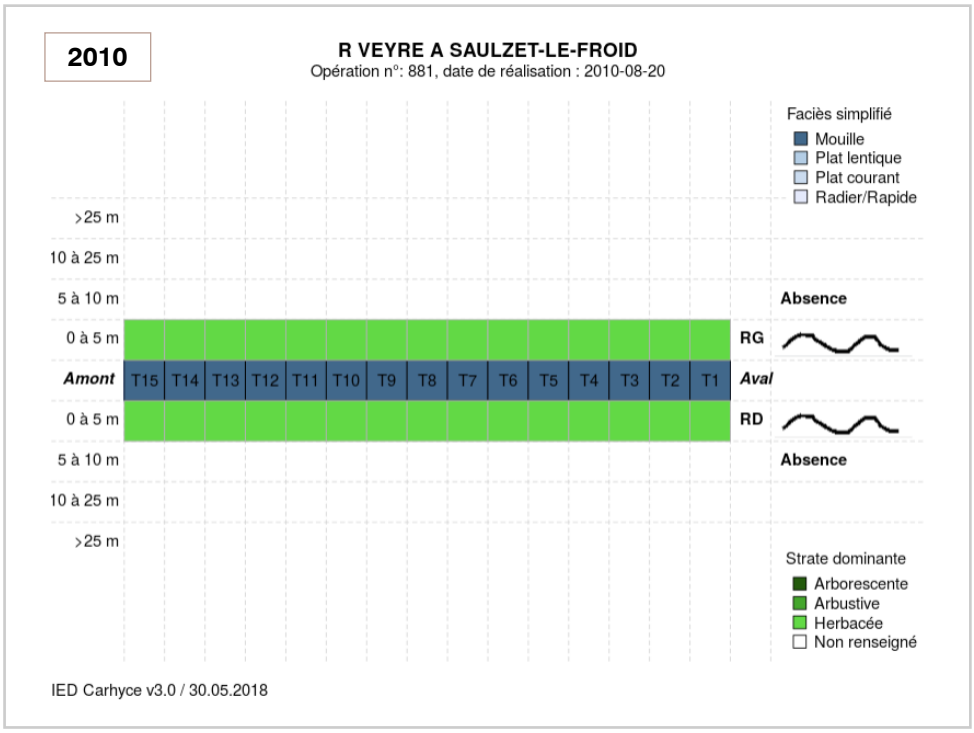
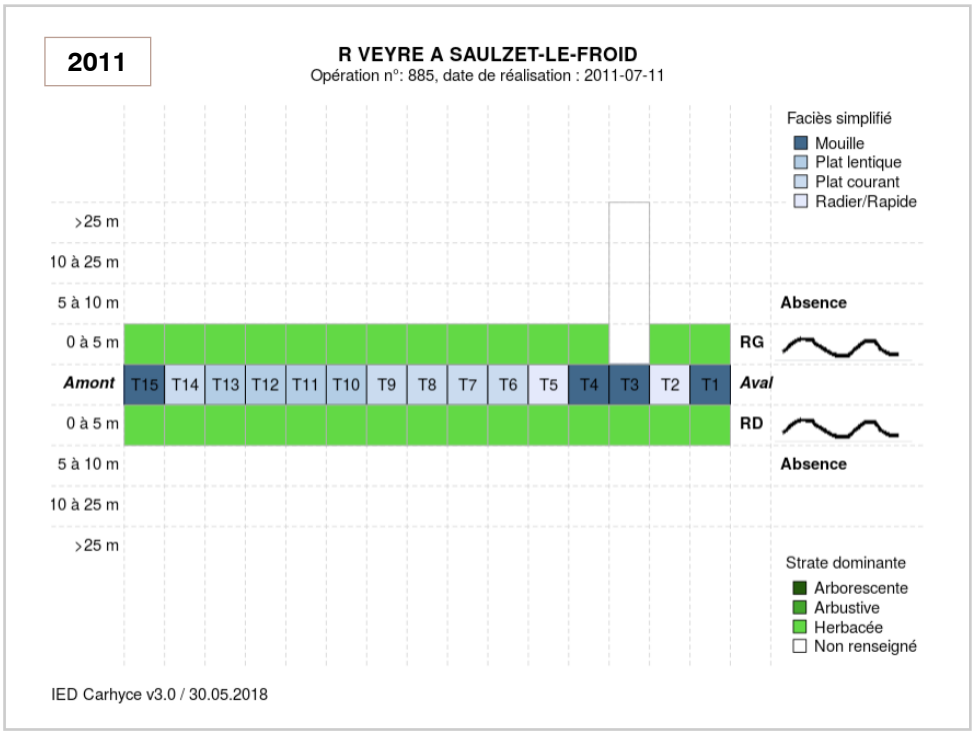


Figure 47 - *Évolution de la taille du substrat de la Veyre avant et après restauration. Les points rouges correspondent aux valeurs de D16, D50 (diamètre médian) et D84 - valeurs de références granulométriques - qui expriment respectivement la part (16 %, 50 %, 84 %) de l'échantillon dont la taille (en mm) est inférieure à la valeur en abscisses.*

Enfin, si l'effet du reboisement de la ripisylve ne commence à être réellement visible qu'à partir de 2013, dès 2011 les faciès d'écoulement se sont, eux, fortement diversifiés (Figure 48 ci-dessous et page suivante) pour offrir une diversité d'habitats plus favorable aux communautés biologiques. Ainsi, avant travaux, le chenal ne correspondait qu'à une longue mouille avec très peu de variations de profondeur quand, en 2013, il se voit alterner des radiers et des mouilles (jusqu'à un mètre de profondeur) sur toute la longueur de la station.





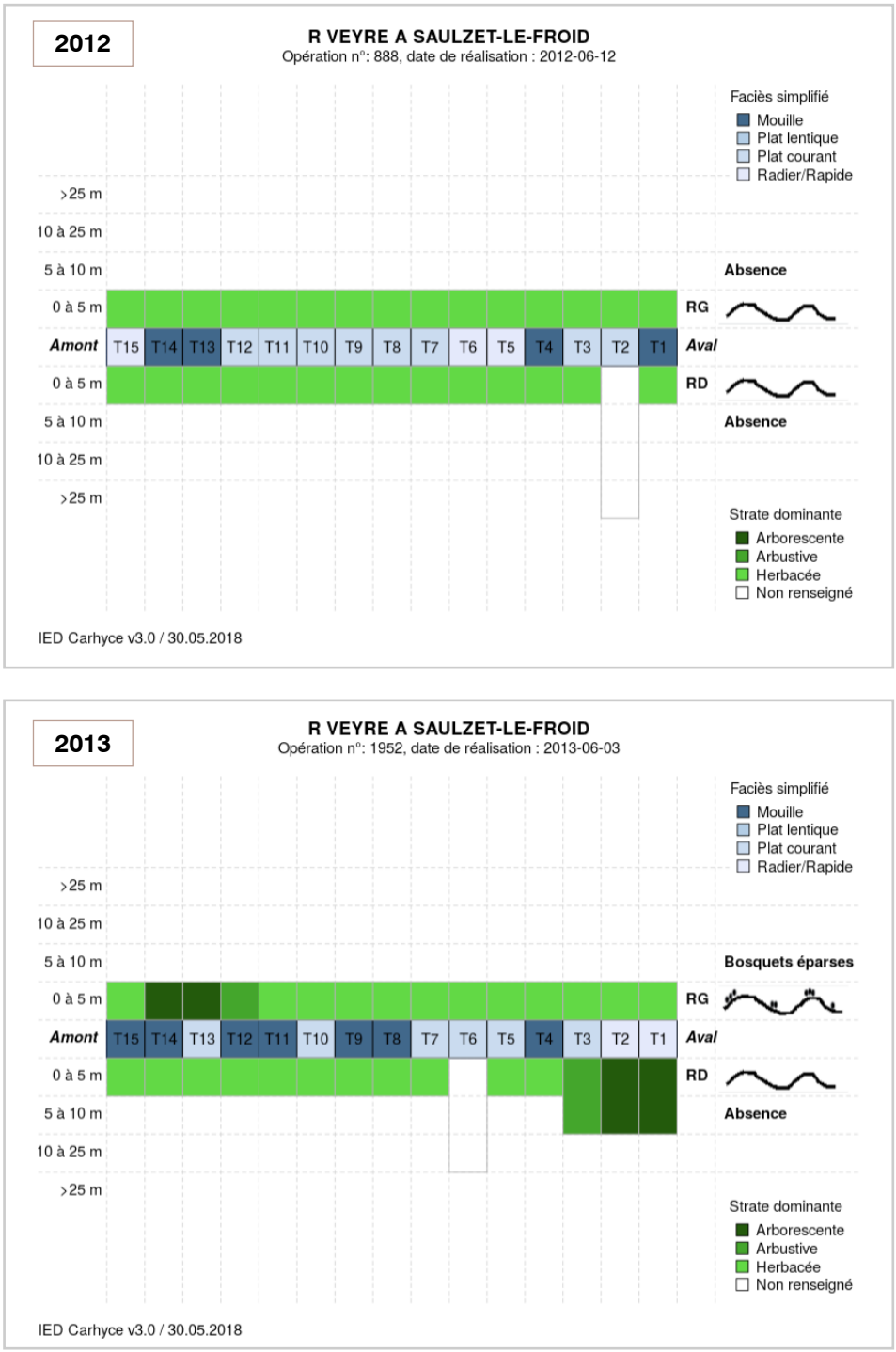


Figure 48 - *Représentation schématique de l'évolution de la ripisylve et des faciès d'écoulement de la Veyre avant et après restauration.*

Bibliographie spécifique

19. Baudoin, Jean-Marc, *et al.*, 2017. *Carhyce. Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied*. Guides et protocoles. Agence française pour la biodiversité. 56 pages.

29. Onema, MEEDDM, et Agences de l'eau, 2010. *La restauration des cours d'eau - Recueil d'expériences sur l'hydromorphologie*.

30. Tamisier, Vincent, Frédéric Gob, Clélia Bilodeau, et Nathalie Thommeret, 2017. *Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français (Carhyce). Valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau.* Rapport scientifique CNRS (LGP-LADYSS)/Université de Paris Panthéon-Sorbonne/ESGT/ AFB.142 pages.

Protocole de pêche

Pêche complète

Le protocole à préférer dans tous les cas où sa mise en œuvre est possible est une pêche complète à **deux passages** (selon guide d'application [20]). Trois passages sont préconisés dans les cas suivants :

- nouvelles espèces/effectifs capturés supérieurs au second passage ;
- difficultés de prospection de la station (blocs, radiers larges et/ou rapides et/ou profonds) ;
- présence d'espèces à faible efficacité de capture en proportions non négligeables (par exemple espèces benthiques comme la loche franche ou petites espèces grégaires comme le vairon).

Dans le cas d'un troisième passage, il est nécessaire d'avoir le matériel de stabulation *ad hoc*. Dans le cas d'espèces d'intérêt particulier, notamment benthiques comme les loches ou le chabot, un suivi optionnel sur un secteur plus restreint (habitat préférentiel) peut être réalisé, de même qu'un suivi au-delà de l'échelle stationnelle, selon les objectifs.

Limites d'application du protocole

En limite d'application du protocole (largeur trop importante - la valeur seuil pour les réseaux de suivi est de 9 m - , profondeur > 1m, vitesse élevée), on privilégiera une pêche par point (type DCE grands milieux peu profonds, voir guide d'application [20]).

Dans tous les cas, on s'attachera à inscrire le suivi dans la durée, en s'assurant que les ressources disponibles seront suffisantes pour la méthode choisie et ce, sur toute la chronique.

Le protocole de pêche par point permet au besoin de réaliser des points complémentaires sur des habitats particuliers s'ils ne sont pas échantillonnés lors de la réalisation du sous-échantillon « représentatif » (75 à 100 premiers points répartis suivant un échantillonnage dit systématique [20]).

Cas particulier des effacements d'ouvrage

Dans la retenue/le remous de l'ouvrage, on préconise des pêches électriques par point de type grands milieux. Selon la profondeur du chenal, la pêche se fera sur l'intégralité de la largeur ou sur les bandes rivulaires. Facultativement, une pose de filets ou verveux peut être envisagée en cas de recherche d'espèces benthiques de la zone profonde (comme la lote ou l'anguille) ou faiblement capturables à l'électricité (comme le sandre).

Biométrie : pesée des individus capturés

Le poids des individus pêchés est une des composantes des analyses (estimation des biomasses). Pour les modalités d'obtention de ces poids, deux possibilités :

- si des abaques tailles/poids **locaux** et **robustes** existent, il est possible de les utiliser et de ne pas peser les individus (à éviter donc pour les espèces dites « rares » ou celles pour lesquelles les courbes ne sont pas fiables), sauf si des objectifs spécifiques l'exigent ;
- sinon, il est nécessaire de mesurer les poids des individus de chaque pêche, avec une possibilité de faire des lots pour les juvéniles.

Remarque

Concernant la biométrie par lots applicables aux pêches électriques, seuls les lots I et les lots S/L seront acceptés (Pas de lot G), et suivant les préconisations du guide, à savoir notamment :

- *des lots seront mis en place « pour les taxons dont les effectifs sont importants (généralement plusieurs centaines d'individus) et en particulier pour les petits individus » [20] ;*
- *pour les lots S/L, « une amplitude maximale de tailles de 20 à 30 mm environ pour les « petits » est souhaitable tandis qu'elle peut atteindre 50 mm pour les plus grands » [20].*

Suivi des migrateurs et espèces-cibles

Un suivi spécifique peut être mis en place pour le suivi d'une ou plusieurs espèces en particulier, le cas échéant, en complément des pêches complètes et/ou sur les stations de type *Échelle étendue*. Ces suivis complémentaires ont plusieurs objectifs :

- visualiser le front de migration et les déplacements des espèces ;
- quantifier la reproduction et visualiser les classes d'âges sur des zones propices au niveau du bassin versant ;
- mieux détecter les espèces peu capturées par la pêche électrique complète (anguilles, lamproies notamment).

Les suivis qui seront mis en place seront donc, selon les objectifs :

- pour les salmonidés, la **pêche sur radiers** (réalisation de « traits »), ainsi que le suivi de frayères (repérage visuel des « nids ») ;
- pour les **truites,** le protocole Vigitruite® développé par l'Inra ;
- pour les **saumons,** le protocole permettant de calculer l'indice d'abondance de juvéniles de saumons [31] ;
- pour les **anguilles,** le protocole permettant de calculer l'indice d'abondance anguilles [32];
- pour les **lamproies**, la méthodologie d'échantillonnage des ammocètes [33];
- pour les **aloses,** un comptage des « bulls » peut être mis en place. Des exemples de suivis sont décrits pages 121 et suivantes et 133 et suivantes du rapport LOGRAMI 2014 [34].

D'autres méthodes, comme les nouvelles méthodes d'ADN environnemental [35] ou les stations de comptage des migrateurs via le suivi vidéo de passes sur le bassin versant [36, 37], peuvent également être mises en place. Dans le cas de problématiques migrateurs concernant plusieurs espèces, des pêches complètes peuvent également être réalisées sur les stations *Échelle étendue*. La fréquence (tous les un ou deux ans) et la durée de ces suivis spécifiques seront à adapter en fonction des potentiels de colonisation et du retour effectif des espèces visées.

Fichiers de saisie

Les fichiers de saisie relatifs aux informations sur le point de prélèvement et aux données issues des pêches sont fournis sous la forme d'un fichier Excel en annexe du guide. Chaque opération de pêche devra être saisie via ce format, compatible Aspe (voir *Déclaration, bancarisation, consultation des données du suivi scientifique minimal*).

Éléments d'interprétation

La diagnose des peuplements de poissons se base notamment sur le calcul et l'analyse des abondances et biomasses des différentes espèces et/ou guildes écologiques, les analyses de structure en classes de taille/âge des principales espèces, les indices de diversité et de richesse des peuplements ainsi que les indicateurs DCE (IPR, IPR+ [20bis], [20ter]) et leurs métriques élémentaires.

Ces calculs et analyses sont réalisables dès lors que le protocole de pêche recommandé a été mis en place (pêche complète deux passages). Attention, si la pêche a été réalisée par point, les calculs de densité ne sont pas possibles.

Exemple 1 - Projet de reconstitution du matelas alluvial

Le suivi des espèces lithophiles apparaît comme l'une des métriques à suivre. Dans le cas de cours d'eau salmonicoles à faible richesse spécifique, le suivi de la dynamique de population de ces espèces peut fournir des informations pertinentes sur la qualité et la stabilité du substrat rapporté. La métrique « juvéniles de truite » de l'IPR+ apparaît également particulièrement pertinente.

Exemple 2 - Projet d'effacement d'ouvrage

Dans la retenue, le glissement de la population des taxons de milieux lentiques vers des taxons rhéophiles et l'arrivée d'espèces depuis l'aval sont classiquement recherchés.

Deux autres éléments peuvent être suivis plus spécifiquement, mais nécessitent d'avoir auparavant complété la phase terrain en conséquence :

- le suivi du coefficient de condition de Fulton (nécessitant d'avoir pris précisément les poids associés aux longueurs de chaque individu) ; ce coefficient permet de connaître la condition physiologique des poissons en étudiant les relations taille-poids par rapport aux données de référence par espèce.
- le suivi de l'état sanitaire des individus (nécessitant d'avoir mis en place un protocole adapté sur le terrain, par exemple en suivant la méthodologie des « codes pathologie » développée par l'Association santé poissons sauvages [38], basée notamment sur les travaux de Karr *et al.* [39]). Ce suivi permet, d'après le pourcentage d'individus présentant des pathologies, de savoir si le peuplement de poissons présente un état sanitaire préoccupant. Il permet également d'en déduire un indicateur de la qualité du milieu.

Bibliographie spécifique

20. Belliard, Jérôme, Jean-Maxence Ditche, Nicolas Roset, et Samuel Dembski, 2012. *Guide pratique de mise en oeuvre des opérations de pêche à l'électricité dans le cadre des réseaux de suivi des peuplements de poissons*.

20bis. AFNOR, 2011. *NF T90-344 - Qualité de l'eau - Détermination de l'indice poissons rivière (IPR)*.

20ter. Pont, Didier, Olivier Delaigue, Jérôme Belliard, Anahita Marzin, et Maxime Logez, 2013. *Programme IPR+. Révision de l'indice poisson rivière pour l'application de la DCE*. Partenariat Irstea - Onema.

31. Bretagne Grands Migrateurs, 2013. *Description du protocole de pêche selon la méthode des indices d'abondance de juvéniles de saumon.* 8 pages.

32. Bretagne Grands Migrateurs, 2009. *Méthode de pêche électrique par échantillonnage par point au Martin Pêcheur « indice d'abondance anguille »*.

33. Bretagne Grands Migrateurs, 2012. *Méthodologie d'échantillonnage des ammocètes*.

34. Bach, Jean-Michel, *et al*., 2015. *Recueil de données biologiques 2014 sur les poissons migrateurs du bassin Loire, rapport d'activité*. Association LOGRAMI - Loire Grands Migrateurs.291 pages.

35. Civade, Raphaël*, et al.*, 2016. *Spatial Representativeness of Environmental DNA*

Metabarcoding Signal for Fish Biodiversity Assessment in a Natural Freshwater System. PLOS ONE, 11(6): p. e0157366.

36. Abdallah, Y., D. Rivoallan, et I. Lebel, 2016. *Suivi vidéo des passages de poissons migrateurs dans la passe à poissons de Bladier-Ricard sur le fleuve Hérault. Campagne 2016.* Association MRM, FDPPMA Hérault.32 pages + annexes.

37. FDPPMA 62, 2017. *Dispositif de comptage des Grands Salmonidés Migrateurs, Riverwatcher d'Auchy-lès-Hesdin, résultats 2017*. Fédération du Pas-de-Calais pour la pêche et la protection du milieu aquatique.26 pages.

38. Élie, Pierre et Patrick Girard, 2014. *L'Etat de santé des poissons sauvages : les Codes pathologie, un outil d'évaluation*. Association Santé Poissons sauvages.

39. Karr, James R, Kurt D Fausch, Paul L Angermeier, Philip R Yant, et Isaac J Schlosser, 1986. *Assessing biological integrity in running waters. A method and its rationale.* Illinois Natural History Survey, (Special Publication 5).

Macro-invertébrés benthiques

Protocole de suivi

- Se référer à la norme *NF T90-333* [21] et au guide d'application *FD T90-733* [22] pour le terrain ; à la norme expérimentale *XP T90-388* [40] et au guide d'application *GA T90-788* [41] pour le laboratoire, avec un tri **sans regroupement par phase** (déterminer séparément les 12 prélèvements unitaires).

Fichiers de saisie

https://professionnels.afbiodiversite.fr/node/310

Les opérations réalisées devront être saisies sur les fiches de comptes rendus standardisées pour le suivi des macro-invertébrés en cours d'eau (fichiers Excel disponibles au lien ci-contre), pour la partie terrain et la partie détermination au laboratoire (onglets fiche terrain et onglet saisie respectivement).

Éléments d'interprétation

La diagnose des peuplements d'invertébrés sera suivie en premier lieu par le calcul des indices IBG-DCE et I2M2 [41bis] puis complétée par les métriques élémentaires de l'I2M2 (diversité de Shannon, fréquence relative des espèces ovovivipares, fréquence relative des espèces polyvoltines, ASPT [*Average Score Per Taxon*] et richesse taxonomique).

On pourra ensuite suivre l'évolution de la richesse et de l'abondance des différents ordres (notamment Éphémères, Trichoptères, Plécoptères), ainsi que l'évolution des traits biologiques des peuplements (proportion des rhéophiles, des lithophiles, évolution du régime alimentaire…).

Par ailleurs, l'opérateur pourra également utiliser les résultats fournis par les modèles « risque d'altération hydrologique » et « risque de colmatage » de l'outil de diagnostic associé à l'I2M2 [42][31]. L'examen de la réponse des métriques élémentaires de l'I2M2 au cours du suivi de la restauration peut également être proposé (voir, à titre d'exemple, les métriques bio/écologiques proposées dans l'exemple 1 ci-dessous).

