



Université
de Toulouse



Rapport de fin de stage 2024

Sous la direction de : Mr Sénac Antoine

(Technicien de la Réserve Naturelle Nationale de Nohèdes)

L'évolution hydrologique du bassin-versant du Caillan sur la vallée de Nohèdes et de Conat depuis 2009



**Photo de l'Estany del Clot depuis le rec de Jujols (Réalisé par B. Crouzil,
2024)**



Remerciement

Tout d'abord, je remercie mon responsable, M. SENAC Antoine, technicien de la réserve naturelle nationale de Nohèdes. Son accueil et son partage de connaissance m'ont permis de me sentir en confiance dans les différentes tâches effectuées durant ces 5 mois. Nous avons pu faire avancer cette thématique qui était à l'arrêt depuis 2019. Je fais une mention spéciale au conservateur, M. SALVADOR Olivier, avec qui on a beaucoup discuté du rôle de la Réserve, des différents faits historiques touchant à ma thématique et d'autres sujets très intéressants.

J'adresse mes remerciements à mon tuteur, M. ANTOINE Jean-Marc, qui m'a rapidement guidé dans la structure de ce rapport me permettant d'aller de l'avant dans ce stage. Ainsi, j'ai eu les outils nécessaires afin de terminer l'écriture de ce rapport de fin d'étude. Ces remerciements sont aussi dédiés à l'équipe enseignante et les intervenants professionnels qui, pendant ces 2 ans d'études, m'ont apporté les bases de l'hydrologie notamment sur les jaugeages et des calculs de débit.

Cette partie des remerciements sera orientée vers l'équipe de la réserve naturelle nationale de Nohèdes, M. PIMENTA Raul et M. DOLESON François. Ils m'ont permis d'avancer à certains moments et de participer à des animations. Je n'oublie pas, M. NIVET Thomas et M. DECHERY Guillem, les derniers membres de la Réserve qui m'ont aidé pour la réalisation des jaugeages. Vous m'avez rapidement accordé votre confiance et vous m'avez permis de participer à plusieurs expériences enrichissantes.

Je remercie sincèrement M. LE COZ et M. RENARD pour m'avoir aidé dans la réalisation de la courbe de tarage. Ils ont pris de leur temps pour me répondre. Merci beaucoup.

Pour terminer, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers ma famille pour leur confiance et leur soutien tout au long du stage.

Résumé

Depuis 2009, la réserve naturelle nationale de Nohèdes organise chaque année des stages sur le bilan hydrique du bassin-versant du Caillan, situé dans la vallée de Nohèdes et Conat. Ces stages ont pour objectif de mieux comprendre le fonctionnement du cours d'eau et de son bassin-versant.

Cependant, de 2019 à 2024, ces stages n'ont pas été reprogrammés, et plusieurs tempêtes ont frappé le territoire durant cette période. Ces événements ont entraîné des changements notables sur le bassin-versant. Ce rapport présente l'évolution hydrologique du bassin-versant du Caillan dans la vallée de Nohèdes et de Conat. La présence du karst complexifie l'étude en raison des infiltrations qu'il engendre.

Les débits sont enregistrés depuis 2009, ce qui offre une première vision de l'évolution des écoulements. Les courbes de tarage montrent qu'à partir de la tempête Gloria en 2020, la dynamique de la rivière a changé. On observe un écart entre les débits calculés après 2020 et ceux mesurés auparavant.

Cette étude met en relation le territoire avec le changement climatique. La hausse des températures, les modifications de la répartition saisonnière des précipitations et leur variabilité tendent à réduire les débits du Caillan. De plus, la diminution en quantité et en durée du manteau neigeux contribue à cette tendance. L'assèchement des sols impacte également les zones humides présentes sur le territoire, ce qui entraîne une baisse du niveau piézométrique de la nappe phréatique dans les zones karstiques. Ce phénomène modifie les échanges entre le cours d'eau et le karst.

Ainsi, le Caillan a connu un changement notable en 2020. On observe une évolution progressive, liée au changement climatique, qui devrait continuer dans les années à venir. Cette tendance est significative, car la disponibilité en eau dans le bassin-versant risque de diminuer d'ici 2050.

Face à ce constat, une réunion entre les habitants et les acteurs de la vallée est nécessaire pour élaborer un plan de gestion durable de la ressource en eau.

Summary :

Since 2009, the Nohèdes National Nature Reserve has been organizing annual workshops on the water balance of the Caillan watershed, located in the Nohèdes and Conat valleys. These workshops aim to deepen understanding of the functioning of the river and its watershed.

However, from 2019 to 2024, these workshops were not rescheduled, and several storms impacted the region during this period. These events led to significant changes in the watershed. This report examines the hydrological evolution of the Caillan watershed in the Nohèdes and Conat valleys. The presence of karst adds complexity to the study due to the infiltrations it causes.

Flow rates have been recorded since 2009, providing an initial overview of the evolution of water flows. Rating curves indicate that since Storm Gloria in 2020, the river's dynamics

have shifted. A discrepancy is noticeable between flow rates calculated after 2020 and those measured earlier.

This study links the territory to climate change. Rising temperatures, changes in the seasonal distribution of precipitation, and their increasing variability tend to reduce the Caillan's flow rates. Additionally, the decrease in both the quantity and duration of the snowpack contributes to this trend. Soil drying also affects the wetlands in the area, leading to a drop in the piezometric level of the karst aquifer. This phenomenon alters the exchanges between the river and the karst system.

As a result, the Caillan underwent a significant change in 2020. A progressive evolution related to climate change is ongoing and is expected to persist in the coming years. This trend is critical, as water availability in the watershed is projected to decrease by 2050.

In light of this situation, a meeting between local residents and stakeholders in the valley is essential to develop a sustainable water resource management plan.

Mots clés :

Hydrologie, karst, changement climatique, bassin-versant, enjeux

Keywords :

Hydrology, karst, climate change, watershed, issues

Sommaire

Remerciement	1
Résumé	2
Sommaire	4
Liste des sigles	5
Introduction	6
I-Présentation du stage	7
A. La structure d'accueil	7
B. Le territoire d'étude	8
C. Les missions demandées	10
II- Matériel et méthode	10
A- Suivi limnimétrique	10
B- Jaugeage et courbe de tarage	13
C- Traitement des données	16
III- Résultats	18
A- Climatologie	18
1- La pluviométrie et l'évapotranspiration	18
2- La température et le modèle Aurelhy	21
3- Les diagrammes ombrothermiques	24
4- L'évolution du manteau neigeux dans les Pyrénées	26
B- Le cours d'eau	29
1- Le rôle géologique sur le cours d'eau	29
2- L'historique des écoulements depuis 2009	31
3- Les évolutions des débits	35
4- Contextualisation pyrénéenne	41
5- La température de l'eau	46
C- Perspective	51
1- Etat des lieux des sols	52
2- Le changement climatique	56
3- Les discussions pour la réserve	59
Conclusion	61
Bibliographie	63
Liste des figures	66
Annexes	69

Liste des sigles

AGRNN : Association gestionnaire de la réserve naturelle nationale

BRGM : Bureau de recherche géologiques et minières

EDF: Electricité de France

ETR : Evapotranspiration réelle

FRNC : Fédération des réserves naturelles catalanes

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

OPCC : Observatoire pyrénéen du changement climatique RNN:Réserve naturelle nationale

Introduction

Le Caillan est un affluent de la Têt, situé au cœur des Pyrénées-Orientales. Son cours prend naissance sur le massif du Madres, à plus de 2 400 mètres d'altitude. Il traverse la commune de Nohèdes, puis les localités de Betllans et Conat, avant de terminer son parcours à Ria-Sirach. La rivière s'étend sur environ 18 kilomètres, suivant un axe ouest-est. Le bassin-versant abrite deux réserves naturelles nationales : celle de Nohèdes et celle de Conat, toutes deux situées dans la partie sud du territoire.

Depuis 2009, la réserve naturelle de Nohèdes a initié un suivi hydrologique sur le bassin-versant de Nohèdes et de Conat. Ce suivi exclut la rivière d'Urbanya, un affluent du Caillan situé sur la rive gauche, dont la confluence se trouve à Conat, en dehors du territoire étudié. Les études, menées de 2009 à 2019, ont repris en 2024. Elles visent à mettre en lumière les enjeux liés à l'eau. Ces enjeux, nombreux et cruciaux, concernent notamment la biodiversité, les usages par les habitants et les besoins des acteurs locaux. Dans le contexte du changement climatique, ces problématiques s'accroissent, générant des tensions entre les exigences de préservation de la biodiversité, les besoins des populations locales et les activités des acteurs du territoire. Ainsi, les données collectées depuis 2009 permettent d'identifier une première tendance d'évolution jusqu'en 2024 pour les débits, les précipitations et les températures à Nohèdes. Cette étude fournit des connaissances précieuses sur les quantités d'eau disponibles ainsi que sur les évolutions climatiques et hydrologiques enregistrées depuis le début des mesures. Une partie de l'analyse est également dédiée aux projections des tendances futures dans un contexte de changement climatique.

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de ma deuxième année de master « Géographie, aménagement, environnement et développement », parcours « Gestion et évaluation des milieux montagnards », à l'Université Jean Jaurès de Toulouse. Cette étude aborde plusieurs aspects hydrologiques.

Dans une première partie, le stage sera présenté, avec une description de la structure d'accueil, du territoire étudié et des missions confiées. Ensuite, une seconde partie sera consacrée à la présentation du matériel utilisé pour l'étude. Enfin, dans une troisième partie, les résultats obtenus seront analysés. Ces résultats porteront sur des aspects climatologiques, sur le cours d'eau et sur les perspectives pour le bassin-versant.

I-Présentation du stage

A. La structure d'accueil

La réserve naturelle nationale de Nohèdes a été créée en 1986. Sa gestion a été confiée, dès 1987, à l'Association gestionnaire de la réserve naturelle de Nohèdes (AGRNN). Par ailleurs, depuis plus de 30 ans, elle est également encadrée par la Fédération des Réserves Naturelles Catalanes (FRNC). L'objectif principal de cet espace protégé est de préserver durablement la biodiversité exceptionnelle qu'il abrite. En effet, de nombreuses espèces rares ou endémiques y sont présentes, faisant de la réserve un lieu d'une grande importance pour la conservation du patrimoine naturel.



Figure 1 : Carte de présentation de la réserve naturelle de Nohèdes (Source : FRNC)

Le territoire de la réserve se situe à l'ouest du département (figure 1) et s'étend sur plus de 2 000 hectares. Une partie de la réserve occupe le versant sud-est du massif du Madres, tandis que l'autre se trouve sur le versant nord du Mont-Coronat. Le point culminant de la réserve est le Roc Nègre, à 2 459 mètres d'altitude. Cet espace naturel est également connecté à deux autres réserves naturelles nationales : celle de Conat, située à l'est, et celle de Jujols, au sud.

La structure possède trois objectifs principaux :

- Le suivi, la protection et l'étude de la biodiversité et du patrimoine naturel et culturel ;
- L'accueil, le partage et la communication avec le grand public ;
- La gestion du territoire en prenant en compte tous les acteurs comme les usagers.

Cet espace naturel est un lieu de cohabitation entre l'environnement et l'homme tout en désacralisant les suivis de biodiversité grâce à la communication et aux animations.

B. Le territoire d'étude

Le territoire d'étude couvre l'ensemble de la vallée du Caillan. Les réserves naturelles occupent plus de la moitié de la zone étudiée. Cette dernière s'étend sur plus de 3 000 hectares (figure 2).

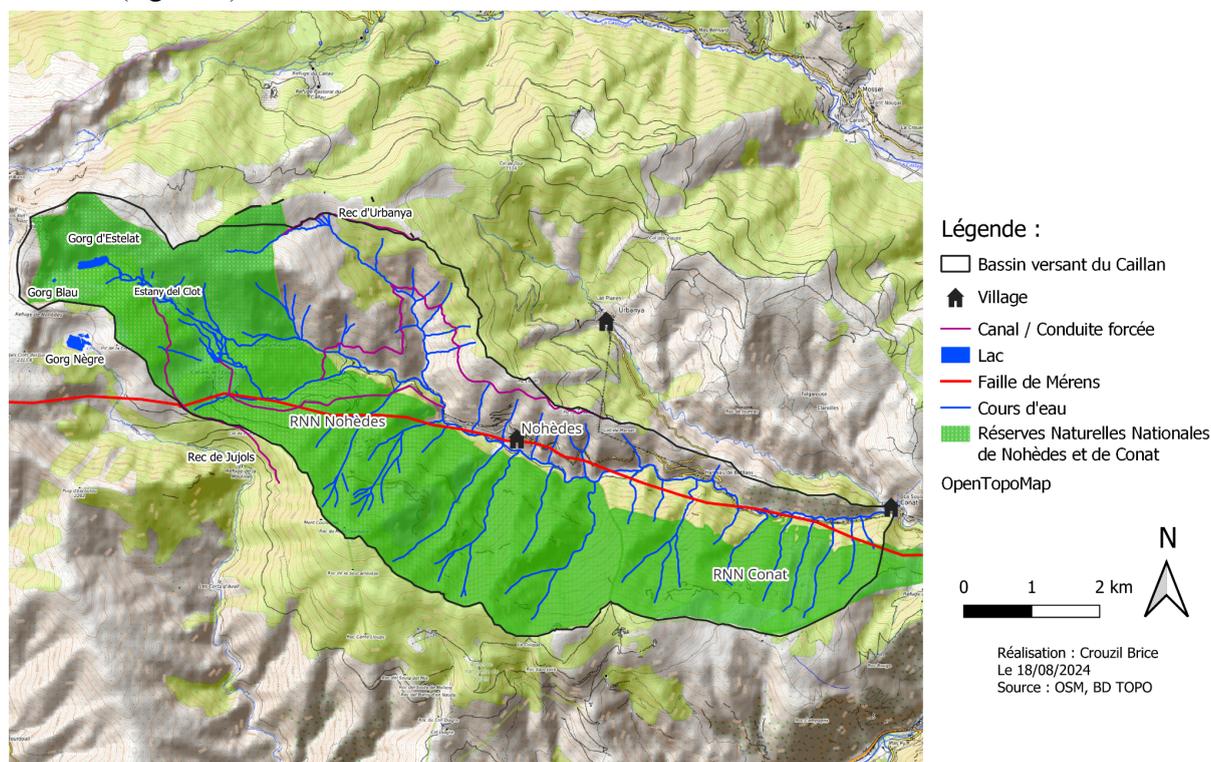


Figure 2 : Carte du territoire d'étude

Le bassin-versant du Caillan présente de nombreuses particularités, telles que le versant très pentu du Mont-Coronat, des formations glaciaires et une géologie complexe, marquée par la faille de Mérens. Les formations glaciaires se situent dans la partie amont du territoire d'étude et datent du Quaternaire. La figure 2 illustre le réseau hydrographique naturel ainsi que les conduites et canaux construits par les habitants et les entreprises. Il est important de noter que l'Estany del Clot est un lac artificiel créé pour la production d'électricité par une microcentrale hydroélectrique située à Nohèdes. Ce lac est géré par un répartiteur qui dévie une partie des eaux de la rivière. Un débit réservé de 50 l/s est maintenu. Le réseau hydrographique est constitué d'une rivière principale, le Caillan, alimentée par diverses sources et affluents. On trouve également des tourbières au niveau des lacs et des plateaux, notamment sur le Pla d'Amunt.

Le contexte géologique de la région est complexe et joue un rôle important dans l'évolution des débits du cours d'eau au fil des années. La faille de Mérens traverse la vallée d'ouest en est, séparant deux types de roches distinctes : du calcaire au sud, du granite à la tête du bassin-versant et du schiste sur le reste de la vallée (figure 3) (CUXAC, 2019). Le calcaire est une roche perméable, contrairement au granite et au schiste, qui sont imperméables. Ainsi, la partie calcaire du bassin-versant est poreuse, permettant à l'eau de s'y infiltrer, tandis que l'infiltration n'est pas présente dans les zones de granite et de schiste. Ce karst est bien connu, mais les cheminements de l'eau à l'intérieur restent mal compris. En conséquence, l'eau infiltrée peut ressurgir à des endroits comme Ria, Jujols ou Villefranche-de-Conflent, par exemple. L'eau qui s'infiltré dans le karst est considérée comme une perte pour le bassin-versant, car elle échappe au réseau de surface.

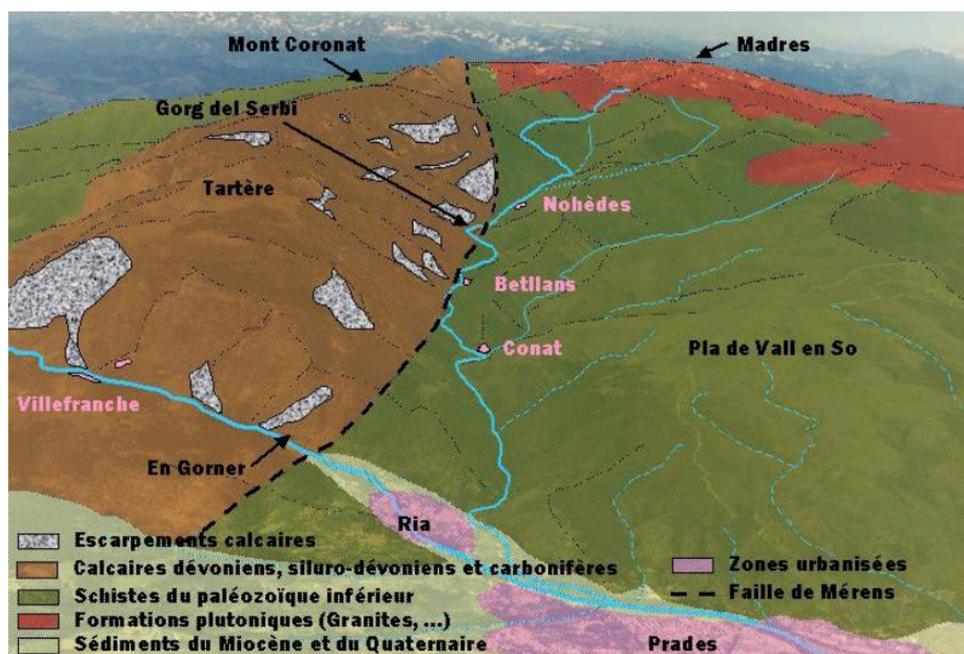


Figure 3 : Carte géologique du territoire d'étude

Le territoire d'étude se caractérise comme suit :

- À la tête du bassin-versant se trouvent des formations glaciaires, avec un cirque, des lacs et des tourbières, reposant sur une roche granitique pour les parties hautes et sur du schiste pour les parties plus basses.
- Le dernier lac en aval de la vallée est l'Estany del Clot, un lac artificiel créé pour la production d'hydroélectricité.
- Au-delà de ce lac, une vallée en V se forme, traversée en son centre par la faille de Mérens, qui sépare le karst au sud du schiste au nord. Avant d'atteindre le village de Nohèdes, on observe une confluence avec la rivière de Torrelles. Par la suite, la vallée alterne entre passages étroits, comme au pont de Betllans, et passages plus larges, comme entre Conat et le pont de Betllans. Le cours d'eau varie en fonction de ces passages, avec des gorges à Betllans et un lit plus large avant et après ce passage étroit.

C. Les missions demandées

Depuis 2009, l'étude hydrologique du bassin-versant de Nohèdes et de Conat est menée par des étudiants dans le cadre de stages. L'enchaînement de ces stages permet d'acquérir chaque année les données hydrologiques des stations limnimétriques. Ainsi, les stages contribuent à faire progresser les connaissances sur le fonctionnement complexe du Caillan.

Les missions confiées ont consisté à actualiser les données hydrologiques, à vérifier les stations limnimétriques et à les réparer si nécessaire, à évaluer les évolutions des débits et du climat, ainsi qu'à modéliser les futurs écoulements.

- L'actualisation des données hydrologiques permet d'affiner les courbes de tarage grâce à des jaugeages. Ces courbes de tarage servent à convertir les hauteurs d'eau enregistrées par les stations limnimétriques en débits, exprimés en m^3/s .
- La vérification des stations permet de s'assurer de leur bon fonctionnement. En cas de dysfonctionnement, une réparation doit être effectuée. La gestion des stations représente une tâche complexe, et le maintien des cinq stations pour la réserve devient de plus en plus difficile. Ainsi, la station de Torrelles a été supprimée en raison de son fonctionnement trop aléatoire pour fournir des données fiables et étudiables.
- L'évaluation des débits et du climat depuis le début des études permet d'observer les premières tendances d'augmentation ou de diminution des débits, des précipitations et des températures.

II- Matériel et méthode

Différentes méthodes et calculs sont nécessaires pour étudier l'hydrologie de la vallée de Nohèdes et de Conat. Cette section explique donc les différentes méthodes et calculs utilisés lors du stage pour obtenir les résultats. Les matériels et techniques employés seront également détaillés.

A- Suivi limnimétrique

Le suivi limnimétrique consiste à recueillir les données des différentes stations et à les remettre en marche si leur fonctionnement a cessé. Ces stations ont été installées de manière permanente entre 2011 et 2014 (CUXAC, 2019). Sur le territoire d'étude, cinq stations étaient présentes, dont celles du répartiteur (ou du Clot), de Torrelles de la Millada, de Betllans, et de Conat (figure 4).

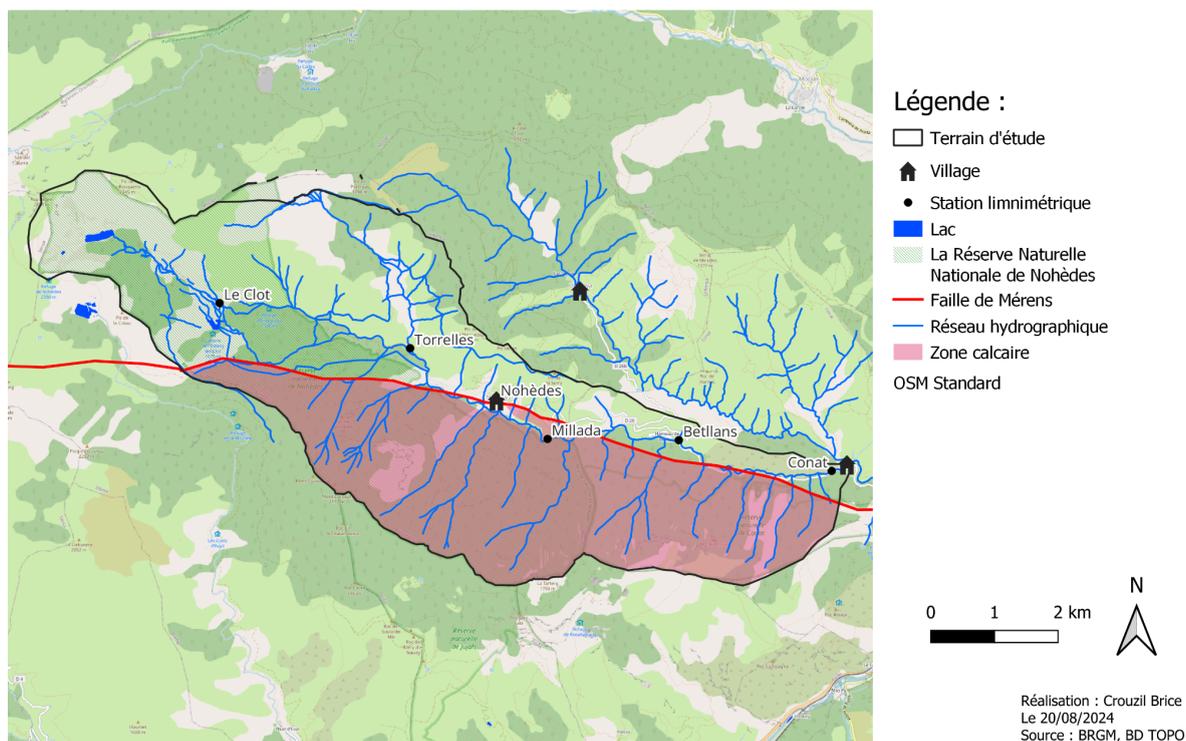


Figure 4 : Carte des stations limnimétriques du bassin-versant

Chaque station se compose d'une échelle limnimétrique et d'une sonde enregistreuse située à l'intérieur de l'échelle. La sonde utilisée est un modèle OTT Orpheus Mini (figure 5). Chaque station est programmée de manière spécifique afin d'enregistrer les données les plus précises possible. Cette programmation est réalisée lors de l'installation, en tenant compte de plusieurs critères, tels que la morphologie du cours d'eau et le positionnement de l'échelle.



Figure 5 : Photos de la station limnimétrique du Clot et d'une sonde OTT Orpheus Mini

Ces cinq stations enregistrent les hauteurs d'eau toutes les heures. La récupération des données s'effectue grâce à une interface infrarouge située en haut de chaque station. En connectant la sonde à un ordinateur équipé du logiciel Hydras 3, le transfert des données peut être effectué. Les données brutes récoltées incluent les dates, les heures et les valeurs des hauteurs d'eau en mètres. Cependant, ces informations doivent être vérifiées avant d'être utilisées. Les erreurs possibles peuvent provenir d'un dysfonctionnement de la sonde, du gel des sondes ou de la présence d'un embâcle. Ces problèmes sont résolus lors des inspections sur le terrain par les techniciens de la réserve.

L'un des objectifs de ce stage était de réduire le nombre de stations sans affecter l'étude hydrologique. Certaines stations rencontrent des problèmes de fonctionnement, comme celles de Torrelles et de Betllans. La station de Torrelles a été retirée afin de réparer celle de Betllans. À ce jour, c'est la seule station supprimée. Dans les années à venir, d'autres stations pourraient être supprimées, comme celle de Conat, car la différence de débit entre Betllans et Conat n'est pas significative. Cette suppression des stations est réalisée, car leur entretien demande du temps que le personnel de la réserve ne peut plus consacrer.

Les interventions réalisées sur les stations limnimétriques durant le stage ont consisté à retirer la sonde de Torrelles en prenant les dernières données, à remplacer les piles des stations de Betllans, de la Millada et du Clot, et à réparer la sonde de Betllans. Le changement des piles a eu lieu sur toutes les stations, à l'exception de celles de Torrelles et de Conat. La sonde de Betllans présentait plusieurs problèmes, notamment une date et une heure incorrectes, une interface infrarouge cassée et des piles vides. En 2018, cette sonde s'était arrêtée et Monsieur CUXAC l'avait remise en état. Cependant, la date et l'heure n'étaient toujours pas à jour.

Grâce au logiciel Hydras 3, j'ai actualisé la sonde et corrigé toutes les données depuis l'incident de 2018.

La seconde intervention a concerné la tête de la sonde, là où se trouve l'interface infrarouge. Cette interface s'étant cassée, il a fallu dévisser la partie endommagée et la remplacer par la tête de la station de Torrelles. Une fois la réparation effectuée, la hauteur d'eau a été corrigée et les piles ont été remplacées.

B- Jaugeage et courbe de tarage

Une fois que les hauteurs d'eau récoltées sont vérifiées, elles peuvent être transformées en débits. Pour effectuer cette transformation, il est nécessaire de créer une courbe de tarage dans les logiciels hydrologiques à partir de jaugeages. Ces jaugeages permettent de déterminer le débit à un moment précis en fonction de la hauteur d'eau mesurée grâce à la lecture de l'échelle limnimétrique. Plusieurs techniques de jaugeage existent, telles que le jaugeage au moulinet, utilisé au début des études jusqu'en 2015 (ROCHETEAU, 2017), et le jaugeage au sel, employé depuis 2016.

