

Université de Perpignan Via Domitia

**Master 2 « Sciences de la Mer »
Parcours « Géosciences Marines et Environnements Aquatiques (GMEA) »**

Contributions à l'établissement du bilan hydrologique du bassin versant de Nohèdes



CUXAC Nicolas

Année universitaire 2018-2019

Sous la direction de : Mr MANGEOT Alain
(Conservateur de la Réserve Naturelle Nationale de Nohèdes)

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport de fin d'étude.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon responsable de stage, M. MANGEOT Alain, Conservateur de la Réserve Naturelle Nationale de Nohèdes, pour son accueil, sa disponibilité et le partage de son expertise au quotidien. Grâce aussi à sa confiance, j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions. Il fut d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Je tiens à remercier vivement toute l'équipe pédagogique du Master 2 Sciences de la Mer de l'Université Via Domitia de Perpignan pour avoir assuré la partie théorique de celui-ci. Je remercie également les intervenants professionnels responsables de ce Master et principalement M. Nicolas ROBIN, qui m'a fourni les outils nécessaires au bon déroulement de mon stage et à la réalisation de ce rapport de fin d'étude.

Je saisis également cette occasion pour adresser mes profonds remerciements et témoigner toute ma reconnaissance à l'équipe de la Réserve, Mme MARTIN Maria, Mme DEKKER Jeanet, Mme GOUDEDRANCHE Kimberley, M. SALVADOR Olivier et M. ESPINET Laurent, pour m'avoir intégré rapidement au sein de l'équipe et m'avoir accordé toute leur confiance ; pour le temps qu'ils m'ont consacré et l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'ils m'ont fait vivre durant ces six mois au sein de la Réserve.

Un grand merci également à la Mairie de Nohèdes qui m'a facilité le logement sur place.

Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers ma mère, mon père et ma conjointe, pour leur confiance, leur soutien moral et intellectuel tout au long de mon stage, ainsi que leurs conseils lors de la relecture de ce rapport de stage de fin d'étude.

Sommaire

Table des matières

Remerciements	3
Sommaire.....	5
Introduction	6
I. Présentation du stage.....	7
1. Organisme d'accueil	7
2. Contexte géologique et hydrologique.....	7
3. Etudes antérieures et objectifs du stage	9
II. Matériel et méthode	10
1. Suivi limnimétrique	10
2. Corrections des données des sondes	11
3. Jaugeages au sel	13
4. Construction des courbes de tarage	14
5. Estimation des pluies brutes	16
6. Calcul de l'évapotranspiration	17
III. Résultats	18
1. Bilans hydrologiques	18
2. Modélisation des écoulements futurs.....	22
IV. Discussion et perspectives	27
1. Volumes ruisselés	27
2. Pluies brutes	28
3. Evapotranspiration	29
4. Pertes d'eau.....	30
5. Modélisation des écoulements	31
Conclusion.....	32
Références bibliographiques	33
Liste des figures.....	34
Liste des tableaux	35
Sommaire des annexes	36
Annexes	37
Résumé / Abstract	44
Feuille de route des améliorations du suivi hydrologique	45

Introduction

Située au cœur des Pyrénées-Orientales, la rivière de Nohèdes, qui constitue un affluent de la Têt, s'écoule depuis le massif du Madres, en passant par le village de Nohèdes puis par celui de Conat, jusqu'au village de Ria-Sirach sur un parcours de près de 18 kilomètres et selon un axe Nord-Ouest/Sud-Est. Deux Réserves Naturelles Nationales se situent le long de cette rivière : la Réserve de Nohèdes et la Réserve de Conat. Ceux sont des espaces protégés qui ont pour objectif de préserver et de gérer le patrimoine naturel et culturel du territoire en relation avec les acteurs locaux.

La Réserve Naturelle de Nohèdes a, depuis 2009, initié un suivi hydrologique du bassin versant de Nohèdes-Conat et des études se sont succédées pour essayer de comprendre le fonctionnement du réseau hydrologique de la vallée. En effet, l'eau a de tout temps été une ressource précieuse et vitale pour l'être humain, mais également pour toute la biodiversité environnante. Les enjeux liés à cette ressource sont donc importants et nombreux : acteurs locaux (irrigation, élevage, microcentrale hydroélectrique ...), habitants (eau potable, jardinage...), biodiversité (Desman des Pyrénées, Euprocte...). Tout cela a donc poussé la Réserve Naturelle de Nohèdes à s'intéresser à l'eau et à son avenir. Dans le contexte du réchauffement climatique actuel, il est difficile de s'imaginer que l'état des réserves d'eau ne s'aggrave pas. L'augmentation des températures principalement risque fortement de réduire les quantités d'eau qui s'écoule dans la rivière et de modifier les régimes d'écoulement en réduisant les stocks de neige en altitude. Le développement des connaissances hydrologiques du bassin versant et l'anticipation des impacts sur la ressource en eau pourrait servir d'aide à la décision et permettre d'élaborer des actions pour répondre efficacement aux problématiques et aux enjeux de l'eau en prévision des changements globaux.

Dans le cadre du Master 2 « Sciences de la Mer » parcours « Géosciences Marines et Environnements Aquatiques » de l'Université de Perpignan Via Domitia, ce stage concerne l'étude de l'hydrologie du bassin versant de Nohèdes-Conat. Dans la continuité des études hydrologiques précédemment réalisées à Nohèdes, plusieurs aspects du comportement hydrologique du bassin versant seront abordés tout au long de ce travail. En premier lieu, le contexte et certaines caractéristiques hydrogéologiques seront présentés. Puis, le matériel utilisé et les méthodes employées pour le suivi hydrologique seront détaillés. Les résultats comprenant les bilans hydrologiques et la modélisation des écoulements futurs en contexte de changement climatique seront exposés. Enfin, les méthodes et les résultats seront discutés et des perspectives d'améliorations seront proposées.

I. Présentation du stage

1. Organisme d'accueil

La réserve naturelle de Nohèdes a été créée en 1986 et couvre plus de 2000 hectares. Elle fait partie de la Fédération des Réserves Naturelles Catalanes qui regroupe neuf des onze réserves naturelles nationales des Pyrénées-Orientales (figure 1).

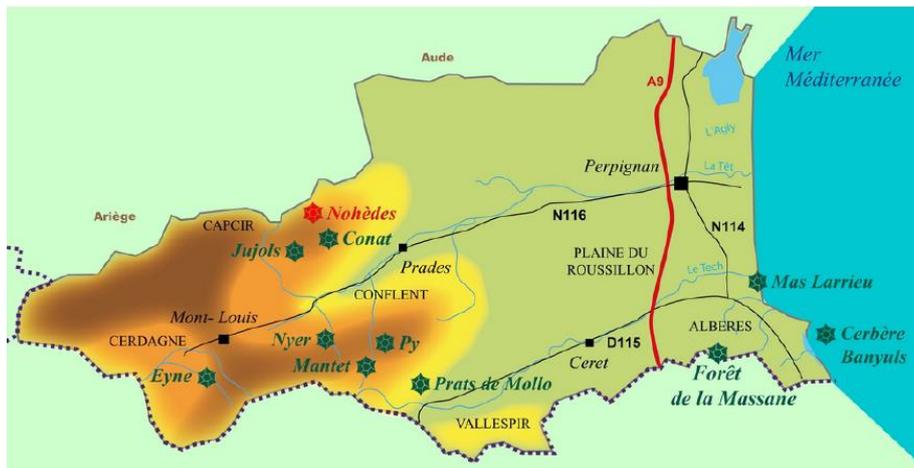


Figure 1 : Carte des réserves naturelles nationales des Pyrénées-Orientales

Une réserve naturelle se définit par trois éléments :

- Un territoire caractérisé par une grande biodiversité et/ou un patrimoine géologique rare
- Une réglementation qui a pour but d'exclure, de restreindre ou d'organiser les activités humaines en vue de la protection du territoire
- Une instance de gestion composée d'un comité consultatif (administrations, élus, usagers, associations...) et d'un organisme de gestion (équipe de la réserve naturelle)

La réserve naturelle poursuit trois objectifs principaux :

- L'étude, le suivi et la protection de la biodiversité et du patrimoine naturel et culturel du territoire
- La gestion du territoire tenant compte des usagers et des acteurs locaux
- L'accueil, la communication et le partage avec le public

Les réserves naturelles sont donc des espaces propices à la concertation locale et à la valorisation des territoires.

2. Contexte géologique et hydrologique

La vallée de Nohèdes-Conat présente des particularités géologiques intéressantes. Elle est délimitée par le Pla de Vall en So au Nord, le Mont Coronat au Sud et le massif du Madres à l'Ouest. En simplifiant le contexte géologique et géomorphologique, les reliefs qui accueillent la réserve sont constitués de terrains anciens (essentiellement de l'ère primaire, > 300 Ma) mais de formes récentes (< 25 Ma). La vallée est scindée en deux par une faille majeure, la faille de Mérens, qui sépare un sol à dominance schisteuse au Nord des falaises de calcaire karstique du Mont Coronat au Sud. Enfin, un massif granitique occupe la tête du bassin versant (figure 2).

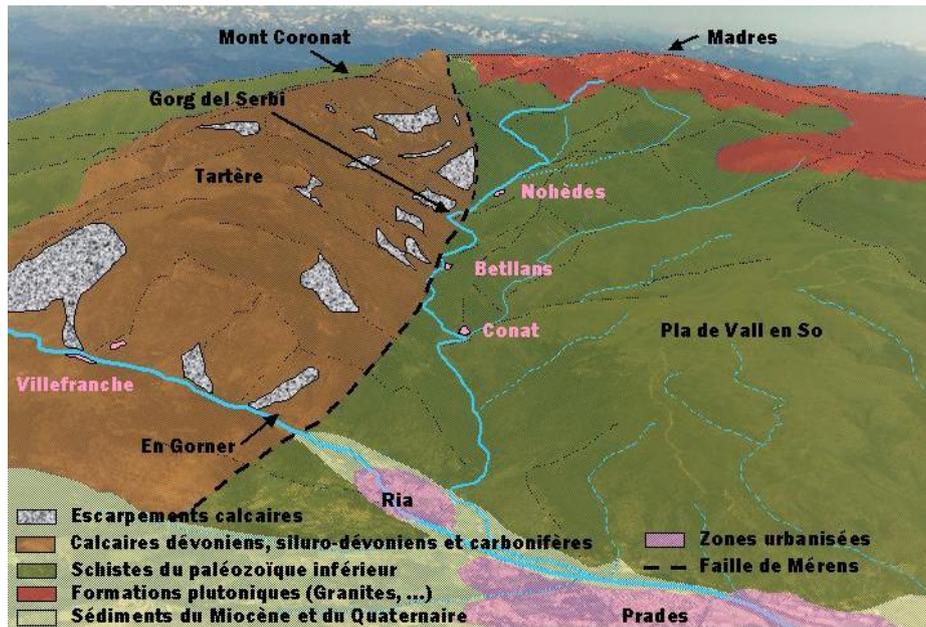


Figure 2 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de Nohèdes-Conat

Le bassin versant de Nohèdes-Conat a été découpé en cinq sous-bassins versants (Clot, Torrelles, Millada, Betllans, Conat) qui figurent sur la carte ci-après. Il est à souligner que la partie sommitale du bassin versant de Torrelles a été retirée puisque le canal d'Urbanya vient drainer les eaux de pluie.

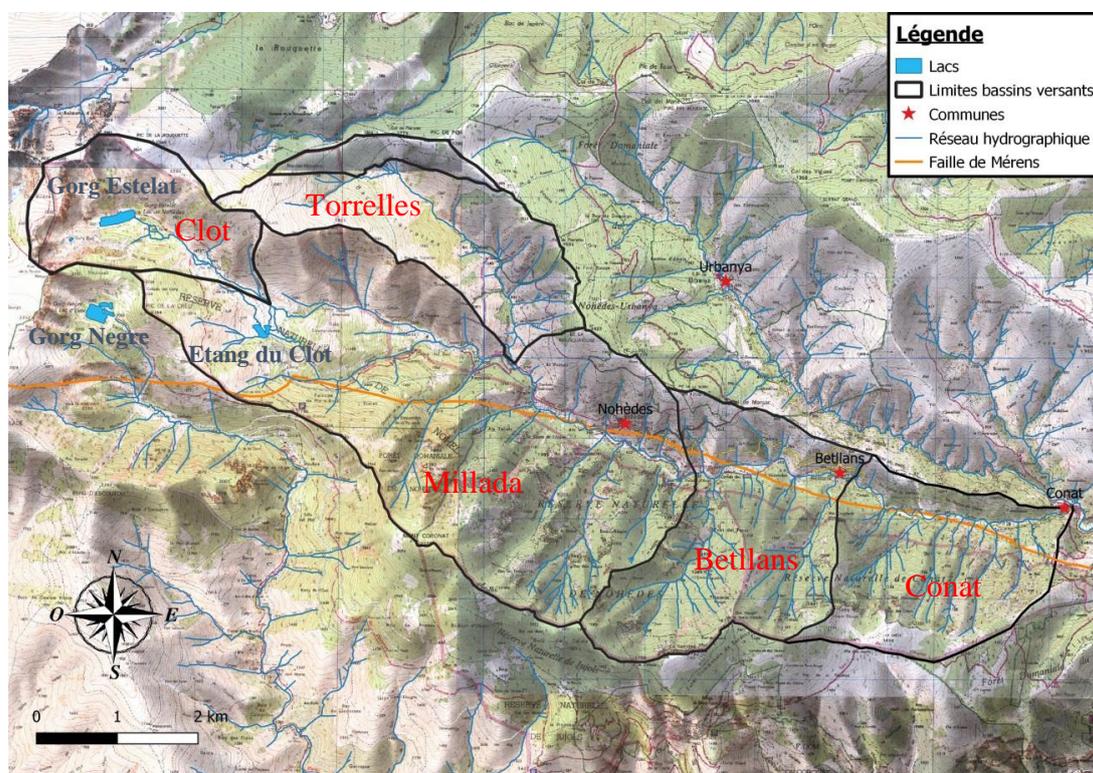


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Nohèdes-Conat

Le réseau hydrographique est composé d'une rivière principale, la rivière de Nohèdes, alimentée latéralement par des sources et dont l'affluent principal est la rivière de Torrelles. Il présente également des tourbières au niveau des plateaux et des lacs d'altitude, notamment le

Gorg Estelat, situés dans des cirques modelés par les érosions glaciaires quaternaires. L'étang du Clot est quant à lui un étang artificiel dans lequel la microcentrale hydroélectrique, proche du village de Nohèdes, vient prélever l'eau. Un répartiteur est en place à proximité de l'étang et répartit l'eau entre la rivière et l'étang (pour la microcentrale).

Le stock d'eau qui alimente la rivière se fait principalement l'hiver par l'accumulation de neige en altitude mais aussi par l'infiltration de l'eau de pluie dans les fractures du massif granitique qui constitue des réserves importantes qui alimentent les sources même l'été en période d'étiage. Le calcaire karstique du Mont Coronat est très poreux et absorbe également des quantités conséquentes qui approvisionnent les réserves souterraines.

3. Etudes antérieures et objectifs du stage

Depuis 2009, l'étude du réseau hydrologique de surface et souterrain est menée lors de stages étudiants successifs, faisant progresser la connaissance du fonctionnement complexe de l'hydrologie locale.

- Dans un premier temps, il était intéressant de vérifier dans quelle mesure les eaux d'infiltration issues du karst sont restituées dans la rivière principale, qui traverse surtout des substrats non calcaires. Une étude (DUCROIX, 2009) a démontré que cet apport était quantitativement faible mais physico-chimiquement important. En outre, une perte d'eau dans un méandre faisant une incursion dans le karst, qui affecterait le débit du cours d'eau, a été révélée à cette occasion.
- Dans un deuxième temps, pour préciser le bilan hydrique du bassin versant, cinq sondes enregistreuses ont été mises en place entre la fin de 2011 pour les premières et août 2014 pour la dernière, en application d'un protocole de suivi hydrologique continu (SERVIÈRE, 2010).
- En relation avec le suivi des précipitations et à l'aide de modèles pluviométriques, ce suivi a permis d'évaluer les volumes d'eau évapotranspirés, mais aussi de donner des indications sur le fonctionnement du stockage de l'eau par les accumulations neigeuses hivernales, par les zones humides ou par les altérites du plateau granitique sommital (LE GUENANFF, 2013).
- Ensuite, les volumes d'eau absorbés par le karst ont été évalués (CHAUBET, 2014) : ils constituent une ressource qui, si elle était captée, pourrait alimenter un bassin de population d'environ 100 000 habitants.
- La contribution des pertes de la rivière de Nohèdes aux écoulements souterrains captés pour l'AEP (alimentation en eau potable) de Ria a été mesurée (RIO, 2015), démontrant la vulnérabilité de cette ressource.
- En outre, une deuxième perte dans la rivière de Nohèdes suspectée entre Betllans et Conat a été mise en évidence récemment (BALL, 2016). Parallèlement, une première évaluation quantitative des fonctions de stockage/restitution a été abordée.
- Depuis 2017, un suivi des températures au niveau des sondes a été instauré, et une campagne de mesures des températures en différents points du haut BV a été menée (ROCHETEAU, 2017).

