

ETABLISSEMENT PUBLIC D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DU BASSIN VERSANT DE L'AULNE

N° : 24F-166-RA-1

Révision n° : A

Date : 01/04/2025

Votre contact :
Benjamin SEUROT
seurot@isl.fr

ELABORATION DES COURBES DE
DEFAILLANCES POUR OPTIMISER LA GESTION
DU SOUTIEN D'ETIAGE A PARTIR DE LA
RETENUE DE SAINT-MICHEL A BRENNILIS-
BASSIN VERSANT DE L'AULNE ET DE L'HYERES



Avec le soutien financier du Département du Finistère
et de la Région Bretagne



// Rapport d'étude

ISL Ingénierie SAS – ANGERS
25 rue Lenepveu
49100 – Angers
France
Tel : +33.2.41.36.01.77
Fax : +33.1.40.34.63.36

www.isl.fr



ISL
Ingénierie

Visa

Document verrouillé du 13/05/2025.

Révision	Date	Auteur	Chef de Projet	Superviseur	Commentaire
A	01/04/2025	AVL	BSE	ATA	

ATA : TARDIEU Antoinette

AVL : VALLEE Arnaud

BSE : SEUROT Benjamin

Rapport ISL
24F-166-RA-1
Revision A
Elaboration des courbes de défaillances pour
<http://www.isl.fr/r.php?c=260530>



SOMMAIRE

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	1
2	RECUEIL ET ANALYSE DES DONNEES D'ENTREE	3
2.1	PLUVIOMETRIE.....	3
2.2	HYDROMETRIE	4
2.3	PRELEVEMENTS ET REJETS.....	7
2.4	TEMPERATURES ET EVAPOTRANSPIRATION	11
2.5	RETENUE DE SAINT-MICHEL.....	12
2.6	APPORTS DU BASSIN VERSANT DE LA RETENUE DE SAINT-MICHEL	13
3	CONSTRUCTION DU MODELE HYDROLOGIQUE	13
3.1	DEMARCHE GENERALE	13
3.2	CHOIX DU LOGICIEL ET DU TYPE DE MODELISATION	13
3.3	DECOUPAGE EN SOUS BASSINS VERSANTS	16
3.4	TOPOLOGIE DU MODELE.....	17
3.5	REPARTITION DES PLUIES SUR LES BASSINS VERSANTS DU MODELE	20
3.6	CALAGE.....	22
3.6.1	Démarche adoptée pour le calage.....	22
3.6.2	Calage à Scignac.....	22
3.6.3	Vérification du calage du modèle global	24
4	ELABORATION DES COURBES DE DEFAILLANCE EN SITUATION ACTUELLE	27
4.1	DEMARCHE GENERALE	27
4.2	COURBES DE DEFAILLANCE ETABLIES SUR LA PERIODE 2006-2023	30
5	ELABORATION DES COURBES DE DEFAILLANCE A L'HORIZON 2040-2060.....	32

5.1	PREAMBULE	32
5.2	CHRONIQUE DE DEBIT JOURNALIERS DE L'AULNE AU POINT NODAL A L'HORIZON 2040-2060	34
5.3	PLUVIOMETRIE ET ETP SUR LA RETENUE DE SAINT-MICHEL A L'HORIZON 2040-2060	37
5.4	COURBES DE DEFAILLANCE A L'HORIZON 2040-2060	38

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1	PROGRAMME PYTHON	1
-----------------	-------------------------------	----------

TABLE DES FIGURES

Figure 1-1 : Schéma du complexe hydraulique de l'Aulne (source : EPAGA).....	2
Figure 2-1 : stations pluviométriques retenues pour l'étude	3
Figure 2-2 : stations hydrométriques retenues pour l'étude.....	5
Figure 2-3 : chroniques de débits disponibles aux différentes stations hydrométriques.....	6
Figure 2-4 : scatter-plot des rejets issus de STEP à Châteauneuf et Châteaulin.....	8
Figure 2-5 : chronique de rejets (STEP).....	9
Figure 2-6 : chroniques de prélèvements en eau potable (AEP)	10
Figure 2-1 : historique des températures à Pleyber-Christ de 2000 à 2023.....	11
Figure 1-2 : Chronique d'ETP journalière sur la période 2006-2023.....	12
Figure 1-3 : loi Cote – Volume de la retenue de Saint-Michel.....	12
Figure 1-4 : Chronique de débits journaliers reconstitués entrant dans la retenue de Saint-Michel sur la période 2006-2024 (source : EDF)	13
Figure 3-1 : schéma de base d'un modèle GESRES _{ISL}	14
Figure 3-2 : schéma du modèle hydrologique GR4J	15
Figure 3-3: stockage dans un tronçon (J.P. Laborde, 2003).....	16
Figure 3-4 : numérotation des sous-bassins versants	17
Figure 3-5 : visualisation de la topologie du modèle hydrologique.....	19
Figure 3-6 : découpage en polygones de Thiessen à partir de la localisation des pluviomètres	20
Figure 3-7 : bassin versant de l'Aulne à Scignac.....	22
Figure 3-8 : débit observé et débit en sortie du modèle à Scignac sur la période 1993-2023.....	23
Figure 3-9 : débit observé et débit en sortie du modèle à Scignac – zoom sur l'année 2019/2020	24
Figure 3-10 : exemple de profil en travers d'un bief.....	25

Figure 3-11 : débit observé et simulé au droit de Châteauneuf en 2022.....	26
Figure 4-1 : Exemple de chroniques de soutien d'étiage calculées pour l'année sèche de 2022..	28
Figure 4-2 : Schéma représentatif des entrants/sortants considérés pour le calcul de l'évolution de la retenue de Saint-Michel	29
Figure 4-3 : Exemple de calcul de l'évolution de la retenue en saison d'étiage sur la période 2006-2023 – cas du DOE n°1 pour un calcul démarrant au 1 ^{er} juin	30
Figure 4-4 : Courbes de défaillance établies sur la période 2006-2023.....	31
Figure 5-1 : schéma de la chaîne de traitement de descente d'échelle	32
Figure 5-2 : écart sur la période annuelle 2041-2070 (RCP 4.5) – source DRIAS	34
Figure 5-3 : écart sur la période estivale (juin, juillet, août) 2041-2070 (RCP 4.5) – source DRIAS	34
Figure 5-4 : Débits moyens journaliers interannuels sur la période d'étiage en situation actuelle (2006-2023) et à l'horizon projeté (2040-2060)	36
Figure 5-5 : courbe de VNC10 sur les débits naturels avec et sans changement climatique période 2006-2023.....	37

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : pluviomètres retenus pour l'étude.....	4
Tableau 2 : stations hydrométriques retenues pour l'étude	5
Tableau 3 : synthèse des données de prélèvements et de rejets	8
Tableau 4 : affectation des valeurs pluviométriques aux sous bassins-versants	21
Tableau 5 : Critères de calage et paramètres retenus à l'issu du calage du modèle GR4J de l'Aulne à Scignac.....	23
Tableau 6 : Critères de calage du modèle à la station de Châteauneuf (Pont Pol Ty Glaz) sur la période 2006-2023.....	25
Tableau 7 : récapitulatif des différences entre les volumes simulés et observés sur la période de juin à octobre au point nodal.....	26
Tableau 8 : Débit caractéristiques d'étiage mesurés et calculés au point nodal sur la période 2006-2023.....	27
Tableau 9 : Moyenne des écarts de quantile de débits (étape 4)	35
Tableau 10 : quantiles de débits naturels simulés avec GES-RES sur la période 2006-2023 (étape 5)	35
Tableau 11 : valeurs caractéristiques d'étiage pour les débits naturels de l'Aulne au point nodal sur la période 2006-2023 et à l'horizon 2040-2060 (scénario RCP4.5 du GIEC).....	37
Tableau 12 : Ecart d'ETP moyenne journalière (mm/j) entre la période 2003-2023 et l'horizon 2040-2060 (étape 3)	38
Tableau 13 : Courbes de défaillance à l'horizon 2040-2060 et sur la période de référence (2006-2023)	39

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

La présente étude consiste à mettre en œuvre un outil d'aide à la décision pour le syndicat mixte Etablissement Public d'Aménagement et de Gestion du bassin versant de l'Aulne (EPAGA) afin d'améliorer la gestion du soutien d'étiage du bassin versant de l'Aulne et de l'Hyères.

Le bassin versant de l'Aulne couvre superficie de 1892 km² environ. Il s'agit du 3^{ème} bassin hydrographique de Bretagne et s'étale sur 89 communes situées sur 3 départements : le Finistère, les Côtes d'Armor et le Morbihan. Les principaux affluents de l'Aulne sont de l'amont vers l'aval :

- L'Ellez
- L'Hyères et le canal de Nantes à Brest
- Le Ster Goanez
- La Douffine.

Sur l'Ellez, deux barrages se succèdent :

- Le barrage de Nestavel formant la retenue de Saint-Michel. Le plan d'eau s'étale sur 450 ha pour un volume de 13,5 Mm³ dont 9,5 Mm³ mobilisables. Le débit réservé est de 0,12m³/s.
- Le barrage de Saint-Herbot situé à 5 km en aval du barrage de Nestavel. Le plan d'eau s'étale sur 15 ha. Le débit réservé est de 0,16m³/s, porté à 0,24 m³/s du 15 novembre au 15 janvier.

Les principaux usages tributaires du soutien d'étiage sont :

- la production d'eau potable pour une région ayant un fort attrait touristique notamment l'été.
- la qualité des milieux aquatiques. La Bretagne n'étant pas épargnée par les événements de sécheresse intense, la retenue de Saint Michel à Brennilis est mise à profit pour garantir le bon état et le maintien des fonctions des cours d'eau.

Les autres usages sont l'hydroélectricité par turbinage du débit relâché par la retenue de Saint-Herbot et les prélèvements pour l'irrigation bien que peu impactant sur le bassin versant.



Figure 1-1 : Schéma du complexe hydraulique de l'Aulne (source : EPAGA)

Les outils actuels utilisés pour définir le volume à lâcher ont montré leurs limites notamment lors de la sécheresse de 2022.

L'objet de l'étude sera d'élaborer un nouvel outil décisionnel sous forme de courbes de défaillances. Ces courbes présentent le risque de non-satisfaction des usages sur la période d'étiage du 1^{er} juin au 30 octobre en fonction de la disponibilité de volume dans la retenue et d'un débit réglementaire cible au point nodal de Pont Pol Ty Glaz :

- Débit d'objectif d'étiage (DOE) : 2,15 m³/s jusqu'en 2016 (débit objectif inscrit dans le SAGE Aulne de 2014),
- Débit d'objectif d'étiage (DOE) : 1,8m³/s après 2016
- Débit seuil d'alerte (DSA) : 1,5 m³/s
- Débit seuil d'alerte renforcé (DSAR) : 1,2 m³/s
- Débit de crise (DCR) : 0,75 m³/s

La présente étude peut se découper en plusieurs étapes :

- Etape 1 : Recueil et analyse des données d'entrée nécessaires à l'étude,
- Etape 2 : Construction d'un modèle hydrologique de l'Aulne et vérification du calage,
- Etape 3 : Réalisation de simulations et analyses statistiques en vue de définir les courbes de défaillance.
- Etape 4 : Réalisation de simulations et analyses statistiques en vue de définir les courbes de défaillance à l'horizon 2040-2060 en considérant l'impact du changement climatique sur la ressource en eau.

2 RECUEIL ET ANALYSE DES DONNEES D'ENTREE

Cette première partie d'analyse générale du bassin versant vise à synthétiser l'ensemble des informations et caractéristiques en lien avec l'hydrologie du bassin de l'Aulne et de l'Hyères susceptibles d'être exploitées dans le cadre de la présente étude.

2.1 PLUVIOMETRIE

La figure suivante localise les pluviomètres exploités pour la reconstitution des chroniques de pluies. Certains pluviomètres comme « ST – SEGAL SA » n'ont été utilisés que pour combler les lacunes de données provenant d'autres pluviomètres principaux. Le Tableau 1 quant à lui précise le code des stations, les périodes de données disponibles et un commentaire indique si les données ont été complétées par d'autres pluviomètres.

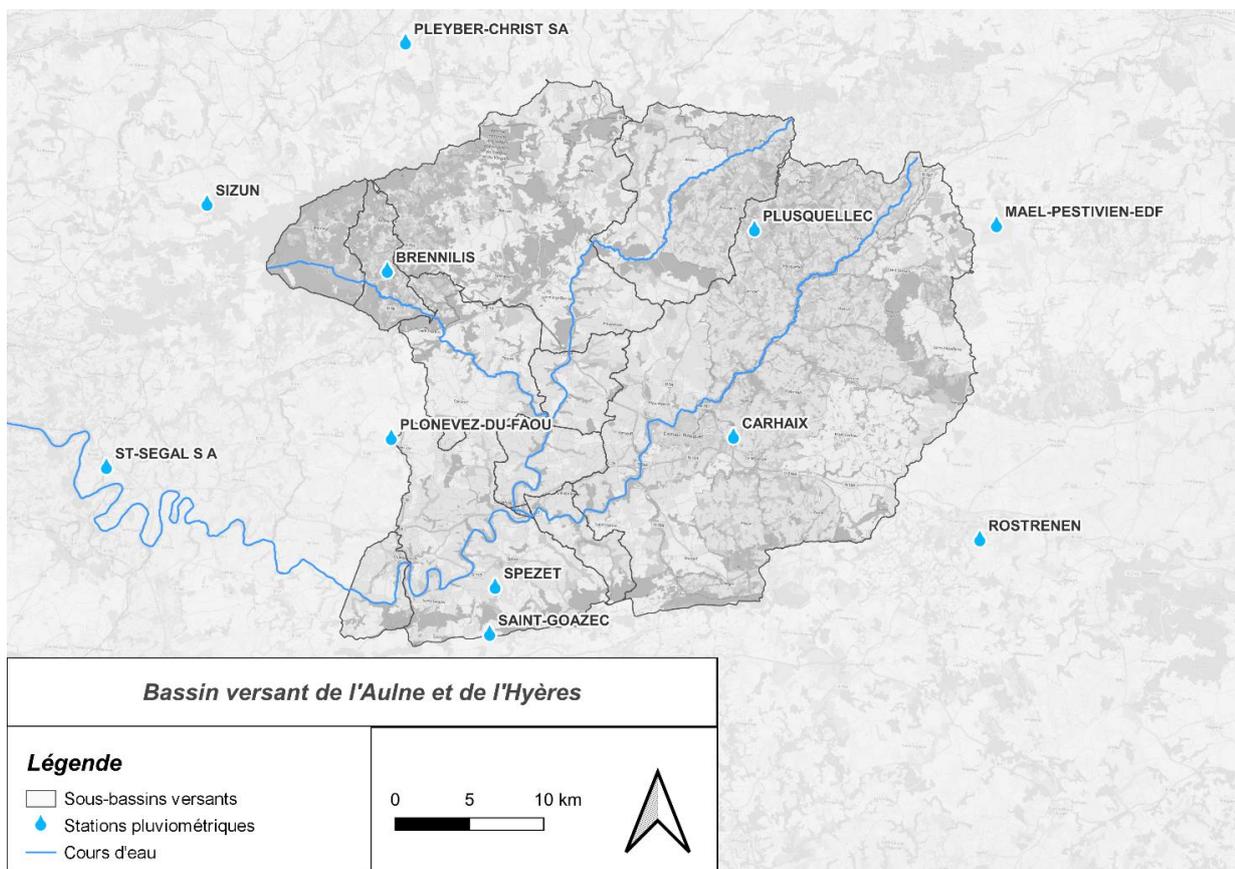


Figure 2-1 : stations pluviométriques retenues pour l'étude

Code	Station	Début	Fin	Commentaire
29018001	BRENNILIS	01/12/1961	18/09/2024	Complété par SIZUN de 2021 à 2022
29024003	CARHAIX	01/09/1980	31/12/2020	Complété par ROSTRENNEN de 2020 à 2024
29163003	PLEYBER-CHRIST SA	01/03/1994	18/09/2024	RAS
29175001	PLONEVEZ-DU-FAOU	01/08/1978	30/04/2018	Complété par St - SEGAL de 2018 à 2024

Code	Station	Début	Fin	Commentaire
29249002	SAINT-GOAZEC	22/06/2017	18/09/2024	RAS
29278001	SPEZET	01/11/1994	30/06/2017	Complété par St – GOAZEC de 2017 à 2024
22138003	MAEL-PESTIVIEN-EDF	01/01/1989	18/09/2024	RAS
22138003	ROSTRENEN	01/11/1954	18/09/2024	RAS
29277001	SIZUN	01/01/1982	29/09/2024	RAS
22243001	PLUSQUELLEC	01/01/1977	18/09/2024	RAS
29263002	ST SEGAL	01/02/1987	29/09/2024	RAS

Tableau 1 : pluviomètres retenus pour l'étude

2.2 HYDROMETRIE

La figure suivante localise les stations hydrométriques pertinentes pour l'étude. Comme pour les stations pluviométriques, un tableau précise les intervalles de données disponibles.