Le principe de ce jaugeage consiste à insérer une certaine quantité de sel dilué dans la rivière pour mesurer en aval la conductivité de l'eau. Le sel augmente la conductivité de l'eau (CUXAC, 2019). Ainsi, la quantité de sel utilisée dépend de la quantité d'eau présente dans la rivière. Certaines caractéristiques du cours d'eau sont nécessaires pour que le jaugeage au sel soit de qualité. En effet, il faut insérer une solution complètement diluée, choisir un tronçon entre la zone d'injection et le conductimètre d'une longueur d'environ 25 fois supérieure à la largeur du cours d'eau, sans zone d'eau morte ou vasque trop importante, et veiller à ce que la zone de prise de mesure soit sans agitation excessive pour assurer la stabilisation de la conductivité (CUXAC, 2019). Selon le débit et le tronçon choisi, la prise de mesure peut être plus ou moins longue. La mesure réalisée par le conductimètre, associée à un fichier Excel adapté, permet de calculer le débit du cours d'eau. Ainsi, il faut transférer les données brutes de l'appareil sur un tableur Excel ou LibreOffice. Parmi ces données, seules les colonnes des heures et de la conductivité sont pertinentes. Après avoir préparé les données, on peut insérer les valeurs brutes dans le tableur, en plaçant les heures dans la colonne correspondante et la conductivité dans la colonne appropriée (figure 6). Ensuite, il faut renseigner les différentes caractéristiques de la journée, telles que la date, le nom du cours d'eau, le lieu du jaugeage, la température de l'eau, la distance d'injection, la hauteur d'eau et la quantité de sel. Une fois toutes les informations saisies dans le tableur, celui-ci fournit le débit de la rivière en L/s (figure 6). De plus, il génère un graphique représentant la conductance enregistrée lors de la prise de mesures avec le conductimètre. La courbe obtenue doit être la plus stable possible pour considérer que le jaugeage est fiable (figure 6).

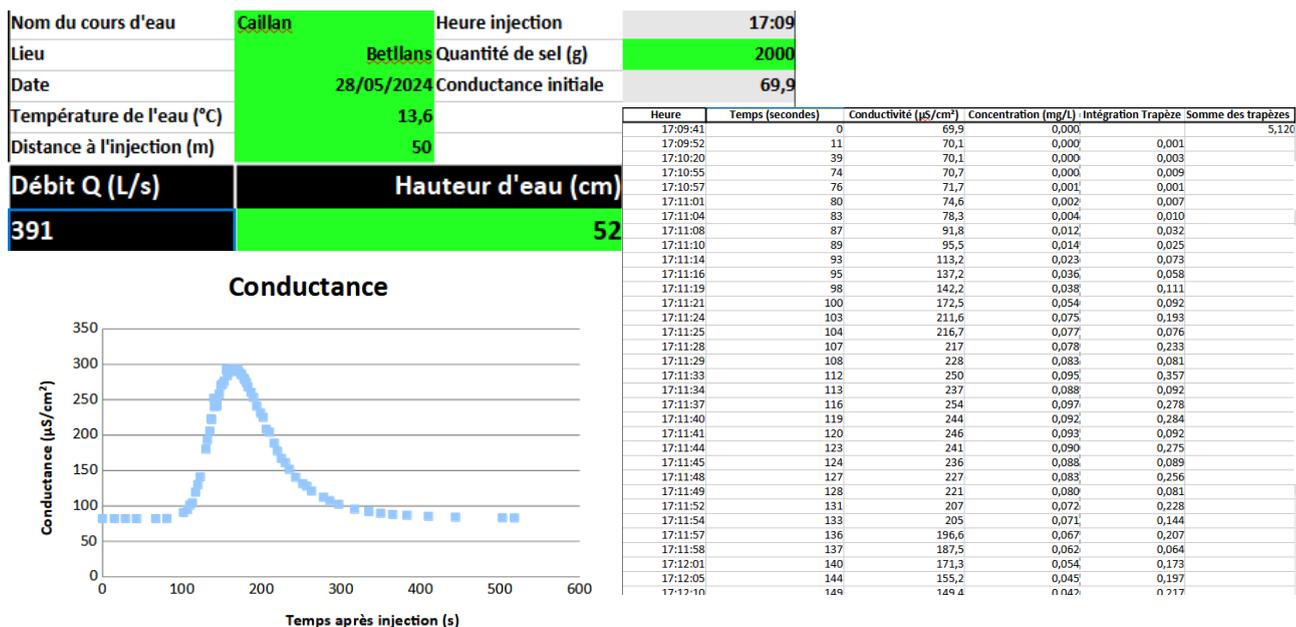


Figure 6 : Photos du fichier d'obtention des débits

Ces jaugeages permettent de créer et de compléter les différentes courbes de tarage. Il existe une courbe de tarage par station. La construction de la courbe de tarage se fait à l'aide de logiciels spécialisés tels que Hydraccess et BaRatin.

Le logiciel Hydraccess est utilisé depuis 2009, au début des études. Il contient toutes les données transformées de 2009 à 2024. Il permet de construire les courbes de tarage grâce au module CALIBRA. Pour chaque station, ce module a besoin de connaître les caractéristiques physiques du cours d'eau, informations qui ont été saisies lors de l'installation des stations. Les jaugeages effectués permettent de déterminer la hauteur d'eau correspondant à un débit. Ainsi, avec plusieurs jaugeages, le module CALIBRA peut extrapoler une courbe de tarage entre les différents points mesurés, mais aussi pour des hauteurs d'eau inférieures et supérieures (figure 7).

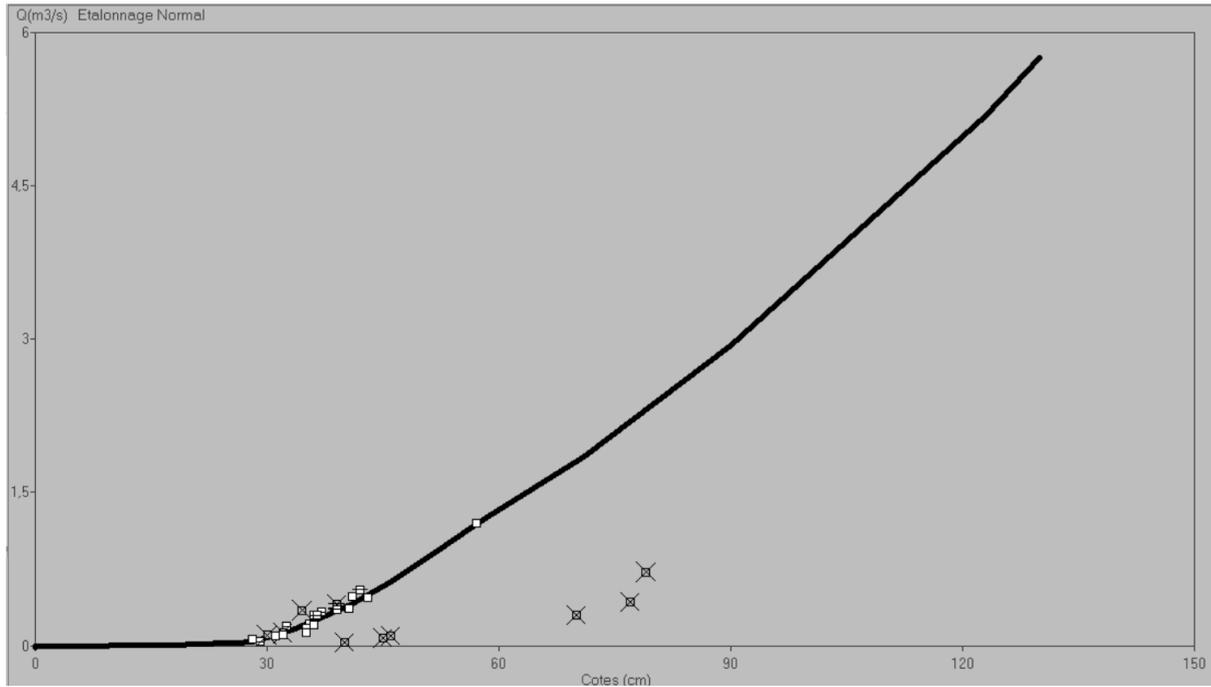


Figure 7 : Courbe de tarage de Betllans avec les points de jaugeages sur Hydraccess

Toutefois, ce logiciel devient vétuste et j'ai introduit un nouveau logiciel développé par l'INRAE, nommé BaRatin. Ce logiciel a été mis en place en réponse à la tempête Gloria de 2020, qui a modifié le lit du Caillan, notamment à Betllans. Le lit ayant changé, les caractéristiques physiques saisies dans Hydraccess ne sont plus valides. J'ai donc mis en place, pour la station de Betllans uniquement, une courbe de tarage réalisée avec BaRatin, avec la précieuse aide de Monsieur Le Coz (figure 8).

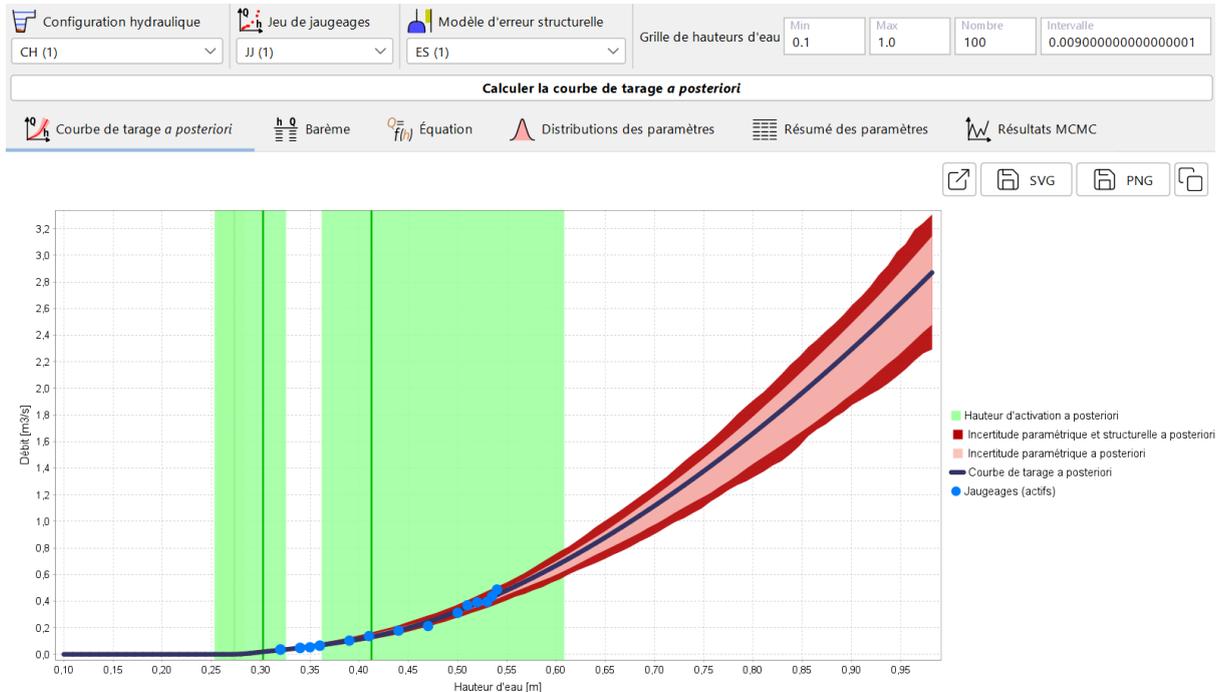


Figure 8 : Courbe de tarage de Betllans réalisée sur BaRatin

La différence notable entre les deux logiciels réside dans la gestion de l'incertitude. Cette incertitude permet d'obtenir plusieurs débits possibles, créant ainsi une fourchette plus ou moins précise. Elle est liée aux diverses mesures prises sur la rivière, qu'il s'agisse des jaugeages ou des mesures physiques du cours d'eau. Grâce à ce logiciel, il a été possible de transformer les hauteurs d'eau entre 2020 et 2024, après l'épisode de Gloria. Ces deux logiciels ont permis de traduire toutes les hauteurs d'eau accumulées depuis le dernier stage de 2019. En comparant les résultats autour de la tempête Gloria, on constate qu'Hydraccess donne un pic de crue à 10,46 m³/s le 23 janvier 2020 à 9h, tandis que BaRatin fournit plusieurs valeurs, allant de 9,78 m³/s pour l'estimation la plus basse à 14,75 m³/s pour l'estimation la plus haute. L'estimation la plus basse et la plus élevée sont liées à l'incertitude paramétrique et structurelle a posteriori, représentée en rouge sur la figure 8. La seconde estimation, l'incertitude paramétrique à posteriori, fournit une fourchette de débits allant de 10,47 m³/s à 14,03 m³/s. La courbe de tarage estime un débit de 12,43 m³/s. La différence entre les deux logiciels pour cet événement est significative. Hydraccess donne une estimation basse du débit en raison du changement du lit, tandis que BaRatin estime plusieurs débits, offrant ainsi une fourchette claire.

C- Traitement des données

La transformation des données brutes en débits, grâce aux différents logiciels, permet de les traiter de manière approfondie. Après avoir regroupé toutes les données depuis le début des études, il a été possible de comparer les différentes années, mois, et d'analyser l'évolution dans le temps. Ce travail statistique a été réalisé non seulement sur les débits, mais aussi sur la température de l'eau et de l'air, ainsi que sur les précipitations.

Pour ces quatre variables, les traitements sont similaires. Toutes les données sont regroupées dans un seul fichier, classé par année civile, avec une feuille supplémentaire pour effectuer les différents calculs. Voici les calculs réalisés :

- **Une moyenne par mois** : Les données étant disponibles à l'heure ou au jour, une moyenne mensuelle a été calculée.
- **Une moyenne par an** : Une moyenne annuelle a été calculée et illustrée par un diagramme, accompagné d'une courbe de tendance.
- **Une moyenne générale par mois** : Cette moyenne représente le régime hydrologique des débits pour chaque mois.
- **Une classification par mois** : Un diagramme a été élaboré pour montrer l'évolution des débits mensuels, accompagné de la courbe de tendance.
- **Le calcul de la différence en pourcentage** : La différence, exprimée en pourcentage, a été calculée pour chaque mois entre deux périodes de temps choisies. Chaque mois est représenté par la moyenne de la période, et en comparant les deux moyennes, la différence peut être démontrée. Un diagramme a ensuite été créé pour illustrer la tendance d'évolution en pourcentage pour chaque mois.

Ces calculs sont réalisés pour les différentes données. Cependant, certaines variables nécessitent un traitement spécifique, comme pour les précipitations. Plutôt que de calculer une moyenne mensuelle, il a été nécessaire de faire la somme des précipitations par mois, puis de traiter cette donnée de la même manière que les autres.

Le calcul du bilan hydrique est le suivant :

$$P = E_c + (ETR) + \Delta R$$

Avec :

P : la lame d'eau précipitée (mm)

E_c : la lame d'eau écoulée

ETR : l'évapotranspiration

ΔR : les pertes souterraines

Ce calcul permet de connaître la quantité d'eau qui entre dans le bassin-versant et ce qui en ressort. Par conséquent, **P** représente la lame d'eau précipitée, soit toute l'eau entrant dans le bassin-versant. **E_c** correspond au débit présent à l'exutoire du bassin-versant. **ETR** désigne l'évapotranspiration réelle, qui regroupe l'évaporation et la transpiration de la flore. **ΔR** représente les pertes souterraines, autrement dit les infiltrations. Ce calcul permet ainsi de savoir si le rapport entre l'eau entrant dans le bassin-versant et celle qui en sort est équilibré. Si le calcul donne un résultat négatif, c'est-à-dire si la somme des trois facteurs (**E_c**, **ETR** et **ΔR**) est supérieure à la lame d'eau précipitée, cela signifie que le bassin-versant est en perte hydrique sur la période prise en compte par le calcul. Cette perte d'eau est préoccupante car elle indique que le bassin-versant est en train de s'assécher.

Le calcul de l'ETR, l'évapotranspiration réelle est le suivant :

$$ETR = \frac{P}{\left(\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}\right)}$$

Avec :

P : La pluie annuelle moyenne annuelle (en mm/an)

L = 300 + 25 * T + 0,05 * T³

T : La température moyenne (°C)

Cette formule est appelée la formule de Turc (CUXAC, 2019). Elle est considérée comme la méthode la plus appropriée, par rapport à la formule de Thornthwaite, car elle est utilisée depuis le début des études hydrologiques sur ce bassin-versant. L'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la transpiration de la flore et du milieu. Elle dépend principalement de la température : lorsque cette dernière augmente, l'évapotranspiration réelle devient plus importante. Pour réaliser un bilan hydrique, le calcul de l'ETR est crucial car il représente

une perte d'eau pour le bassin-versant. En effet, l'ETR prend en compte l'évaporation et la transpiration, deux processus qui contribuent au départ de l'eau du bassin-versant.

De plus, pour compléter l'analyse des données sur les débits, il paraît pertinent de comparer l'évolution du bassin-versant de Nohèdes avec celle d'autres cours d'eau, afin de replacer la dynamique de la vallée dans un contexte plus large. Cette comparaison se base sur les stations du répartiteur (le Clot) et de Betllans, situées respectivement à une altitude de 1 690 m pour le Clot et de 639 m pour Betllans (CUXAC, 2019). Les stations sélectionnées pour la comparaison sont à des altitudes similaires, bien qu'elles ne se trouvent pas toutes dans le département des Pyrénées-Orientales. La première station se situe à 1 340 m, dans la rivière de l'Angoustrine, en aval de la commune d'Angoustrine-Villeneuve-des-Escalades. La seconde station est localisée dans les Hautes-Pyrénées, à Arreau. Dans cette commune, une confluence entre la Neste du Louron et la Neste d'Aure se trouve, et la station est installée en amont de cette confluence, sur la Neste du Louron, à environ 700 m d'altitude. Le climat de cette dernière station diffère de celui des autres stations, mais la comparaison entre la Neste du Louron et le Caillan permet d'étudier les dynamiques distinctes de ces rivières. Ce choix est également justifié par la disponibilité de données à des altitudes proches. En effet, lors de la recherche pour comparer les données, il s'est avéré que de nombreuses stations à des altitudes similaires manquent de données fiables.

Ce travail sur les données est complété par une recherche bibliographique portant sur plusieurs thématiques, telles que le changement climatique et les différents scénarios possibles, l'impact du changement climatique sur les Pyrénées, ainsi que le devenir des cours d'eau pyrénéens.

III- Résultats

Les résultats sont organisés en trois parties : la climatologie dans une première section, l'hydrologie du cours d'eau dans une seconde, et enfin les perspectives liées au changement climatique dans la dernière partie. Le premier axe présente les données climatiques du bassin-versant. Le second axe détaillera les résultats obtenus sur les courbes de tarage, avec une comparaison des logiciels utilisés, ainsi que l'évolution des débits et des tendances observées, avant de conclure sur l'évolution des températures de l'eau. Le dernier axe sera dédié aux perspectives, en se concentrant sur l'impact du changement climatique sur le bassin-versant.

A- Climatologie

1- La pluviométrie et l'évapotranspiration

À Nohèdes, les enregistrements des précipitations ont débuté en 1955. Ces données sont principalement classées par mois, à l'exception des années récentes, de 2010 à 2018, où elles sont enregistrées à l'échelle horaire. Bien que toutes les données proviennent de la même station, elles couvrent des périodes avec des résolutions temporelles différentes. De 1955 à 2004, les précipitations moyennes étaient les suivantes (figure 9) :

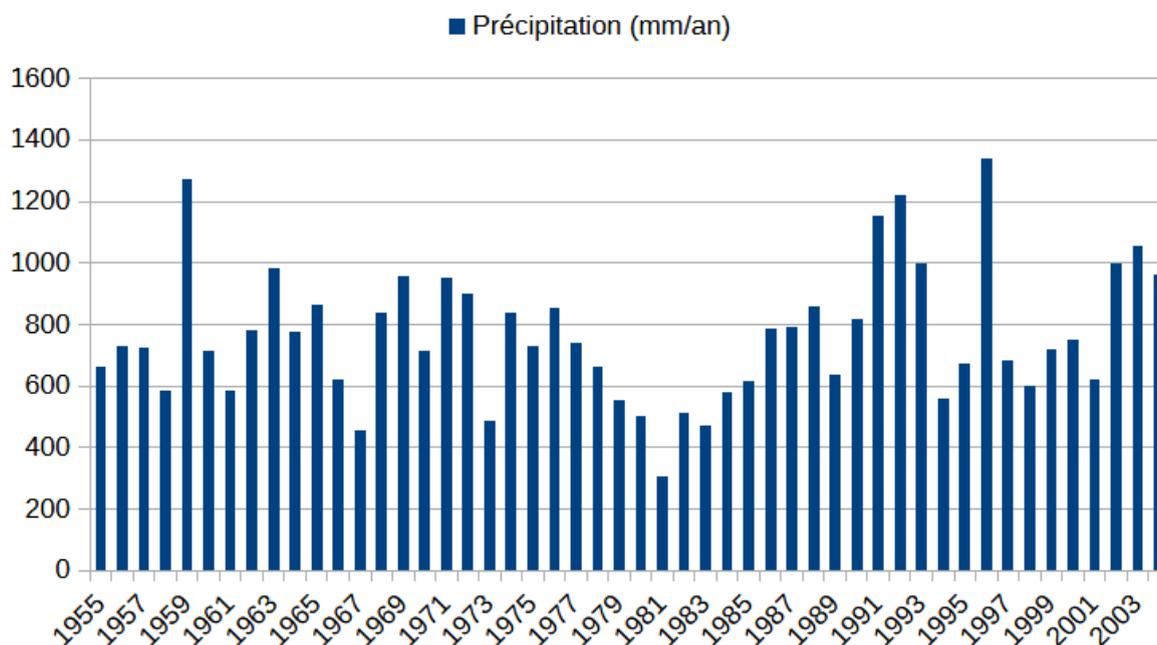


Figure 9 : Graphique des précipitations moyennes mensuelles de 1955 à 2004 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

En moyenne, la pluviométrie à Nohèdes entre 1955 et 2004 est de 763 mm/an. Toutefois, cette donnée présente un biais majeur, en particulier en 1983, lié à un changement de positionnement de la station météorologique. La station a été déplacée de la centrale hydroélectrique à la maison de la réserve (DUCROIX, 2009). Une année notable est 1981, qui apparaît exceptionnellement sèche avec moins de 400 mm/an, en raison d'un manque de données. Ce problème s'est aussi manifesté sur les trois années suivantes, rendant les données de 1981 à 1984 non exploitables (DUCROIX, 2009). En séparant la période pluviométrique en deux, de 1955 à 1980 et de 1985 à 2005, on obtient respectivement des moyennes de 749 mm/an pour la première période et de 842 mm/an pour la seconde. Cette augmentation de la pluviométrie peut être expliquée par les valeurs minimales et maximales. En effet, les années avec des précipitations faibles restent proches des 600 mm/an, tandis que les années à forte pluviométrie se sont multipliées au fil du temps. Aucune donnée pluviométrique n'est disponible pour la période entre 2005 et 2010.

De 2010 à 2024, les données météorologiques sont partagées entre EDF et la réserve, dans le cadre d'une convention. Grâce à cette collaboration, les données ont été actualisées pour la période de 2020 à 2024. La figure 10 présente la pluviométrie observée sur ces 14 dernières années.

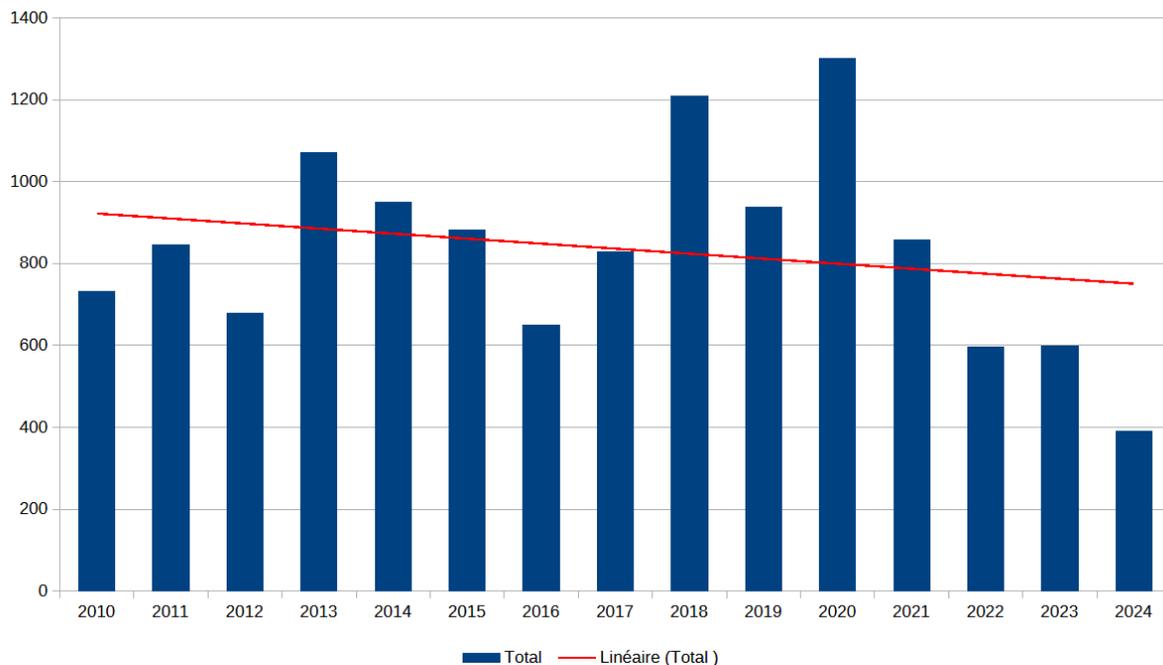


Figure 10 : Graphique des précipitations moyennes annuelles de 2010 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Sur la période 2010-2024, la moyenne des précipitations à Nohèdes est de 837 mm/an. Les années 2013, 2018 et 2020 se démarquent, notamment 2020, qui a connu deux événements climatiques majeurs : la tempête Gloria en janvier et un épisode méditerranéen en avril. La tempête Gloria constitue un phénomène clé pour l'étude des débits. Malgré ces événements exceptionnels, la courbe de tendance montre une diminution des précipitations, même après l'exclusion de l'année 2024, encore incomplète. Les années 2022 et 2023 sont les plus sèches. Lors du calcul de l'évapotranspiration réelle sur Nohèdes, cette tendance de sécheresse se confirme avec des pics d'évapotranspiration pendant ces années, comme l'illustre la figure 11.

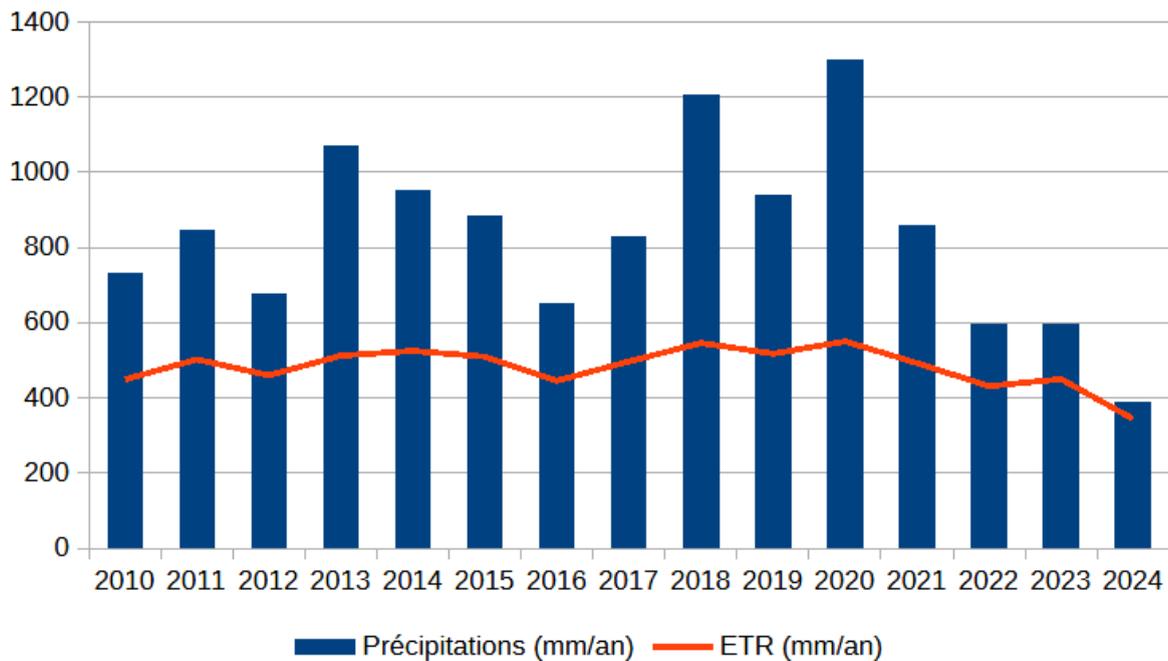


Figure 11 : Graphique de l'évapotranspiration réelle moyenne sur Nohèdes depuis 2010 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Les années 2022 et 2023 ont enregistré un total de précipitations inférieur à 600 mm, avec un ETR d'environ 440 mm. Cela signifie que plus de 70 % des précipitations ont été évaporées par la végétation. Cette combinaison de faibles précipitations et d'un ETR élevé accentue la pression sur la ressource hydrique, en la réduisant. Ce phénomène est un facteur clé à surveiller pour la gestion de la réserve dans les années à venir.