Dans la continuité des études précédentes, les objectifs principaux de ce stage sont :

- Préciser le bilan hydrologique du bassin versant de Nohèdes-Conat (amélioration des courbes de tarage et établissement des bilans hydriques).
- Modéliser l'impact des changements climatiques sur les écoulements (diminution de la quantité d'eau et modification des régimes hydrologiques).

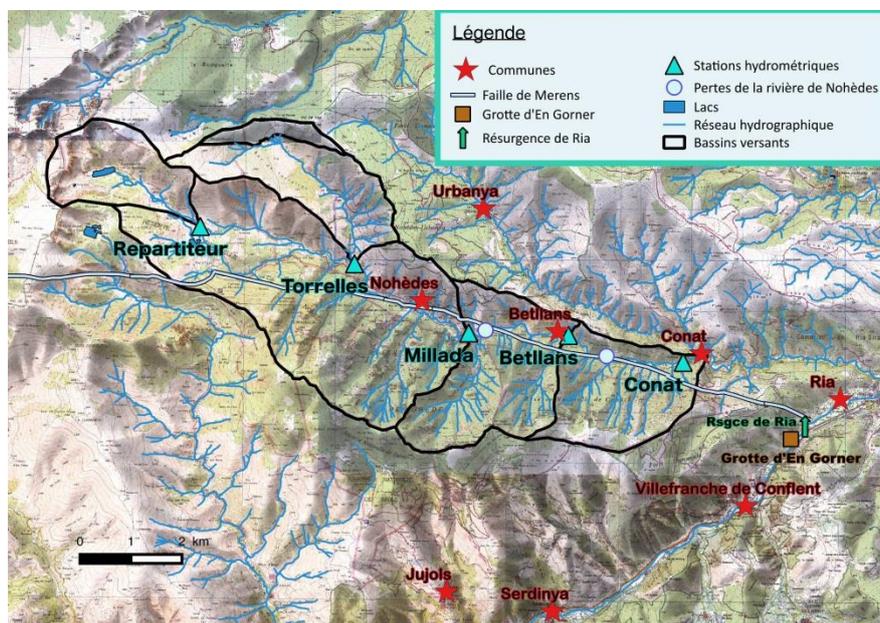
II. Matériel et méthode

Pour étudier l'hydrologie de la vallée de Nohèdes-Conat, il a été nécessaire de réaliser des suivis, calculs et corrections de façon méthodique afin de pouvoir obtenir et utiliser des données d'une qualité convenable. Il sera donc détaillé ci-dessous le matériel employé et les différentes méthodes qui ont permis d'aboutir aux résultats.

1. Suivi limnimétrique

Suivi limnimétrique :

Afin de réaliser le suivi quantitatif de la ressource en eau à Nohèdes, un réseau de stations hydrométriques a été installé entre 2011 et 2014 à l'exutoire de chaque sous-bassin versant et est illustré sur la carte suivante.



Il y a cinq stations hydrométriques au total à savoir :

- Clot (Répartiteur)
- Torrelles
- Millada
- Betllans
- Conat

Les stations Clot, Torrelles et Betllans ont été installées en 2011. Les stations Millada et Conat ont respectivement été mises en place en 2013 et 2014. Les coordonnées géographiques et l'altitude de chaque station figurent dans le tableau ci-dessous :

	Coordonnées géographiques des stations	Altitude (m)
Clot	42.636068 , 2.235808	1690
Torrelles	42.629846 , 2.27256	1002
Millada	42.617457 , 2.300203	762
Betllans	42.617134 , 2.324155	639
Conat	42.61282 , 2.35297	518

Tableau 1 : Coordonnées et altitude des stations hydrométriques

Toutes les stations sont équipées d'une échelle limnimétrique et d'une sonde enregistreuse (OTT Orpheus Mini). Chaque station a une configuration particulière en fonction des contraintes rencontrées lors de leur installation (morphologie du cours d'eau, positionnement de l'échelle...). L'échelle limnimétrique permet de lire la hauteur d'eau directement sur le terrain. La sonde est située au fond de la rivière, à l'intérieur du support de l'échelle limnimétrique. Il s'agit d'une sonde de pression qui enregistre la hauteur et la température de l'eau toutes les heures en continu.



Figure 5 : Photos d'une échelle limnimétrique et d'une sonde OTT Orpheus Mini

Pour récupérer les données, il suffit de se connecter à l'interface infrarouge située en haut de l'échelle limnimétrique avec un ordinateur et d'effectuer le transfert à l'aide du logiciel Hydras 3. Les données brutes récupérées contiennent les dates et heures des mesures ainsi que les valeurs de hauteur d'eau en mètres. Cependant, avant de pouvoir utiliser ces données, il est crucial de vérifier si elles ne contiennent pas des erreurs de manière à les corriger si cela est possible.

2. Corrections des données des sondes

Les données brutes de hauteur d'eau obtenues contiennent bon nombre d'erreurs. Il y a trois types d'erreur majeurs : les dysfonctionnements (sauts ou décalages temporels, erreurs de configuration), les embâcles et les risques de gel. Il est nécessaire de corriger ces erreurs afin de rendre les données valides et utilisables. Pour cela, une correction adaptée est appliquée en fonction de chaque problème rencontré.

- Le dysfonctionnement des sondes

Il se peut que les sondes rencontrent des problèmes de fonctionnement pour diverses raisons. Tout d'abord, il arrive qu'une sonde cesse d'enregistrer pour des raisons peu évidentes pendant un certain laps de temps, souvent très court, que l'on appelle saut temporel. S'il s'agit d'un saut plutôt court, quelques heures tout au plus, les valeurs manquantes sont corrigées de façon linéaire entre la dernière valeur enregistrée avant le saut et la première enregistrée après

le saut temporel. Lorsque les valeurs manquent sur de plus longues périodes, il est impossible de les corriger, ce qui peut entraîner des années où les données sont incomplètes. Il est alors difficile de les utiliser par la suite pour établir des résultats. Cela peut se produire par exemple lorsque les piles lithium d'une sonde sont vides et ne sont pas changées à temps ou alors tout simplement lorsqu'une sonde ne fonctionne plus et qu'il faut la remplacer.

Si les piles ont été changées trop tard, cela signifie que la sonde a cessé de fonctionner pendant un certain temps. Il faut donc penser, le jour où l'on remplace les piles, à reconfigurer la date et l'heure de la sonde sinon elle reprendra les enregistrements à la date à laquelle elle s'était arrêtée, ce qui créera un décalage temporel. Il sera donc ensuite nécessaire de recalculer les valeurs de hauteur d'eau en face des bonnes dates.

Enfin, il peut arriver qu'une sonde ait un problème de configuration ou de programmation. Suite à un problème de ce type, la sonde de Conat mesure les données avec des variations inversées par rapport aux autres stations. La comparaison des hauteurs d'eau entre Conat et Betllans figure ci-dessous :

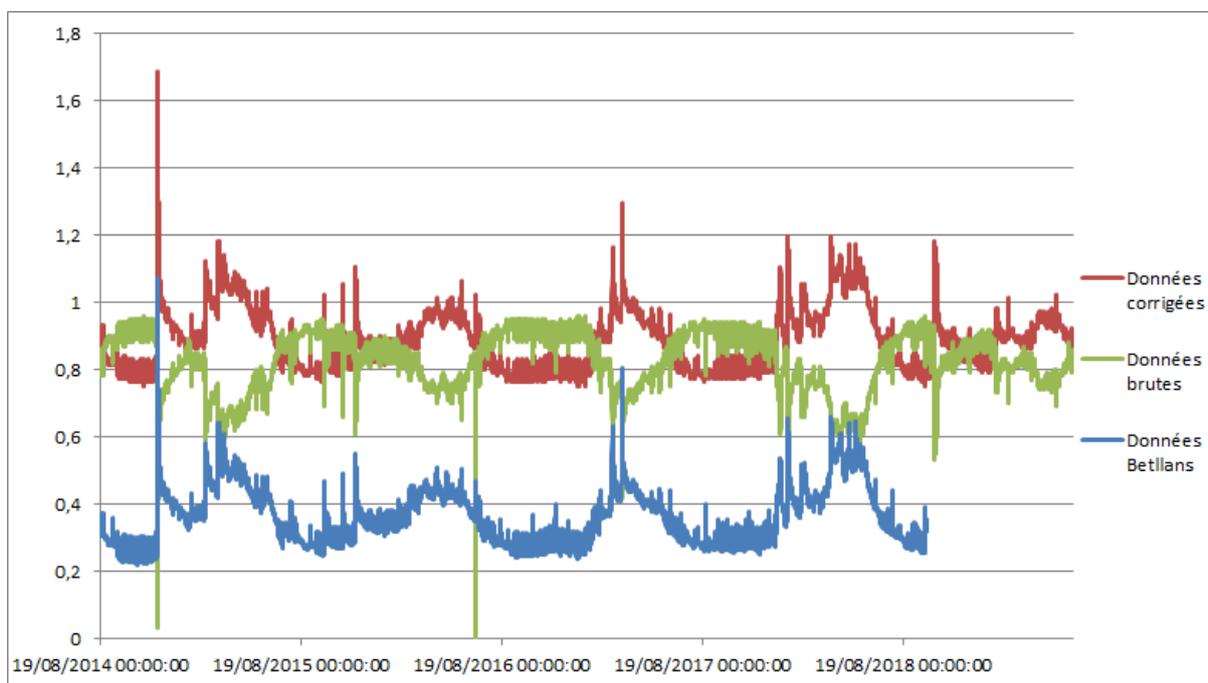


Figure 6 : Graphique montrant une inversion des variations des hauteurs d'eau et sa correction à Conat

Pour remédier à ce problème, la totalité des données de hauteur d'eau a été corrigée selon la relation linéaire suivante : $-1,0054x + 171,6739$; obtenue en utilisant plusieurs valeurs de hauteur lues sur le terrain et mises en relation avec les données à corriger. On obtient alors les nouvelles valeurs de hauteur d'eau corrigées.

- Les embâcles

Les embâcles occasionnent un type d'erreur qui arrive de temps en temps. Un embâcle se forme par l'accumulation de branches et de feuilles contre un rocher par exemple au niveau de la station. Cela crée donc une retenue d'eau qui augmente la hauteur localement. La sonde enregistre donc une hauteur d'eau qui est supérieure à la hauteur d'eau théorique. Le graphique ci-dessous illustre une augmentation anormale de la hauteur d'eau à la station de Betllans qui témoigne de la présence d'un embâcle.

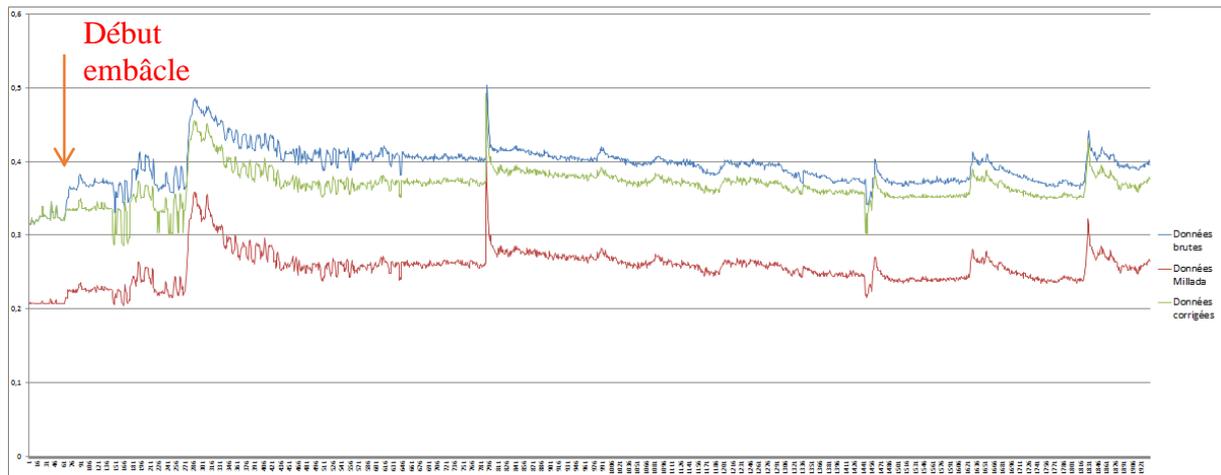


Figure 7 : Graphique montrant un embâcle et sa correction à Betllans

Il est donc important de corriger les embâcles pour retrouver les valeurs réelles de hauteur d'eau. Pour ce faire, les écarts moyens (sur minimum 50 valeurs) sont calculés entre la station de Betllans et la station de Millada (pour ce cas de figure) par classe de hauteur (tous les centimètres) sur une période similaire où il n'y a pas d'erreur. En partant de ces écarts moyens et en se basant sur les valeurs de Millada, on peut simplement recréer les valeurs de la station de Betllans sur la période de l'embâcle.

Les embâcles peuvent rester en place plusieurs jours voire même plusieurs semaines. Ils sont parfois retirés lors des sorties de terrain, mais la plupart du temps ils sont détruits par les crues.

- Le risque de gel des sondes

Enfin, le dernier type d'erreur majeur est le gel des sondes. Cela arrive occasionnellement tous les ans, surtout sur les stations d'altitude (Clot et Torrelles) et plus rarement sur les autres. Lorsque les températures de l'eau descendent trop bas (proche de 0°C), il se peut que la sonde de pression gèle (souvent pendant des périodes de quelques heures). Le gel autour de la sonde crée alors une énorme pression qui est enregistrée. Cela donne donc des valeurs aberrantes (très élevées) qui ne correspondent pas à des périodes de fortes précipitations. On corrige les valeurs erronées de façon linéaire entre la dernière valeur avant le gel et la première valeur après le gel, de la même manière que pour les sauts temporels.

3. Jaugeages au sel

Une fois les données de hauteur d'eau acquises et corrigées, elles sont prêtes à être transformées en débits. La première étape de cette transformation consiste à réaliser des jaugeages au sel.

Le principe d'un jaugeage au sel est de mettre dans la rivière une certaine quantité de sel diluée dans de l'eau et de mesurer plus en aval la conductivité de l'eau. En effet, le sel augmente nettement la conductivité de l'eau. La quantité de sel est déterminée en fonction de la quantité d'eau présente dans la rivière (au moins 10 grammes de sel par litre d'eau par seconde). La quantité de sel injectée en période de crue est donc plus importante qu'en période d'étiage. Le sel est entièrement dilué dans un seau contenant de l'eau de la rivière et est injecté d'un seul trait.

Les tronçons de rivière choisis pour réaliser les jaugeages à chaque station respectent certaines caractéristiques essentielles pour une estimation de débit précise :

- Une zone d'injection avec un bon mélange
- Un tronçon sans zone d'eau morte ou grande vasque où une partie de l'eau salée pourrait être retenue
- Une zone de prise de mesure sans agitation excessive (pour stabilisation de l'appareil de mesure) et pas trop éloignée de la station
- Une longueur de tronçon (distance d'injection) qui correspond à environ 25 fois la largeur moyenne du cours d'eau

Un conductimètre équipé d'une sonde accrochée à une perche est utilisé pour effectuer les mesures de conductivité. Le conductimètre est étalonné régulièrement à l'aide de solution étalon afin de garantir la précision des mesures. Avant l'injection du sel, il est nécessaire de plonger la sonde afin que l'appareil stabilise la valeur de conductivité initiale. La prise de mesure débute au moment de l'injection du sel. Une mesure est prise toutes les trois secondes jusqu'à ce que la valeur finale de conductivité de l'eau soit revenue proche de la valeur initiale.

