

ETUDE E190366 : AMENAGEMENTS DE BOIS DU CURE ET MALASSIS.
EXPERTISE DES ENJEUX ECOLOGIQUES ET DES RISQUES ECO-
MORPHOLOGIQUES SUR LA CURE ASSOCIES A LA GESTION HYDROLOGIQUE
DES AMENAGEMENTS.

Maître d'ouvrage



La centrale de Bois-de-Cure

Volet Hydrologie

Auteurs : Philippe BARAN
Vincent CORNU

Janvier 2020

ECOGEA
ETUDES ET CONSEILS EN GESTION
DE L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE
352 avenue Roger Tissandié
31600 MURET
Tél : 05 62 20 98 24
ecogea@wanadoo.fr
www.ecogea.fr

Citation

BARAN P., CORNU V. 2019. Aménagements de Bois du Cure et Malassis. Expertise des enjeux écologiques et des risques éco-morphologiques sur la Cure associés à la gestion hydrologique des aménagements – Volet Hydrologie. Rapport ECOGEA E190366 pour EDF, 40p.

Table des matières

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	1
2. RAPPEL DES CARACTERISTIQUES DES AMENAGEMENTS ET DE LA CURE	2
2.1. Caractéristiques et fonctionnement des aménagements	2
2.1.1. Caractéristiques des aménagements	2
2.1.2. Fonctionnement des aménagements	3
2.2. Principales caractéristiques de la zone d'étude	4
3. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE LA CURE EN LIEN AVEC LES AMENAGEMENTS DE BOIS-DE-CURE ET MALASSIS	5
3.1. Objectifs	5
3.2. Méthodologies	5
3.2.1. Données disponibles	5
3.2.1. Méthodes d'analyses	6
3.3. Résultats.....	8
3.3.1. Régime hydrologique de la Cure au niveau des stations hydrométriques	8
3.3.2. Régime hydrologique du tronçon court-circuité de Bois de Cure	11
3.3.3. Analyse des variations de débits	12
3.3.4. Analyse des étiages	22
3.4. Thermie.....	30
3.4.1. Données disponibles	30
3.4.2. Résultats	30
4. BIBLIOGRAPHIE.....	34

Liste des figures

Figure 1 : Situation hydrographique des aménagements étudiés.....	2
Figure 2 : Localisation des stations hydrologique de la zone d'étude (en bleu : banque HYDRO; en rouge : EDF).....	6
Figure 3 : Débits moyens mensuels de la Cure à Marigny, Foissy-lès-Vézelay et Arcy-sur-Cure pour la période 1997-2018 (période commune aux 3 stations hydrologiques).....	9
Figure 4 : Évolutions mensuelles des débits spécifiques de la Cure à Marigny-l'Eglise, Foissy-lès-Vézelay et Arcy-sur-Cure.....	10
Figure 5 : Débits moyens mensuels de la Cure à Marigny, à Domecy-sur-Cure et dans la partie aval du TCC de Bois-de-Cure pour la période 1961-1997 (période commune aux 3 points).....	11
Figure 6 : Débit instantané de la Cure à Foissy, et date de début et de fin des baisses d'éclusées détectées par l'indicateur éclusée (période 01/01/2016 – 31/10/2018).....	16
Figure 7 : Distribution des baisses détectées par l'indicateur entre le 01/01/2016 et le 31/10/2018 en fonction de leur amplitude.....	16
Figure 8 : Cas de 3 baisses détectées par l'indicateur durant la période 11/11/2017 au 05/12/2017 où le débit turbiné par Bois de Cure est restitué assez fidèlement par déversement à Malassis (B1 et B2) ou par turbinage (B3).....	17
Figure 9 : Cas de 2 baisses détectées par l'indicateur durant la période 23/12/2017 au 29/12/2017 où le débit turbiné par Bois de Cure est restitué par turbinage à Malassis, mais avec apparition de variations significatives non explicables avec les débits moyens journaliers des aménagements.....	17
Figure 10 : Distribution des baisses détectées par l'indicateur entre le 01/01/2016 et le 31/10/2018 en fonction de leur amplitude et du type de baisse.....	18
Figure 11 : Comparaison des débits moyens mensuels d'octobre à décembre 2019 par rapport à la moyenne 1979-2009.....	18
Figure 12 : Débits à pas de temps variable enregistrés à la station de Foissy-lès-Vézelay entre octobre et décembre 2019.....	19
Figure 13 : Comparaison des débits à pas de temps variable enregistrés à la station de Foissy-lès-Vézelay d'octobre et décembre 2019 avec les débits de Malassis et les turbinés de Bois de Cure.....	20
Figures 14, 15, 16 et 17 : Zooms sur les débits à pas de temps variable enregistrés à la station de Foissy-lès-Vézelay, au niveau de l'aménagement de Malassis et en aval de Bois de Cure.....	21
Figure 18 : Évolution du débit moyen des mois de juillet à septembre (QMOY), du débit minimum moyen mensuel (QMNA) et du débit minimum sur 10 jours consécutifs (VCN10) de la Cure à Marigny entre 1962 et 2018.....	23
Figure 19 : Évolution des déficits annuels d'étiage sur la Cure à Marigny-l'Eglise entre 1962 et 2018.....	23
Figure 20 : Évolution des déficits d'étiage par décennies sur la Cure à Marigny-l'Eglise entre 1962 et 2018.....	24
Figure 21 : Évolution du débit moyen des mois de juillet à septembre (QMOY), du débit minimum moyen mensuel (QMNA) et du débit minimum sur 10 jours consécutifs (VCN10) de la Cure à Marigny entre 1997 et 2018.....	24
Figure 22 : Évolution des déficits annuels d'étiage sur la Cure à Foissy-lès-Vézelay entre 1995 et 2018.....	25
Figure 23 : Évolution des déficits d'étiage par décennies sur la Cure à Foissy-lès-Vézelay entre 1995 et 2018.....	25
Figure 24 : Évolution du débit moyen des mois de juillet à septembre (QMOY), du débit minimum moyen mensuel (QMNA) et du débit minimum sur 10 jours consécutifs (VCN10) de la Cure à Marigny entre 1962 et 2017.....	26
Figure 25 : Évolution des déficits annuels d'étiage sur la Cure à Arcy-sur-Cure entre 1962 et 2018.....	27
Figure 26 : Évolution des déficits d'étiage par décennies sur la Cure à Arcy-sur-Cure entre 1962 et 2018.....	27
Figure 27 : Évolution du débit moyen des mois de juillet à septembre (QMOY), du débit minimum moyen mensuel (QMNA) et du débit minimum sur 10 jours consécutifs (VCN10) de la Cousin à Avallon entre 1997 et 2018.....	28

Figure 28 : Évolution de nombre de jours avec déficits annuels d'étiage sur le Cousin à Avallon entre 1995 et 2018 (*pas de données en 2011).....	28
Figure 29 : Évolution des déficits d'étiage par décennies sur le Cousin à Avallon entre 1995 et 2018 (*l'année 2011 n'est pas incluse dans la période 2010-2018 : pas de données).....	29
Figure 30 : Comparaison des déficits moyens par décennies des stations hydrologiques de la Cure à Marigny-l'Eglise, Foissy-lès-Vézelay et Arcy-sur-Cure et la station du Cousin à Avallon.	29
Figure 31 : Evolution de la température moyenne mensuelle des 4 stations de suivi de la température de l'eau de la Cure.	31
Figure 32 : Enregistrement continu de la température de l'eau au niveau des 3 sites de l'étude d'impact des aménagements de Bois de Cure et Malassis (ASCONIT consultant et ARALEP, 2006).	32
Figure 33 : Enregistrement continu de la température de l'eau au niveau des 2 sites sur la Cure en aval de Malassis (Baran, 2001).....	33

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques des aménagements.....	3
Tableau 2 : Qualification du niveau de perturbation hydrologique due aux éclusées.....	7
Tableau 3 : Principales caractéristiques des stations hydrologiques entourant la zone étudiée (source : Banque HYDRO).	9
Tableau 4 : Débits caractéristiques d'étiages de la Cure au niveau des 3 stations hydrologiques.	10
Tableau 5 : Débits caractéristiques des crues de la Cure au niveau des 3 stations hydrologiques.	11
Tableau 6 : Principales caractéristiques des stations hydrologiques entourant la zone étudiée (source : Banque HYDRO).	11
Tableau 7 : Débits classés des 3 stations hydrologiques pour la période 1961-1997.....	12
Tableau 8 : Débits de crues au niveau des 3 stations pour la période 1961-1997.	12
Tableau 9 : Principaux résultats de l'indicateur éclusées annuel pour les deux stations de la Cure sur la période 2014-2018.	13
Tableau 10 : Principaux résultats de l'indicateur éclusées de la période allant de novembre à mi-mars pour les deux stations de la Cure sur la période 2014-2018.....	13
Tableau 11 : Principaux résultats de l'indicateur éclusées de la période allant de mi-mars à fin juin pour les deux stations de la Cure sur la période 2014-2018.	14
Tableau 12 : Principaux résultats de l'indicateur éclusées de juillet et août pour les deux stations de la Cure sur la période 2014-2018.....	15
Tableau 13 : Nombre de variations totales et communes entre les 3 sites de mesures sur la Cure....	20

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Suite au renouvellement de la concession des aménagements de Bois de Cure et Malassis et au classement de la rivière Cure au droit du barrage de Malassis au titre du 1^o et du 2^o de l'article L. 214-17 du code de l'environnement sur le bassin Seine-Normandie (arrêté du 18 décembre 2014), des solutions techniques permettant de limiter les impacts de l'ouvrage sur la continuité écologique ont été étudiées. Pour compléter le diagnostic des enjeux relatifs à la continuité écologique au droit de ces aménagements, une évaluation des risques éco-morphologiques potentiels liés au fonctionnement des deux aménagements a été engagée.

Les objectifs de cette étude sont, sur la base des documents et connaissances existantes, de :

- Caractériser le fonctionnement hydrologique actuel de la rivière en relation avec les aménagements,
- Caractériser le contexte biologique du cours d'eau,
- Évaluer les risques éco-morphologiques associés au fonctionnement hydrologique actuel ainsi que ceux qui pourraient découler de nouvelles modalités de fonctionnement des aménagements,
- Dimensionner des propositions de mesures alternatives sur la morphologie des cours d'eau.

La note présente dans une 1^{ère} partie le contexte général des aménagements de Bois-de-Cure et Malassis. La deuxième partie s'attache à caractériser le fonctionnement hydrologique de la Cure en lien avec ces aménagements.

2. RAPPEL DES CARACTERISTIQUES DES AMENAGEMENTS ET DE LA CURE

2.1. CARACTERISTIQUES ET FONCTIONNEMENT DES AMENAGEMENTS

2.1.1. CARACTERISTIQUES DES AMENAGEMENTS

Les aménagements de Bois-de-Cure et de Malassis sont installés sur la rivière Cure sur la commune de Domecy-sur-Cure.

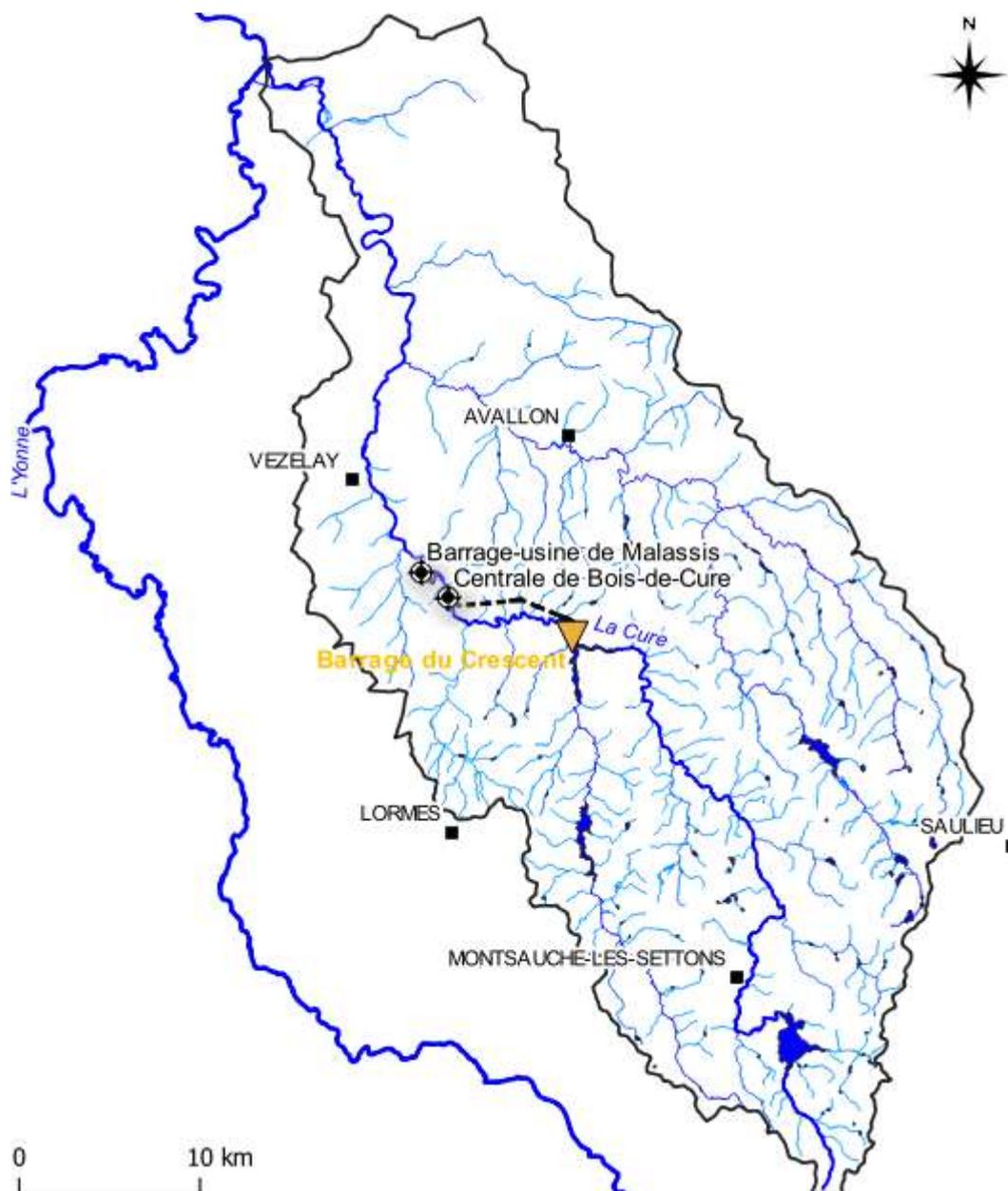


Figure 1 : Situation hydrographique des aménagements étudiés.

La centrale de Bois-de-Cure a été construite en 1932. Elle utilise les eaux de la Cure stockées dans la retenue du Crescent (14.3 millions de m³), et acheminées par un canal de 8.3 km.

L'aménagement peut fonctionner par éclusées, après un passage dans un bassin d'accumulation puis une conduite forcée, l'eau est turbinée par 3 groupes Francis avec un débit maximum de 33 m³/s.

Le barrage-usine de Malassis a été mis en service en 1931. Il est situé en aval immédiat de la centrale de Bois-de-Cure. La prise d'eau est constituée d'un barrage de 6.1 m de hauteur créant une retenue de 330 000 m³ en amont d'environ 1,5 km de longueur. La centrale est équipée de 2 groupes Kaplan turbinant un débit maximum de 26 m³/s.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des aménagements.

	Bois-de-Cure	Malassis
<i>Année de mise en service</i>	1932	1931
<i>Bassin versant en km²</i>	408	480
<i>Surface de la retenue en ha</i>	165	9.5
<i>Capacité de la retenue en millions de m³</i>	14.3	0.33
<i>Volume utile en millions de m³</i>	4.95	0.25*
<i>Module du cours d'eau à la prise d'eau en m³/s</i>	8.9	10.5
<i>Nombre de groupes</i>	3	2
<i>Débit maximum turbiné en m³/s</i>	33	26
<i>Débit réservé en m³/s</i>	0.9	1.5

* à cause de l'envasement de la retenue, il n'est que d'environ 0.2 millions de m³ (Soudre, communication personnelle).

2.1.2. FONCTIONNEMENT DES AMENAGEMENTS

2.1.2.1. DEBITS RESERVES

Le débit réservé à l'aval du barrage du Crescent (alimentant la centrale de Bois-de-Cure) est de 900 l/s (10.4% du module de la Cure à Foissy). Lors d'épisodes de crue des déversements peuvent se produire au barrage du Crescent et alimenter le tronçon court-circuité (TCC).

Le débit réservé à l'aval du barrage-usine de Malassis est de 1.5 m³/s (16% du module de la Cure à Foissy).