Exemple 1 - Projet de reconstitution du matelas alluvial
Diverses métriques de l'outil de diagnostic pouvant contribuer à identifier un risque de colmatage seront étudiées (par exemple, les fréquences relatives du « stade adulte aquatique », d'un « mode de dissémination aquatique, passif », d'organismes préférant l'étage du « métapotamon » ou les « cours d'eau de plaine »).

Exemple 2 - Projet de reméandrage
Les métriques/traits relatifs à l'augmentation de l'hétérogénéité de l'habitat seront particulièrement étudiés (augmentation de la diversité, apparition de taxons exigeants sur la qualité de l'habitat, etc.)

[31] *Outil de « diagnostic » associé à l'I2M2 : fondé sur une combinaison de métriques bio/écologiques, cet outil évalue un risque d'altération de la communauté d'invertébrés par différentes pressions anthropiques (chimiques et hydromorphologiques). Même si les modèles sous-jacents n'ont pas été spécifiquement conçus pour répondre aux types de restauration hydromorphologique ciblés dans le cadre du SSM, on peut attendre de leur part une réponse mesurable, par modification des fréquences relatives de sélection de certaines caractéristiques biologiques des communautés, dans le secteur restauré et éventuellement à l'aval de celui-ci.*

Protocoles de suivi

- Diatomées - Se référer à la norme *NF T90-354 [23]*.
- Macrophytes - Se référer à la norme *NF T90-395 [24]*.
- Oligochètes - Se référer à la norme *NF T90-393 [25]*.

Fichiers de saisie

Les opérations réalisées devront être saisies sur les fiches de comptes rendus standardisées :

- pour le suivi des diatomées, fichiers à télécharger (voir lien ci-contre) ; fichier Excel « échange soutien bio » pour le terrain, fichier texte « échange liste », compatible Omnidia pour la détermination au laboratoire ;
- pour le suivi des macrophytes, fichiers à télécharger (voir lien ci-contre) ; soit via les fichiers « échange soutien bio » pour le terrain et « échange listes » pour la liste floristique, soit via l'application Alisma ;
- pour les oligochètes, fichier exemple de compte rendu disponible en annexe (dans le cadre du marché Agence de l'eau Rhin-Meuse).

https://professionnels.afbiodiversite.fr/node/310

https://hydrobio-dce.irstea.fr/telecharger/macrophytes-rivieres-2/

Éléments d'interprétation

La diagnose des communautés floristiques et faunistiques se fera en premier lieu par le calcul des indicateurs d'évaluation (IBD, IBMR, IOBS).

On pourra dans un second temps suivre l'évolution des communautés (richesse et diversité des assemblages, dominances, sténoécie et sensibilité spécifique des taxons…).

Plus spécifiquement pour les diatomées, un modèle « risque de colmatage » a été élaboré dans l'outil de diagnostic des cours d'eau peu profonds, basé sur le compartiment diatomées benthiques, comme pour le compartiment invertébrés benthiques [43][32]. Les résultats de ce modèle et son évolution pourront être étudiés.

Remarque

Des indicateurs précoces de la résilience des milieux, non détaillés ici, peuvent également s'avérer pertinents à pas de temps plus court (une année avant travaux, et une à deux années consécutives après travaux). Il s'agit des indicateurs de fonctionnement de type « sac à litière », « bandelettes de coton » [44].

[32] *Modèle « risque de colmatage » de l'outil de diagnostic basé sur les diatomées : fondé sur une combinaison de métriques taxonomiques et bio/écologiques spécifiques, ce modèle pourra être utilisé par l'opérateur. Même s'il n'a pas été spécifiquement conçu pour répondre aux types de restauration hydromorphologique ciblés dans le cadre du SSM, on peut attendre de sa part une réponse mesurable, par modification des proportions de certains taxons et des fréquences relatives d'utilisation de certaines caractéristiques biologiques des communautés, dans le secteur restauré et éventuellement à l'aval de celui-ci.*

05 Température

Objectifs

- Suivre l'évolution de la température par station, sur les stations du suivi, sur la chronique du suivi et pouvoir comparer les chroniques de température entre elles et avant/après restauration.
- Bancariser les chroniques obtenues afin d'assurer leur pérennité et d'en faciliter l'analyse.

Matériel de mesure

Différents dispositifs de mesure de la température de l'eau sont disponibles, depuis l'enregistreur autonome jusqu'à la station de mesure avec télétransmission.

Quel que soit le dispositif retenu, le capteur doit pouvoir rester immergé à demeure pour permettre un suivi en continu selon un **pas de temps de mesure au moins horaire**.

Remarque

Sauf si le logiciel prend explicitement en charge les conversions d'horaires, l'horloge interne des capteurs doit être réglée selon le Temps universel coordonné (UTC) et non pas selon l'heure locale, ce qui peut créer des problèmes lors des passages heure d'été/heure d'hiver.

La **précision du capteur doit être si possible de ±0,2°C** entre 0° et +50°C, et *a minima* de ±0,5°C.

Remarque

Les capteurs, quel que soit leur type, sont soumis au phénomène de dérive instrumentale. Au cours de leur utilisation, la valeur de température mesurée par la sonde dans le milieu a tendance à s'éloigner de plus en plus de la valeur exacte de température du milieu. La fiabilité de la mesure étant essentielle pour la mise en place d'un suivi thermique, il convient de contrôler à chaque visite de terrain la dérive instrumentale afin de remplacer l'appareil de mesure ou d'apporter un facteur correctif avant l'exploitation des données. Pour cela, on procèdera, si possible, comme préconisé page 108 du guide rédigé par Rebière et al. *(2018)[45], en réalisant des contrôles avec un enregistreur neuf lors des visites de terrain. En cas d'impossibilité, réaliser des mesures de température (sonde multiparamètres* in situ *par exemple) à chaque visite de terrain et les comparer aux données déchargées.*

Mise en œuvre du suivi

Remarque

À la différence des autres paramètres, le suivi de la température se fera en continu tout au long de la chronique, dès la pose des sondes qui se fera autant que possible 12 mois avant le début des travaux. Sur la station Restaurée*, la sonde sera retirée juste avant la mise en œuvre des travaux puis replacée dès que possible à la fin de la phase chantier.*

À l'échelle d'un point de prélèvement, la température du cours d'eau peut varier de plusieurs degrés selon les conditions environnementales (ombrage, profondeur, débit, etc.). Avant d'installer le capteur, il convient d'effectuer une série de mesures de température et conductivité afin d'avoir une idée de l'hétérogénéité des flux et de déterminer l'emplacement d'installation en cohérence avec l'objectif poursuivi.

Dans le cadre du SSM, dans un but de comparaison avant/après travaux mais aussi inter-stations, les points les plus importants sont d'une part la reproductibilité d'une année sur l'autre et d'autre part la similarité des conditions entre les stations.

On cherchera donc à :

- placer le capteur dans une zone qui puisse être conservée sur toute la chronique, qui restera accessible dans le futur et sur laquelle aucune modification est envisagée, sauf bien sûr sur la station ***Restaurée***. Pour celle-ci, on cherchera après travaux à retrouver les conditions les plus proches possibles pour la nouvelle localisation, en termes d'ombrage, de profondeur, de vitesse de courant (si c'est possible) ;
- placer le capteur dans les mêmes conditions sur toutes les stations : ombrage, profondeur, vitesse de courant, autant que possible.

En cas d'impossibilité de suivre ces recommandations, les écarts seront tracés, notamment sur les fiches terrain. Ceux-ci constituent en effet un facteur explicatif dont la connaissance est essentielle.

Lors de l'installation du capteur, il est recommandé de respecter un minimum de conditions (citées selon l'ordre d'importance) :

- placer le capteur dans une **zone immergée en permanence**. Surveiller les variations de niveau d'eau pour éviter que le capteur se retrouve hors de l'eau ou juste sous la surface en période d'étiage ;
- placer le capteur dans une **veine d'eau courante ;**
- placer le capteur **sur le fond** (si nécessaire le lester pour qu'il reste proche du fond) sans le fixer - l'eau doit passer tout autour du capteur ;
- si possible, immerger le capteur **au moins à 0,5 m sous la surface en petit cours d'eau, 1 m lorsque c'est possible** afin d'éviter l'influence des rayonnements solaires ;
- choisir un emplacement **ombragé** (excepté si la profondeur d'installation ≥ 1m) et **orienté à l'est** (le soleil couchant échauffe les berges qui restituent au cours d'eau pendant la nuit, faussant ainsi les données) ;
- éviter l'installation du capteur dans la zone d'influence située en aval d'un rejet/affluent sauf en cas d'étude d'impact de ce rejet/affluent ;
- éviter les zones colonisées par la végétation aquatique durant l'année ;
- choisir un emplacement peu fréquenté et facilement accessible. S'il est impossible de placer le capteur en zone peu fréquentée, programmer les installations et relèves en-dehors des périodes de fréquentation ;
- en présence de sous-berges, privilégier l'installation du capteur à proximité de celles-ci (elles procurent ombrage, stabilité et moindre visibilité pour les passants).

Remarque

Sur un cours d'eau peu profond sur lequel on suspecte un risque d'assec, on privilégiera l'installation d'un capteur à deux paramètres : température et conductivité, température et pression, ou température et taux d'oxygène. En cas de forte variation du second paramètre, un assec sera suspecté. Ceci permettra ainsi de valider la donnée thermique obtenue. Attention cependant aux risques de dérive de ces sondes.

Remarque

Attention, si le capteur repose sur le fond d'un cours d'eau envasé, l'envasement fausse les mesures de température. Sous seulement quelques centimètres de vase, les variations journalières de température sont significativement atténuées. Même si la mesure de température moyenne (mensuelle, annuelle) demeure valide, le temps de réponse est décalé par rapport à la réalité du milieu. Il est donc important de vérifier le niveau d'envasement du capteur.

Remarque

Bien que d'après certains tests il n'y ait aucune influence à court terme du champ électrique sur le capteur de température, il est conseillé lors d'éventuelles pêches à l'électricité de ne pas approcher les électrodes à proximité immédiate du capteur.

L'expérience montre que les crues peuvent emporter le matériel de mesure et les données associées lorsqu'elles y sont stockées. Afin de **privilégier la récupération des données**, il faut donc bien veiller à assurer la fixation du dispositif de mesure et, si possible, installer le capteur à l'abri des crues. Aussi, on conseille de le fixer à un substrat racinaire de ligneux vivant, à l'aide de câbles inox ou de chaînes. Les zones d'abris hydrauliques naturels seront privilégiées.

Pour faciliter la récupération du matériel, il est essentiel, outre son géoréférencement, de décrire l'emplacement exact du site d'installation : prendre plusieurs repères pour localiser le capteur et le point de fixation (photos sur différents plans, bombe de peinture - seulement en zone peu fréquentée -, etc.) car les éléments naturels servant de repère peuvent varier fortement d'une saison à l'autre ou en cas d'événement hydrologique significatif.

Afin de prendre toutes les informations essentielles, tant lors de la pose des sondes que lors de la relève, les fiches terrain spécifiques au suivi thermie seront remplies à chaque campagne (en annexe de cette fiche).

Dans le cas d'enregistreurs autonomes sans télétransmission des données, afin de minimiser la perte de données en raison de disparition ou de défaillances des enregistreurs, il est recommandé de procéder à la récupération des données le plus régulièrement possible (sous réserve de conditions hydrologiques favorables). *A minima*, une **récupération des données 2 fois par an** est conseillée : de manière indicative, il est possible de cibler la fin du printemps-début d'été (mai-juin) et la fin d'été-début d'automne (septembre-octobre). Afin que la récupération ait lieu hors période de crues (et si possible *avant* les périodes de crues), ce calendrier pourra être modifié en fonction du régime hydrologique local.

Remarque

La récupération des données sera aussi l'occasion de vérifier l'état de la batterie des enregistreurs. Notamment, en cas d'exposition prolongée en eau froide, la durée de vie de la batterie est souvent moindre que celle annoncée.
Dans tous les cas, au moins un changement de batterie par sonde sera à prévoir sur la chronique du suivi.

Remarque

Afin de faciliter la récupération en cas de perte, et de rassurer les riverains qui trouveraient une sonde, une plaquette informative pourra être fixée à la sonde, indiquant l'organisme d'origine et un contact.

Bancarisation

http://www.sandre.eaufrance.fr/notice-doc/processus-dacquisition-des-donn%C3%A9es-de-temp%C3%A9rature-en-continu

et http://www.sandre.eaufrance.fr/urn.php?urn=urn:sandre:scenario-d-echanges:quesucont:FRA:::ressource:1:::pdf

Comme précisé dans la partie précédente, les fiches terrain spécifiques au suivi thermie (en annexe de cette fiche) seront remplies systématiquement à chaque campagne de pose ou de relève, ainsi qu'aux visites pour la récupération des données. Ceci permettra la bancarisation dans de bonnes conditions.

En vue de garantir l'interopérabilité avec les bases de données existantes ou à venir, les données recueillies devront être conformes au dictionnaire Sandre[33] « Processus d'acquisition des données de température en continu » dans sa version validée la plus à jour (actuellement version 1.0 du 21/01/2013, voir ci-contre).

[33] *« Le Sandre a pour mission, d'établir et de mettre à disposition le référentiel des données sur l'eau du SIE (système d'information sur l'eau). Ce référentiel, composé de spécifications techniques et de listes de codes libres d'utilisation, décrit les modalités d'échange des données sur l'eau à l'échelle de la France. D'un point de vue informatique, le Sandre garantit l'interopérabilité des systèmes d'information relatifs à l'eau. » (définition Sandre.eaufrance.fr)*

A minima, les informations suivantes doivent accompagner chaque série de mesures :

- le code Sandre de l'intervenant ;
- le code Sandre de la station de mesure (voir *Déclaration, bancarisation, consultation des données du suivi scientifique minimal*) à laquelle est rattaché le point de prélèvement correspondant au suivi thermique (point de prélèvement de support « eau ») ;
- les coordonnées géographiques (Lambert 93) du positionnement précis du capteur ;
- l'identifiant et les caractéristiques (modèle, précision) du capteur ;
- les dates et heures de début (immersion) et de fin (récupération des données, remplacement, retrait) de la série de mesures ;
- la profondeur (m) à laquelle le capteur est installé et le niveau d'eau au jour de l'installation.

A l'heure actuelle, les données de température seront stockées dans l'espace de stockage du SSM, au format indiqué dans la partie *Déclaration, bancarisation, consultation des données du suivi scientifique minimal*.

Pour la mise en forme des données de température et leur interprétation, se référer à la *Fiche 9* [*Hydrologie*] et notamment l'annexe 3 : *Manuel d'utilisation du fichier de contextualisation hydrologique des suivis de restauration hydromorphologique*.

Caractéristiques annuelles de la station de pose de l'enregistreur

Type de restauration				Restaurée			Témoin altéré			Témoin non altéré		
Intensité des étiages*	Visible			Faible			Non visible			Assec		
Marnage (Différence crue/étiage)	< 1 m				1 à 2 m				> 2 m			
Période de crues	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Crues torrentielles	Oui						Non					
Accumulation de dépôts fins	Oui						Non					
Ombrage	Nul				Faible				Fort			

Schéma de localisation de la sonde et/ou photo

Nota :

** Cf. nomenclature Onde*

Fiche de pose suivi de la température

Nom station			
Code Station SANDRE			
Cours d'eau			
Commune/Département			
Lieu-dit, précision			
Nom du préleveur/structure			
N° identifiant enregistreur			
Coordonnée X (Lambert 93) en m			
Coordonnée Y (Lambert 93) en m			
Date et heure de pose			
Profondeur de pose			
Température de l'eau au droit de l'enregistreur (en °C)			
Niveau d'eau	Basses eaux	Moyennes eaux	Hautes eaux
Localisation de la sonde	☐ Chenal ☐ Rive gauche	☐ Rive droite ☐ Sous-berge	
Description du lieu de pose et mode de fixation (chaîne, câble, sur racine de ligneux,...)			

Fiche de relève suivi de la température

Nom station			
Code Station SANDRE			
Cours d'eau			
Commune/Département			
Lieu-dit, précision			
Nom du préleveur/structure			
N° identifiant Enregistreur			
Coordonnée X (Lambert 93) en m			
Coordonnée Y (Lambert 93) en m			
Date et heure de relève			
Profondeur de relève			
Température de l'eau au droit de l'enregistreur (en °C)			
Niveau du cours d'eau	Basses eaux	Moyennes eaux	Hautes eaux
Enregistreur exondé	Oui	Non	
Enregistreur envasé ou enseveli	Oui	Non	
Enregistreur perdu	Oui	Non	
Autres remarques lors de la relève Si enregistreur déplacé, description du nouvel emplacement (refaire une fiche pose, si besoin)			

06 Physico-chimie

Objectifs

- Collecter des données physico-chimiques classiques et les paramètres complémentaires de manière harmonisée entre les sites de restauration hydromorphologique dans le cadre du SSM.
- Bancariser les résultats obtenus dans les bases de données publiques des agences de l'eau afin d'en conserver une trace sur le long terme.

Éventuellement, une agence de l'eau peut utiliser sa maîtrise d'ouvrage formalisée dans un marché pour produire ces données - et être d'autant plus engagée sur le long terme dans le suivi de ces opérations.

Les points clefs suivants sont des repères vers des protocoles standardisés mais ne constituent pas en eux-mêmes une méthode aboutie. Il conviendra de réfléchir à l'articulation entre les prélèvements physico-chimiques, hydrobiologiques et hydromorphologiques ne serait-ce que pour éviter toute interférence de date. L'application d'un protocole hydrobiologique ou hydromorphologique n'est pas susceptible de gêner les résultats physico-chimiques **après 48h**. À l'inverse également, l'application d'un protocole de prélèvement en rivière n'est pas susceptible de gêner les résultats biologiques **après 48h. En cas de prélèvement le même jour que d'autres opérations, veiller à prélever l'eau avant toute intervention dans le cours d'eau, en limite aval des points de prélèvements biologiques et/ou hydromorphologiques.**

Mise en œuvre du suivi

http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace_documentaire/documents_en_ligne/guides_milieux_aquatiques/Guide_prelevement.pdf

1. Fréquence des prélèvements : bimestrielle ou mensuelle, soit 6 ou 12 pour une année, même fréquence avant - pendant - après travaux et inter-sites, voir *Chronologie des suivis* et les fiches par type d'opération.
2. Protocole de prélèvement : Guide du prélèvement d'échantillons en rivière - Novembre 2006 par exemple, soumettre le protocole à l'agence de l'eau concernée qui connaît les standards applicables sur son district. Dans la mesure du possible, il est demandé que le préleveur et le laboratoire d'analyse soient couverts par l'agrément ministériel Lab'eau et donc accrédités au COFRAC (laboratoire COFRAC **et** rendant les analyses ci-dessous sous accréditation).
3. Phase d'initiation des mesures. Elle est dans l'idéal de 3 années de suivi avant-travaux. Mettre en place le suivi de la physico-chimie dès que possible s'il est trop tard pour mettre en place ce préliminaire, et *a minima* sur une année.
4. Liste des paramètres à suivre : voir ci-dessous. La physico-chimie *in situ* et les paramètres classiques sont à suivre dans tous les cas, les autres paramètres sont à suivre selon les cas.

PC (Physico-chimie) *in situ* (Tronc commun OBLIGATOIRE)

Tableau 5 - *Paramètres à suivre dans tous les cas (mesures* in situ*)*

Code Sandre	Libellé
1301	Température
1302	pH
1303	Conductivité (25°)
1311	O2 dissous
1312	taux de saturation en O2

PC Classique (Tronc commun OBLIGATOIRE)

Tableau 6 - *Paramètres à suivre dans tous les cas (analyses laboratoire)*

Code Sandre	Libellé
1295	Turbidité
1305	Matières en suspension
1335	Ammonium (eau filtrée)
1339	Nitrites (eau filtrée)
1340	Nitrates (eau filtrée)
1347	Titre alcalimétrique complet
1350	Phosphore (eau filtrée)
1433	Orthophosphates (PO4)
1841	Carbone organique dissous (eau filtrée)

Remarque

Les limites de quantification du phosphore et des nitrates doivent être performantes (Tableau 7). Norme : consulter l'Agence de l'eau, ou bien performance analytique de la Directive QA/QC (Directive_2009_90_CE_31_07_2009).

http://www.labeau.ecologie.gouv.fr/doc/Directive_2009_90_CE_31_07_2009.pdf

Tableau 7 - *Exemples de paramètres nécessitant des seuils de quantifications bas*

Code Sandre	Paramètres	Seuil agences	Unité	Fraction analytique
1339	Nitrites	0,01	mg/L	eau filtrée
1340	Nitrates	0,5	mg/L	eau filtrée
1433	Orthophosphates	0,015	mg/L	eau filtrée

Paramètres de l'eutrophisation

Si une eutrophisation est suspectée, ou si une évolution du niveau trophique du milieu est attendue, les paramètres de l'eutrophisation sont à suivre (Tableau 8). En première approche, le suivi de la silice, des phéopigments et de la chlorophylle a est préconisé (notamment en plans d'eau et retenues en amont de seuils). Par la suite, un suivi des variations des paramètres de l'oxygène, de la température et du pH sur un rythme nycthéméral peut être envisagé (annexe 1 de cette fiche).

La mesure de la biomasse, voire plus simplement les estimations des recouvrement de la végétation aquatique selon la grille jointe en annexe, seront essentiels pour ce domaine d'étude pour l'interprétation des données[34]. Un suivi photographique tout au long de la saison de végétation peut être réalisé d'avril à septembre, avec une fréquence bimensuelle à partir du démarrage de la végétation (voir également la *Fiche 7 [Photos]*).