2- La température et le modèle Aurelhy

La pluviométrie dans la vallée est de type océanique à influence méditerranéenne, avec des pics de précipitations en avril, mai, et entre octobre et décembre. Les périodes les plus sèches se situent de février à mars et de juillet à septembre (SERVIÈRE, 2010). Le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) dépend non seulement des précipitations, mais aussi des températures. Les enregistrements de température ont débuté en 1958 et se poursuivent jusqu'à 2024, avec un biais similaire à celui observé pour la pluviométrie entre 1981 et 1984 en raison d'un changement de position et d'un manque de données.

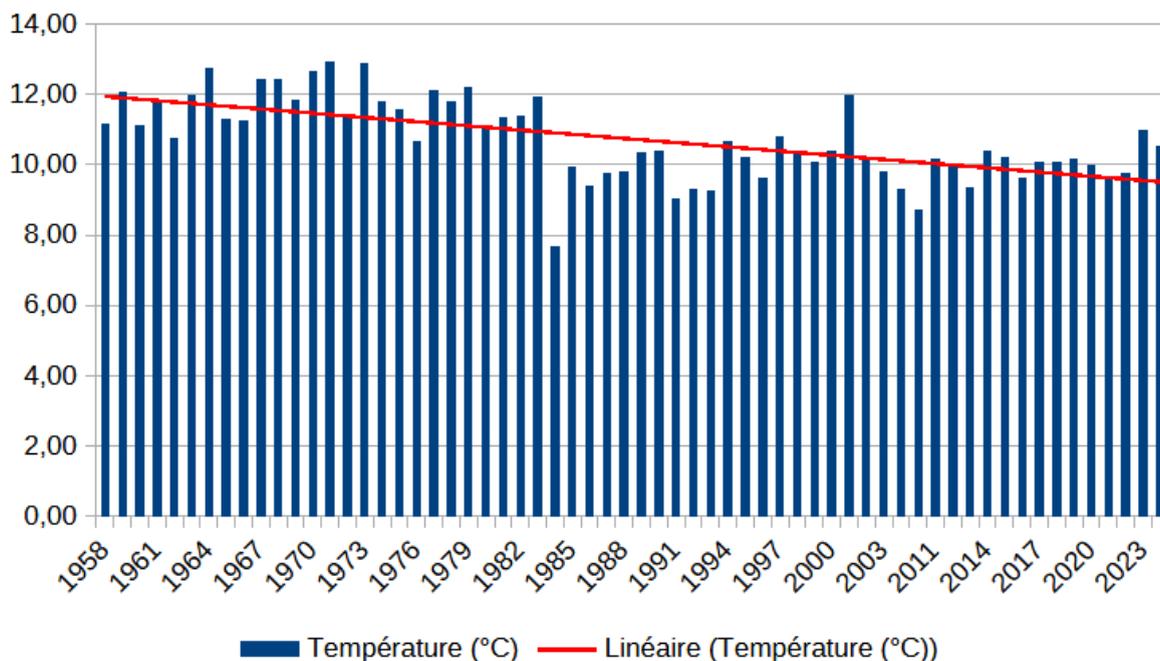


Figure 12 : Graphique des températures moyennes annuelles et la courbe de tendance à Nohèdes de 1958 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Le graphique présente l'évolution de la température moyenne sur la période étudiée. De 1958 à 1980, la température moyenne était de 11,8°C, tandis que de 1984 à 2006, elle a chuté à 10,1°C. Cette baisse pourrait être attribuée au changement de localisation du pluviomètre. En effet, l'année 1983 présente une température moyenne de 11,93°C, tandis qu'en 1984, elle chute à 7,67°C en raison du manque de données, influençant ainsi la moyenne. Cependant, cette évolution est également reflétée dans un diagnostic de vulnérabilité réalisé par Life Natur'Adapt et la FRNC, qui examine les réserves naturelles de Nohèdes, Conat, et Jujols. Ce rapport indique une baisse de 0,58°C dans la température du massif du Madres-Coronat, contrairement à une hausse de 1,5°C observée dans la réserve naturelle de la Forêt de la Massane (QUELENNEC, 2022).

Pour la période plus récente, de 2010 à 2024, la tendance des températures présente une inversion par rapport à la tendance générale observée antérieurement (figure 13).

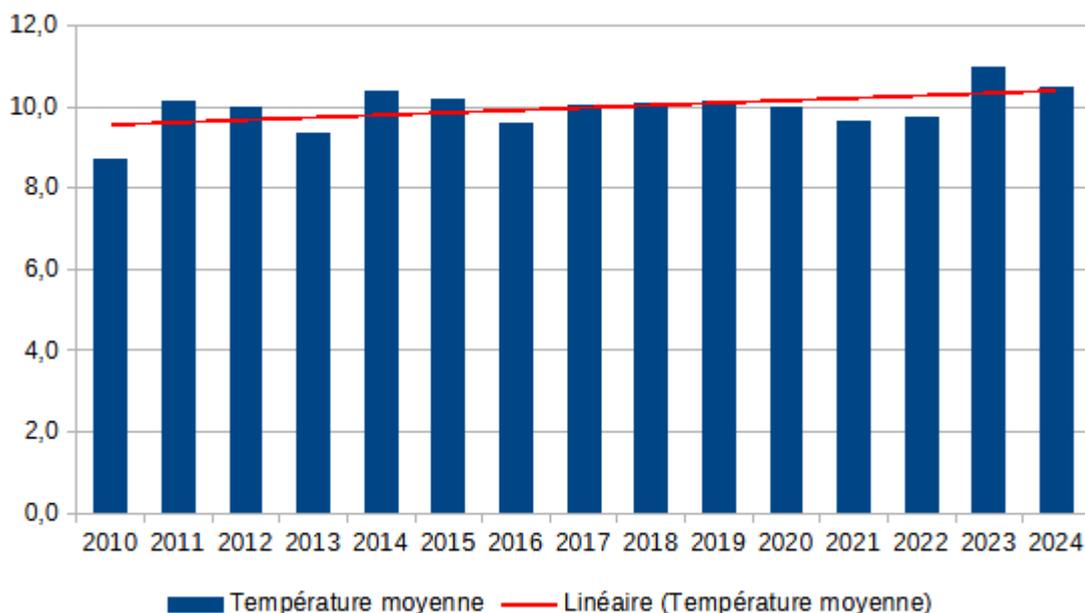


Figure 13 : Graphique des températures moyennes à Nohèdes de 2010 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Le graphique montre que, sur la dernière décennie, la température moyenne est en hausse, avec un pic notable en 2023. Cette augmentation pourrait être liée à un temps plus court, mais il est également important de noter que l'année 2019 a été la plus froide depuis plus de 20 ans, tandis que les deux années suivantes ont enregistré des moyennes supérieures à 10°C. Cette tendance reste à confirmer avec les années à venir.

Depuis 2019, un modèle pluviométrique, appelé Aurelhy, a été mis en place par Météo France pour estimer les pluies brutes en fonction des altitudes (figure 14) (CUXAC, 2019).

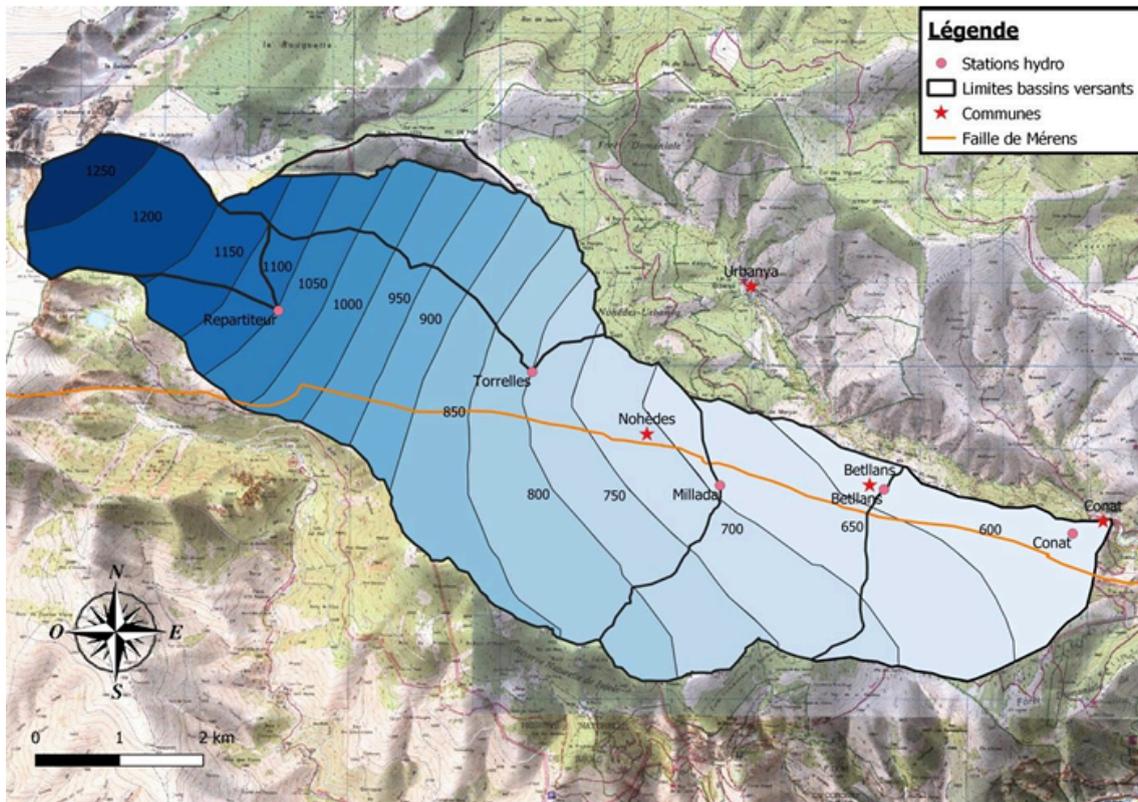


Figure 14 : Carte du modèle Aurelhy (Réalisation : CUXAC, 2019)

Le modèle Aurelhy permet d'estimer la répartition de la pluviométrie sur le territoire d'étude. Cependant, il présente certaines faiblesses, notamment une sous-estimation des précipitations sur la tête du bassin-versant (QUELENNEC, 2022). Pour améliorer la précision de ces estimations, ce modèle peut être complété par les données fournies par des stations météorologiques.

3- Les diagrammes ombrothermiques

La combinaison des données de précipitations et de température permet de créer des diagrammes ombrothermiques. Ces diagrammes sont construits en suivant la formule $P = 2T$, où l'axe vertical gauche représente les précipitations, et l'axe vertical droit représente les températures. Ce diagramme permet de comparer les précipitations moyennes mensuelles aux températures moyennes mensuelles. Le diagramme présenté ci-dessous reprend les données de 1958 à 2004 pour les précipitations et les températures (figure 15).

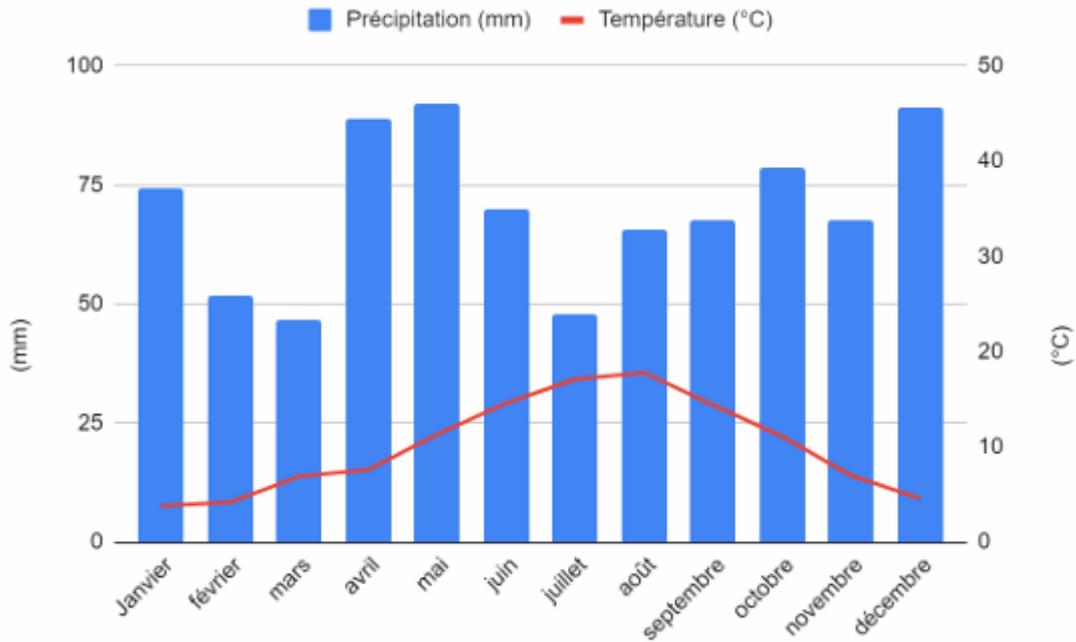


Figure 15 : Diagramme ombrothermique de 1958 à 2004 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Le climat de Nohèdes présente un caractère océanique avec une influence méditerranéenne. Aucun mois sec n'est enregistré au cours des années. Le graphique permet d'obtenir une vision générale du climat de Nohèdes, et en tenant compte de l'augmentation des températures entre 2010 et 2024, un diagramme ombrothermique sur cette période offre une comparaison avec celui du graphique précédent. Cela permettrait d'observer les évolutions climatiques au fil du temps. Le second diagramme présente les données collectées depuis 2010 jusqu'à aujourd'hui (figure 16).

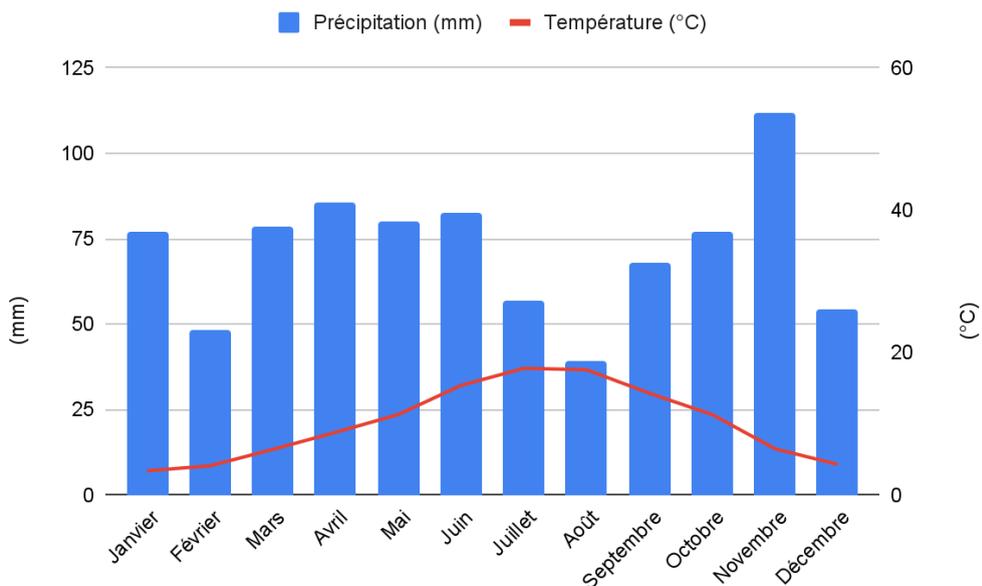


Figure 16 : Diagramme ombrothermique de 2010 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

L'analyse des diagrammes ombrothermiques montre une évolution marquée du climat à Nohèdes, avec un rapprochement entre les courbes de température et de précipitations durant les mois estivaux. En effet, bien que le mois de juillet ait été historiquement le plus sec, la tendance s'inverse en 2010-2018, avec un août plus sec. Ce phénomène suggère qu'une hausse des températures pourrait entraîner des sécheresses plus graves dans les années à venir. En outre, la répartition des précipitations montre une évolution du climat, avec des mois traditionnellement secs (comme février, mars, août et septembre) devenant plus secs, tandis que les mois pluvieux (principalement au printemps et en automne) deviennent plus marqués. Cette modification dans la distribution des précipitations témoigne d'un changement climatique significatif.

Cependant, les données recueillies sont biaisées, notamment en raison du changement de localisation des stations météorologiques dans les années 1980. Pour pallier ce problème, l'installation de nouvelles stations sur la réserve de Nohèdes et la réserve de Conat s'avère essentielle. Ces stations permettraient d'obtenir des données plus précises et fiables, facilitant ainsi l'amélioration du modèle Aurelhy et la réalisation d'études hydrologiques plus rigoureuses pour mieux comprendre les dynamiques climatiques et hydrologiques de la vallée.

4- L'évolution du manteau neigeux dans les Pyrénées

Après avoir analysé les dynamiques des précipitations, des températures, de l'ETR et des diagrammes ombrothermiques, il est pertinent de se tourner vers une étude récente qui traite de l'évolution du manteau neigeux dans les Pyrénées. Publiée en 2020, l'étude intitulée *Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees* présente les tendances à long terme concernant la durée et l'épaisseur du manteau neigeux dans les Pyrénées. Les auteurs de l'étude ont observé les évolutions de la neige à deux altitudes spécifiques (1 500 m et 2 100 m) pendant la période de décembre à avril, couvrant ainsi un large échantillon de données allant de 1958 à 2017. Cette étude met en lumière les changements dans le manteau neigeux au fil des décennies.

Pour l'année 2024, les techniciens et le conservateur ont souligné l'absence notable de neige par rapport aux années précédentes. En effet, les chutes de neige ont été particulièrement faibles cette année, ce qui a conduit à une période des hautes eaux moins marquée. Ce phénomène reflète des tendances observées dans le cadre de l'étude mentionnée, où l'évolution du manteau neigeux semble indiquer une réduction de sa durée et de son épaisseur, possiblement exacerbée par les changements climatiques.

Massif	Average values				Kendall-Tau and classified group							
	Dur. 1500	Dur. 2100	Depth 1500	Depth 2100	Dur. 1500	PC	Dur. 2100	PC	Depth 1500	PC	Depth 2100	PC
Pays Basque	106	150	0.31	1.70	-0.42	1	-0.10	1	-0.38	1	-0.33	1
Aspe-Ossau	134	150	0.37	1.71	-0.27	1	-0.17	1	-0.22	1	-0.23	1
Hte. Bigorre	122	148	0.18	0.93	-0.15	1	-0.18	1	-0.10	1	-0.20	1
Aure-Louron	112	148	0.19	0.93	-0.21	1	-0.15	1	-0.19	1	-0.28	1
Luchonnais	116	148	0.23	1.03	-0.22	1	-0.17	1	-0.18	1	-0.26	1
Couserans	126	148	0.25	1.11	-0.19	1	-0.17	3	-0.08	1	-0.11	3
Aran	99	146	0.17	0.84	-0.09	1	-0.16	3	0.07	2	-0.17	1
Hte. Ariege	122	146	0.20	0.91	-0.15	2	-0.21	2	-0.14	2	-0.18	3
Andorre	66	126	0.04	0.31	0.01	1	-0.23	3	0.06	1	-0.25	3
Orlu-StBarthe	118	146	0.19	0.94	-0.10	2	-0.23	2	-0.09	2	-0.21	2
Capcir-Puymorens	67	127	0.06	0.36	-0.02	2	-0.18	2	0.00	3	-0.18	2
Cerdagne	85	120	0.05	0.40	-0.18	2	-0.13	4	0.17	3	-0.01	2
Navarra	108	149	0.31	1.72	-0.31	1	-0.21	1	-0.18	1	-0.19	3
Jacetania	109	149	0.22	1.44	-0.17	1	-0.13	4	-0.11	1	-0.20	3
Gállego	120	148	0.24	1.40	-0.10	1	-0.08	4	0.00	1	-0.15	3
Sobrarbe	127	147	0.18	1.09	-0.06	1	-0.02	4	0.06	1	0.03	3
Ésera	96	147	0.17	0.94	-0.11	1	-0.18	3	-0.03	1	-0.14	3
Ribagorza	85	146	0.16	0.89	-0.11	2	-0.14	3	0.01	2	-0.17	2
Pallaresa	100	139	0.09	0.50	-0.13	2	-0.11	2	0.17	2	-0.02	2
Perafita	60	125	0.05	0.35	-0.01	2	-0.31	2	0.02	3	-0.25	2
Teruel-Frese	48	123	0.06	0.40	0.18	2	-0.06	2	0.17	2	0.09	2
Cadi-Moixero	52	126	0.05	0.39	0.17	2	-0.22	2	0.11	3	-0.11	2
Prepirene	75	130	0.07	0.48	0.08	2	-0.21	4	0.04	3	-0.10	3

Figure 17 : Tableau de la durée moyenne et de l'épaisseur du manteau neigeux dans les Pyrénées (Source : Lopez Moreno *et al*, 2020)

Ce tableau (figure 17) présente les moyennes sur la durée et l'épaisseur du manteau neigeux à 1 500 m et 2 100 m d'altitude. La seconde colonne indique les tendances statistiques, calculées grâce au test de Tau-Kendall, et les valeurs significatives sont mises en gras. Pour notre étude sur le bassin-versant du Caillan, les stations les plus proches, le

Capcir-Puymorens et la Cerdagne, sont surlignées en jaune. Il ressort que pour le Capcir, les valeurs significatives se trouvent à 2 100 m d'altitude, tant pour la durée que pour l'épaisseur du manteau neigeux. Cela suggère que la durée et l'épaisseur de la neige ont diminué de manière significative à cette altitude. En revanche, pour la Cerdagne, c'est à une altitude de 1 500 m que les valeurs sont significatives. On observe une augmentation de l'épaisseur de la neige à 1 500 m, bien que la durée du manteau neigeux ait diminué. Cependant, malgré ces particularités, la tendance générale sur les deux stations reste à la baisse pour ces deux paramètres, comme le montre la figure 18.

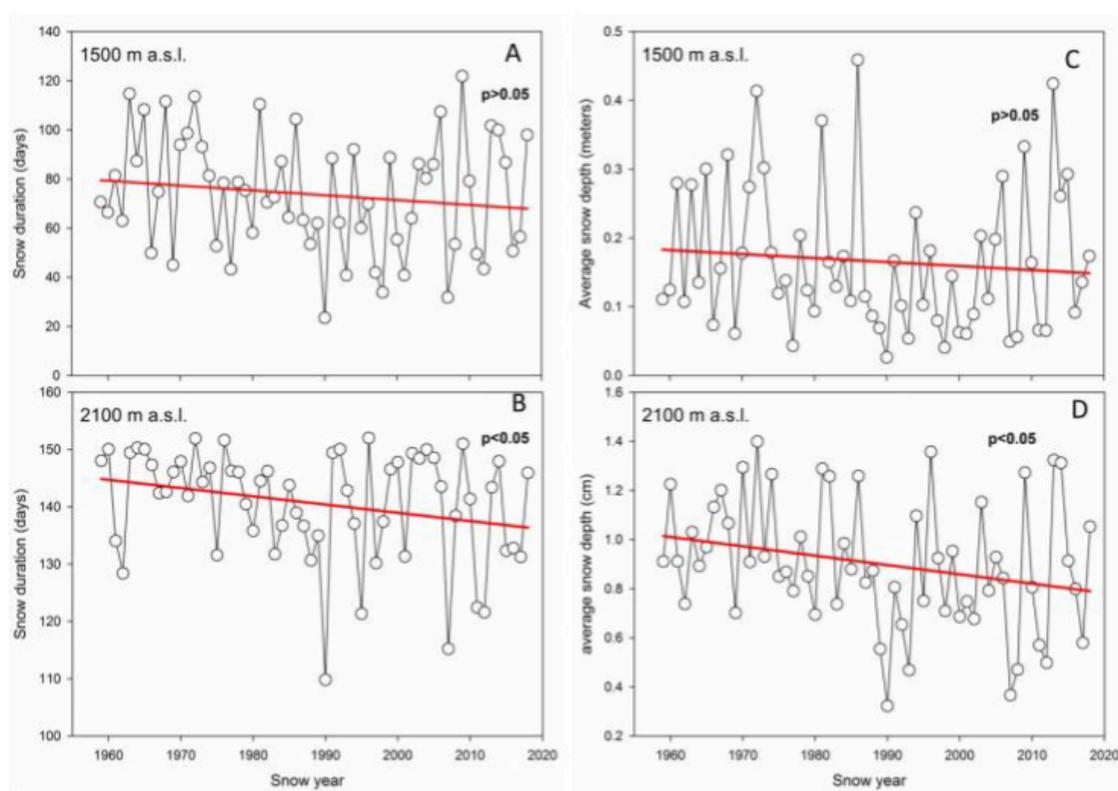


Figure 18 : Graphique représentant la durée et l'épaisseur du manteau neigeux à 1 500 m et 2 100 m (Source : Lopez Moreno *et al*, 2020)

Cette baisse générale se traduit par une réduction de la durée du manteau neigeux à 2 100 m, qui passe de 145 jours à un peu plus de 130 jours, et une diminution de l'épaisseur de la neige, passant d'environ 1 mètre à 0,8 mètre. À 2 100 m, la réduction est plus marquée qu'à 1 500 m. Il est à noter que la durée moyenne de la couverture neigeuse à 1 500 m, comme l'indique le graphique en haut à gauche, présente une grande variabilité. Cela est dû au fait qu'à cette altitude, la neige peut persister pendant un mois lors d'une année, ou plusieurs mois lors d'autres années (LOPEZ MORENO, 2020). C'est pour cette raison que la baisse est plus significative à 2 100 m qu'à 1 500 m sur les graphiques.

En conclusion, sur la période de 1958 à 2017, la quantité de neige a globalement diminué dans les Pyrénées, entraînant une perte d'eau pour chaque bassin-versant pyrénéen. Sur le territoire du Caillan, cette réduction de la neige affecte les périodes des hautes eaux et de

l'été, avec un impact direct sur le fonctionnement du cours d'eau. De plus, cette tendance de diminution ne semble pas ralentir, car ces dernières années, le personnel de la réserve a observé une baisse continue de la quantité de neige. Cette perte est cruciale pour la gestion hydrologique de la vallée et pourrait aggraver la pression sur la ressource en eau dans le futur.

B- Le cours d'eau

1- Le rôle géologique sur le cours d'eau

Dans la présentation du territoire, nous avons évoqué la géologie du terrain, qui joue un rôle important dans les écoulements du cours d'eau, notamment dans la partie calcaire du bassin-versant. Ce type de roche représente un peu moins de 50 % du bassin-versant de la rivière. Le cours d'eau traverse deux fois des formations calcaires, et à chaque passage, des échanges dynamiques se produisent entre le karst et la rivière. Ces échanges peuvent varier selon l'échelle de l'analyse et se manifestent de différentes manières. Parmi ces échanges, on distingue trois principales formes : la rivière drainante (figure 19), la rivière déconnectée et l'infiltration (figure 20) (DUCROIX, 2009). Ces interactions influencent le régime hydrologique du bassin et sont essentielles à la gestion optimale de la ressource en eau.