Une fois les données récupérées sur ordinateur, on obtient un profil de conductivité en fonction du temps qui illustre le passage du sel au point de mesure.

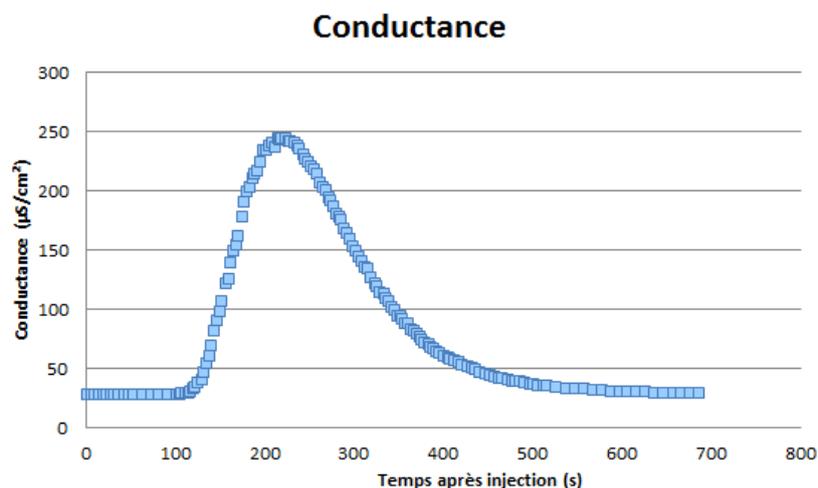


Figure 8 : Graphique montrant l'évolution de la conductivité au cours du temps lors d'un jaugeage au sel

Le temps de mesure peut durer plus ou moins longtemps selon le débit et la morphologie du tronçon. Le passage du sel dilué correspond au pic sur le graphique. Ce profil de conductivité est ensuite traduit en un profil de concentration, puis le débit du cours d'eau au point de mesure est calculé par intégration du profil de concentration. La formule de calcul de la valeur du débit est la suivante :

$$Q = \frac{M_{in}}{\int C(t) dt}$$

Q : débit (L/s)
 M_{in} : Masse de sel injecté (g)
 C(t) : Concentration à l'instant t (g/l)

On obtient alors une valeur de débit associée à une hauteur d'eau qui a été lue sur l'échelle limnimétrique lors du jaugeage. Cette valeur de hauteur sera ensuite précisée au dixième, une fois les données de la sonde récupérées.

4. Construction des courbes de tarage

Chaque station a sa propre courbe de tarage. Une courbe de tarage permet de transformer les valeurs de hauteur d'eau enregistrées par la sonde en débits. La construction des courbes de

tarage se fait sur le logiciel Hydraccess à l'aide du module CALIBRA. Pour chaque station, les différents jaugeages réalisés sont positionnés sur un graphique hauteur/débit. La courbe de tarage est donc tracée à partir des jaugeages au sel et est biunivoque (pas toujours : hystérésis), c'est-à-dire qu'une valeur de hauteur d'eau correspond à une seule valeur de débit.

Pour construire la courbe de tarage, deux méthodes différentes ont été utilisées. Tout d'abord, la méthode d'ajustement potentiel a été utilisée pour interpoler les points de jaugeages. L'ajustement potentiel est de la forme :

$$Q = a * (H - H_0)^p$$

Avec : Q le débit (en m³/s)
H la hauteur d'eau (en cm)
H₀ la hauteur pour laquelle le débit s'annule (en cm)
a et p les variables d'ajustement

Par ailleurs, les parties de courbe au-delà des points de jaugeages (basses eaux et hautes eaux) ont nécessairement été extrapolées. En effet, les valeurs extrêmes sont très rarement observées. Pour l'extrapolation, la méthode de l'ajustement potentiel ne fonctionnant pas, c'est la relation de Manning-Strickler qui a été utilisée :

$$Q = K * \sqrt{i} * Rh^3 * S$$

Avec : Q le débit (en m³/s)
K le coefficient de Strickler (en m^{1/3}/s)
i la pente de la ligne d'eau (en m/m)
Rh le rayon hydraulique (en m)
S la surface de la section mouillée (en m²)

Il est possible d'utiliser cette formule car les constantes géométriques sont fournies par le module CALIBRA à partir des profils en travers réalisés antérieurement. Cependant, il est impossible de déterminer la pente i de la ligne d'eau car elle varie en fonction du débit pour un torrent de montagne. C'est pour cela que le produit K * √i a été estimé pour chaque station de façon à ce que les portions de courbes extrapolées se rejoignent avec la portion de courbe interpolée. Il en résulte cinq courbes de tarage, une pour chaque station. La courbe de tarage de la station Clot figure ci-dessous, les autres sont en annexe 1 à 4.

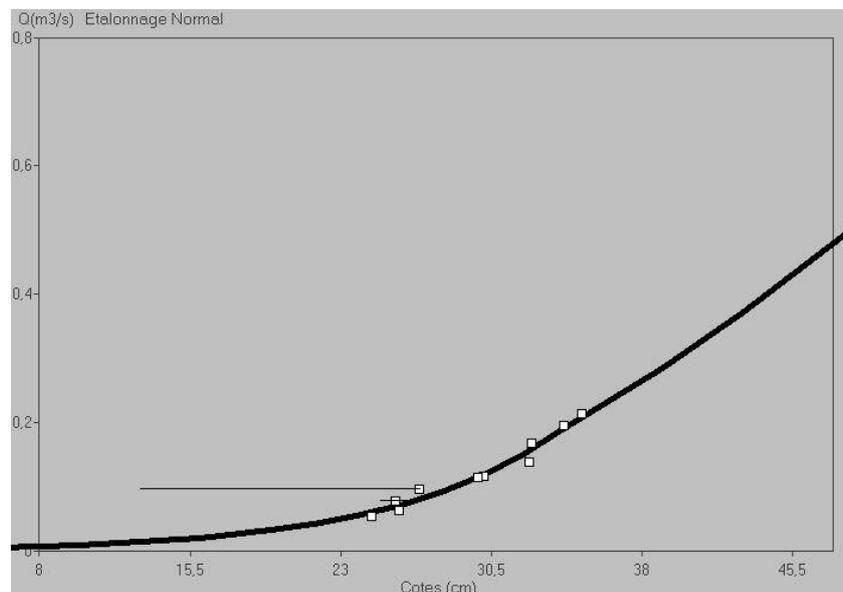


Figure 9 : Zoom sur la courbe de tarage du Clot avec ses points de jaugeage

Une fois toutes les courbes de tarage construites, l'intégralité des hauteurs d'eau mesurées par les sondes sont directement traduites en débits. Les débits horaires sont ensuite transformés en volumes horaires pour obtenir les volumes ruisselés mensuels et annuels qui seront utilisés dans les résultats.

5. Estimation des pluies brutes

Il est important d'estimer les pluies car elles sont directement liées à la quantité d'eau qui s'écoule dans le bassin versant. Les pluies brutes correspondent aux pluies qui tombent sur la surface du bassin versant. L'estimation des pluies brutes se fait en plusieurs étapes.

Tout d'abord, il est essentiel de calculer en premier lieu la surface de tous les sous-bassins versants qui ont été tracés sur QGIS. On utilise ensuite un modèle de pluviométrie. Ici il s'agit du modèle Aurelhy de Météo France (Analyse Utilisant le RELief et l'HYdrométéorologie). Ce modèle comporte plusieurs isohyètes, chacune associée à une valeur de pluie annuelle, qui augmente avec l'altitude, et que l'on recoupe par les bassins versants pour obtenir la carte des isohyètes du bassin versant de Nohèdes.

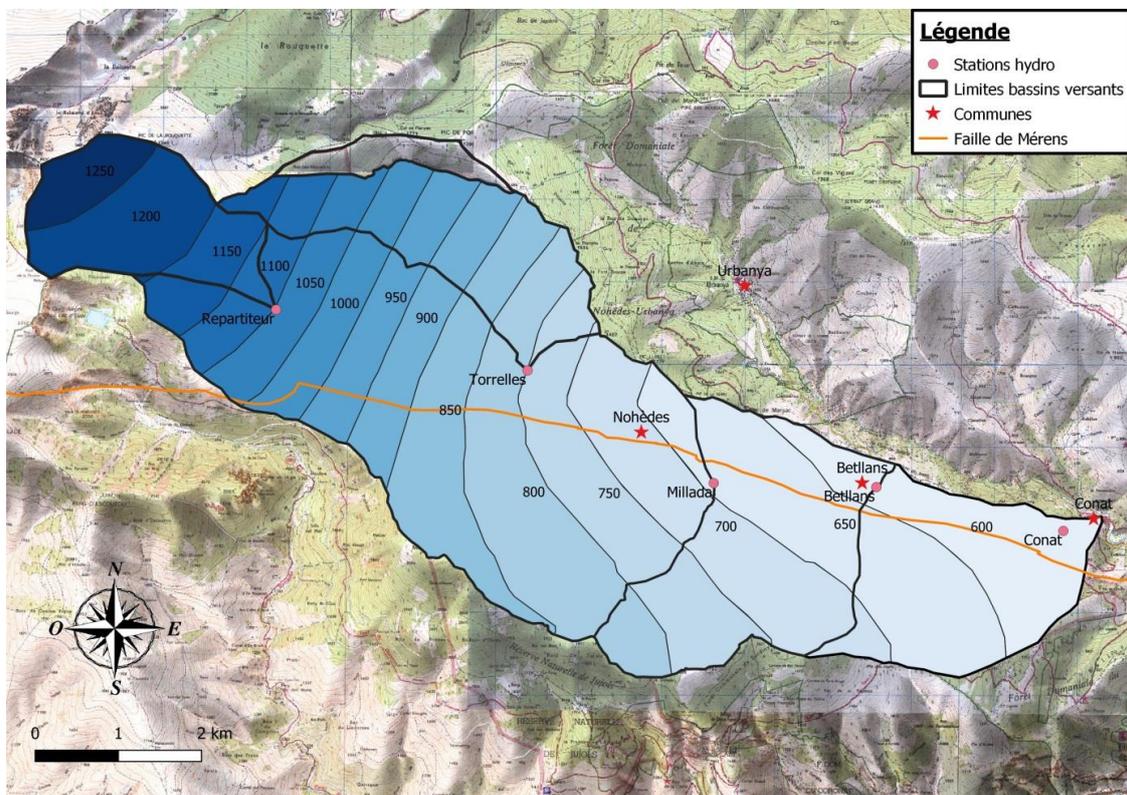


Figure 10 : Carte des isohyètes du modèle Aurelhy

Un pluviomètre est installé au village de Nohèdes et est relevé tous les jours, ce qui permet d'avoir la pluviométrie chaque année. Ces valeurs annuelles sont utilisées pour corriger, avec la valeur de l'année concernée, la valeur de pluie annuelle attribuée à Nohèdes par le modèle Aurelhy (soit 712,335 mm) à l'aide d'un coefficient de correction. L'hypothèse retenue, faute de mieux, est que les précipitations annuelles en un point varient proportionnellement aux variations de pluviométrie annuelles au village. Il en résulte donc des isohyètes corrigées pour chaque année étudiée. Il suffit ensuite de multiplier la surface de chaque isohyète par sa valeur corrigée associée pour obtenir le volume de pluie tombé dans l'année. Cette manipulation permet d'obtenir les volumes de pluie brute chaque année pour chaque sous-bassin versant.

Les pluies brutes ont un devenir différent en fonction du substrat sur lequel elles tombent. Pour les distinguer, les zones perméables, correspondant au substrat calcaire karstique, ont été tracées en vert sur la carte ci-dessous. Les zones restantes sont considérées comme imperméables.

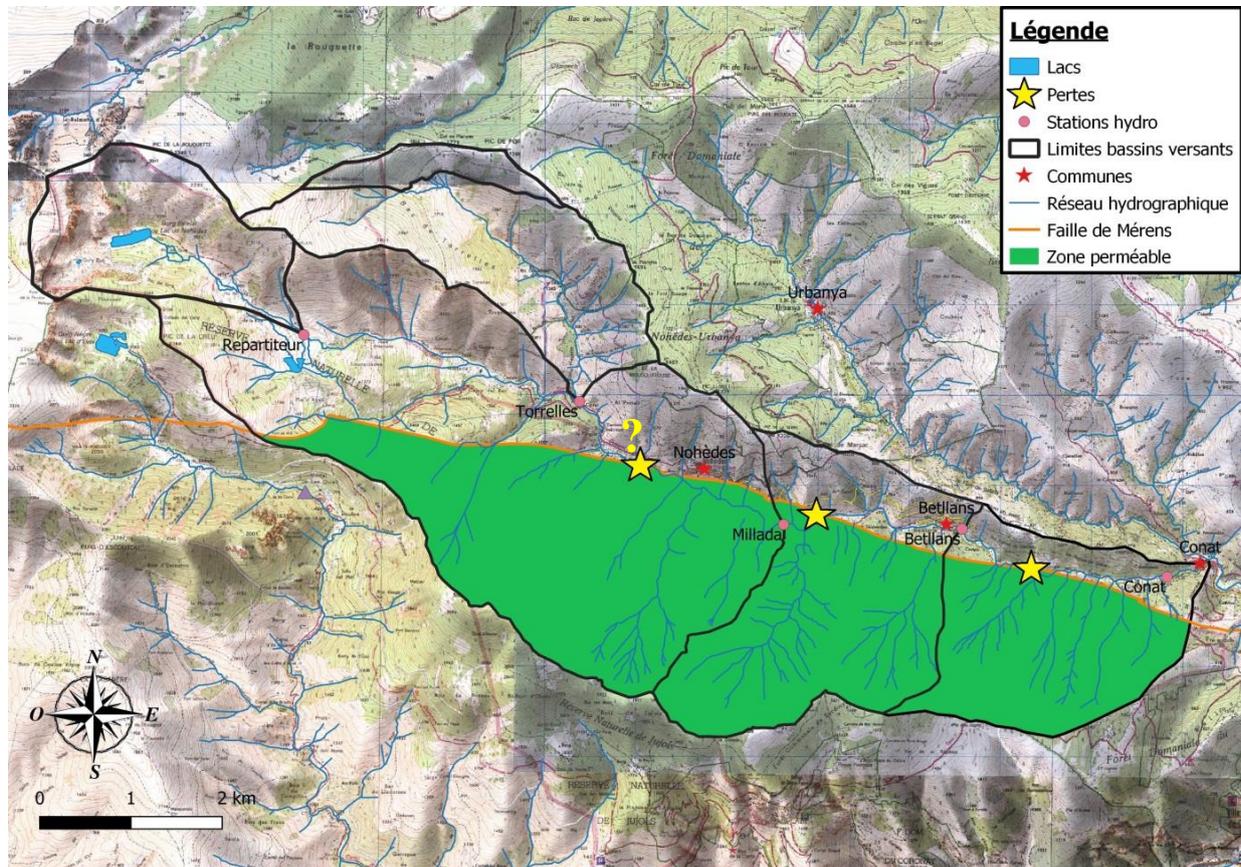


Figure 11 : Carte des zones imperméables du bassin versant de Nohèdes-Conat

En croisant avec les isohyètes, les volumes de pluies brutes perméables et imperméables ont pu être calculés. Les volumes de pluie qui tombent sur les zones perméables ne ruissellent pratiquement jamais sur le versant (sauf en cas de fortes pluies) et s'infiltrent directement dans les réserves karstiques du mont Coronat (une faible partie s'évapotranspire également). Pour simplifier, il est considéré que l'intégralité des volumes de pluie sur les zones perméables s'infiltrer dans le calcaire karstique.