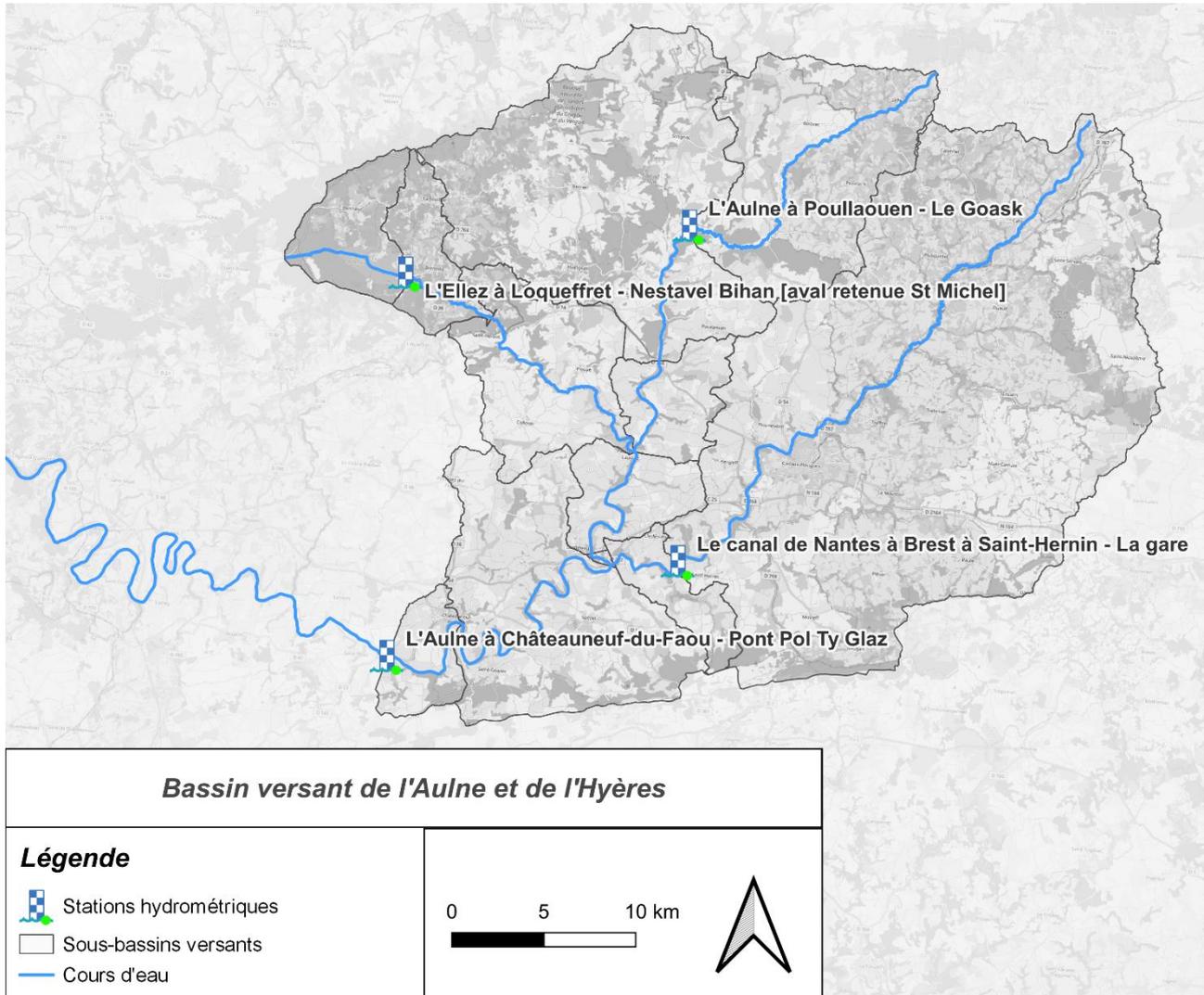


Figure 2-2 : stations hydrométriques retenues pour l'étude

Station	Début	Fin	Commentaire
POULLAOUEN (Aulne)	27/06/1974	01/01/2024	RAS
HERNIN (Canal Nantes à Brest)	01/01/1961	01/01/2024	Quelques intervalles manquants antérieurs à 2000
CHATEAUNEUF (Aulne)	05/01/1970	01/01/2024	RAS
ST MICHEL (Ellez)	01/01/2003	01/01/2024	RAS

Tableau 2 : stations hydrométriques retenues pour l'étude

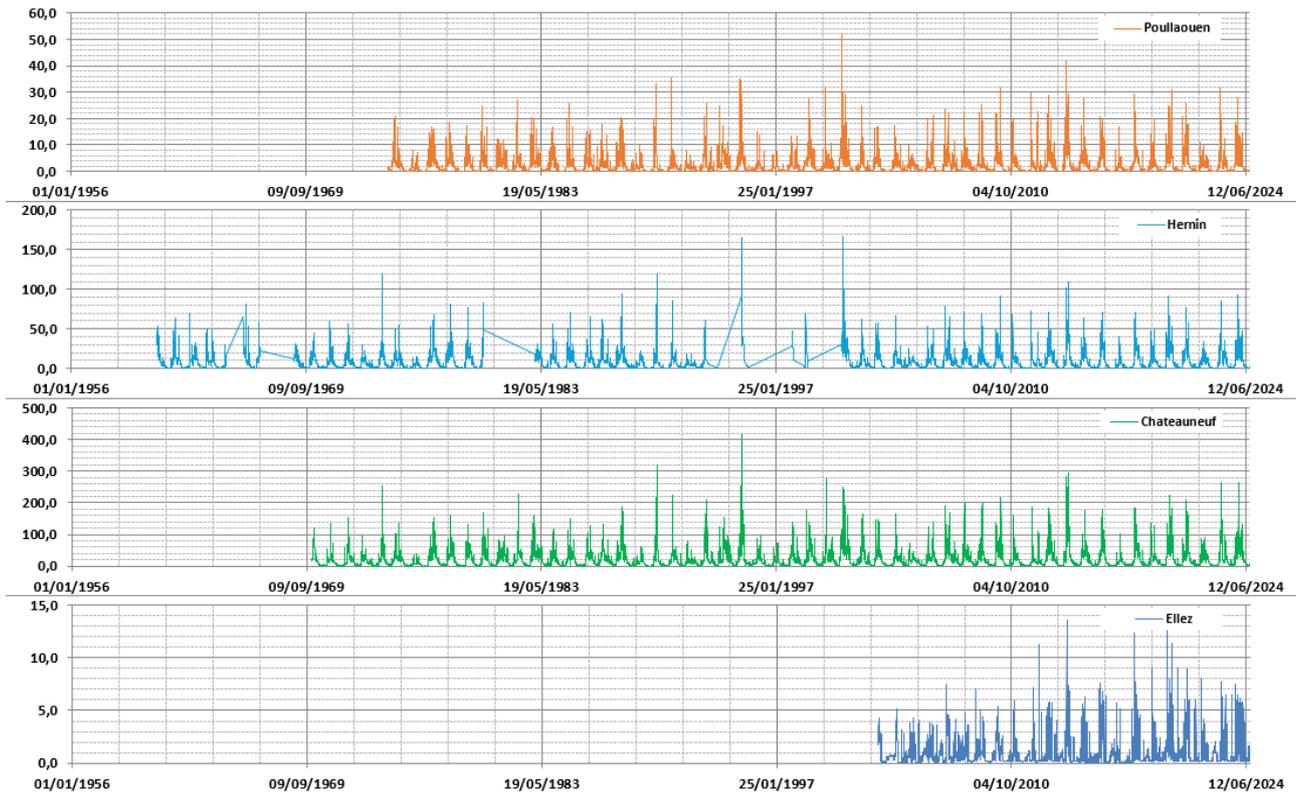
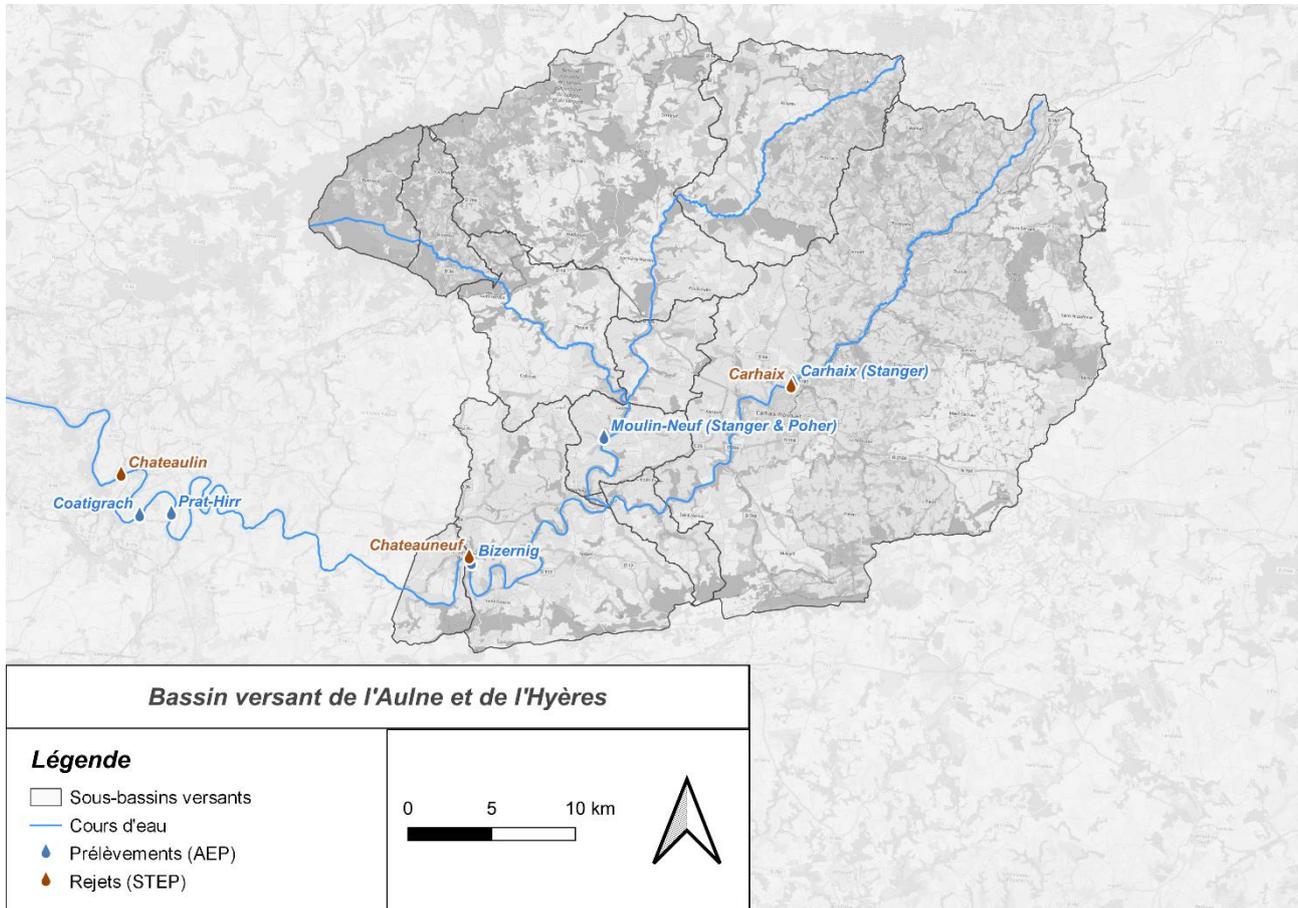


Figure 2-3 : chroniques de débits disponibles aux différentes stations hydrométriques

2.3 PRELEVEMENTS ET REJETS

La figure suivante localise les principaux rejets et prélèvements sur le bassin versant.



Les données sur les prélèvements et rejets sont fournies par l'EPAGA et sont synthétisées dans le tableau suivant :

Type de données	Station	Début	Fin	Commentaire
AEP	Châteauneuf (Bizernig)	01/05/2003	31/12/2023	Il manque les données de 2010 et de 2014 à aujourd'hui, complétées par les moyennes journalières mensuelles
AEP	Syndicat Poher (Moulin Neuf)	01/05/2003	31/12/2023	Il manque les données de 2005 et de 2010, complétées par les moyennes journalières mensuelles
AEP	Syndicat Stanger (Moulin Neuf ou Carhaix)	01/05/2003	31/12/2023	Données disponibles à Moulin Neuf seulement sur la période estivale, il semble manquer les données de 2007 à 2010 et de 2012. Données prises telles quelles, car la prise d'eau sur l'Aulne n'a lieu qu'en cas de restriction sur l'Hyères à Carhaix. Les données à Carhaix ne sont pas utilisées.
AEP	Coatigra'h	01/05/2003	31/12/2023	Il manque les données de 2010, 2014 et 2018. Quelques points de forts prélèvements sont observés (> à 20 000 m ³ /jour).
AEP	Prat-Hir	01/05/2003	31/12/2023	Il manque les données de 2010, 2014 et 2018. Quelques points de forts prélèvements sont observés (> à 50 000 m ³ /jour et jusqu'à 350 000 m ³).
STEP	Châteauneuf	01/01/2011	30/06/2024	De 2006 à 2011 et 2014 à 2019, les données sont interpolées à partir des données de Châteaulin et Carhaix
STEP	Carhaix	01/01/2006	31/07/2024	Utilisé pour combler les valeurs manquantes de Châteauneuf
STEP	Châteaulin	01/11/2006	31/08/2024	Utilisé pour combler les valeurs manquantes de Châteauneuf

Tableau 3 : synthèse des données de prélèvements et de rejets

Un coefficient de corrélation supérieur à 99% a été calculé entre les couples de données de rejets issues des STEP. Le graphique suivant de type « scatter-plot » montre que la relation entre les rejets de Châteauneuf et de Châteaulin est plutôt bonne et relativement linéaire, il en est de même pour la relation entre les rejets de Châteauneuf et de Carhaix. La moyenne des deux relations linéaires déterminées a été appliquée pour combler les données manquantes.

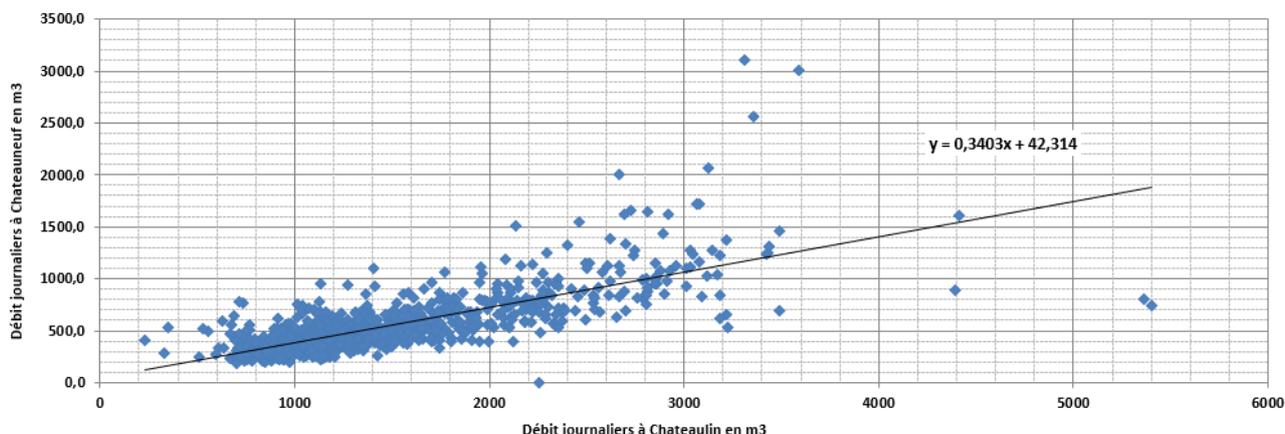


Figure 2-4 : scatter-plot des rejets issus de STEP à Châteauneuf et Châteaulin

Les chroniques de rejets de STEP sont présentées ci-après :

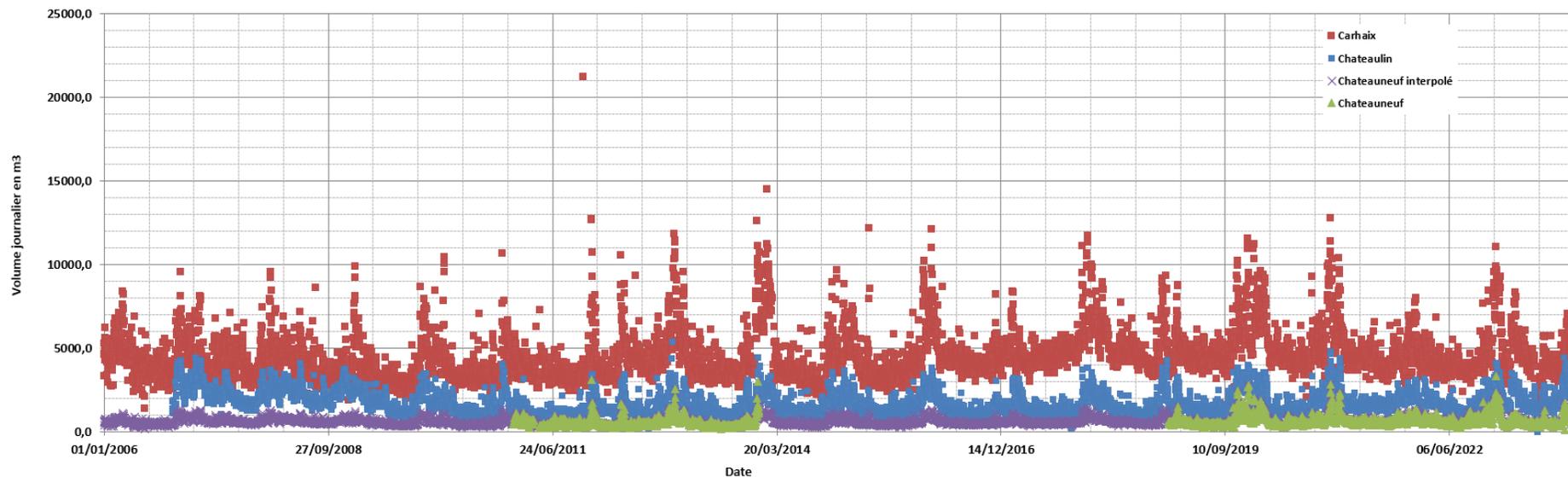


Figure 2-5 : chronique de rejets (STEP)

Contrairement aux rejets, les prélèvements sont difficilement corrélables entre eux. Les périodes manquantes ont donc été comblées avec la moyenne mensuelle ramenée sur une journée. Les données brutes de prélèvement du Stanger à Moulin Neuf ne sont pas complétées car le prélèvement n'a lieu qu'en cas de défaillance de l'Hyères. Ne pouvant pas dissocier les périodes de données manquantes des périodes de manques, il a été préféré de ne pas réaliser de correction.