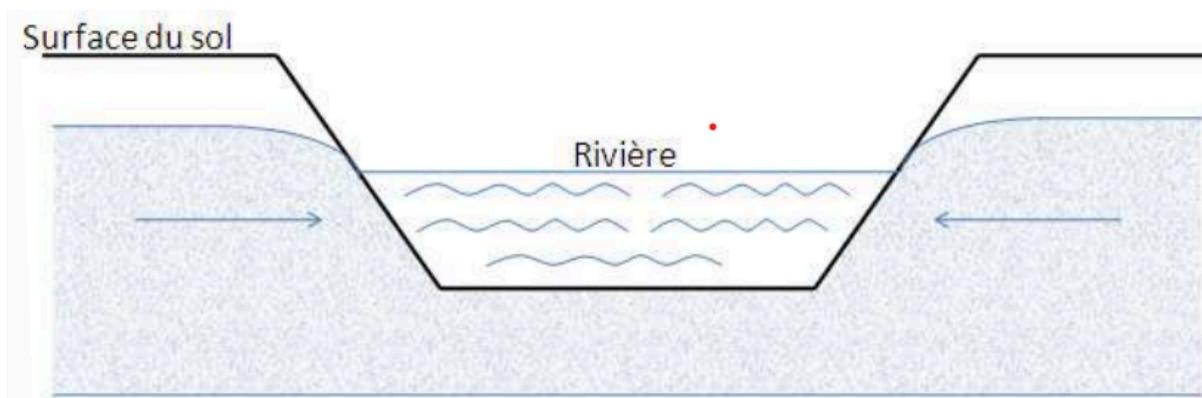


Figure 19 : Schéma d'une rivière drainante (DUCROIX, 2009)

Ce phénomène intervient lorsque le niveau piézométrique de l'aquifère est supérieur au niveau de la rivière. La rivière vient drainer l'aquifère (DUCROIX, 2009).

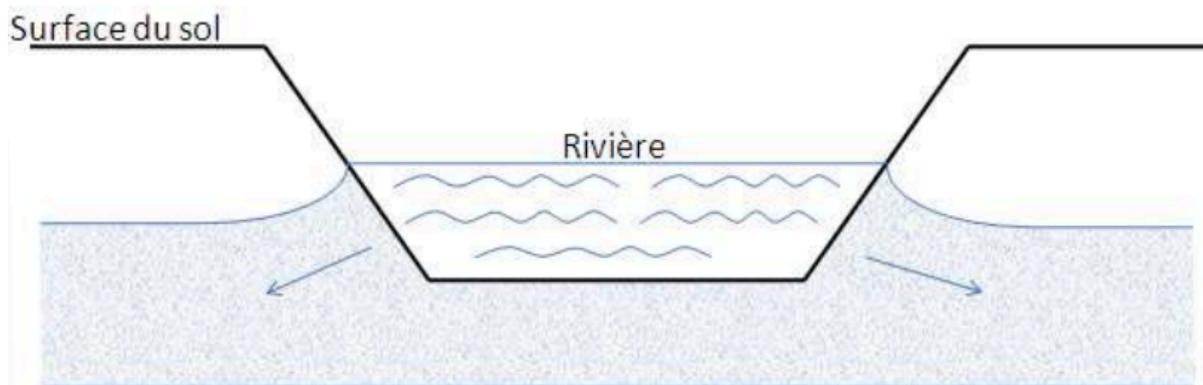


Figure 20 : Schéma d'une rivière de type infiltrante (DUCROIX, 2009)

Ce fonctionnement est l'inverse de celui précédemment décrit. Dans ce cas, la rivière s'infiltrate dans le sol car le niveau de la nappe phréatique est inférieur à celui du cours d'eau. Cependant, sur le bassin-versant du Caillan, le niveau piézométrique de la nappe n'est pas bien connu. Les échanges peuvent être déduits en fonction des périodes, notamment si la rivière est en hautes ou basses eaux. Ainsi, pendant les périodes de hautes eaux, la rivière peut avoir des infiltrations, tandis qu'en période de basses eaux, elle devient drainante et soutient l'étiage, assurant un flux régulier de l'eau (DUCROIX, 2009).

Ces échanges sont cruciaux à comprendre, car ils influencent directement les écoulements et le comportement hydrologique du bassin-versant. En effet, les pertes d'eau dépendent de ces différents types d'échanges. Afin de mieux comprendre ces dynamiques, des séries de jaugeage ont été effectuées lors du stage de 2017 et de celui de cette année, précisément dans les zones où le cours d'eau traverse des formations calcaires. Les résultats de ces jaugeages fournissent des données importantes pour évaluer les interactions entre la rivière et le sol calcaire. Les résultats sont :

- Jaugeage le 22/06/2017 : 222 l/s avant le passage sur le calcaire pour 146 l/s après le passage (ROCHETEAU, 2017)
- Jaugeage le 21/07/2017 : 74 l/s avant le calcaire et 64 l/s après (ROCHETEAU, 2017)
- Jaugeage le 02/08/2024 : 35 l/s avant le calcaire et 27 l/s après

Les résultats des jaugeages montrent que, selon la quantité d'eau disponible dans la rivière, les pertes varient en intensité. Toutefois, la théorie du changement de régime, qui suggère que la rivière pourrait se comporter différemment en fonction de l'état de l'écoulement, n'est pas complètement vérifiée. En effet, des pertes sont observées même lors des périodes d'étiage plus marquées. Cette perte d'eau à l'étiage peut être attribuée à une baisse du niveau piézométrique de la nappe entre 2017 et 2024. La sécheresse prolongée entre 2022 et 2023 a conduit à une réduction significative du niveau des nappes phréatiques, lesquelles n'ont pas pu se recharger en raison du manque de précipitations pendant les périodes cruciales du printemps et de l'automne. Ce phénomène met en évidence l'importance de suivre de près le fonctionnement de la rivière et l'évolution des nappes phréatiques pour anticiper ces dynamiques et mieux intégrer ces données dans les bilans hydriques futurs.

2- L'historique des écoulements depuis 2009

Depuis l'installation des stations limnimétriques en 2011, les études ont pu collecter des données précieuses jusqu'en 2024. Avant cette période, il a été nécessaire de mettre à jour les courbes de tarage des stations de Betllans et du répartiteur. Cette mise à jour a été réalisée grâce à des jaugeages effectués directement au niveau de ces stations limnimétriques. Ces jaugeages ont permis de garantir que les courbes de tarage reflétaient avec précision les variations du débit et ainsi d'améliorer la précision des analyses hydrologiques sur le bassin-versant.

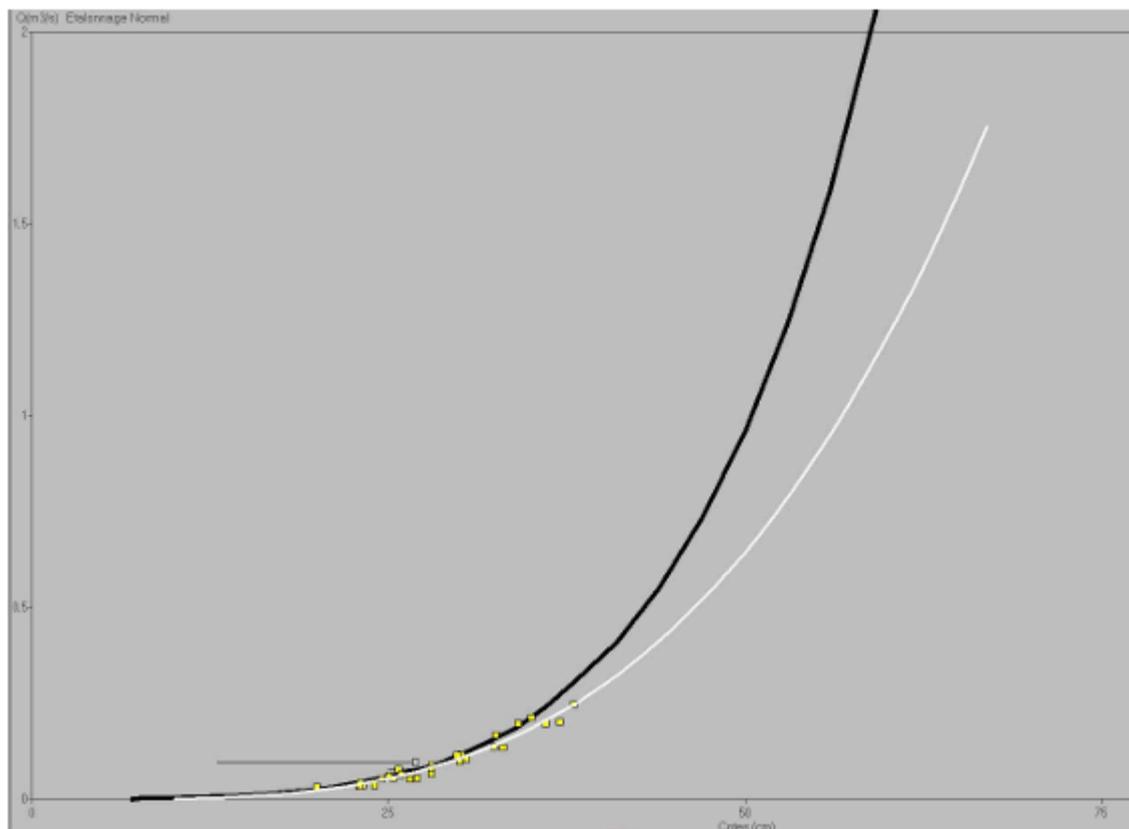


Figure 21 : Courbe de tarage actualisée de la station du répartiteur (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Sur la figure 21, un changement notable de la courbe de tarage est observé. La courbe blanche représente l'actualisation la plus récente, tandis que la courbe noire date de 2019, sa dernière mise à jour. En l'espace de quatre ans, un débit plus faible est observé pour une même hauteur d'eau. Cette modification peut être attribuée à des changements dans le lit du cours d'eau, résultant d'événements importants ou de l'érosion naturelle. Bien que la tempête Gloria n'ait pas eu un impact direct sur le cours d'eau à cet endroit précis, en raison de la protection offerte par le manteau neigeux, des phénomènes comme le ruissellement de la fonte ont pu affecter l'écoulement. Néanmoins, il est probable que l'érosion ou les déplacements du lit aient contribué à cette réduction de débit.

La station de Betllans, quant à elle, a été particulièrement affectée par la tempête Gloria. La violence de l'événement a été telle qu'au pont de l'hameau, le niveau de l'eau a atteint des hauteurs exceptionnelles, submergeant la station limnimétrique (figure 22).

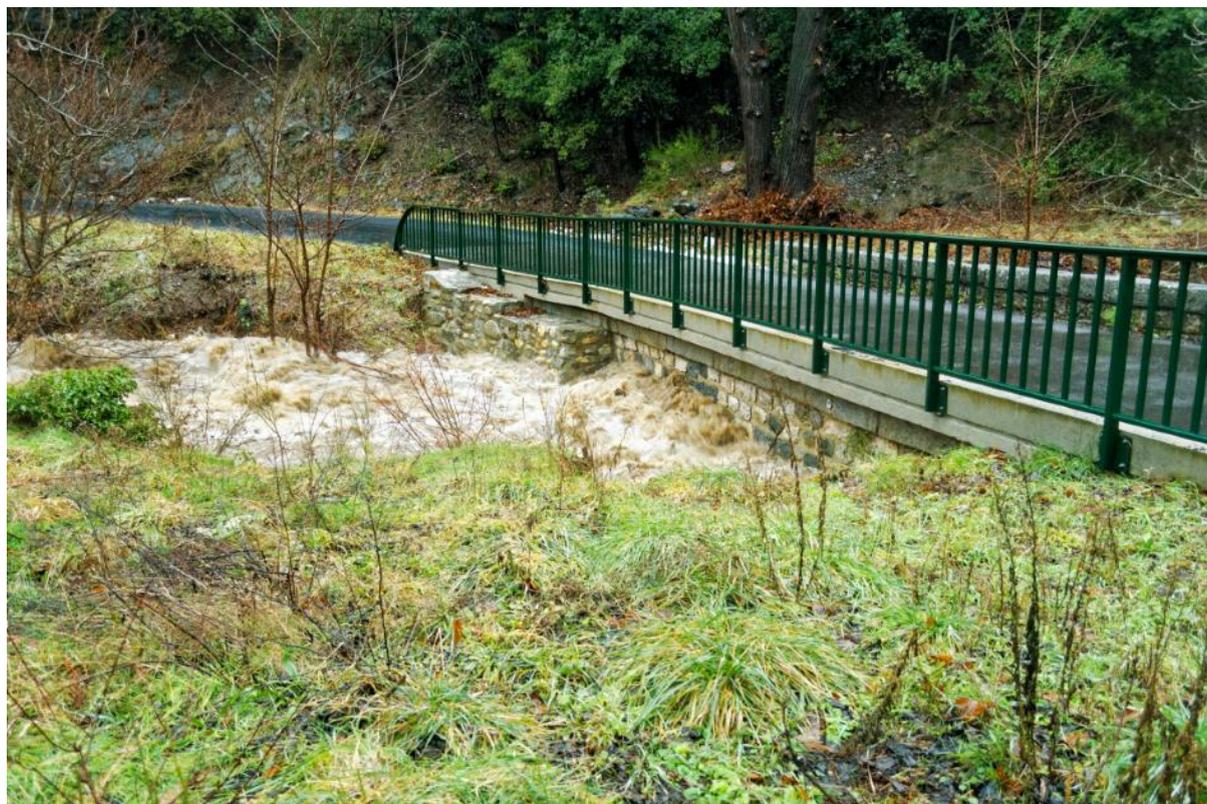


Figure 22 : Photo de la décrue de la tempête Gloria en janvier 2020 (prise par Morichon David, 2020)

Cet événement marque un tournant dans notre étude, car il marque clairement un avant et un après la tempête Gloria. Selon les témoignages, le pont de Betllans jouait un rôle de retenue, et l'eau, en grande quantité, s'échappait sous pression. Cette dynamique est confirmée par les jaugeages réalisés avant et après l'événement, comme l'illustre la figure 23. Les résultats des jaugeages montrent des variations significatives dans le débit du cours d'eau, témoignant de l'impact profond de la tempête sur les conditions hydrologiques du secteur.

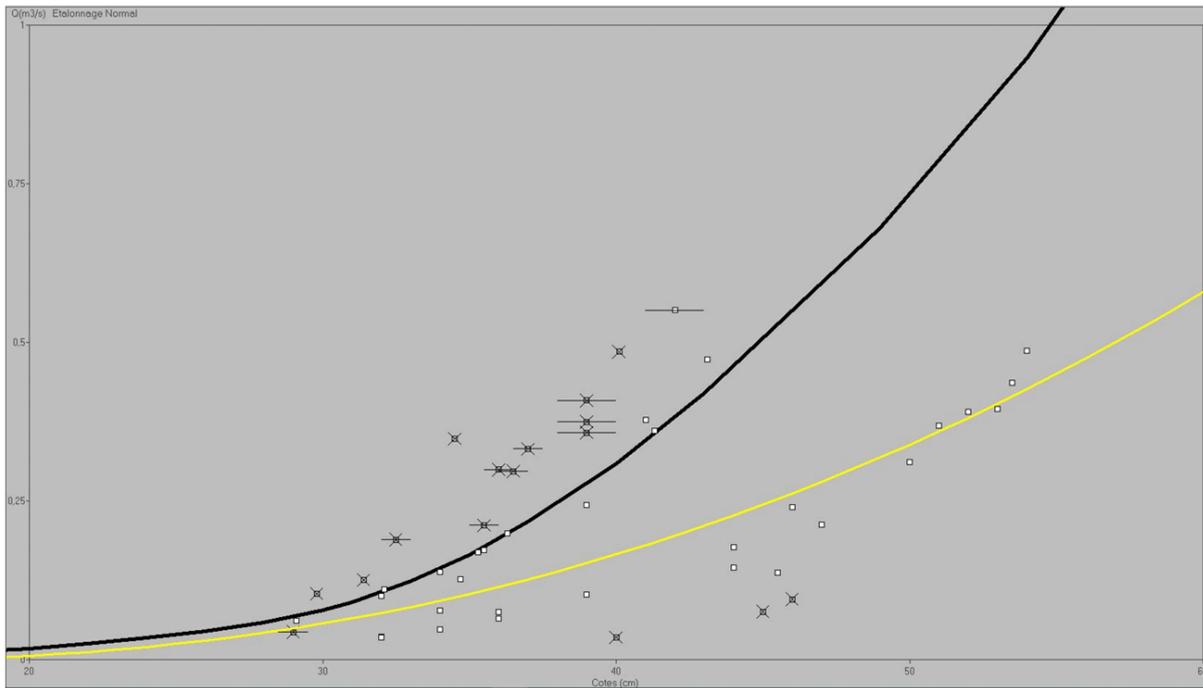


Figure 23 : Courbe de tarage de Betllans par le logiciel Hydraccess (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Les points blancs sur la figure 23 représentent les jaugeages utilisés pour l'estimation des courbes de tarages. Ceux qui se trouvent sur la courbe noire datent d'avant la tempête Gloria, tandis que les autres points correspondent aux mesures post-Gloria. Cette distinction souligne l'impact majeur de la tempête sur les conditions hydrologiques de la rivière. Pour prendre en compte ces changements, j'ai choisi d'utiliser un nouveau logiciel de calcul de débit pour Betllans. Ce logiciel permet de saisir les nouvelles caractéristiques physiques du cours d'eau et d'obtenir des débits plus précis et en accord avec la réalité post-Gloria. Nous avons déjà observé la courbe de tarage générée avec le logiciel BaRatin à la figure 8.

Une fois les données mises à jour, la traduction des hauteurs a été effectuée sur les deux logiciels, et le traitement des résultats sur Excel a permis de calculer les débits mensuels. Cela a conduit à la détermination du régime hydrologique du Caillan pour la vallée de Nohèdes et de Conat, comme illustré dans la figure 24.

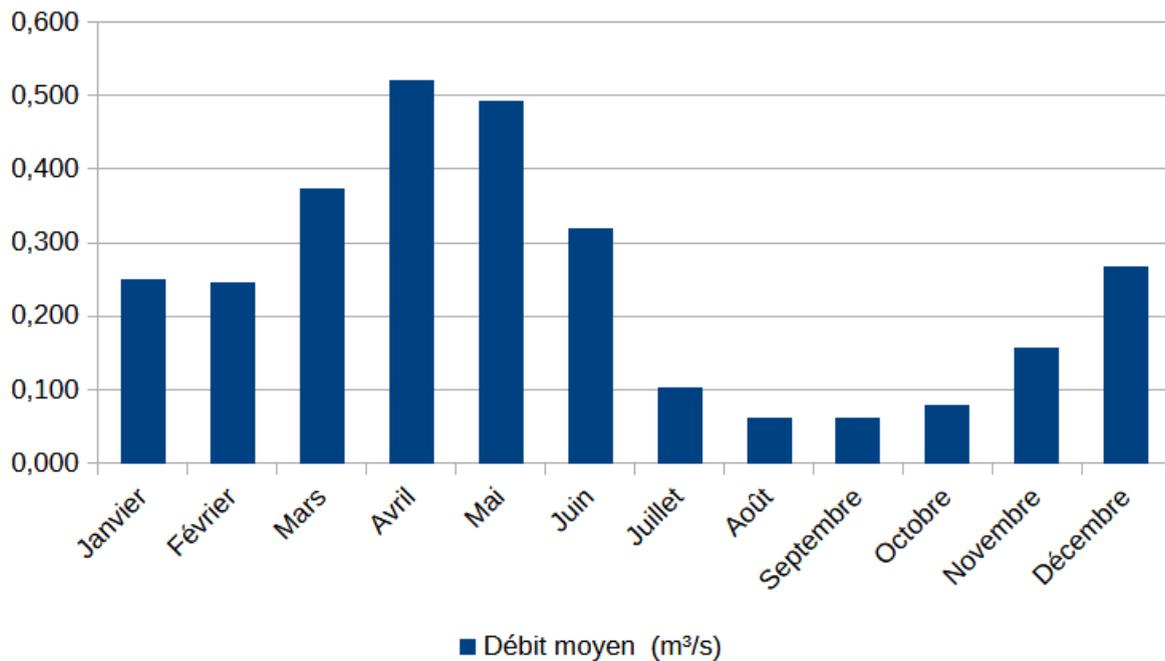


Figure 24 : Graphique du régime hydrologique du Caillan à la station de Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024)

La rivière présente un régime nivo-pluvial, caractérisé par une période de hautes eaux au printemps, de mars à juin, suivie d'une période sèche de juillet à septembre. Il existe également une période de transition entre l'automne et l'hiver. Cependant, il convient de noter que le mois d'octobre 2018 est manquant en raison d'un problème de sonde. Cette année-là n'est pas anecdotique, car elle figure parmi les plus pluvieuses depuis le début des enregistrements.

Pour la station du Répartiteur, le régime hydrologique est principalement nival, avec une période de hautes eaux au printemps, de mars à juin, et une période de basse eau durant le reste de l'année, comme le montre la figure 25.

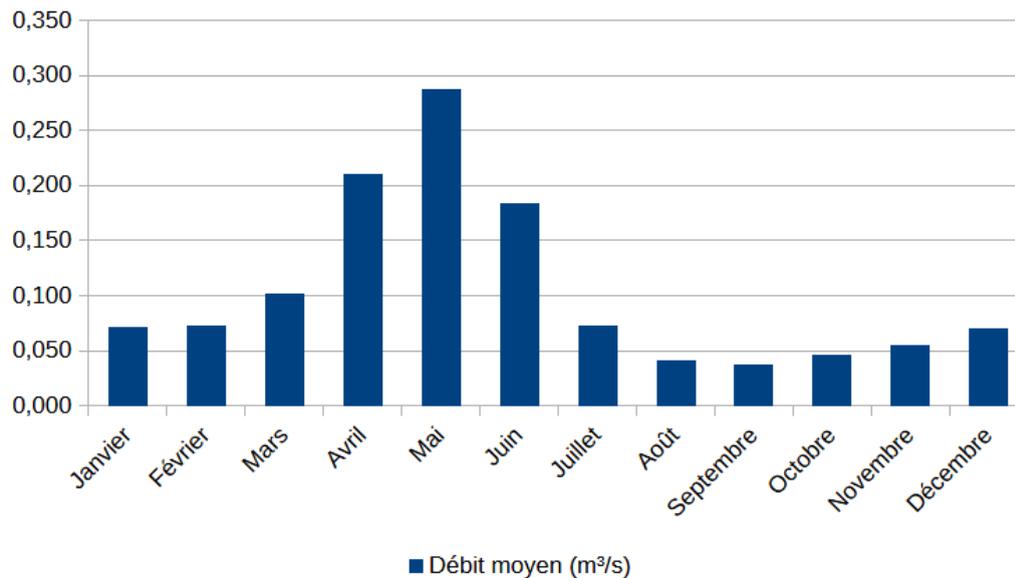


Figure 25 : Graphique du régime hydrologique du Caillan à la station du Répartiteur (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Le régime hydrologique de la rivière varie en fonction de l'altitude, car les apports en eau évoluent selon les formes de précipitations. En altitude, la neige et sa fonte constituent l'apport majoritaire à la rivière, tandis qu'en aval, l'apport neigeux est complété par les précipitations pluvieuses et les sources. Cette variation entre l'amont et l'aval influence la dynamique du cours d'eau. L'historique des débits fournit ainsi un ensemble de données précieux pour analyser les changements et les évolutions des flux d'eau, en particulier face aux impacts du changement climatique et des modifications des régimes de précipitations.

3- Les évolutions des débits

Ces régimes hydrologiques évoluent car lorsqu'on travaille les années pour mettre deux temporalités en comparaison on remarque des changements. Les pas de temps choisis sont égaux de 2012-2018 et 2019-2024, le nombre d'années étant impair, le choix a été de mettre une année de plus pour les données les plus anciennes. Cependant, certaines années manquent encore dans l'analyse, et les futures études hydrologiques permettront de compléter les données et de confirmer ou infirmer les tendances observées.

Cette comparaison entre les régimes hydrologiques est particulièrement pertinente, car elle met en évidence les baisses et les hausses des débits au fil des mois. Ce travail a été fait sur les deux stations. Pour le Répartiteur, la comparaison est la suivante :

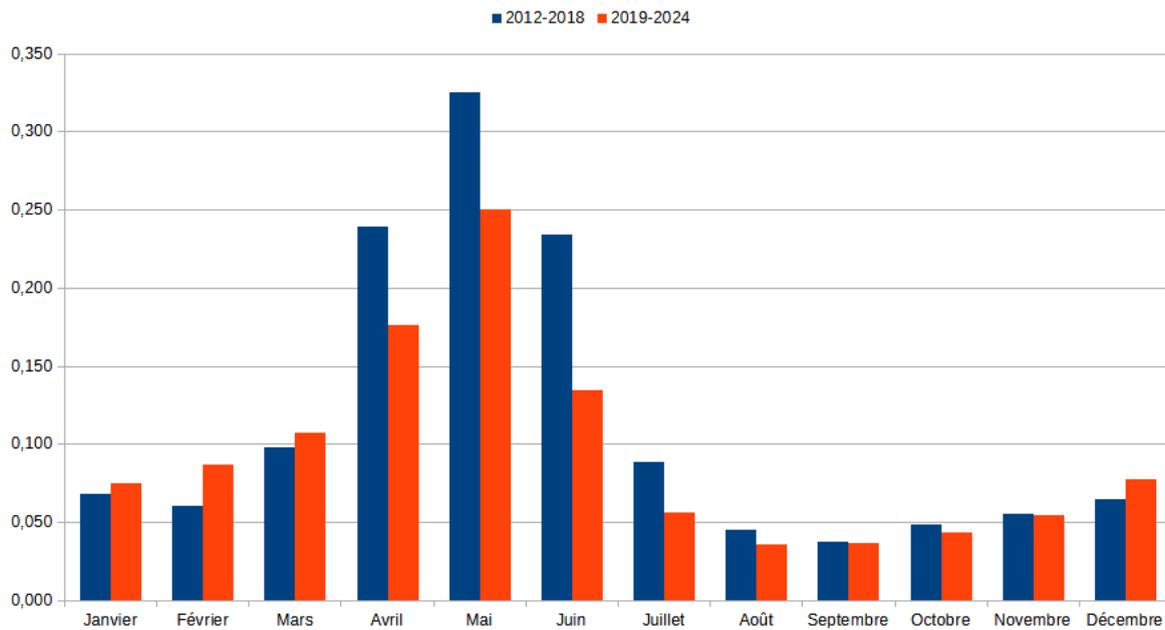


Figure 26 : Graphique de la comparaison des régimes hydrologiques de la station du Répartiteur (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Sur la figure 26, trois dynamiques distinctes sont observées dans l'évolution des débits à la station du Répartiteur : une baisse significative des débits d'avril à août, suivie d'une période d'équilibre entre septembre et novembre, et enfin une augmentation des débits de décembre à mars. Ces tendances sont clairement mises en évidence et permettent de mieux comprendre les variations saisonnières du régime hydrologique de la rivière. Pour une analyse plus approfondie, la figure 27 illustre ces dynamiques d'une manière encore plus perceptible, mettant en lumière les fluctuations des débits au fil de l'année.

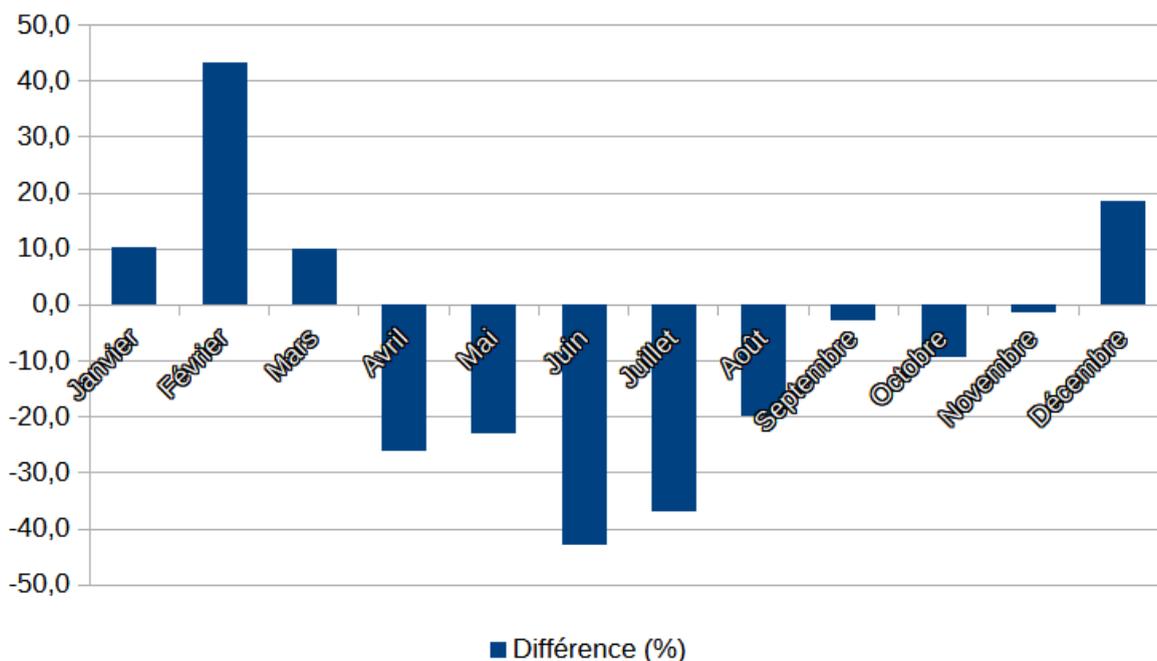


Figure 27 : Graphique sur les différences du régime hydrologique du Répartiteur (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Les dynamiques observées des débits varient en fonction des mois, et certaines fluctuations sont particulièrement marquées. Par exemple, en juin, une perte de plus de 40 % des débits a été calculée. Ces pertes et gains sont largement influencés par les précipitations, tant neigeuses que pluvieuses. Ces dernières années, la baisse des précipitations, notamment neigeuses, a entraîné une diminution des débits. De plus, le phénomène de fonte des neiges, qui se transforme de plus en plus en pluie en raison d'hivers plus doux, a eu pour conséquence une augmentation des débits pendant l'hiver, mais une réduction lors du printemps, période où il y a moins de neige. Ainsi, sur la station du Répartiteur, la baisse des débits pendant la période des hautes eaux suggère une transformation du régime hydrologique nival vers un régime plus pluvial, en réponse aux changements climatiques observés.