En application des règlement d'eau en vigueur et de la convention tri-partite et P pour faciliter la pratique des sports en eaux vives et assurer le soutien d'étiage, l'exploitant doit réaliser :

- du 1^{er} avril au 30 juin : 30 lâchers de 3 m³/s minimum,
- du 1^{er} juillet au 31 août : réalisation d'éclusées journalière d'un débit de 3 m³/s minimum réparti pour obtenir un débit moyen journalier garanti de 2 m³/s,
- du 1^{er} septembre au 15 novembre : des lâchers spécifiques de 3 m³/s minimum, pendant les week-ends et les jours fériés,
- Du 1^{er} juillet au 1^{er} octobre : gestion adaptée pour garantir un débit moyen journalier de 2 m³/s.

Lors des lâchers pour les sports d'eau vive, le débit relâché est constant entre 8h et 18h.

2.1.2.2. FONCTIONNEMENT DES GROUPES DE PRODUCTION

L'usine de Bois de Cure possède trois groupes et fonctionne principalement à 1 ou 2 groupes. Ces groupes ne sont pas « réglant » et fonctionnent soit à 0 m³/s, 9 m³/s ou 11 m³/s. L'écart journalier entre le débit minimum et le débit maximum imputable aux manœuvres de l'ouvrage

doit être maintenu entre 0 et 33 m³/s. Lors de baisse de débit le gradient doit être au maximum de 6.6 m³/s/minute.

En cas d'éclusées infra-journalière, la centrale de Bois de Cure ne fonctionne que quelques heures par jour afin d'utiliser les capacités de marnage de Malassis.

L'ouvrage de Malassis est alimenté par les éclusées de Bois-de-Cure, le débit réservé du barrage du Crescent et les apports intermédiaires du TCC. Il possède 2 groupes de production, chaque groupe ayant une plage de fonctionnement comprise entre 6 et 13 m³/s. Tous les débits inférieurs à 6 m³/s sont restitués par une vanne de fond.

Le règlement d'eau actuel de l'ouvrage de Malassis stipule :

- L'amplitude journalière des variations de débit générées par l'ouvrage doivent être inférieures ou égales 13 m³/s dans la plage 1.5 m³ (débit réservé) - 26 m³/s (débit maximum règlementaire de l'usine), sauf en cas d'hydrologie particulière ;
- L'exploitant détermine quotidiennement la valeur du débit stabilisé retenu avec un objectif de débit sortant constant pour 24h ;
- Les variations de débit doivent être effectuées pour éviter manœuvre nocturne des ouvrages VNF ou les samedis et dimanches (avec prise en compte de la durée de propagation vers l'aval) ;
- Les variations de débit doivent être inférieures à 7 m³/s du 15/03 au 10/11 ;
- Lors de baisse de débit le gradient doit être au maximum de 2.5 m³/s/minute.

2.2. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude couvre la rivière Cure depuis l'aval du barrage de Crescent jusqu'à la confluence avec l'Yonne, soit un tronçon de 66.2 km. La situation du principal affluent de cette zone (le Cousin) sera abordée.

Les prises d'eau des ouvrages concernés (Bois-de-Cure [code ROE] ; Malassis [code ROE29696]) se situe sur la Cure au sein de la masse d'eau FRHR51 (La Cure du confluent du Chalaux au confluent du Cousin). Cette rivière est un affluent de l'Yonne (bassin de la Seine). Elle prend ses sources dans le massif granitique du Morvan en amont du lac des Settons à 730 m d'altitude. Son parcours jusqu'au barrage de Malassis couvre 67 km de linéaire. Son réseau hydrographique est très dense avec plus de 500 km de ruisseaux et rivières affluents.

La Cure traverse successivement 3 retenues, le lac des Settons (366 ha, 4 km de linéaire), le réservoir du Crescent (165 ha, 2,7 km de linéaire, où se situe la prise d'eau de la centrale de Bois-de-Cure) et la retenue de Malassis. Les deux premières retenues font partie des ouvrages pouvant contribuer à l'écrêtement des crues ainsi qu'au soutien d'étiage de la Seine.

A noter, que l'aménagement de Malassis se situe à la transition géologique entre le massif granitique du Morvan et les calcaires en aval. La morphologie de la vallée change également rapidement avec un élargissement du plancher alluvial très marqué et une réduction de la pente à partir de Pierre-Perthuis.

La zone de Malassis correspond donc à un changement notable en termes de caractéristiques de la rivière et donc de composantes biologiques.

3. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE LA CURE EN LIEN AVEC LES AMENAGEMENTS DE BOIS-DE-CURE ET MALASSIS

3.1. OBJECTIFS

Caractériser la situation hydrologique de la Cure de part et d'autre des aménagements en termes d'hydrologie générale des tronçons, de variations inter et infra-journalières, d'étiage. Comparer cette situation à un autre contexte proche : le Cousin.

3.2. METHODOLOGIES

3.2.1. DONNEES DISPONIBLES

Les données de débits disponibles concernent les stations hydrométriques de :

- *La Cure à Marigny-l'Eglise*, en amont des aménagements, de 1962 à 2019 qui compile les données de deux stations hydrologiques (Iles Ménéfriers 1961-1997 et Crottefou 1997-2019). Les données utilisées sont les débits moyens journaliers (QMJ). Cette station hydrologique est située 8.9 km en amont du barrage du Crescent.
- *La Cure à Foissy-lès-Vézelay*, en aval proche des aménagements, de 1995 à 2019. Les données utilisées sont les QMJ et les débits à pas de temps variables (QTVAR). Cette station est située 4.5 km en aval du barrage-usine de Malassis.
- *La Cure à Arcy-sur-Cure*, en aval éloigné des aménagements, de 1962 à 2019. Les données utilisées sont les QMJ et les QTVAR. Cette station est située 31 km en aval du barrage-usine de Malassis.
- *Le Cousin à Avallon*, qui sert de comparatif régional, de 1995 à 2018. Les données utilisées sont les QMJ. Cette station est située sur la partie aval du Cousin.



• Figure 2 : Localisation des stations hydrologique de la zone d'étude (en bleu : banque HYDRO; en rouge : EDF).

En plus de ces données, l'exploitant a fourni :

- les débits moyens journaliers au niveau des aménagements étudiés (débits turbinés et débits déversés),
- les débits horaires turbinés à Bois de Cure sur la période octobre-décembre 2019,
- les débits instantannés (turbinés et déversés) à Malassis sur la période octobre-décembre 2019.

3.2.1. METHODES D'ANALYSES

3.2.1.1. CARACTERISATION GENERALE DU REGIME HYDROLOGIQUE

La caractérisation générale du régime hydrologique consiste à étudier l'évolution des **débits moyens mensuel** et des **débits spécifiques mensuels** tout au long de l'année pour une période donnée, déterminer le **débit moyen annuel (module)** ainsi que les débits caractéristiques de **crues (biennales, quinquennales, décennales...)** et d'**étiage (Q_{MNA2} , Q_{MNA5})**.

Pour la caractérisation hydrologique du TCC, tronçon qui ne dispose pas d'une station hydrométrique, le débit moyen journalier a été reconstitué sur la période 1961-1997 en utilisant les données de deux stations hydrométriques qui ne sont plus en service actuellement (La

Cure à Marigny l’Eglise [Ile Ménéfrier] et la Cure à Domecy-sur-Cure). La méthode employée est la suivante :

- Détermination de la surface du bassin versant du TCC de Bois-de-Cure (S_{BVi}) à l’aide du logiciel QGIS ;
- Détermination du débit journalier du BVi en utilisant le débit spécifique journalier de la Cure à Marigny pondéré par les caractéristiques du BVi ($Q_{BVi} = Q_{spé\ Marigny} \times Coefficient\ pondération \times S_{BVi}$) ;
- Détermination du débit de base du TCC (Q_{base}) en ajoutant le débit réservé au débit journalier du BVi ($Q_{base}=Q_{BVi}+Q_r$). Afin de s’approcher de la situation actuelle, le débit réservé utilisé est celui en vigueur actuellement, à savoir 900 l/s ;
- Ajout des débits déversés au barrage du Crescent à Q_{base} . Il a été considéré qu’un déversement avait lieu lorsque la différence entre le débit de la Cure à Domecy-sur-Cure et la Débit de base du TCC était supérieur à 33 m³/s (débit maximum turbiné par la centrale de Bois de Cure).

3.2.1.2. CARACTERISATION DES VARIATIONS INFRA ET INTER-JOURNALIERES

La caractérisation des éclusées a été réalisée en utilisant la méthode de « l’indicateur éclusées » (Courret, 2014). L’objectif de l’indicateur éclusée est de synthétiser les informations données par différents régimes d’éclusées, sous forme de 5 classes qualifiant le niveau de perturbation hydrologique.

Tableau 2 : Qualification du niveau de perturbation hydrologique due aux éclusées.

Classe	Code couleur	Niveau de perturbation hydrologique due aux éclusées
0		Hydrologie naturelle ou peu perturbée
1	Bleu	Perturbation hydrologique sensible.
2	Vert	Perturbation hydrologique marquée.
3	Jaune	Perturbation hydrologique très marquée.
4	Orange	Perturbation hydrologique sévère.
5	Rouge	Perturbation hydrologique très sévère.

Le classement de la perturbation hydrologique d’un cours d’eau donnée est effectué suivant 6 étapes :

- 1) saisie des hydrogrammes et définition du module du cours d’eau et du débit maximum d’éclusée,
- 2) listing de toutes les hausses et baisses de débit identifiées sur les hydrogrammes (la valeur seuil pour l’identification des variations de débit est de 1% du module/heure),
- 3) listing préliminaire des hausses et baisses d’éclusées, par sélection dans le listing précédent en fonction de condition d’amplitude minimale, de gradient supérieur aux gradients naturels théoriques et par limitation des valeurs de débit maximum,
- 4) listing définitif des hausses et des baisses, par concaténation d’éventuelles éclusées consécutives,
- 5) définition des statistiques annuelles et mensuelles des régimes de hausses et de baisses,
- 6) classement annuel du niveau de perturbation hydrologique lié à ces variations par le biais d’une analyse discriminante sur 5 paramètres caractéristiques :

- le nombre total de baisses et de hausses par année,
- la valeur du débit de base non dépassé par 10% des baisses (Bqbase10),
- la valeur de l'amplitude non dépassée par 90% des baisses (Bampli90),
- la valeur de gradient non dépassée par 90% des baisses (Bgrad90)),
- la valeur de gradient non dépassée par 90% des hausses (Hgrad90).

L'indicateur éclusée a été élaboré à partir d'un jeu de données de 80 stations hydrométriques sur des cours d'eau soumis à éclusées dont plus de 80% ont un module inférieur à 100 m³/s. De même, afin de discriminer les variations naturelles de débit de celles non naturelles, l'indicateur détermine des gradients naturels théoriques qui ont été calibrés à partir d'un jeu de données de 97 stations hydrométriques situées sur des cours d'eau à écoulements naturels dont plus de 95% ont un module inférieur à 100 m³/s. Les gradients naturels de montée du niveau d'eau en cas de crue peuvent être très importants comparés à ceux de baisse lors de la décrue, si bien que l'indicateur détecte en général plus de baisses non naturelles que de hausses.

L'indicateur éclusée a été déployé à l'échelle annuelle et à l'échelle saisonnière pour **5 années consécutives entre 2014 et 2018** pour les deux stations hydrologiques situées en aval de l'aménagement de Malassis (Foissy-lès-Vézelay et Arcy-sur-Cure).

En plus des résultats de l'indicateur, une attention particulière a été portée sur la caractérisation des variations détectées.

3.2.1.3. CARACTERISATION DES ETIAGES

L'évolution interannuelle des caractéristiques générales des étiages (débit moyen de juillet à septembre, QMNA, VCN10) sera réalisée.

La caractérisation des étiages sera effectuée sur la base des indicateurs d'étiage développé par Guintoli et Renard (2010) à savoir les volumes d'étiage, leur durée, les dates d'apparition. Pour cela, les 3 stations hydrométriques seront analysées et comparées.

La caractérisation des conditions d'étiages se base sur plusieurs variables :

- les volumes écoulés sont calculés sur la base des débits transitant dans la rivière en étiage de juillet à septembre,
- les déficits en eau par rapport à un seuil d'étiage correspondant au débit non dépassé 15% du temps de l'année (Q15) ainsi que sur les valeurs moyennes mensuelles.
- les périodes d'apparition des étiages se caractérisent par les dates de début, de fin d'étiage mais également celle ayant vues 25, 50 et 75% des volumes d'eau d'étiage écoulés. Les durées correspondent à la somme des jours où le débit est inférieur au seuil du Q15.

3.3. RESULTATS

3.3.1. REGIME HYDROLOGIQUE DE LA CURE AU NIVEAU DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Le régime hydrologique de la Cure est de type pluvial, avec des hautes eaux en hiver, quand les précipitations sont les plus abondantes et un étiage estival. La période printanière correspond à une baisse des débits qui s'amorcent en mars mais qui devient plus marquée en mai et juin notamment au niveau d'Arcy-sur-Cure.

Tableau 3 : Principales caractéristiques des stations hydrologiques entourant la zone étudiée (source : Banque HYDRO).

	Code station	Période	Bassin versant	Module	Débit spécifique
Marigny-l'Eglise	H2122020	1997-2019	221 km ²	4.6 m ³ /s	20.8 l/s/km ²
Foissy-les-Vézelay	H2142030	1979-2019	549 km ²	9.4 m ³ /s	17.1 l/s/km ²
Arcy-sur-Cure	H2182010	1962-2019	1182 km ²	16.2 m ³ /s	13.7 l/s/km ²

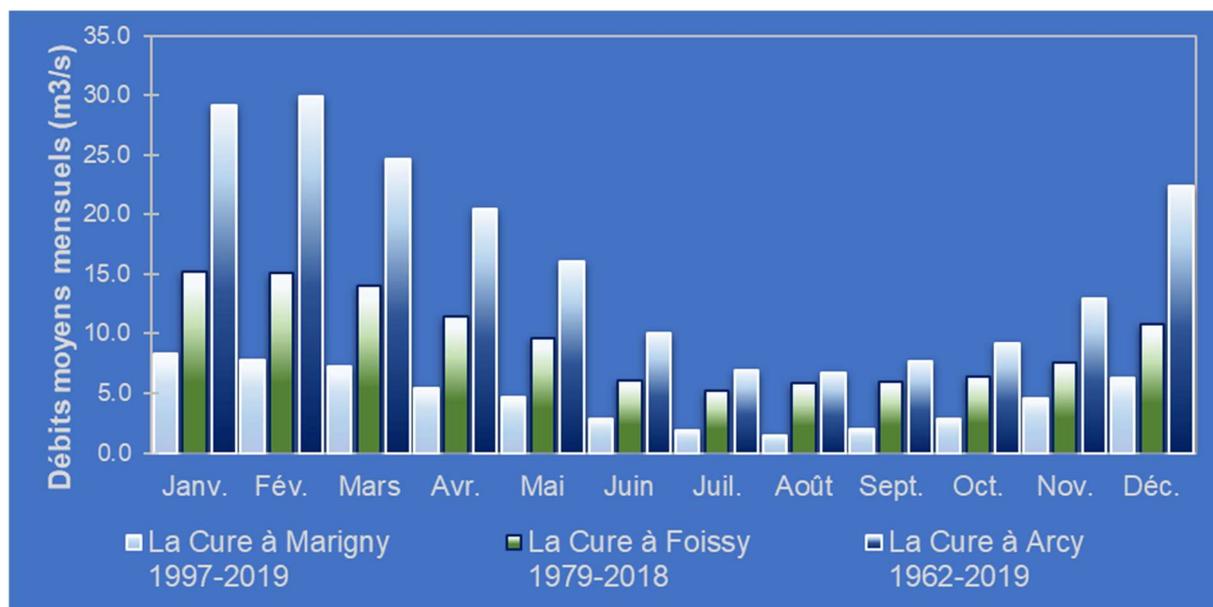


Figure 3 : Débits moyens mensuels de la Cure à Marigny, Foissy-lès-Vézelay et Arcy-sur-Cure pour la période 1997-2018 (période commune aux 3 stations hydrologiques).

Les débits spécifiques suivent un gradient altitudinal tout à fait classique en relation avec l'abondance des précipitations (1316 mm/an à Marigny contre 1200 mm/an à Foissy et 1052 mm/an à Arcy). Seule la situation d'août et septembre à Foissy est atypique avec un débit spécifique qui augmente. Cette situation est liée au débit garanti en aval de Malassis pour le soutien d'étiage et les lâchers d'eau pour les sports d'eau vive.