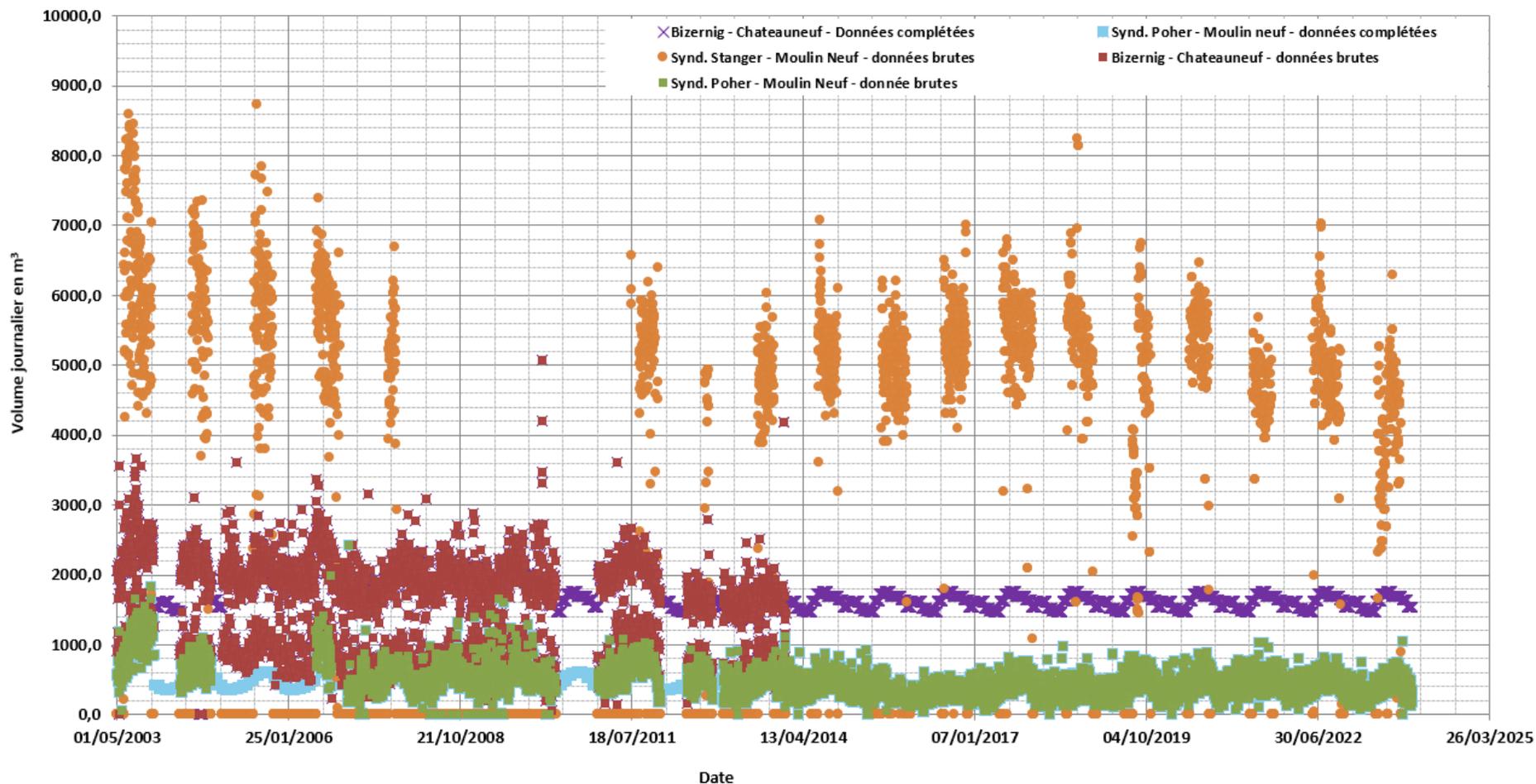


Figure 2-6 : chroniques de prélèvements en eau potable (AEP)

2.4 TEMPERATURES ET EVAPOTRANSPIRATION

L'historique des températures va permettre d'estimer l'évapotranspiration sur le bassin versant à partir de la formule d'Oudin simplifiée. La température est peu variable d'un point à un autre du bassin versant de l'Aulne. La chronique de températures de la station Météo-France à Pleyber-Christ a été retenue.

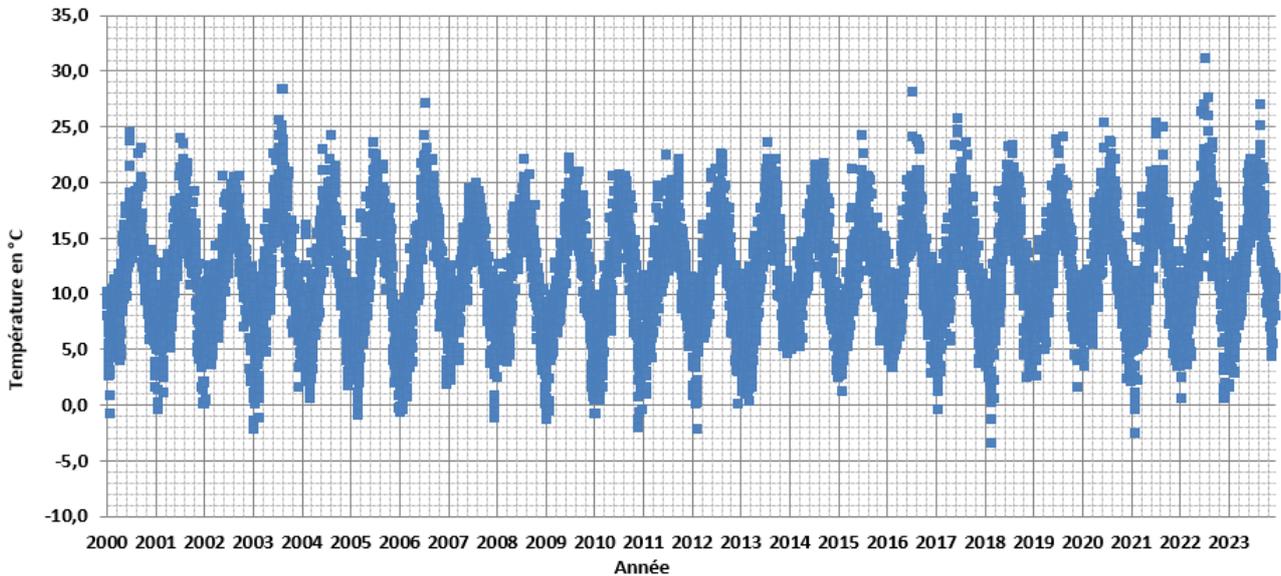


Figure 2-1 : historique des températures à Pleyber-Christ de 2000 à 2023

La formule simplifiée d'Oudin s'écrit :

$$ETP = \frac{0.408 \times R_a \times \max(0, T + 5)}{\lambda}$$

Où :

R_a le rayonnement astronomique est approximé en fonction de la latitude,

T est la température moyenne quotidienne (en °C),

λ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau (environ 2,45 MJ/kg).

La chronique d'ETP journalière qui résulte de ce calcul est représentée sur le graphique ci-après.

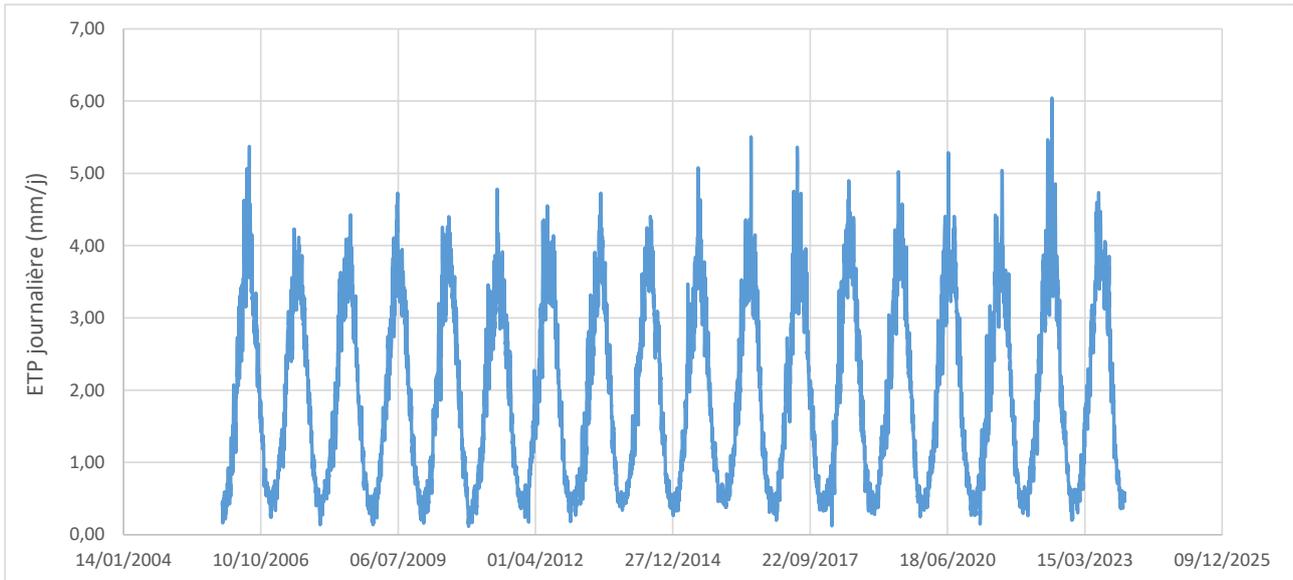


Figure 1-2 : Chronique d'ETP journalière sur la période 2006-2023

2.5 RETENUE DE SAINT-MICHEL

Les caractéristiques de la retenue de Saint-Michel sont données par un abaque élaboré par EDF.

La retenue normale est fixée à 227,0 mNGF et la cote du volume mort (volume d'eau non mobilisable pour le soutien d'étiage) est estimée à 223,84 mNGF ce qui correspond à un volume restant dans la retenue d'environ 3,9 hm³. La figure suivante illustre la loi Cote – Volume qui sera exploitée dans la suite de l'étude.

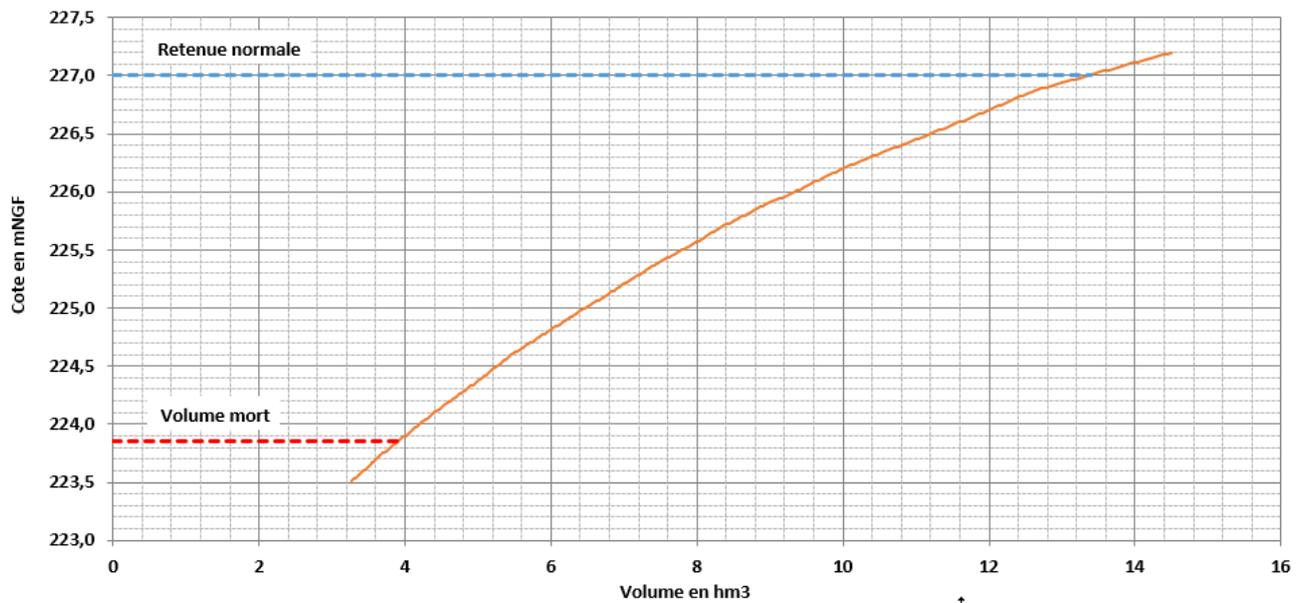


Figure 1-3 : loi Cote – Volume de la retenue de Saint-Michel

2.6 APPORTS DU BASSIN VERSANT DE LA RETENUE DE SAINT-MICHEL

Les apports naturels journaliers entrant dans la retenue de Saint-Michel ont fait l'objet d'une reconstitution par modélisation hydrologique de la part d'EDF. Un aperçu de cette chronique reconstituée est donné ci-après sur la période 2006-2024.

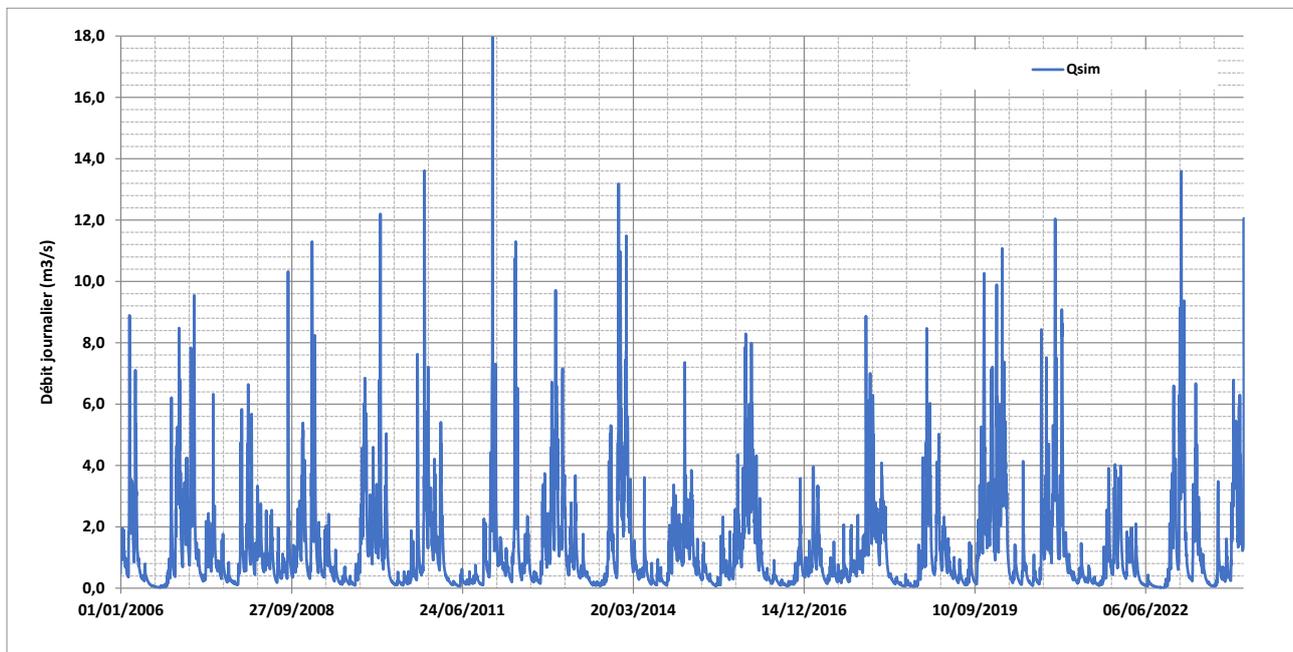


Figure 1-4 : Chronique de débits journaliers reconstitués entrant dans la retenue de Saint-Michel sur la période 2006-2024 (source : EDF)

3 CONSTRUCTION DU MODELE HYDROLOGIQUE

3.1 DEMARCHE GENERALE

Les principales étapes pour la construction du modèle sont listées ci-dessous :

- Choix du type de logiciel et du type de modélisation
- Découpage en sous bassins versants du secteur d'étude
- Construction du modèle hydrologique : topologie
- Elaboration des pluies de bassins
- Calage

3.2 CHOIX DU LOGICIEL ET DU TYPE DE MODELISATION

Le modèle hydrologique est réalisé avec le logiciel GESRES développé en interne à ISL.