Les débits moyens annuels du Répartiteur ont tendance à se réduire (figure 28).

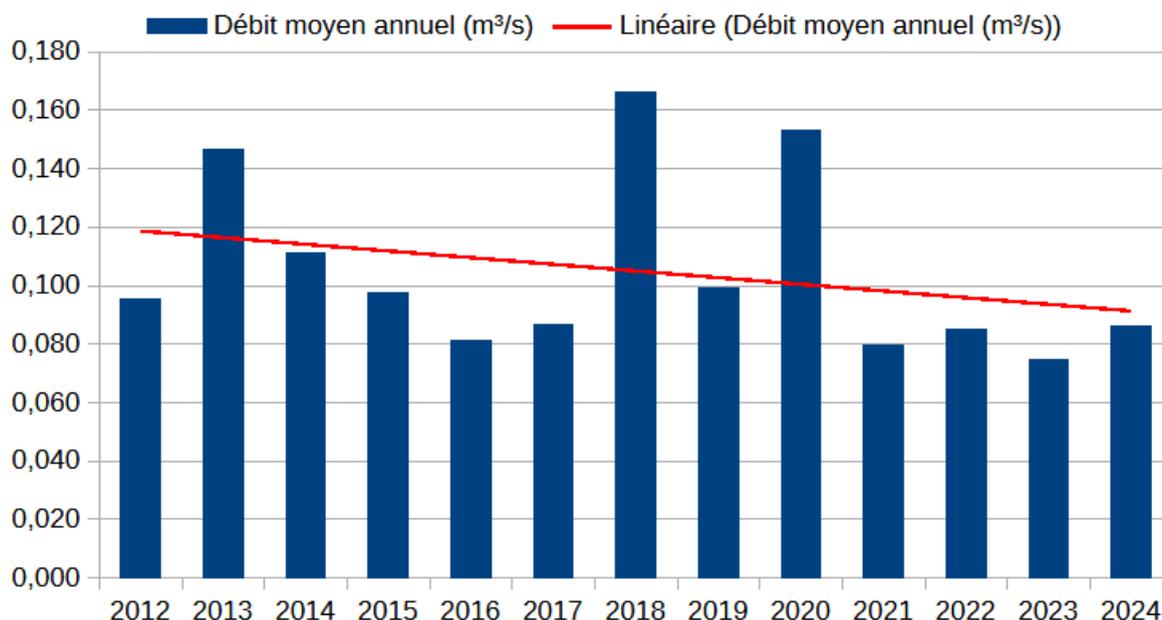


Figure 28 : Graphique des débits moyens annuels sur la station du Clot (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Sur le graphique des débits moyens annuels, on observe clairement une tendance à la baisse, en particulier entre 2021 et 2024. Les débits moyens faibles se succèdent, avec un pic notable en 2023, où les débits sont inférieurs à 80 l/s sur l'année. Ce déclin est significatif et, en calculant la perte en comparaison avec les régimes hydrologiques précédents, on constate une réduction de 14 % des débits moyens annuels. Cette tendance met en lumière l'impact des changements climatiques et de la variabilité des précipitations, notamment la diminution des chutes de neige et l'intensification des périodes sèches, qui influencent directement les ressources en eau du bassin-versant.

Pour la station de Betllans, nous prendrons le même cheminement avec une comparaison des régimes hydrologiques et un graphique sur les débits moyens annuels.

La comparaison des régimes hydrologiques à Betllans est la figure 29.

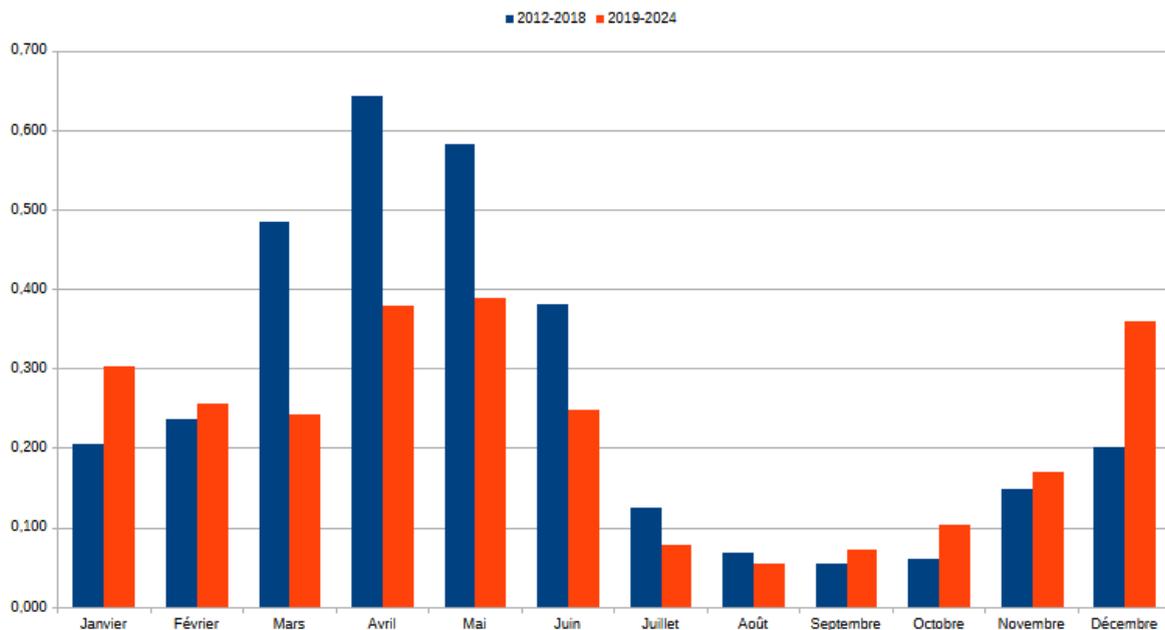


Figure 29 : Graphique de la comparaison des régimes hydrologiques de la station de Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Cette comparaison met en évidence deux dynamiques principales : une baisse des débits moyens au printemps et en été, et une augmentation des débits durant l'hiver et l'automne. Pour la station du Clot, des mois ont montré un équilibre entre ces deux temporalités. Toutefois, sur le graphique, l'augmentation des débits en hiver et en automne est plus marquée que celle observée à la station du Répartiteur. La différence, exprimée en pourcentage, montre que les dynamiques saisonnières à la station du Clot sont plus prononcées, ce qui suggère des changements plus importants dans le régime hydrologique du cours d'eau. Cette évolution pourrait être liée à une augmentation des précipitations sous forme de pluie pendant l'hiver, en lien avec les températures plus douces, et une diminution des apports en neige pendant le printemps (figure 30).

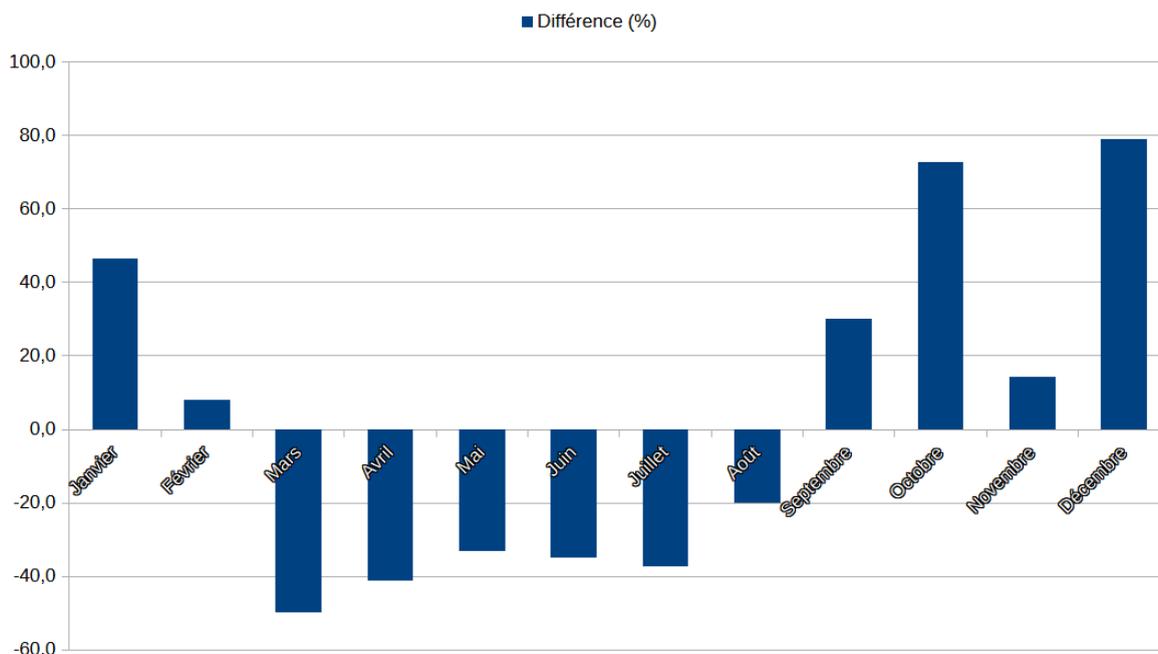


Figure 30 : Graphique sur les différences du régime hydrologique de Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Cette différence est particulièrement notable en automne, avec des mois comme octobre et décembre, où le pourcentage d'augmentation des débits dépasse 60 %, atteignant un pic impressionnant de 79 % en décembre. Cette évolution peut être expliquée par les mêmes phénomènes météorologiques observés à la station du Clot, notamment une transformation des chutes de neige en pluie en raison de températures hivernales plus douces. Cependant, le bassin-versant de la station est plus étendu, ce qui permet un captage plus important des précipitations pluvieuses, ce qui se reflète directement dans les données de débit. Ces tendances montrent une accentuation du régime nivo-pluvial, avec une baisse des débits pendant la période des hautes eaux au printemps et une augmentation marquée durant l'automne, illustrant un changement dans les apports en eau, notamment la transformation des précipitations neigeuses en pluie.

Au final, la moyenne des débits annuels à la station de Betllans illustre le même phénomène qu'au Clot (figure 31).

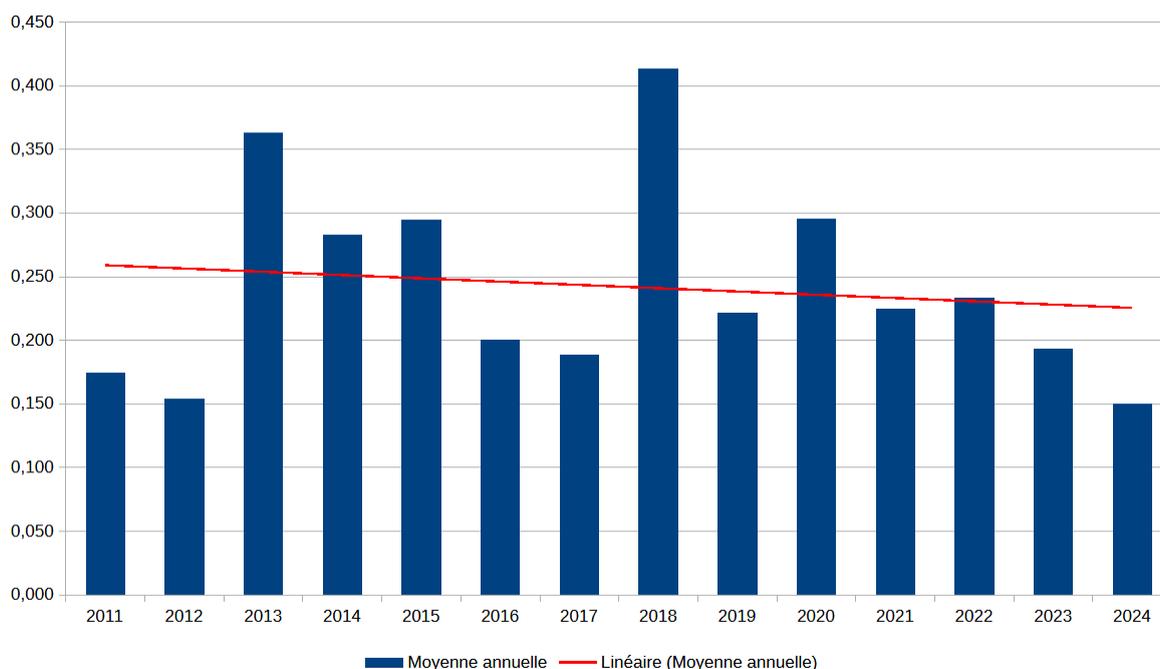


Figure 31 : Graphique des débits annuels à la station de Betllans de 2011 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

La diminution progressive du débit des cours d'eau se caractérise par des années initiales avec des débits moyens relativement plus élevés, comme en 2013. Cependant, plusieurs années sèches, telles que 2012, 2017, 2023 et 2024, montrent des tendances inquiétantes. Bien que 2023 ait été particulièrement sèche, les années précédentes, comme 2012 et 2017, ont été suivies de périodes exceptionnelles avec des débits importants, notamment en 2013 et 2018. Les années 2022 et 2023, bien que sèches, n'affichent pas de débits moyens particulièrement bas, mais leur enchaînement pourrait exacerber la baisse du débit à long terme. L'année 2011 et 2024 restent incomplètes, mais même sans ces années, la courbe des tendances montre une baisse significative. En effet, la comparaison des débits moyens entre 2011-2018 et 2019-2024 révèle une perte de -16,75 %, une réduction qui reste similaire à celle observée à la station du Répartiteur. Cette baisse indique un affaiblissement global des débits dans la région et une évolution du régime hydrologique, potentiellement influencée par les sécheresses récurrentes.

4- Contextualisation pyrénéenne

La contextualisation de notre étude permet d'élargir l'analyse en comparant les débits des rivières similaires afin de déterminer si la perte enregistrée sur le bassin-versant du Caillan se retrouve ailleurs. Le choix des rivières a été guidé par plusieurs critères, notamment l'altitude et la disponibilité des données. Ainsi, la rivière de l'Angoustrine, située à 1 340 m d'altitude, a été sélectionnée pour une comparaison avec la station du Clot, tandis que la Neste du Louron, à 700 m d'altitude, a été choisie pour la comparaison avec la station de Betllans. Ces deux rivières présentent des caractéristiques géographiques et climatiques

distinctes, permettant ainsi d'étudier si les dynamiques de débits observées sur notre territoire sont partagées par d'autres rivières dans des contextes différents.

La station de l'Angoustrine, qui dispose de données complètes et vérifiées de 2008 à 2023, présente un régime hydrologique nival, similaire à celui observé pour la station du Répartiteur. Les débits de cette rivière sont généralement plus importants que ceux de la station du Clot. Le régime nival de l'Angoustrine se caractérise par une période de hautes eaux de mars à juillet, suivie d'un étiage marqué en été. Pour étudier l'évolution des débits, nous avons appliqué la même méthode de comparaison utilisée pour les stations précédentes, en divisant la période d'étude en deux segments : de 2008 à 2015 et de 2016 à 2023. L'objectif de cette comparaison est de quantifier les différences de débits sur ces deux périodes, afin de détecter d'éventuelles tendances, telles que la baisse des débits observée sur les autres stations. Les résultats sont présentés dans la figure 32.

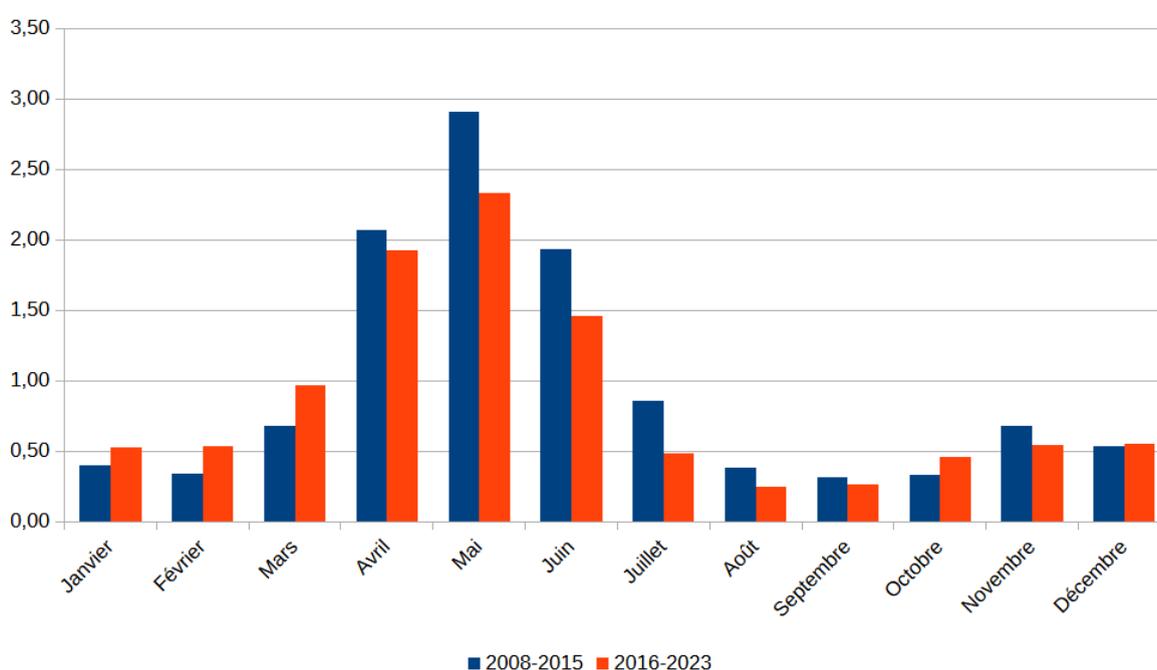


Figure 32 : Graphique de la comparaison des régimes hydrologiques de l'Angoustrine (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Le régime hydrologique de la rivière Angoustrine suit des dynamiques similaires à celles observées à la station du Clot, avec une baisse des débits de avril à septembre et en novembre, et une augmentation des débits de janvier à mars et en octobre. Un léger équilibre est observable au mois de décembre. Pour mieux comprendre et comparer ces dynamiques avec celles de la station du Répartiteur, un calcul en pourcentage a été effectué pour chacune des dynamiques. Cette analyse permet de visualiser les différences de comportements hydrologiques entre les deux stations et de mettre en évidence les variations possibles du régime nival au fil des années. Ces résultats sont illustrés sur la figure 33.

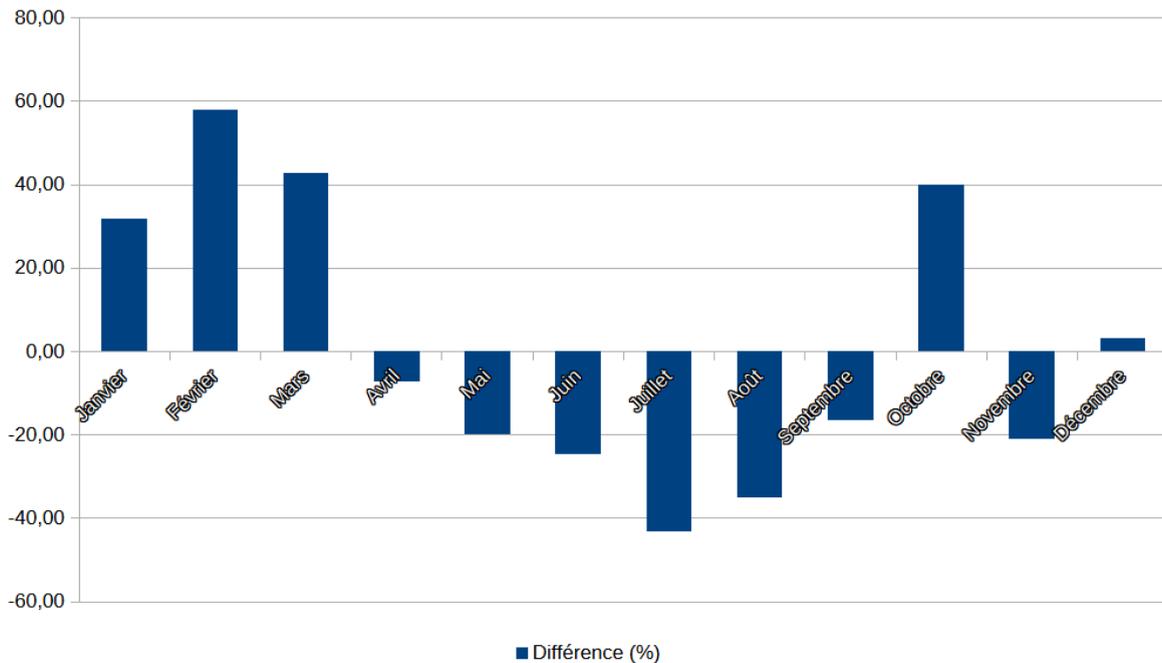


Figure 33 : Graphique sur les différences du régime hydrologique de l'Angoustrine (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Les dynamiques hydrologiques de la rivière Angoustrine présentent des similitudes notables avec celles du Caillan au niveau du Répartiteur, bien que certaines différences existent. L'une des principales distinctions réside dans le gain de débits plus important pour l'Angoustrine pendant l'hiver, où un pic de gain de plus de 50 % est observé, tandis que pour le Caillan, ce gain est légèrement inférieur, avec un pic de 40 %. Concernant les pertes, l'Angoustrine affiche des pourcentages de pertes plus faibles en avril, mai et juin par rapport à ceux enregistrés pour le Caillan. De plus, les mois correspondant au pic de pertes diffèrent : pour l'Angoustrine, il survient en juillet, alors qu'il se situe en juin pour le Caillan. En dépit de ces nuances, les dynamiques mensuelles des deux cours d'eau sont globalement similaires. La tendance des débits moyens annuels de l'Angoustrine suit une trajectoire semblable à celle observée pour le Répartiteur, comme l'illustre la figure 34, renforçant ainsi l'idée d'une tendance générale de diminution des débits.

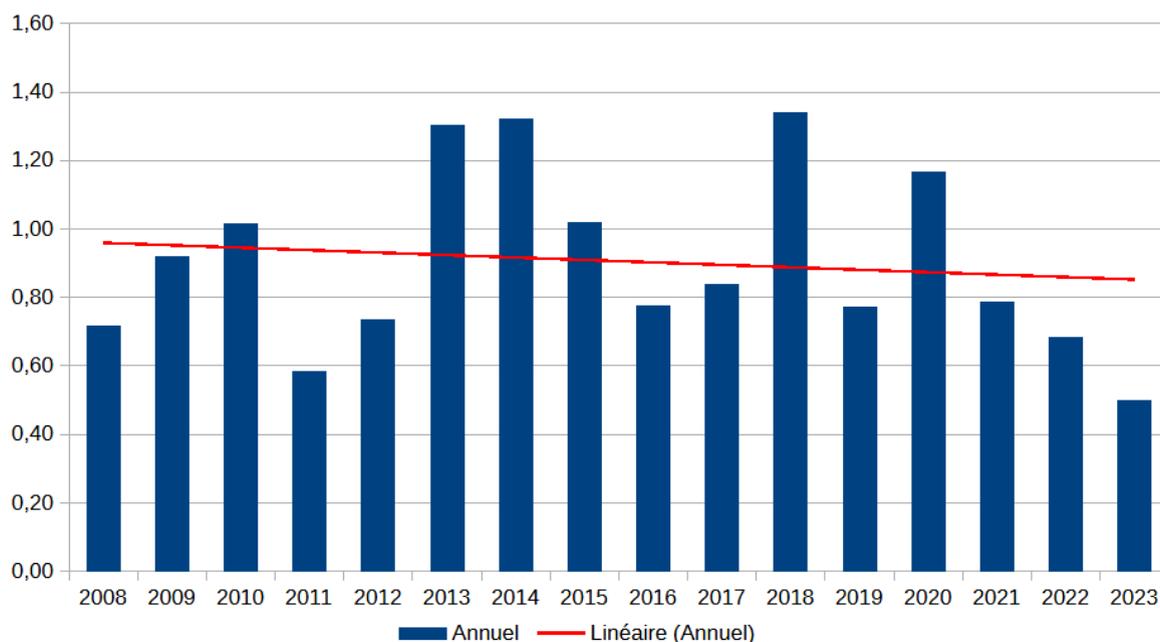


Figure 34 : Graphique des débits annuels de l'Angoustrine de 2008 à 2023 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

L'analyse des débits moyens annuels de l'Angoustrine et du Caillan montre une tendance similaire de diminution des débits. Pour l'Angoustrine, cette baisse peut être particulièrement observée au cours des trois dernières années, avec un pic notable en 2023, où le débit moyen est descendu à 0,5 m³/s. De la même manière, l'année 2023 a été marquée par un débit moyen très bas pour le Caillan. La perte moyenne des débits entre les périodes de 2008 à 2015 et de 2016 à 2023 est estimée à moins de 10 % pour l'Angoustrine, tandis que pour le Caillan, la perte est de 14 %. Bien que ces deux résultats soient proches, ils témoignent d'une tendance générale à la baisse des débits pour les deux rivières, confirmant les impacts potentiels du changement climatique et de la variabilité des précipitations sur les régimes hydrologiques des cours d'eau.

La comparaison entre la station de Betllans et celle d'Arreau, entre le Caillan et la Neste du Louron, se fait sur un autre plan, bien que les régimes hydrologiques de ces deux cours d'eau soient différents. Le régime hydrologique de la Neste du Louron étant nivo-pluvial, elle est beaucoup plus importante que le Caillan, avec des débits mensuels moyens dépassant les 8 m³/s. Ce cours d'eau bénéficie d'un climat distinct, ce qui rend la comparaison directe des régimes hydrologiques moins pertinente. Cependant, une analyse comparative intéressante réside dans l'examen des débits moyens annuels. Cette comparaison permet de mieux comprendre les tendances globales des débits des deux rivières, malgré leurs différences climatiques et hydrologiques.