6. Calcul de l'évapotranspiration

Sur les zones imperméables, une partie des pluies s'évapotranspire et une partie des pluies ruisselle vers la rivière. L'évapotranspiration est un concept très complexe et n'est donc calculée que sur les zones imperméables. Elle correspond à une quantité d'eau qui est transférée vers l'atmosphère par plusieurs phénomènes majeurs :

- L'évaporation de l'eau au niveau du sol (réserve utile)
- La transpiration végétale (évaporation de l'eau par les feuilles)
- L'interception par les végétaux (feuilles et branches, eau entièrement évaporée)

Elle représente généralement des volumes importants et joue par conséquent un rôle non négligeable dans les transferts d'eau du bassin versant. Pour estimer les quantités d'eau

éapotranspirées, de nombreuses formules différentes existent. Pour ce stage, la formule utilisée, compte tenu des données disponibles, est l'évapotranspiration réelle de Turc (ETR) :

$$\text{Formule de Turc : } ETR(\text{mm/an}) = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec P la pluie moyenne annuelle (en mm/an)

$$L = 300 + 25 * T + 0,05 * T^3$$

T la température moyenne annuelle

La pluie moyenne annuelle est issue des relevés journaliers du pluviomètre de Nohèdes. Cependant, les seules valeurs de température annuelle disponibles sont les températures de 1962 à 1983 au village. La moyenne des températures de ces 22 années, à savoir 11,85°C est donc utilisée dans la formule de l'ETR, faute d'avoir les données des années étudiées.

La température moyenne varie en fonction de l'altitude selon un gradient de température de 0,6°C tous les 100 mètres. L'ETR est donc calculée pour chaque isoligne d'altitude dans chaque sous-bassin versant uniquement sur les zones imperméables. Il suffit ensuite de cumuler les volumes évapotranspirés de chaque isoligne. Il en résulte donc les volumes évapotranspirés chaque année étudiée pour tous les sous-bassins versants.

III. Résultats

Les résultats s'organisent selon deux grands axes de travail :

- L'établissement du bilan hydrologique du bassin versant de Nohèdes-Conat ainsi que le détail des sous-bassins versants
- La modélisation des écoulements futurs au regard des changements climatiques

Le premier axe fera l'objet d'une présentation des résultats principaux et d'explications de certains éléments des bilans hydrologiques. Le second introduira les résultats majeurs qui témoignent des impacts potentiels de l'évolution du climat sur la ressource en eau dans le bassin versant de Nohèdes-Conat.

1. Bilans hydrologiques

Le bilan hydrologique s'établit sur une année hydrologique complète. Une année hydrologique correspond à une période de 12 mois allant d'un régime d'étiage à un régime d'étiage et encadre la phase de stockage (hiver) et la phase de déstockage (printemps). Une année hydrologique peut démarrer à des dates différentes en fonction de la météorologie de la région. Pour le cas du bassin versant de Nohèdes-Conat, le début d'une année hydrologique a été fixé au 1^{er} septembre et la fin au 31 août de l'année suivante car on considère que l'intégralité de l'eau stockée sous forme de neige au cours de la période hivernale s'est écoulée à la fin du mois d'août. Par exemple, l'année hydrologique 2015 commence le 1^{er} septembre 2015 et se termine le 31 août 2016.

Les bilans ont été établis pour les années hydrologiques 2015, 2016 et 2017 car les données des années antérieures étaient incomplètes. Le bilan hydrologique se définit comme suit :

$$\text{Pluies brutes} = \text{Volume ruisselé} + \text{Evapotranspiration} + \text{Pertes}$$

Le tableau ci-dessous regroupe les bilans hydrologiques des trois années étudiées du bassin versant total de Nohèdes-Conat (cumul des cinq sous-bassins versants).

Bilan hydrologique				
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)
2015	29944473	6821417	9087268	14035788
2016	29620565	6040037	9069073	14511455
2017	37331342	11327616	9589770	16413956

Tableau 2 : Bilan hydrologique total du bassin versant de Nohèdes-Conat

Les pluies brutes ont été estimées à l'aide du modèle Aurelhy de Météo France, l'ETR a été calculée selon la formule de Turc et le volume ruisselé résulte des données enregistrées par les stations hydrologiques. Quant aux pertes, elles sont automatiquement déduites et comprennent les pertes dans la rivière et les pertes directes sur les zones perméables (infiltrations et évapotranspiration). Les trois années hydrologiques étudiées ont la pluviométrie relevée au village de Nohèdes suivante :

- 2015 = 678,0 mm
- 2016 = 672,3 mm
- 2017 = 780,1 mm

La pluviométrie moyenne trentennale étant de 789,1 mm au village, les années 2015 et 2016 sont des années sèches alors que l'année 2017 est proche de la moyenne.

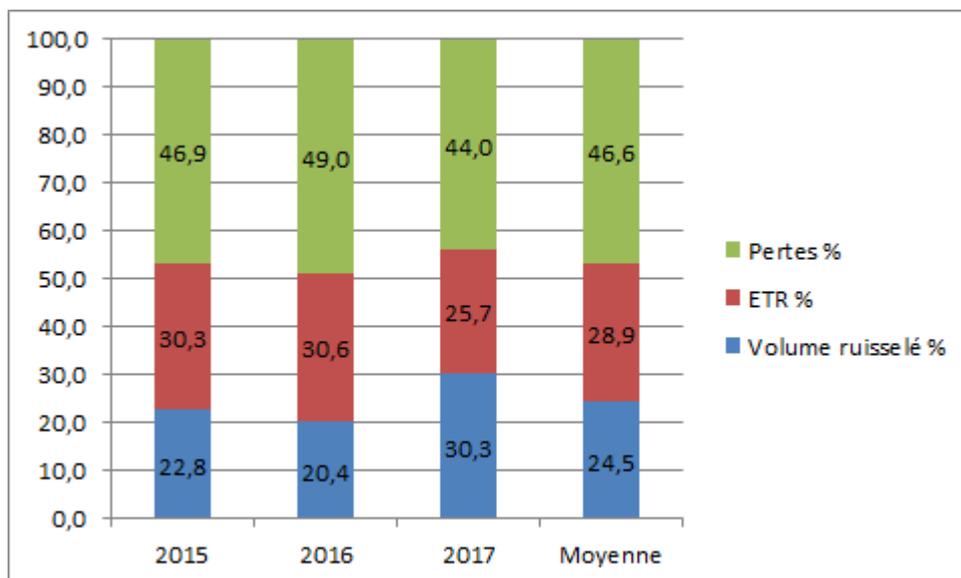


Figure 12 : Graphique des proportions de chaque élément du bilan par rapport aux pluies brutes

Le graphique ci-dessus montre que le volume ruisselé représente seulement un quart du volume des pluies brutes. Cela s'explique directement par une importante proportion de pertes qui peut atteindre presque la moitié du volume total de l'eau qui entre dans le bassin versant chaque année.

Pour mieux comprendre la répartition de ces pertes, le détail du bilan hydrologique figure dans le tableau ci-dessous :

Bilan des pertes								
	Pluies perméables (m3)	Pluies imperméables (m3)	Pluies brutes totales (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes rivière (m3)	Pertes karst + ETR karst (m3)	Pertes totales (m3)
2015	12600127	17344346	29944473	6821417	9087268	1435661	12600127	14035788
2016	12492907	17127657	29620565	6040037	9069073	2018547	12492907	14511455
2017	14496962	22834380	37331342	11327616	9589770	1916994	14496962	16413956

Tableau 3 : Bilan des pertes du bilan hydrologique total du bassin versant de Nohèdes-Conat

Les pluies ont été calculées sur les zones perméables et imperméables de façon à pouvoir donner une estimation des pertes à la rivière (faille) et des pertes directes dans le karst (zones perméables). Les pertes à la rivière s'obtiennent en faisant le bilan hydrologique des zones uniquement imperméables. Les pertes directes dans le karst sont largement majoritaires et correspondent directement au volume des pluies perméables puisqu'on considère que toute la pluie qui tombe sur le calcaire karstique s'infiltré immédiatement dans le réseau souterrain. Quant aux pertes dans la rivière, elles représentent en moyenne 22% du volume ruisselé.

Afin de développer et de mieux appréhender le rôle des sous-bassins versants, les bilans exclusifs (bilans non cumulés, qui excluent les sous-bassins versants en amont) de chaque sous-bassin versant ont été calculés. Tout d'abord, les deux sous-bassins versants d'altitude (Clot et Torrelles) ont dû être corrigés comme présenté ci-dessous :

Bilan hydrologique					
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	
2015	4390231	2912634	1537008	-59411	
2016	4352874	2755328	1535538	62008	
2017	5051141	5160272	1558358	-1667489	

Bilan hydrologique corrigé					
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Correction pluie (%)
2015	4452008	2912634	1539374	0	1,41
2016	4288243	2755328	1532915	0	-1,49
2017	6749140	5160272	1588868	0	33,62

Tableau 4 : Bilan hydrologique exclusif brut et corrigé du sous-bassin versant du Clot

Bilan hydrologique					
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	
2015	4126788	1535818	2166445	424525	
2016	4091672	1557245	2161732	372695	
2017	4748039	3131996	2236635	-620592	

Bilan hydrologique corrigé					
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Correction pluie (%)
2015	3625926	1535818	2090108	0	-12,14
2016	3651852	1557245	2094607	0	-10,75
2017	5423852	3131996	2291856	0	14,23

Tableau 5 : Bilan hydrologique exclusif brut et corrigé du sous-bassin versant de Torrelles

En effet, ces deux sous-bassins versants se situent sur un substrat imperméable et ne sont pas concernés par le réseau de failles. Par conséquent, on peut considérer que les pertes géologiques sont nulles. Or, après calcul des ETR, volumes ruisselés et pluies brutes, le bilan présente des pertes. Afin d'y remédier, il a été nécessaire de corriger les pluies brutes pour équilibrer le bilan. Le pourcentage de correction appliqué aux pluies brutes figure dans le tableau bilan hydrologique corrigé. Les deux années sèches 2015 et 2016 semblent être légèrement surestimées pour le sous-bassin versant de Torrelles alors que le modèle

pluviométrique fonctionne plutôt bien ces mêmes années pour le Clot. Par ailleurs, les pluies de l'année 2017 (année plus pluvieuse que les deux précédentes) sont visiblement sous-estimées pour ces deux sous-bassins versants d'altitude. Cette sous-estimation semble augmenter avec l'altitude puisque le % de sous-estimation pour le sous-bassin versant du Clot est de 34 % contre 14 % pour Torrelles. Gottardi, dans sa thèse sur l'analyse des précipitations en montagne datant de 2009, avait trouvé des tendances similaires concernant la sous-estimation des précipitations du modèle Aurelhy dans la zone pyrénéenne (GOTTARDI, 2009). Ses conclusions seront plus largement détaillées dans la discussion. Ensuite viennent les trois sous-bassins versants suivants dont les bilans exclusifs figurent ci-après à savoir : Millada, Betllans et Conat.

Bilan hydrologique				
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)
2015	14235641	2951304	4073603	7210734
2016	14114506	2669285	4064228	7380993
2017	16378689	3543087	4215033	8620569

Tableau 6 : Bilan hydrologique exclusif du sous-bassin versant de Millada

Bilan hydrologique				
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)
2015	4415463	-670880	776654	4309689
2016	4377890	-1262480	773021	4867349
2017	5080171	-667838	834713	4913296

Tableau 7 : Bilan hydrologique exclusif du sous-bassin versant de Betllans

Bilan hydrologique				
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)
2015	3215435	92541	607529	2515365
2016	3188074	320659	604302	2263113
2017	3699490	160099	659300	2880091

Tableau 8 : Bilan hydrologique exclusif du sous-bassin versant de Conat

Le sous-bassin versant de Millada présente la pluviométrie la plus importante en raison de son importante superficie et de son altitude moyenne plus élevée que les deux autres. Aussi, parmi les trois, c'est celui qui contribue le plus au volume ruisselé dans la rivière de Nohèdes à Conat. Cependant, parmi les cinq sous-bassins versants, c'est celui le plus en altitude (Clot) qui a la plus forte contribution annuelle. Les sous-bassins versants de Betllans et de Conat possèdent quant à eux une proportion de pertes très importante. Le premier témoigne, à travers ses volumes ruisselés négatifs, de pertes d'eau géologiques bien supérieures aux apports. Il a donc une contribution négative : il y a moins d'eau à l'exutoire du bassin versant qu'à son entrée. Le second présente également un volume important de pertes mais contribue quand même légèrement au volume ruisselé.

Bilan des pertes								
Année	Pluies perméables (m3)	Pluies imperméables (m3)	Pluies brutes totales (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes rivière (m3)	Pertes karst + ETR karst (m3)	Pertes totales (m3)
2015	6691568	7544073	14235641	2951304	4073603	519166	6691568	7210734
2016	6634627	7479878	14114506	2669285	4064228	746365	6634627	7380993
2017	7698923	8679766	16378689	3543087	4215033	921646	7698923	8620569

Tableau 9 : Bilan des pertes exclusif du sous-bassin versant de Millada

Bilan des pertes								
Année	Pluies perméables (m3)	Pluies imperméables (m3)	Pluies brutes totales (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes rivière (m3)	Pertes karst + ETR karst (m3)	Pertes totales (m3)
2015	3428265	987198	4415463	-670880	776654	881424	3428265	4309689
2016	3399092	978798	4377890	-1262480	773021	1468257	3399092	4867349
2017	3944359	1135812	5080171	-667838	834713	968937	3944359	4913296

Tableau 10 : Bilan des pertes exclusif du sous-bassin versant de Betllans

Bilan des pertes								
Année	Pluies perméables (m3)	Pluies imperméables (m3)	Pluies brutes totales (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes rivière (m3)	Pertes karst + ETR karst (m3)	Pertes totales (m3)
2015	2480294	735141	3215435	92541	607529	35071	2480294	2515365
2016	2459188	728886	3188074	320659	604302	-196075	2459188	2263113
2017	2853680	845810	3699490	160099	659300	26411	2853680	2880091

Tableau 11 : Bilan des pertes exclusif du sous-bassin versant de Conat

En regardant en détail les bilans des pertes ci-dessus, il est clair que ces nombreuses pertes s'expliquent principalement par le fait que ces deux sous-bassins versant se situent majoritairement sur le calcaire karstique du mont Coronat (pluies perméables bien supérieures aux pluies imperméables), contrairement au sous-bassin versant de Millada, mais aussi par des pertes dans la rivière plus ou moins importantes. Il y a une zone de perte d'eau géologique dans la rivière pour chacun de ces trois sous-bassins versants. Le bilan des pertes permet d'estimer chacune de ces pertes distinctivement afin de pouvoir les mettre en relation avec les valeurs mesurées lors d'études antérieures. Les pertes moyennes dans les bilans sont de 23 l/s pour Millada, de 35 l/s pour Betllans et de 1 l/s pour Conat.

D. Rocheteau en 2017 a étudié la perte entre Betllans et Conat et a mis en évidence une perte d'environ 10 l/s (ROCHETEAU, 2017). Par ailleurs, A. Chaubet en 2014 et M. Rio en 2015 ont respectivement mesuré 48 l/s (CHAUBET, 2014) et 53 l/s (RIO, 2015) d'eau perdue dans la rivière entre Millada et Betllans. Enfin, la perte située en amont de la station Millada n'a jamais été spécifiquement mesurée à ce jour. Cependant, si on se fie à la valeur moyenne obtenue dans le bilan et aux méthodes de calcul utilisées pour établir le bilan, on pourrait supposer que la valeur de la perte se situe aux alentours de 23 l/s. Ces différences entre les pertes obtenues dans le bilan et les pertes mesurées pourraient s'expliquer par le fait que lorsqu'il y a des fortes pluies au cours de l'année, les quantités d'eau dans le karst augmentent et des résurgences se mettent à restituer une partie de l'eau à la rivière, ce qui réduit les volumes de pertes sur l'année. Ce phénomène ne peut pas être observable sur des mesures à un instant t qui ont en plus été réalisées en période d'étiage. Cette hypothèse permettrait donc d'expliquer pourquoi mes valeurs de pertes sont plus faibles et il faudrait bien sûr réaliser une étude spécifique sur ces pertes afin de la valider.

2. Modélisation des écoulements futurs

Avant de présenter le principe de la modélisation ainsi que les résultats obtenus, il paraît essentiel de préciser qu'il ne s'agit pas là de conclusions certaines ou robustes mais plutôt d'une tentative de proposer des premières estimations de l'effet du réchauffement climatique sur la quantité et le comportement des écoulements de la rivière de Nohèdes à Conat qui s'inscrit dans une volonté d'anticipation et de compréhension de l'évolution d'une ressource fragile et qui sera probablement approfondie ultérieurement.