Le logiciel GESRES_{ISL} est un logiciel de modélisation hydrologique. Il a été développé spécifiquement par ISL dans le cadre d'études hydrologiques dans des contextes très différents (liste non exhaustive) : modèles du bassin de l'Oudon (1 500 km²), de l'Oise (15 000 km²), du Gard en France ; modèle du bassin du Niger (140 000 km²) en Guinée et Mali ; modèle de la Sanaga (130 000 km²) au Cameroun, modèles des rivières de la région de Ntoun (de 50 à 200 km², Gabon).

Le code de calcul s'articule autour de trois modules :

- Le **module hydrologique** réalise la transformation pluie-débit sur une distribution de bassins versants ;
- Le **module de propagation** assure la propagation et la combinaison des hydrogrammes de crue résultants de la transformation pluie-débit dans le réseau hydrographique ;
- Le **module de calcul des retenues** permet d'intégrer une gestion fine des ouvrages-réservoirs disposés sur le réseau hydrographique.

Pour chaque module, plusieurs modèles théoriques sont disponibles. Le modèle peut aussi bien être utilisé pour des simulations « événementielles » (typiquement, simulations de crues) que pour des simulations « continues » sur des périodes de plusieurs années.

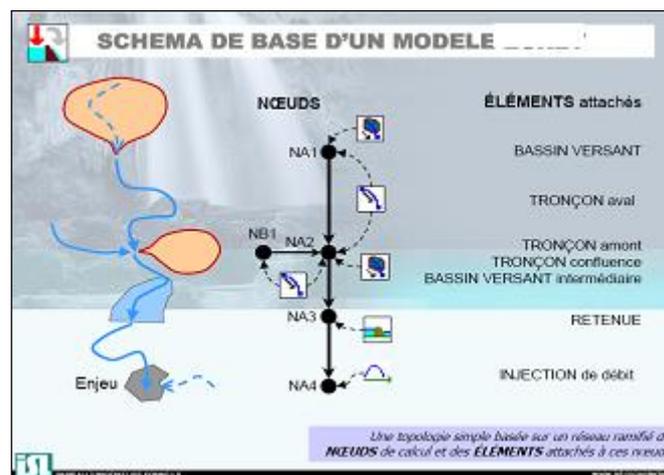


Figure 3-1 : schéma de base d'un modèle GESRES_{ISL}.

L'architecture du modèle s'appuie sur une topologie simplifiée, formée de nœuds de calcul auxquels sont rattachés les éléments producteurs et de contrôle des débits (bassin versant, hydrogramme, retenue) et reliés entre eux par les éléments du réseau hydrographique (biefs).

Le logiciel GESRES_{ISL} est par ailleurs couplé à une base de données géographiques au format Mapinfo® ou QGIS® qui permet d'extraire de manière automatique les caractéristiques des différents éléments structurels du modèle.

Choix du type de modèle pluie débit : GR4J

Le choix de ce modèle s'appuie sur l'expérience d'ISL en matière de modélisation hydrologique.

Le modèle GR4J, développé par le CEMAGREF, est un modèle à réservoirs à quatre paramètres optimisables :

- A** : capacité du réservoir de production (mm)
- B** : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)
- C** : temps de base de l'hydrogramme unitaire $HU1$ (h)
- D** : coefficient d'échanges souterrains (mm)

Un réservoir de production S détermine la partie de la pluie participant à l'écoulement ; une percolation du réservoir de production (réservoir sol) est introduite et l'écoulement s'ajoute à la pluie nette avant séparation des deux composantes d'écoulement. Un réservoir de transfert R répartit la pluie en écoulements directs et écoulements indirects. Des échanges sont intégrés entre écoulements directs et indirects.

Dans la fonction de transfert, le débit à l'exutoire est déterminé à partir de 2 hydrogrammes unitaires : le premier (90 %) introduit un décalage progressif entre la pluie brute et la pluie nette, le second (10 %) représente le débit s'écoulant directement à l'exutoire.

Signalons quelques points forts de la modélisation proposée :

Les paramètres sont en nombre limité (4) ;

Il existe une procédure automatique de calage développée au CEMAGREF. Les paramètres sont optimisés afin de minimiser l'écart entre débits observés et débits calculés sur la base de critères d'évaluation des performances robustes (Nash, critère de bilan, critère relatif d'erreur absolu).

La Figure 3-2 donne un aperçu des différentes étapes de calcul de l'hydrogramme de crue sur chaque bassin versant.

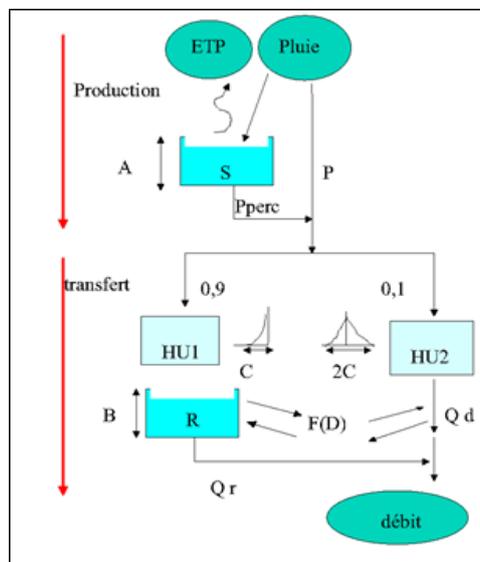


Figure 3-2 : schéma du modèle hydrologique GR4J

ETP : évapotranspiration potentielle,

Pperc : percolation du réservoir sol S,

HU1 et HU2 : hydrogrammes unitaires,

Qr : débit ruisselé,

Qd : débit direct

Choix du modèle de propagation dans les biefs : Muskingum-Cunge

Pour les calculs de propagation de l'hydrogramme le long des biefs, GESRES_{ISL} utilise la méthode de Muskingum-Cunge, initialement développée par Mc Carty en 1938 lors de l'étude de la rivière de Muskingum.

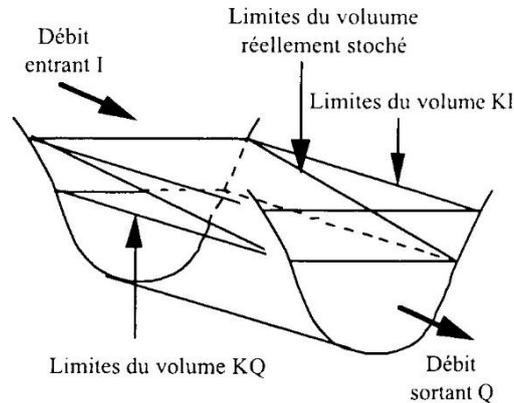


Figure 3-3: stockage dans un tronçon (J.P. Laborde, 2003)

Cette méthode est basée sur un concept simple qui consiste à écrire que le volume d'eau stocké dans un bief est proportionnel à une moyenne pondérée des débits observés au même instant aux deux extrémités du bief :

$$V = K(\alpha \cdot Q_e + (1 - \alpha) \cdot Q_s)$$

avec V = volume stocké dans le bief,

Q_e = débit d'entrée dans le bief,

Q_s = débit de sortie du bief,

K = temps de propagation dans le bief,

α = terme sans dimension lié à l'amortissement de la crue dans le bief : coefficient d'atténuation.

Cette méthode a été complétée par la suite par Cunge afin de relier les paramètres du modèle (α et K) aux caractéristiques physiques de la rivière (section, pente, longueur, rugosité de fond).

3.3 DECOUPAGE EN SOUS BASSINS VERSANTS

Pour les besoins de l'étude, le bassin versant de l'Aulne est découpé en sous bassins versants. Ces derniers sont définis en fonction de points stratégiques du modèle :

- Arrivée d'un affluent notoire
- Point de prélèvement
- Point de rejet
- Présence d'une station hydrométrique
- Présence d'une retenue
- Point nodal
- ...

La carte ci-après donne la localisation des 11 sous bassins versants retenus pour l'étude.

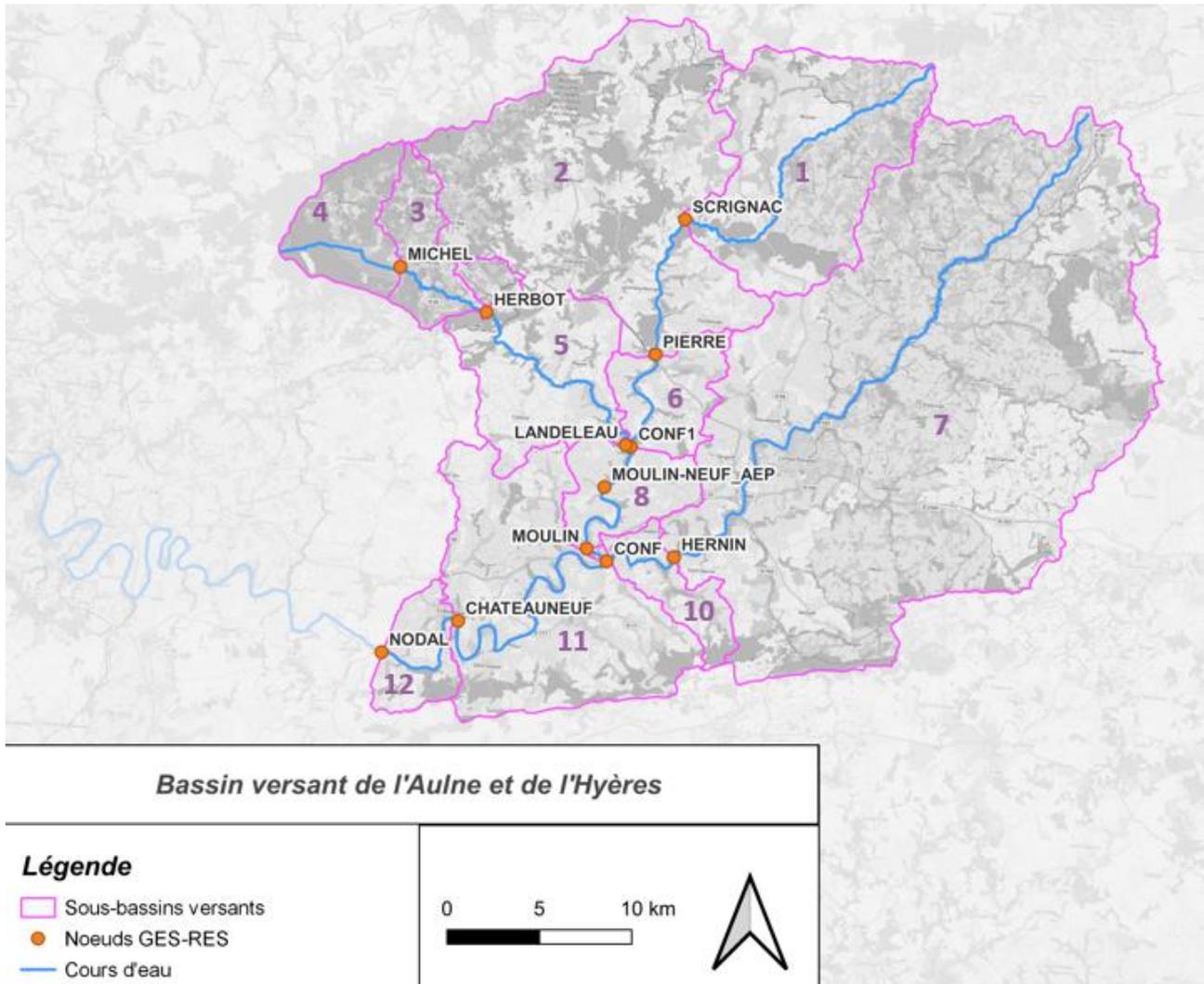


Figure 3-4 : numérotation des sous-bassins versants

3.4 TOPOLOGIE DU MODELE

Le modèle hydrologique de l'Aulne est composé des éléments structurels suivants :

- Des bassins versants (X9) permettant d'effectuer une transformation pluie-débit (modèle GR4J) ;
- Des biefs de propagation de débits (X12) reposant sur la méthode de Muskingum-Cunge,
- Des nœuds de calcul (X13) permettant d'extraire des résultats et/ou d'intégrer des chroniques d'apports et de prélèvements.

Le modèle est également composé d'éléments non structurels :

- Chronique de débits journaliers : hydrogrammes de l'Ellez à l'aval de la retenue de Saint-Michel, Hydrogramme de l'Aulne à Scrignac, hydrogramme de l'Hyères à Saint-Hernin.
- Chroniques journalières de prélèvements et de rejets ;
- Chroniques de pluies ;

- Chronique de températures permettant de calculer l'évapotranspiration (formule d'Oudin) appliquée aux bassins versants et aux biefs.

Remarque : La retenue de Saint-Herbot n'est pas incluse dans la modélisation.

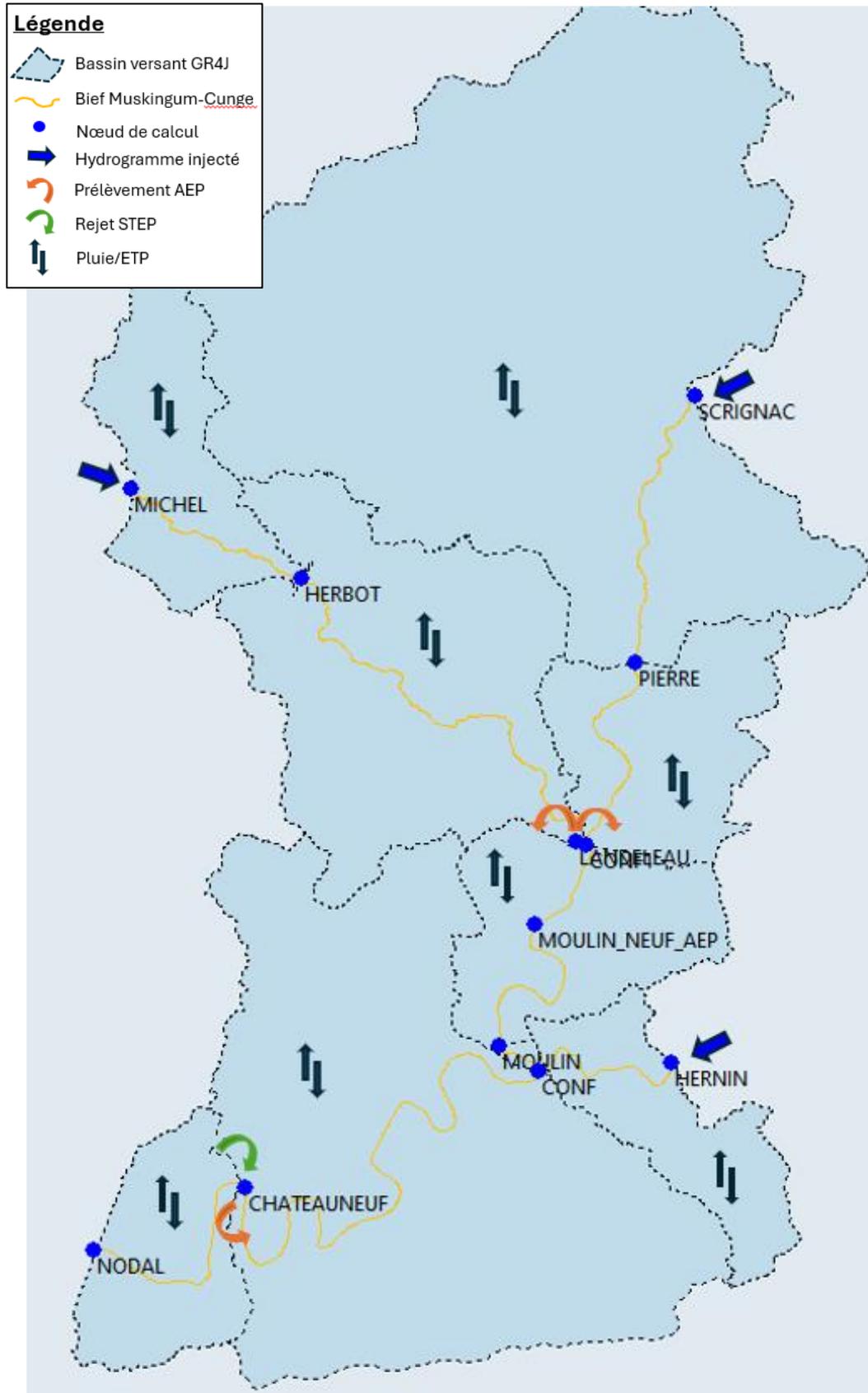


Figure 3-5 : visualisation de la topologie du modèle hydrologique

3.5 REPARTITION DES PLUIES SUR LES BASSINS VERSANTS DU MODELE

Un découpage en polygones de Thiessen (cf. Figure 3-6) a été effectué à partir de la localisation des différents pluviomètres retenus pour l'étude. Cette méthode est utilisée pour définir les zones d'influence des pluviomètres sur chacun des sous bassins versants. Les surfaces d'influence rapportées à la taille globale du sous bassin ont permis d'établir des coefficients de pondération. Le Tableau 4 donne les valeurs de ces coefficients pour chaque sous bassin versant.