[34] *Il est recommandé que les observateurs fassent des tests « en aveugle » afin de caler leurs estimations.*

Tableau 8 - *Paramètres à suivre en cas de suspicion d'eutrophisation*

Code Sandre	Libellé
1342	Silice dissoute (eau filtrée)
1436	Phéopigments (méthode Lorenzen)
1439	Chlorophylle a (méthode Lorenzen)
1311	O2 dissous (amplitude jour-nuit)
1312	taux de saturation en O2 (amplitude jour-nuit)
1301	Température (enregistrement)
1302	pH (amplitude jour-nuit)

Paramètres révélateurs d'une charge organique

En cas de suspicion d'évolution de la charge carbonée, comme par exemple en présence d'un assainissement non collectif défectueux à proximité (dans un rayon de 3 km), de modification de rejets industriels ou d'une collectivité, de connexion modifiée à une fosse ou à un bief ayant subi des décantations importantes de matières organiques : suivre en sus la Demande chimique en oxygène (DCO), la Demande biologique en oxygène à 5 jours (DBO5), l'ammonium (NH_4^+) et les chlorures, sur la base d'une prospection préalable.

Si possible, des mesures de conductivité seront réalisées plusieurs fois dans la journée (fin de nuit, matinée, fin de journée), pour aider à l'interprétation des résultats.

Paramètres bactériologiques

Aucun complément de paramètres bactériologiques ne semble en lien direct avec l'hydromorphologie.

Paramètres ions majeurs

En vue d'analyser finement la capacité biogène de certains sites et pour une première approche des relations nappes-rivières (voir aussi la *Fiche 10 [Connexions avec la nappe]*), s'il n'y a pas de station de mesures comparable au plan hydrogéochimique, suivre les ions majeurs peut s'avérer intéressant. Il n'est pas nécessaire de les suivre à une fréquence mensuelle ou tous les deux mois : deux fois par an basse-eaux/hautes-eaux suffit en général. Ces ions sont (code Sandre et nom du paramètre) : 1327 Hydrogénocarbonates, 1328 Carbonates, 1337 Chlorures, 1338 Sulfate, 1367 Potassium, 1372 Magnésium, 1374 Calcium, 1375 Sodium.

Bancarisation

Prévenir l'Agence pour y déclarer les points de prélèvement avec leurs attributs techniques (géoréférencement notamment) et pour obtenir leur codification puis leur rattachement aux stations (voir la partie *Déclaration, bancarisation, consultation des données du suivi scientifique minimal*). Il est rappelé de bien positionner les points de prélèvement pour la physico-chimie à l'aval des linéaires prospectés pour la biologie et, comme pour tous les autres supports, hors singularités hydrographiques (ouvrages, confluences, rejets).

Se rapprocher de l'Agence pour les formats de fichiers de saisie.

Les systèmes de récupération/téléchargement des données bancarisées sont indiqués dans le Tableau 9.

Tableau 9 - *Interfaces de consultation des données et lien vers le site correspondant, par Agence*

Agence	Interface de consultation des données	Lien web
Loire-Bretagne	OSUR	http://osur.eau-loire-bretagne.fr/exportosur/action/Geographie
Seine-Normandie	Qualit'eau	http://qualiteau.eau-seine-normandie.fr
Rhône-Méditerranée et Corse	SIERMC	http://sierm.eaurmc.fr/gestion/dce/geo-sdage
Adour-Garonne	SIEAG	http://adour-garonne.eaufrance.fr/etat-des-milieux-superficiels/qualite-des-cours-deau
Rhin-Meuse	SIERM	http://rhin-meuse.eaufrance.fr/qualit-coursdeau
Artois-Picardie	Qualité des rivières	http://www.eau-artois-picardie.fr/donnees-sur-leau/visualiser-et-telecharger-les-donnees

Suivi du bilan oxygène et impact de l'eutrophisation en cours d'eau

En cas de fort enjeu sur l'eutrophisation, il est préconisé de réaliser un protocole spécifique.
La fréquence, la période et l'heure de la mesure sont prédominantes dans l'évaluation des phénomènes d'eutrophisation afin d'encadrer le cycle nycthéméral.
Des mesures sont ainsi réalisées sur au moins 4 campagnes en période d'étiage estival de juin à fin septembre, confondues avec les campagnes de prélèvements en vue d'analyses physico-chimiques, et une campagne en période hivernale de basses eaux.
Ces campagnes consistent en des mesures *in situ* 5 fois par jour des paramètres de terrain classiques : température, pH, oxygène dissous, conductivité, réparties comme suit :

- tôt le matin (avant le démarrage de la photosynthèse) ;
- deux au cours de la journée ;
- une en fin d'après-midi (18 - 19 h) ;
- une en début de nuit.

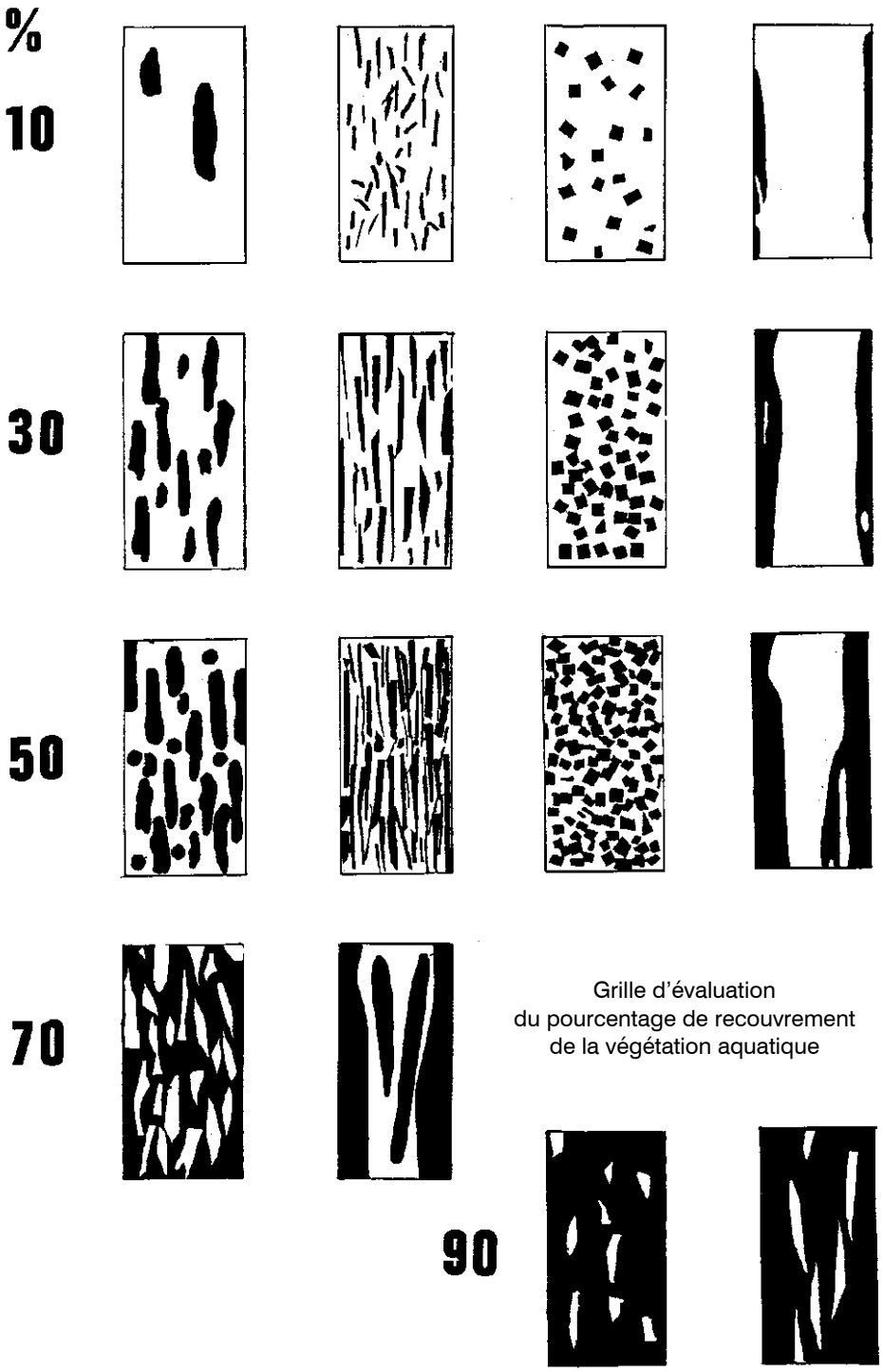
Ces mesures doivent être réalisées au cours d'une journée ensoleillée.

Remarque

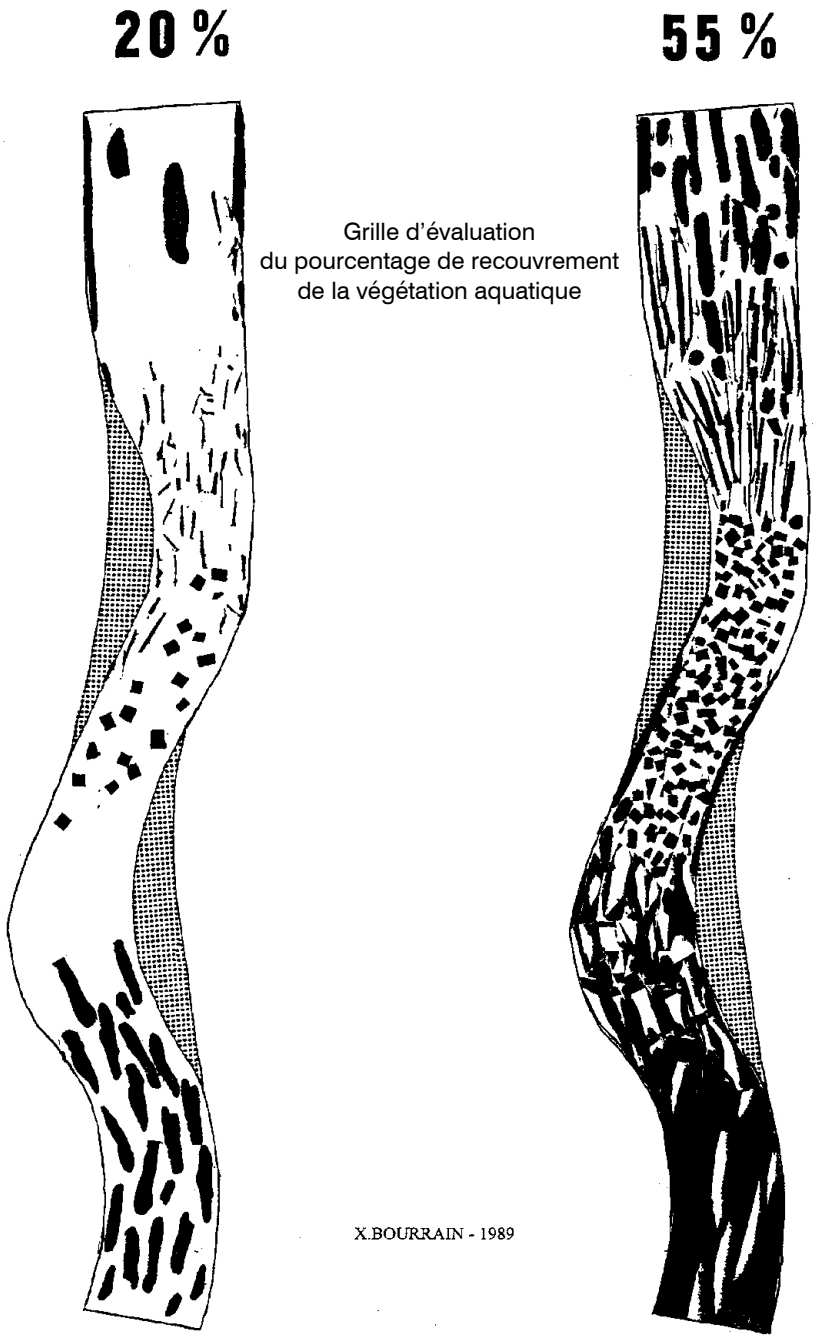
Lorsque ce sera possible, les campagnes de mesure débuteront par les prélèvements de l'après-midi afin d'être assuré d'avoir une météorologie favorable pour appréhender une activité photosynthétique maximum.

Grille comparative des recouvrements de végétation aquatique

Grilles établies par Xavier Bourrain, Agence de l'eau Loire-Bretagne



Grille d'évaluation
du pourcentage de recouvrement
de la végétation aquatique



Grille d'évaluation
du pourcentage de recouvrement
de la végétation aquatique

Protocole de suivi photographique de l'évolution hydromorphologique d'un cours d'eau

Principe

Le suivi photographique proposé dans ce document consiste en un ensemble de photos réalisées sur un site avant puis après (voire pendant) des travaux de restauration hydromorphologique. Chaque photo est prise à un endroit choisi permettant de garantir une prise de vue suivant les mêmes caractéristiques techniques (positionnement vertical, horizontal, angle d'observation…). La fréquence, définie selon les critères du SSM (voir *Chronologie des suivis*) pourra être complétée selon les variations annuelles et saisonnières (débit, développement végétal…) et les évolutions morphologiques attendues.

Objectifs

Le protocole développé ici a pour objectif de confronter des visuels avant et après (voire pendant) des travaux de restauration hydromorphologique sur un cours d'eau. Il doit permettre d'illustrer les différentes étapes de l'évolution du cours d'eau suite aux travaux (ajustements morphologiques ou développement de la végétation) dans un contexte global d'évolution du paysage. Il pourra également, le cas échéant, témoigner d'une stabilité des formes.

- Ce suivi, dans le cadre du SSM, apporte une vision complémentaire de l'évolution du milieu appréhendée par les indicateurs plus classiques.

Remarque

Le suivi photo peut répondre à un objectif de communication vers le grand public car c'est un outil visuel puissant de l'évolution du milieu et de son paysage appréhendable par tous.

Ce type de suivi peut être déployé seul si les contraintes techniques ou la faible ampleur du projet ne permettent pas la mise en place des suivis scientifiques préconisés dans le SSM car il peut être interprété indépendamment d'autres indicateurs.

Remarque

Le protocole de suivi photographique présenté concerne des photos à hauteur de vue humaine. Il ne traite pas des suivis par vue aérienne. Les suivis photographiques (ou filmographiques) par vue aérienne permettent d'obtenir des visuels d'envergure pertinente notamment sur des projets de restauration morphologique entraînant une forte évolution du tracé en plan du cours d'eau, des surfaces en eau, ou de la végétation. Les variations d'altitude permettent également de varier les angles jusqu'à une prise de vue à la verticale, offrant un visuel simplifié à deux dimensions. Ils sont également complémentaires des suivis photographiques au sol en limitant fortement les contraintes liées à l'évolution de la végétation ligneuse qui rend parfois inexploitables certaines prises de vue à hauteur humaine.

Matériels et méthodes

Matériel

Le suivi photographique doit être réalisé avec :

- un appareil permettant de géo-positionner chaque prise de vue (GPS intégré à l'appareil photo ou dissocié) ;
- un (ou des) appareil(s) photographique(s) :
  - permettant de générer des fichiers numériques si possible de qualité haute définition (définition *a minima* 10 Mpix) avec une bonne résolution (environ 300 dpi),
  - permettant de générer des fichiers bruts, car il est souvent nécessaire de travailler les photos pour corriger des erreurs ou variations d'exposition limitantes pour la comparaison de plusieurs campagnes. Généralement, un double enregistrement raw/jpeg ou raw/tiff est conseillé, pour assurer la compatibilité avec les logiciels de traitement d'image,
  - avec des focales fixes ou variables permettant de couvrir les besoins du suivi (plan très large, large, serré). Les focales les plus proches de la vision humaine, de 35-50 mm (voir remarque en partie *reconduction des prises de vue* sur les coefficients multiplicateurs), seront à privilégier dès que possible. Elles permettent des suivis détaillés en vision assez rapprochée. Avec une focale proche de la vision humaine, il est beaucoup plus facile de se recaler et retrouver le point de vue d'origine lorsqu'on revient à une saison différente ou après plusieurs années, qu'avec un grand angle ou un téléobjectif ;
- un trépied (fortement conseillé).

Remarque

Pour les plans larges, il est plus rapide et économique de réaliser une vue panoramique en assemblant un lot d'images se superposant. Certains logiciels, parfois intégrés à l'appareil photo, permettent des traitements d'image très rapides et assez efficaces. L'utilisation d'un pied calé à l'aide d'un niveau à bulle est recommandée pour limiter les erreurs de calage entre les photos.

Méthode

Il s'agit de réaliser plusieurs séries de clichés photographiques à partir de points définis précisément et à intervalle de temps régulier.

Plan d'échantillonnage des prises de vue

Ces points sont choisis de façon :

- à couvrir l'ensemble du site devant faire l'objet de travaux de restauration hydromorphologique ;
- à obtenir un rendu visuel de l'état hydromorphologique, des perturbations et des altérations du milieu devant être corrigés par les travaux de restauration. Il faut veiller à choisir des points permettant autant que possible d'appréhender visuellement :
  - le tracé en plan, les profils en travers du cours d'eau,
  - la diversité des faciès d'écoulement,
  - la diversité des habitats (sous-berges, herbiers, caches...),
  - la qualité du corridor alluvial (ripisylve, occupation des berges et de la zone rivulaire),
  - les éventuels ouvrages, vannages, digues ou merlons de curage,
  - éventuellement, les traces plus fines d'ajustements morphologiques (atterrissements, traces d'incision, confluences de sources ou fossés, développement de végétation, dépôts organiques...).

En préalable, il sera utile :

- de bien souligner certains repères visuels fixes (nettoyer la mousse, enlever des ronces sur une grosse pierre, une pile de pont…), voire d'ajouter des repères latéraux ou d'altitude (trace de peinture, échelle limnigraphique…) à des endroits stratégiques ;
- d'avoir dans la mesure du possible quelques visuels permettant d'avoir une vue d'ensemble du site en situant quelques points culminants (haut de vallée, de talus…) ;
- d'avoir des vues que l'on suppose durables malgré le développement en hauteur de la végétation. Il convient de multiplier les visuels sur un même site afin d'anticiper cette évolution ;
- de rechercher des points de vue qui doivent permettre de visualiser le déplacement latéral du cours d'eau le cas échéant (cours d'eau à forte énergie, cours d'eau en tresses) ;
- de choisir des points de vue facilement accessibles ;
- d'avoir des conditions d'éclairement optimales afin de permettre un passage unique pour l'ensemble des points.

Remarque

Si un bon ensoleillement peut être intéressant pour avoir des clichés flatteurs pour le paysage et les travaux menés, cela peut présenter des inconvénients notoires :

- *les ombres portées peuvent masquer une bonne visibilité de certains points de détail en lit mineur (faciès d'écoulement, granulats…), surtout si les berges sont assez hautes et l'axe du lit perpendiculaire au soleil. Une campagne estivale avec un soleil presque à la verticale aura un rendu visuel très différent d'une campagne hivernale avec des ombres portées très longues ;*
- *les contrastes très marqués soleil-ombre peuvent perturber la gestion automatisée de la lumière, de la balance des blancs voire de l'autofocus sur certains appareils. Un appareil assez sophistiqué et un bon savoir-faire de l'opérateur sont nécessaires pour pallier à ces inconvénients.*

Une journée nuageuse (mais non pluvieuse et avec une luminosité suffisante), permet de réaliser des clichés souvent techniquement plus intéressants (même si le caractère « artistique » de la photo peut en pâtir). Par temps ensoleillé, l'utilisation d'un pare-soleil est très fortement recommandée et indispensable pour les objectifs « grand angle ».

Reconduction des prises de vue et saisie du carnet de suivi

Les premières prises de vue (avant travaux) puis les prises de vue suivantes (après, voire pendant travaux) doivent être effectuées avec une grande rigueur afin de permettre une comparaison aisée et rigoureuse des clichés. Pour cela, les photos doivent donc être prises d'un point fixe et selon un cadrage constant.

Pour la prise de vues initiale, il est essentiel :

- de géo-positionner et/ou de matérialiser les points de prises de vue sur le terrain par un marquage au sol ou sur des repères fixes (poteaux, arbres, piquets…). La matérialisation sur des arbres doit être doublée systématiquement de repérages métriques car une coupe intempestive ou une tempête abattant une portion importante de ripisylve peut aisément compromettre un suivi pluriannuel ;
- de noter précisément les conditions techniques de la première prise de vues (format - focale).

À l'issue de la série photographique initiale (avant travaux), il convient de réaliser un carnet de suivi photographique identifié par le code Sandre et le nom du réseau de suivi local (voir *Déclaration, bancarisation, consultation des données du suivi scientifique minimal*). Ce carnet comprend :

- un plan d'échantillonnage localisant chaque prise de vue par son identifiant et permettant de visualiser sur une carte l'itinéraire à suivre sur le site (à réaliser sur Géoportail ou sur un logiciel SIG) ;

- une fiche d'implantation pour chaque point de vue présentant le cliché initial et précisant :
  - numéro du point de vue dans l'itinéraire, numéro de la série photographique,
  - coordonnées GPS, date, heure, météo,
  - nom du photographe, hauteur de prise de vue, orientation (N, S, E, O, vers amont, vers aval, rive droite, rive gauche, ou angulation précise relevée à la boussole),
  - critères hydromorphologiques suivis : tracé en plan, profil en travers, faciès d'écoulement, ripisylve, habitats, ouvrages...

Les documents en annexe de cette fiche seront utilisés pour la réalisation de ce carnet.

Pour les reprises de vues suivantes, il est conseillé :

- de réaliser les prises dans des conditions d'éclairement similaires et des conditions météorologiques proches ;
- de respecter les conditions de prise de vue initiale et notamment l'emplacement de l'appareil, la focale, l'angle et le champ de la prise de vue.

Une fiche terrain (en annexe de cette fiche) sera systématiquement remplie à chaque campagne de terrain.

Remarque

Il est généralement préférable de réaliser ses suivis photos toujours avec la même focale et le même boîtier mais sur un suivi pluriannuel ou partagé entre plusieurs opérateurs, il peut être difficile de se tenir à cette recommandation. En cas de changement de focale ou du boîtier, pour les boîtiers qui ne sont pas plein-format, attention de vérifier les coefficients multiplicateurs des appareils numériques qui peuvent varier d'une marque et d'un modèle à l'autre (voir https://fr.wikipedia.org/wiki/APS-C).