Maintenant que le bilan hydrologique du bassin versant de Nohèdes-Conat a été établi, ainsi que ceux des sous-bassins versants, il est possible de modifier certains paramètres pour observer les répercussions sur les différents termes du bilan, et notamment sur le volume ruisselé. L'objectif est donc de modéliser les écoulements futurs dans un contexte de

changement climatique. Pour ce faire, deux paramètres déterminants vont être modifiés : la température et les précipitations. Cela va permettre d'évaluer l'impact des variations de température, de pluviométrie, et des deux combinées sur la ressource en eau.

Les nouvelles valeurs de température et de pluviométrie ont été choisies en se basant sur les prévisions régionales de l'évolution du climat pour la fin du siècle publiées par l'OPCC (Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique) en 2018, prévisions qui sont visiblement proches de celles à échelle plus globale du GIEC (Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) et de l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique). L'augmentation des températures au cours du siècle est un élément majeur du changement climatique. Les valeurs de température sélectionnées correspondent approximativement aux différents scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) utilisés pour les prévisions et permettent d'encadrer l'intégralité des valeurs possibles (OPCC, 2018). Les nouveaux bilans du bassin versant total de Nohèdes-Conat vont donc être modélisés ci-dessous avec les valeurs de température modifiées de la façon suivante :

- Scénario + 1,5°C (RCP 4.5)
- Scénario + 3°C (RCP 6.0)
- Scénario + 5°C (RCP 8.5)

Le scénario + 5°C correspond aux prévisions pour 2100 dans le cas où l'on ne ferait rien pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et que l'on continuerait donc sur la dynamique actuelle. Le scénario + 1,5°C correspond lui aux prévisions dans le cas où tous les moyens seraient mis en place pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre. C'est d'ailleurs l'objectif qui a été fixé par les pays signataires de la convention cadre des Nations unies pour la fin du siècle (augmentation inférieure à +2°C).

Bilan hydrologique + 1,5°C						
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	29944473	6176761	9731924	14035788	9,45	7,09
2016	29620565	5399399	9709711	14511455	10,61	7,06
2017	37331342	10567207	10350179	16413956	6,71	7,93

Bilan hydrologique + 3°C						
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	29944473	5522688	10385997	14035788	19,04	14,29
2016	29620565	4750038	10359072	14511455	21,36	14,22
2017	37331342	9777103	11140283	16413956	13,69	16,17

Bilan hydrologique + 5°C						
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	29944473	4643866	11264819	14035788	31,92	23,96
2016	29620565	3878755	11230355	14511455	35,78	23,83
2017	37331342	8682431	12234955	16413956	23,35	27,58

Tableau 12 : Modélisation des bilans hydrologiques totaux du bassin versant de Nohèdes-Conat pour différents scénarios de température

L'augmentation de la température agit directement sur l'ETR en augmentant sa valeur. Dans le tableau figure le gain d'ETR chaque année qui augmente logiquement avec l'augmentation de la température. Cette augmentation de l'ETR, pour rééquilibrer le bilan, va impliquer une diminution du volume ruisselé (ne sachant pas comment réagiraient les pertes géologiques à ces changements, elles sont considérées comme constantes). En effet, s'il y a une plus grande quantité d'eau qui s'évapotranspire, il y a par conséquent moins d'eau disponible qui ruisselle dans la rivière. La colonne perte du volume ruisselé dans le tableau indique un pourcentage de perte allant en moyenne de 8,9 % pour le scénario + 1,5°C à 30,4 % pour le scénario + 5°C. Il

pourrait donc y avoir, pour le scénario le plus pessimiste, presque un tiers d'eau en moins dans la rivière de Nohèdes à Conat. Néanmoins, il est important de mentionner, pour nuancer les résultats, que les années 2015 et 2016 sont des années sèches et que l'année 2017 a une pluviométrie très proche de la moyenne trentennale. Il est évident qu'une augmentation de + 5°C aura un impact plus important sur les années sèches que sur les années à pluviométrie moyenne ou élevée. Cela est clairement visible dans le tableau puisque l'année 2017, qui est la plus pluvieuse des trois, présente une perte de volume ruisselé toujours inférieure aux deux autres ainsi qu'un gain d'ETR toujours supérieur car il y a beaucoup plus d'eau disponible à l'évapotranspiration cette année-là.

En ce qui concerne les variations de pluviométrie d'ici la fin du siècle, l'OPCC constate que, pour les Pyrénées, il y a autant de modèles qui prévoient une légère augmentation de la pluviométrie moyenne (quelques %) que de modèles qui indiquent une baisse de celle-ci (OPCC, 2018). La tendance semblerait être au maintien des précipitations moyennes actuelles avec quelques variations positives ou négatives et surtout de nombreuses incertitudes dans les prévisions. Il a donc été décidé de traiter deux scénarios d'évolution de la pluviométrie à Nohèdes, à savoir + 10 % et - 10 %, qui figurent dans les bilans ci-dessous, afin d'observer quelles pourraient être les conséquences sur l'hydrologie de la vallée. Ces deux scénarios symbolisent assez largement les bornes inférieures et supérieures des variations potentielles prévues des précipitations et permettent d'évaluer et d'encadrer approximativement la gamme d'impact des modifications pluviométriques sur la quantité d'eau dans la rivière de Nohèdes à Conat.

Bilan hydrologique - 10% P						
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) - X%	Pertes (m3) - X%	Perte V Ruisselé (%)	Perte ETR (%)
2015	26950026	5384794	8789457	12775775	21,06	3,28
2016	26658509	4627128	8769217	13262164	23,39	3,31
2017	33598208	9282301	9351647	14964260	18,06	2,48

Bilan hydrologique + 10% P						
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3) + X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3) + X%	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	32938921	8309745	9333375	15295801	21,82	2,71
2016	32582621	7504924	9316951	15760746	24,25	2,73
2017	41064476	13417413	9783411	17863652	18,45	2,02

Tableau 13 : Modélisation des bilans hydrologiques totaux du bassin versant de Nohèdes-Conat pour différents scénarios de pluviométrie

La modification de la pluviométrie impacte directement le volume des pluies brutes qui ont donc augmenté ou diminué de 10 % selon le scénario. Par conséquent, l'ETR a donc augmenté ou diminué selon qu'il y a plus ou moins d'eau disponible à l'évapotranspiration. Les pertes ont suivi la tendance de la pluviométrie puisque, même si les pertes dans la rivière sont considérées comme constantes car on ne connaît pas leur comportement, les pertes directes de pluies sur les zones perméables (karst) dépendent logiquement, à température égale, de la quantité de précipitations. Il a donc été ajouté ou enlevé aux pertes la portion des 10 % de pluie qui tombe sur le calcaire karstique. Il en résulte donc un nouveau volume ruisselé qui, pour nos scénarios fictifs, va subir une perte ou un gain de 21 % en moyenne. Une fois les modélisations de température et de pluviométrie achevées, il a paru intéressant de croiser différents scénarios pour observer les impacts cumulés. Pour ce faire, trois nouveaux scénarios ont été établis comme suit :

- Un scénario pessimiste : + 5°C et - 10 % de précipitations
- Un scénario moyen : + 3°C et pas de changement sur les précipitations
- Un scénario optimiste : + 1,5°C et + 10 % de précipitations

Les résultats de ces croisements figurent dans les bilans ci-dessous :

Bilan hydrologique - 10% P + 5°C						
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	26950026	3432136	10742115	12775775	49,69	18,21
2016	26658509	2691616	10704729	13262164	55,44	18,04
2017	33598208	6845080	11788868	14964260	39,57	22,93

Bilan hydrologique + 3°C						
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	29944473	5522688	10385997	14035788	19,04	14,29
2016	29620565	4750038	10359072	14511455	21,36	14,22
2017	37331342	9777103	11140283	16413956	13,69	16,17

Bilan hydrologique + 10% P + 1,5°C						
	Pluies brutes (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	32938921	7613242	10029878	15295801	11,61	10,37
2016	32582621	6812178	10009697	15760746	12,78	10,37
2017	41064476	12612296	10588528	17863652	11,34	10,41

Tableau 14 : Modélisation des bilans hydrologiques totaux du bassin versant de Nohèdes-Conat pour différents scénarios de pluviométrie et de température croisés

Les différences de perte de volume ruisselé entre les différents scénarios sont clairement notables. Dans le cas le plus pessimiste, la rivière de Nohèdes pourrait perdre à Conat environ la moitié de son volume d'eau annuel. A contrario, le scénario le plus optimiste envisagerait un gain de 11 à 13 % de volume ruisselé. Par ailleurs, l'intégralité des sous-bassins versants exclusifs (exclusif signifie qui ne prend en compte que le sous-bassin versant concerné et exclu les sous-bassins versant en amont de celui-ci) ont également fait l'objet de cette modélisation et figurent en annexe 5 à 9. Ces résultats ont permis d'établir le tableau suivant qui récapitule et met en évidence les variations d'eau écoulee aux différents exutoires des bassins versants selon les scénarios.

	Précipitations	+10 %	0	-10%
	Températures	+1,5°C	+3°C	+5°C
Eau écoulee	Clot	+10%	-6% à -10%	-24 à -31%
	Torrelles	+10%	-13% à -19%	-36 à -47%
	Millada	+10% à +11%	-12% à -17%	-35 à -45%
	Betllans	+11% à +13%	-13% à -22%	-39 à -57%
	Conat	+11% à +13%	-14% à -21%	-40 à -55%

Tableau 15 : Impacts cumulés des scénarios croisés sur les écoulements d'eau dans la rivière pour chaque sous-bassin versant

Il s'agit ici des bassins versants totaux (donc cumulés). Le code couleur permet d'évaluer la gravité des impacts des différents scénarios sur chacun des bassins versants. Le scénario moyen pourrait entraîner une diminution du volume d'eau de plus de 20 % et le scénario pessimiste pourrait aller jusqu'à 55 % de diminution. Pour ces deux scénarios, l'impact négatif sur l'eau écoulee augmente visiblement en allant vers les bassins versants de plus faible altitude. Cela s'explique par deux éléments principaux :

- Plus l'altitude diminue, plus les apports sont faibles
- Plus l'altitude diminue, plus il fait chaud et plus l'évapotranspiration augmente. Ce phénomène est donc accentué par l'augmentation des températures

Enfin, après avoir modélisé les impacts du changement climatique sur la quantité d'eau dans le bassin versant de Nohèdes-Conat, la question du comportement du régime hydrologique du bassin versant s'est posée. En effet, augmenter la température moyenne de 5°C impliquerait une remontée de la limite de stockage de neige d'un peu plus de 800 mètres (avec un gradient adiabatique de 0,6°C/100 mètres). La limite actuelle de stockage de neige se situant aux alentours de 2000 mètres d'altitude, assez variable selon les années, et le sommet du massif du Madres culminant à 2469 mètres, il n'y aurait probablement plus de stockage de neige en altitude. Pour montrer l'influence de cette absence de stockage sur le régime hydrologique, il a été décidé de comparer les débits moyens actuels du bassin versant de Nohèdes-Conat avec les débits théoriques correspondant au scénario +5°C et -10 % de précipitations. Ces débits théoriques ont été calculés à partir des débits mensuels moyens sur les quatre dernières années et des pluies mensuelles moyennes sur trente ans.

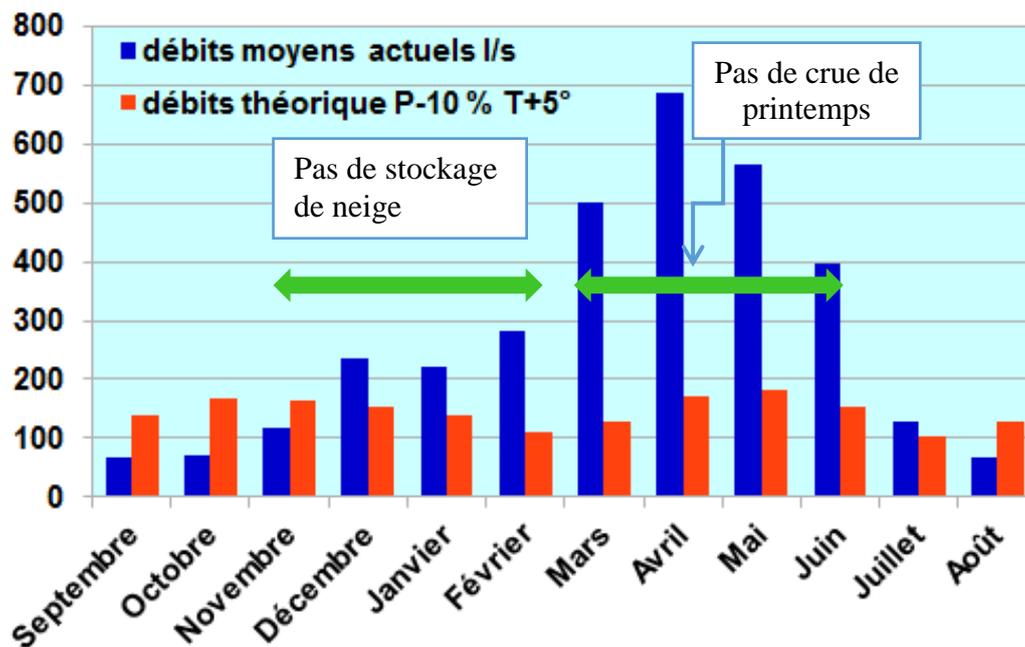


Figure 13 : Graphique comparatif du régime d'écoulement annuel actuel avec un régime d'écoulement modélisé selon le scénario pessimiste

Le graphique ci-dessus illustre clairement la différence entre le régime hydrologique actuel et un régime hydrologique hypothétique pour la fin du siècle. Le régime actuel présente un stockage de précipitations sous forme de neige en hiver et une crue importante au printemps lors de la fonte des neiges. C'est lors de cette période que la majorité du volume d'eau annuel s'écoule. Le régime théorique quant à lui ne présente plus de stockage de neige l'hiver. Il y a donc un débit moyen plus important lors de cette période puisque les précipitations s'écoulent directement et la neige fond très vite. S'il n'y a pas de stock, il n'y a donc pas de crue de printemps et donc les écoulements sont plus homogènes sur toute l'année. Pour résumer, dans le modèle théorique, les débits sont directement liés aux précipitations c'est-à-dire que la pluie qui tombe s'écoule immédiatement après. Il est important de souligner que pour les débits théoriques, l'évapotranspiration a été prise en compte de façon homogène sur tous les mois. Cependant, ce n'est pas le cas dans la réalité puisque l'évapotranspiration est beaucoup plus importante l'été que l'hiver ; il y aurait donc des débits plus faibles l'été et plus forts l'hiver que ceux qui sont donnés dans ce graphique pour les débits théoriques. L'objectif de cette représentation était en premier lieu de mettre en évidence les différences de régime hydrologique mais il serait très intéressant d'intégrer une évapotranspiration adaptée à chaque mois pour approfondir encore plus ce travail.

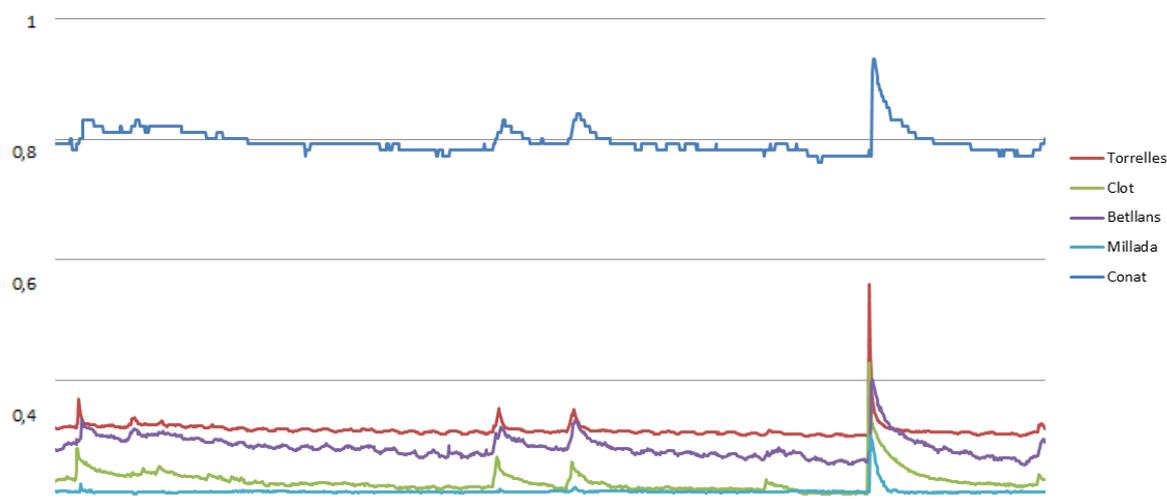
IV. Discussion et perspectives

Cette partie va principalement s'articuler autour de la discussion des résultats (bilans hydrologiques et modélisation), ainsi que des perspectives d'amélioration des méthodes et des données pour les résultats futurs. Elle évoquera également une tentative de proposition d'un protocole de suivi hydrologique pour les années à venir.