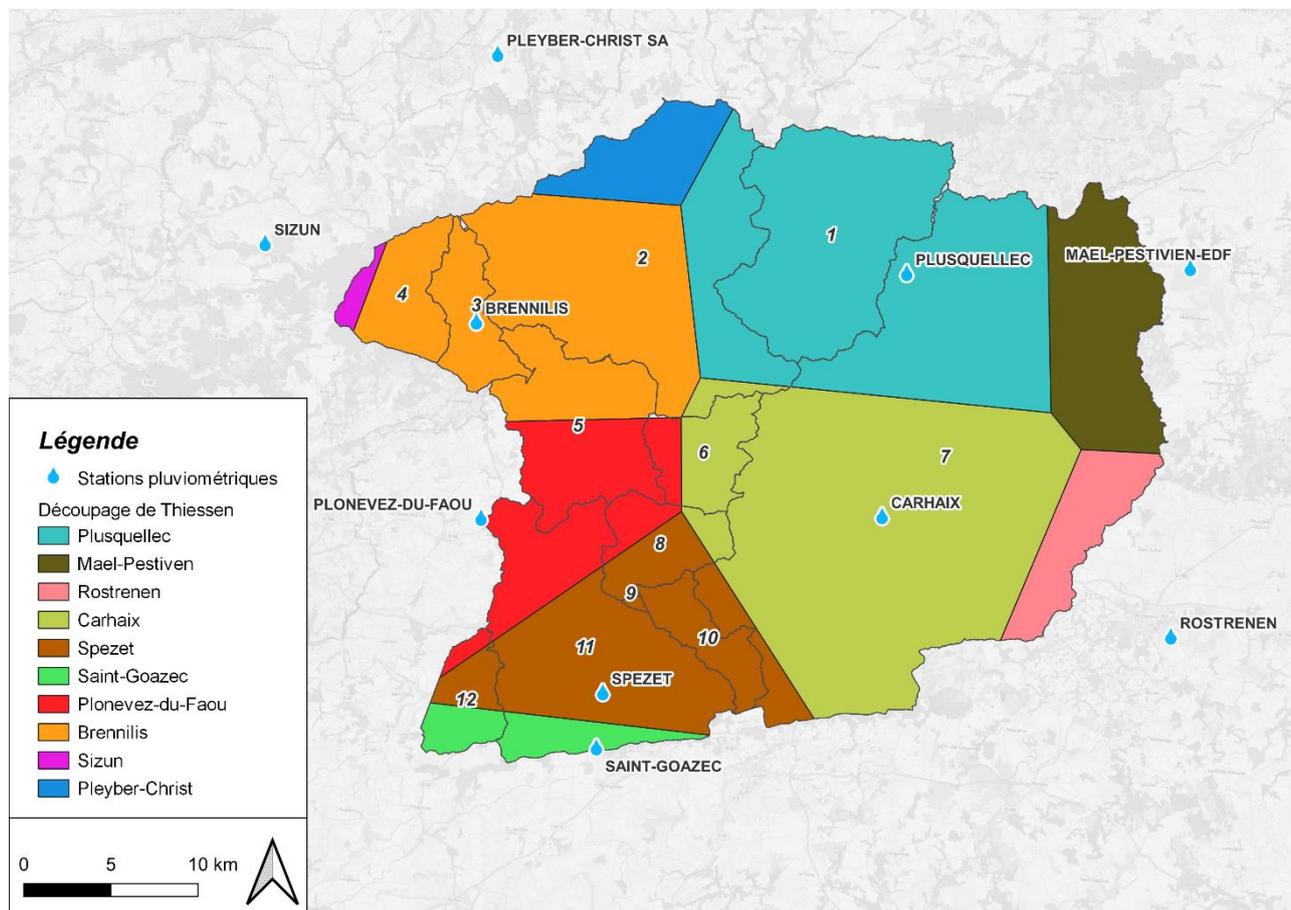


Figure 3-6 : découpage en polygones de Thiessen à partir de la localisation des pluviomètres

Identifiant	NOM DU BASSIN VERSANT	PLUVIOMETRES	PART EN %
1	SCRIGNAC	PLUSQUELLEC	100,00%
2	PIERRE	PLUSQUELLEC	25,10%
		PLEYBER-CHRIST SA	18,20%
		CARHAIX ou ROSTRENEN	2,80%
		BRENNILIS ou SIZUN	53,90%
3	MICHEL - HERBOT	BRENNILIS ou SIZUN	100,00%

Identifiant	NOM DU BASSIN VERSANT	PLUVIOMETRES	PART EN %
4	MICHEL - HERBOT	Données fournies par le modèle EDF	-
5	HERBOT - LANDELEAU	PLONEVEZ-DU-FAOU ou St SEGAL	52,00%
		BRENNILIS ou SIZUN	48,00%
6	PIERRE - CONF1	CARHAIX ou ROSTRENEN	73,30%
		PLONEVEZ-DU-FAOU ou St SEGAL	26,10%
7	HERNIN	Non représenté dans le modèle	-
8	CONF1 - MOULIN	SPEZET ou St GOAZEC	53,20%
		CARHAIX ou ROSTRENEN	17,80%
		PLONEVEZ-DU-FAOU ou St SEGAL	29,00%
9	MOULIN - CONF	SPEZET ou St GOAZEC	100,00%
10	HERNIN - CONF	SPEZET ou St GOAZEC	100,00%
11	CONF - CHATEAUNEUF	SPEZET ou St GOAZEC	73,40%
		PLONEVEZ-DU-FAOU ou St SEGAL	26,60%
12	CHATEAUNEUF - NODAL	SPEZET ou St GOAZEC	87,70%
		PLONEVEZ-DU-FAOU ou St SEGAL	12,30%

Tableau 4 : affectation des valeurs pluviométriques aux sous bassins-versants

3.6 CALAGE

3.6.1 DEMARCHE ADOPTEE POUR LE CALAGE

Les paramètres du modèle pluie-débit GR4J sont calés dans un premier temps sur le bassin versant jaugé de l'Aulne à Scignac. Ce sous bassin représente environ 10% du bassin versant total, il est coloré en rose sur la figure suivante :

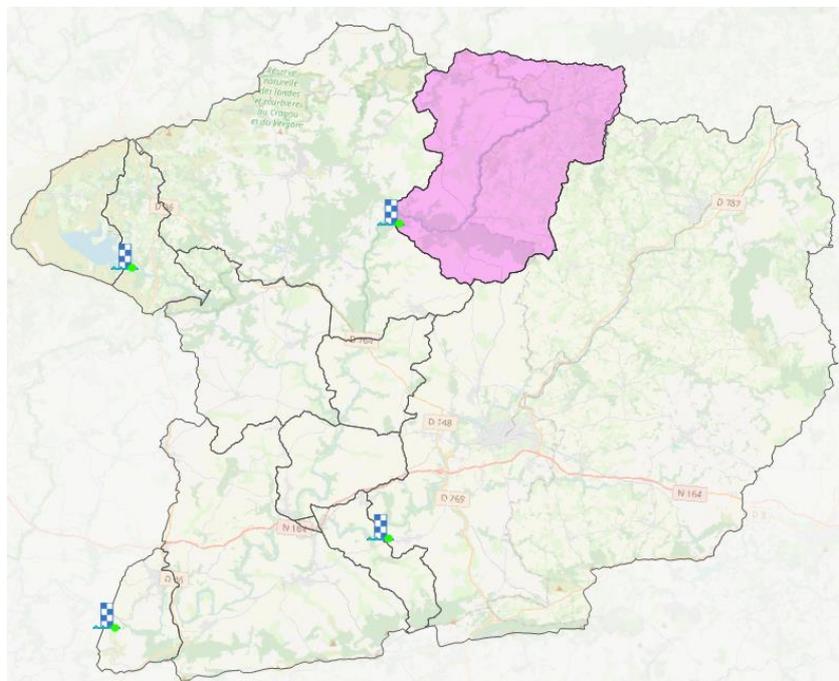


Figure 3-7 : bassin versant de l'Aulne à Scignac

Ce bassin versant présente l'avantage d'être peu influencé par des apports ou des rejets d'origine anthropique.

Une fois le calage réalisé, les paramètres du modèle pluie débit de bassin de l'Aulne à Scignac sont appliqués aux autres sous bassins du modèle.

La fiabilité du modèle global est ensuite vérifiée par comparaison des débits calculés de l'Aulne au point nodal avec ceux mesurés (station de Pont Pol Ty Glaz à Châteauneuf-du-Faou).

3.6.2 CALAGE A SCRIGNAC

Le calage est réalisé sur la période 1994-2023, ce qui représente quasiment trente ans de simulation.

Les paramètres du modèle GR4J retenus après le calage (A, B, C, D) et les indicateurs sont présentés au tableau suivant. Les indicateurs de calage retenus sont les suivants :

- **Nash(In(Q))** : le critère de Nash qui traduit le pourcentage de fiabilité du modèle par rapport à l'observation valable pour les bas débits (objectif : 100%) ;
- **RDE** : qui correspond au rapport entre les durées d'étiages, il est égal au nombre de jours où les débits calculés sont inférieurs au quart du module interannuel divisé par le nombre de jours où les débits observés sont inférieurs au quart du module interannuel (objectif : 100%) ;
- **Bilan** : somme des écarts entre les deux chroniques (objectif : 0%)

Les paramètres retenus et les critères de calage sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Paramètres du modèle GR4j				Critères de calage		
	A	B	C	D	Nash(ln(Q)) (%)	RDE (%)	Bilan (%)
L'Aulne à Scrignac	189,75	95,25	16	0	91%	92,5%	-0,15%

Tableau 5 : Critères de calage et paramètres retenus à l'issue du calage du modèle GR4J de l'Aulne à Scrignac

Les critères de calage sont proches des valeurs cibles, ils sont jugés satisfaisants.

La Figure 3-8 donne une représentation graphique des débits observés (en vert) et des débits calculés (en bleu) à Scrignac sur la période 1993-2023. La Figure 3-9 donne un zoom sur la période 2019/2020.

La dynamique en crue est correctement simulée par le modèle. Les phases de tarissement et les étiages sont également cohérents avec celles observées.

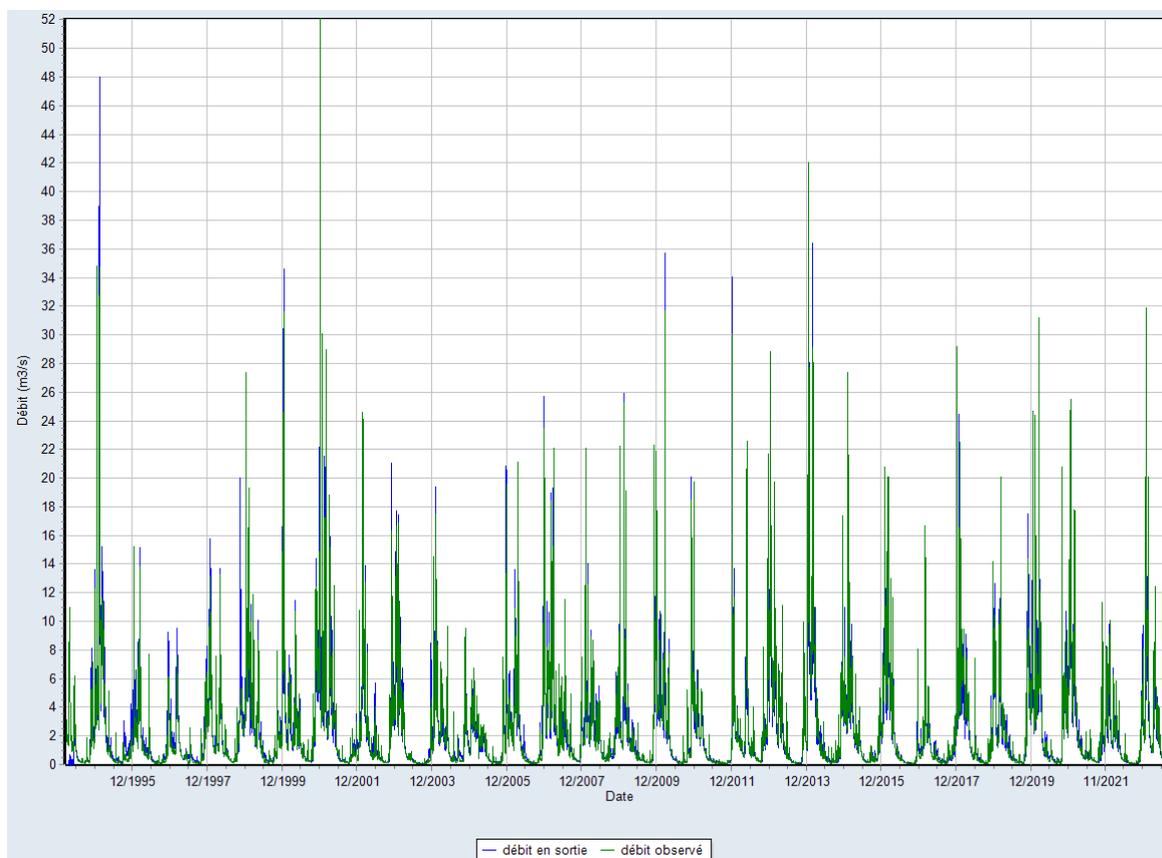


Figure 3-8 : débit observé et débit en sortie du modèle à Scrignac sur la période 1993-2023

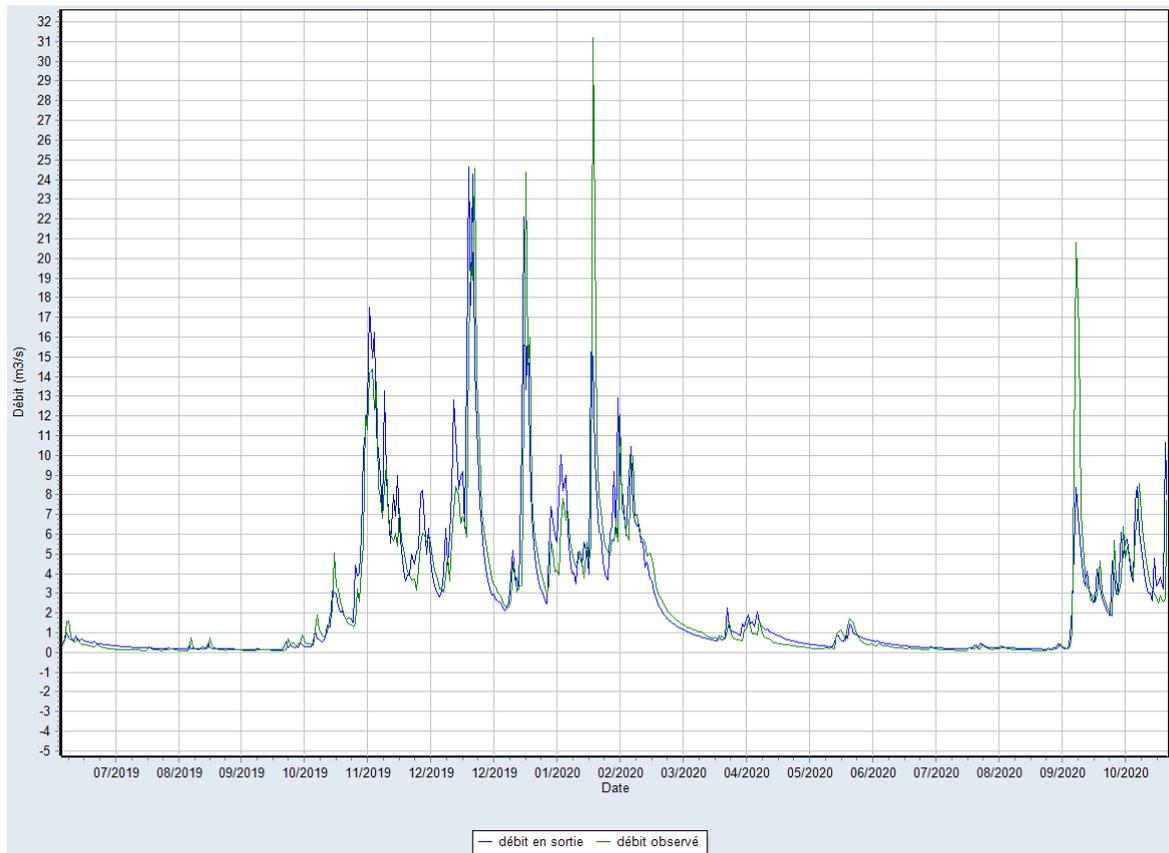


Figure 3-9 : débit observé et débit en sortie du modèle à Scignac – zoom sur l'année 2019/2020

3.6.3 VERIFICATION DU CALAGE DU MODELE GLOBAL

Pour cette phase de calage la topologie du modèle employé est celle présentée sur la Figure 3-5. Le calage est vérifié au point nodal sur la période pour laquelle nous disposons du plus grand nombre de données d'entrée : 2006-2023.

Les paramètres de calage obtenus sur le bassin versant de l'Aulne à Scignac sont reportés à l'ensemble des sous bassins versants intermédiaires. Le paramètre « C » qui représente le temps de base de l'hydrogramme est ajusté afin qu'il soit compatible avec les caractéristiques géométriques de chacun des sous bassins versants.

Les biefs de propagation sont également paramétrés par un coefficient de rugosité (Strickler), une pente ainsi qu'un profil en travers géométrique caractéristique.