Pour cette reconduction, l'opérateur doit avoir avec lui le carnet de suivi avec le plan d'échantillonnage et les fiches d'implantation de chaque point de vue pour lui permettre de reproduire les clichés à l'identique.

⚠ Dans le cadre de suivi de travaux de reméandrage ou de remise en fond de talweg, la reproductibilité géographique des prises de vues ne sera pas possible car le tracé du cours d'eau est déplacé. Dans ce cas, la confrontation avant et après travaux des clichés portera sur l'évolution visuelle de paramètres tels que l'évolution du tracé en plan, des profils en travers du cours d'eau, de la diversité des faciès d'écoulement, la qualité du corridor alluvial. Dans la mesure du possible, il faudra réaliser des prises de vue de la vallée depuis un point culminant permettant d'avoir une vision du site englobant le tracé avant et le tracé après travaux.

Période et fréquence des prises de vues

Il est conseillé de réaliser *a minima* deux types de séries :

- une série avant travaux (dite série d'implantation) ;
- plusieurs séries après travaux à une périodicité annuelle ou bisannuelle (dites séries de reprise ou de reproduction).

Les séries de clichés seront réalisées sur le même pas de temps que les autres suivis du SSM, soit *a minima* une fois avant les travaux, puis 9 à 15 mois après les travaux puis tous les deux ans jusqu'à 7 ans après travaux.

Pour chacune de ces séries, il convient de les réaliser suivant la même période végétative, la période de végétation (du 1er avril au 30 octobre environ) étant la plus indiquée pour le suivi visuel de la ripisylve et des habitats d'herbiers.

Il est conseillé de compléter la série après travaux par une campagne photographique en période de hautes eaux ajustée aux épisodes de crue (voir Figure 50 ci-après) pour voir le comportement hydraulique sur le site restauré et analyser à la décrue les signes d'ajustement.

Par ailleurs, comme l'atteste la Figure 50, ces séries peuvent être utilement complétées par une série réalisée pendant les travaux.

Figure 49 - *Espace naturel des Brandes de Soyaux, exemple de plan d'échantillonnage (réalisé sur Geoportail d'après Antenne Paysage du CREN de Poitou-Charentes).*

a) © Michel Bramard - AFB

b) © Michel Bramard - AFB

c) © Michel Bramard - AFB

d) © Michel Bramard - AFB

Figure 50 - *Travaux sur la Rune (86).*
a) cours d'eau en phase travaux (dérivation avec lit emboité), b) débit plein bord avant débordement, c) crue débordant sur le lit majeur restreint, d) 4 ans après travaux.

Analyse et interprétation

L'objectif d'un suivi photographique est de permettre de confronter des visuels avant et après (voire pendant) les travaux de restauration hydromorphologique sur un site donné afin d'analyser l'évolution du cours d'eau dans ses composantes physiques et paysagères.

En général, les évolutions attendues sont une augmentation de la diversité des composantes physiques et paysagères du cours d'eau et une diminution des pressions anthropiques soit :

- une sinuosité du tracé en plan ;
- une diversité des profils en travers du cours d'eau ;
- une diversité des faciès d'écoulement ;
- une diversité des habitats (sous berges, herbiers, caches…) ;
- une diversité du corridor alluvial ;
- la modification ou disparition de bâtis anthropiques (ouvrages, vannages, digues ou merlons de curage…) ;
- une ripisylve variée et bien développée.

Des relevés photographiques plus précis associés à des repères verticaux ou latéraux (tiges graduées) et/ou confrontés à des indicateurs morphologiques (voir *Fiche 1 [Hydromorphologie (échelle station)]* et *Fiche 8 [Profil en long et faciès d'écoulements]*) vont permettre d'illustrer une évolution positive ou négative du lit (incision, engravement, colmatage, variation du rapport de forme…) liée aux ajustements après travaux, à des pressions locales (par exemple gestion de la ripisylve, piétinement, etc.) ou à des incidences du fonctionnement du bassin versant en amont (par exemple dysfonctionnements hydrologiques, apports de matières en suspension).

Bibliographie spécifique

CREN Poitou-Charentes, *Les Observatoires Photographiques du Paysage en Poitou-Charentes*. 2014, Antenne Paysage du Conservatoire Régional d'Espaces Naturels de Poitou-Charentes. p. 8.

http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/userfiles/file/P0/methodeOPP.pdf
http://www.cren-poitou-charentes.org/suivi-photographique-des-sites-du-conservatoire-2015
http://www.cren-poitou-charentes.org/paysage/paysage-et-sites-du-conservatoire/observatoires-photographiques-du-paysage
http://www.liferuisseaux.org/realisations_etudes/Valdeschoues/Suivi_photo_suppression_etang.pdf
http://www.lapetiteloiterie.fr/lpl/suivis_etudes/observations/suivi_photo/

Plan d'échantillonnage d'implantation

Localisation

Code Sandre réseau		
Nom du réseau		
Date		
Nom opérateur		
Météo		
Créneau horaire		
Commune		
Coordonnées GPS de début parcours (Lambert 93 ou WGS 84)		

Appareil/Réglages

Type d'appareil			
Focale			
Manuel		Automatique	
Ouverture (facultatif) :		Types de modes automatiques :	
Vitesse (facultatif) :			

Prises de vue implantation (1 fiche par prise)

Date et heure	
N° du point de vue	
N° de la photo donnée par l'appareil	
Repères/positionnement appareil	
Coordonnées GPS (Lambert 93 ou WGS 84)	
Précision GPS (en m)	
Description points de repères	N S E O Vers amont Vers aval Rive droite Rive gauche
Orientation	
Hauteur de prise de vue	
Objectifs et critères hydromorphologiques	Tracé en plan/profil en travers/faciès d'écoulement/ripisylve/habitats/ouvrages
Schéma de positionnement de l'appareil et/ou remarques	

Prises de vue reconduction

Localisation

Code Sandre réseau et nom du réseau	
Date	
Nom opérateur	
Météo	
Créneau horaire	
N° de la série photographique	

Appareil/Réglages

Type d'appareil	
Focale	

Manuel		Automatique	
Ouverture (facultatif) :		Types de modes automatiques :	
Vitesse (facultatif) :			

Remarques/Schémas/Autre

N° du point de vue	N° de la photo donnée par l'appareil	Remarques/difficultés

Modèle carnet de suivi/ Plan d'échantillonnage d'implantation

Localisation

Code Sandre réseau		
Nom du réseau		
Date		
Nom opérateur		
Météo d'implantation		
Créneau horaire		
Commune		
Coordonnées GPS de début parcours		

Appareil/Réglages

Type d'appareil			
Focale			
Manuel		Automatique	
Ouverture (facultatif) :		Types de modes automatiques :	
Vitesse (facultatif) :			

Itinéraire photographique (SIG)

Modèle carnet de suivi/fiche d'implantation

N° du point de vue		
Coordonnées GPS (Lambert 93 ou WGS 84)		
Précision GPS (en m)		
Description points de repères		
Orientation		
Hauteur de prise de vue		
Objectifs et critères hydromorphologiques		
Photo	Schéma	

Profil en long et faciès d'écoulements

Suivi du profil en long

Définition générale du profil en long

Le profil en long d'un cours d'eau est une représentation graphique qui met en rapport la cote du fond du lit et/ou de la ligne d'eau et/ou du niveau des berges (en ordonnées), et la distance (en abscisses). Il peut être réalisé à différentes échelles du cours d'eau (linéaire complet, tronçons, stations) et permet d'observer les variations longitudinales de la pente du fond du lit et/ou de la ligne d'eau et/ou du niveau des berges.

C'est un outil hydromorphologique essentiel qui traduit, par la comparaison diachronique de plusieurs relevés, les processus physiques verticaux d'ajustement (érosion/dépôt), sous l'effet notamment des variations de débits liquide et solide (variables de contrôle primaires). Plus localement, la pente et la géométrie de la vallée, la granulométrie du lit et la végétation rivulaire (variables de contrôle secondaires) influencent aussi la forme du profil longitudinal. Le profil en long s'ajuste également en fonction du « niveau de base » (ou « niveau de contact aval ») qui peut être le niveau de la mer pour les fleuves ou la cote altitudinale du cours d'eau récepteur pour leurs affluents [46]. Lorsque le niveau de base évolue, pour des raisons naturelles (variation du niveau marin ou de la cote de l'exutoire) ou anthropiques (par exemple, mise en place de seuils ou curage), le profil en long s'ajuste plus ou moins rapidement soit par incision (érosion régressive) soit par exhaussement (remblaiement du lit).

À l'échelle du cours d'eau, une forme de profil en long dite d'équilibre, généralement concave [46] s'établit lorsque la capacité de transport est en équilibre avec la fourniture sédimentaire (équilibre entre l'érosion et le dépôt). Cependant, cette forme n'est pas « lisse », car localement des facteurs comme la géologie et la topographie de la vallée ou des structures anthropiques peuvent créer des irrégularités.

Objectifs du suivi

Le suivi du profil en long dans le cadre du suivi scientifique minimal cherche avant tout à rendre compte de l'évolution des variations verticales du fond du lit, puisque c'est là qu'agit et se matérialise une partie des processus d'érosion et de dépôt, témoignant du fonctionnement hydro-sédimentaire.

L'objectif du suivi du profil en long est d'analyser l'évolution altimétrique du fond du lit sous l'effet des nouveaux processus d'érosion et de dépôt occurrents dans le tronçon hydromorphologique comprenant le secteur restauré. Le suivi doit également permettre d'identifier et de quantifier, sur l'ensemble de la zone d'étude, les ruptures de pente, pour analyser leur évolution. La caractérisation du profil en long, dans le cadre du SSM, informe sur l'évolution longitudinale et verticale de la séquence radier/mouille.

Définition de l'emprise du suivi

Emprise des travaux

Pour les restaurations linéaires (reméandrage, remise dans le talweg, contournement de plans d'eau, etc.), l'emprise des travaux se définit assez simplement par le linéaire concerné par les travaux. Dans le cas de ce type d'opération, il correspond à la dénomination «linéaire restauré» (voir *Échelles du suivi et éléments à suivre*). Pour les opérations d'effacement d'obstacle, le linéaire concerné par les travaux est borné par le remous solide à l'amont (si celui-ci est difficile à caractériser, prendre en compte l'extrémité amont de la retenue formée par l'ouvrage) et par l'ouvrage lui-même à l'aval.

Attention, bien souvent, le point de prélèvement Carhyce (*voir la Fiche 1 [Hydromorphologie (échelle station)*]) de la station *Restaurée* ne couvrira pas l'intégralité du linéaire concerné par les travaux. Il faut donc bien distinguer d'une part l'emprise des travaux et d'autre part l'emprise du point de prélèvement Carhyce de la station *Restaurée*.

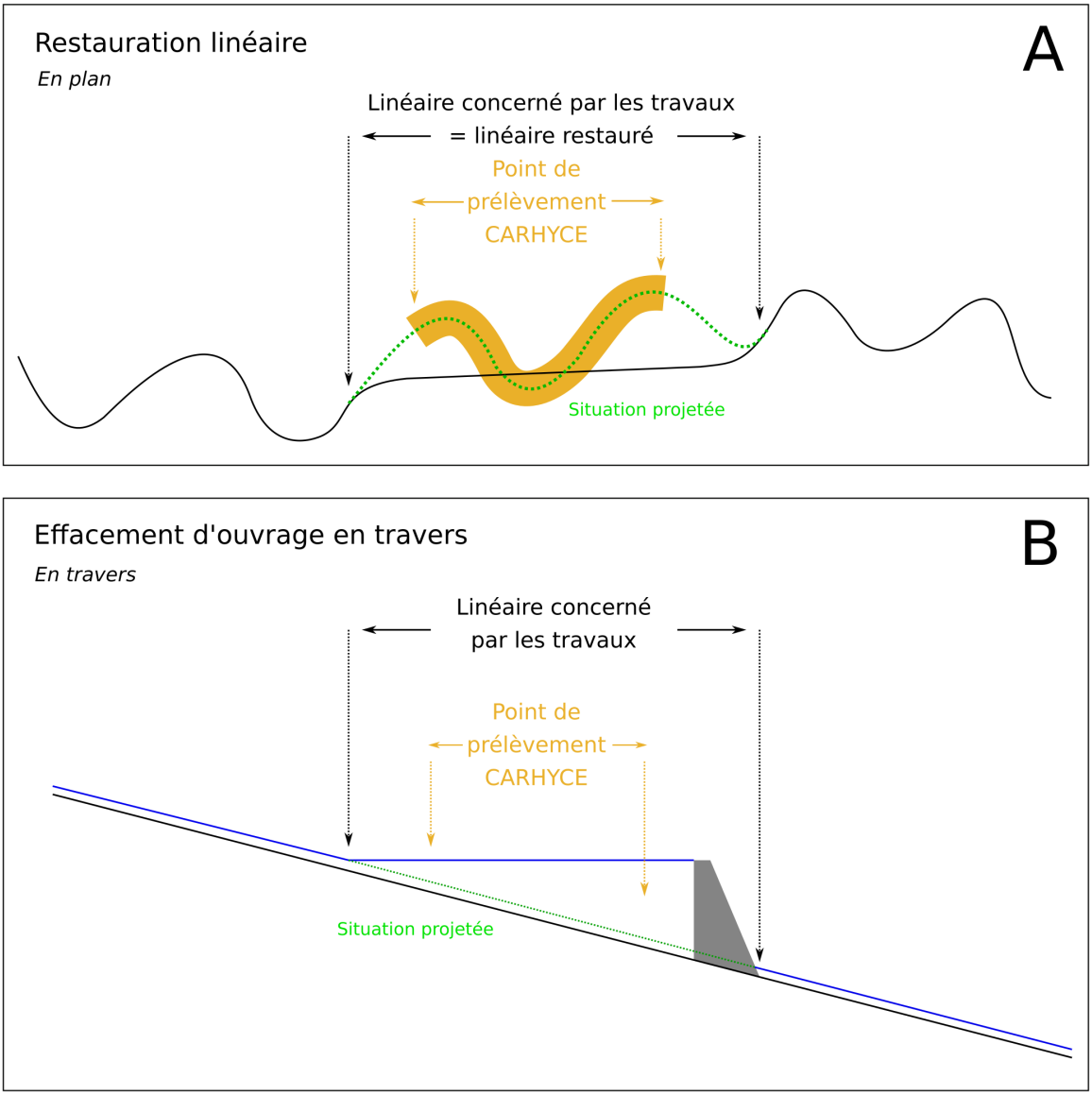


Figure 51 - *Définition du linéaire concerné par les travaux dans le cas des différents types d'opérations de restauration*

Définition de la zone de suivi du profil en long

La zone qui fait l'objet du suivi du profil en long comprend le linéaire concerné par les travaux dans son intégralité, étendu à l'amont et à l'aval d'une distance de 50 largeurs pleins bords du cours d'eau hors emprise d'une retenue (50 Lpb), puisque les effets de la restauration (notamment vis-à-vis des débits liquide et solide) vont contribuer à modifier le profil en long du lit au-delà du linéaire concerné par les travaux. Ainsi, pour un cours d'eau de 5 m de large, le profil en long réalisé s'étendra sur 250 m en amont de la limite amont des travaux et sur la même distance en aval de la limite aval de ceux-ci. Sur l'exemple Figure 51, si le linéaire concerné par les travaux s'étend sur 400 m et que le cours d'eau a une Lpb = 5 m, le profil en long doit être réalisé sur 900 m (Figure 52).

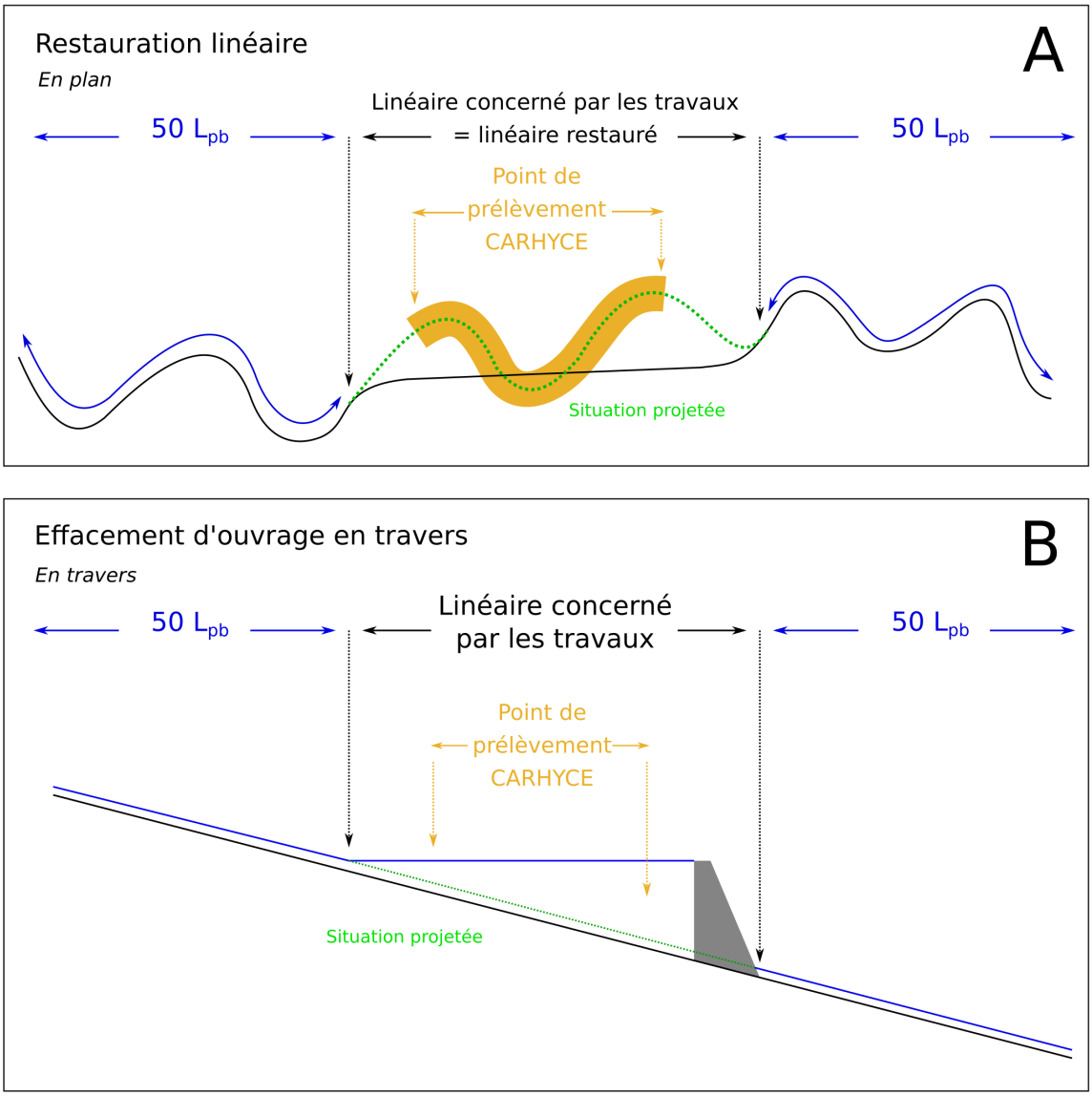


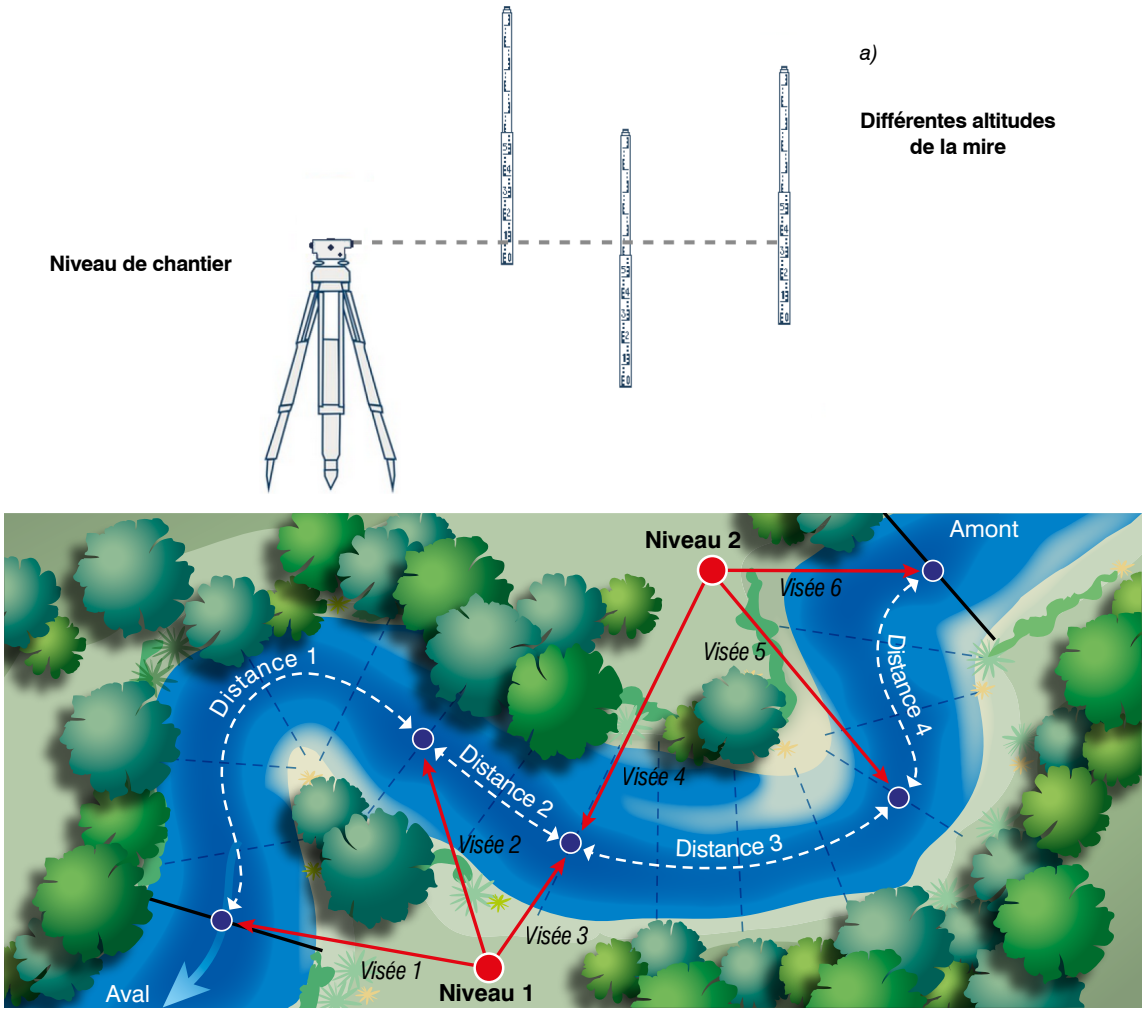
Figure 52 - *Définition du linéaire qui fait l'objet du suivi du profil en long dans le cas des différents types d'opération de restauration*

Réalisation du profil en long

Choix de la solution topographique

Quatre méthodes de mesures topographiques, s'appuyant chacune sur des instruments spécifiques, peuvent être mobilisées pour réaliser le profil en long : le niveau de chantier (associé à une mire), le tachéomètre, et le GPS différentiel (DGPS) avec ou sans base fixe.