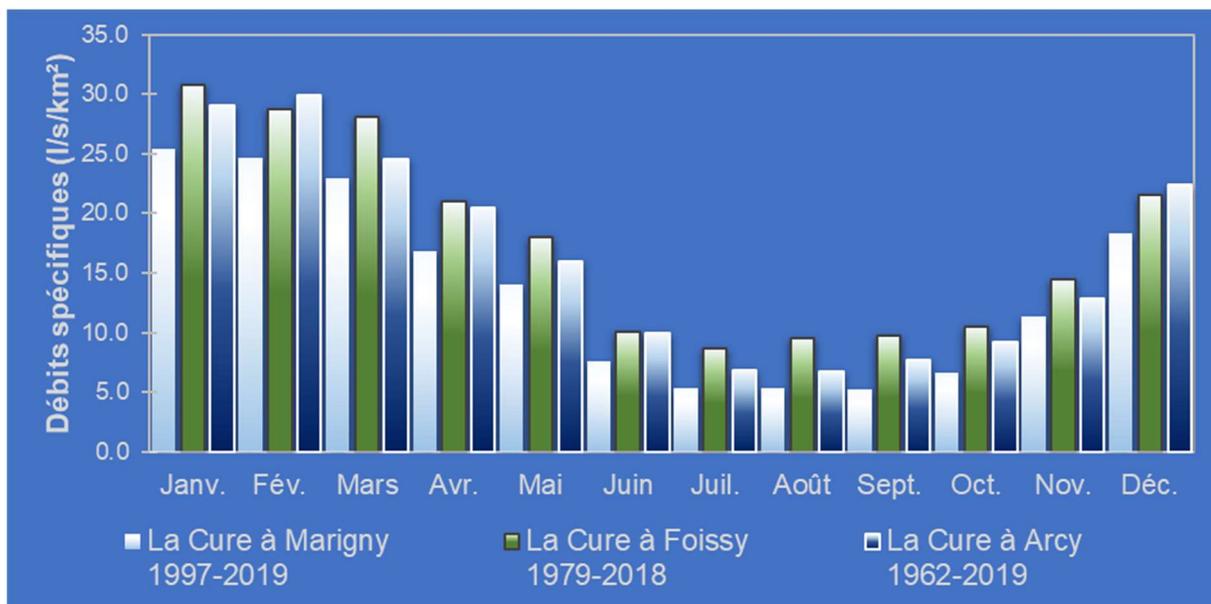


Figure 4 : Évolutions mensuelles des débits spécifiques de la Cure à Marigny-l'Eglise, Foissy-lès-Vézelay et Arcy-sur-Cure.

Les valeurs de débit mensuel d'étiage de fréquence quinquennale (Q_{MNA5}) sont de $0.880 \text{ m}^3/\text{s}$ à Marigny-l'Eglise, $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$ à Foissy-lès-Vézelay et $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ à Arcy-sur-Cure soit des valeurs proches de 20% du module ce qui correspond à une situation d'étiage assez soutenu. La valeur observée à Foissy (environ 25% du module) est liée au soutien d'étiage.

Tableau 4 : Débits caractéristiques d'étiages de la Cure au niveau des 3 stations hydrologiques.

	Période	Q_{MNA2}		Q_{MNA5} en m^3/s	
		m^3/s	% du module	m^3/s	% du module
Marigny-l'Eglise	1997-2019	1.2	26.1%	0.88	19.1%
Foissy-lès-Vézelay	1979-2019	3.4	36.2%	2.3	24.5%
Arcy-sur-Cure	1962-2019	4.4	27.2%	3.1	19.1%

Par contre les débits minimaux sur 10 jours consécutifs (VCN10) montrent un gradient amont/aval indiquant que, sur des périodes plus courtes, les étiages aval peuvent être plus marqués (15% du module à Marigny, 13% à Foissy et 11% à Arcy), le bassin versant aval étant nettement moins producteur en terme de débit (altitude plus basse).

Les débits de crue correspondent à 5.1-5.6 fois le module pour la crue biennale et 6.5-8 fois le module pour la crue quinquennale.

Tableau 5 : Débits caractéristiques des crues de la Cure au niveau des 3 stations hydrologiques.

	Période	Biennale		Quinquennale		Décennale	
		m ³ /s	% du module	m ³ /s	% du module	m ³ /s	% du module
Marigny-l'Eglise	1997-2019	24	522%	30	652%	34	739%
Foissy-lès-Vézelay	1979-2019	48	512%	66	704%	77	821%
Arcy-sur-Cure	1962-2019	91	562%	130	802%	150	926%

L'intensité des crues est d'autant plus forte que la station se trouve en aval du bassin versant.

3.3.2. REGIME HYDROLOGIQUE DU TRONÇON COURT-CIRCUITE DE BOIS DE CURE

Le caractère pluvial du régime hydrologique de la fin du TCC de Bois-de-Cure est très affaibli par rapport aux deux stations hydrologiques qui l'encadrent. Il y a très peu de débits soutenus durant la période hivernale, et une faible variabilité annuelle.

Tableau 6 : Principales caractéristiques des stations hydrologiques entourant la zone étudiée (source : Banque HYDRO).

	Code station	Période	Bassin versant	Module	Débit spécifique
Marigny-l'Eglise	H2122010	1961-1997	216 km ²	5,03 m ³ /s	23,3 l/s/km ²
Domecy-sur-Cure	H2142010	1961-1997	403 km ²	8,83 m ³ /s	21,9 l/s/km ²
TCC (reconstitué)	NR	1961-1997	89 km ²	2,57 m ³ /s	17,5 l/s/km ²

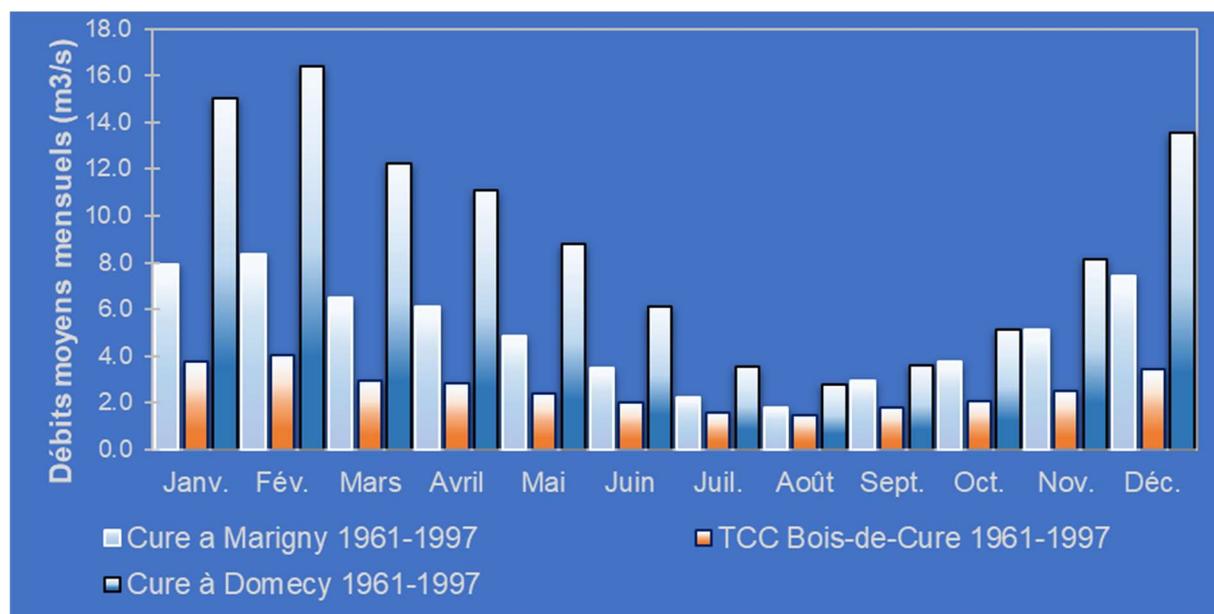


Figure 5 : Débits moyens mensuels de la Cure à Marigny, à Domecy-sur-Cure et dans la partie aval du TCC de Bois-de-Cure pour la période 1961-1997 (période commune aux 3 points).

L'effet de la dérivation des eaux par le complexe Crescent/Bois-de-Cure est particulièrement visible dans le TCC avec une baisse significative du débit à partir des valeurs de débit médian (22% du module dans le TCC contre 70% du module pour les deux autres stations).

Tableau 7 : Débits classés des 3 stations hydrologiques pour la période 1961-1997.

	TCC		Marigny		Domecy	
	m ³ /s	%M*	m ³ /s	%M	m ³ /s	%M
MIN	1.04	11.7%	0.44	8.8%	0.07	0.8%
Q10	1.29	14.6%	1.27	25.2%	1.70	19.2%
Q25	1.50	17.0%	1.94	38.4%	3.00	34.0%
Médiane	2.02	22.9%	3.62	71.7%	6.20	70.2%
Q75	3.11	35.3%	7.15	141.5%	11.70	132.5%
Q90	4.15	47.0%	10.50	208.0%	19.20	217.4%
MAX	55.90	633.0%	43.90	869.5%	88.90	1006.6%
Module (M)	2.57	29.1%	5.05	-	8.83	-

* Les débits du TCC sont exprimés en fonction du module de la Cure à Domecy.

L'étude des débits de crues confirme ces observations. Les crues biennales et quinquennales observées dans le TCC sont systématiquement plus faibles que pour les deux stations qui l'encadrent.

Tableau 8 : Débits de crues au niveau des 3 stations pour la période 1961-1997.

	TCC		Marigny		Domecy	
	m ³ /s	%M*	m ³ /s	%M	m ³ /s	%M
Biennale	15	170%	24.1	477%	48	544%
Quinquennale	39.02	442%	33.64	666%	72.02	816%
Décennale	42.8	485%	37.94	751%	75.8	858%

* Les débits du TCC sont exprimés en fonction du module de la Cure à Domecy.

3.3.3. ANALYSE DES VARIATIONS DE DEBITS

3.3.3.1. RESULTATS ANNUELS GLOBAUX

L'indicateur éclusée a été calculé pour les stations de Foissy-lès-Vézelay et Arcy-sur-Cure pour la période 2014-2018.

Sur les deux stations, des variations de débits ne correspondant pas à des caractéristiques naturelles ont été détectés (de 34 à 53/an à Foissy et de 19 à 22/an à Arcy). Il s'agit principalement de baisses non naturelles de débit.

Le niveau de perturbation hydrologique varie de **sensible** à **marqué** à Foissy et de **peu perturbé** à **sensible** à Arcy.

Pour les deux stations, les 1^{ers} déciles des débits atteints à la fin des baisses (Bqbase10) sont en moyenne de 2.43 m³/s à Foissy-lès-Vézelay (26% du module) et de 3.62 m³/s à Arcy-sur-Cure (22% du module). Selon les années, les amplitudes de 90% des baisses (Bampli90) sont de 0.98-2.03 fois le module à Foissy et 0.46-0.74 fois le module à Arcy. Les débits maximums rencontrés avant les baisses dans 90% des cas (Q₉₀) dépassent rarement 20 m³/s à Foissy (2.4 fois le module) et 32 m³/s à Arcy (1.7 fois le module). Enfin les gradients de 90% des baisses sont généralement de 30% du module par heure à Foissy et 10% du module par heure à Arcy pour des valeurs de références naturelles de l'ordre de 5-6% du module par heure.

Tableau 9 : Principaux résultats de l'indicateur éclusées annuel pour les deux stations de la Cure sur la période 2014-2018.

Station	Année	Nb d'éclusées détectées	Bqbase10		Bampli90		Q90 Débit avant baisse		Bgrad90 %M/h	Classe finale
			m ³ /s	%M	m ³ /s	%M	m ³ /s	%M		
Foissy-lès-Vézelay	2014	42	2.48	26%	10.32	110%	21.91	233%	33%	2-
	2015	34	2.34	25%	9.25	98%	20.87	222%	35%	1
	2016	47	3.03	32%	9.49	101%	21.94	233%	31%	2-
	2017	46	2.00	21%	8.25	88%	20.94	223%	35%	1
	2018	53	2.30	24%	19.06	203%	26.60	283%	67%	3-
Arcy-sur-Cure	2014	22	3.68	23%	9.49	59%	31.79	196%	10%	1
	2015	18	3.40	21%	8.64	53%	29.49	182%	10%	0
	2016	19	4.34	27%	8.02	49%	17.64	109%	6%	0
	2017	20	2.50	15%	7.41	46%	26.61	164%	8%	1
	2018*	21	4.18	26%	11.91	74%	32.40	200%	12%	1

* Année incomplète

Le niveau de perturbation diminue d'amont en aval sous l'effet de l'amortissement des variations lors de leur propagation vers l'aval, les deux stations étant distantes de 26.5 km.

Le niveau de perturbation hydrologique est très variable d'une année sur l'autre à Foissy alors qu'il est assez stable à Arcy.

3.3.3.2. RESULTATS PERIODE NOVEMBRE A MI-MARS [REPRODUCTION ET INCUBATION DES ŒUFS DE TRUITE]

Le niveau de perturbation hydrologique varie de sensible à très marqué à Foissy et de peu perturbé à sensible à Arcy.

Tableau 10 : Principaux résultats de l'indicateur éclusées de la période allant de novembre à mi-mars pour les deux stations de la Cure sur la période 2014-2018.

Station	Année	Nb d'éclusées détectées	Bqbase10		Bampli90		Q90 Débit avant baisse		Bgrad90 %M/h	Classe finale
			m ³ /s	%M	m ³ /s	%M	m ³ /s	%M		
Foissy-lès-Vézelay	2013-2014	12	5.17	55%	10.85	115%	26.93	286%	68%	1
	2014-2015	16	2.44	26%	12.28	131%	22.70	241%	49%	2+
	2015-2016	15	2.11	22%	10.67	114%	25.32	269%	29%	2-
	2016-2017	20	2.27	24%	8.02	85%	13.80	147%	18%	1
	2017-2018	21	4.64	49%	20.66	220%	30.50	324%	84%	3-
Arcy-sur-Cure	2013-2014	4	11.52	71%	10.40	64%	34.69	214%	11%	0
	2014-2015	8	6.96	43%	9.23	57%	31.31	193%	12%	1
	2015-2016	7	3.95	24%	7.82	48%	14.94	92%	6%	0
	2016-2017	11	4.93	30%	7.82	48%	19.40	120%	5%	1
	2017-2018	10	5.30	33%	9.31	57%	34.40	212%	23%	1

Pour les deux stations, les 1^{ers} déciles des débits atteints à la fin des baisses rencontrés sur la période étudiée sont en moyenne de 3.33 m³/s à Foissy-lès-Vézelay (35% du module) et de 6.54 m³/s à Arcy-sur-Cure (40% du module). Les amplitudes de 90% des baisses sont de 0.85-2.20 fois le module à Foissy et 0.48-0.64 fois le module à Arcy selon les années. Les débits maximums rencontrés avant les baisses dans 90% des cas (Q₉₀) dépassent rarement 25 m³/s à Foissy (2.7 fois le module) et 32 m³/s à Arcy (1.7 fois le module). Enfin les gradients de 90%

des baisses varient de 20 à 80% du module par heure à Foissy et de 5 à 23% du module par heure à Arcy.

Pour cette période le niveau de perturbation diminue également d'amont en aval sous l'effet de l'amortissement des variations lors de leur propagation vers l'aval.

Le niveau de perturbation hydrologique est très variable d'une année sur l'autre à Foissy alors qu'il est assez stable à Arcy.

3.3.3.3. RESULTATS PERIODE MI-MARS A JUIN [EMERGENCE DES ALEVINS DE TRUITE ET REPRODUCTION DES CYPRINIDES LITHOPHILES]

Le niveau de perturbation hydrologique varie de sensible à marqué à Foissy et de peu perturbé à sensible à Arcy.

Tableau 11 : Principaux résultats de l'indicateur éclusées de la période allant de mi-mars à fin juin pour les deux stations de la Cure sur la période 2014-2018.