1. Volumes ruisselés

Tout d'abord, il y a certaines incohérences dans les volumes ruisselés des bilans hydrologiques, notamment pour Betllans et Conat. En effet, il y a par exemple un volume ruisselé deux fois plus faible à Betllans en 2016 qu'en 2015 alors que ces deux années ont une pluviométrie similaire. Il y a également plus de volume ruisselé à Conat en 2016 qu'en 2017 alors qu'il pleut 108 mm de moins en 2016. Une des hypothèses qui pourrait expliquer ces variations consisterait à considérer que le régime de pertes dans la rivière ne serait pas constant et pourrait varier en fonction du régime pluviométrique de l'année, même avec la même pluviométrie annuelle. Le fonctionnement des pertes sera discuté un peu plus loin.

Cependant, il peut y avoir également plusieurs sources d'erreurs qui viennent alimenter ces incohérences. Pour commencer, il a été constaté que les sondes semblent avoir des sensibilités différentes, notamment celle de Millada en période d'étiage. Ce phénomène est bien visible sur la portion de graphique de la hauteur d'eau en période d'étiage ci-dessous :



0,2 **Figure 14 : Graphique des hauteurs d'eau de chaque station (fin d'année hydrologique 2016)**

Il est clair en voyant les courbes du graphique que la sonde de Millada (courbe bleu clair tout en bas) réagit très peu aux variations faibles et moyennes de hauteur d'eau. Il serait intéressant d'acheter une nouvelle sonde pour remplacer celle de Millada afin de la réparer sans perdre de données. Les corrections des erreurs des sondes peuvent également amener de l'imprécision.

Les méthodes de construction des courbes de tarage peuvent également apporter des imprécisions. En effet, même si la partie centrale des courbes de jaugeage est bien modélisée grâce à des nombreux jaugeages sur chaque station, les parties de courbes qui sont extrapolées dans les gammes de débit ne disposant pas de points de jaugeage sont peu robustes puisqu'elles sont basées sur des méthodes d'ajustement et non des mesures de jaugeage faites sur le terrain. Il n'a pas été possible cette année de réaliser des jaugeages en période de crue pour compléter les courbes de tarage car il y a eu très peu de stockage de neige cet hiver. Il

devient donc urgent de compléter les cinq courbes de tarage en faisant des jaugeages aux valeurs extrêmes pour avoir des courbes précises pour toute la gamme de hauteurs d'eau observée. Cela aura une réelle influence sur les débits qui sont au cœur des conclusions établies par la suite.

2. Pluies brutes

Les pluies brutes varient logiquement en fonction de l'altitude et de la superficie des sous-bassins versants. Cependant, le modèle de pluviométrie utilisé semble présenter des limites en zone montagneuse. En effet, il a été nécessaire de corriger les précipitations en altitude dans les bilans du Clot et de Torrelles. En comparant ses estimations finales avec celles du modèle Aurelhy, Gottardi constate que les précipitations issues du modèle Aurelhy sont sous-estimées en zone montagneuse. Selon lui, les facteurs influents de cette sous-estimation sont principalement le vent et la fraction solide des précipitations (GOTTARDI, 2009). La carte ci-dessous illustre la différence entre les estimations du modèle Aurelhy et les estimations de Gottardi qui tiennent compte des données d'enneigement ainsi que de nombreuses corrections :

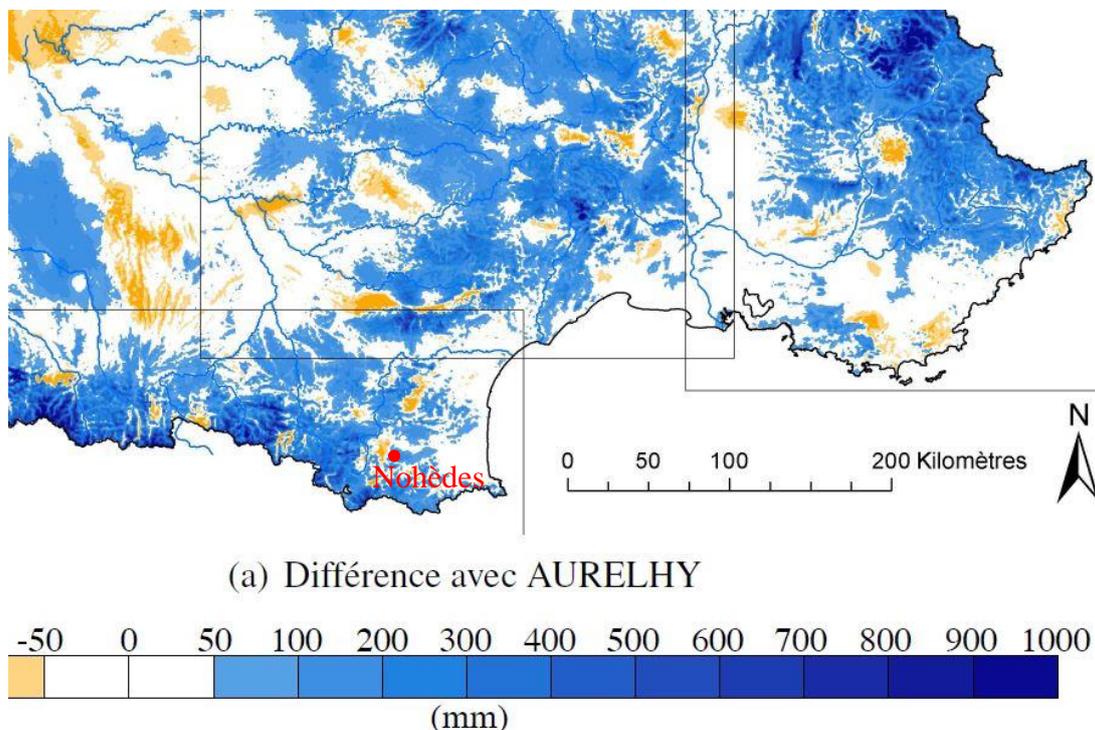


Figure 15 : Carte des différences d'estimation de précipitations entre le modèle Aurelhy et le modèle construit par Gottardi

Le village de Nohèdes semble se situer entre 50 et 100 mm de sous-estimation des pluies. Ces valeurs semblent correctes puisque le modèle Aurelhy donne 712 mm de précipitations annuelles au village alors que la moyenne trentennale mesurée est de 789 mm. En 2017, la correction pour Torrelles est d'environ 150 mm de pluies en plus et pour le Clot de 450 mm. Les corrections sont plutôt cohérentes avec les estimations de Gottardi et augmentent avec l'altitude même si celle du Clot est assez importante. Cette importante valeur de correction peut en partie s'expliquer par le fait que la courbe de tarage du Clot ne soit pas assez précise en hautes eaux, ce qui pourrait entraîner une sur-corrrection des pluies dans le cas où les volumes ruisselés seraient surestimés. De plus, la carte ci-dessus ne prend pas en compte

certaines aspects locaux. En effet, une hypothèse probable mettant en jeu un phénomène local pourrait expliquer ces corrections plus importantes au Clot et rejoindre Gottardi dans son raisonnement sur les facteurs de ces sous-estimations de pluie en altitude. Les plateaux d'altitude situés sur la partie haute du bassin versant du Clot ont une pluviométrie importante, notamment sous forme de neige l'hiver, et subissent des vents violents fréquemment (tramontane). Il a donc été envisagé que, lorsque la tramontane souffle intensément, une quantité non négligeable de neige pourrait être transportée depuis l'extérieur vers l'intérieur des limites de notre bassin et participer au stock et donc aux écoulements de printemps. Par ailleurs, la limite des forêts monte progressivement en altitude à cause du réchauffement climatique et de la disparition de l'influence pastorale et soulève de nouvelles problématiques. Les forêts pourraient bientôt atteindre les hauts plateaux, au détriment d'une biodiversité unique menacée (type climat nordique). La présence de forêts à cette altitude pourrait fortement atténuer le phénomène de transport éolien de la neige depuis l'extérieur des limites du bassin versant vers l'intérieur et donc diminuer le stock neigeux et les volumes ruisselés dans la vallée de Nohèdes. Ce phénomène n'est pour le moment pas pris en compte dans le bilan hydrique et la modélisation mais pourrait faire l'objet d'études postérieures afin d'évaluer la quantité d'eau (neige) supplémentaire apportée par le vent en altitude au bassin versant de Nohèdes-Conat.

Enfin, les relevés journaliers réalisés au pluviomètre peuvent également causer des imprécisions sur l'estimation des pluies annuelles. Gottardi explique que le problème de captation des pluviomètres est difficile à mettre en évidence. Selon lui, il est dû à trois facteurs principaux (GOTTARDI, 2009) :

- La turbulence : effet de la topographie locale et du vent (effet « venturi », angle d'incidence, effet aggravé sur la neige car les particules sont plus légères)
- L'évaporation (directement au sein du collecteur et sur les bords du collecteur par capillarité, jusqu'à 1 mm par jour)
- Les pertes par éclaboussures (au moment du contact entre la goutte d'eau et l'appareil)

3. Evapotranspiration

Les valeurs d'évapotranspiration obtenues dans les bilans représentent presque un tiers des volumes d'eau entrants et semblent donc assez cohérentes à l'échelle du bassin versant ; sachant qu'à l'échelle continentale, avec de nombreuses masses d'eau de surface, l'évapotranspiration représente un peu moins de deux tiers des précipitations (OUDIN, 2004). Cependant, il est largement possible d'améliorer la précision des estimations de l'évapotranspiration sur le bassin versant de Nohèdes-Conat. En premier lieu, il serait judicieux d'installer un capteur enregistreur de température au village de Nohèdes pour pouvoir utiliser dans les années à venir les températures moyennes annuelles adéquates dans la formule, plutôt que d'utiliser la moyenne entre 1962 et 1983.

Pour aller plus loin, il serait intéressant d'installer plusieurs capteurs de température supplémentaires selon des transects sur tout le bassin versant. Pour ce faire, il faudrait rajouter un à trois capteurs à des altitudes différentes de Nohèdes mais dans les conditions les plus similaires possibles (même exposition). Il faudrait ensuite en rajouter deux de plus en face de chacun, un en fond de vallée et un sur le versant opposé pour évaluer les écarts de températures. Cela permettrait de modéliser des isothermes et de pouvoir calculer l'évapotranspiration du bassin versant de manière plus précise.

Enfin, plusieurs propositions d'approfondissement permettraient de développer et d'améliorer grandement ces estimations :

- Calculer l'évapotranspiration en fonction du couvert végétal et du substrat : la quantité d'eau transpirée est différente selon les végétaux et le type de substrat joue un rôle dans la rétention d'eau (disponibilité de l'eau au sol pour évaporation) et l'infiltration
- Réussir à calculer l'évapotranspiration sur les zones perméables
- Travailler sur d'autres formules d'évapotranspiration prenant en compte des éléments ignorés par la formule de Turc (durée d'insolation, rayonnement global, vitesse du vent, humidité relative...) pour pouvoir comparer les résultats ensemble.

4. Pertes d'eau

Tout d'abord, la majorité des pertes se fait par infiltration des pluies dans le calcaire karstique du mont Coronat. En effet, les ruisseaux sur ce versant sont presque toujours à sec sauf en cas de très fortes pluies. Les volumes infiltrés sont donc très importants Cette formation karstique aurait donc le mérite d'être étudiée puisqu'elle a le potentiel de contenir des réserves d'eau potable conséquentes entre autres.

Ensuite, il y a les pertes dans la rivière qui concernent les stations de Millada, Betllans et Conat. Au regard des résultats, les pertes semblent ne pas suivre de réelle tendance. Il n'y a pas de cohérence visible entre les pertes, la pluviométrie et les volumes ruisselés. Cela signifie que le comportement des pertes est très complexe.

En 2016, le sous-bassin versant de Conat présente des pertes dans la rivière négatives. La seule hypothèse plausible est la suivante : elles sont dues à une saturation des zones de perte qui a activé des résurgences (renvoi des eaux souterraines à la surface) lors de forts débits. En effet, les graphiques ci-dessous montrent que la moitié du débit en 2016 s'est écoulé en deux mois, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres années.

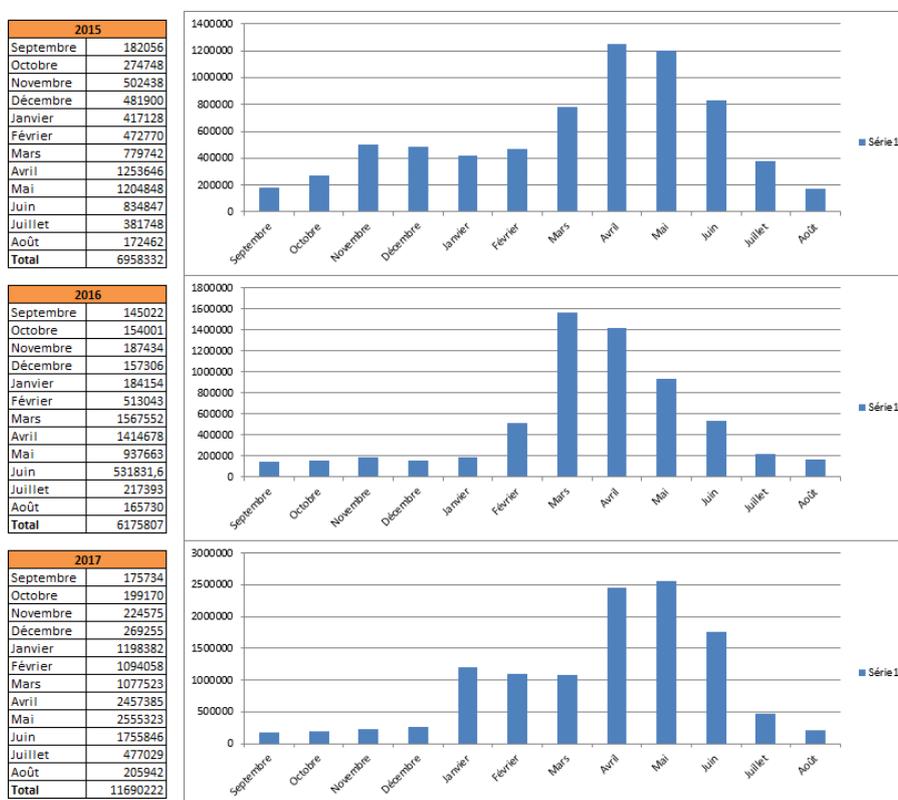


Figure 16 : Graphiques des débits écoulés à Conat pour les années hydrologiques 2015, 2016 et 2017

L'année 2017 présente les débits maximum les plus élevés (résurgences très probables) et l'année 2015 les plus faibles. Cette hypothèse permet donc également d'expliquer pourquoi il y a moins de pertes en 2017 qu'en 2015, malgré une pluviométrie et des débits plus importants en 2017.

Cependant, cette hypothèse reste encore à être validée par des mesures sur le terrain pour évaluer les volumes d'eau renvoyés à la rivière par résurgence. Il est aussi important de réaliser des mesures au niveau des trois pertes à différents débits pour mieux encadrer les quantités d'eau perdues mais également pour approfondir la compréhension du régime des pertes qui est pour l'instant peu connu.

5. Modélisation des écoulements

Les résultats issus de la modélisation sont satisfaisants et remplissent l'objectif principal de ce travail qui est de donner une idée des impacts du réchauffement climatique sur la quantité de la ressource en eau dans le bassin versant de Nohèdes-Conat. Les chiffres sont à prendre avec beaucoup de précautions mais les tendances semblent se dessiner. En effet, si la dynamique actuelle reste la même, il faut s'attendre à ce que la quantité d'eau dans la rivière diminue de façon non négligeable. L'eau est une ressource vulnérable et le scénario modélisé ci-dessous pour le sous-bassin versant de Conat l'illustre bien.