- Le niveau de chantier est un outil optique simple. Le niveau est réglé de manière à être horizontal et calé sur un (ou des) repère(s) fixe(s)[35]. Puis un opérateur vise la mire maintenue par un second opérateur situé au sein du lit, à chaque point que l'on veut mesurer. La distance (longueur développée) entre ces mêmes points doit être mesurée dans l'axe du cours d'eau par un topofil. On obtient ensuite la pente par le rapport entre la différence d'altitude entre les deux points et la distance entre eux.



© N. Pioch, G. Melun et D. Baril [47], modifié d'après Manuelle Philippe et Sébastien Hervé.

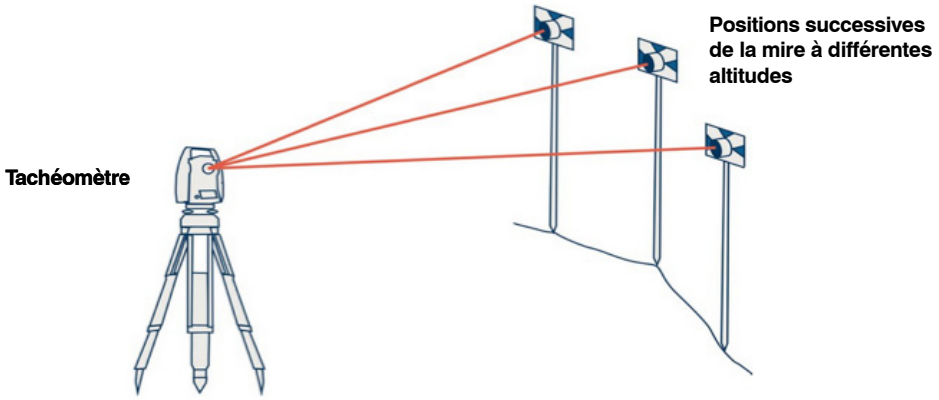
© Graphies

Figure 53 - *Mise en œuvre de la méthode du niveau de chantier.*
a) le mode d'utilisation du niveau de chantier et de la mire, b) le tracé en plan d'un exemple de mise en œuvre.

Cet outil robuste est facile d'utilisation et présente l'avantage d'être déjà mobilisé dans le cadre du protocole Carhyce. Cependant, il rencontre plusieurs limites :

- la visée et la lecture s'avèrent difficiles à plus de 50 mètres ;
- le « champ de vision » du niveau en termes d'altitude est limité et il faut fréquemment réaliser des reports de niveau dans les zones de forte pente ;
- les données récoltées sont relatives à la position du pivot et ne peuvent pas être géoréférencées au moyen de ce seul outil ;
- les données sont notées de façon manuscrite, ce qui peut générer des erreurs de compréhension et de retranscription (biais opérateur).

[35] *Il est préconisé de se caler* a minima *sur un repère fixe, idéalement situé en dehors du plein bord (ouvrage maçonné, point NGF.)*



© Crédits projet Cocosrico, Manuelle Philippe et Sébastien Hervé [48].

Figure 54 - *Utilisation du tachéomètre.*

- Le tachéomètre est un instrument de mesure optique. Il permet de mesurer à la fois des angles et des distances, grâce à trois fonctions :
  - goniomètre : mesure des angles dans les plans horizontaux et verticaux ;
  - clisimètre : mesure des pentes ;
  - stadimètre : mesure des distances (télémètre laser ou infrarouge).

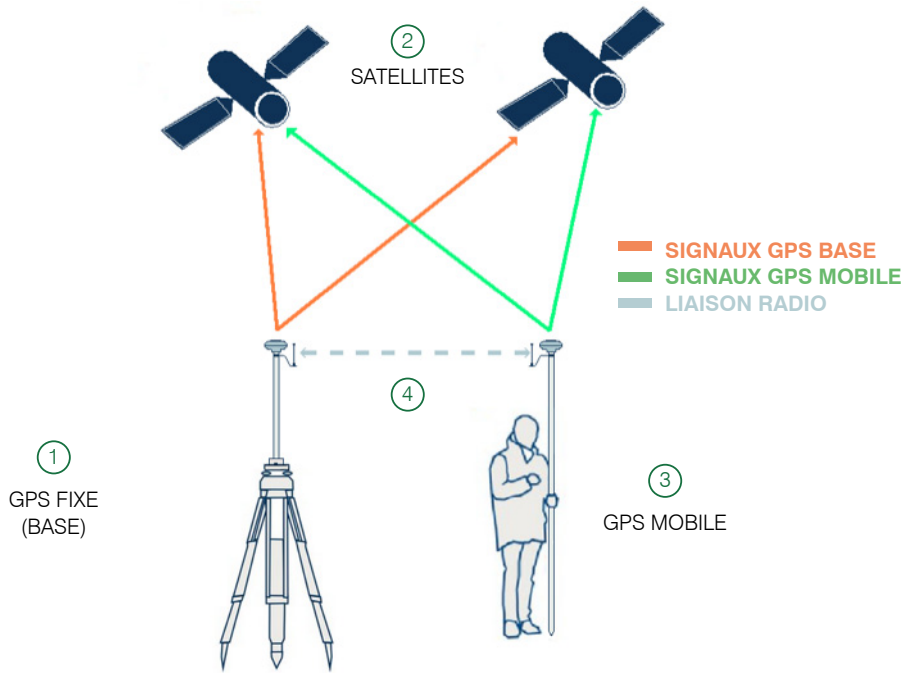
Un opérateur déplace une mire, que vise un deuxième opérateur à travers le tachéomètre. Les données sont enregistrées au format numérique dans l'appareil, et sont ensuite traitées afin de calculer la position de chaque point de la mire par rapport à celle du tachéomètre. Là encore, les données sont relatives, et il est nécessaire de connaître la position absolue du tachéomètre, pour en déduire les coordonnées précises des points mesurés.

- Le GPS différentiel avec base fixe est une solution qui s'appuie sur deux GPS : l'un est utilisé comme GPS mobile tandis que l'autre est fixe, et sert de relais. Chacun des GPS capte le signal des satellites. Ils sont également en contact par liaison radio, ce qui permet à la base de transmettre les corrections au mobile[36]. La solution DGPS se compose donc (Figure 55) :
  - de la « base » (1), ou pivot, qui reste fixe tout au long des mesures et enregistre sa position à pas de temps régulier grâce à la liaison GPS avec les satellites captés (2). Il crée donc une multitude de positions, prises en référence à la position initiale à t = 0. En effet, les conditions atmosphériques notamment, ainsi que la précision intrinsèque du matériel et des signaux satellites, engendrent une erreur sur la position de la base qui devra être corrigée par post-traitement. Pour ce traitement de données, la base doit être maintenue en place pour une période minimale de 1,5 à 2 heures et ne doit absolument pas être déplacée pendant ce temps, puisqu'elle représente la *référence* qui permettra de donner une précision centimétrique aux mesures réalisées avec le deuxième GPS, appelé « mobile » (3) ;
  - du mobile qui est un GPS positionné sur une canne d'une certaine hauteur et déplacé par l'opérateur sur le terrain pour la prise de mesure. On peut utiliser simultanément autant de GPS mobiles que nécessaire. Le mobile calcule lui aussi sa position grâce à une liaison GPS avec les satellites captés, à chaque fois que l'opérateur crée un nouveau point de mesure.

Ces deux entités sont en liaison grâce à un signal radio (4), qui permet de transférer les corrections de position en temps réel au mobile [49]. Ce type de matériel peut être configuré de deux manières différentes pour corriger le positionnement : soit la base corrige directement sa position via la souscription d'un abonnement au RTK-Réseau (voir ci-dessous) ; soit les coordonnées de la base sont corrigées en post-traitement,

[36] *Pour en savoir plus sur le principe de la correction appliquée au signal, voir « Le GPS différentiel (DGPS) et temps réel (GPS RTK) » (CETMEF, 2008).*

grâce au réseau GPS permanent de stations relais (RGP) de l'IGN, dont les coordonnées sont connues. Son utilisation peut s'avérer limitée dans les vallées profondes et sous un couvert forestier dense ou par temps nuageux. En effet, ces situations peuvent entraîner des difficultés de liaison téléphonique et/ou satellitaire.



© Crédits projet Cocosrico, Manuelle Philippe et Sébastien Hervé [48].

Figure 55 - *Méthode du GPS différentiel avec base fixe.*

- **Le GPS différentiel relié au RTK-réseau** est un second système de GPS différentiel. Son principal avantage est de s'affranchir de la base. L'idée est que les calculs de correction soient centralisés sur un serveur auquel a accès le GPS mobile grâce à un téléphone portable. Le GPS est en contact avec le téléphone mobile par une liaison Bluetooth. Le serveur - centre de calcul - communique en temps réel les informations au GPS. C'est cette étape qui est techniquement la plus critique. En effet, il arrive souvent que les zones de mesures (rivières, zones humides…) ne soient pas couvertes par le réseau GSM. L'utilisation de ce type de matériel devient alors impossible puisque les corrections ne peuvent être transférées au mobile. Cela constitue un inconvénient majeur. Hormis cela, ce type de technologie présente de nombreux avantages :
  - le coût d'achat est réduit puisqu'il ne s'agit plus d'investir dans deux GPS (une base et un mobile), mais dans un seul. Cependant, l'abonnement au réseau de correction (Orpheon[37], Sat-Info[38] ou Teria[39]), peut s'avérer plus coûteux pour une couverture nationale avec le réseau Orpheon par exemple ;
  - il n'y a plus de contrainte liée à la liaison radio avec la base et l'opérateur peut se déplacer sans contrainte de distance, ce qui constitue un énorme avantage pour la réalisation de profils en long notamment.

Actuellement, ce genre de matériel est donc bien adapté pour des mesures en zone bien couverte par le réseau GSM, tandis qu'il est préférable d'utiliser un couple base-mobile pour des mesures dans les secteurs où la connexion GSM est peu fiable.

Fréquence et répartition des points

La prise de points se fait dans le fond du lit mouillé, au point le plus bas de la section en travers. Deux possibilités[40] décrites ci-après s'offrent alors selon le temps disponible, l'ambition du suivi, la finesse du profil souhaitée et le matériel à disposition. Dans tous les cas on veillera à localiser précisément (marquage visuel et géoréférencement) les points de début et de fin de suivi lors de la première campagne. Les opérateurs se recaleront sur ces limites lors des suivis ultérieurs.

[37] *http://reseau-orpheon.fr/*
[38] *http://www.sat-info.fr/*
[39] *https://www.reseau-teria.com/*
[40] *La méthode de prise de point choisie lors de l'état initial sera conservée pour toute la durée du suivi.*

- **Prise de points en routine :** dans ce cas, il s'agit de prendre des mesures à intervalles réguliers, fixés a minima à **5 L_{pb}**. On peut améliorer la finesse du profil en réduisant cet écart (multipliant le nombre de points). Il reste cependant essentiel, dans le cadre du suivi, de fixer un écartement entre les points et de s'y tenir au fil des campagnes de mesures.

Exemple

Pour un cours d'eau de 2 m de largeur pleins bords restauré sur un linéaire de 100 m, on obtient un profil en long composé de 10 points au niveau du linéaire concerné par les travaux et 10 points en amont et en aval de ce linéaire, → soit *a minima* 30 points au total. Pour un cours d'eau de 5 m de large, restauré sur un linéaire de 400 m, on obtient un profil en long composé de 16 points au sein du linéaire concerné par les travaux et 10 points en amont et en aval de ce linéaire, → soit *a minima* 36 points au total.

- **Prise de points en fonction de la pente :** pour chaque changement de pente du fond du lit, un point GPS est fait. Ce choix de protocole est à privilégier car il permet un recensement fin et exhaustif des modifications de la pente, plutôt que la prise de points en routine qui donne un aperçu plus partiel. Cette méthode est particulièrement recommandée dans le cas des cours d'eau à fond mobile (charriage actif) ainsi que des plus petits cours d'eau. Lorsque certains faciès - notamment les plats lentiques ou les plats courants - sont très étendus (> **4 L_{pb}**) des points intermédiaires peuvent être pris pour mieux caractériser l'homogénéité du fond.

Post-traitement et bancarisation

Les coordonnées obtenues sur le terrain, quelle que soit la solution topographique retenue peuvent être incorporées dans le classeur de bancarisation (fichier « bancarisationPL.xls ») joint à la fiche. Celui-ci permettra de compiler les données relatives au profil en long au fil des campagnes de suivi (1 onglet par campagne).

Suivi des faciès d'écoulement

Définition des faciès d'écoulement

Malavoi et Bravard (2010) [46] définissent par faciès d'écoulement : « *[de] petites portions de cours d'eau (d'une longueur comprise entre 1 et 10 fois la largeur à pleins bords environ) présentant une homogénéité, de l'échelle de quelques m² à quelques centaines de m², sur le plan des vitesses, des profondeurs, de la granulométrie, de la pente du lit et de la ligne d'eau, des profils en travers* ». Ces unités hydromorphologiques fondamentales ainsi que leur succession au sein du lit mineur traduisent directement les processus physiques à court terme (érosion/dépôt) et permettent donc d'appréhender la « fonctionnalité » d'un cours d'eau. La diversité des faciès d'écoulement autorise une diversité d'habitats qui favorise elle-même une diversité des biocénoses présentes.

Objectifs du suivi des faciès d'écoulement

Les objectifs du suivi des faciès d'écoulement dans le cadre du SSM sont de pouvoir :
- caractériser l'évolution de la morphologie du lit ;
- quantifier la diversification post-restauration de ces faciès.

Cette diversification, caractérisant une hétérogénéisation des conditions d'habitat, constitue un bon indicateur d'amélioration de la qualité du milieu.

Mise en œuvre du suivi des faciès d'écoulement

En même temps que le relevé altimétrique du lit (profil en long), il est recommandé de renseigner la répartition des faciès d'écoulement suivant la typologie des faciès de Malavoi & Souchon [50]. On s'appuiera pour cela sur la distinction des 6 faciès majeurs (Chenal lentique/Mouille/Plat lentique/Plat courant/Radier/Rapide). L'étendue des différents faciès est mesurée au fil de la progression vers l'aval, grâce au topofil (ou directement noté par des points GPS, le cas échéant). Il est rappelé de bien veiller à localiser précisément les limites amont et aval du suivi, dès la première campagne, afin d'assurer un recouvrement optimal des différents relevés. Le relevé est reporté directement sur la fiche terrain.

Données diachroniques

Certaines données relatives au profil longitudinal peuvent déjà exister et être intéressantes à mobiliser pour mettre en perspective les réajustements morphologiques récents du lit, notamment suite à la restauration :

- études hydrauliques préexistantes (voir syndicat mixtes, EPTB, Archives départementales, associations) ;
- profils des grandes Forces Hydrauliques.

https://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=e_profils

Bibliographie spécifique

46. Malavoi, Jean-René et Jean-Paul Bravard, 2010. Éléments d'hydromorphologie fluviale. Physio-Géo. Géographie physique et environnement. 224 pages.

48. Hénaff, Alain, 2014. *Gestion des risques d'érosion et de submersion marines : guide méthodologique*. Équipe Littoral, environnement, télédétection, géomatique.

49. CETMEF, 2008. *Le GPS différentiel (DGPS) et temps réel (GPS RTK).*6 pages.

50. Malavoi, Jean-René et Yves Souchon, 2002. *Standardized description of streams and rivers channel geomorphic units: Qualitative description key and physical measurements.* Bulletin Francais De La Peche Et De La Pisciculture, (365-66): p. 357-372.

09 Hydrologie

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 nature[41].

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

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'eau[42].
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.

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

[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*

Encart n° 1

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).*

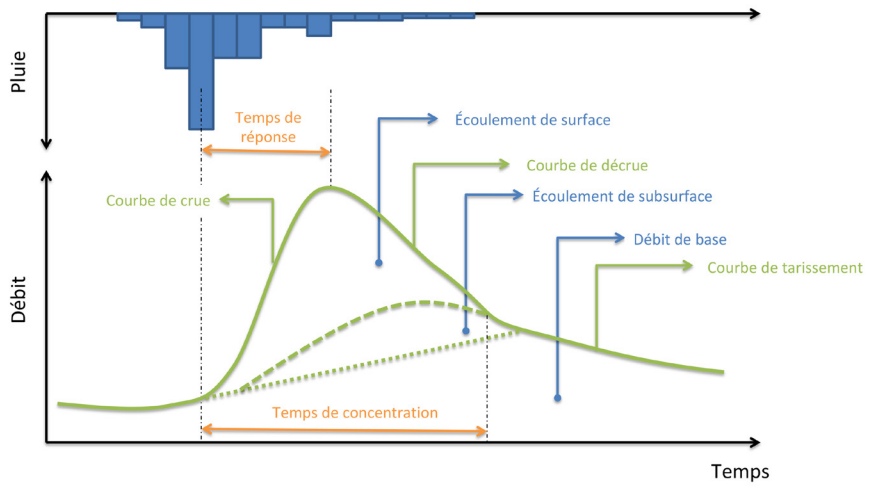


Figure 56 - *Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un événement pluie-débit (d'après A. Musy)*

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…

https://bnpe.eaufrance.fr/

https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/atlas-regional-de-loccupation-des-sols-en-france-clc

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

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

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.

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

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

http://hydro.eaufrance.fr/

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'exutoire[43] 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).

[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.*

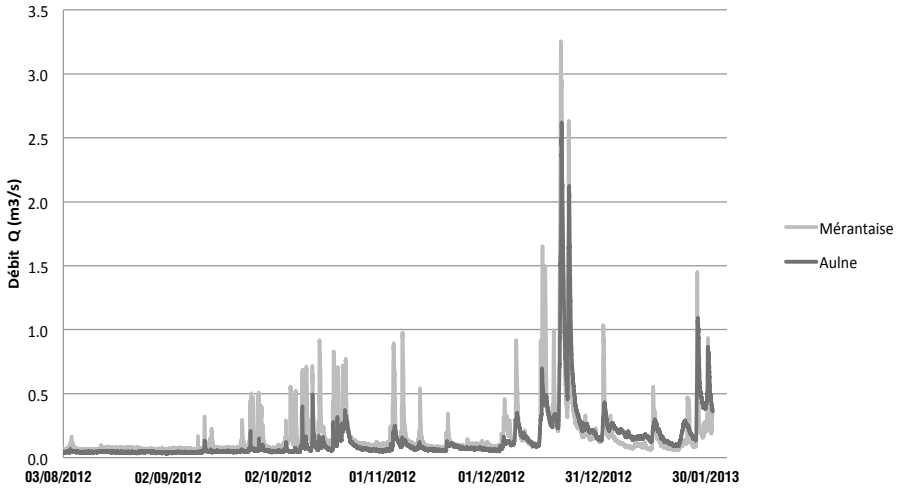


Figure 57 - *Exemple de deux cours d'eau du Parc naturel régional de la Haute vallée de Chevreuse.*

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 jaugé (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

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.

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

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

Laisses 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

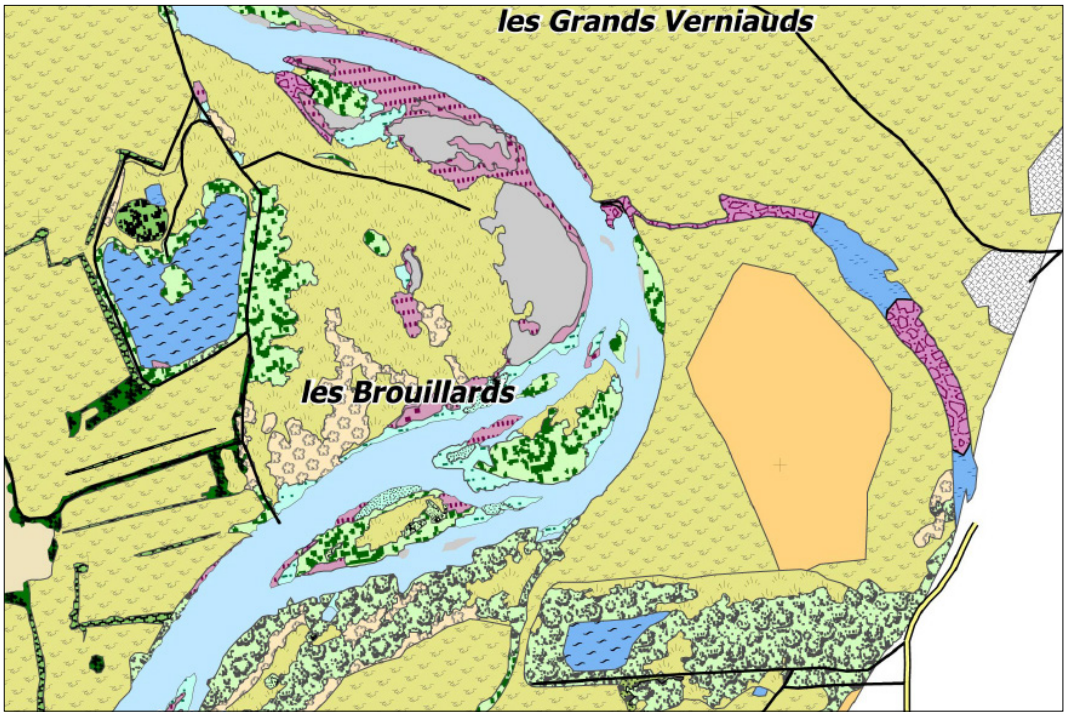
https://onde.eaufrance.fr/

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].