Station	Année	Nb d'éclusées détectées	Bqbase10		Bampli90		Q90 Débit avant baisse		Bgrad90 %M/h	Classe finale
			m ³ /s	%M	m ³ /s	%M	m ³ /s	%M		
Foissy-lès-Vézelay	2014	12	2.93	31%	8.49	90%	14.09	150%	33%	1
	2015	15	3.24	34%	9.20	98%	18.84	200%	31%	2-
	2016	19	5.83	62%	8.33	89%	20.12	214%	47%	1
	2017	19	2.64	28%	7.40	79%	15.66	167%	33%	2-
	2018	24	1.82	19%	8.92	95%	18.27	194%	40%	2+
Arcy-sur-Cure	2014	11	3.63	22%	7.14	44%	18.60	115%	9%	1
	2015	10	3.36	21%	8.67	54%	26.77	165%	10%	1
	2016	5	3.93	24%	7.56	47%	20.94	129%	8%	0
	2017	7	2.60	16%	7.39	46%	14.78	91%	7%	1
	2018*	13	3.87	24%	11.59	72%	20.84	129%	10%	1

* Année incomplète

Pour les deux stations, les 1^{ers} déciles des débits atteints à la fin des baisses rencontrées sur la période étudiée sont en moyenne de 3.29 m³/s à Foissy-lès-Vézelay (35% du module) et de 3.48 m³/s à Arcy-sur-Cure (21% du module). Les amplitudes de 90% des baisses sont proches du module à Foissy et de 0.46-0.72 fois le module à Arcy selon les années. Les débits maximums rencontrés avant les baisses dans 90% des cas (Q90) dépassent rarement 20 m³/s à Foissy (2.1 fois le module) et 21 m³/s à Arcy (1.3 fois le module). Enfin les gradients de 90% des baisses de l'ordre de 30 à 47% du module par heure à Foissy et de 10% du module par heure à Arcy.

Pour cette période le niveau de perturbation diminue également d'amont en aval.

Le niveau de perturbation hydrologique est assez variable d'une année sur l'autre à Foissy alors qu'il est assez stable à Arcy.

3.3.3.4. RESULTATS PERIODE JUILLET-AOUT [CROISSANCE DES ALEVINS]

Pour les deux stations, le niveau de perturbation hydrologique varie de peu perturbé à sensible.

A cette période de l'année les variations non naturelles sont peu nombreuses, les 1^{ers} déciles des débits atteints après les baisses sont en moyenne de 3.09 m³/s (33% du module) à Foissy et 4.66 m³/s (29% du module) à Arcy. Les amplitudes de 90% des baisses sont au maximum

de 73% du module à Foissy et 40% du module à Arcy. Les gradients de baisse de 90% des variations sont inférieurs à 25% du module par heure à Foissy et 6% à Arcy.

Tableau 12 : Principaux résultats de l'indicateur éclusées de juillet et août pour les deux stations de la Cure sur la période 2014-2018.

Station	Année	Nb d'éclusées détectées	Bqbase10		Bampli90		Q90 Débit avant baisse		Bgrad90	Classe finale
			m ³ /s	%M	m ³ /s	%M	m ³ /s	%M	%M/h	
Foissy-lès-Vézelay	2014	5	4.20	45%	3.56	38%	10.26	109%	19%	1
	2015	1	2.98	32%	3.11	33%	6.09	65%	13%	0
	2016	6	4.09	44%	6.42	68%	11.40	121%	19%	1
	2017	7	1.73	18%	6.85	73%	9.18	98%	16%	1
	2018	5	2.48	26%	4.44	47%	11.43	122%	25%	1
Arcy-sur-Cure	2014	2	7.23	45%	4.39	27%	11.78	73%	4%	0
	2015	1	3.65	23%	3.26	20%	6.91	43%	3%	0
	2016	5	5.41	33%	5.35	33%	15.12	93%	6%	1
	2017	3	2.36	15%	6.55	40%	9.90	61%	5%	0
	2018*	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* Pas de données

Pour cette période de l'année les perturbations hydrologiques détectées par l'indicateur sont du même niveau pour les deux stations, la variabilité interannuelle est assez faible.

3.3.3.5. ÉTUDE DE LA FREQUENCE, DES CARACTERISTIQUES ET DE L'ORIGINE DES BAISSSES DETECTEES A FOISSY

3.3.3.5.1 Analyse sur la base des débits moyens journaliers de Bois de Cure

Entre le 1^{er} janvier 2016 et le 31 octobre 2018, l'indicateur éclusées a détecté 134 baisses à Foissy-lès-Vézelay.

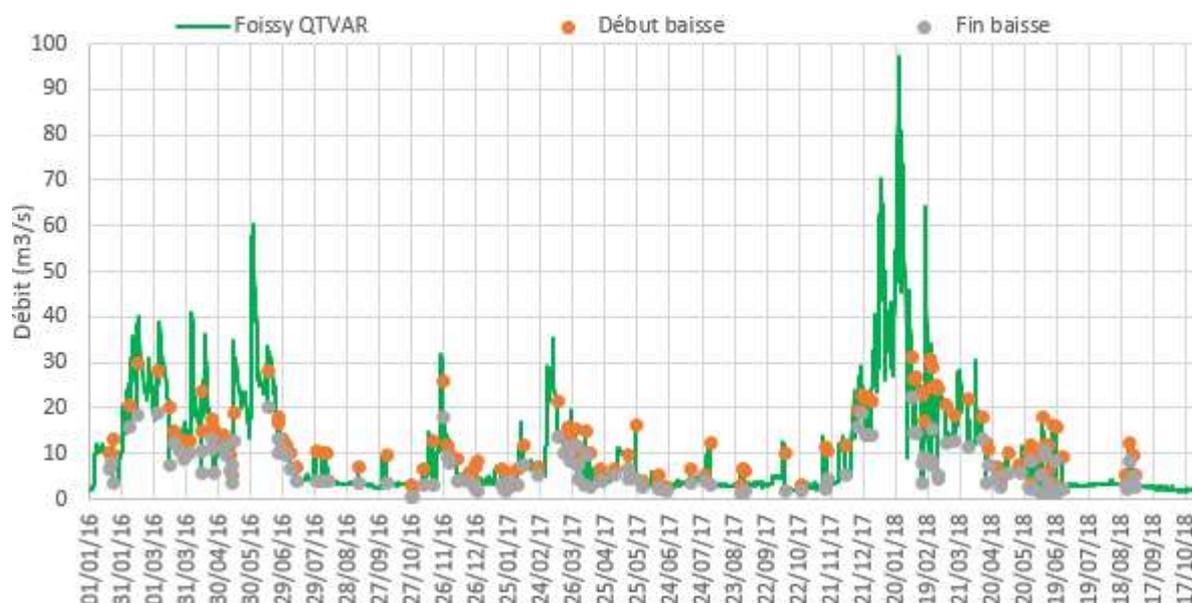


Figure 6 : Débit instantané de la Cure à Foissy, et date de début et de fin des baisses d'éclusées détectées par l'indicateur éclusée (période 01/01/2016 – 31/10/2018).

Parmi ces 134 baisses, 9 sont imputables à des expérimentations réalisées par EDF et VNF (Soudre, 2018). Ces 9 variations, non imputables au fonctionnement normal des usines ont été retirées de l'analyse.

La majorité (55.2%) des baisses détectées sont comprises entre 10% et 50% du module, les baisses comprises entre 50 et 100% du module représentent 30.4% des baisses, les baisses supérieures à 100% du module représentent les 14.4% restant.

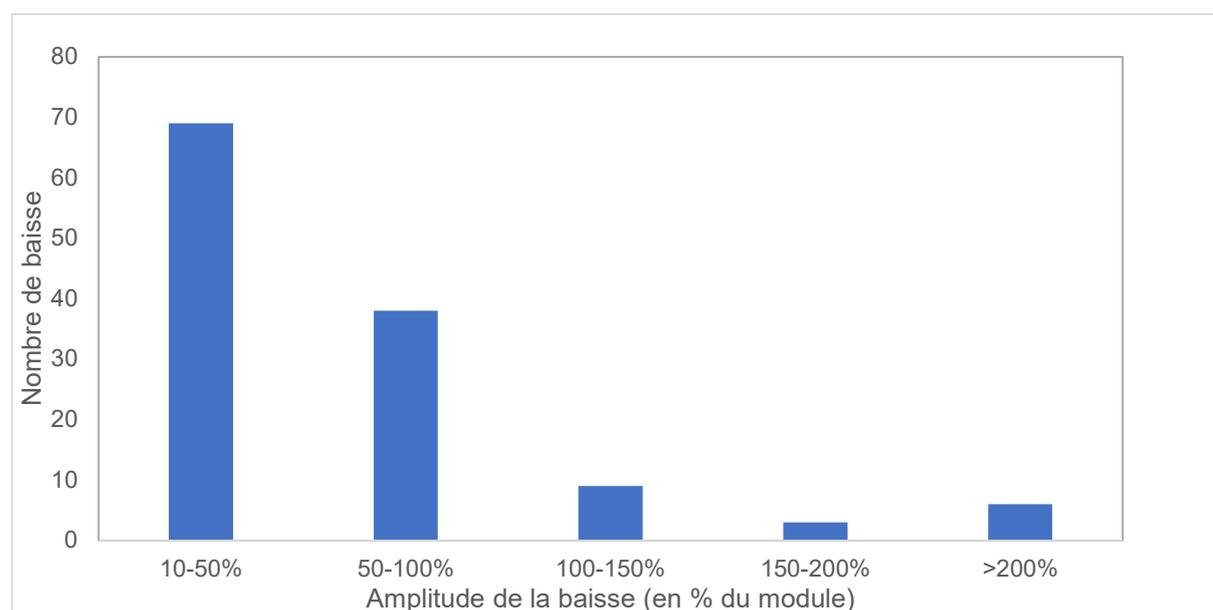


Figure 7 : Distribution des baisses détectées par l'indicateur entre le 01/01/2016 et le 31/10/2018 en fonction de leur amplitude.

Notons que 9 baisses (7.2% de l'effectif) sont supérieures à 13 m³/s (140% du module).

La comparaison de l'hydrogramme de la Cure à Foissy avec les débits moyen journaliers de l'usine de Bois de Cure, de Malassis ainsi que les déversements à Malassis met en évidence que :

- certaines variations de débit observées à Foissy sont directement liées au fonctionnement de l'usine de Bois de Cure (variation de type 1), l'ouvrage de Malassis ne faisant que reproduire les variations de Bois de Cure, soit par déversement soit par turbinage du débit.



Figure 8 : Cas de 3 baisses détectées par l'indicateur durant la période 11/11/2017 au 05/12/2017 où le débit turbiné par Bois de Cure est restitué assez fidèlement par déversement à Malassis (B1 et B2) ou par turbinage (B3).

- certaines variations observées à Foissy semblent ne pas toujours être directement liées au fonctionnement de l'usine de Bois-de-Cure (du moins avec l'analyse des débits moyens journaliers; variation de type 2). Avec le niveau de précision temporelle des données fournies par EDF l'origine de ces variations est difficilement identifiable. Ces variations sont en général infra-journalières.

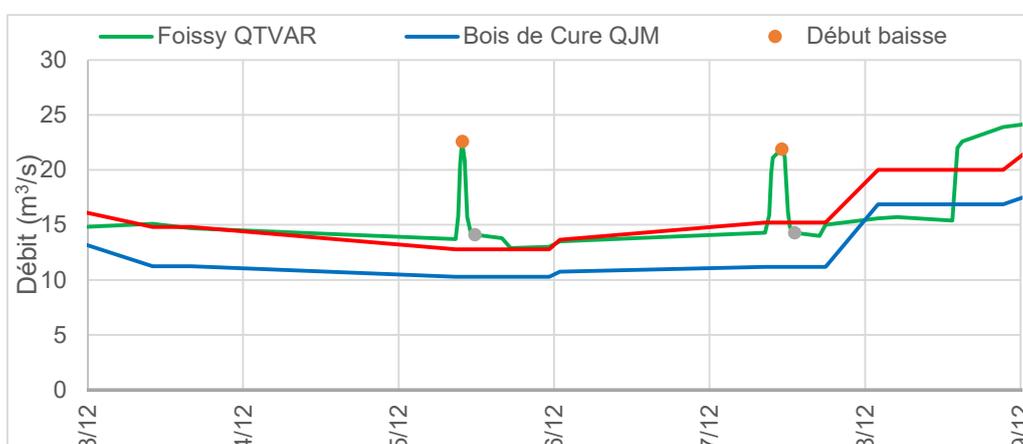


Figure 9 : Cas de 2 baisses détectées par l'indicateur durant la période 23/12/2017 au 29/12/2017 où le débit turbiné par Bois de Cure est restitué par turbinage à Malassis, mais avec apparition de variations significatives non explicables avec les débits moyens journaliers des aménagements.

L'étude des 125 baisses détectées par l'indicateur éclusée montre que 55 (44%) sont de type 1 (imputables au fonctionnement de Bois-de-Cure) et 70 (56%) sont de type 2 (autre origine). L'aménagement de Malassis semble générer plus de variations non naturelles que celui de Bois-de-Cure.

Les baisses de type 2 sont plus nombreuses que les baisses de type 1 pour les amplitudes inférieures à 100% du module ainsi que pour les amplitudes supérieures à 200% du module.

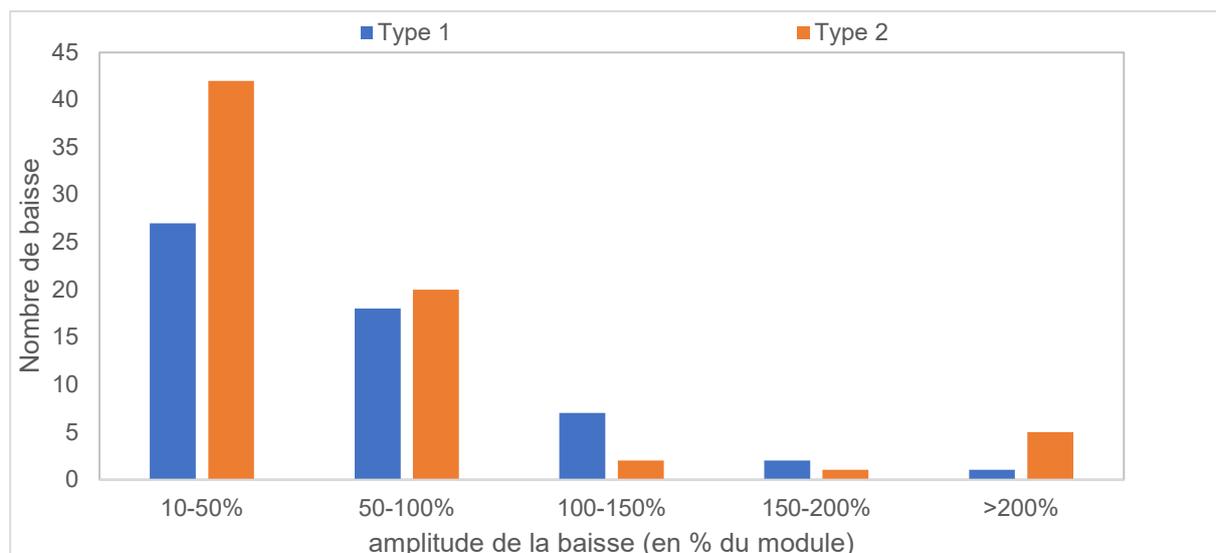


Figure 10 : Distribution des baisses détectées par l'indicateur entre le 01/01/2016 et le 31/10/2018 en fonction de leur amplitude et du type de baisse.

Parmi les 9 baisses de plus de 13 m³/s, 6 sont de type 2 et 3 de type 1.

Ne disposant que des débits moyens journaliers turbinés à Bois de Cure, il est difficile de qualifier le rôle exact de ces turbinés vis-à-vis des variations de la Cure à Foissy-les-Vézelay

3.3.3.5.2 Analyse sur la base des débits horaires de Bois de Cure

D'octobre 2019 à décembre 2019, l'exploitant a fourni les débits horaires turbinés à Bois de Cure. Nous avons donc pu conduire sur cette période une comparaison plus précise des variations de débits en les turbinés de Bois de Cure, les débits transitant à Malassy et ceux observés à Foissy-les-Vézelay.

- Hydrologie à Foissy-les-Vézelay

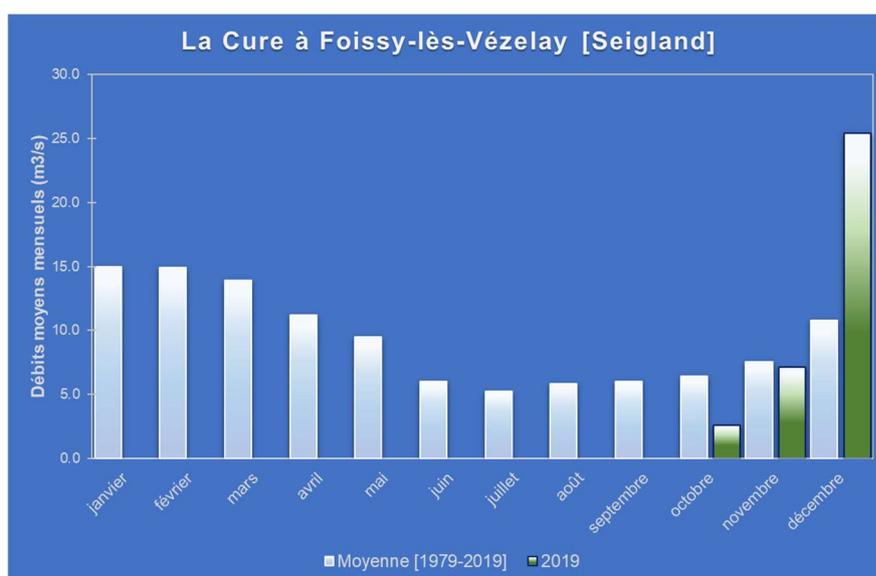


Figure 11 : Comparaison des débits moyens mensuels d'octobre à décembre 2019 par rapport à la moyenne 1979-2009.