Bilan hydrologique - 10% P + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	2893892	3820	622736	2267336	95,87	2,50
2016	2869267	233606	618467	2017194	27,15	2,34
2017	3329541	40457	694361	2594723	74,73	5,32

Tableau 16 : Modélisation du bilan hydrologique exclusif du sous-bassin versant de Conat pour le scénario pessimiste

Le sous-bassin versant de Conat a une contribution actuelle à la rivière assez faible. Cependant, dans le cas du scénario pessimiste, la modélisation montre que, pour certaines années, la contribution du sous-bassin versant de Conat pourrait se rapprocher dangereusement de la valeur nulle. Cela ferait avec le sous-bassin versant de Betllans, deux sous-bassins versants consécutifs qui ne contribueraient pas à terme au volume ruisselé de la rivière. Il y a donc une forte vulnérabilité de la ressource en eau dans le bassin versant principalement à cause des proportions importantes de pertes (karst + rivière).

Il semble également important d'évoquer les impacts non visibles, qui ont fait l'objet d'une tentative de représentation graphique (figure 13), comme la diminution du stock de neige et les périodes d'étiage plus marqués. Ces modifications auront un impact sur la disponibilité de l'eau et par conséquent sur la morphologie (disparition des crues morphogènes) et l'écologie du cours d'eau (connectivité des berges et disponibilité de la nourriture pour le Desman des Pyrénées par exemple).

Conclusion

Pour conclure, tout le travail effectué au cours de ce stage a contribué à développer les connaissances du comportement hydrologique du bassin versant de Nohèdes-Conat.

Tout d'abord, les méthodes mises en place ont permis d'atteindre les objectifs fixés par le stage. Un important travail sur les données a dû être réalisé pour s'assurer de leur qualité et pouvoir les exploiter.

Les bilans hydrologiques ont été établis pour les trois années précédentes et ceux de l'année hydrologique 2018/2019 seront réalisés au cours du mois de septembre. Ils ont montré que les différents sous-bassins versants de la vallée avaient des contributions vraiment inégales. Il a aussi été mis en évidence des pertes d'eau très importantes. De ce fait, les bilans des pertes ont été dressés pour mieux comprendre les transferts d'eau dans le bassin versant de Nohèdes-Conat et ont appuyé sur la nécessité d'approfondir les études sur le régime des pertes au cours de l'année, tant ce dernier semble complexe.

La première tentative de modélisation des écoulements futurs dans le contexte de changement climatique actuel a abouti sur des résultats marquants. Cette première approche permet d'illustrer la vulnérabilité de la ressource en eau et le besoin d'anticiper les changements à venir. Les quantités d'eau et les régimes d'écoulements vont être inévitablement modifiés et de nouvelles problématiques émergeront. Il est donc essentiel de tout mettre en œuvre pour protéger au mieux cette ressource vitale.

Il y a finalement encore beaucoup de travail et de nombreuses améliorations à apporter au suivi hydrologique afin de rendre plus robuste les données et les modèles pour tendre vers des bilans hydrologiques plus précis et une modélisation bien plus significative. La première modification à faire en priorité serait d'installer une station pluviométrique en altitude afin de pouvoir recalibrer les isohyètes chaque année pour l'estimation des pluies.

Enfin, il a été jugé intéressant, à l'issue de ce stage, de proposer un début de « protocole » pour les études hydrologiques à venir regroupant des actions suivies essentielles à réaliser tout au long d'une année hydrologique. Ces actions sont les suivantes :

- Mettre à jour les courbes de tarage chaque année hydrologique (à l'aide de plusieurs jaugeages effectués à chaque station sur des périodes ciblées) pour garantir la qualité des données hydrologiques et suivre l'évolution de la morphologie du cours d'eau
- Mettre en place une méthodologie stricte pour la correction des données brutes des sondes faussées par diverses erreurs
- Instaurer des visites de station à un rythme régulier afin de vérifier la présence d'embâcles à retirer ou autres problèmes (à coupler avec d'autres activités)
- Créer une méthodologie générale prenant en compte tous les paramètres à étudier pour valider la bonne qualité des données acquises chaque année
- Poursuivre une maintenance cohérente et régulière du matériel pour éviter des pertes de données

Personnellement, ce stage a été très enrichissant et valorisant pour moi à l'issue de mon parcours universitaire et m'a permis de développer et d'approfondir mes connaissances et mes compétences dans le domaine de l'hydrologie, et plus largement des sciences de la nature, de la gestion des ressources naturelles et des problématiques d'un territoire protégé, au sein d'une équipe de professionnels compétents. Cette expérience a consolidé mon attrait pour ces thématiques et mon envie de continuer dans cette voie, tant les enjeux de protection du patrimoine naturel fragile de notre planète me préoccupent et me captivent.

Références bibliographiques

Ball, C. 2016. Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de la vallée de Nohèdes. *Rapport final École Polytechnique Universitaire de Montpellier*, 29p.

Chaubet, A. 2014. Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de la vallée de Conat et de Nohèdes. *Rapport final École Polytechnique Universitaire de Montpellier*, 63p.

Ducroix, P. 2009. Caractérisation des échanges hydriques entre le karst du mont Coronat et la rivière de Nohèdes. *Rapport final École Polytechnique Universitaire de Montpellier*, 40 p.

Gottardi, F., 2009. Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne, utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement, application aux grands massifs montagneux français. *Thèse Institut National Polytechnique de Grenoble*, 285p.

Le Guenanff, M. 2013. Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de Nohèdes. *Rapport final École Polytechnique Universitaire de Montpellier*, 52 p.

Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique-Communauté de Travail des Pyrénées, 2018. Le changement climatique dans les Pyrénées : impacts, vulnérabilités et adaptation. *Résumé exécutif du rapport OPCC-CTP*, 34p.

Oudin, L., 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. *Thèse Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts*, 496p.

Rio, M. 2015. Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de la vallée de Conat et de Nohèdes. *Rapport final École Polytechnique Universitaire de Montpellier*, 50p.

Rocheteau, D. 2017. Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de la vallée de Nohèdes et de Conat. *Rapport final École Polytechnique Universitaire de Montpellier*, 42p.

Serviere, M. 2010. Fonctionnement du réseau hydrique de Nohèdes : élaboration d'un protocole de suivi hydrologique de la rivière de Nohèdes. *Rapport final École Polytechnique Universitaire de Montpellier*, 88 p.

Liste des figures

Figure 1 : Carte des réserves naturelles nationales des Pyrénées-Orientales.....	7
Figure 2 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de Nohèdes-Conat	8
Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Nohèdes-Conat	8
Figure 4 : Carte des stations hydrométriques du bassin versant	10
Figure 5 : Photos d'une échelle limnimétrique et d'une sonde OTT Orpheus Mini	11
Figure 6 : Graphique montrant une inversion des variations des hauteurs d'eau et sa correction à Conat	12
Figure 7 : Graphique montrant un embâcle et sa correction à Betllans	13
Figure 8 : Graphique montrant l'évolution de la conductivité au cours du temps lors d'un jaugeage au sel.....	14
Figure 9 : Zoom sur la courbe de tarage du Clot avec ses points de jaugeage ...	15
Figure 10 : Carte des isohyètes du modèle Aurelhy	16
Figure 11 : Carte des zones imperméables du bassin versant de Nohèdes-Conat	17
Figure 12 : Graphique des proportions de chaque élément du bilan par rapport aux pluies brutes.....	19
Figure 13 : Graphique comparatif du régime d'écoulement annuel actuel avec un régime d'écoulement modélisé selon le scénario pessimiste.....	26
Figure 14 : Graphique des hauteurs d'eau de chaque station (fin d'année hydrologique 2016)	27
Figure 15 : Carte des différences d'estimation de précipitations entre le modèle Aurelhy et le modèle construit par Gottardi.....	28
Figure 16 : Graphiques des débits écoulés à Conat pour les années hydrologiques 2015, 2016 et 2017	30

Liste des tableaux

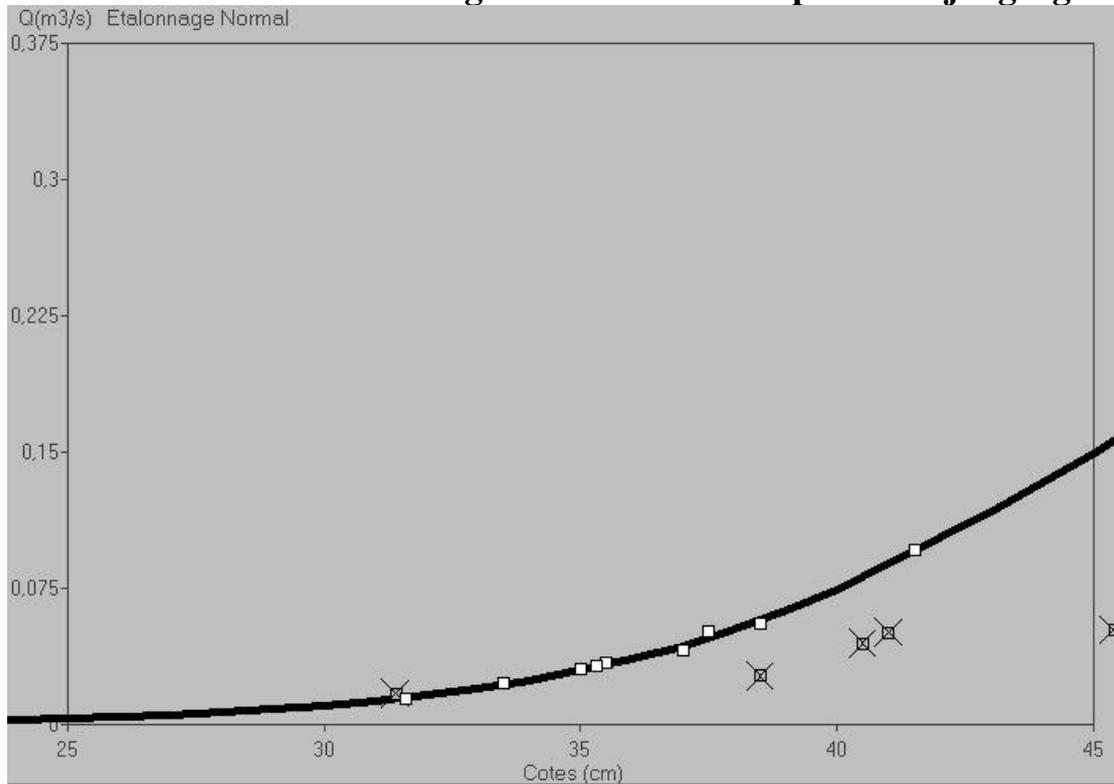
Tableau 1 : Coordonnées et altitude des stations hydrométriques	10
Tableau 2 : Bilan hydrologique total du bassin versant de Nohèdes-Conat	19
Tableau 3 : Bilan des pertes du bilan hydrologique total du bassin versant de Nohèdes-Conat	20
Tableau 4 : Bilan hydrologique exclusif brut et corrigé du sous-bassin versant du Clot	20
Tableau 5 : Bilan hydrologique exclusif brut et corrigé du sous-bassin versant de Torrelles.....	20
Tableau 6 : Bilan hydrologique exclusif du sous-bassin versant de Millada.....	21
Tableau 7 : Bilan hydrologique exclusif du sous-bassin versant de Betllans	21
Tableau 8 : Bilan hydrologique exclusif du sous-bassin versant de Conat	21
Tableau 9 : Bilan des pertes exclusif du sous-bassin versant de Millada	21
Tableau 10 : Bilan des pertes exclusif du sous-bassin versant de Betllans	22
Tableau 11 : Bilan des pertes exclusif du sous-bassin versant de Conat	22
Tableau 12 : Modélisation des bilans hydrologiques totaux du bassin versant de Nohèdes-Conat pour différents scénarios de température	23
Tableau 13 : Modélisation des bilans hydrologiques totaux du bassin versant de Nohèdes-Conat pour différents scénarios de pluviométrie	24
Tableau 14 : Modélisation des bilans hydrologiques totaux du bassin versant de Nohèdes-Conat pour différents scénarios de pluviométrie et de température croisés	25
Tableau 15 : Impacts cumulés des scénarios croisés sur les écoulements d'eau dans la rivière pour chaque sous-bassin versant	25
Tableau 16 : Modélisation du bilan hydrologique exclusif du sous-bassin versant de Conat pour le scénario pessimiste	31

Sommaire des annexes

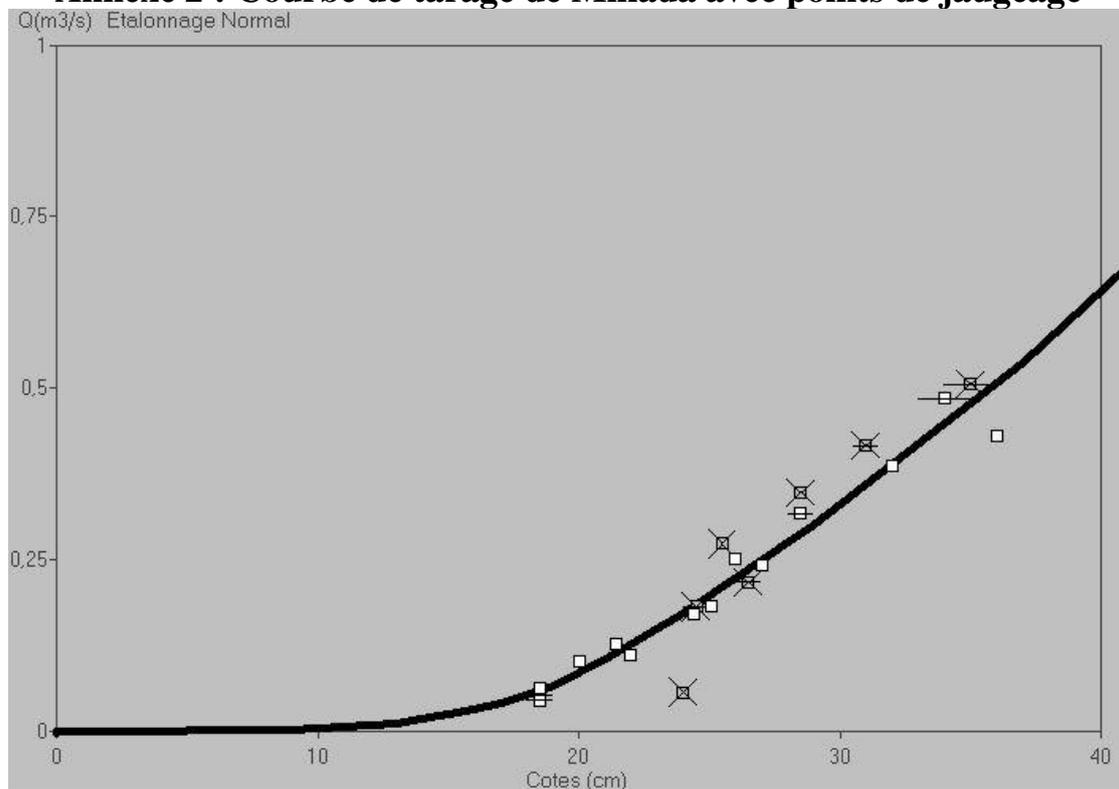
Annexe 1 : Courbe de tarage de Torrelles avec points de jaugeage.....	37
Annexe 2 : Courbe de tarage de Millada avec points de jaugeage.....	37
Annexe 3 : Courbe de tarage de Betllans avec points de jaugeage.....	38
Annexe 4 : Courbe de tarage de Conat avec points de jaugeage.....	38
Annexe 5 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant du Clot selon différents scénarios.....	39
Annexe 6 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant de Torrelles selon différents scénarios.....	40
Annexe 7 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant de Millada selon différents scénarios.....	41
Annexe 8 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant de Betllans selon différents scénarios.....	42
Annexe 9 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant de Conat selon différents scénarios.....	43