© Système d'information des évolutions du lit de la Loire, Dreal Centre-Val de Loire (2012)

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.

Acquisition des données hydrologiques nécessaires au suivi des opérations de restauration

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.

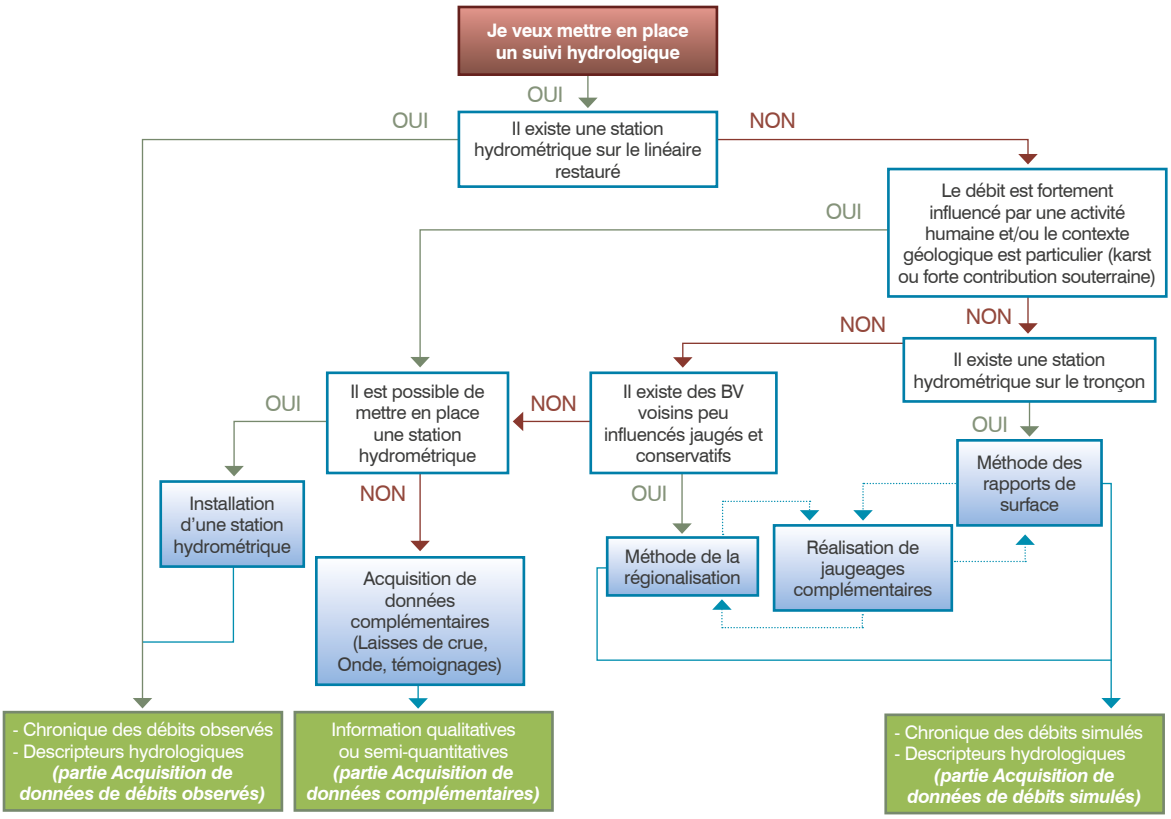


Figure 60 - *Arbre de décision simplifié de la stratégie d'acquisition des données hydrologiques nécessaires au suivi des opérations de restauration hydromorphologique des cours d'eau.*

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.

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

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.

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 :

$$Q\ non\ jaugé = Qjaugé\ \times \frac{S\ non\ jaugé}{S\ jaugé}$$

Avec Q en $m^3.s-1$ et S la surface de bassin versant en km^2.
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.

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

L'installation du logiciel R via la plateforme du projet R est également requise. Le modèle et les fonctions de calibrations sont disponibles en tapant *install.packages* (« airGR »).

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

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.

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.

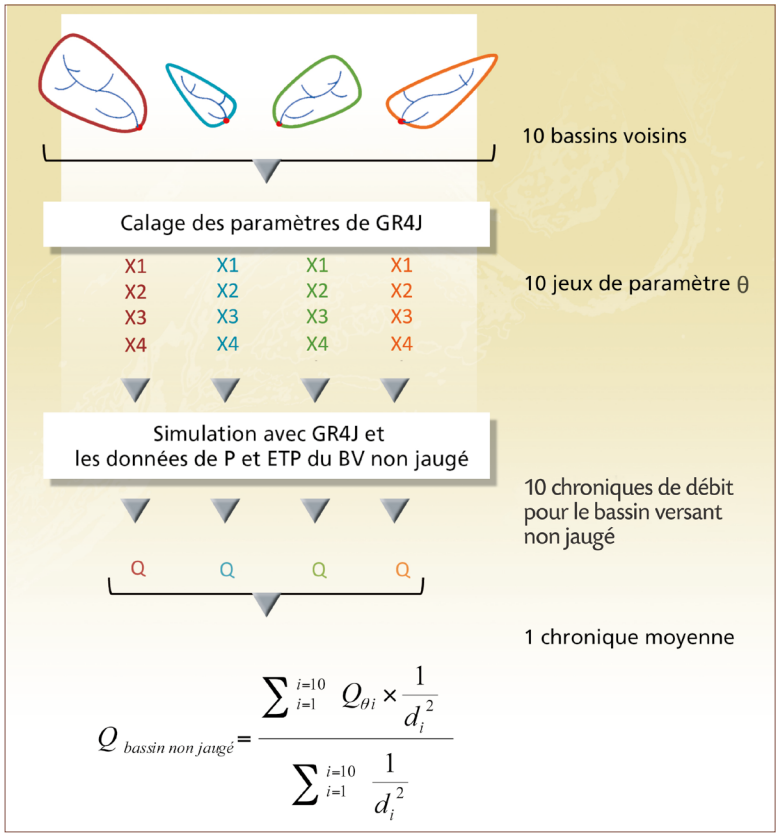


Figure 61 - *Schéma explicatif de la méthode de régionalisation basée sur la proximité géographique. (LeBecherel* et al. *[51])*

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.

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

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.

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.

http://hydro.eaufrance.fr/

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…).

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).

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

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.

Acquisition de données complémentaires

Mise en place du protocole Onde/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

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.

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 influe 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 influeront 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 entrainer 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 bord[44],
  - la **crue décennale** (Q_{10}) de période de retour 10 ans ou crue débordante, qui représente une crue assez conséquente mais qui reste relativement fréquente[44] ;
- 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=LEGIARTI000025800815&cidTexte=LEGITEXT000006074220

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 évènements hydrologiques marquants, en particulier les crues.

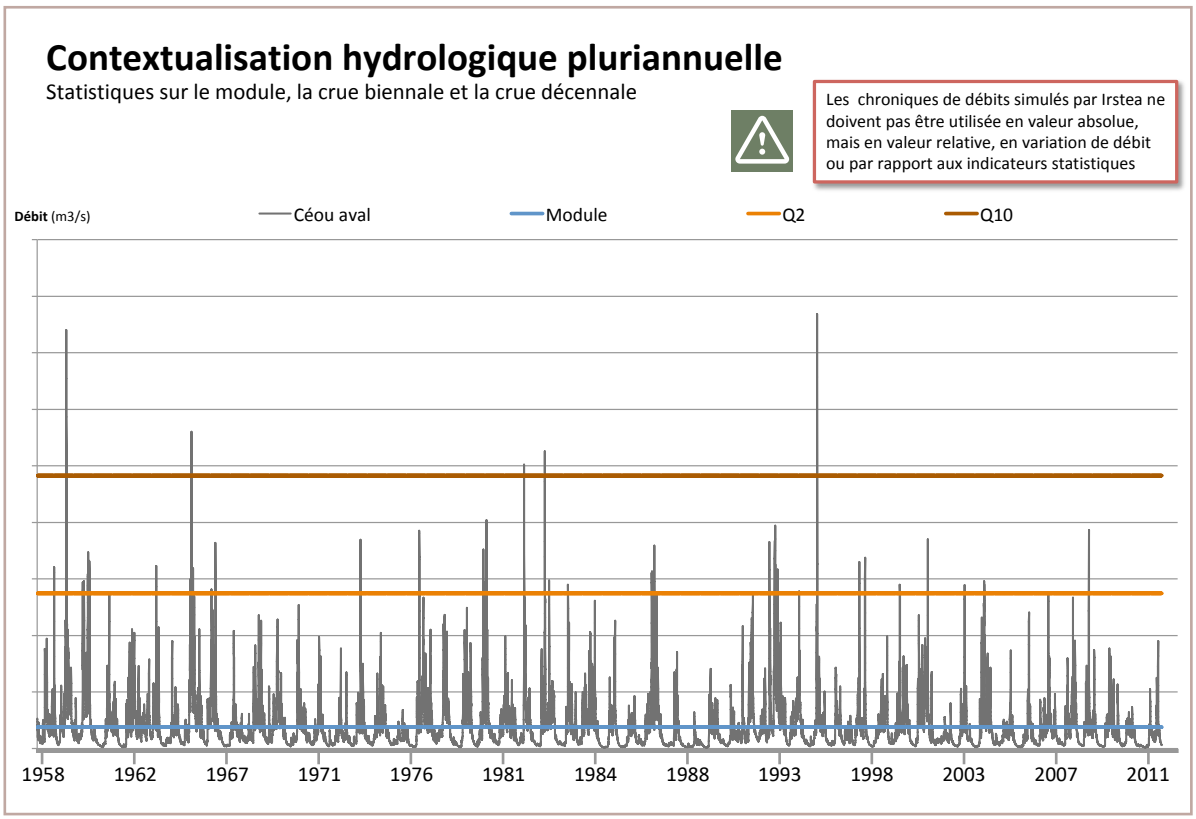


Figure 62 - *Exemple de chronique hydrologique pluriannuelle sur le Céou aval (source des données : reconstitution de chroniques hydrologiques Irstea sur le site du projet Carmen http://carmen.carmencarto.fr/66/AFB_Reconstitution-chroniques-hydrologiques.map)*

[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.

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.

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.

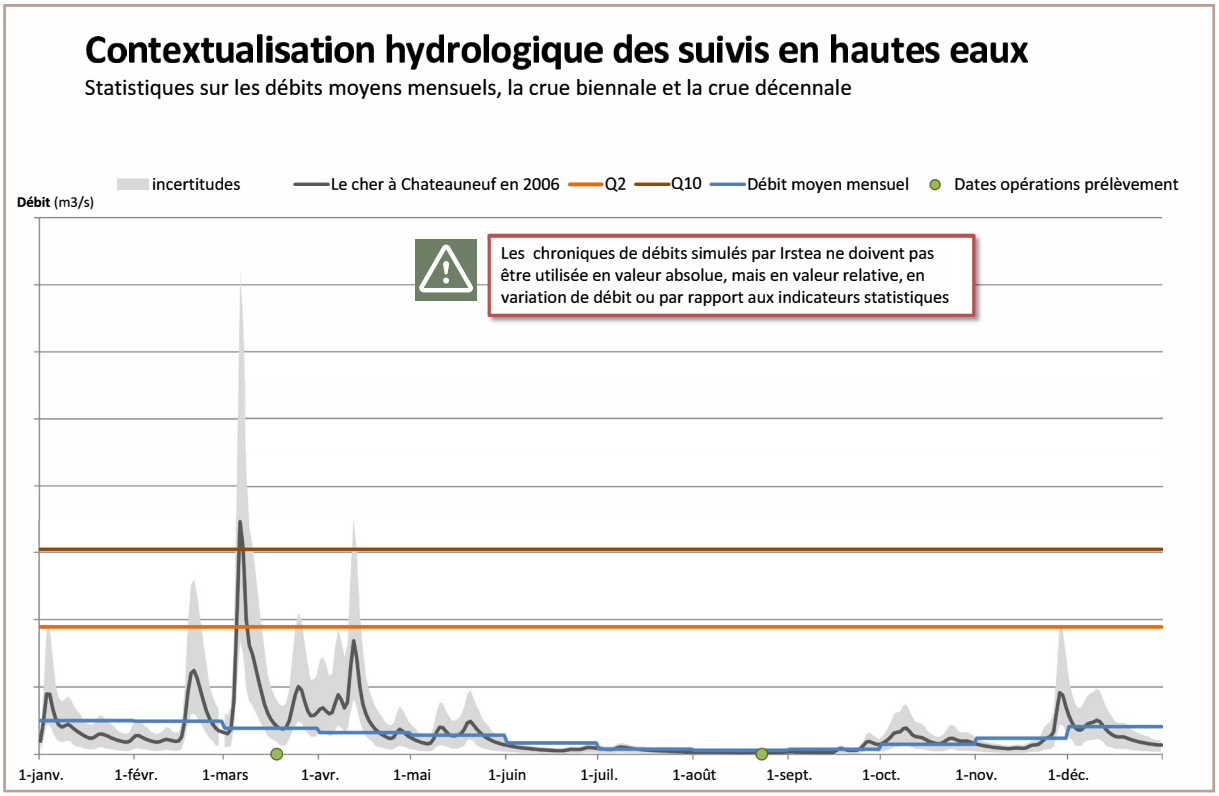


Figure 63 - *Exemple de contextualisation hydrologique des suivis en hautes eaux sur le Cher à Châteauneuf en 2006 (source des données : Reconstitution de chroniques hydrologiques Irstea sur le site du projet Carmen http://carmen.carmencarto.fr/66/AFB_Reconstitution-chroniques-hydrologiques.map)*

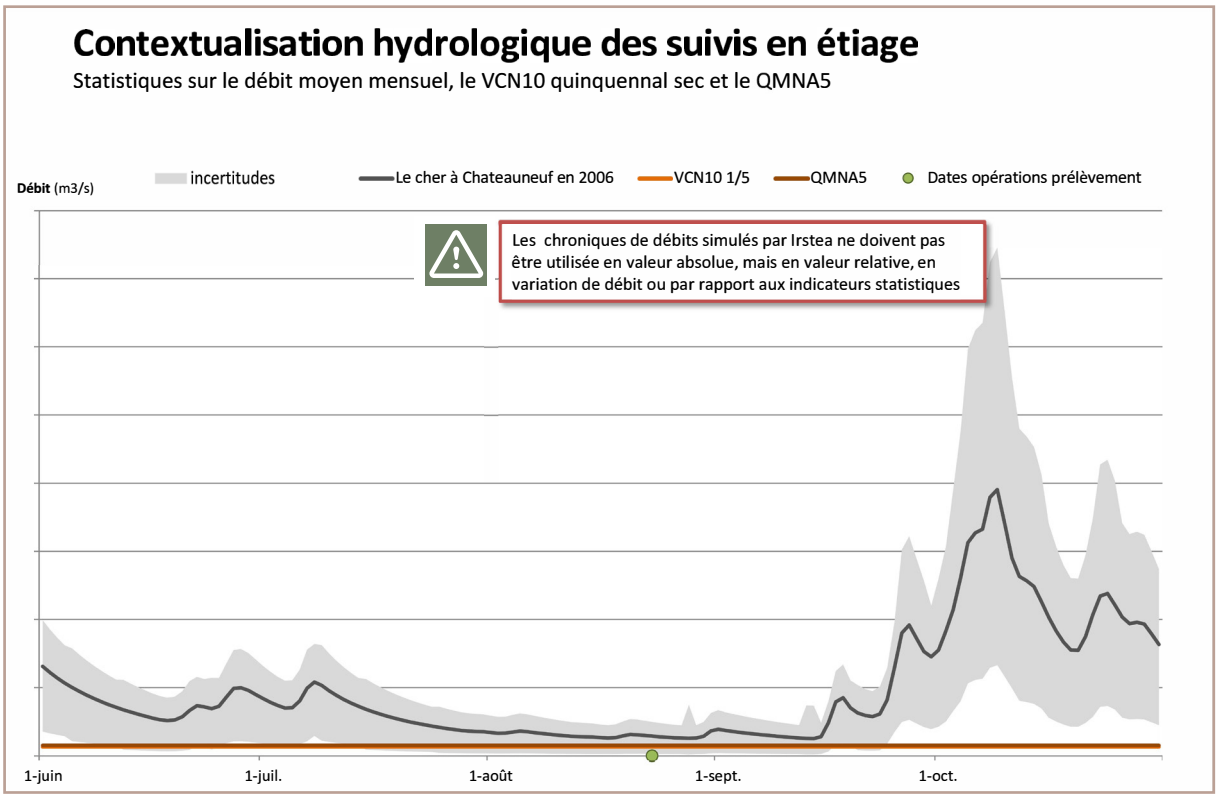


Figure 64 - *Exemple de contextualisation hydrologique des suivis en étiage sur le Cher à Châteauneuf en 2006 (source des données : Reconstitution de chroniques hydrologiques Irstea sur le site du projet Carmen http://carmen.carmencarto.fr/66/AFB_Reconstitution-chroniques-hydrologiques.map)*

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 Clotaire 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 :

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

  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 :

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

- **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.

Fiche 9 - Annexe 2

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 θj.
- **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 θj.
- **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.

Eléments 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, jaugeages 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

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.*

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) ;

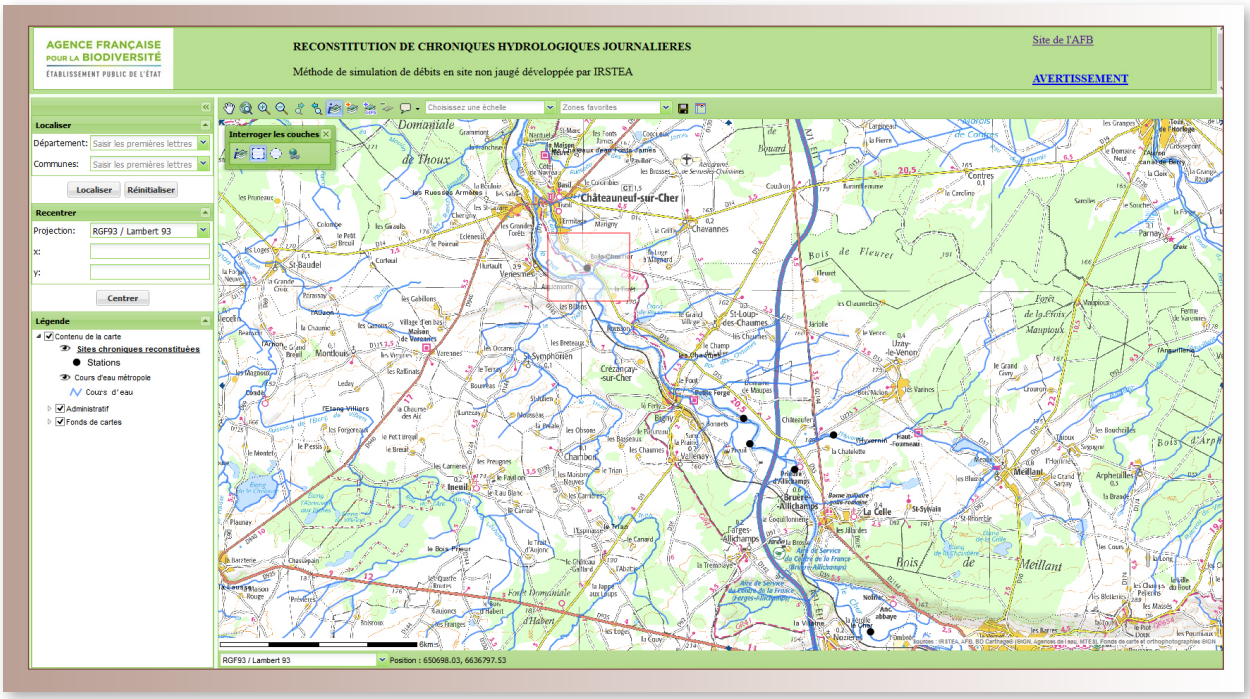
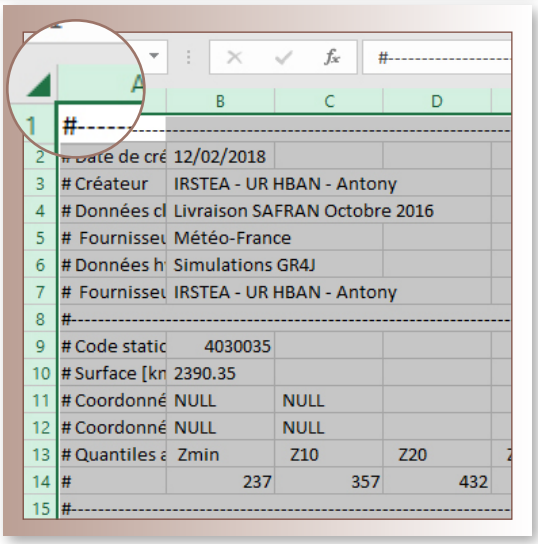


Figure 65 - *Sélection des stations sur l'outil cartographique du projet Carmen.*

- 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 »**.



	B	C	D
1	#----------		
2	# Date de cré	12/02/2018	
3	# Créateur	IRSTEA - UR HBAN - Antony	
4	# Données cl	Livraison SAFRAN Octobre 2016	
5	# Fournisseu	Météo-France	
6	# Données h	Simulations GR4J	
7	# Fournisseu	IRSTEA - UR HBAN - Antony	
8	#----------		
9	# Code static	4030035	
10	# Surface [kn	2390.35	
11	# Coordonné	NULL	NULL
12	# Coordonné	NULL	NULL
13	# Quantiles a	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 ».