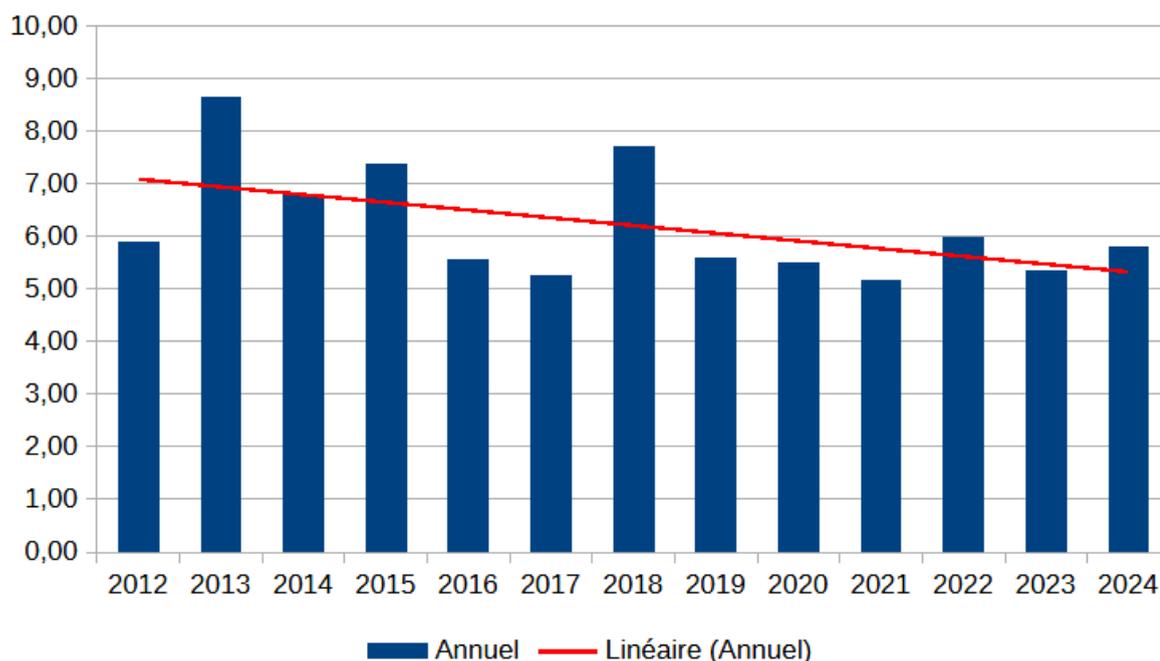


Figure 35 : Graphique des débits moyens annuels de la Neste du Louron à Arreau de 2012 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

La comparaison des débits moyens annuels entre la station de Betllans et celle de la Neste du Louron montre des tendances similaires mais avec des différences notables. Sur le graphique, on peut observer deux périodes distinctes : la première, de 2012 à 2018, avec des débits moyens élevés, notamment un pic en 2013 avec plus de 8 m³/s ; et la seconde, de 2019 à 2024, où les débits moyens ne dépassent jamais les 6 m³/s.

Cette évolution met en évidence une tendance générale à la baisse des débits moyens annuels, avec une perte de 17,5 % pour la Neste du Louron entre ces deux périodes. À Betllans, la perte est légèrement inférieure, à 16,7 %. Bien que la perte soit un peu plus marquée pour la Neste, les deux rivières montrent des dynamiques similaires en termes de diminution des débits moyens au cours des dernières années.

Ces deux comparaisons mettent en lumière une tendance générale à la réduction des débits dans les rivières pyrénéennes, avec une perte de débit évidente sur plusieurs années. En comparant l'Angoustrine et le Caillan au niveau du Répartiteur, on observe une différence significative : l'Angoustrine, tout comme la Neste du Louron, montre une perte de débit plus importante en termes absolus, en raison de son débit bien supérieur à celui du Caillan.

Bien que les pourcentages de réduction des débits soient similaires entre les différentes rivières, les pertes absolues sont plus importantes dans les cours d'eau plus importants comme l'Angoustrine et la Neste du Louron, qui ont des débits plus élevés. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte à la fois les variations relatives (en pourcentage) et les

variations absolues (en débit) pour mieux comprendre l'ampleur des changements hydrologiques à l'échelle pyrénéenne.

Toutefois, ces comparaisons sont à compléter avec d'autres cours d'eau afin de mieux contextualiser les données sur le bassin-versant du Caillan.

5- La température de l'eau

La dernière donnée suivie est la température de l'eau. Cet élément est important à surveiller, car il influence directement la faune et la flore des cours d'eau et des lacs. Des phénomènes peuvent apparaître à cause d'une température trop élevée ou trop basse. Dans cette section, nous étudierons les températures enregistrées par les stations limnimétriques du Clot et de Betllans.

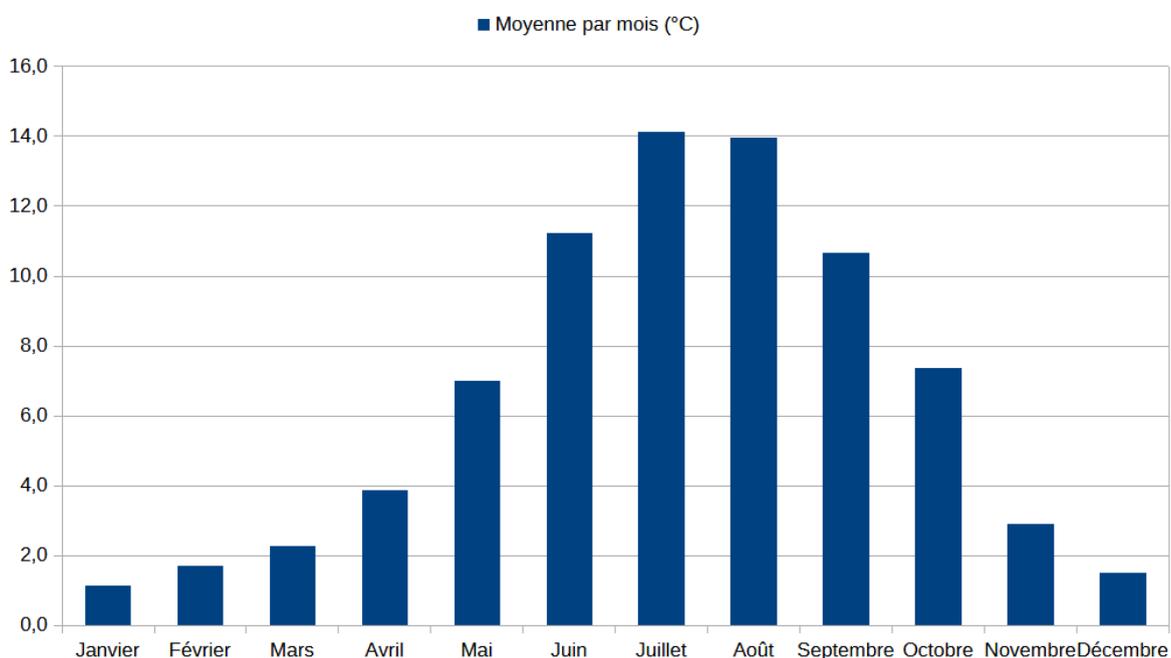


Figure 36 : Graphique de l'évolution annuelle de température de la station limnimétrique du Clot de 2015 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

La figure 36 montre comment la température de l'eau évolue en fonction de l'année civile. Pendant les mois de juillet et août, l'eau est la plus chaude, tandis qu'elle est la plus froide durant les mois de décembre et janvier. Cette période de temps n'est pas encore suffisante pour tirer des conclusions définitives. Cependant, elle permet d'observer un début d'évolution, notamment à travers la courbe de tendance des moyennes annuelles des températures (figure 37).

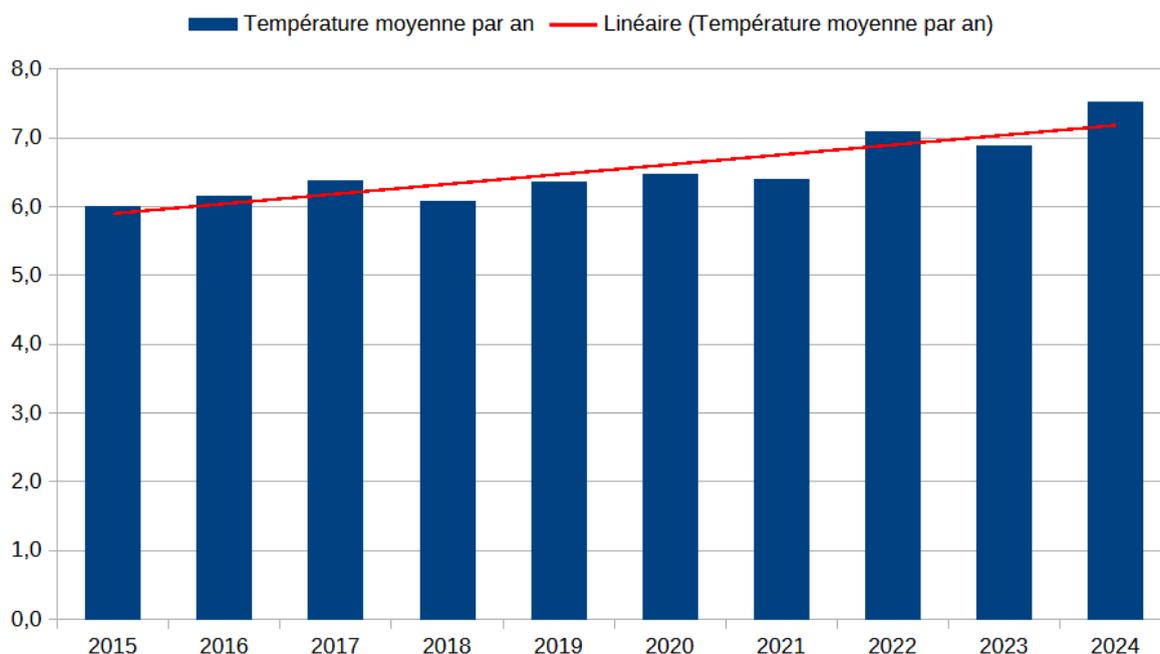


Figure 37 : Graphique des températures moyennes annuelles du Clot de 2015 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)

La figure 37 montre clairement une tendance à l'augmentation progressive des températures de l'eau au cours des années, ce qui pourrait indiquer un réchauffement des écosystèmes aquatiques. Le fait que 2022 et 2023 soient les deux années les plus chaudes enregistrées par la station renforce cette tendance, bien que l'absence de données complètes pour 2024 limite encore l'analyse définitive.

L'augmentation de 11 % de la température de l'eau entre les périodes 2015-2019 et 2020-2024, passant de 6,2 à 6,9 °C, pourrait signaler un changement climatique local ou régional qui commence à avoir un impact sur les écosystèmes aquatiques. Cette hausse semble relativement modeste, mais elle reste significative et mérite d'être suivie sur les années à venir pour déterminer si elle se confirme comme une tendance durable.

La comparaison des températures mensuelles moyennes et leur traduction en pourcentage (figure 38) permet de mieux visualiser cette évolution. Ce type d'analyse mensuelle, combiné à l'analyse annuelle, permet de détecter des variations saisonnières et de mettre en évidence des changements spécifiques liés à chaque mois de l'année. Si les mois estivaux continuent de montrer une augmentation des températures, cela pourrait avoir un impact sur la biodiversité, en favorisant certaines espèces adaptées à des températures plus élevées, tout en mettant en péril celles qui nécessitent des eaux plus fraîches.

Il sera crucial de continuer à surveiller ces données dans les années à venir pour confirmer si cette tendance est persistante et pour en étudier les impacts sur la faune et la flore aquatiques.

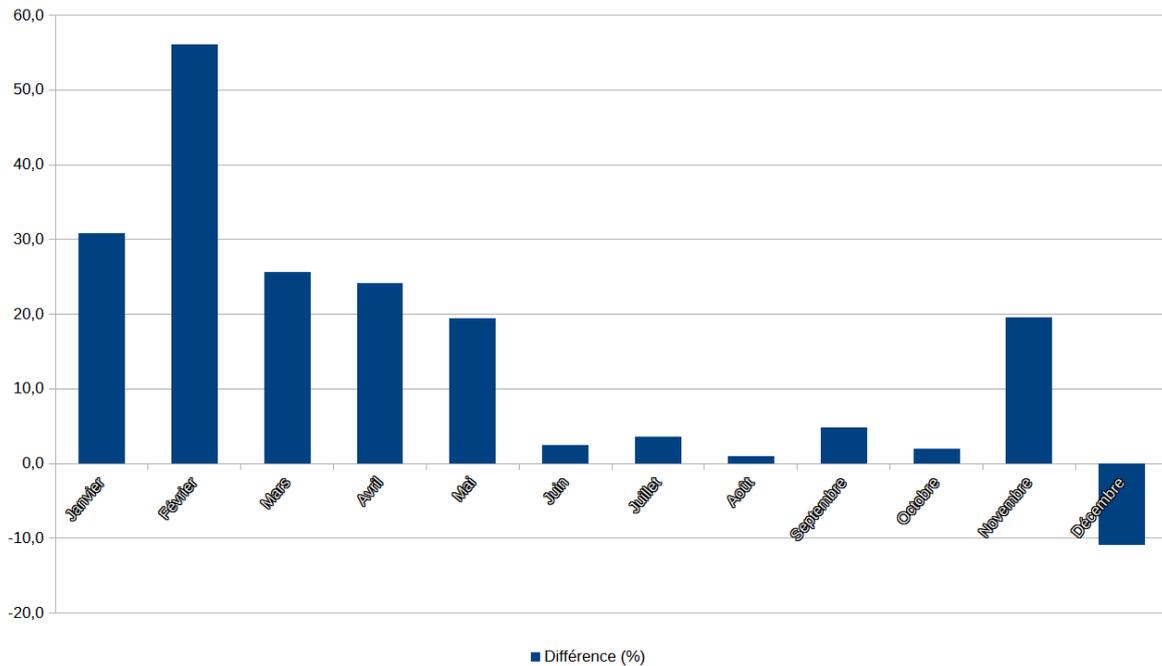


Figure 38 : Graphique sur les pourcentages d’augmentation et de régression de la température de l’eau à la station du Clot (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Sur cette figure, on remarque que l’augmentation la plus forte se trouve durant l’hiver, en janvier et février. Par la suite, les mois de mars, avril, mai et novembre présentent une augmentation similaire, tout comme les mois estivaux de juin, juillet et août ainsi que septembre et octobre. Le seul mois qui se rafraîchit est décembre ; pour l’instant, aucune explication n’est possible concernant ce rafraîchissement.

Pour ce qui est des augmentations, ces pourcentages importants s’expliquent par la température de base utilisée pour le calcul du pourcentage. En effet, le mois de février passe d’une moyenne de 1,3 °C entre 2015 et 2019 à 2 °C entre 2020 et 2024. Cette augmentation représente 56 % de 1,3 °C. Pour le mois de juillet, la température augmente de 13,8 °C à 14,4 °C, soit une augmentation de 3,7 %. Le gain sur ces deux mois est similaire, mais leur part ne l’est pas. C’est ce qui est à comprendre dans ce raisonnement : une augmentation de 0,7 °C pour un mois d’hiver est plus significative en pourcentage car les températures moyennes sont naturellement basses, tandis qu’en été, une augmentation similaire paraît moins marquée.

Pour la station de Betllans, l’eau est plus chaude d’un écart d’environ 2 °C avec la station du Clot (figure 39).

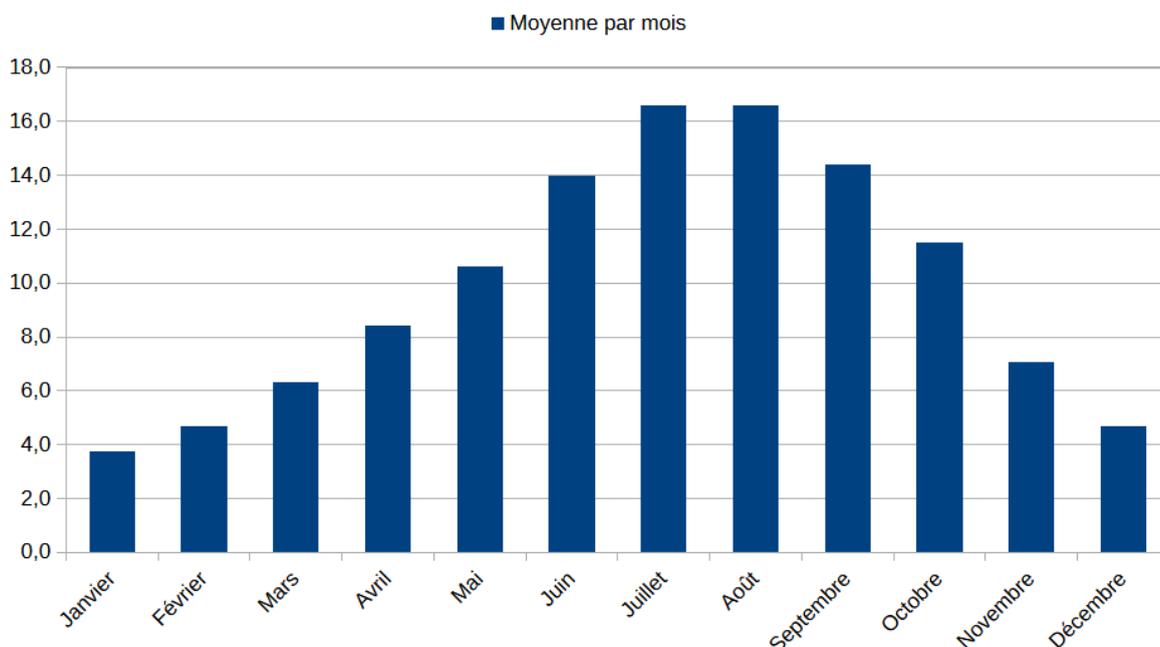


Figure 39 : Graphique des températures moyennes mensuelles à Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024)

La sonde enregistre les températures depuis 2013. L'échantillon est donc plus conséquent que le précédent. L'été est la période où l'eau est la plus chaude, avec des moyennes dépassant les 16°C. En hiver, l'eau oscille autour de 4°C. Les températures moyennes annuelles de Betllans varient entre 9 et 11°C (figure 40).

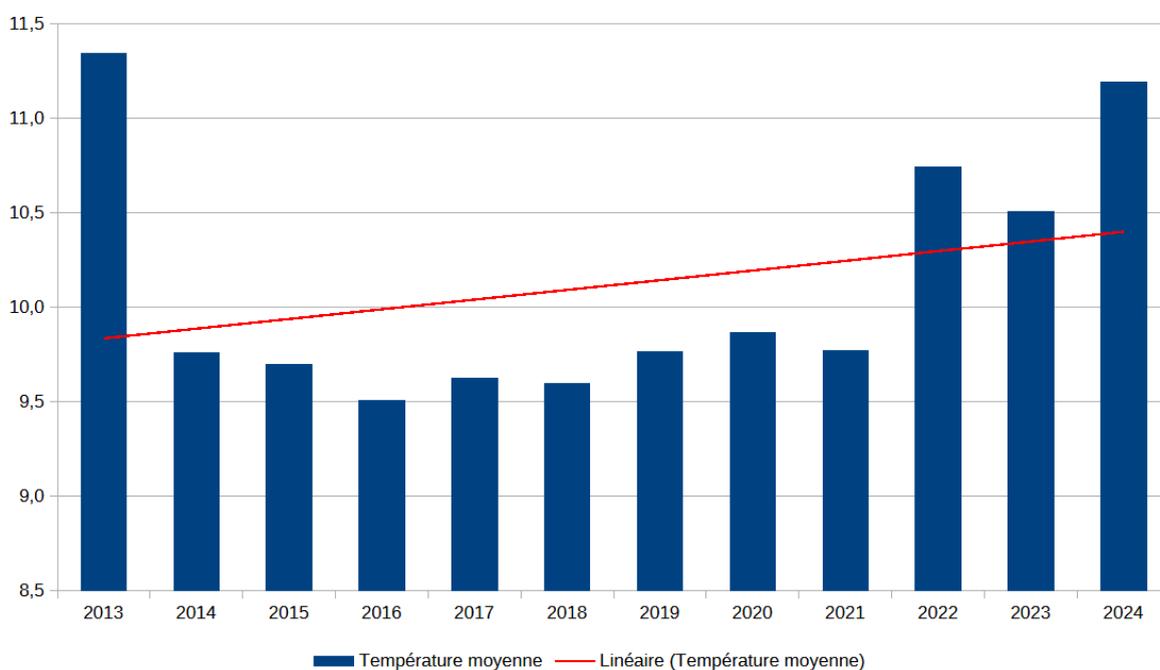


Figure 40 : Graphique des températures moyennes annuelles à Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024)

L'année 2013 n'est pas complète, car c'est le début des enregistrements de la température. La campagne a débuté en juin 2013. La moyenne est élevée, car il manque l'hiver et le printemps. Les années 2022 et 2023 marquent un tournant dans l'augmentation de la température. En effet, entre 2021 et 2022, l'écart des températures est d'environ 1°C. L'année 2024 est encore à compléter, mais il faudra vérifier si cette année suit la tendance des deux dernières ou non. La tendance générale est donc à l'augmentation de la température au fil des années. Une augmentation de 4 % est à noter entre les périodes 2013-2018 et 2019-2024. Cette augmentation est moins importante que celle observée sur la station du Clot.

Sur une répartition mensuelle, comme on a pu voir pour le Clot, la température de l'eau connaît un dynamique similaire (figure 41).

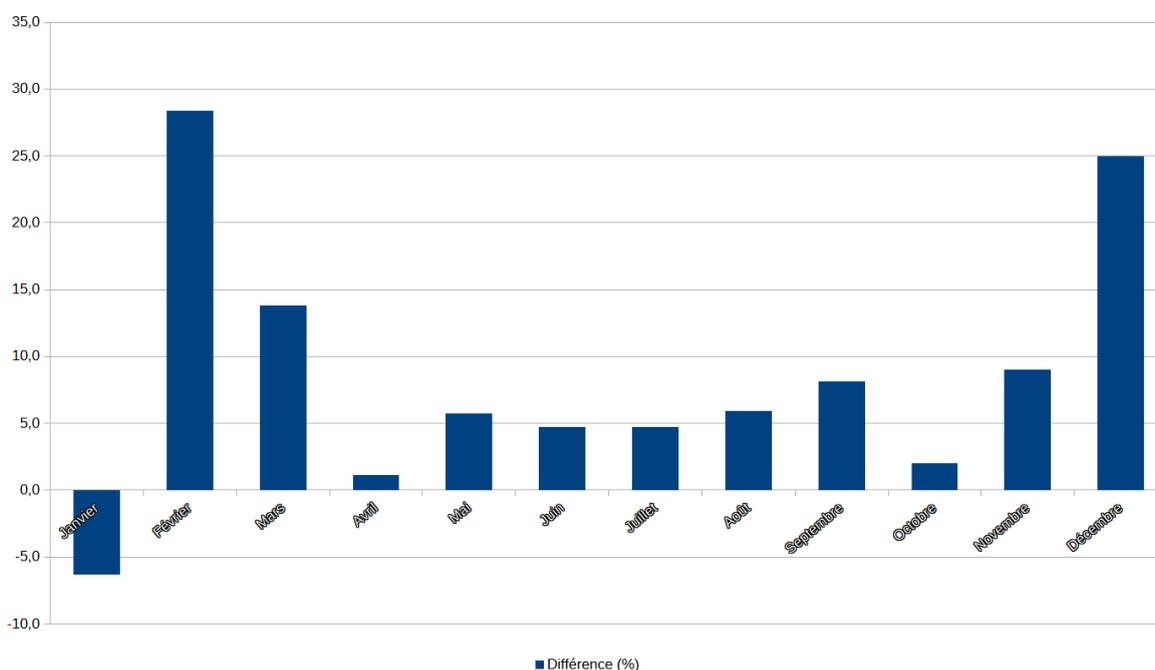


Figure 41 : Graphique des pourcentages d'augmentation et de régression de la température de l'eau à Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024)

On remarque immédiatement que les mois de février et de décembre connaissent la plus forte augmentation, avec plus de 25 %. En février, la température passe de 4,1 à 5,2°C et en décembre de 4,2 à 5,2°C. Ces augmentations de 1°C sont significatives car elles interviennent en hiver, et une eau plus chaude pendant cette période changera le fonctionnement de la biodiversité aquatique à long terme. De plus, des augmentations de 1°C sont également observées en août, passant de 16,1 à 17,1°C, et en septembre, de 13,8 à 15°C. Ces signes montrent que l'eau se réchauffe progressivement au fil des années, ce qui pourrait entraîner, si la tendance continue, un changement de la biodiversité, comme une remontée des poissons à des altitudes plus basses, par exemple. Ce réchauffement général des eaux sur le bassin versant s'applique non seulement au cours d'eau, mais aussi aux différents lacs de la réserve. Ces lacs sont des milieux où l'eutrophisation peut se développer. Ce phénomène est naturel, mais il est accéléré par les activités humaines (figure 42).

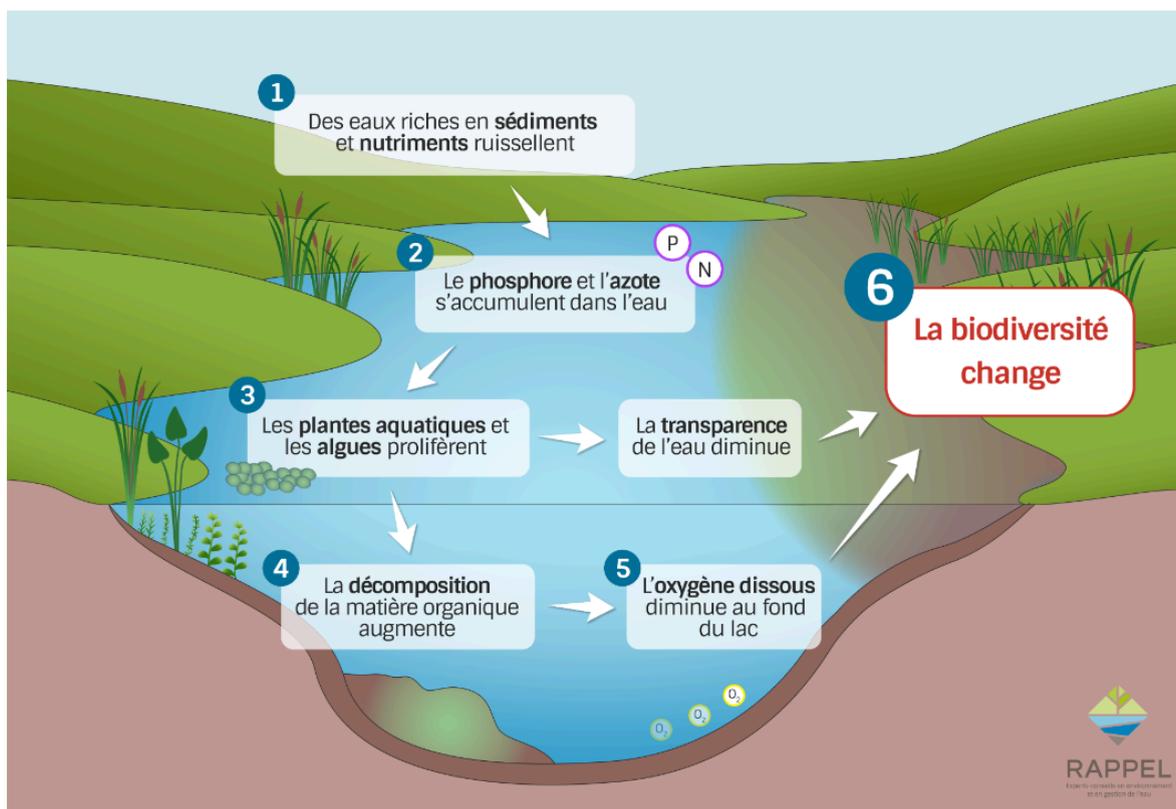


Schéma : Les étapes clés du processus d'eutrophisation des lacs

Figure 42 : Schéma de l'eutrophisation d'un lac (Source : RAPPEL, 2022)

L'eutrophisation est la raréfaction de l'oxygène présent dans l'eau. Elle se produit lorsque la température du lac dépasse un certain seuil et reste élevée. Cela permet à des plantes et des algues de se développer et de coloniser l'ensemble du lac si la température ne redescend pas. Ainsi, ces plantes se positionnent en surface et, tout en raréfiant l'oxygène, elles obstruent la lumière, empêchant sa pénétration au plus profond du lac. Sans oxygène et lumière, certaines plantes de fond meurent, tout comme la faune. Afin de prévenir ce phénomène et d'éviter qu'il ne surprenne la vallée, un suivi plus rigoureux de la température des lacs doit être mis en place pour alerter les habitants et limiter les conséquences environnementales. Ce phénomène pourrait se manifester à l'Estany del Clot, car ce lac est situé à une altitude suffisamment basse pour connaître un réchauffement des eaux significatif.

C- Perspective

Cette section présente dans un premier temps un état des lieux des sols. Ensuite, elle aborde les perspectives, tant climatiques que hydrologiques. Enfin, la troisième partie discute

des perspectives concernant l'avenir des autres stations, ainsi que du karst et de la qualité de l'eau.