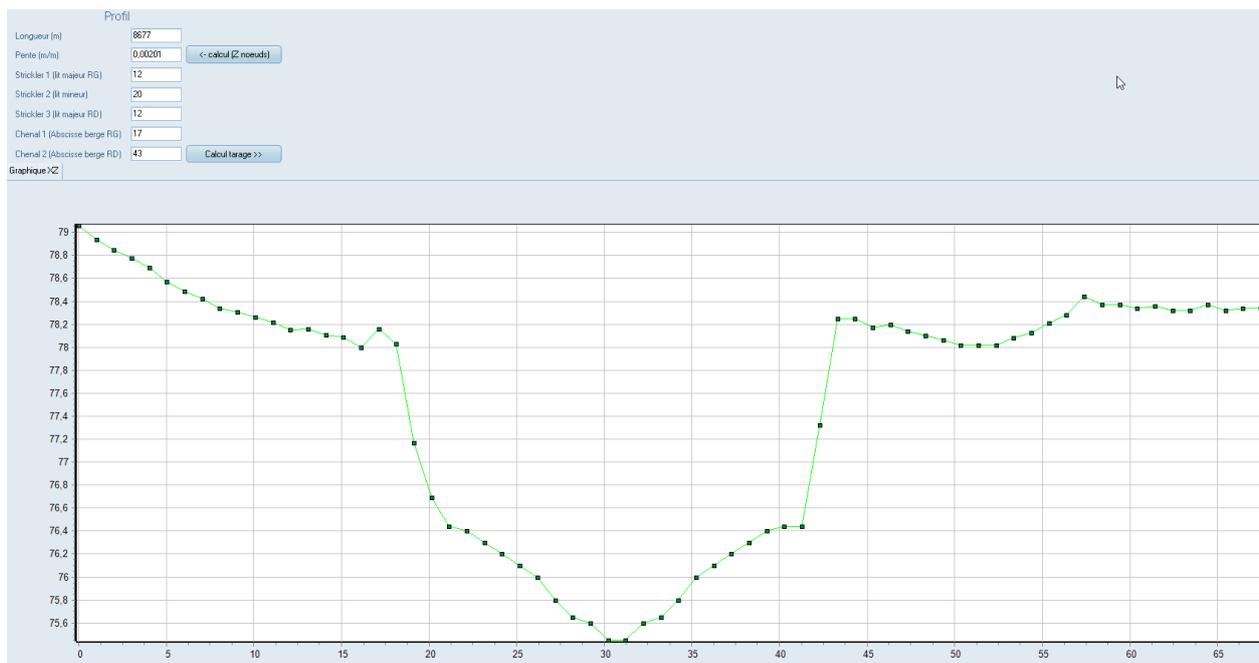


Figure 3-10 : exemple de profil en travers d'un bief

Plusieurs chroniques de débits journaliers mesurés par des stations sont directement injectés dans le modèle :

- Débit de l'Aulne à Scrignac ;
- Débit de l'Hyères à Saint-Hernin ;
- Débit de l'Ellez en sortie de la retenue de St Michel ;

De même, les chroniques journalières de prélèvements pour l'eau potable et de rejets de STEP sont injectées en certains points de calcul du modèle :

- Débits relâchés par la STEP de Châteauneuf ;
- Débits prélevés pour l'alimentation en eau potable au Moulin Neuf par les syndicats du Poher et du Stanger ainsi que la prise d'eau de Bizernig à proximité de Châteauneuf.

Les autres flux pris en compte dans le modèle sont la pluie et l'évapotranspiration appliqués aux bassins versants et aux biefs.

Au point nodal, les critères de calage sur les débits peuvent à nouveau être calculés :

Nash(ln(Q)) (%)	RDE (%)	Bilan (%)
96,1%	101,5%	4,2%

Tableau 6 : Critères de calage du modèle à la station de Châteauneuf (Pont Pol Ty Glaz) sur la période 2006-2023

Les critères de calage, calculés sur la période 2006-2023 et sur l'année entière, restent satisfaisants au droit du point nodal.

L'étiage 2022 a été sévère sur le bassin versant de l'Aulne, la figure suivante montre à titre d'exemple l'évolution du débit simulé et observé à Châteauneuf au cours de cette l'année. Le tableau inséré à la suite du graphique précise pour chaque année les écarts de volumes sur la période d'étiage.

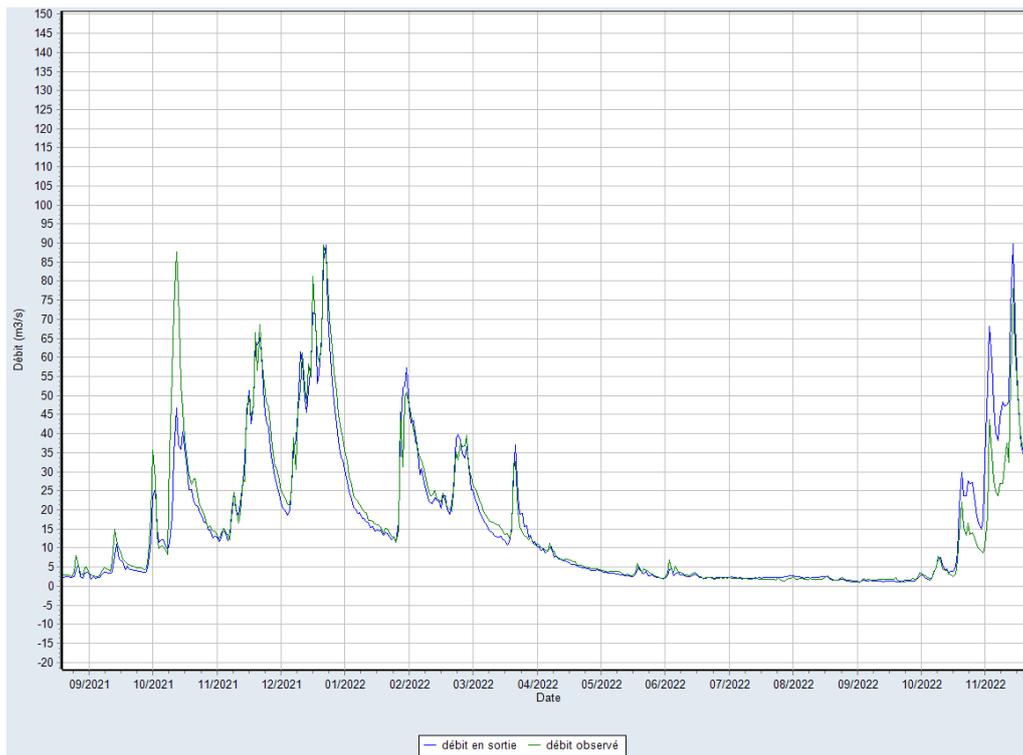


Figure 3-11 : débit observé et simulé au droit de Châteauneuf en 2022

Année	Ecart en % sur le volume sur la période de juin à octobre - Simulé/Observé
2006	9%
2007	-11%
2008	-1%
2009	-8%
2010	-4%
2011	-6%
2012	-9%
2013	5%
2014	11%
2015	-10%
2016	-7%
2017	14%
2018	2%
2019	12%
2020	4%
2021	-16%
2022	1%
2023	-11%
Total	-1%

Tableau 7 : récapitulatif des différences entre les volumes simulés et observés sur la période de juin à octobre au point nodal

Sur la période simulée (2006-2023), les écarts en termes de volumes simulé/observé en étiage sont généralement compris -15 et 15 % selon l'année. Sur l'ensemble de la chronique cela représente un écart de -1%.

La capacité du modèle hydrologique à simuler les débits d'étiage a également été analysée en comparant les valeurs des débits d'étiage caractéristiques (QMNA_{5ans} et VCN10_{5ans}). Les valeurs sont données dans le tableau ci-après :

	Calculé d'après mesures	Calculé d'après modèle
QMNA _{5ans}	2,1 m ³ /s	2,0 m ³ /s
VCN10 _{5ans}	1,8 m ³ /s	1,7 m ³ /s

Tableau 8 : Débit caractéristiques d'étiage mesurés et calculés au point nodal sur la période 2006-2023.

Au regard de ces résultats et de certains facteurs d'incertitude difficilement modélisables (écourues, prélèvements agricoles, relation nappe rivière, hypothèses pour compléter certaines chroniques lacunaires de prélèvements/rejets...), le calage du modèle global est jugé satisfaisant.

4 ELABORATION DES COURBES DE DEFAILLANCE EN SITUATION ACTUELLE

4.1 DEMARCHE GENERALE

Les courbes de défaillances représentent le risque de non-satisfaction des usages sur la période d'étiage du 1^{er} juin au 30 octobre en fonction de la disponibilité de volume dans la retenue et d'un débit règlementaire cible au point nodal de Pont Pol Ty Glaz :

- Débit d'objectif d'étiage (DOE) : 2,15 m³/s jusqu'en 2016 (débit objectif inscrit dans le SAGE Aulne de 2014), 1,8m³/s après 2016
- Débit seuil d'alerte (DSA) : 1,5 m³/s
- Débit seuil d'alerte renforcée (DSAR) : 1,2 m³/s
- Débit de crise (DCR) : 0,75 m³/s

En pratique, il s'agit de réaliser l'analyse suivante tous les 15 jours sur la période d'étiage :

- o Un niveau initial dans la retenue de Saint-Michel est fixé à la date de début d'analyse.
- o L'évolution du niveau de la retenue de Saint-Michel est alors calculée sur 18 années d'étiage (2006-2023) en demandant au modèle de relâcher a minima le débit réservé et si besoin un complément pour le soutien d'étiage afin de respecter le débit objectif au point nodal.
- o Les niveaux minimums atteints sur la période d'étiage analysée sont extraits chaque année et comparés au niveau du volume mort de la retenue (223,84 m NGF). Il y a défaillance si ce niveau est atteint.
- o Des itérations sur le niveau initial de la retenue sont réalisées en suivant les étapes précédentes de façon à définir les risques de défaillance à 15%, 30%, 50% et 75%.

Précisions concernant la valeur du débit réservé prise en compte dans le calcul :

Le débit réservé à l'aval immédiat de la retenue de Saint Michel est fixé règlementairement à 120 l/s tandis que celui à l'aval de la retenue de Saint-Herbot est fixé à 160 l/s.

Puisque la retenue de Saint Herbot n'est pas intégrée à la modélisation, la valeur du débit réservé a été fixée de la façon suivante :

- Si la somme du débit réservé règlementaire de Saint-Michel (120 l/s) et des apports du bassin intermédiaire entre Saint-Michel et Saint-Herbot permet d'atteindre les 160 l/s à Saint Herbot, alors le débit réservé est maintenu à 120 l/s à l'aval de Saint Michel.
- Si ce n'est pas le cas, le débit réservé à l'aval de Saint-Michel est augmenté de façon à atteindre 160 l/s à Saint-Herbot en considérant les apports du bassin intermédiaire.

Précisions concernant le calcul de la chronique de soutien d'étiage :

Le **complément pour le soutien d'étiage** est déterminé de la façon suivante :

- Réalisation d'une simulation avec le modèle hydrologique sans soutien d'étiage en injectant uniquement le débit réservé à l'aval du barrage de Saint-Michel ;
- Calcul au point nodal du débit manquant pour atteindre le débit objectif ciblé. Ce débit manquant est considéré comme étant le complément pour le soutien d'étiage. Les valeurs de débits objectifs ciblés au point nodal sont les suivantes :
 - o DOE n°1 (jusqu'en 2016) : 2,15 m³/s
 - o DOE n°2 (après 2016) : 1,8 m³/s
 - o DSA : 1,5 m³/s + prélèvements AEP du Syndicat Mixte de l'Aulne situés à l'aval du point nodal
 - o DSAR : 1,2 m³/s + prélèvements AEP du Syndicat Mixte de l'Aulne situés à l'aval du point nodal
 - o DCR : 0,75 m³/s + prélèvements AEP du Syndicat Mixte de l'Aulne situés à l'aval du point nodal

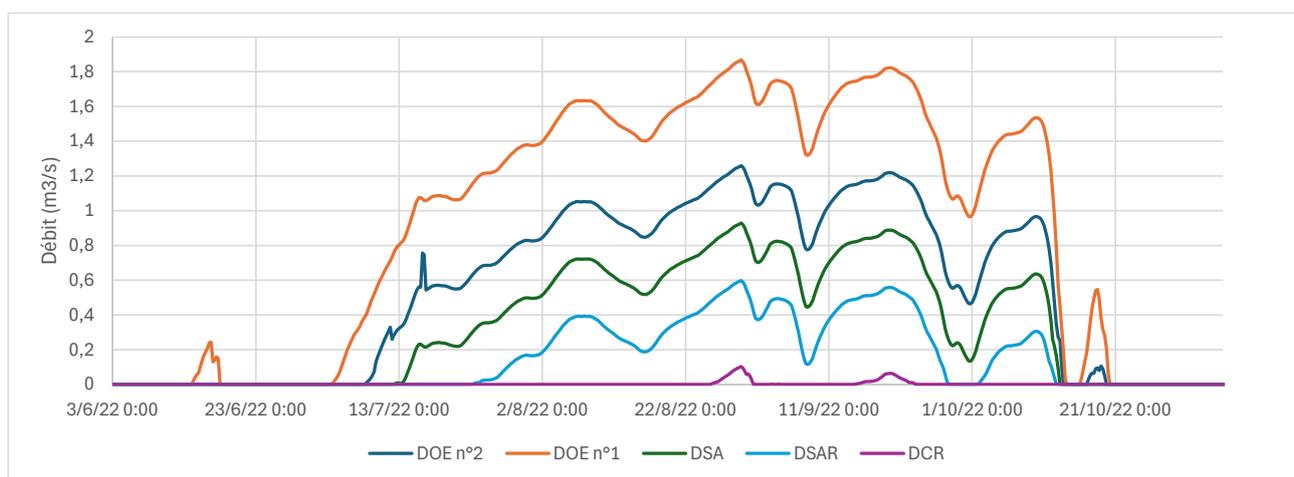


Figure 4-1 : Exemple de chroniques de soutien d'étiage calculées pour l'année sèche de 2022

Précisions concernant le calcul de l'évolution de la retenue de Saint-Michel

Le **calcul de l'évolution du niveau de la retenue de Saint-Michel sur 17 années d'étiage** est réalisé par un bilan volumique sur les entrants/sortants de la retenue au pas de temps journalier :

$$\Delta Volume = V_{ruissellé} - V_{débit\ réservé} - V_{éaporé} - V_{surverse} + V_{pluie\ directe} - V_{soutien\ étéage}$$

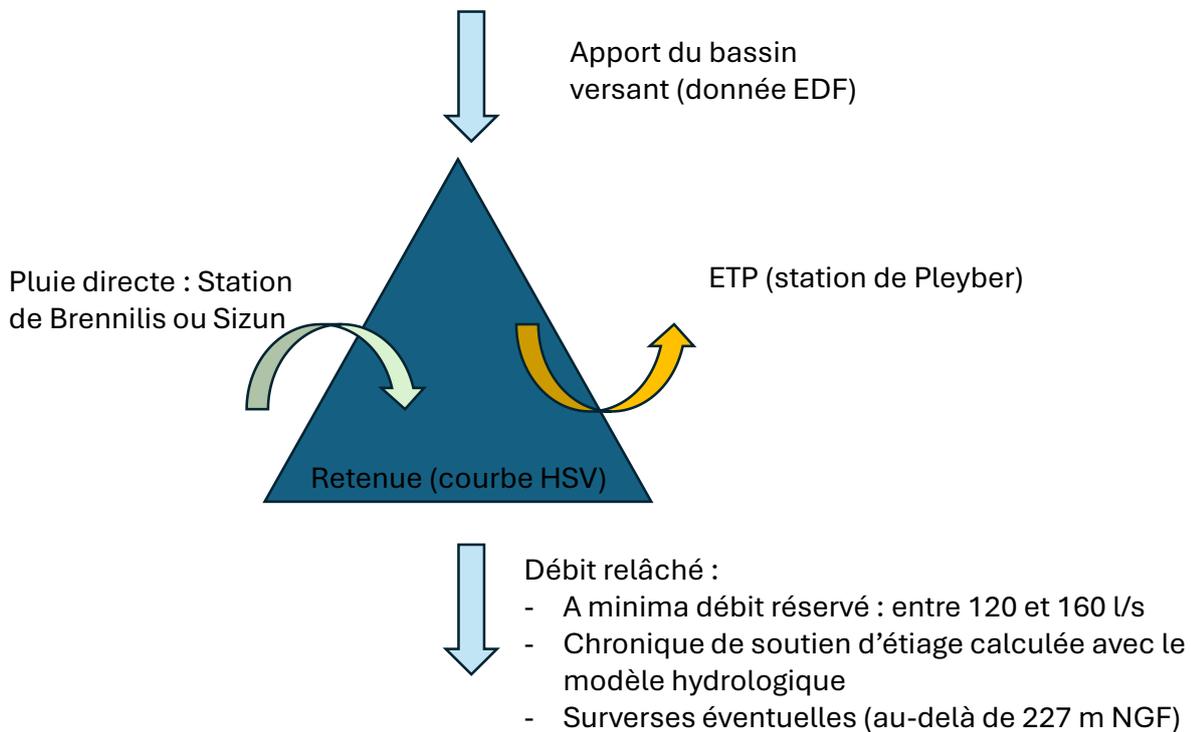


Figure 4-2 : Schéma représentatif des entrants/sortants considérés pour le calcul de l'évolution de la retenue de Saint-Michel

Un programme codé sous Python a été développé pour ce calcul et permet notamment de sélectionner la date de début de calcul. Une boucle itérative fait ensuite varier la cote initiale de la retenue par pas de 5 cm. En sortie, le programme fournit chaque année l'évolution journalière du niveau de la retenue pendant la période d'été en fonction de la cote initiale de retenue. Un exemple de rendu est donné sur la figure ci-après en considérant un démarrage des calculs au 1^{er} juin et une valeur cible au point nodal correspondant au DOE n°1.