L'hydrologie de l'automne 2019 se caractérise par des débits faibles en octobre, puis des débits proches de la moyenne en novembre et nettement supérieurs en décembre. Le débit médian de 2019 est inférieur de 32% à la valeur médiane calculée entre 1994 et 2019.

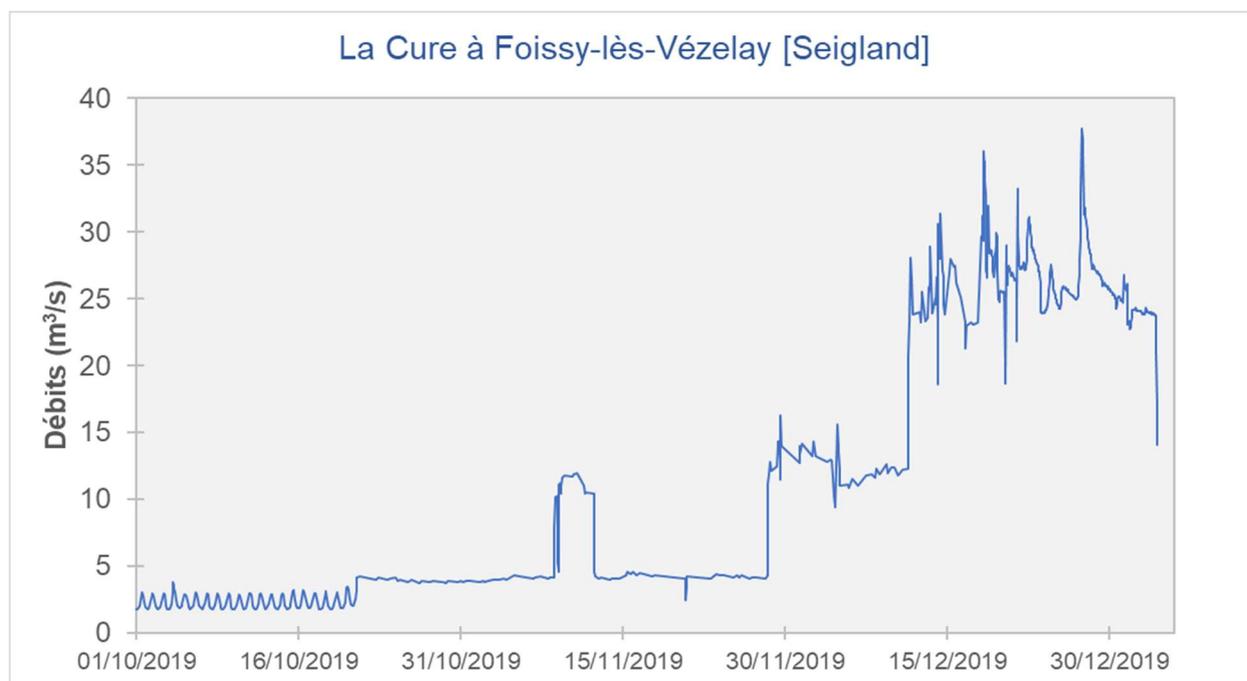


Figure 12 : Débits à pas de temps variable enregistrés à la station de Foissy-lès-Vézelay entre octobre et décembre 2019.

Durant ces 3 mois, 32 éclusées ont été comptabilisées. L'analyse des données automnales de 2013 à 2018 donne une moyenne de 9 éclusées sur la saison (de 6 à 14). Cette différence est uniquement liée aux 21 éclusées d'octobre correspondant à des augmentations de débit en journée et des baisses de nuit avec des amplitudes très faibles (1,1 m³/s). Ce fonctionnement très particulier a été mis en œuvre dans un contexte de très faible hydrologie (2 fois moins que la situation moyenne). Il permettait de délivrer des débits compatibles avec les exigences de la navigation de loisir en journée tout en conservant des réserves. La valeur de l'indicateur éclusée est de 2- pour cette période de 2019 soit une perturbation hydrologique qualifiée de marquée.

- Comparaison avec les turbinés de Bois de Cure et les débits à Malassis

Pour la période d'octobre à décembre 2019, nous disposons des débits transitant à Malassis (turbinés et déversés) ainsi que des débits horaires turbinés à Bois de Cure.

Le régime de turbinage de Bois de Cure n'est que très partiellement retranscrit en aval de Malassis. Sur les deux mois de débits faibles (octobre et novembre), seule 1 éclusée sur les 108 de Bois de Cure est retranscrite en aval. A partir fin novembre, les 4 éclusées de Bois de Cure se traduisent par seulement 2 hausses de débits en aval de Malassis. En revanche, on comptabilise 8 autres variations qui ne correspondent pas à des turbinages de Bois de Cure.

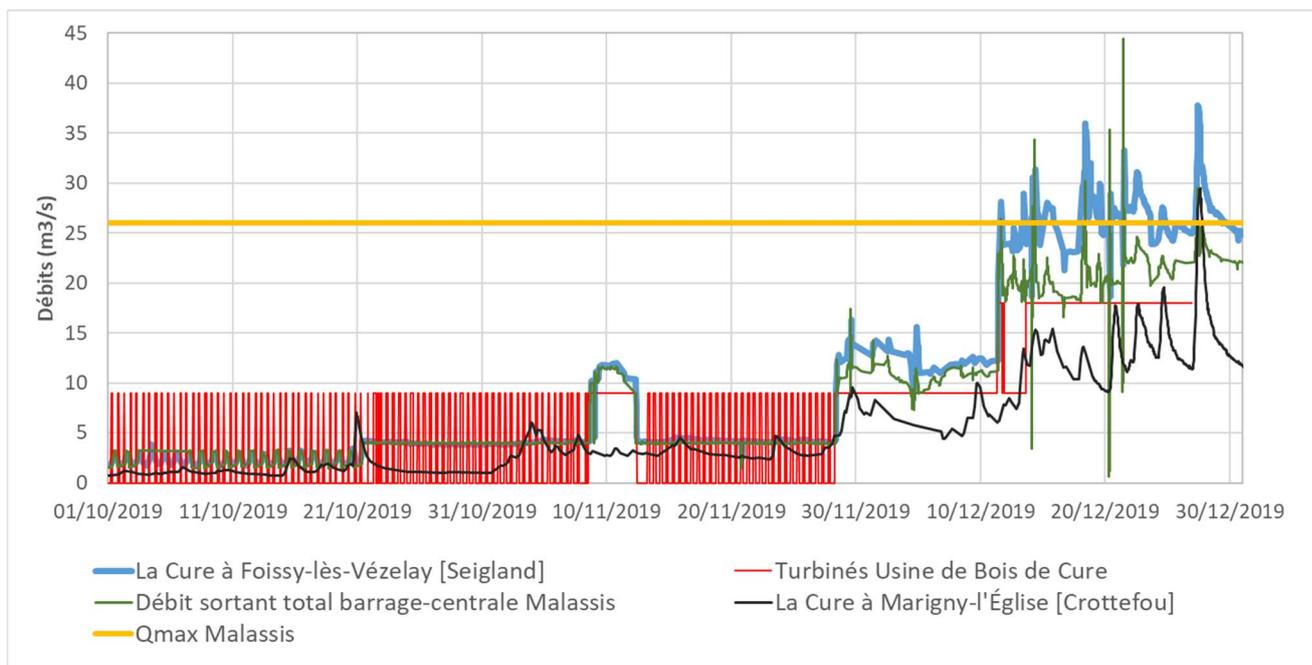


Figure 13 : Comparaison des débits à pas de temps variable enregistrés à la station de Foissy-lès-Vézelay d’octobre et décembre 2019 avec les débits de Malassiset les turbinés de Bois de Cure.

Tableau 13 : Nombre de variations totales et communes entre les 3 sites de mesures sur la Cure.

	Bois de Cure	Malassis	Foissy lès Vézelay
Bois de Cure	111		
Malassis	3	32	
Foissy lès Vézelay	3	32	32

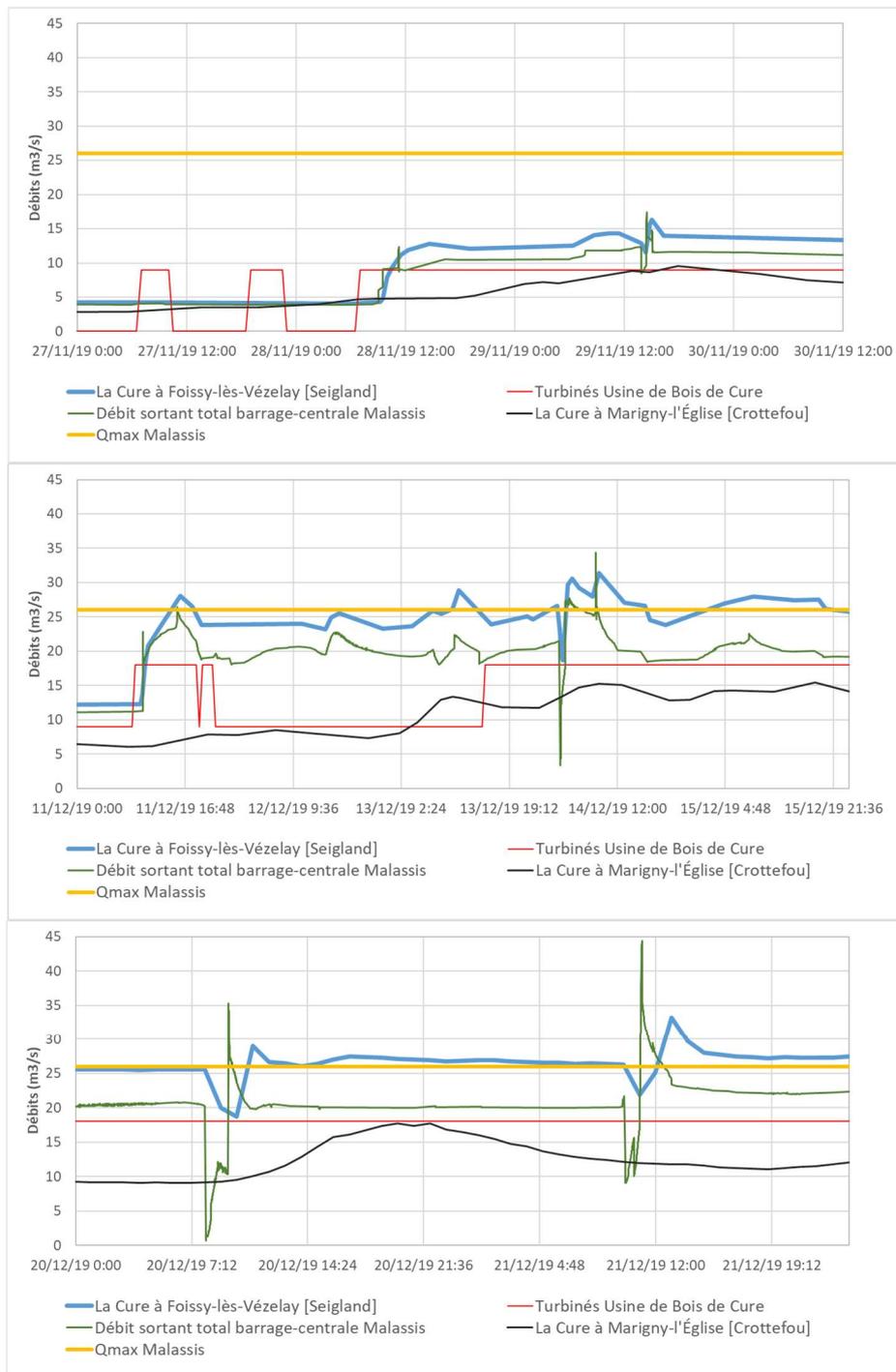
Dans les 3 exemples ci-dessous, on peut observer :

- Des éclusées de Bois de Cure non retranscrites en aval de Malassis (27, 28/11 et 13/12),
- Des éclusées qui se répercutent en aval de Malassis (28/11, 11/12),
- Des éclusées en aval de Malassis qui ne proviennent pas de variations de Bois de Cure (29/11, 14/12, 20/12 et 21/12).

Sur l’ensemble de l’automne 2019, seules 10% des variations de débits enregistrées en aval de Malassis sont directement imputables à Bois de Cure. Pour autant, la situation de cette saison n’a pas été représentatives des autres années avec notamment les 21 petites éclusées journalières générées en aval de Malassis lors des faibles débits. Si l’on exclut ces variations très particulières, il reste malgré tout encore 7 variations sur 10 qui ne proviennent pas de Bois de Cure. Ces variations sont liées :

- À des ruptures de l’acheminement par Enedis qui oblige à un arrêt brutal des groupes (14/12/2019, 20/12/2019),
- A des arrêts des groupes liés à des pertes de charge importantes au plan de grille liées au transit des feuilles (01/12/2019, 18/12/2019).

A l’opposé, durant la même période, 97% des éclusées de Bois de Cure n’ont pas été retranscrites directement sous Malassis.



Figures 14, 15, 16 et 17 : Zooms sur les débits à pas de temps variable enregistrés à la station de Foissy-lès-Vézelay, au niveau de l'aménagement de Malassis et en aval de Bois de Cure.

3.3.3.6. BILAN DES NIVEAUX DE PERTURBATION

Les niveaux de perturbations de l'hydrologie détectés par l'indicateur éclusée diminuent d'amont en aval, sous l'effet de l'amortissement des variations lors de leur propagation vers l'aval, les deux stations étant distantes de 26.5 km.

La station de Foissy présente un niveau de perturbation variant selon les années de sensible à très marquée.

Les périodes automne/hiver et printemps présentent les niveaux de perturbation les plus élevés à la station de Foissy.

Ce sont surtout les amplitudes et les gradients de variations qui sont les paramètres les plus déclassants.

L'analyse de 2013 à 2018, les variations observées en aval de Malassis semblent liées à seulement 44% au fonctionnement de l'usine de Bois-de-Cure.

Un zoom à l'automne 2019 a confirmé que certaines variations enregistrées à Foissy provenaient directement de l'aménagement de Malassis (arrêt du turbinage lors d'avaries (réseau, dégrilleur). Cette analyse détaillée a également montré que durant cette période, 97% des éclusées de Bois de Cure ne se retranscrivaient pas directement sous Malassis.

3.3.4. ANALYSE DES ETIAGES

3.3.4.1. EN AMONT DES AMENAGEMENTS

La station hydrologique utilisée pour caractériser les étiages de cette partie du bassin est celle de Marigny-l'Eglise pour la période 1962-2018.

Les différents descripteurs de l'étiage sont très variables selon les années. Sur la période 1962-2018, le débit moyen de juillet à septembre va de 0.78 à 4.49 m³/s (médiane = 1.82 m³/s, 39% du module), le QMNA de 0.58 à 2.95 m³/s (médiane = 1.23 m³/s, 27% du module) et le VCN10 de 0.45 à 1.94 m³/s (médiane = 0.94 m³/s, 20% du module). Il n'y a pas de tendance nette concernant l'évolution de ces descripteurs des étiages.

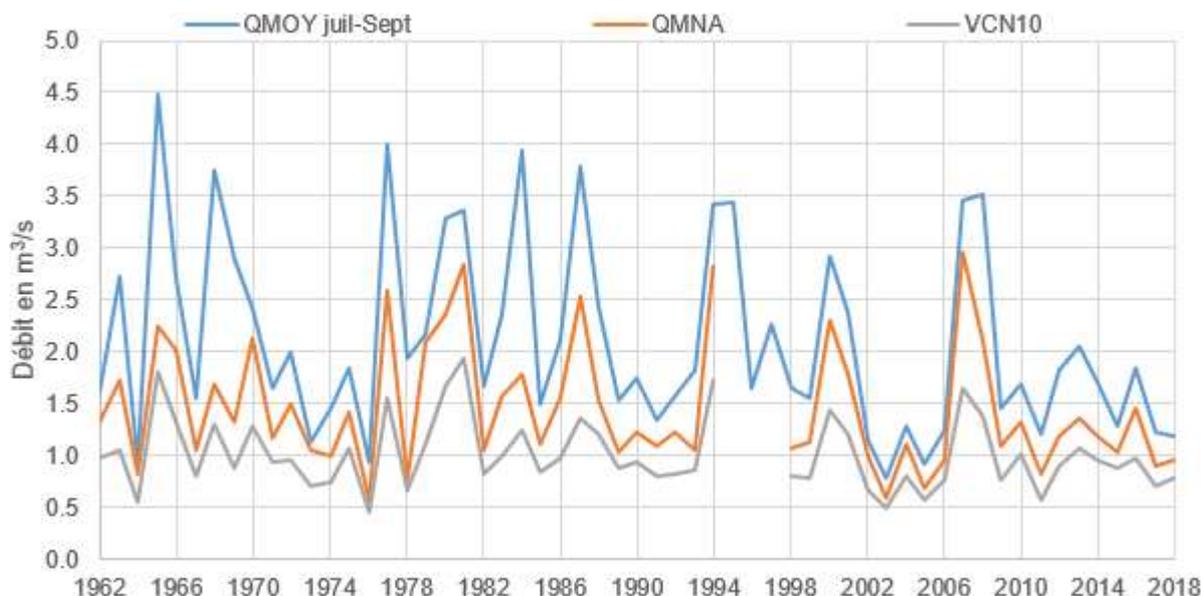


Figure 18 : Évolution du débit moyen des mois de juillet à septembre (QMOY), du débit minimum moyen mensuel (QMNA) et du débit minimum sur 10 jours consécutifs (VCN10) de la Cure à Marigny entre 1962 et 2018.