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

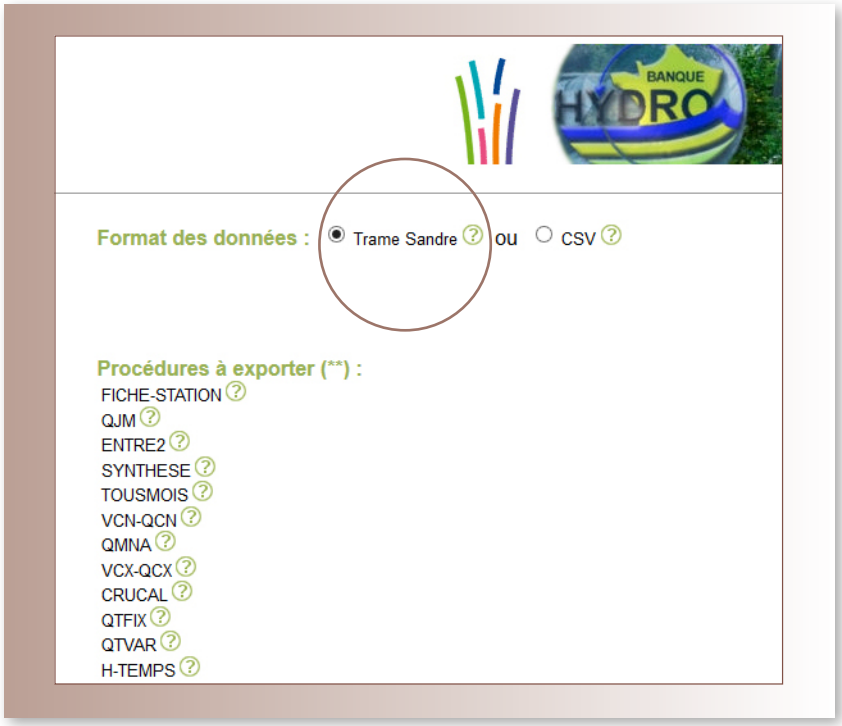


Figure 67 - *Banque hydro - sélection des formats d'export*

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.

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.

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).

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 (m3/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

(moyenne)
15.00 [13.90;16.20]

Fréquence	Quinquennale sèche	Médiane	Quinquennale humide
Débits (m3/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 (m3/s)	VCN10 (m3/s)	QMNA (m3/s)
Biennale	0.350 [0.290;0.430]	0.480 [0.390;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 (m3/s)	
Xo	119.000	
Gradex	[illegible].800	
Biennale	140.0 [[illegible]160.0]	
Quinquennale	220.0 [[illegible]250.0]	
Décennale	2[illegible].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 (km²)	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.

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.

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.

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

Pour les enregistreurs Hobo :
- ouvrir le logiciel HOBOware Pro ;

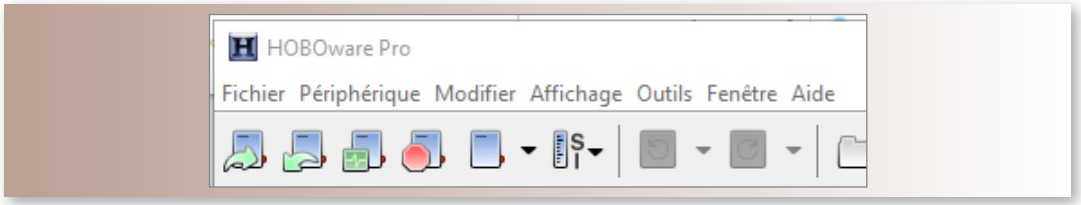


Figure 73 - *Accueil du logiciel HOBOware Pro.*

- configurer les préférences dans le logiciel HOBO.

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

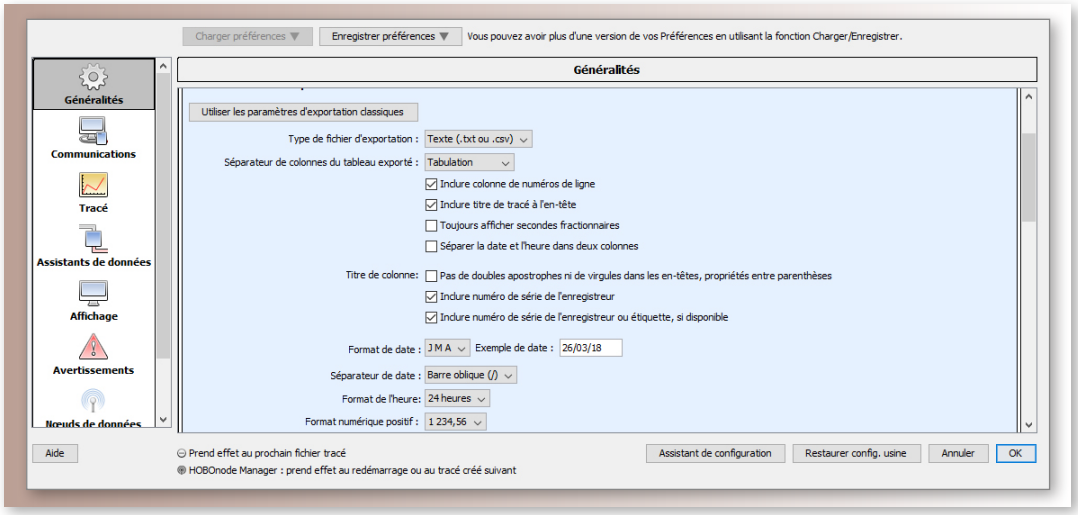


Figure 74 - *Gestion des préférences du logiciel HOBOware.*

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

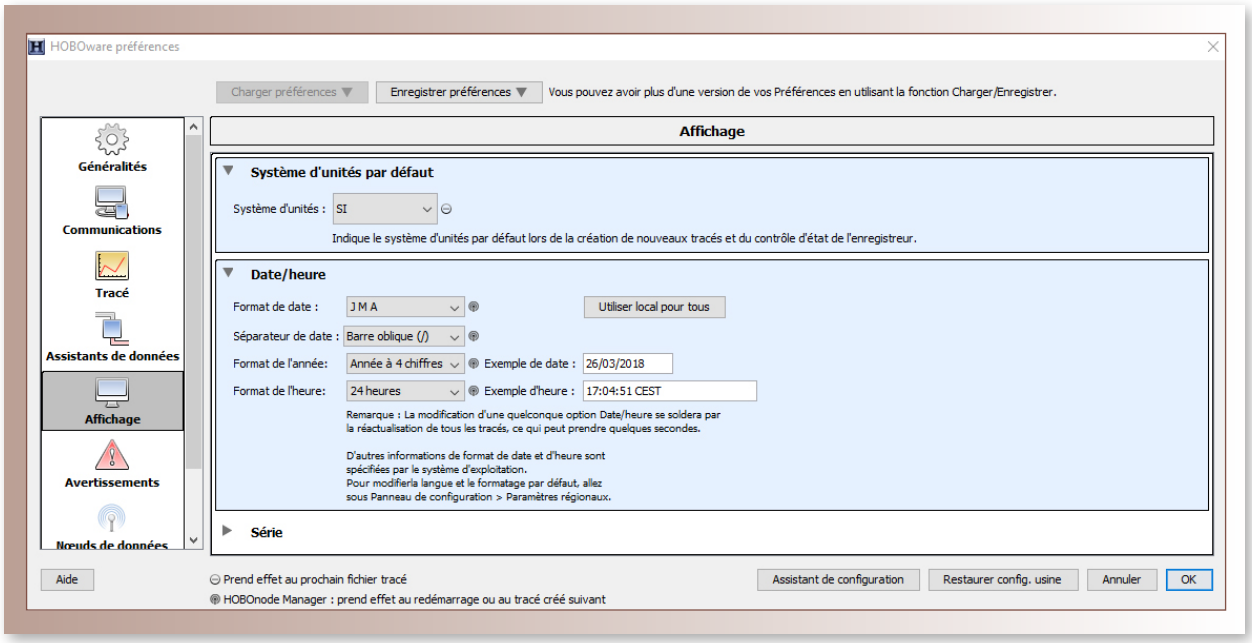


Figure 75 - *Vérification de la configuration dans le logiciel HOBOware.*

- Puis ouvrir le fichier hobo (Figure 76) ;

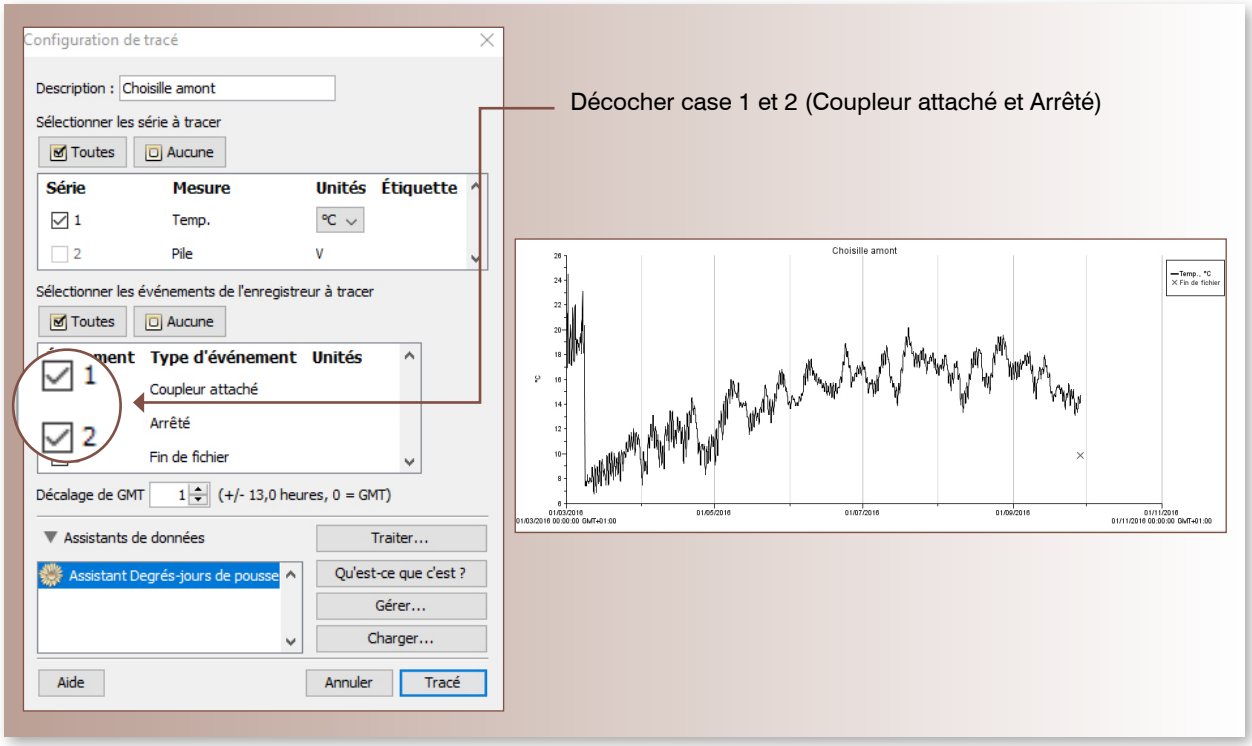


Figure 76 - *Procédure et visualisation du fichier issu du logiciel HOBOware (exemple sur la Choisille de Beaumont).*

- Passage au format .txt ;

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

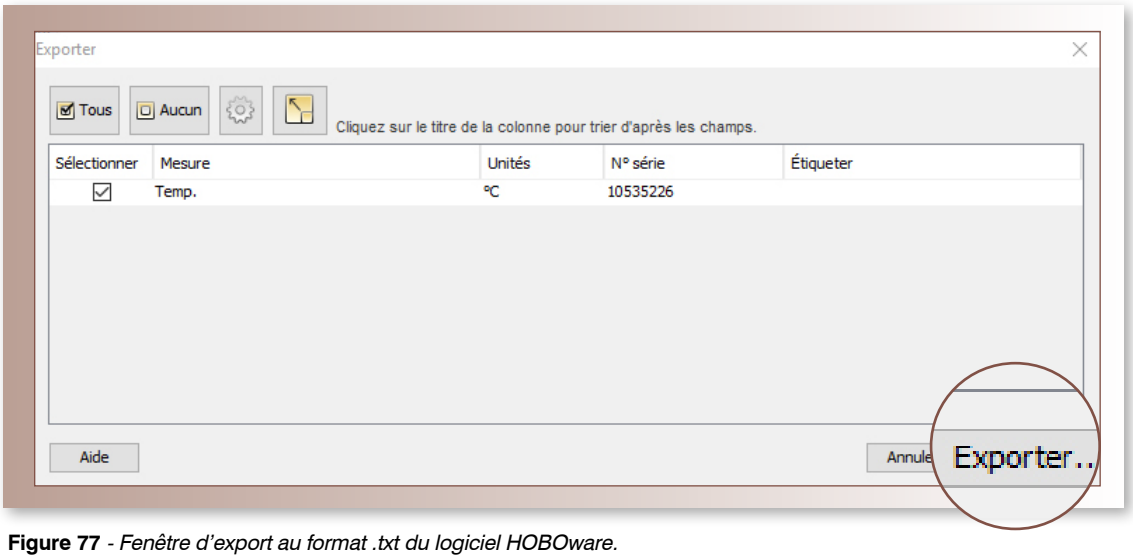


Figure 77 - *Fenêtre d'export au format .txt du logiciel HOBOware.*

- 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.

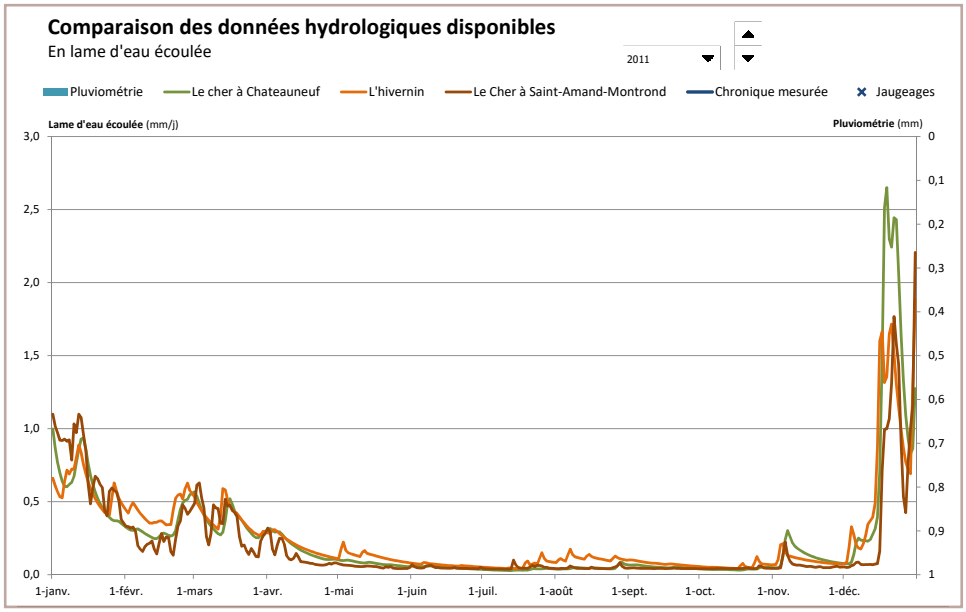


Figure 78 - *Visualisation de l'onglet « Graph comparaison stations » (exemple sur le Cher).*

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.

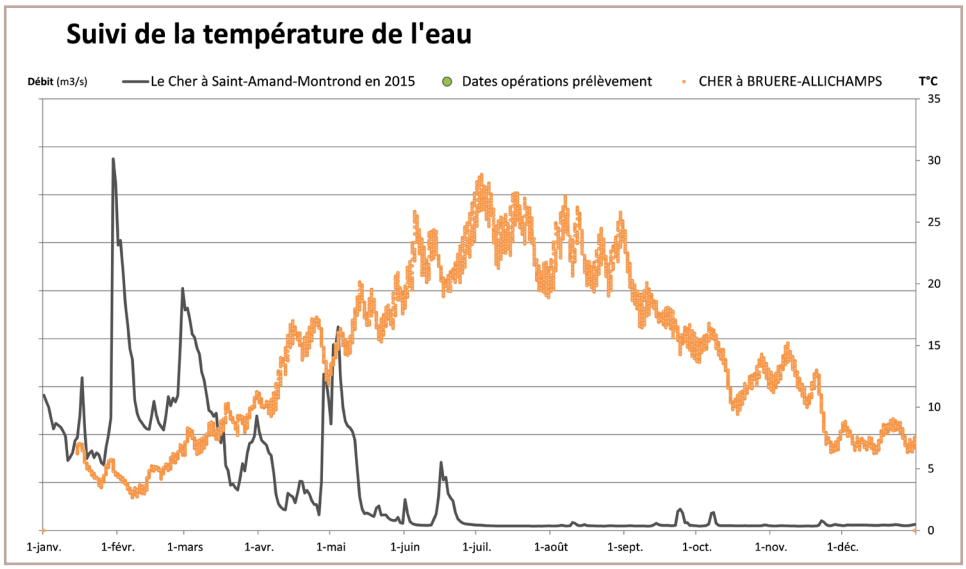


Figure 79 - *Visualisation de l'onglet « Graph température » (exemple sur le Cher).*

⚠ *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).

10 Connexions avec la nappe

Caractérisation des liens nappe/cours d'eau et zones humides associées

Objectifs

Un suivi piézométrique permet de suivre l'évolution du niveau de la nappe accompagnatrice du cours d'eau. Il peut s'agir d'un suivi de la nappe seule et de ses évolutions saisonnières ou liées aux événements hydrologiques, ou d'un suivi du lien entre niveau d'eau du cours d'eau et niveau de la nappe.

Une évolution du niveau de la nappe accompagnant le cours d'eau peut avoir des conséquences sur les milieux naturels à proximité : alimentation des annexes hydrauliques, évolution des fonctionnalités des zones humides, dessèchement, pourrissement ou favorisation de la ripisylve, selon que le niveau diminue ou augmente et selon les espèces qui la composent.

Les usages peuvent aussi être affectés : en cas de baisse du niveau de la nappe, les stations de pompage peuvent rencontrer des problèmes. Selon la géologie du sol, il peut également y avoir un risque de déstabilisation d'ouvrages et/ou d'habitations.

Les travaux d'aménagements anciens des cours d'eau (seuil mais aussi mise en bief de cours d'eau, rectification, recalibrage, curage voire busage) ont modifié les liens entre les cours d'eau et leurs nappes d'accompagnement. Dans les cas de mise en bief par exemple, les cours d'eau sont généralement perchés et une partie de l'eau du cours d'eau est drainée par la nappe. À l'inverse, dans les cas de curage anciens et répétés par exemple, les cours d'eau s'incisent, et l'eau de la nappe est drainée par le cours d'eau (Figure 80).

Ainsi, les opérations de restauration peuvent modifier à la fois le niveau de la nappe et ses évolutions saisonnières, et le sens et le volume des échanges nappe-rivière.

Dans le cas d'un effacement d'ouvrage par exemple, il s'agira avant tout de suivre l'évolution du niveau de la nappe et de s'assurer que les usages de celle-ci peuvent être maintenus.

Dans le cas d'une remise dans le talweg, d'un reméandrage ou de la reconstitution du matelas alluvial, il s'agira d'abord de suivre l'évolution des échanges nappes-rivières, et ainsi de s'assurer d'un retour à un fonctionnement plus équilibré (limitation des phénomènes de drainage d'un côté ou de l'autre). L'évolution de ces échanges pouvant entraîner une modification du niveau de la nappe, il sera également nécessaire de suivre l'évolution du niveau de la nappe, ici aussi dans le cadre des usages de celle-ci, mais aussi pour le fonctionnement des annexes, zones humides et ripisylve associées.

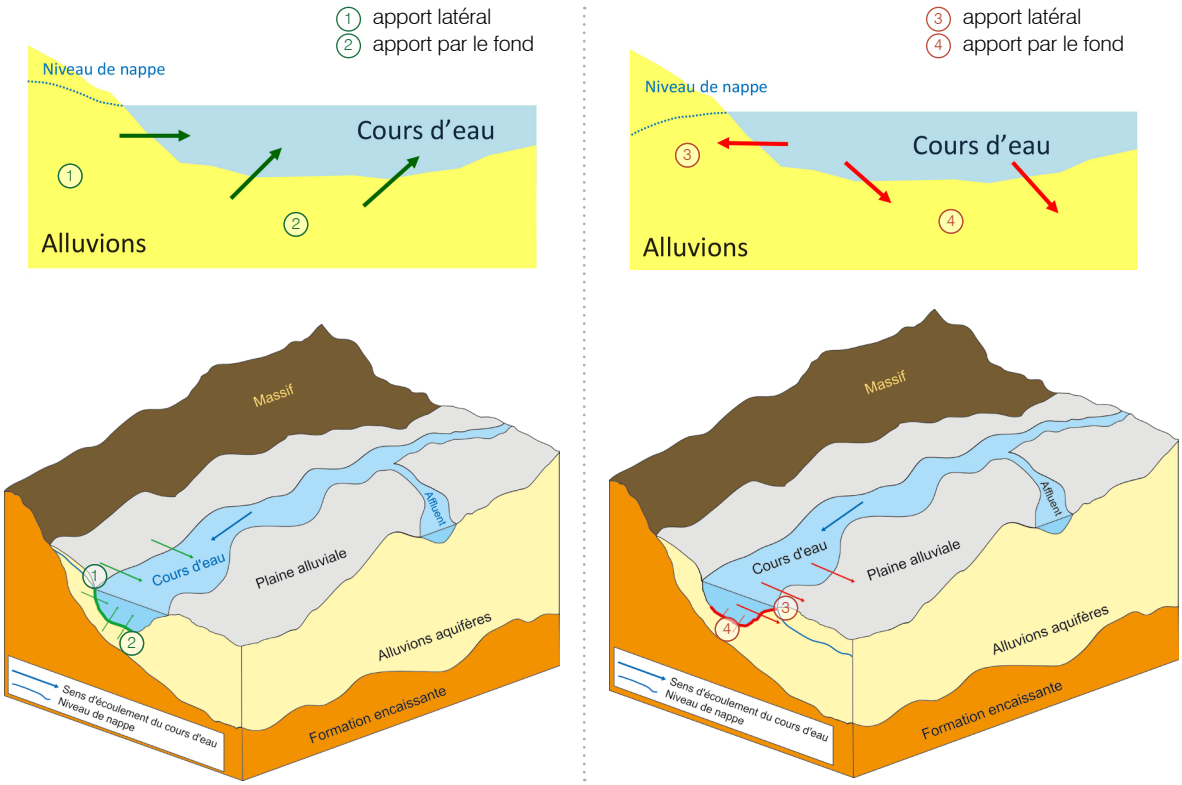


Figure 80 - *Sens des échanges nappe-cours d'eau.*
À gauche, cas d'un cours d'eau incisé, le cours d'eau draine la nappe. À droite, cas d'un cours d'eau perché, la nappe draine le cours d'eau. (in Guide interactions nappes-rivières *[59]).*

Dans le cadre du SSM, l'objectif sera donc, d'une part de caractériser les échanges entre le cours d'eau et la (les) nappe(s), puis d'autre part de définir le niveau de(s) nappes(s) accompagnatrice(s), et par la suite de suivre les effets des travaux de restauration sur ce niveau et ces échanges, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif.
Pour chaque projet susceptible de rehausser ou d'abaisser significativement le fond topographique du cours d'eau et donc le niveau de la nappe, cette analyse mérite d'être développée.