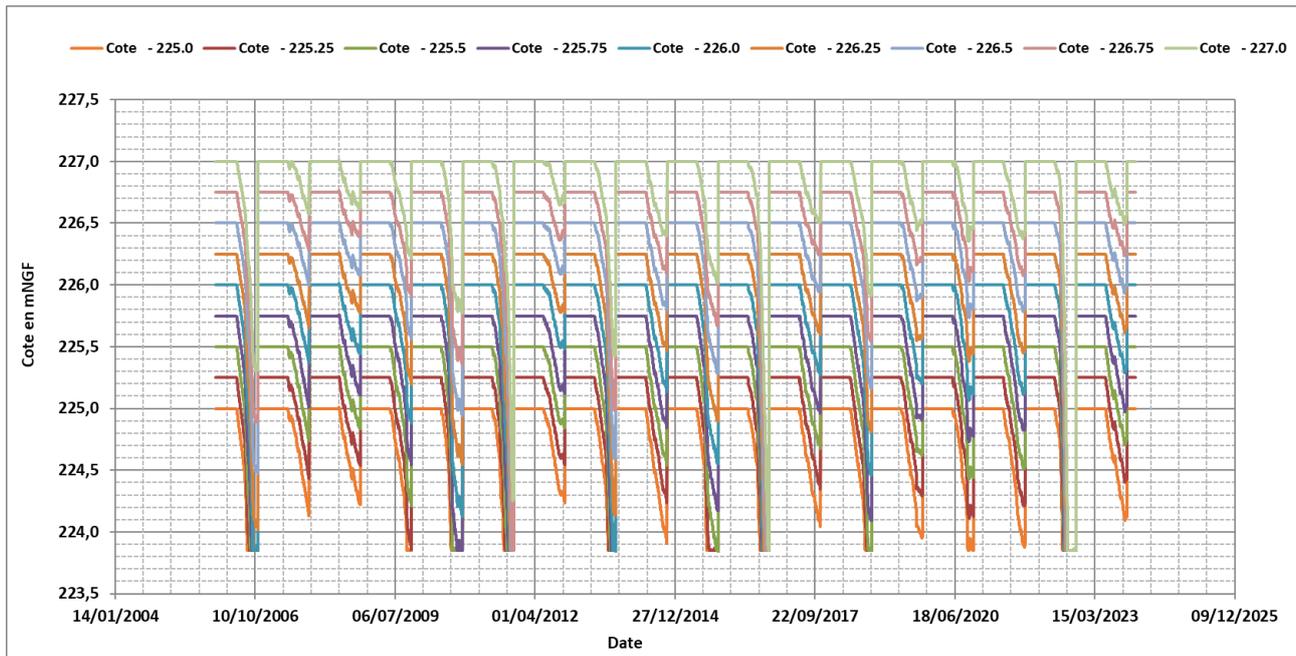


Figure 4-3 : Exemple de calcul de l'évolution de la retenue en saison d'étéage sur la période 2006- 2023 – cas du DOE n°1 pour un calcul démarrant au 1^{er} juin

Précisions concernant le calcul des probabilités de défaillance

Il y a défaillance si le volume mort de la retenue ($z=223,84$ m NGF) est atteint avant la fin de la période d'étéage. La probabilité de défaillance est alors définie comme le rapport entre le nombre d'années ayant connu une défaillance et le nombre d'années d'analyse (18 années entre 2006 et 2023).

4.2 COURBES DE DEFAILLANCE ETABLIES SUR LA PERIODE 2006-2023

Les courbes de défaillances obtenues pour chacun des débits ciblés au point nodal de Pont Pol Ty Glaz sont données en page suivante.

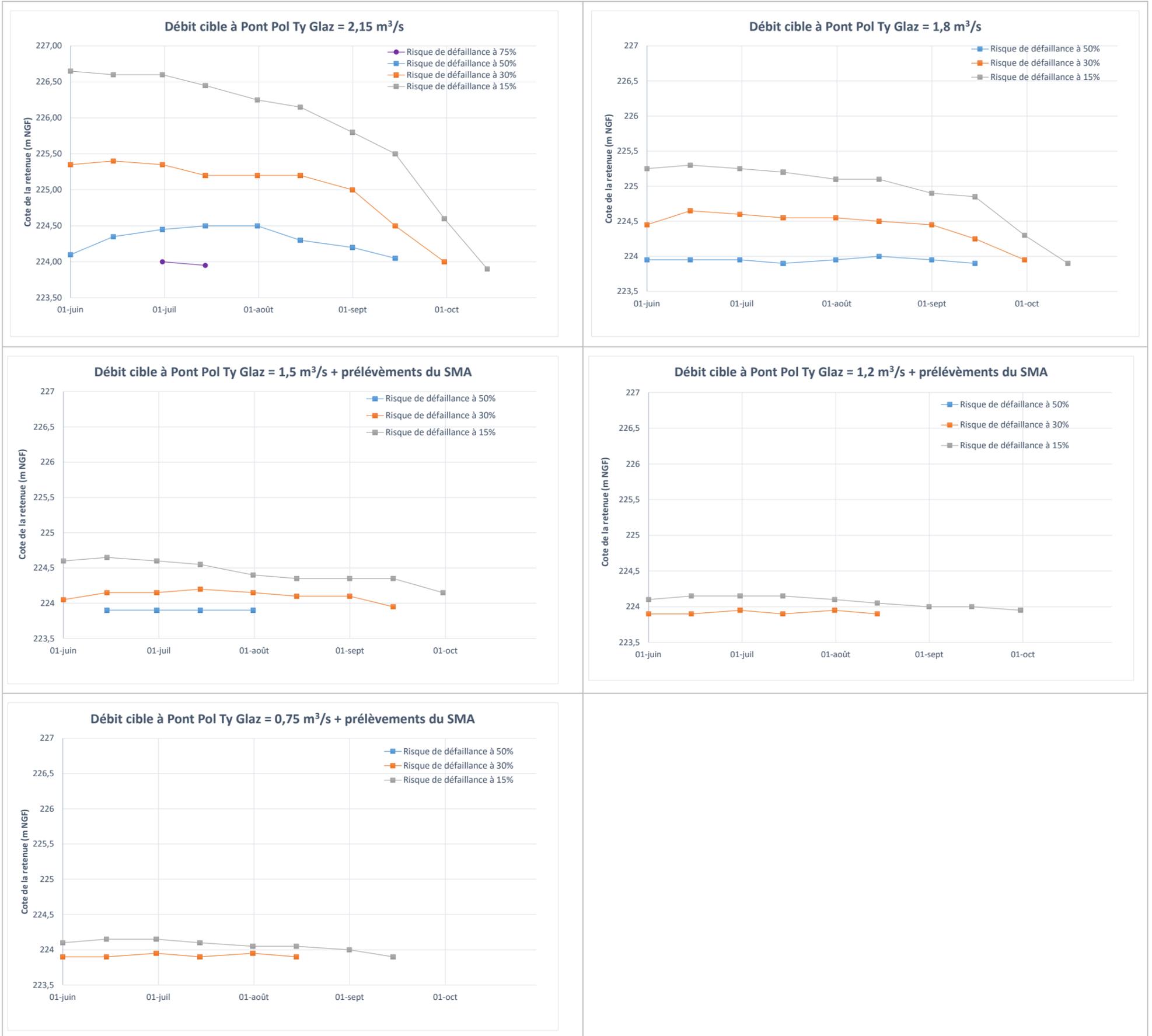


Figure 4-4 : Courbes de défaillance établies sur la période 2006-2023

5 ELABORATION DES COURBES DE DEFAILLANCE A L'HORIZON 2040-2060

5.1 PREAMBULE

L'objectif de ce chapitre vise dans un premier temps à étudier l'impact du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau sur le bassin versant de l'Aulne. Dans un second temps, les courbes de défaillances sont à nouveau calculées en considérant l'impact du changement climatique sur la ressource en eau.

Le portail de la DRIAS-Eau permet d'accéder à un jeu de données de projection hydrologiques des eaux de surface et souterraines, réalisées dans le cadre des projets DRIAS 2020 et Explore2 sur l'ensemble du territoire français.

Le projet Explore 2 s'inscrit dans le cadre du programme **DRIAS (Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés)**. Il vise à fournir des données climatiques régionalisées et des projections pour évaluer les impacts des changements climatiques sur des thématiques spécifiques comme les ressources en eau. Les simulations et les modèles associés dans ce cadre permettent de :

- Simuler les débits des rivières sous différents scénarios climatiques.
- Évaluer les variations temporelles et géographiques des ressources en eau.
- Aider à la prise de décisions pour des politiques d'adaptation au changement climatique.

Dans le cadre de ces projets, la descente d'échelle dynamique est utilisée pour affiner les projections climatiques à une échelle géographique plus fine que celle fournie par les modèles climatiques globaux (GCM). La chaîne de traitement pour la descente d'échelle est représentée sur le schéma ci-après et détaillée par la suite.

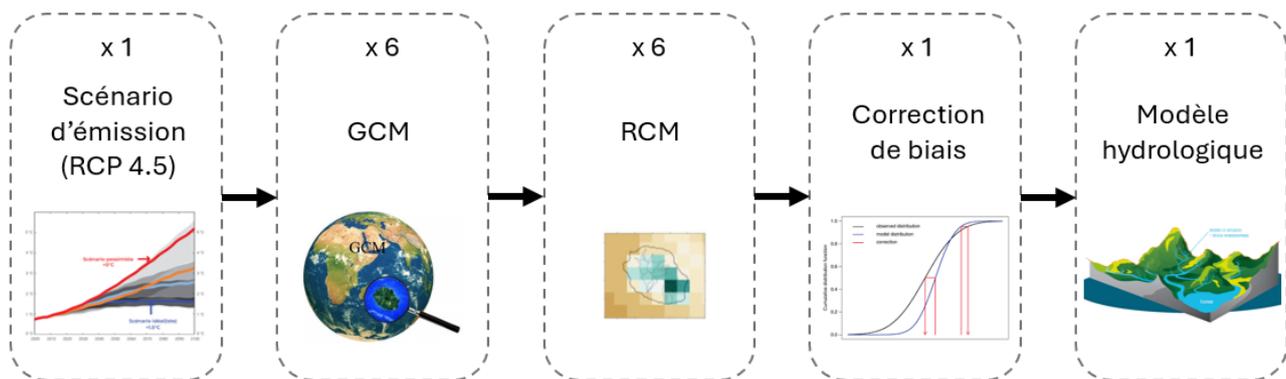


Figure 5-1 : schéma de la chaîne de traitement de descente d'échelle

En concertation avec l'EPAGA et les membres du COTECH, le scénario RCP 4.5 établi par le GIEC a été choisi. Il correspond à un scénario intermédiaire de stabilisation du forçage radiatif à 4,5 W/m² (stabilisation des émissions de gaz à effet de serre).

Ici, les modèles climatiques globaux (**GCM**) utilisés sont :

- CNRM-CM5,
- EC-EARTH,

- IPSL-CM5A-MR,
- HadGEM2-ES,
- MPI-ESM-LR,
- NorESM1-M.

Les modèles climatiques régionaux (**RCM**) utilisés sont les suivants :

- ALADIN63,
- RACMO22E,
- RCA4,
- CCLM4-8-17,
- REMO2009,
- HIRHAM5.

La méthode ADAMONT intervient pour **corriger le biais** présent dans les simulations des modèles climatiques globaux et régionaux. Les données SAFRAN réanalysées fournissent des informations météorologiques basées sur l'observation et sont exploitées pour les corrections de biais.

L'ensemble des chaînes de traitement se terminent par une chaîne de **modèles hydrologiques** (SIM2) développée dans le cadre d'une coopération entre Météo-France et le Centre de géosciences de Mines ParisTech.

Au total, 8 sorties de chaînes de traitement de descente d'échelle dynamique sont disponibles sur la plateforme au point nodal de Pont Pol Ty Glaz sur le l'Aulne, elles sont citées ci-après. Les noms des modèles GCM sont en bleu, les noms des modèles RCM en jaune et les noms en noir correspondent aux instituts de recherche.

- CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CNRM-ALADIN63,
- ICHEC-EC-EARTH_KNMI-RACMO22E,
- ICHEC-EC-EARTH_SMHI-RCA4,
- IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMHI-RCA4,
- MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17,
- MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4-8-17,
- MPI-M-MPI-ESM-LR_MPI-CSC-REMO2009,
- NCC-NorESM1-M_DMI-HIRHAM5.

Les deux figures suivantes permettent de comparer les modèles du projet EXPLORE2 sur le territoire français, l'ensemble CMIP6 correspond aux simulations présentées dans le sixième rapport du GIEC :

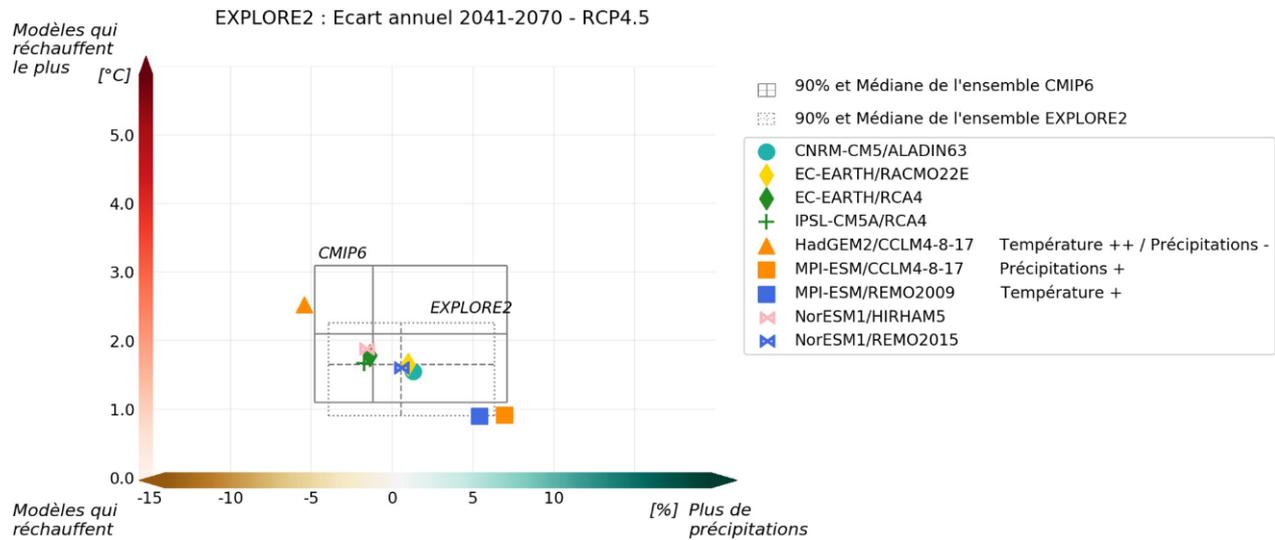


Figure 5-2 : écart sur la période annuelle 2041-2070 (RCP 4.5) – source DRIAS

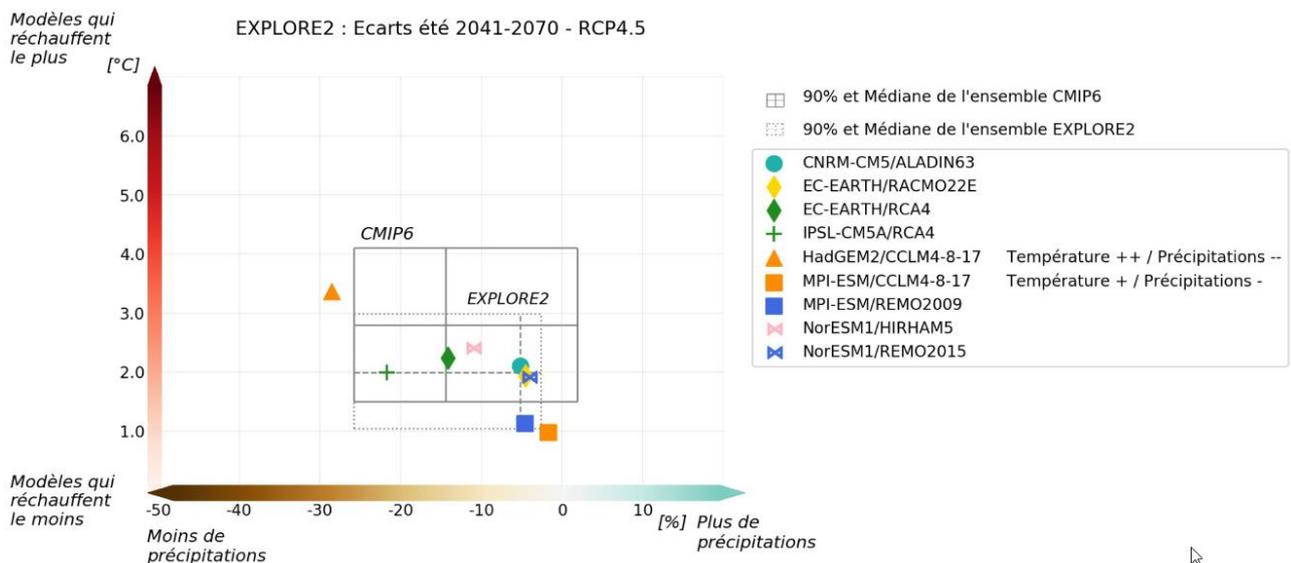


Figure 5-3 : écart sur la période estivale (juin, juillet, août) 2041-2070 (RCP 4.5) – source DRIAS

Les graphiques précédents montrent dans le cadre du projet Explore 2 que les chaînes de modélisation utilisées prévoient en France à l'horizon 2041-2070 :

- une augmentation médiane des températures d'environ 1,6 °C à l'année et de 2°C en période estivale. A noter que l'ensemble des chaînes de modélisation s'accordent sur une tendance à la hausse des températures
- une augmentation médiane des cumuls de précipitation de moins de 1 % à l'année et une diminution médiane de 5% en été. A noter que les projections sur la pluviométrie sont très variables d'une chaîne de modélisation à l'autre.