1- Etat des lieux des sols

Tout d'abord, il est important de connaître l'état des nappes phréatiques après les deux dernières années exceptionnellement sèches, 2022 et 2023. En effet, le département des Pyrénées-Orientales a connu deux années particulièrement sèches en termes de pluviométrie (figure 43).

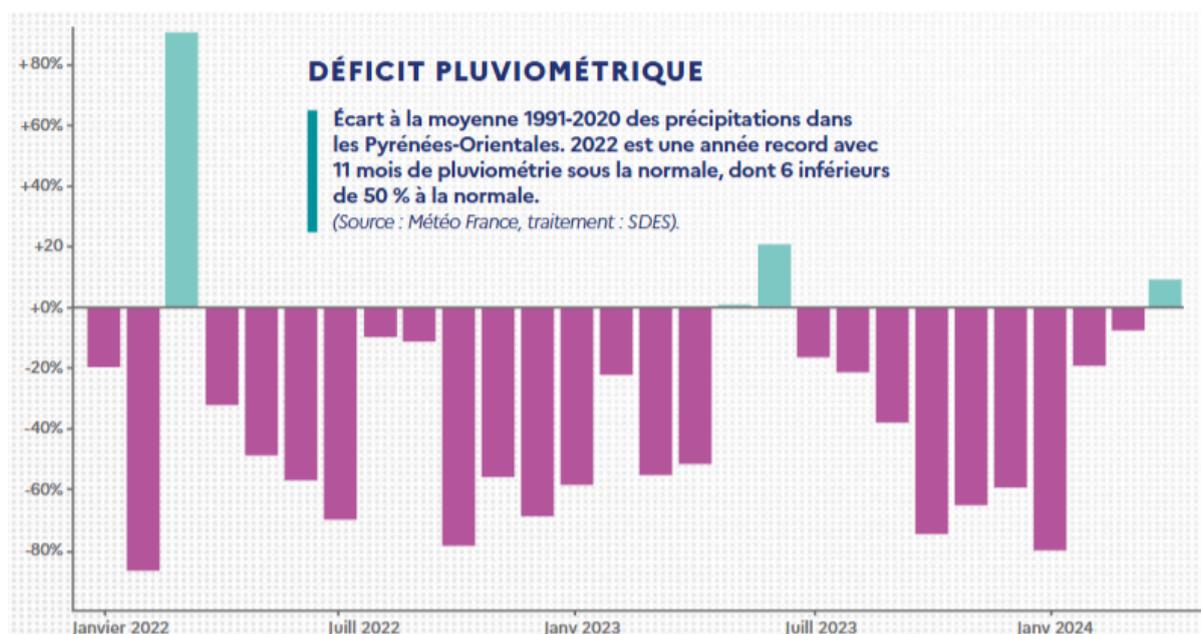


Figure 43 : Graphique du déficit pluviométrique sur le département des Pyrénées-Orientales (Source : Plan de résilience de l'eau, 2024)

Ce graphique met en évidence les deux années sèches qu'a vécues le département et ses habitants. Le déficit est considérable, provoqué par l'enchaînement des années sèches, combiné à l'intensité de la sécheresse. Le manque d'eau de pluie exerce une pression accrue sur les nappes phréatiques, qui constituent des réserves d'eau potable pour les populations. Ainsi, le tirage d'eau a augmenté, tant pour les besoins humains que pour la biodiversité. Le niveau piézométrique des nappes phréatiques a baissé de manière significative au cours des trois dernières années (figure 44).

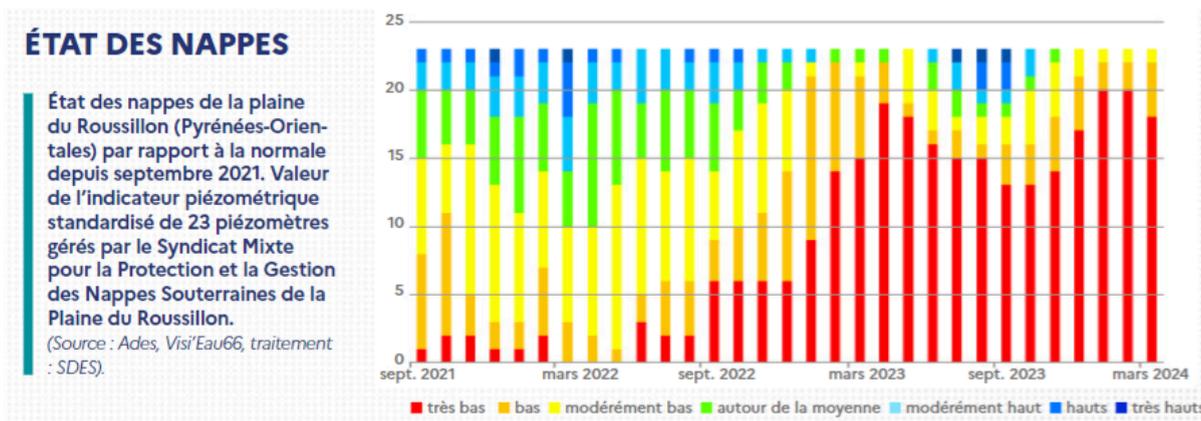


Figure 44 : Graphique indiquant l'évolution de 23 piézomètres depuis septembre 2021 (Source : Plan de résilience de l'eau, 2024)

Grâce à cette figure, on constate que les niveaux piézométriques des nappes ont chuté de manière significative en l'espace de trois ans. C'est à partir de septembre 2022 que le niveau « très bas » s'est propagé, affectant la majorité des nappes phréatiques. Auparavant, les niveaux de nappes se situaient dans la catégorie « modérément bas » ou « bas ». Toutes les nappes phréatiques du département ont vu leur niveau diminuer. Les conséquences de cette diminution pour les populations humaines se manifestent à la fois dans la qualité et la disponibilité de l'eau potable, mais aussi dans l'approvisionnement en eau d'arrosage pour l'agriculture (Plan de résilience de l'eau, 2024).

Pour les cours d'eau, les nappes phréatiques permettent plusieurs échanges, comme nous l'avons vu précédemment. La baisse des niveaux d'eau des nappes modifie ces échanges avec les cours d'eau. Ainsi, les rivières drainantes peuvent devenir des rivières infiltrantes, voire même des rivières déconnectées. Ce dernier phénomène peut entraîner l'absorption totale du cours d'eau superficiel, notamment si la rivière traverse un sol perméable. Ces modifications impactent directement notre étude, car nous avons observé que le Caillan traverse parfois des zones karstiques. Lors de ces passages, les échanges entre la rivière et les nappes sont les suivants : une rivière infiltrante lors des hautes eaux et une rivière drainante lors de l'étiage. La baisse continue des nappes pourrait modifier ces échanges, et la rivière infiltrante pourrait se généraliser, quel que soit la saison, voire même la rivière déconnectée. Cependant, comme les passages karstiques du Caillan sont relativement courts, la déconnexion peut se produire, et le cours d'eau peut s'assécher pendant les étiages dans ces sections, car l'infiltration de l'eau y est plus importante que l'eau présente dans le cours d'eau. Ce phénomène doit être pris en compte dans les années à venir, surtout si les nappes ne se rechargent pas. En outre, avec l'assèchement des nappes, les sols superficiels connaissent également une sécheresse accrue.

L'assèchement des sols est une donnée essentielle à prendre en compte dans notre étude. En effet, ces sols jouent un rôle crucial en tant que réservoirs d'eau pour toute la

biodiversité. Un déficit d'humidité des sols affecte également le cours d'eau, car il entraîne une augmentation de l'utilisation de l'eau par la biodiversité, à la fois sur le sol et dans le cours d'eau. Le Plan de résilience pour l'eau de 2024 met en évidence l'humidité des sols à l'échelle nationale (figure 45).

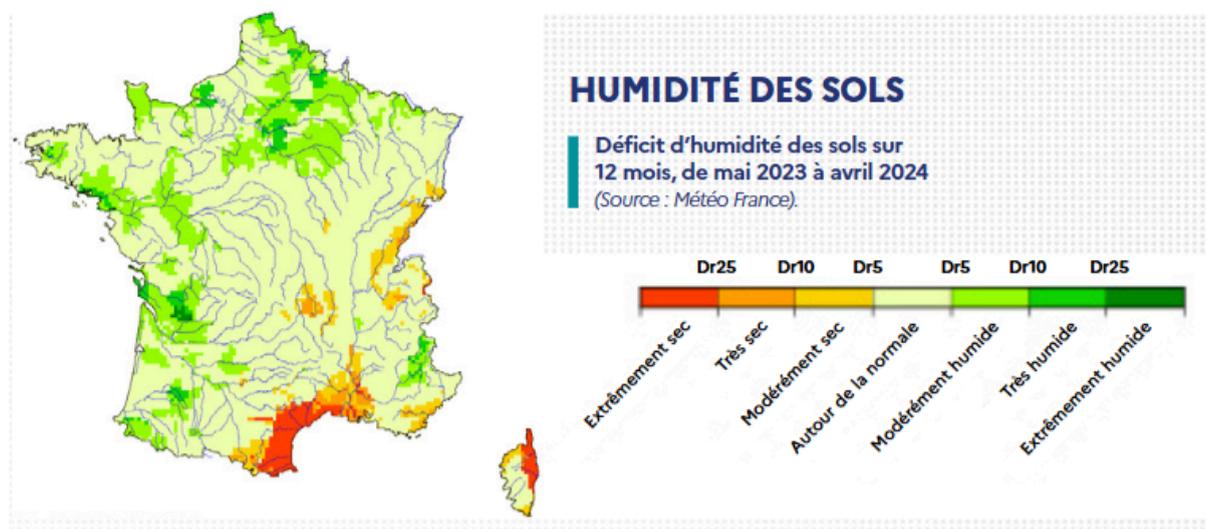


Figure 45 : Carte du déficit d'humidité des sols en France (Source: Plan de résilience de l'eau, 2024)

Cette carte illustre de manière très significative l'état actuel des sols dans les Pyrénées-Orientales. En effet, le département est représenté en rouge et orange foncé, indiquant des niveaux d'humidité parmi les plus bas possibles. La perte d'humidité est considérable et raréfie encore davantage l'eau de manière générale, exerçant des pressions importantes sur la flore, la faune et les sociétés humaines. Cette carte complète parfaitement l'étude menée par Lisa SICK en 2021.

Cette étude, intitulée « La rupture climatique de 1987 en France : quels effets sur l'humidité des sols ? », examine « les caractéristiques spatio-temporelles de l'humidité des sols à l'échelle de la France entre deux sous-périodes (1959-1987 et 1988-2019) ». Les deux périodes ont été comparées à travers un calcul qui met en évidence la perte ou le gain d'humidité du sol (figure 46).

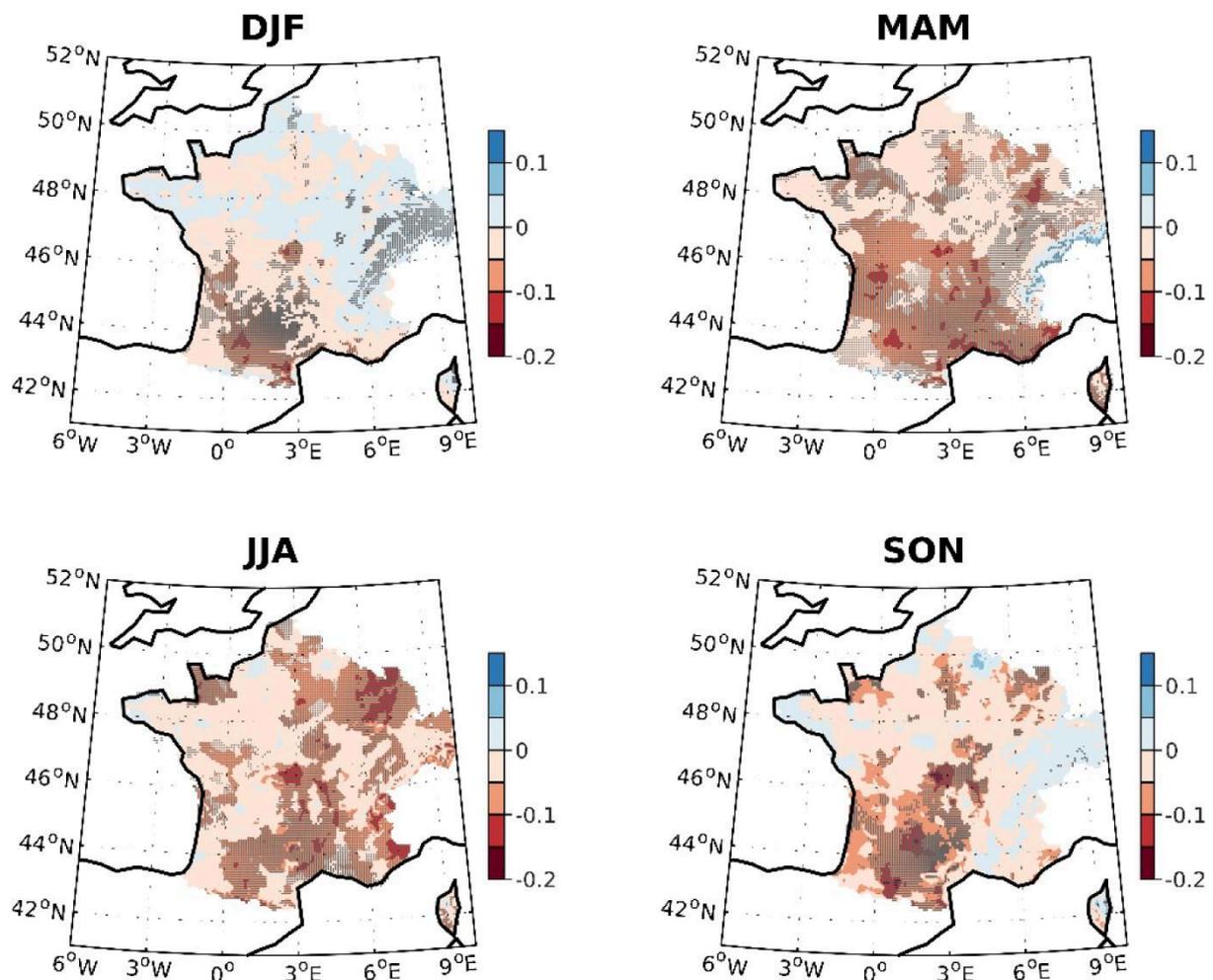


Figure 46 : Carte des différences d'humidité des sols en fonction des saisons entre 1959 à 1987 et 1988 à 2019 (Source : SICK, 2021)

Ces cartes montrent que les sols perdent davantage d'humidité pendant certaines saisons. L'automne et l'hiver sont les plus touchés dans les Pyrénées-Orientales, avec des coefficients de $-0,2$. Le printemps n'est pas épargné, avec une perte quantifiée à $-0,1$. Seule la période estivale reste stable autour de 0 à $-0,05$. Cette perte d'humidité des sols est une tendance générale en France selon les saisons, comme le révèlent les cartes (SINK, 2021). Toutefois, cet assèchement des sols exacerbe la pression sur la biodiversité en termes de disponibilité de l'eau, entraînant ainsi une pression supplémentaire sur les ressources en eau superficielles et souterraines.

Ces deux phénomènes liés aux sols doivent être pris en compte dès à présent, car leurs effets ne sont pas toujours visibles immédiatement. En effet, un assèchement progressif des sols se manifeste par des signes tels que le dépérissement des arbres ou l'appauvrissement progressif de la végétation. De plus, la baisse des niveaux piézométriques entraîne un changement dans les échanges entre la nappe phréatique et le cours d'eau, pouvant provoquer l'assèchement de certaines portions de rivière. Ces phénomènes prennent une importance accrue à la suite des deux années de sécheresse, 2022 et 2023, qui ont considérablement intensifié la pression sur les ressources en eau. Sur notre territoire d'étude, aucune donnée précise sur ces sujets n'est disponible. Une étude spécifique pourrait être réalisée pour évaluer

l'état actuel de l'eau dans le karst et de l'humidité des sols. Cette analyse offrirait un état des lieux des sols sur le bassin-versant du Caillan avant que les évolutions dues au changement climatique aggravent la situation.

Par ailleurs, le territoire abrite de nombreuses zones humides, dont l'impact de ces phénomènes pourrait provoquer de nouveaux défis. En effet, les tourbières présentes au Pla d'Amunt et à l'Estany del Clot risquent de se réduire à cause de l'augmentation des températures, de l'assèchement des sols et de la diminution des chutes de neige. Ces tourbières pourraient ainsi se dessécher au fil des années. Ce phénomène est particulièrement préoccupant car les tourbières jouent un rôle d'éponge naturel pour le bassin-versant, ralentissant l'écoulement des précipitations et réduisant les risques de crues (AGENCE DE LA BIODIVERSITÉ, 2013).

2- Le changement climatique

Le changement climatique est analysé par le GIEC, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, à travers cinq scénarios possibles. Le premier scénario prévoit une augmentation de +1,5°C de la température moyenne terrestre, tandis que le dernier scénario anticipe une hausse d'environ +4°C (GIEC, 2023). Les autres scénarios situent les augmentations de température entre ces deux valeurs. Le rapport met en évidence les divers impacts du réchauffement climatique sur le climat, notamment l'augmentation et la variabilité des précipitations (GIEC, 2023). À partir de ces scénarios, l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC) a sélectionné trois d'entre eux sous le nom de RCP, qui signifie "Representative Concentration Pathways" (figure 47).

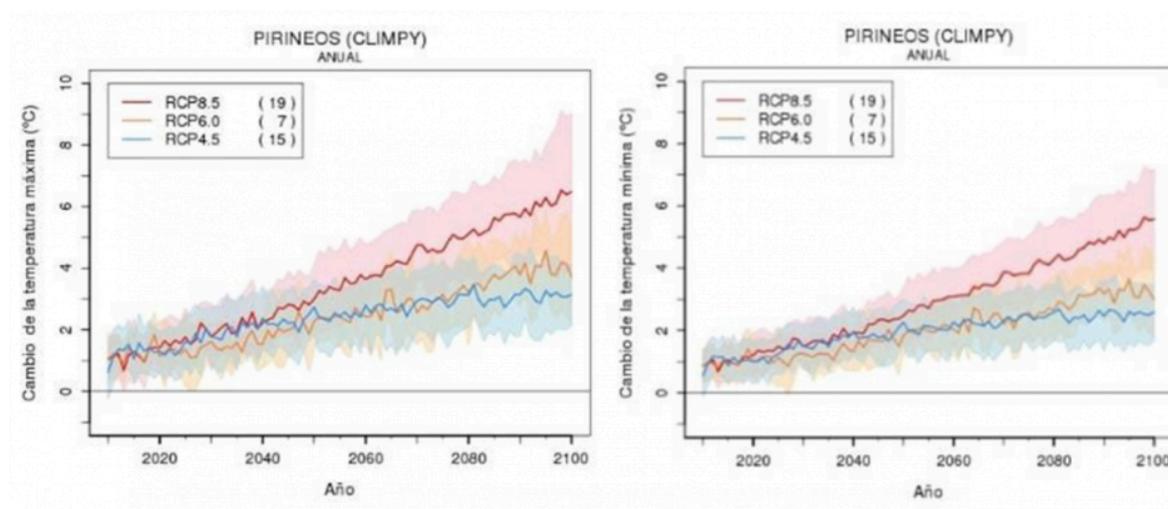


Figure 47 : Graphique des 3 scénarios prévisionnels retenus par l'OPCC jusqu'en 2100 (Source : OPCC)

Ces graphiques montrent l'évolution des températures maximales et minimales prévues jusqu'en 2100. Sur le site de l'OPCC, un géoportail a été mis en place pour visualiser l'évolution des précipitations en fonction de deux scénarios : RCP 4.5 et RCP 8.5. D'ici 2050, les précipitations sur la réserve naturelle de Nohèdes et de Conat devraient diminuer de

10 % par rapport à la moyenne annuelle. En 2050, l'évolution des précipitations variera selon les saisons. En hiver et au printemps, elles baisseraient de 30 à 10 %. En été, la diminution serait comprise entre 0 et -10 %. En automne, les précipitations augmenteraient de 0 à 10 % (OPCC GEOPORTAL, 2020). À partir de ces prévisions de précipitations et de températures pour 2050, un graphique basé sur les moyennes mensuelles de ces données permet de visualiser l'évolution du climat de la réserve (figure 48).

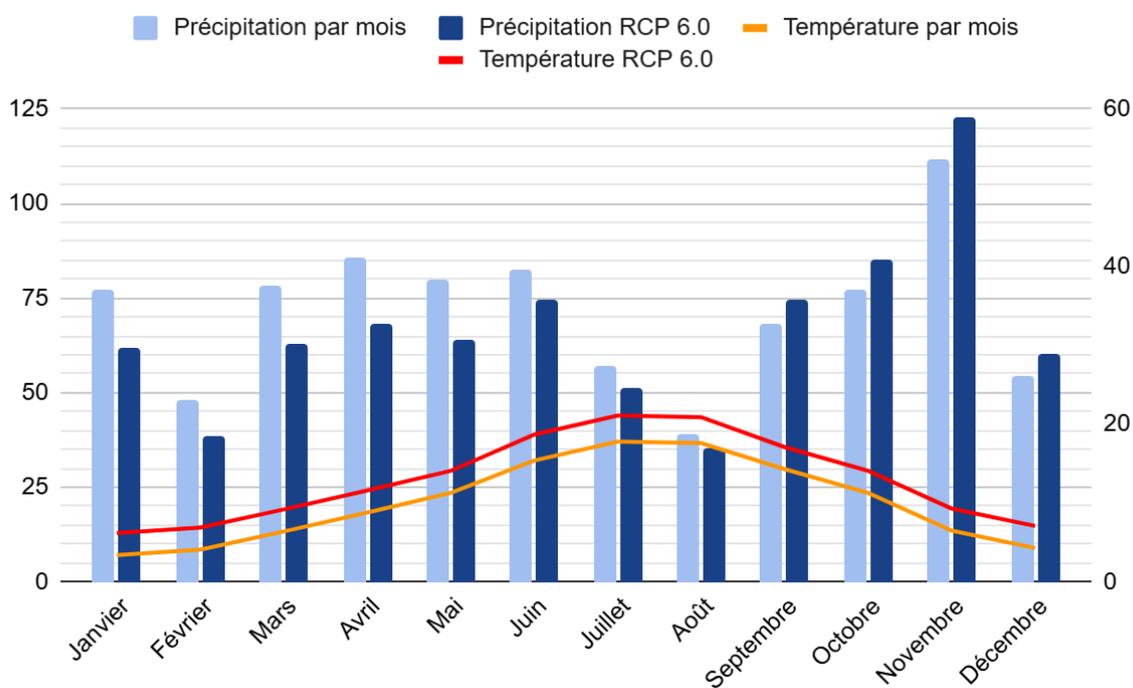


Figure 48 : Diagramme ombrothermique du climat de Nohèdes comparant le RCP 6.0 pour 2050 et les données actuelles (réalisé par B.Crouzil, 2024)

Ce diagramme ombrothermique compare le climat actuel de Nohèdes avec celui prévu pour 2050. Ce que l'on remarque immédiatement, c'est que la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations. Les prévisions indiquent qu'à partir de 2050, le mois d'août deviendra de plus en plus souvent un mois sec. Ce déficit de précipitations pourrait s'étendre aux mois de juillet et de septembre, qui pourraient également connaître des périodes de sécheresse. Ainsi, d'ici 2050, le climat de Nohèdes tend vers un climat plus méditerranéen, caractérisé par un manque de précipitations en été et de fortes pluies en automne. Il est également important de prendre en compte la variabilité des précipitations dans ces prévisions, notamment l'intensité des pluies. Avec le changement climatique, les précipitations pourraient devenir beaucoup plus intenses, pouvant cumuler les pluies d'une saison en une seule fois, suivi d'une période de sécheresse (GIEC, 2023). Cette inversion entre les températures et les précipitations caractérise le climat méditerranéen. Dans les annexes, des diagrammes ombrothermiques d'autres villes, ayant des climats différents, sont présentés. Il est notable que le climat méditerranéen se définit par une période sèche en été, avec cette inversion entre les précipitations et les températures.

Ces scénarios auront également un impact sur les débits des cours d'eau pyrénéens. Une étude du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), intitulée PIRAGUA, indique que les débits annuels perdront 15 % de leur écoulement d'ici 2040 (BRGM, 2023) (figure 49).

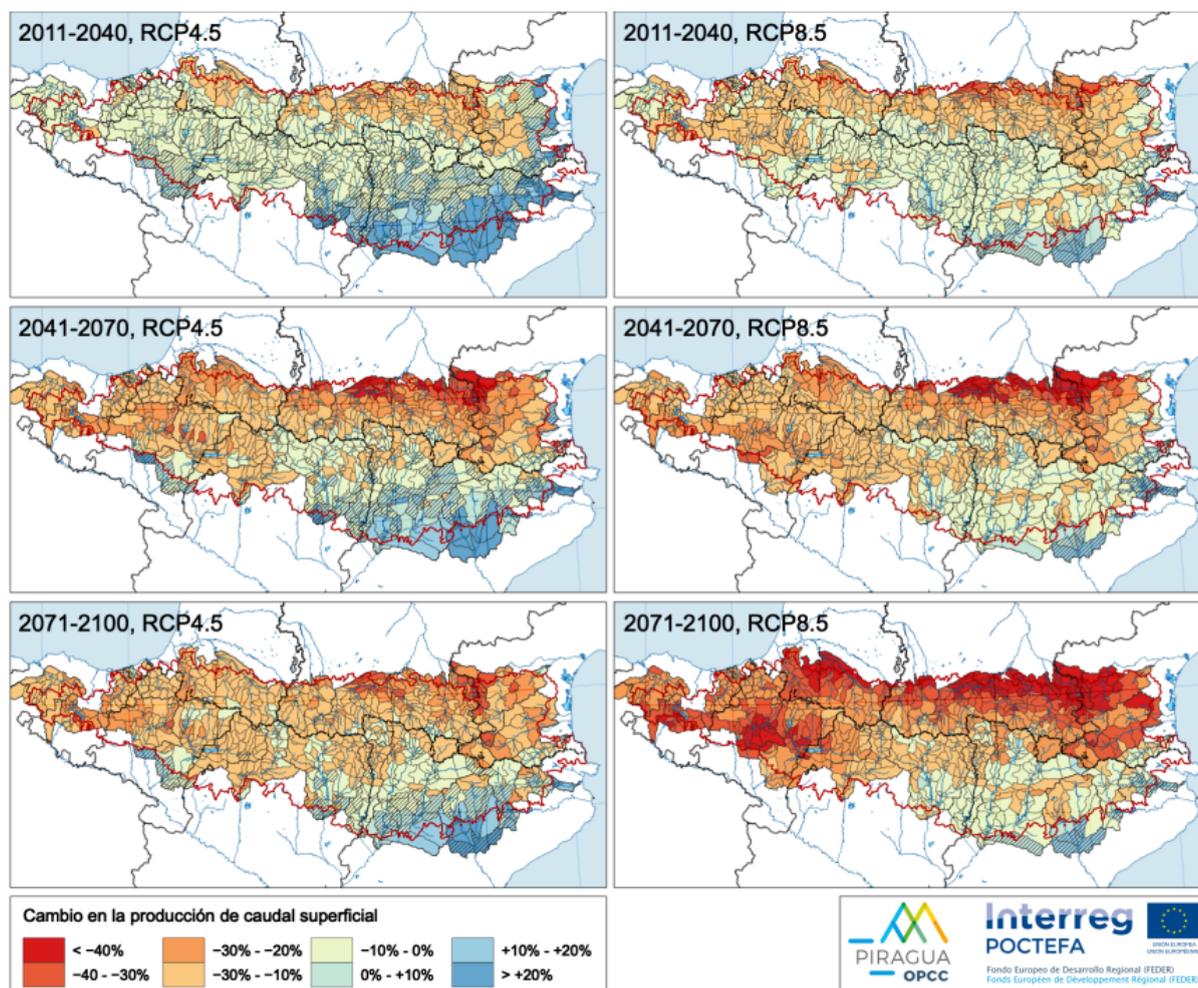


Figure 49 : Cartes de l'étude PIRAGUA montrant la perte des débits dans les Pyrénées (BRGM, 2023)

Ces cartes montrent l'évolution des débits à travers deux scénarios : le RCP 4.5 et le RCP 8.5. On peut observer que, pour le scénario RCP 4.5, la perte des débits est plus importante dans le nord-est du massif que dans d'autres régions. En revanche, le scénario RCP 8.5 prévoit une baisse significative des débits pour l'horizon 2100, avec une perte de 30 à 40 % des débits. Les prévisions pour 2040 indiquent une perte de 15 %. Nos données confirment qu'en fonction de l'altitude, la perte de débit varie. Par exemple, la perte de débit au Clot est de 14 %, tandis qu'à Betllans, elle est de 16,7 %. Ces chiffres correspondent aux prévisions pour 2040. Toutefois, pour valider ces informations, il est nécessaire de poursuivre les suivis et de continuer à traiter les données afin d'enrichir la base de données.