Sur cette période, le déficit médian annuel en étiage s'établit à 1.14 Mm³ pour une durée cumulée médiane de 50 jours par an. Cette valeur est conforme à une zone de moyenne montagne relativement bien arrosée comme la façade ouest du Morvan.

Les déficits sont fluctuants d'une année sur l'autre avec des années de forts déficits en 1964, 1976, 1985, 2002 à 2006 et des années sans déficit en 1965, 1977, 1980-81, 1987, 1994, 2000, 2007 et 2008.

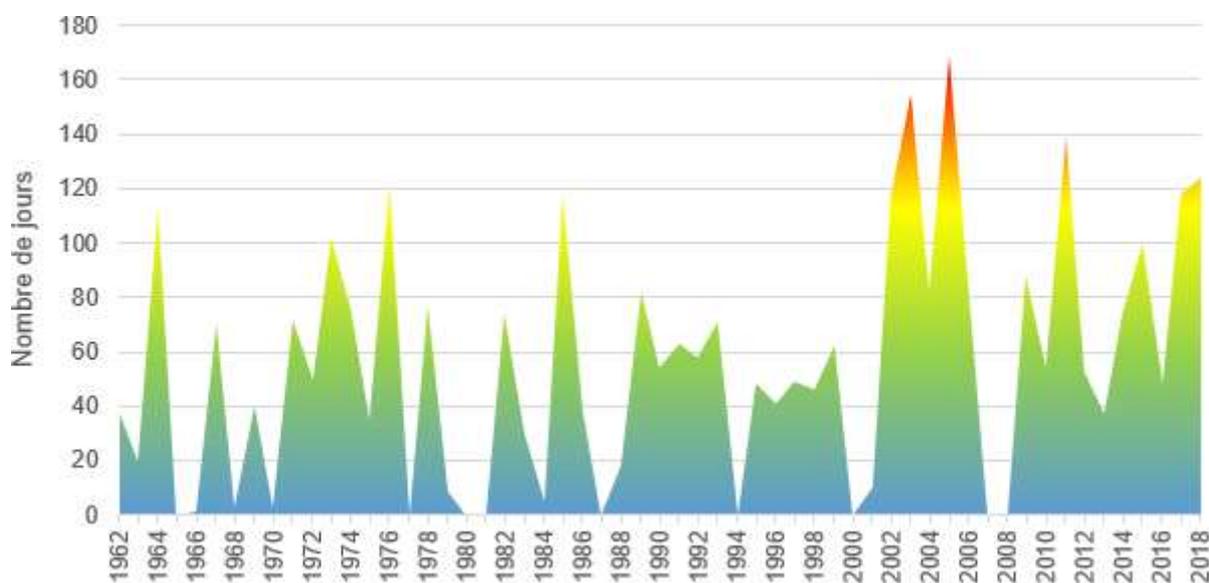


Figure 19 : Évolution des déficits annuels d'étiage sur la Cure à Marigny-l'Eglise entre 1962 et 2018.

Analysés sur des périodes de 10 ans, il apparaît que les déficits d'étiage se sont aggravés à partir des années 2000. Depuis 2000, deux décennies de forts déficits se suivent, la durée des étiages a en moyenne augmentée de 35 jours entre la période avant 2000 et celle d'après 2000.

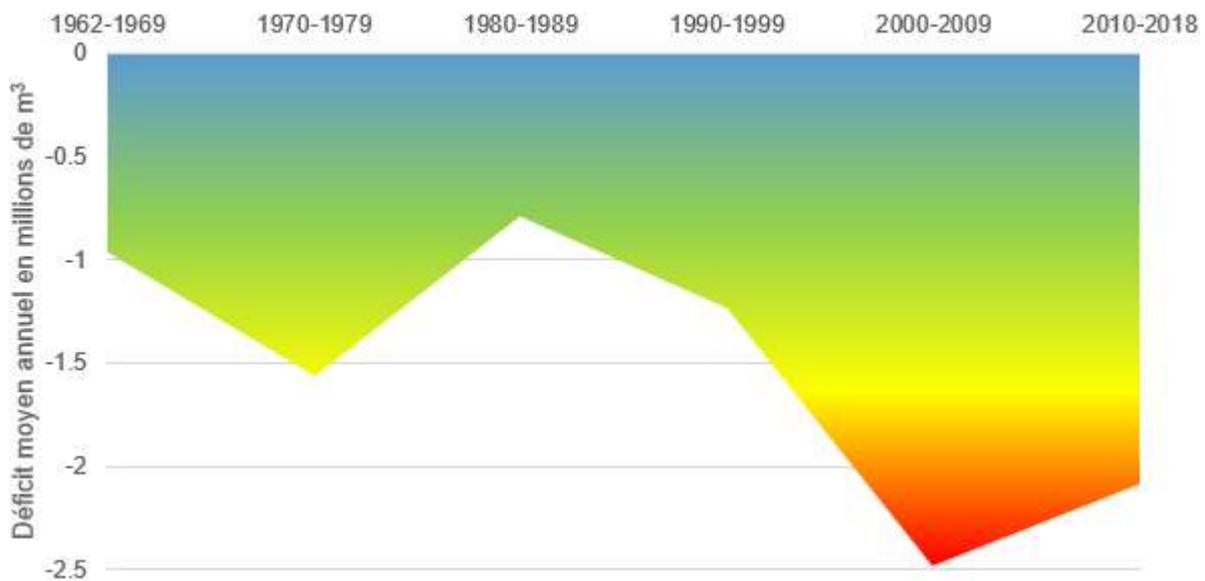


Figure 20 : Évolution des déficits d'étiage par décennies sur la Cure à Marigny-l'Eglise entre 1962 et 2018.

3.3.4.2. A PROXIMITE AVAL DES AMENAGEMENTS

La station hydrologique utilisée pour caractériser les étiages de cette partie du bassin est celle de Foissy-lès-Vézelay de 1997 à 2018.

Les différents descripteurs de l'étiage sont très variables selon les années. Sur la période 1997-2018, le débit moyen de juillet à septembre va de 3.02 à 9.21 m³/s (médiane = 4.70 m³/s, 50% du module), le QMNA de 1.59 à 6.24 m³/s (médiane = 3.13 m³/s, 33% du module) et le VCN10 de 1.04 à 3.44 m³/s (médiane = 1.36 m³/s, 14% du module).

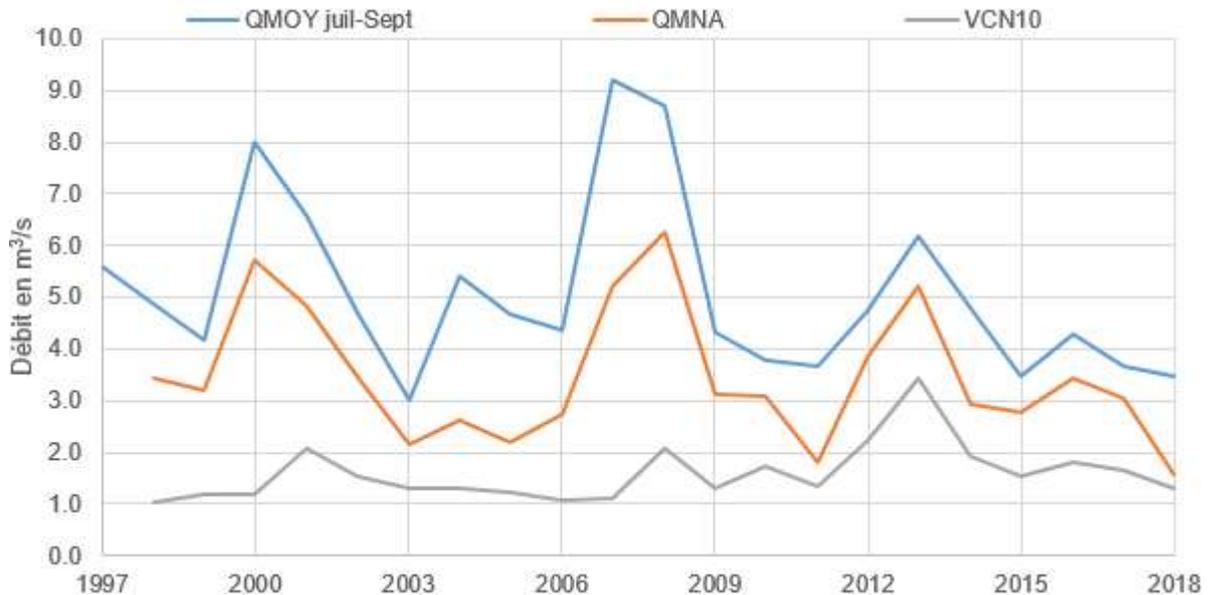


Figure 21 : Évolution du débit moyen des mois de juillet à septembre (QMOY), du débit minimum moyen mensuel (QMNA) et du débit minimum sur 10 jours consécutifs (VCN10) de la Cure à Marigny entre 1997 et 2018.

L'évolution du QMOY de juillet à septembre et du QMNA montre une baisse de ces paramètres dans la dernière décennie, plutôt liée à l'absence de valeurs fortes, à l'inverse, le VCN10 semble augmenter.

Sur cette période, le déficit médian annuel en étiage s'établit à 3.5 Mm³ pour une durée cumulée médiane de 50 jours par an.

Les déficits sont fluctuants d'une année sur l'autre avec des années de forts déficits de 2003 à 2006, en 2011 et 2018, et des années sans déficit en 1996 et 2013.

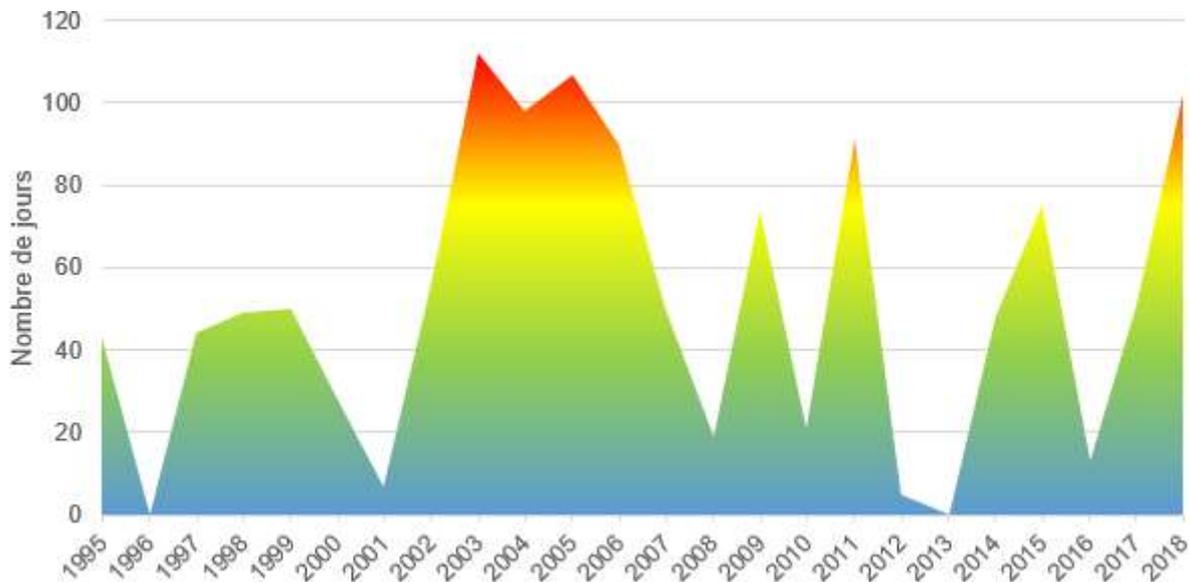


Figure 22 : Évolution des déficits annuels d'étiage sur la Cure à Foissy-lès-Vézelay entre 1995 et 2018.

Analysé sur des périodes de 10 ans, il apparaît que les déficits d'étiage ont été les plus importants dans les années 2000. Dans la dernière décennie ils sont plutôt faibles, contrairement à ce qui a été observé sur la station de Marigny.

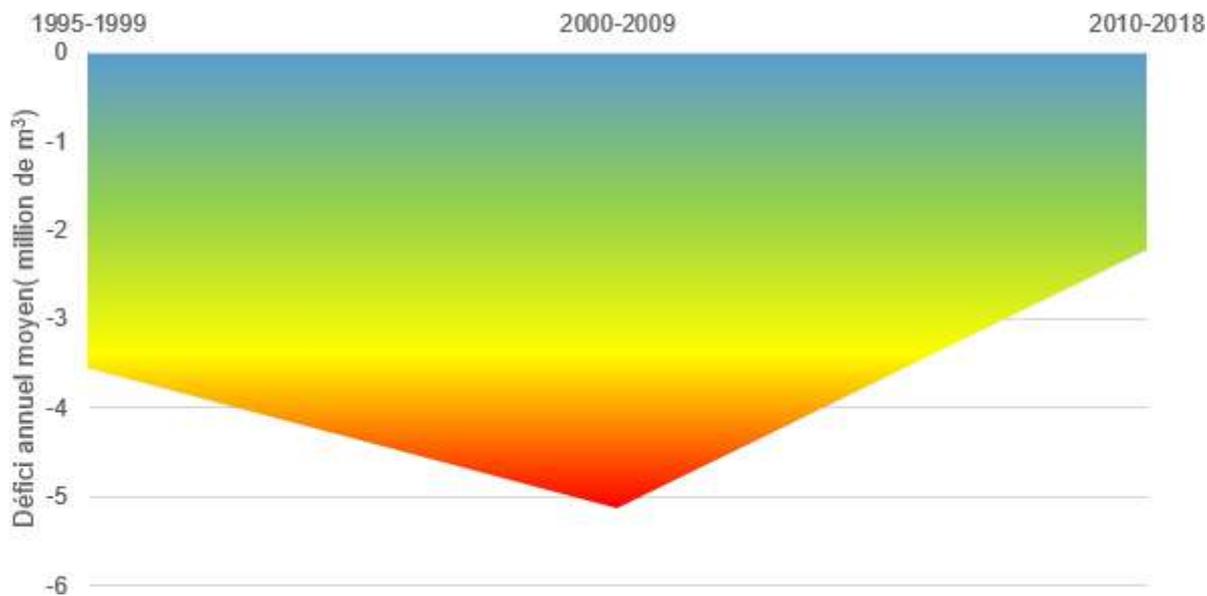


Figure 23 : Évolution des déficits d'étiage par décennies sur la Cure à Foissy-lès-Vézelay entre 1995 et 2018.

3.3.4.3. SUR LA PARTIE BASSE DE LA CURE

La station hydrologique utilisée pour caractériser les étiages de cette partie du bassin est celle d'Arcy-sur-Cure de 1962 à 2018.

Les différents descripteurs de l'étiage sont très variables selon les années. Sur la période 1997-2018, le débit moyen de juillet à septembre va de 3.38 à 14.39 m³/s (médiane = 6.53 m³/s, 40% du module), le QMNA de 1.23 à 8.93 m³/s (médiane = 4.51 m³/s, 28% du module) et le VCN10 de 0.80 à 5.88 m³/s (médiane = 2.25 m³/s, 14% du module).