5.2 CHRONIQUE DE DEBIT JOURNALIERS DE L'AULNE AU POINT NODAL A L'HORIZON 2040-2060

Un point de sortie (débits journaliers) des huit chaînes de traitement de descente d'échelle présentées précédemment est disponible pour l'Aulne à Châteauneuf du Faou (point nodal).

Pour reconstituer une chronique de débits journaliers en saison d'étiage à l'horizon 2040-2060 en s'appuyant sur les données des différentes chaînes de traitement, nous proposons de suivre les étapes suivantes :

Etape 1 : Calcul des quantiles de débits (5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% et 95%) pour chaque mois d'étiage à partir des chroniques fournies par les différentes chaînes de traitement (X8) sur la période 2006-2023

Etape 2 : Calcul des quantiles de débits (5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% et 95%) pour chaque mois d'étiage à partir des chroniques fournies par les différentes chaînes de traitement (X8) sur la période 2040-2060

Etape 3 : Calcul des écarts en % entre les valeurs de quantiles des 8 chaînes de traitement sur la période 2040-2060 et la période 2006-2023

Etape 4 : moyenne des écarts de quantiles pour les 8 chaînes de traitement

	Quantile 0,05	Quantile 0,1	Quantile 0,25	Quantile 0,5	Quantile 0,75	Quantile 0,9	Quantile 0,95
Jun	-15%	-15%	-13%	-14%	-12%	-10%	-7%
Juillet	-3%	-2%	-4%	-1%	1%	1%	3%
Août	-3%	-2%	-9%	-15%	-10%	-12%	-4%
Septembre	-10%	-21%	-25%	-29%	-21%	-16%	-12%
Octobre	-25%	-25%	-10%	-8%	-7%	0%	5%

Tableau 9 : Moyenne des écarts de quantile de débits (étape 4)

Etape 5 : Calcul des quantiles de débits (5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% et 95%) pour chaque mois d'étiage à partir de la chronique naturelle (désinfluencée) de l'Aulne donnée par notre modèle hydrologique sur la période 2006-2023

	Quantile 0,05	Quantile 0,1	Quantile 0,25	Quantile 0,5	Quantile 0,75	Quantile 0,9	Quantile 0,95
Jun	4,16	4,42	5,20	6,83	8,95	11,29	13,25
Juillet	3,20	3,30	3,66	4,31	5,30	6,89	7,77
Août	2,21	2,30	2,63	3,15	3,97	5,06	6,05
Septembre	1,96	2,04	2,29	2,77	3,51	4,46	5,03
Octobre	3,75	4,25	5,27	7,44	12,25	17,80	21,57

Tableau 10 : quantiles de débits naturels simulés avec GES-RES sur la période 2006-2023 (étape 5)

Etape 6 : Affectation du rang de quantile (entre 0 et 100%) aux débits journaliers de la chronique naturelle (désinfluencée) de l'Aulne donnée par notre modèle hydrologique sur la période 2006-2023

Etape 7 : Application des écarts de quantile (calculés à l'étape 4) à la chronique naturelle (désinfluencée) de l'Aulne donnée par notre modèle hydrologique sur la période 2006-2023 en fonction des rangs affectés lors de l'étape 6.

A l'issue de l'étape 7 nous obtenons ainsi une chronique naturelle de débits journaliers de l'Aulne au point nodal de Pont Pol Ty Glaz. La chronique ainsi établie comprend 18 années représentatives de l'hydrologie naturelle projetée à l'horizon 2040-2060 en considérant le scénario RCP4.5 du GIEC.

Remarque : La même démarche est également appliquée à la chronique de débits journaliers de l'Ellez en amont de la retenue de Saint-Michel fournie par EDF.

La figure ci-après permet de visualiser graphiquement l'impact du changement climatique sur les débits moyens journaliers interannuels de l'Aulne au point nodal.

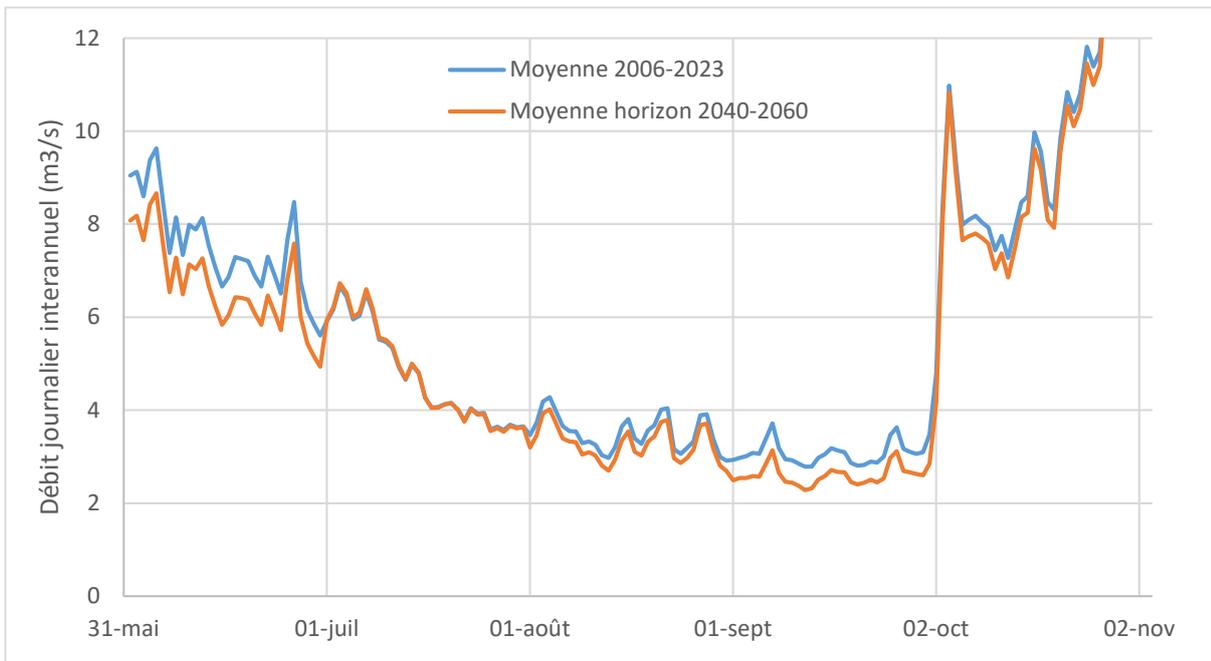


Figure 5-4 : Débits moyens journaliers interannuels sur la période d'étiage en situation actuelle (2006-2023) et à l'horizon projeté (2040-2060)

L'impact sur les débits caractéristiques d'étiage naturels de l'Aulne au point nodal a été calculé par ajustement à une loi log-normale (cf. exemple pour le VCN10 sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

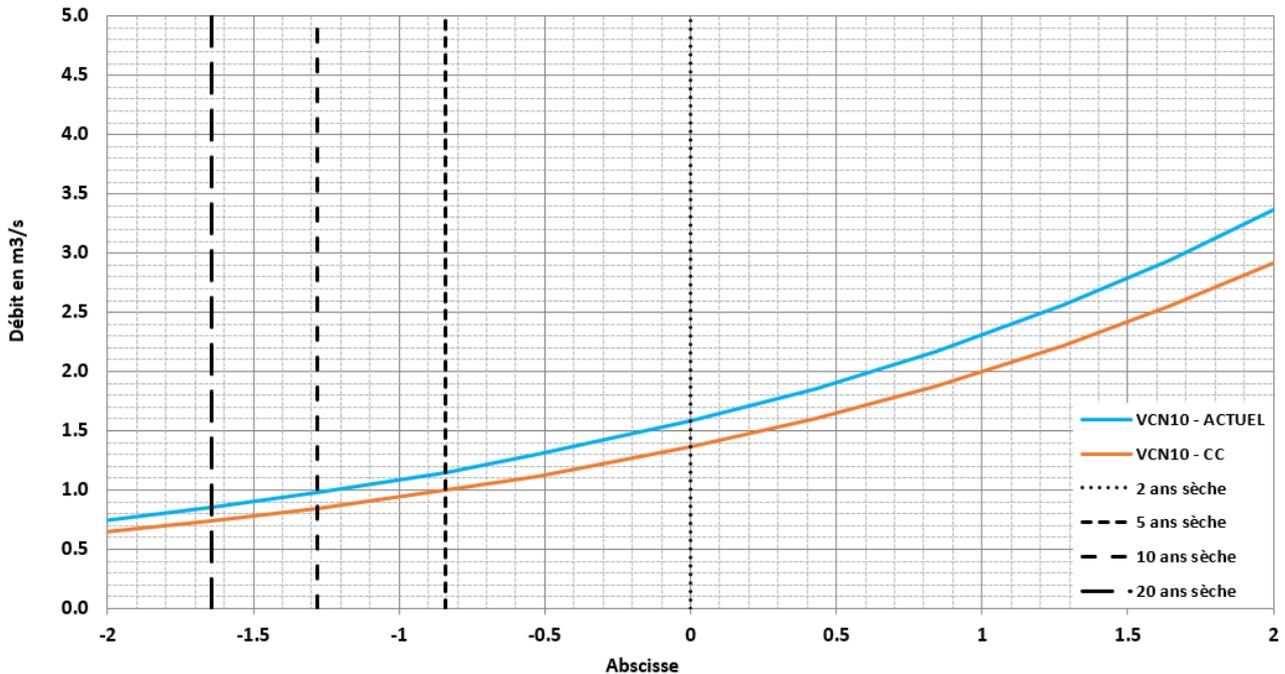


Figure 5-5 : courbe de VNC10 sur les débits naturels avec et sans changement climatique période 2006-2023

Les valeurs caractéristiques d'étiage pour les débits naturels de l'Aulne au point nodal sont données ci-après :

	2006-2023	Horizon 2040-2060	Evolution
QMNA (5ans)	1,46 m³/s	1,31 m³/s	-10,3%
VCN10 (5ans)	1,14 m³/s	1 m³/s	-12,3%

Tableau 11 : valeurs caractéristiques d'étiage pour les débits naturels de l'Aulne au point nodal sur la période 2006-2023 et à l'horizon 2040-2060 (scénario RCP4.5 du GIEC)

Etape 8 : Les différents prélèvements et rejets sont rajoutés à la chronique de débits journaliers naturels de l'Aulne en vue de déterminer la chronique de soutien d'étiage. **Il est considéré que les prélèvements et rejets sont identiques à ceux de la période 2006-2023.**

5.3 PLUVIOMETRIE ET ETP SUR LA RETENUE DE SAINT-MICHEL A L'HORIZON 2040-2060

Comme évoqué précédemment, les tendances sur l'évolution de la pluviométrie sont très variables d'une chaîne de traitement à l'autre et notamment en Bretagne. Aussi, il est considéré que la pluviométrie appliquée sur la période 2006-2023 est conservée pour la période projetée 2040-2060.

Concernant les températures et donc l'ETP, il est proposé de retenir les résultats de la chaîne de traitement CNRM-CM5/ALADIN63 qui se situe dans la médiane des différentes chaînes (cf. Figure 5-3). Les données de la chaîne de traitement sont extraites du point 13740 de la grille de calcul du DRIAS, ce dernier est situé au centre du bassin versant de l'Aulne.

Les étapes suivantes sont ensuite respectées :

Etape 1 : Calcul des ETP mensuelles pour chaque mois d'étiage à partir de la chronique fournie par la chaîne de traitement retenue (CNRM-CM5/ALADIN63) sur la période 2006-2023

Etape 2 : Calcul des ETP mensuelles pour chaque mois d'étiage à partir de la chronique fournie par la chaîne de traitement retenue (CNRM-CM5/ALADIN63) sur la période 2040-2060

Etape 3 : Calcul des écarts (%) entre les ETP moyennes mensuelles sur la période 2040-2060 et la période 2006-2023

Etape 4 : Application des écarts des écarts d'ETP mensuelle (calculés à l'étape 3) à la chronique d'ETP journalière utilisée pour la situation actuelle sur la période 2006-2023.

	ETP journalière moyenne 2006-2023	ETP journalière moyenne 2040-2060	Delta
juin	3,21	3,43	+7%
juil	3,54	3,79	+7%
août	2,99	3,20	+7%
sept	1,99	2,16	+9%
oct	1,05	1,05	0%

Tableau 12 : Ecart d'ETP moyenne journalière (mm/j) entre la période 2003-2023 et l'horizon 2040-2060 (étape 3)

5.4 COURBES DE DEFAILLANCE A L'HORIZON 2040-2060

Une fois l'impact du changement climatique pris en compte sur la ressource en eau du bassin versant de l'Aulne, la démarche présentée au paragraphe 4.1 est à nouveau appliquée pour déterminer les courbes de défaillance à l'horizon 2040-2060.

Les courbes de défaillances obtenues pour chacun des débits ciblés au point nodal de Pont Pol Ty Glaz sont données en page suivante. Les courbes à l'horizon 2040-2060 sont données en traits pleins. Les courbes établies sur la période de référence (2006-2023) sont également redonnées en traits pointillés à titre comparatif.

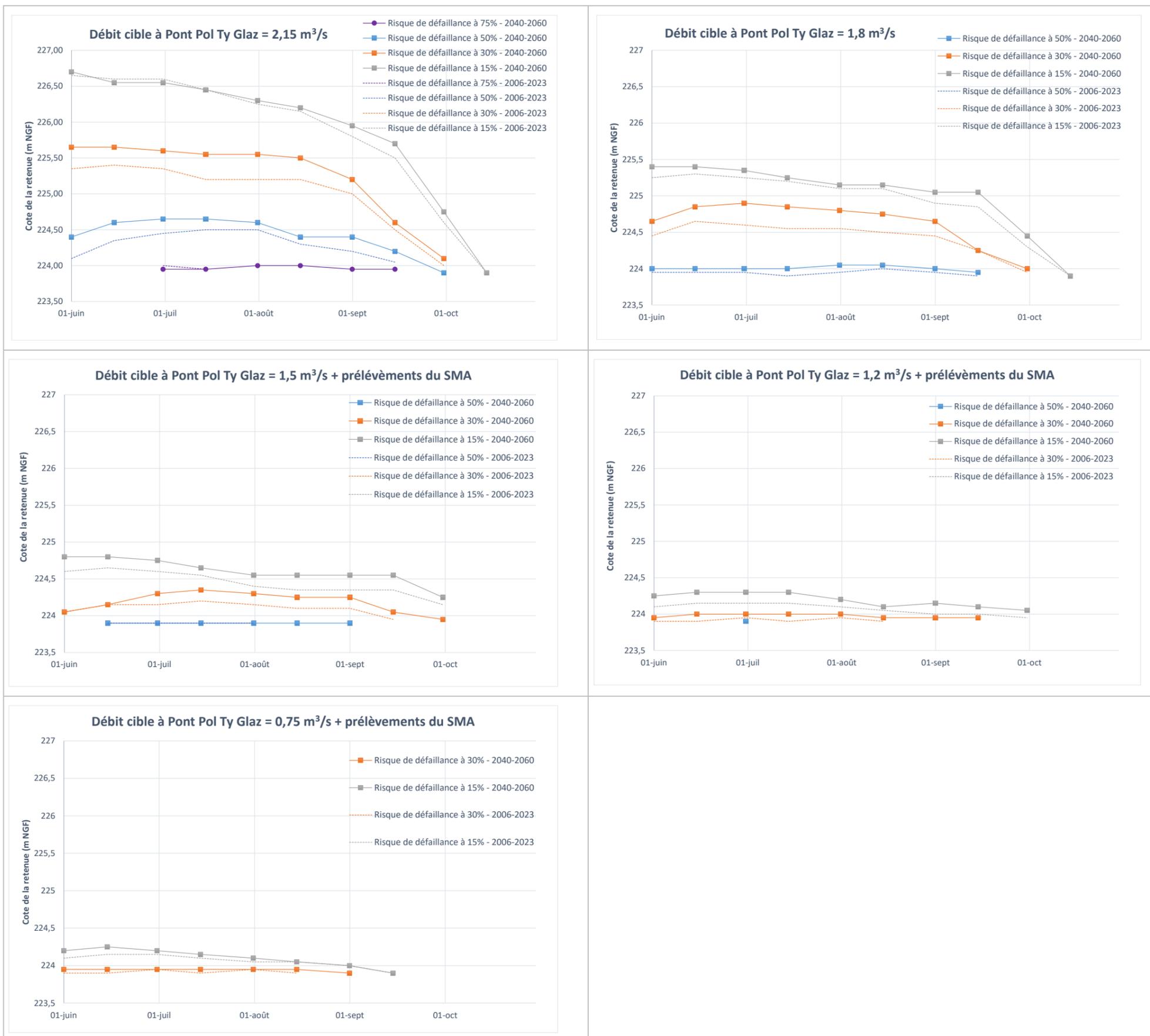


Tableau 13 : Courbes de défaillance à l'horizon 2040-2060 et sur la période de référence (2006-2023)