3- Les discussions pour la réserve

Au cours de l'étude, nous avons constaté plusieurs manques de connaissances, dus à l'absence d'appareils ou d'études spécifiques. Cette section a pour objectif d'expliquer ces lacunes afin que la réserve puisse progresser sur ces sujets.

Le premier objectif est de mettre en place des stations météorologiques affiliées à la réserve ou à la mairie, afin d'avoir un accès direct aux données, sans avoir besoin de conventions. De plus, le choix de l'emplacement des stations sera étudié pour trouver les meilleurs sites. Ces stations permettent de recueillir des données plus fiables. En outre, l'installation d'une seconde station à Conat permettrait de couvrir tout le territoire d'étude. La station de Formiguères pourrait compléter le jeu de données pour les hautes altitudes. Ce quadrillage du territoire améliorerait le modèle Aurelhy, afin d'obtenir un modèle complet utilisable pour les scénarios de l'OPCC.

Le second objectif concerne la gestion des stations limnimétriques. Lors du stage, nous nous sommes concentrés sur les stations du Répartiteur et de Betllans. Les stations de la Millada et de Torrelles ont été mises à jour jusqu'à ce que Torrelles soit retirée. La réserve ne peut pas entretenir efficacement toutes ces stations sans créer un nouveau poste dédié à l'eau dans la vallée, en collaboration avec la réserve de Conat. L'avenir des stations de la Millada et de Conat doit être étudié pour déterminer si la réserve poursuivra ou non leur suivi.

Le troisième objectif est de mettre en place un suivi constant de la température de l'eau de l'Estany del Clot et du Gorg Estelat, afin de suivre l'évolution des températures et prévenir une éventuelle eutrophisation des lacs.

Le quatrième objectif est de mener une étude sur la qualité de l'eau. En lien direct avec l'eutrophisation des lacs, la qualité de l'eau est essentielle pour le bien-être de la biodiversité, notamment du Desman des Pyrénées. Cette étude se concentrerait sur la qualité chimique de l'eau. Elle permettrait d'obtenir une évaluation globale de l'état chimique de l'eau.

Le cinquième objectif est de réaliser une nouvelle étude sur le karst. Ce karst soulève de nombreuses questions, notamment concernant les résurgences de l'eau. Nous ne savons pas exactement où l'eau infiltrée ressort. Une étude utilisant la fluorescéine serait à envisager sur le karst du mont Coronat. De plus, une étude sur le potentiel d'infiltration des précipitations et des eaux du cours d'eau serait bénéfique pour mieux comprendre les pertes d'eau dans le bassin-versant et leurs impacts sur les bilans hydriques futurs. Ces données, combinées avec le modèle Aurelhy et les informations issues des stations météorologiques, permettraient d'élaborer des bilans hydriques plus précis.

Ces différents objectifs seront discutés par la réserve. Cependant, nous avons pu constater que la ressource en eau tend à se raréfier. Dans les décennies à venir, les habitants et les acteurs de la vallée vivront cette baisse. Afin de s'adapter à cette future pénurie d'eau, un

plan de gestion de l'eau pourrait être mis en place, impliquant les habitants, les mairies, les réserves, ainsi que les acteurs économiques du territoire, tels que la microcentrale et les maraîchers. Ce plan de gestion consisterait à définir et à faire respecter des débits réservés sur les cours d'eau où ils sont actuellement absents. Les jardins du village ne pourront pas être arrosés par le canal toute l'année, mais la récupération des eaux de pluie pourrait être un moyen de faire face durant les périodes chaudes. Il sera nécessaire d'accepter l'assèchement des canaux durant les périodes d'étiage. Par exemple, les maraîchers présents sur le territoire devront revoir leurs pratiques d'irrigation. Une irrigation nocturne, plutôt qu'en plein jour pendant les fortes chaleurs, pourrait être plus bénéfique pour les plantes. En effet, l'irrigation pendant les fortes chaleurs entraîne d'importantes pertes dues à l'évapotranspiration. L'installation de systèmes de goutte à goutte permettrait d'arroser les plantes aux moments les plus propices, en optimisant l'utilisation de l'eau disponible. Lorsque la température atteint un certain seuil, les plantes se replient pour économiser de l'eau et éviter une perte excessive. Dès lors, un arrosage durant cette période serait inutile. Il serait plus judicieux de créer un environnement rafraîchissant, par exemple en utilisant de l'ombrage, afin de réduire l'impact de la chaleur. Un arrosage basé sur le fonctionnement naturel des plantes, avec des arrosages le soir et le matin, permettrait de maximiser l'absorption d'eau tout en limitant les pertes d'eau.

L'objectif de ce plan de gestion serait de maximiser l'utilisation de l'eau tout en économisant cette ressource précieuse. L'objectif de cette démarche est d'alerter les lecteurs sur le futur de la ressource en eau et d'amorcer un changement de pratiques pour les années à venir, afin que la vallée continue à se développer de manière durable, bénéfique à la fois pour la société et pour la biodiversité.

Conclusion

En résumé, cette étude permet de mettre en évidence les tendances actuelles sur le bassin-versant. Tout d'abord, bien que les données sur les précipitations soient peu fiables, une tendance générale à l'augmentation des précipitations a été observée entre 1955 et 2018. La température a globalement baissé, mais une augmentation progressive est apparue depuis les années 2010. La quantité de neige dans les Pyrénées, entre 1958 et 2017, a diminué à 1 500 m et à 2 100 m d'altitude. Cette diminution est plus marquée à 2 100 m, car la neige est plus présente à cette altitude qu'à 1 500 m (LOPEZ MORENO, 2020).

Lors de l'étiage, les pertes d'eau peuvent être nulles ou minimales, tandis que pendant les périodes de hautes eaux, les pertes sont plus importantes. Cette différence dépend du niveau piézométrique de la nappe phréatique. Selon la hauteur d'eau de la nappe et du cours d'eau, les échanges entre le karst et la rivière peuvent s'inverser, passant d'une rivière infiltrante à une rivière drainante. Depuis 2012, le régime hydrologique du cours d'eau du Caillan est clairement nivo-pluvial. Le cours d'eau entre parfois en crue de manière spectaculaire, comme cela a été le cas en janvier 2020 avec la tempête Gloria, qui a influencé la morphologie du cours d'eau à Betllans. Cet événement est crucial pour la compréhension des débits futurs du cours d'eau. L'actualisation de la courbe de tarage et les jaugeages effectués après cet événement confirment ce changement. De plus, ce n'est pas le seul changement visible sur le bassin-versant. La courbe de tarage de la station du Répartiteur suit une tendance similaire, bien que moins marquée qu'à Betllans. Globalement, la tendance des débits montre une baisse annuelle. À ce titre, le Clot enregistre une baisse de 14 % et Betllans de 16,7 %. Les pertes mensuelles les plus importantes se produisent pendant la période des hautes eaux, tandis que la période hivernale voit une légère augmentation des débits. En comparaison, des rivières telles que l'Angoustrine et la Neste du Luron présentent des pertes annuelles de débits inférieures, notamment l'Angoustrine, qui enregistre une perte inférieure à 10 %, et la Neste du Luron, qui affiche une perte annuelle supérieure à 700 m d'altitude. Cette comparaison met en évidence que la perte de débit est plus marquée en altitude. La température de l'eau connaît également une augmentation, surtout en hiver, avec des hausses pouvant atteindre 1°C sur certains mois dans les deux stations. Cette augmentation de la température pourrait contribuer au phénomène d'eutrophisation des lacs.

Depuis plusieurs décennies, les sols des Pyrénées-Orientales se sont considérablement asséchés, tout comme les nappes phréatiques, dont le niveau piézométrique a diminué de manière significative. Ces phénomènes se produisent dans un contexte de changement climatique, qui prévoit une augmentation de la température et une nouvelle répartition des précipitations, marquée par une fréquence accrue des événements intenses. Les prévisions concernant les débits annoncent une baisse générale de 15 % des débits annuels d'ici 2040. Nos résultats montrent que cette perte de débits est déjà en cours. La continuité du suivi hydrologique permettra de savoir si cette tendance se maintient autour de 15 %, ou si elle connaît une augmentation ou une diminution. Par conséquent, la réserve et la vallée devront s'adapter à cette diminution future de l'eau grâce à une meilleure connaissance des cours d'eau, de la météorologie, de la géologie, et un effort collectif en matière de gestion de l'eau.

En conclusion, ce rapport met en lumière l'évolution hydrologique de la vallée. Globalement, cette tendance est à la baisse, malgré une climatologie contradictoire, avec une diminution des températures et une augmentation des précipitations depuis 1955. Cependant, la fiabilité des données reste discutable, et la présence de neige dans les Pyrénées diminue. En prenant en compte les données de l'EDF, qui remontent à 2010, on observe une augmentation des températures et une diminution des précipitations. Les débits suivent également cette tendance à la baisse, avec une perte de 14 % pour le Répartiteur et de 16,7 % pour Betllans.

Ce phénomène se déroule dans un contexte de sécheresse marquée, ce qui entraîne une baisse du niveau piézométrique des nappes phréatiques et un assèchement progressif des sols. Les années 2022 et 2023 ressortent particulièrement dans les données relatives aux températures de l'eau, aux débits, aux précipitations et aux températures de l'air. Ces deux années sont soit au-dessus des moyennes pour les températures de l'air et de l'eau, soit en dessous pour les débits et les précipitations. Les conclusions définitives concernant 2024 devront attendre la fin de l'année.

La situation de sécheresse et la diminution des débits révèlent une tendance à la raréfaction des ressources en eau dans les années à venir. Les températures continueront d'augmenter, les précipitations vont diminuer, et leur répartition changera avec une augmentation de la fréquence des événements violents. Ces changements réduiront encore davantage les chutes de neige sur le bassin-versant, aggravant la diminution de la présence de l'eau, notamment au niveau des nappes, de l'humidité des sols et des débits.

Cette baisse généralisée des ressources en eau aura un impact direct sur la biodiversité et les villages de la vallée, nécessitant une gestion optimisée de l'eau et le respect des débits réservés. À long terme, des changements importants sont à prévoir, comme la disparition de l'Estany del Clot en raison de l'évaporation et de l'eutrophisation. Ces évolutions se produiront sur des périodes moyennes à longues.

Il est donc essentiel que les habitants et les acteurs du territoire commencent dès maintenant à s'adapter à ces changements. Il est préférable de prendre des mesures préventives plutôt que de réagir aux phénomènes une fois qu'ils sont survenus, car les conséquences seront alors beaucoup moins sévères.

Bibliographie

Publication scientifique :

Andrieu-Ponel V., Hubschman J., Jalut G., Héraïl G., 1988, « Chronologie de la déglaciation des Pyrénées françaises. Dynamiques de sédimentation et contenu pollinique des paléolacs; application à l'interprétation du retrait glaciaire », Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire, vol 25, n°2-3, p. 55-67; DOI : <https://doi.org/10.3406/quate.1988.1866>

Jalut G., 1983, La transition tardiglaciaire-postglaciaire dans les Pyrénées méditerranéennes et atlantiques, Colloque International du CNRS, CNRS, Montpellier, 103-106 p, [en ligne] DOI : 10.4000/books.editions-cnrs.945

Le Coz J. Renard B., Bonnifait L., Le Boursicaud R., Branger F., Mansanarez V., 2014, Guide pratique de la méthode BaRatin pour l'analyse des courbes de tarage et leurs incertitudes, INRAE, consulté le 28/06/2024, [en ligne] URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02601038v1/document#page=12.14>

López Moreno JI., Soubeyroux JM., Gascoin S., Alonso-gonzalez E., Durán-gómez N., Lafaysse M., Vernay M., Carmagnola C., Morin S., 2020, Long-term trends (1958-2017) in snow cover duration and depth in the Pyrénées, International Journal of Climatology, consulté le 10/08/2024, [en ligne] URL : <https://hal.science/hal-02552904>

Quélenec C., coord., 2022, Diagnostic de vulnérabilité. Démarche d'adaptation au changement climatique des réserves naturelles du massif du Madres-Coronat, Conat, Jujols, Nohèdes. Rapport d'étude. Prades, Fédération des réserves naturelles catalanes, 58 p.

Sick L., Ullmann A., Roucou P., 2021, La rupture climatique de 1987 en France : quels effets sur l'humidité des sols ?, *Climatologie*, Ecoscience, Volume 18, [en ligne] URL : https://climatology.edpsciences.org/fr/articles/climat/full_html/2021/01/climat20211805/climat20211805.html#ack ; DOI : <https://doi.org/10.1051/climat/202118005>

Rapports institutionnels :

Ball C., 2016, *Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin-versant de la vallée de Nohèdes*, Mémoire d'élève ingénieur, École polytechnique universitaire de Montpellier, 29 p.

Cuxac N., 2019, *Contribution à l'établissement du bilan hydrologique du bassin-versant de Nohèdes*, Mémoire de Master 2 « Science de la mer », Parcours « Géosciences marines et environnements aquatiques », Université de Perpignan, 45 p.

Ducroix P., 2009, *Caractérisation des échanges hydriques entre le karst du Mont Coronat et la rivière de Nohèdes*, Mémoire d'élève ingénieur, École polytechnique universitaire de Montpellier, 40 p.

GIEC, 2023, *Changement climatique 2023 : Rapport de synthèse*, GIEC, Genève, 184 p, DOI : 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

OPCC, 2024, *Les projections pour le climat futur*, *Observatoire pyrénéen du changement climatique*, consulté le 10/08/2024, [en ligne] URL: <https://www.lacs-sentinelles.org/fr/pages/lacs-altitude/se-forme-lac-montagne>

OPCC Géoportail, 2020, *Carte interactive avec les différents scénarios*, *Observatoire pyrénéen du changement climatique*, consulté le 10/08/2024, [en ligne] URL : <https://opcc-ctp.org/fr/geoportal>

Rocheteau D., 2017, *Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin-versant de la vallée de Nohèdes et de Conat*, Mémoire d'élève ingénieur, École polytechnique universitaire de Montpellier, 42 p.

Rio M., 2015, *Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin-versant de la vallée de Conat et de Nohèdes*, Mémoire d'élève ingénieur, École polytechnique universitaire de Montpellier, 50 p.

Servière M., 2010, *Fonctionnement du réseau hydrique de Nohèdes : Élaboration d'un protocole de suivi hydrologique de la rivière de Nohèdes*, Rapport d'élève ingénieur, École Polytechnique Universitaire de Montpellier, 88 p.

Site internet :

Agence régionale de la biodiversité, 2013, *Les tourbières*, Centre-Val-de-Loire, consulté le 14/08/2024, [en ligne] URL : <https://www.biodiversite-centrevalde Loire.fr/decouvrir/la-biodiversite-en-centre-val-de-loire/g-rands-milieus-et-especes-associees/milieus-aquatiques-et-humides/zones-humides/les-tourbi-eres>

BRGM, 2023, *PIRAGUA : une diminution du débit es rivières des Pyrénées jusqu'à 15 % d'ici 2040*, consulté le 01/08/2024, [en ligne] URL : <https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/piragua-diminution-debit-rivieres-pyrenees-ju-squ-15-ici-2040>

Climate Data, Climat Toulouse, 2024, consulté le 12/10/2024, [en ligne] URL : <https://fr.climate-data.org/europe/france/midi-pyrenees/toulouse-341/>

Climate Data, Climat Montpellier, 2024, consulté le 12/10/2024, [en ligne] URL : <https://fr.climate-data.org/europe/france/languedoc-roussillon/montpellier-1126/>

Climate Data, Climat Perpignan, 2024, consulté le 12/10/2024, [en ligne] URL : <https://fr.climate-data.org/europe/france/languedoc-roussillon/perpignan-6339/>

Eau France, Site hydrométrique - Y002 5010 01 : Le Riu Rahur [L'Angoustrine] à Angoustrine-Villeneuve-des-Escalades - Fiche d'identité, *Hydroportail*, 2021, consulté le 10/10/2024, [en ligne] URL : <https://www.hydro.eaufrance.fr/stationhydro/Y002501001/fiche>

Eau France, Site hydrométrique-O016 4340 : La Neste du Louron Arreau [Louron]-Fiche d'identité, *Hydroportail*, 2021, consulté le 10/10/2024, [en ligne] URL : <https://www.hydro.eaufrance.fr/sitehydro/O0164340/fiche>

Fédération des réserves naturelles catalanes, 2024, Le site officiel, consulté le 14/05/2024, [en ligne] URL : <https://www.reserves-naturelles-catalanes.org/la-frnc/>

Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, 2024, Plan de résilience pour l'eau dans les Pyrénées-Orientales, *France Nation Verte*, consulté le 19/10/2024, [en ligne], URL : https://www.pyrenees-orientales.gouv.fr/contenu/telechargement/40760/320940/file/22.05.2024_PLAN_EAU_Pyrenees.pdf

Prévot C., 2008, L'évapotranspiration, Eduterre, Institut Français de l'éducation, consulté le 15/08/2024, [en ligne] URL : <https://eduterre.ens-lyon.fr/ressources/scenarioeau/pagesscenarioeau/levapotranspiration>

Rappel, L'eutrophisation : comment ça marche ?, Article de vulgarisation, 2022, consulté le 19/09/2024, [en ligne] URL : <https://rappel.qc.ca/leutrophisation-comment-ca-marche/>

Réserve Naturelle de Nohèdes, 2024, Le site de l'association gestionnaire de la réserve naturelle nationale de Nohèdes, consulté le 14/05/2024, [en ligne] URL : <http://www.nohedes-nature.org/>

Liste des figures

Figure 1 : Carte de présentation de la réserve naturelle de Nohèdes (Source : FRNC).....	7
Figure 2 : Carte du territoire d'étude (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	8
Figure 3 : Carte géologique du territoire d'étude (CUXAC, 2019).....	9
Figure 4 : Carte des stations limnimétriques du bassin-versant (réalisé par B.Crouzil, 2024)	11
Figure 5 : Photos de la station limnimétrique du Clot et d'une sonde OTT Orpheus Mini (réalisé par B.Crouzil, 2024)	12
Figure 6 : Photos du fichier d'obtention des débits	14
Figure 7 : Courbe de tarage de Betllans avec les points de jaugeages sur Hydraccess	15
Figure 8 : Courbe de tarage de Betllans réalisée sur BaRatin	15
Figure 9 : Graphique des précipitations moyennes mensuelles de 1955 à 2004 (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	19
Figure 10 : Graphique des précipitations moyennes annuelles de 2010 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)	20
Figure 11 : Graphique de l'évapotranspiration réelle moyenne sur Nohèdes depuis 2010 (réalisé par B.Crouzil, 2024)	21
Figure 12 : Graphique des températures moyennes annuelles et la courbe de tendance à Nohèdes de 1958 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)	22
Figure 13 : Graphique des températures moyennes à Nohèdes de 2010 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024)	23
Figure 14 : Carte du modèle Aurelhy (CUXAC, 2019)	24
Figure 15 : Diagramme ombrothermique de 1958 à 2004 (réalisé par B.Crouzil, 2024)	25
Figure 16 : Diagramme ombrothermique de 2010 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	25
Figure 17 : Tableau de la durée moyenne et de l'épaisseur du manteau neigeux dans les Pyrénées (Source : Lopez Moreno <i>et al</i> , 2020)	27
Figure 18 : Graphique représentant la durée et l'épaisseur du manteau neigeux à 1 500 m et 2 100 m (Source : Lopez Moreno <i>et al</i> , 2020)	28
Figure 19 : Schéma d'une rivière drainante (DUCROIX, 2009).....	29

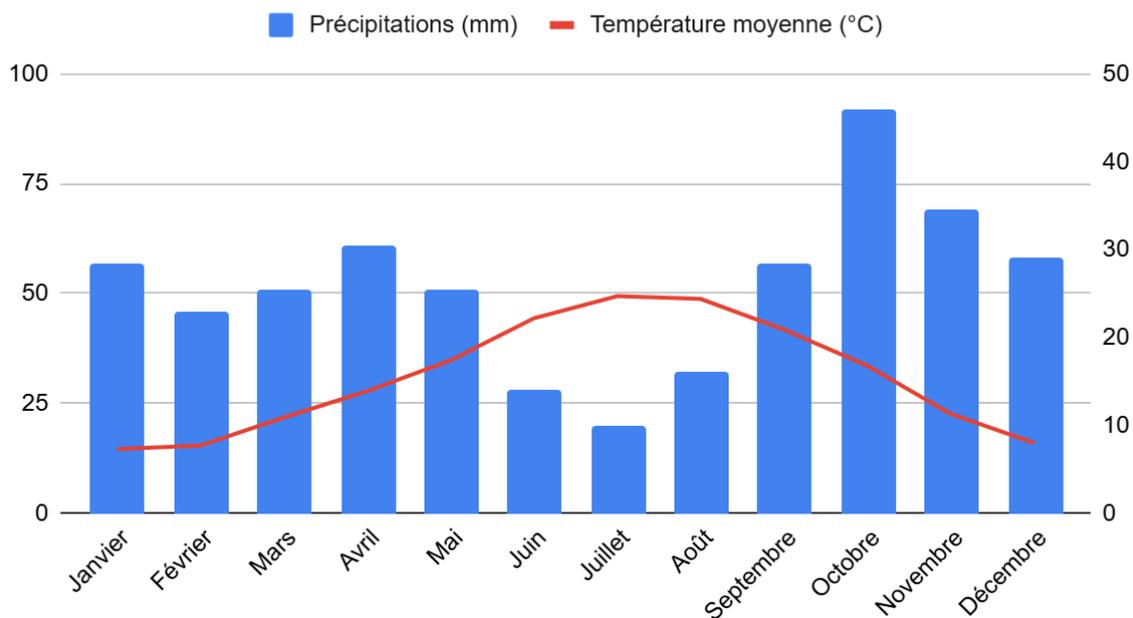
Figure 20 : Schéma d'une rivière de type infiltrante (DUCROIX, 2009).....	30
Figure 21 : Courbe de tarage actualisée de la station du répartiteur (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	31
Figure 22 : Photo de la décrue de la tempête Gloria en janvier 2020 (prise par M. Morichon David, 2020).....	32
Figure 23 : Courbe de tarage de Betllans par le logiciel Hydraccess (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	33
Figure 24 : Graphique du régime hydrologique du Caillan à la station de Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024)	34
Figure 25 : Graphique du régime hydrologique du Caillan à la station du Répartiteur (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	35
Figure 26 : Graphique de la comparaison des régimes hydrologiques de la station du Répartiteur (réalisé par B.Crouzil, 2024)	36
Figure 27 : Graphique sur les différences du régime hydrologique du Répartiteur (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	37
Figure 28 : Graphique des débits moyens annuels sur la station du Clot (réalisé par B.Crouzil, 2024)	38
Figure 29 : Graphique de la comparaison des régimes hydrologiques de la station de Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	39
Figure 30 : Graphique sur les différences du régime hydrologique de Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	40
Figure 31 : Graphique des débits annuels à la station de Betllans de 2011 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	41
Figure 32 : Graphique de la comparaison des régimes hydrologiques de l'Angoustrine (réalisé par B.Crouzil, 2024)	42
Figure 33 : Graphique sur les différences du régime hydrologique de l'Angoustrine (réalisé par B.Crouzil, 2024)	43
Figure 34 : Graphique des débits annuels de l'Angoustrine de 2008 à 2023 (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	44
Figure 35 : Graphique des débits moyens annuels de la Neste du Louron à Arreau de 2012 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	45

Figure 36 : Graphique de l'évolution annuelle de température de la station limnimétrique du Clot de 2015 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	46
Figure 37 : Graphique des températures moyennes annuelles du Clot de 2015 à 2024 (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	47
Figure 38 : Graphique sur les pourcentages d'augmentation et de régression de la température de l'eau à la station du Clot (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	48
Figure 39 : Graphique des températures moyennes mensuelles à Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	49
Figure 40 : Graphique des températures moyennes annuelles à Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	49
Figure 41 : Graphique des pourcentages d'augmentation et de régression de la température de l'eau à Betllans (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	50
Figure 42 : Schéma de l'eutrophisation d'un lac (Source : RAPPEL, 2022).....	51
Figure 43 : Graphique du déficit pluviométrique sur le département des Pyrénées-Orientales (Source : Plan de résilience de l'eau, 2024).....	52
Figure 44 : Graphique indiquant l'évolution de 23 piézomètres depuis septembre 2021 (Source : Plan de résilience de l'eau, 2024).....	53
Figure 45 : Carte du déficit d'humidité des sols en France (Source: Plan de résilience de l'eau, 2024).....	54
Figure 46 : Carte des différences d'humidité des sols en fonction des saisons entre 1959 à 1987 et 1988 à 2019 (Source : SICK, 2021).....	55
Figure 47 : Graphique des 3 scénarios prévisionnels retenus par l'OPCC jusqu'en 2100 (Source : OPCC).....	56
Figure 48 : Diagramme ombrothermique du climat de Nohèdes comparant le RCP 6.0 pour 2050 et les données actuelles (réalisé par B.Crouzil, 2024).....	57
Figure 49 : Cartes de l'étude PIRAGUA montrant la perte des débits dans les Pyrénées (BRGM, 2023).....	58

Annexes

Annexe 1 :

Diagramme ombrothermique de Perpignan



Annexe 2 :

Diagramme ombrothermique de Montpellier

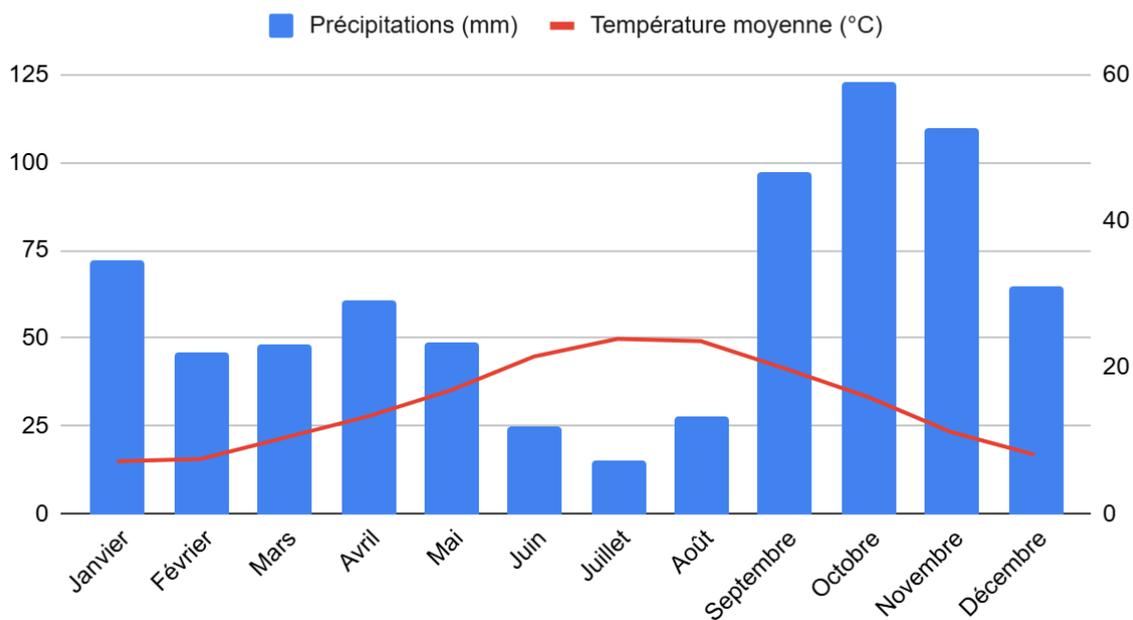


Diagramme ombrothermique de Toulouse