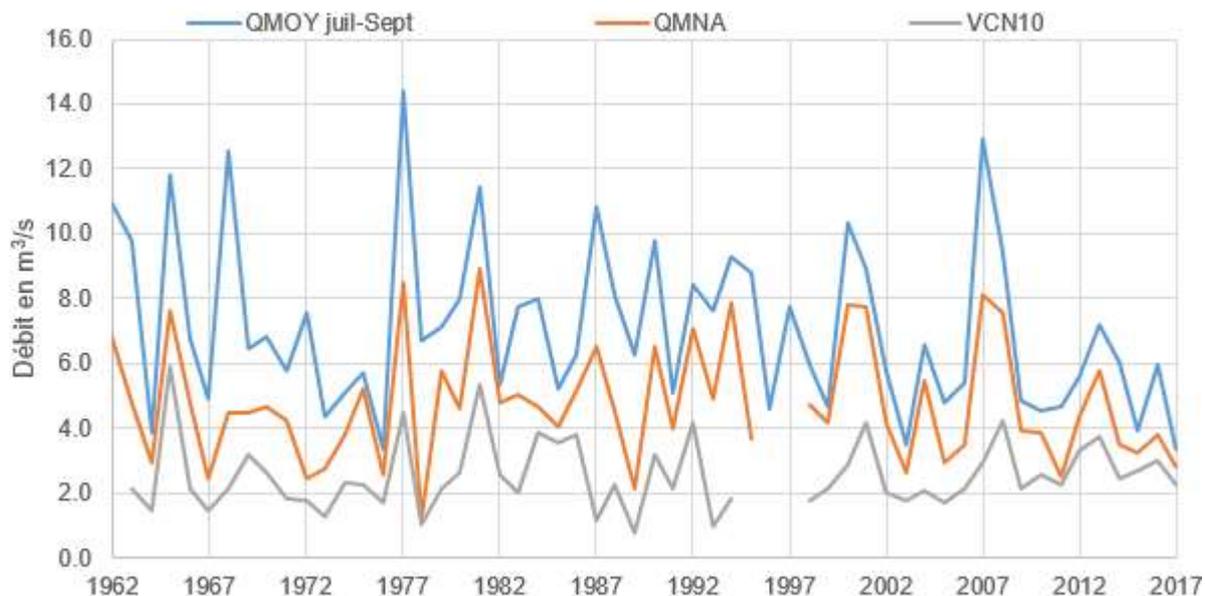


Figure 24 : Évolution du débit moyen des mois de juillet à septembre (QMOY), du débit minimum moyen mensuel (QMNA) et du débit minimum sur 10 jours consécutifs (VCN10) de la Cure à Marigny entre 1962 et 2017.

L'évolution du QMOY de juillet à septembre et du QMNA montre une baisse de ces paramètres dans la dernière décennie, plutôt liée à l'absence de valeurs fortes, à l'inverse, le VCN10 semble augmenter.

Au cours de cette période, le déficit médian annuel en étiage s'établit à 3.7 Mm³ pour une durée cumulée médiane de 45 jours par an.

Les déficits sont fluctuants d'une année sur l'autre avec des années de forts déficits en 1972, 1975, 1977, 1989, 2003, 2005 et 2017 et des années sans déficit en 1977, 1981, 1992, 2001 et 2013.

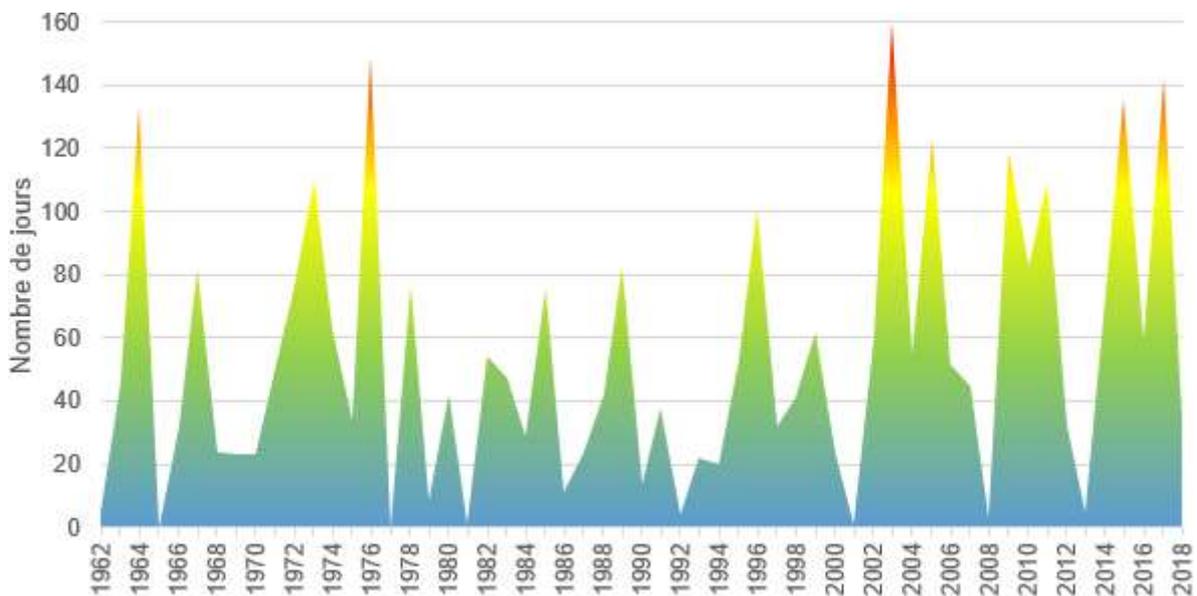


Figure 25 : Évolution des déficits annuels d'étiage sur la Cure à Arcy-sur-Cure entre 1962 et 2018.

Analysé sur des périodes de 10 ans, il apparaît que les déficits d'étiage ont été importants dans les années 1970 et se sont aggravés à partir des années 2000 où deux décennies de fort déficit se succèdent.

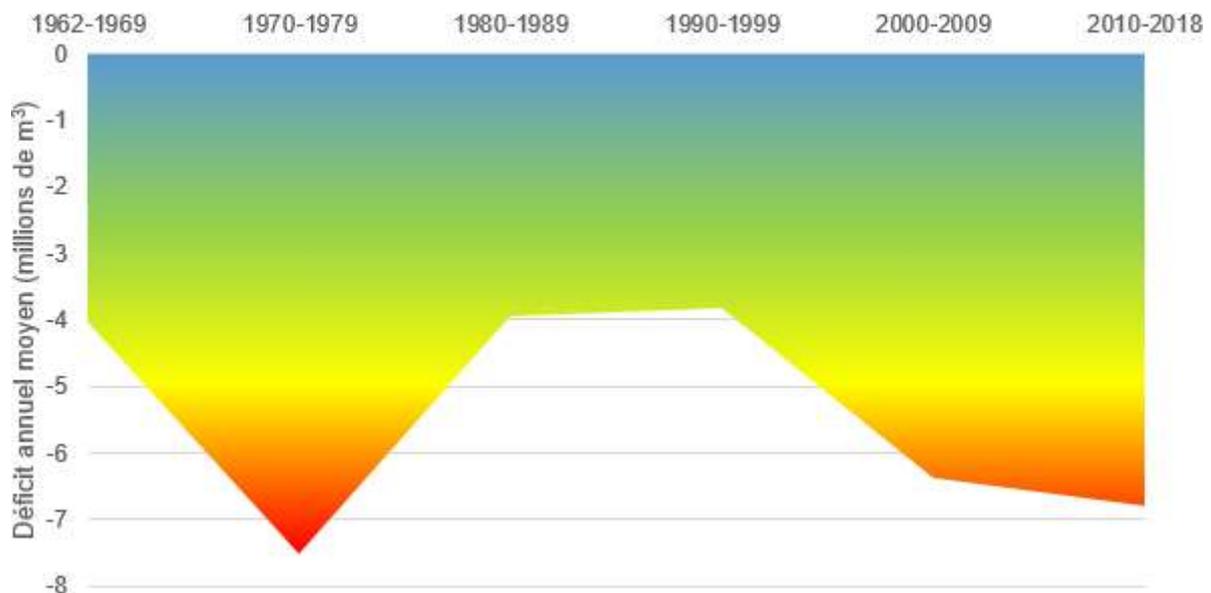


Figure 26 : Évolution des déficits d'étiage par décennies sur la Cure à Arcy-sur-Cure entre 1962 et 2018.

3.3.4.4. SUR UN COURS D'EAU NON INFLUENCE PROCHE DE LA ZONE D'ETUDE : LE COUSIN

La station hydrologique utilisée pour caractériser les étiages de cette partie du bassin est celle du Cousin à Avallon pour la période 1995-2018.

Les différents descripteurs de l'étiage sont très variables selon les années. Sur la période 1995-2018, le débit moyen de juillet à septembre va de 0.15 à 2.34 m³/s (médiane = 0.60 m³/s, 15% du module), le QMNA de 0.11 à 1.51 m³/s (médiane = 0.39 m³/s, 10% du module) et le

VCN10 de 0.08 à 0.88 m³/s (médiane = 0.29 m³/s, 7% du module). Il n'y a pas de tendance nette concernant l'évolution de ces descripteurs des étiages.

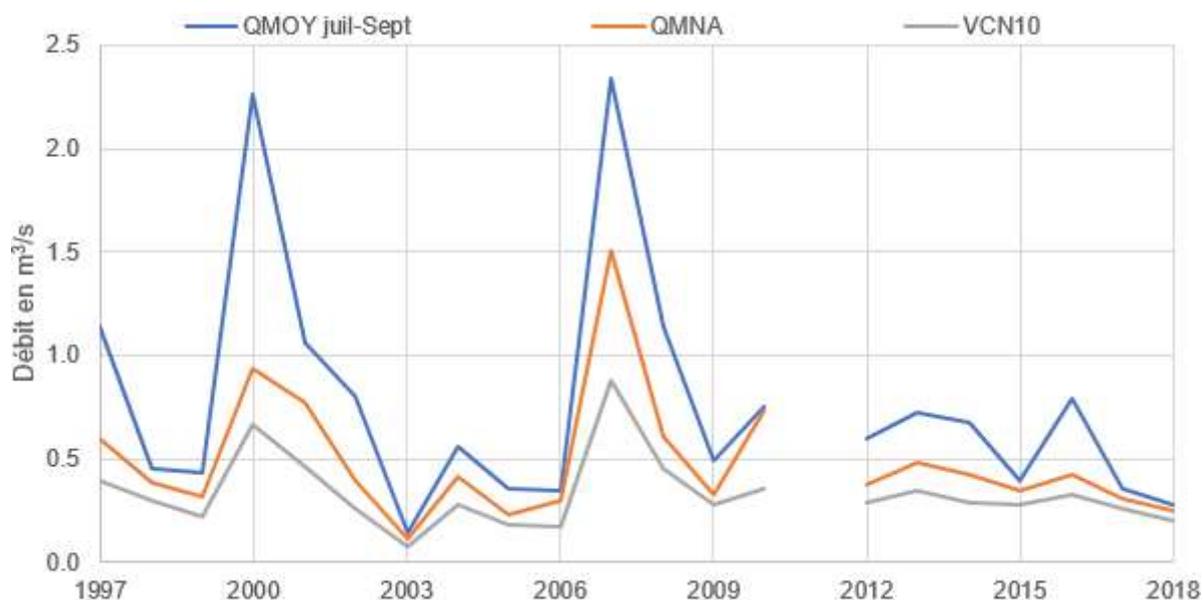


Figure 27 : Évolution du débit moyen des mois de juillet à septembre (QMOY), du débit minimum moyen mensuel (QMNA) et du débit minimum sur 10 jours consécutifs (VCN10) de la Cousin à Avallon entre 1997 et 2018.

Sur cette période, le déficit médian annuel en étiage s'établit à 0.43 Mm³ pour une durée cumulée médiane de 52 jours par an. Cette valeur est, comme sur la Cure, conforme à une zone de moyenne montagne relativement bien arrosée comme la façade ouest du Morvan.

Les durées des périodes de déficits sont fluctuantes d'une année sur l'autre avec des années de forts déficits en 2003, 2005, 2017 et 2018 et des années sans déficit en 2000 et 2007.

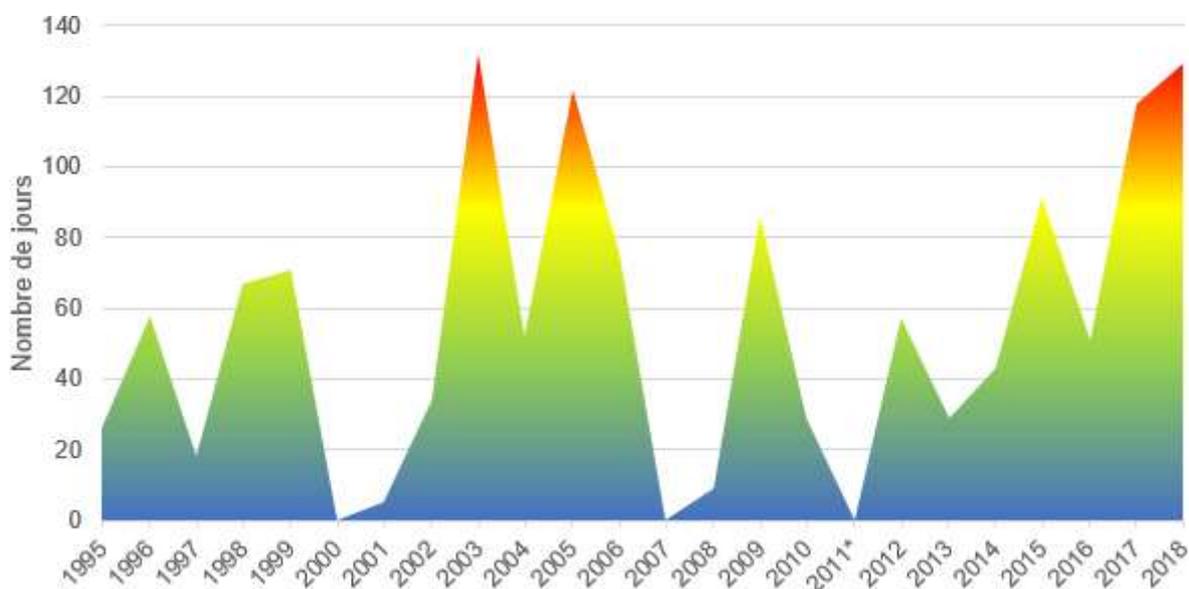


Figure 28 : Évolution de nombre de jours avec déficits annuels d'étiage sur le Cousin à Avallon entre 1995 et 2018 (*pas de données en 2011).

Analysés sur des périodes de 10 ans, il apparaît que les déficits d'étiage se sont aggravés à partir des années 2000. Depuis 2000, deux décennies de forts déficits se suivent, la durée des

étiages a en moyenne augmentée de 22.5 jours entre la période avant 2000 et celle d'après 2000.

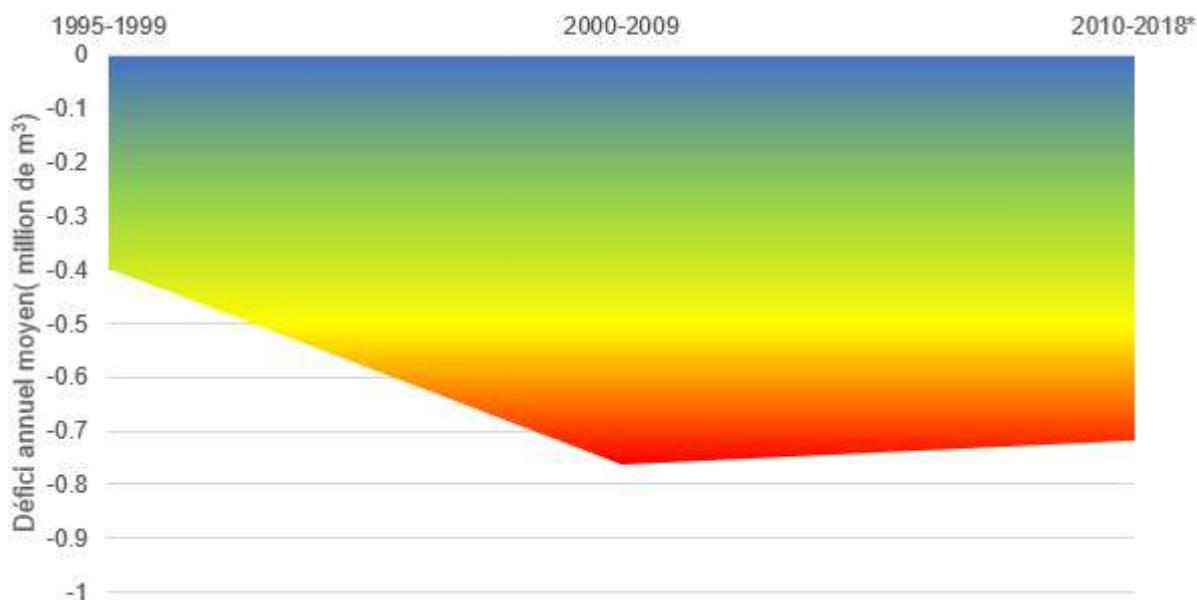


Figure 29 : Évolution des déficits d'étiage par décennies sur le Cousin à Avallon entre 1995 et 2018 (*l'année 2011 n'est pas incluse dans la période 2010-2018 : pas de données).