Méthodes et protocoles

Il n'existe pas à ce jour de méthode standardisée voire même définie dans la bibliographie pour l'évaluation des effets des opérations de restauration de cours d'eau sur les échanges nappes/rivières. Ces mécanismes sont particulièrement complexes à décrire car relevant de différentes spécialités (hydrogéologues, hydrauliciens, botanistes, hydromorphologues…). Les connaissances scientifiques à mobiliser sont donc nombreuses et éparses, parfois anciennes, et les relations entre les différentes disciplines sont variables dans le temps et l'espace [59, 60]. En ce sens, et avant d'engager un suivi piézométrique dédié ou toute autre mesure *in situ*, il est proposé une démarche en deux temps pour concevoir ce suivi.

Étude hydrogéologique préalable

En premier lieu, il convient de vérifier sur une emprise fonctionnelle représentative du site restauré (définition de l'emprise représentative, voir Tableau 11) sur les 2 rives, la présence ou non d'une nappe alluviale sur la base d'une analyse sommaire reposant sur une visite de terrain et l'analyse de documents existants (carte géologique montrant que le cours d'eau coule sur une roche aquifère - Fz - , exploitations de la nappe par pompages et puits…). Cette approche doit permettre de déterminer s'il existe une nappe potentiellement connectée au cours d'eau.

Remarque

Lors de la visite de terrain, on recherchera notamment la présence de zones humides dans le lit majeur du cours d'eau, pouvant être révélatrices de remontées de nappe, et/ou la présence d'un substratum imperméable, indiquant une absence d'échanges entre une éventuelle nappe sous-jacente et le cours d'eau.

Tableau 11 - *Définition de l'emprise fonctionnelle du suivi de nappe(s) accompagnatrice(s)*

Nature de l'opération	Éléments d'aide à la définition de l'emprise fonctionnelle
Suppression ou contournement d'ouvrage [61]	■ **Limite amont** - remous liquide ou nouvel obstacle ■ **Limite aval** - 100 fois la Lpb en aval de l'ouvrage, seuil arbitraire : on observe souvent la réactivation de zones humides « historiques » en aval ■ **Limite latérale :** combinaison des contraintes naturelles et anthropiques au projet Naturelles - En l'absence d'étude hydrogéologique, la délimitation de la limite latérale peut être réalisée à partir des alluvions récentes Fz (voir la carte géologique du secteur) Anthropiques - Les contraintes anthropiques au projet seront définies. En effet, la présence d'infrastructures linéaires (routes, voies ferrées), de surfaces bâties sont autant d'éléments qui déterminent les contraintes physiques
Remise dans le talweg, reméandrage, recharge granulométrique	■ **Limite amont/aval : linéaire restauré** ■ **Limite latérale :** combinaison des contraintes naturelles et anthropiques au projet Naturelles - En l'absence d'étude hydrogéologique, la délimitation de la limite latérale peut être réalisée à partir des alluvions récentes Fz (voir la carte géologique) Anthropiques - Les contraintes anthropiques au projet seront définies. En effet, la présence d'infrastructures linéaires (routes, voies ferrées), de surfaces bâties sont autant d'éléments qui déterminent les contraintes physiques

Dans les cas où il n'y a naturellement pas ou peu de relations hydrodynamiques (notamment cours d'eau circulant sur formations peu perméables ou imperméables, comme les marnes ou les argiles sans nappe phréatique), aucun suivi hydrogéologique n'est à mettre en place et les effets de l'opération de restauration sont alors considérés comme faibles à nuls sur l'évolution du niveau des nappes sous-jacentes.

Par ailleurs, dans les environnements de type karstique, il n'existe pas de méthode pour réaliser un suivi de la nappe à des coûts raisonnables. Ainsi, sauf en cas d'enjeux majeurs, nécessitant l'intervention d'équipes spécialisées, le suivi ne sera pas mis en place sur les cours d'eau de type karstique.

Si la présence d'un aquifère, susceptible d'être en connexion avec le cours d'eau, est avérée, il sera recherché la présence d'ouvrages (puits, forages, piézomètres) dans la zone d'emprise fonctionnelle pouvant permettre de mesurer des niveaux de nappe et/ou de prélever des eaux souterraines. Les principaux ouvrages sont bancarisés dans la base de données du sous-sol du BRGM et les coupes géologiques associées peuvent être disponibles. Les points d'eau disposent d'informations supplémentaires stockées dans la banque de données ADES disponible depuis le même site (données de hauteur d'eau et/ou de qualité d'eau suivant les points).

http://infoterre.brgm.fr

Il existe également des systèmes d'information pour la gestion des eaux souterraines régionaux (SIGES) pour 10 territoires, mettant à disposition des données à l'échelle plus locale.

http://www.brgm.fr/projet/siges-portails-thematiques-regionaux-sur-eaux-souterraines

Cette recherche permettra de connaître la nature du sous-sol et l'altitude du toit de la nappe dans certains cas, voire l'évolution du niveau piézométrique en fonction des conditions hydrologiques afin de caractériser en première approche le fonctionnement hydrogéologique du secteur.

Si des cartes piézométriques sont disponibles (les cartes sont obtenues en combinant les données de hauteur d'eau issues de plusieurs piézomètres), il est parfois possible de savoir si régionalement le cours d'eau draine la nappe ou alimente la nappe aux dates des mesures utilisées pour faire la carte. Attention, cela ne signifie pas que le sens des échanges locaux au site de restauration est le même que celui observé régionalement sur la carte.

Cette analyse préalable doit ainsi permettre de produire une première approche de l'existence des échanges nappes/rivières sur le secteur d'étude dans le but de dimensionner un suivi plus fin avant/après travaux, en particulier par le biais de mesures piézométriques réalisées sur des ouvrages existants et/ou à mettre en place pour les besoins du suivi.

Mesures *in situ* (piézométrie)

Pour comprendre l'évolution des échanges nappe-rivière, il est proposé de suivre le niveau de la nappe à proximité du site et le niveau du cours d'eau à différents moments de l'année (lorsque le cours d'eau est à l'étiage, lorsqu'il est proche du module et à la crue journalière de fréquence biennale - voir pour mettre en place ce suivi la *Fiche 9 [Hydrologie]*). En effet, dans le cadre du SSM, on systématisera une mesure de hauteur d'eau dans le cours d'eau lors des relevés de piézomètres. Ceci permettra de connaître les variations du niveau de la nappe relativement au niveau du cours d'eau, plus informatif qu'une hauteur de nappe seule car prenant en compte une partie de la variabilité saisonnière et interannuelle.

Remarque

*Les nappes d'accompagnement peuvent présenter une grande variabilité interannuelle, selon la pluviométrie notamment. Aussi, un état initial sur plusieurs années sera privilégié (*a minima *3 ans).*

L'écoulement se fait en suivant le gradient de pente de la nappe ; on supposera qu'à l'interface nappe-rivière, la nappe est au niveau de la rivière, on peut donc en déduire le sens des échanges nappe-rivière à partir du niveau de la nappe comparé à celui de la rivière.
L'effort consacré au suivi de la nappe sera proportionné au budget alloué à ce suivi, généralement en rapport avec les enjeux. En cas d'enjeu fort associé à des usages (pompages, stabilité des constructions) ou à des habitats d'intérêt à conserver ou restaurer, le suivi le plus complet sera préconisé. En l'absence d'enjeu particulier, un suivi plus léger pourra être mis en place (Tableau 12).
Un exemple de suivi aux différents niveaux d'efforts est présenté Figure 81.

Tableau 12 - *Mise en œuvre du suivi selon l'importance des enjeux et donc de l'effort de suivi*

Effort du suivi	Mise en œuvre	Fréquence de la mesure	Matériel
Important	3 transects de 4 piézomètres sur chaque rive	Fréquence horaire	sondes enregistreuses
	2 transects de 3 piézomètres sur chaque rive	4 mesures *a minima*	sonde manuelle à bip
	Un transect de 3 piézomètres sur chaque rive	4 mesures *a minima*	sonde manuelle à bip
	Un transect de 3 piézomètres sur une seule rive	Fréquence horaire ou 4 mesures *a minima*	sonde enregistreuse ou sonde manuelle
Faible	Un seul piézomètre, sur une rive	Fréquence horaire Ou 4 mesures *a minima*	sonde enregistreuse ou sonde manuelle

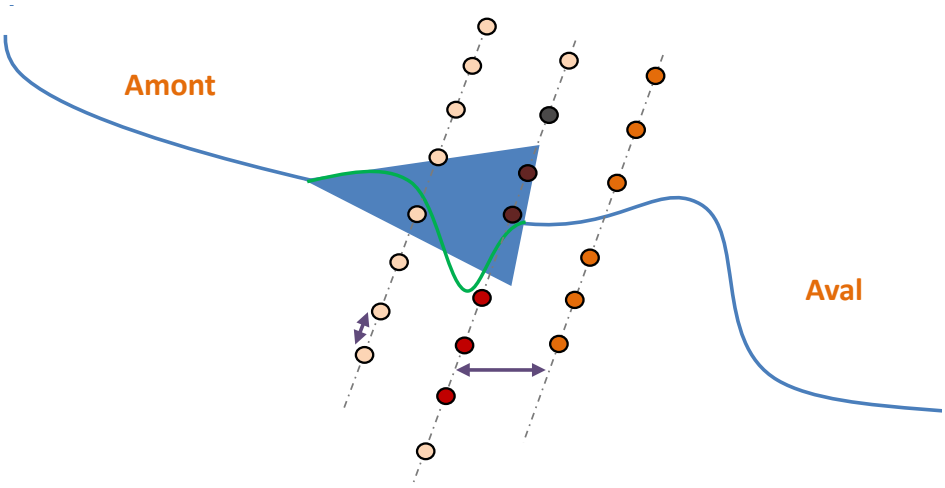


Figure 81 - *Exemple de mise en place des piézomètres, dans le cas d'un effacement d'ouvrage (la mise en place sera similaire pour les autres opérations de restauration). Le suivi le plus simple n'est constitué que d'un seul point (le point noir, rive gauche). Plus le suivi est complet plus l'on y rajoute des piézomètres, jusqu'au plus clair, le plus complet. La distance entre les transects et entre les piézomètres doit être estimée au regard des caractéristiques du site.*

Au-delà des préconisations ci-dessus, la fréquence et la période de suivi dépend des objectifs donnés à ce suivi : en cas de risque lié à l'abaissement, le comportement de la nappe sera principalement suivi à l'étiage ; en cas de suivi de l'augmentation du niveau de la nappe, le suivi pourra être réalisé lorsque les zones humides riveraines sont en eau. En cas d'enjeux forts, il est possible de suivre les piézomètres toute l'année.

A minima, quatre campagnes de mesures sont préconisées : deux en saison hivernale, et deux en saison estivale. Dans les deux cas, une mesure sera réalisée peu après un épisode pluvieux ; la seconde sera réalisée à distance d'événements pluvieux.

La distance à respecter entre les piézomètres d'un même transect et d'un transect à l'autre dépend de la perméabilité du substrat, des flux circulants et de la configuration du site (et des modifications attendues des niveaux de nappe). Entre les piézomètres, la distance est généralement de l'ordre de la dizaine de mètres, en restant dans l'emprise fonctionnelle prédéfinie. Dans le cas d'enjeux biodiversité, dans les annexes hydrauliques notamment, il sera également possible d'installer des piézomètres dans les zones humides d'intérêt (pour la mise en place et l'interprétation, voir la boîte à outils RhoMéO [62] ou la fiche du FMA [63]).

Remarque

Pour les cours d'eau perchés (déplacés hors de leur talweg), le suivi de la reconnexion avec la nappe et l'amélioration de l'alimentation du cours d'eau pourront être suivis via des mesures de débits en différents points du réseau superficiel, notamment en amont du tronçon « déplacé » et dans le tronçon déplacé en cas de remise dans le talweg. Les mesures piézométriques peuvent apporter dans ce cas un complément de connaissance.

Pour la mise en œuvre des mesures piézométriques, des éléments techniques détaillés sont disponibles dans la boîte à outils Rhoméo [62] pour le suivi des zones humides. Plus particulièrement les fiches Indicateur - I03 (p.24) et Protocole - P03 (p.54) fournissent un ensemble de recommandations sur la réalisation de ces mesures. La fiche du Forum Marais Atlantique [63] présente également des préconisations techniques (fiche hydropériode). Ces éléments ont été produits à des fins de compréhension du fonctionnement hydrologique des zones humides mais restent applicables pour les opérations de restauration de cours d'eau (notamment suivis en lit majeur d'annexes hydrauliques, de prairies humides…) ; les recommandations concernant les indicateurs restent à adapter au cas de la restauration.

Concernant la profondeur à laquelle installer les piézomètres, il faudra *a minima* se placer au niveau de la couche en contact avec le cours d'eau (qui pourra être assez profonde en cas d'incision). Sauf enjeu particulier identifié (usage des nappes sous-jacentes, fonctionnement particulier), il ne sera pas nécessaire de rechercher les aquifères plus en profondeur.

Remarque

La mise en place d'un piézomètre est soumise à une demande d'autorisation au titre de la Loi sur l'eau (code de l'environnement - Article R214-1).

Exploitation des données, bancarisation

Pour caractériser le sens des échanges et interpréter les résultats, on s'appuiera sur la fiche outils n° 1 du guide technique interactions nappes-rivières [59], « analyse géomatique des niveaux d'eau ».
Par ailleurs, il sera utile de confronter les résultats du suivi obtenu aux résultats obtenus via les suivis de l'hydrologie et de la température. Ceci permettra d'avoir des indications sur le sens et la fréquence des échanges entre la nappe et le cours d'eau.
Dans un premier temps, les fichiers de données seront stockés dans la banque de données du SSM (voir *Déclaration, bancarisation, consultation des données du suivi scientifique minimal*). Par la suite, l'intégration dans ADES, Banque nationale d'accès aux données sur les eaux souterraines, sera privilégiée.

http://www.ades.eaufrance.fr/

Méthodes complémentaires

Il faut noter qu'au-delà des mesures piézométriques, un ensemble d'autres paramètres peuvent être relevés et nécessaires, selon les enjeux et caractéristiques du site, pour caractériser les échanges nappes-rivières et comprendre les modifications de ces relations suite aux travaux :

- structure de la berge et colmatage (voir *Fiche 1 [Hydromorphologie (échelle station)]*) ;
- géochimie de la nappe (à mettre en lien avec la physico-chimie des eaux superficielles)[60] ;
- végétation aquatique[59] ;
- invertébrés souterrains[59] ;
- pédologie et habitats (flore) en lit majeur.

Les éléments techniques relatifs à ces protocoles complémentaires et à leur interprétation peuvent être consultés au sein des ouvrages listés dans la bibliographie.

Bibliographie spécifique

59. Paran, Frédéric et Bénédicte Augeard, 2017. *Guide technique Interactions nappe/rivière, des outils pour comprendre et mesurer les échanges*. Guides et Protocoles. Agence Française pour la Biodiversité.106 pages.

60. Paran, Frédéric, *et al.*, 2015. *Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire – Guide méthodologique*. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) & GRAIE (Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau).178 pages.

62. Collectif RhoMéO, 2014. *La boîte à outils de suivi des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée*. Conservatoire d'espaces naturels de Savoie.147 pages.

63. Forum des Marais Atlantiques, 2015. *Mallette d'indicateurs de travaux et de suivis en zones humides*. Agence de l'eau Loire-Bretagne et Conseil régional des Pays de la Loire.189 pages.

11 Reconnaissance terrain

Station Restaurée amont/Restaurée aval/Témoin altérée/Témoin non altérée/Échelle étendue			
Nom du réseau et code Sandre			
Cours d'eau			
Commune (département)			
Précision (lieu-dit/Pont/...)			
Justificatif positionnement			
Accès (route/chemin/parcelle à traverser...) - préciser rive droite ou rive gauche			
Mesures et positionnement des limites			
Largeur pleins bords mesurée			
Largeur mouillée mesurée			
Sinuosité (cocher la classe de sinuosité)	Rectiligne (<1,05) Sinueux (1,05<x<1,25) Très sinueux (1,25<x<1,5) Méandriforme (>1,5)		
Coordonnées limite aval Carhyce (L93)	X Y	Si estimées : coordonnées limite amont Carhyce X Y	
Autres coordonnées de points de prélèvements (L93)			
Observations in situ		N° de Photo	Légende
Présence d'altérations (rejets, berges renforcées, etc..)			
Usages identifiés (pompages du cours d'eau, de la nappe)			
Occupation du sol des parcelles jouxtant la station			
Propriétaires identifiés sur la station si rencontrés - noms et coordonnées			
Autres informations (exemple : Poissons : nécessité de pose d'un filet - Diatomées, le cas échéant : nécessité de racler un substrat artificiel, nécessité de pose de substrats)			

Schéma simplifié de la station

Notice

- ***Cours d'eau :*** préciser le nom du cours d'eau, surtout en cas d'impossibilité de positionner une des stations *Témoin* sur le même cours d'eau ou de volonté de suivi *Échelle* étendue sur un autre cours d'eau.
- ***Observations* in situ** : visualisation d'altérations ou d'usages lors du passage sur la station et description de l'occupation du sol des parcelles jouxtant la station.
- ***Largeur pleins bords/mouillée mesurée*** : relever quelques mesures de Lpb afin d'avoir un ordre de grandeur, idem pour la largeur mouillée. **Sinuosité** : entourer la sinuosité visible.
- ***Schéma simplifié de la station*** : réaliser un schéma de positionnement général de la station par rapport à des repères identifiables, et positionner les points Carhyce (*a minima*) et les autres, notamment si un léger décalage est nécessaire.

12 Exemple de fiche pour un site de restauration

0600000402	Le Drac	à	SAINT BONNET-EN-CHAMPSAUR	05

Reconstitution du matelas alluvial

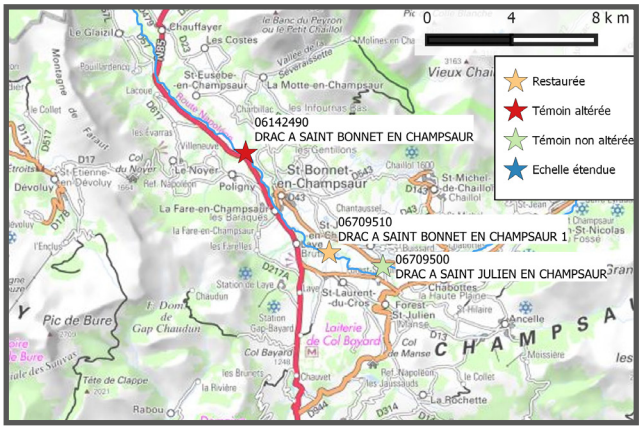
Détail de l'opération :

Linéaire restauré (m)	3700
Largeur plein bords naturelle (m)	15
Agence	AERMC
DIR	DIR PACA
MO travaux	Communauté locale de l'eau du Drac amont - CLEDA

MO des suivis	AERMC

Type de travaux réalisés - Secondaires	Modification de la géométrie du lit sans modification de l'emprise
Type de travaux réalisés - Accessoire	
Code ROE principal	
Hauteur de chute hors ROE (m)	
Date effective début des travaux	01/11/2013
Date effective fin des travaux	31/05/2014

Début des suivis	15/02/2010



© IGN 2012

© Marlène Rolan-Meynard - Irstea

Risque des ME concernées (EDL 2013)

Risque total	
1	Pas de risque
2	Doute sur le risque
3	Risque de non-atteinte

Pressions	
Y	Oui
N	Non
U	Inconnu

Masse d'eau	DR353b	Le Drac, du Drac de champoleone à l'amont de St Bonnet

1	Risque total	Y	Prélèvements	N	Autres
N	Poll. Ponctuelles	Y	Régime Eaux		
N	Poll. Diffuses	Y	Alter. Morpho		

Stations associées

Code station	Libellé station	Finalité	Code ME	Détail situation	Coordonnées limite aval point Lit	
					Coordonnées XY L93	
06709500	DRAC à SAINT JULIEN-EN-CHAMPSAUR	Témoin non altérée	DR353b	Référence amont	947 014	6 399 359
06142490	DRAC à SAINT BONNET-EN-CHAMPSAUR	Témoin altérée	DR353b	Aval travaux	942 019	6 404 852
06709510	DRAC à SAINT BONNET-EN-CHAMPSAUR 1	Restaurée	DR353b	Travaux	945 011	6 400 157

Date de saisie 28/09/2017