3.3.4.5. COMPARAISON INTER-STATIONNELLE

D'une manière générale, et logiquement, les déficits augmentent vers l'aval du bassin.

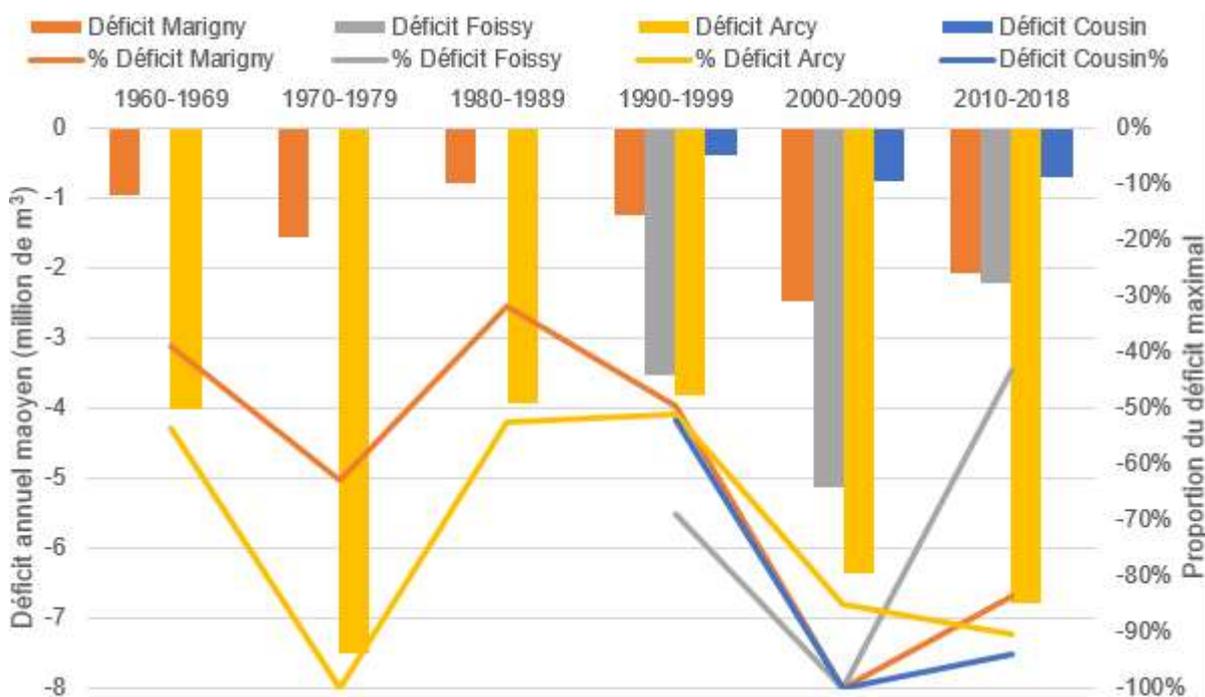


Figure 30 : Comparaison des déficits moyens par décennies des stations hydrologiques de la Cure à Marigny-l'Église, Foissy-lès-Vézelay et Arcy-sur-Cure et la station du Cousin à Avallon.

Sur la période 1962-2018, les déficits des stations hydrologiques de Marigny (amont aménagements) et d'Arcy (aval des aménagements) se suivent, même si ceux de la station aval sont plus importants.

Les déficits rencontrés sur ces deux stations se retrouvent également sur le Cousin pour les trois dernières décennies, avec des variations similaires.

L'effet du soutien d'étiage depuis le lac de Chaumeçon ne se fait pas sentir à Foissy sur les déficits importants de la décennie des années 2000 mais est très visible à la station de Foissy au cours de la dernière décennie. Par contre son effet est vite estompé puisque qu'il ne parvient pas à compenser le déficit de la partie aval du bassin.

3.3.4.6. BILAN DES ÉTIAGES

Les débits moyens d'étiage restent soutenus mais sont très fluctuants d'une année sur l'autre.

Les descripteurs des déficits volumétriques par rapport au débit non dépassé 15% du temps (Q15) soulignent une aggravation des étiages depuis les années 2000, tant en volume qu'en durée.

3.4. THERMIE

3.4.1. DONNÉES DISPONIBLES

Nous avons récupéré les chroniques de température de 4 stations de mesure de la température de l'eau de la Cure :

- Marigny l'Eglise, en amont du barrage du Crescent, entre 2008 et 2018,
- Moulin de Lingoult, à l'aval proche du barrage du Crescent, entre 2014 et 2018,
- Saint-André-en-Morvan, dans la partie médiane du TCC de Bois-de-Cure, entre 2009 et 2018,
- Pierre-Perthuis, à l'aval proche du barrage de Malassis, entre 2009 et 2011,
- Fontaines salées et Bannay en 2001 de juillet à septembre.

3.4.2. RÉSULTATS

L'analyse des températures moyennes mensuelles montre :

- Des eaux du TCC plus froides à partir d'avril et jusqu'en août que celles entrant en amont de Crescent sur la Cure (Marigny) et sortant en aval de Malassy (Pierre-Perthuis) (+2°C par rapport à l'amont et pratiquement 3°C par rapport à l'aval).
- Sur l'ensemble des stations et pour les années de suivis, les températures moyennes sont compatibles avec le développement de la truite ainsi que celle des espèces d'accompagnement (chabot, loche, vairon, lamproie de planer).

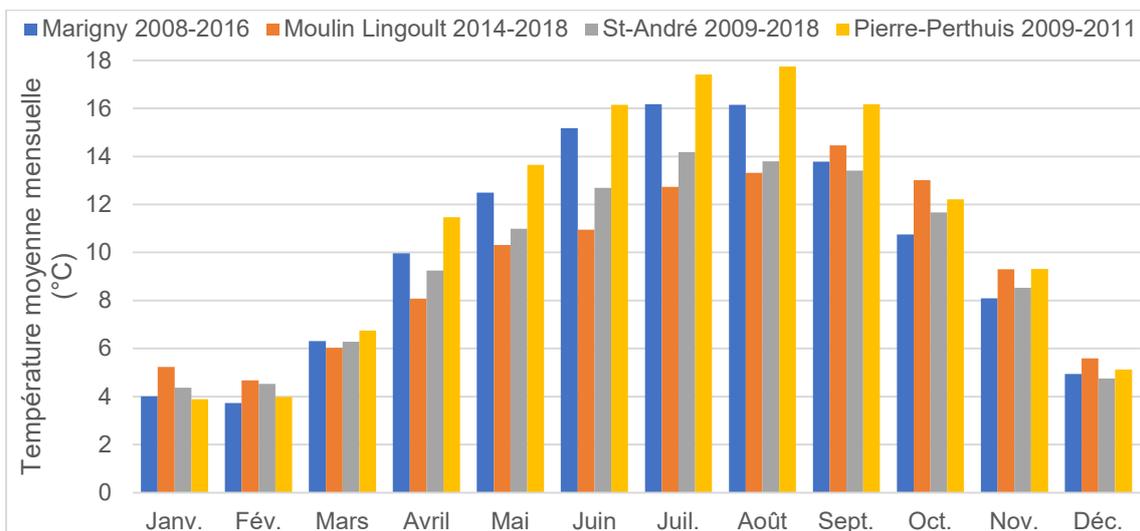


Figure 31 : Evolution de la température moyenne mensuelle des 4 stations de suivi de la température de l'eau de la Cure.

Trois sondes ont également été placées au niveau des aménagements (Moulin de Lingoult en aval du barrage du Crescent, aval immédiat Malassis et au niveau d'Asquin) dans le cadre de l'étude d'impact des aménagements (ASCONIT consultant et ARALEP, 2006) entre le 22/06/2004 et le 09/05/2005.

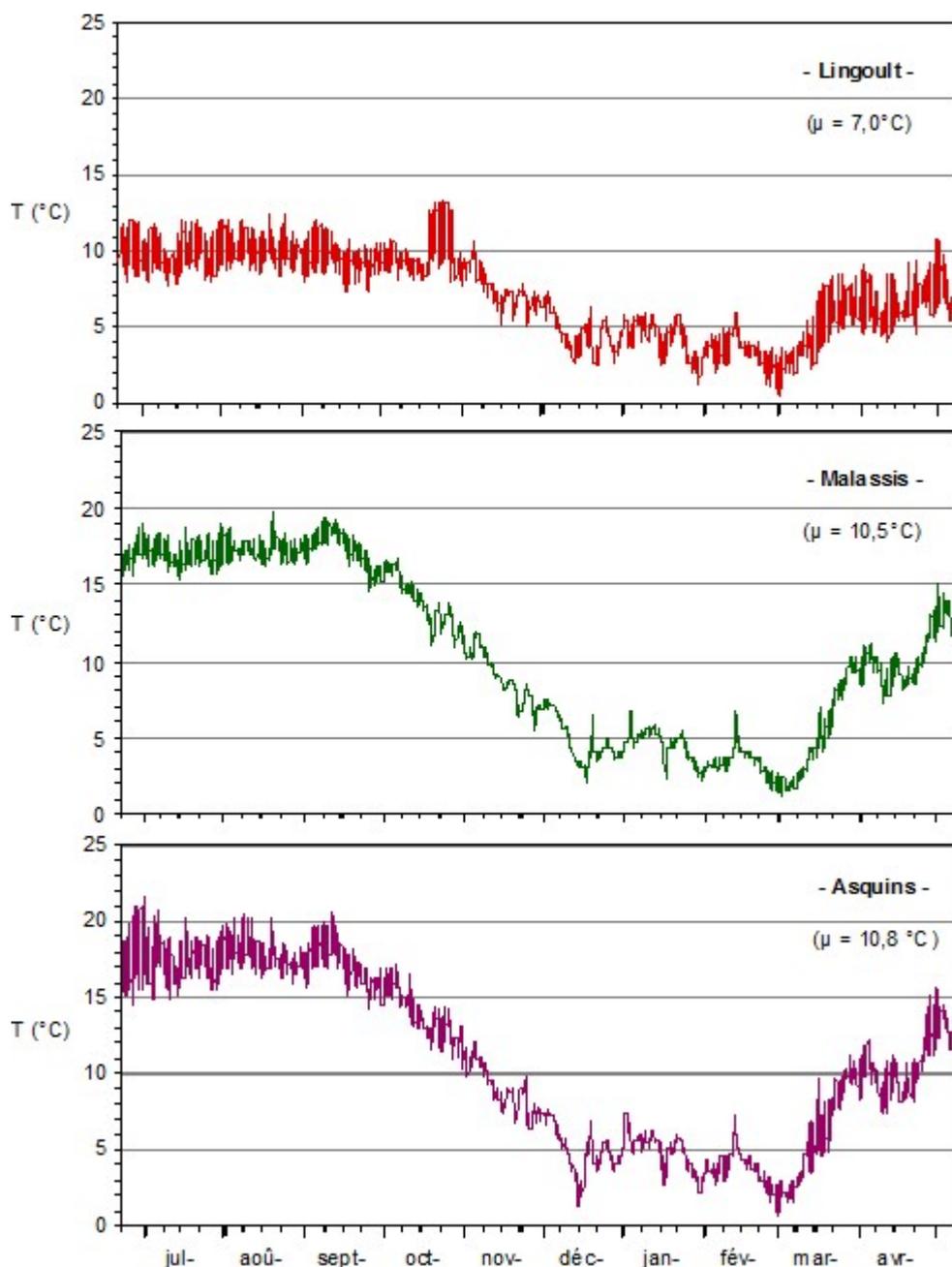


Figure 32 : Enregistrement continu de la température de l'eau au niveau des 3 sites de l'étude d'impact des aménagements de Bois de Cure et Malassis (ASCONIT consultant et ARALEP, 2006).

Durant cette période les tendances sont :

- A Lingoult, la température apparaît très tamponnée autour de la valeur de 10°C en relation avec l'origine de l'alimentation du débit réservé (vanne de fond). L'amplitude journalière est bien marquée. Une hausse de la température se produit la dernière semaine d'octobre qui peut être liée au niveau du lac avec des eaux restituées plus proche de la surface et donc plus chaudes.
- A l'aval immédiat de Malassis, le suivi confirme les données mensuelles avec des eaux nettement plus chaudes que celles du TCC. Les températures estivales varient entre 16 et 19,5°C. Les amplitudes de variations journalières sont assez limitées

(moins de 2,5°C). Ces températures restent compatibles avec le développement de la truite,

- A Asquins, les températures augmentent avec des maxima journaliers pouvant dépasser les 20°C. Les variations journalières sont plus marquées qu'en aval de Malassis avec des amplitudes de 3 à 4,5°C. Ces variations sont liées aux cycles nyctéméraux des températures de l'air.

Nous disposons également d'un suivi de 2001 durant les mois d'été (Baran, 2001).

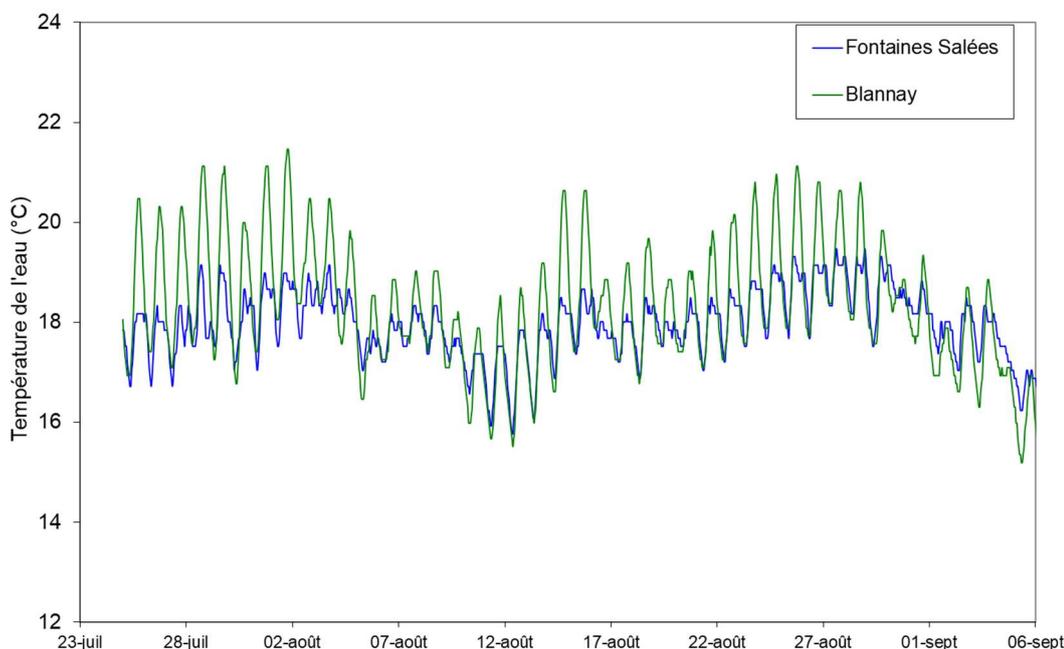


Figure 33 : Enregistrement continu de la température de l'eau au niveau des 2 sites sur la Cure en aval de Malassis (Baran, 2001).

Losr de ce suivi, température moyenne était de 18,1°C aux Fontaines Salées et 18,5°C à Blannay soit des valeurs proches des limites pour la truite commune. Comme observé dans les données précédentes, les amplitudes sont nettement moins marquées à l'aval proche de Malassis qu'au niveau de la confluence du Cousin (Blannay).

Le régime thermique de la Cure du barrage du Crescent à la confluence du Cousin est à la fois influencé par les aménagements hydroélectriques (fort refroidissement estival des eaux dans le TCC de Crescent), amplitudes limitées en aval de Malassis et les conditions atmosphériques avec un réchauffement des eaux en aval et une augmentation des amplitudes journalières. Les conditions de températures semblent rester favorables au développement des truites au moins jusqu'à Asquins.

4. BIBLIOGRAPHIE

Courret, D., 2014. Caractérisation de la perturbation hydrologique induite par les régimes d'éclusées hydroélectriques et définition d'un indicateur. Réflexion sur les mesures de mitigation des impacts des éclusées sur les populations de poissons. Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse.

Guintoli, I., Renard, B., 2010. Identification des impacts hydrologiques du changement climatique: constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages. CEMAGREF - ONEMA.

Soudre, R., 2018. Rapport de synthèse du protocole d'étude entre EDF et NVF comprenant l'analyse des essais et l'analyse de l'hydrologie. Rapport EDF/UP Est.