Annexes

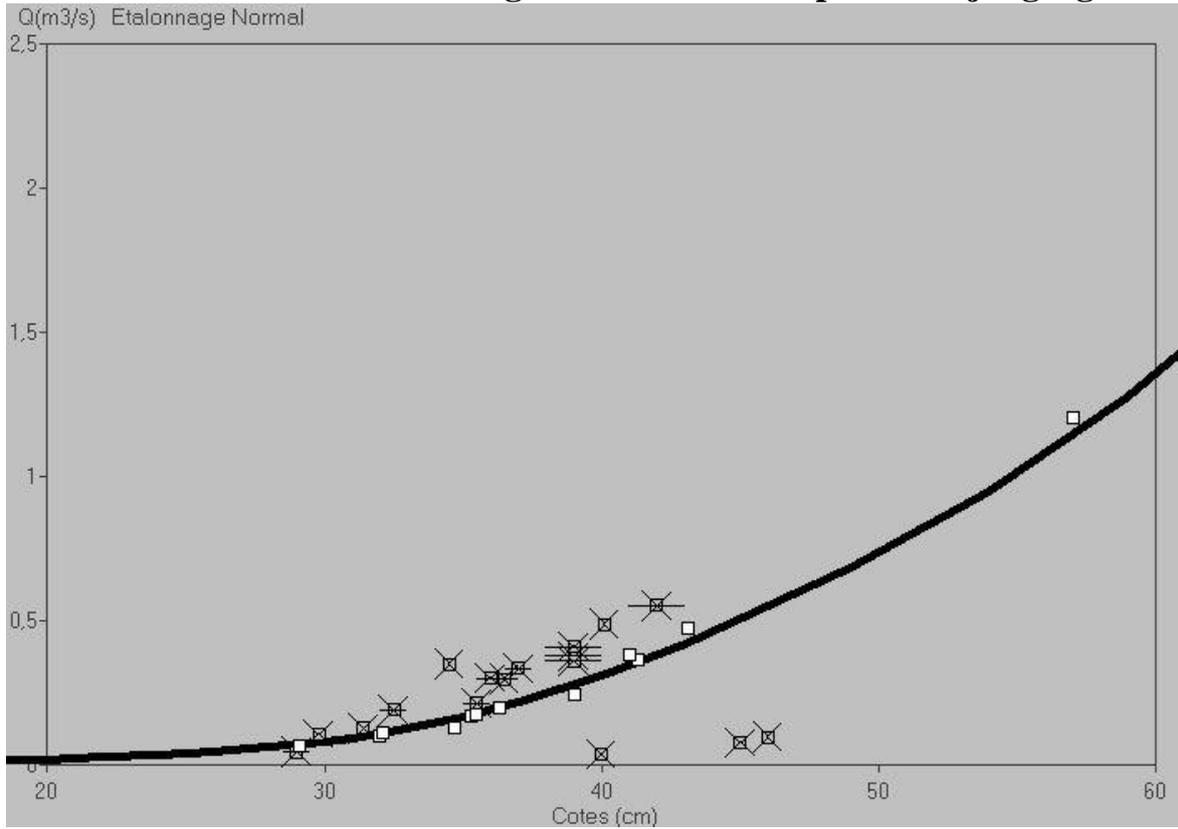
Annexe 1 : Courbe de tarage de Torrelles avec points de jaugeage



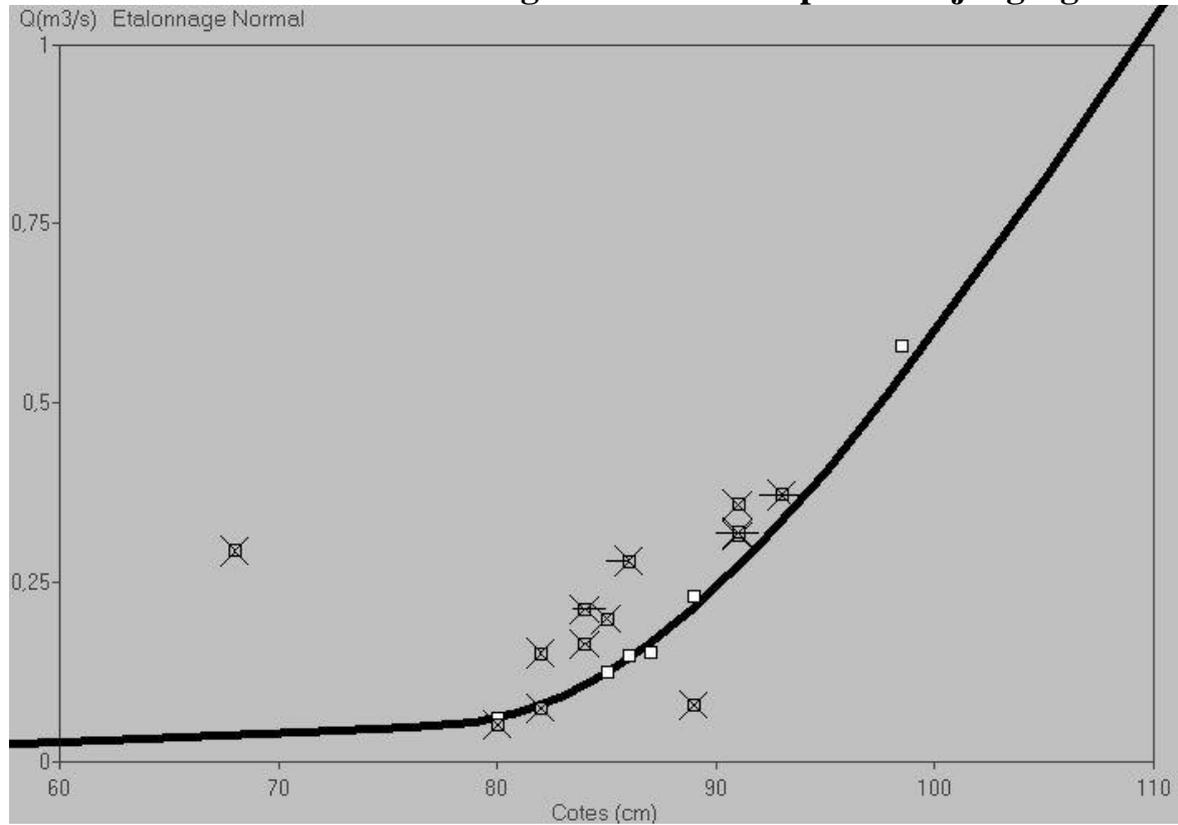
Annexe 2 : Courbe de tarage de Millada avec points de jaugeage



Annexe 3 : Courbe de tarage de Betllans avec points de jaugeage



Annexe 4 : Courbe de tarage de Conat avec points de jaugeage



Annexe 5 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant du Clot selon différents scénarios

Bilan hydrologique + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4452008	2771116	1680892	0	4,86	9,19
2016	4288243	2615745	1672498	0	5,07	9,11
2017	6749140	5003243	1745897	0	3,04	9,88

Bilan hydrologique + 3°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4452008	2622126	1829882	0	9,97	18,87
2016	4288243	2469170	1819073	0	10,39	18,67
2017	6749140	4834502	1914638	0	6,31	20,50

Bilan hydrologique + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4452008	2410045	2041963	0	17,26	32,65
2016	4288243	2261258	2026985	0	17,93	32,23
2017	6749140	4587378	2161762	0	11,10	36,06

Bilan hydrologique - 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) - X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Perte ETR (%)
2015	4006807	2486653	1520154	0	14,63	1,25
2016	3859419	2346931	1512488	0	14,82	1,33
2017	6074226	4494659	1579567	0	12,90	0,59

Bilan hydrologique + 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) + X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4897209	3343130	1554079	0	14,78	0,96
2016	4717067	3168488	1548579	0	14,99	1,02
2017	7424054	5828195	1595859	0	12,94	0,44

Bilan hydrologique - 10% P + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4006807	2008999	1997808	0	31,02	29,78
2016	3859419	1878884	1980535	0	31,81	29,20
2017	6074226	3935693	2138533	0	23,73	34,59

Bilan hydrologique + 10% P + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4897209	3197132	1700077	0	9,77	10,44
2016	4717067	3024178	1692889	0	9,76	10,44
2017	7424054	5668874	1755180	0	9,86	10,47

Annexe 6 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant de Torrelles selon différents scénarios

Bilan hydrologique + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3625926	1390403	2235523	0	9,47	6,96
2016	3651852	1410832	2241020	0	9,40	6,99
2017	5423852	2936517	2487335	0	6,24	8,53

Bilan hydrologique + 3°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3625926	1244117	2381809	0	18,99	13,96
2016	3651852	1263402	2388450	0	18,87	14,03
2017	5423852	2730688	2693164	0	12,81	17,51

Bilan hydrologique + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3625926	1050545	2575381	0	31,60	23,22
2016	3651852	1068090	2583762	0	31,41	23,35
2017	5423852	2441866	2981986	0	22,03	30,11

Bilan hydrologique - 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) - X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Perte ETR (%)
2015	3263333	1243754	2019579	0	19,02	3,37
2016	3286667	1262085	2024582	0	18,95	3,34
2017	4881467	2632469	2248998	0	15,95	1,87

Bilan hydrologique + 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) + X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3988519	1841075	2147444	0	19,88	2,74
2016	4017037	1865555	2151482	0	19,80	2,72
2017	5966237	3640993	2325244	0	16,25	1,46

Bilan hydrologique - 10% P + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3263333	815867	2447466	0	46,88	17,10
2016	3286667	830333	2456334	0	46,68	17,27
2017	4881467	1991663	2889804	0	36,41	26,09

Bilan hydrologique + 10% P + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3988519	1682552	2305967	0	9,55	10,33
2016	4017037	1706075	2310962	0	9,56	10,33
2017	5966237	3436107	2530130	0	9,71	10,40

Annexe 7 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant de Millada selon différents scénarios

Bilan hydrologique + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	14235641	2651420	4373487	7210734	10,16	7,36
2016	14114506	2371598	4361915	7380993	11,15	7,32
2017	16378689	3208560	4549560	8620569	9,44	7,94

Bilan hydrologique + 3°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	14235641	2346077	4678830	7210734	20,51	14,86
2016	14114506	2068814	4664699	7380993	22,50	14,77
2017	16378689	2862249	4895871	8620569	19,22	16,15

Bilan hydrologique + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	14235641	1936435	5088472	7210734	34,39	24,91
2016	14114506	1663150	5070363	7380993	37,69	24,76
2017	16378689	2387697	5370423	8620569	32,61	27,41

Bilan hydrologique - 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) - X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Perte ETR (%)
2015	12812077	2319625	3950875	6541577	21,40	3,01
2016	12703055	2045240	3940285	6717530	23,38	3,05
2017	14740820	2779077	4111066	7850677	21,56	2,47

Bilan hydrologique + 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) + X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	15659205	3606922	4172392	7879891	22,21	2,43
2016	15525957	3317416	4164085	8044456	24,28	2,46
2017	18016558	4328676	4297421	9390461	22,17	1,95

Bilan hydrologique - 10% P + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	12812077	1413846	4856654	6541577	52,09	19,22
2016	12703055	1148363	4837162	6717530	56,98	19,02
2017	14740820	1728611	5161532	7850677	51,21	22,46

Bilan hydrologique + 10% P + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	15659205	3283143	4496171	7879891	11,24	10,37
2016	15525957	2995699	4485802	8044456	12,23	10,37
2017	18016558	3972616	4653481	9390461	12,12	10,40

Annexe 8 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant de Betllans selon différents scénarios

Bilan hydrologique + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4415463	-705627	811401	4309689	5,18	4,47
2016	4377890	-1296722	807263	4867349	2,71	4,43
2017	5080171	-711402	878277	4913296	6,52	5,22

Bilan hydrologique + 3°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4415463	-738044	843818	4309689	10,01	8,65
2016	4377890	-1328627	839168	4867349	5,24	8,56
2017	5080171	-752910	919785	4913296	12,74	10,19

Bilan hydrologique + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4415463	-776978	882752	4309689	15,81	13,66
2016	4377890	-1366894	877435	4867349	8,27	13,51
2017	5080171	-803962	970837	4913296	20,38	16,31

Bilan hydrologique - 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) - X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Perte ETR (%)
2015	3973917	-723963	731018	3966862	7,91	5,88
2016	3940101	-1314613	727274	4527440	4,13	5,92
2017	4572154	-738159	791453	4518860	10,53	5,18

Bilan hydrologique + 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) + X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4857009	-612042	816535	4652516	8,77	5,13
2016	4815679	-1204628	813049	5207258	4,58	5,18
2017	5588188	-591288	871744	5307732	11,46	4,44

Bilan hydrologique - 10% P + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3973917	-810396	817451	3966862	20,80	5,25
2016	3940101	-1399570	812231	4527440	10,86	5,07
2017	4572154	-851344	904638	4518860	27,48	8,38

Bilan hydrologique + 10% P + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	4857009	-652692	857185	4652516	2,71	10,37
2016	4815679	-1244735	853156	5207258	1,41	10,37
2017	5588188	-641250	921706	5307732	3,98	10,42

Annexe 9 : Modélisation des bilans hydrologiques exclusifs du sous-bassin versant de Conat selon différents scénarios

Bilan hydrologique + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3215435	69449	630621	2515365	24,95	3,80
2016	3188074	297946	627015	2263113	7,08	3,76
2017	3699490	130289	689110	2880091	18,62	4,52

Bilan hydrologique + 3°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3215435	48412	651658	2515365	47,69	7,26
2016	3188074	277279	647682	2263113	13,53	7,18
2017	3699490	102574	716825	2880091	35,93	8,73

Bilan hydrologique + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3215435	23819	676251	2515365	74,26	11,31
2016	3188074	253151	671810	2263113	21,05	11,17
2017	3699490	69452	749947	2880091	56,62	13,75

Bilan hydrologique - 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) - X%	ETR (m3) - X%	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Perte ETR (%)
2015	2893892	58725	567831	2267336	36,54	6,53
2016	2869267	287485	564588	2017194	10,35	6,57
2017	3329541	114255	620563	2594723	28,63	5,88

Bilan hydrologique + 10% P						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3) + X%	ETR (m3) + X%	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3536979	130660	642925	2763394	41,19	5,83
2016	3506881	358093	639756	2509032	11,67	5,87
2017	4069439	210837	693143	3165459	31,69	5,13

Bilan hydrologique - 10% P + 5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Perte V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	2893892	3820	622736	2267336	95,87	2,50
2016	2869267	233606	618467	2017194	27,15	2,34
2017	3329541	40457	694361	2594723	74,73	5,32

Bilan hydrologique + 10% P + 1,5°C						
	Pluies brutes corrigées (m3)	Volume ruisselé (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)	Gain V Ruisselé (%)	Gain ETR (%)
2015	3536979	103107	670478	2763394	11,42	10,36
2016	3506881	330961	666888	2509032	3,21	10,36
2017	4069439	175949	728031	3165459	9,90	10,42

Résumé / Abstract

Contributions à l'établissement du bilan hydrologique du bassin versant de Nohèdes

Résumé :

La Réserve Naturelle Nationale de Nohèdes, située dans le massif du Madres dans les Pyrénées-Orientales au Sud de la France, poursuit depuis 2009, parmi de nombreuses missions, une étude hydrologique de la vallée. Dans la continuité des stages précédents, ces travaux ont pour but d'approfondir les connaissances et la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Nohèdes-Conat. Les objectifs de cette étude sont d'établir les bilans hydrologiques du bassin versant pour analyser les transferts d'eau et mieux appréhender le comportement hydrologique du bassin versant et de modéliser les quantités et le régime des écoulements futurs dans un contexte de changement climatique.

Mots-clés : hydrologie, géologie, climatologie, bassin versant, changement climatique, Réserve Naturelle de Nohèdes, Pyrénées-Orientales

Abstract :

The National Nature Reserve of Nohèdes, located in the mountain of the Madres in the Pyrénées-Orientales in the south of France, continues since 2009, among many missions, a hydrological survey of the valley. Following on from previous studies, this work aims to deepen knowledge and understanding of the hydrological functioning of the Nohèdes-Conat drainage basin. The goals of this survey are to establish drainage basin water balances to analyze water transfers and better understand the drainage basin's hydrological behaviour and to model the quantities and the regime of future flows in the context of climate change.

Keywords : hydrology, geology, climatology, drainage basin, climate change, Nature Reserve of Nohèdes, Pyrénées-Orientales

Feuille de route des améliorations du suivi hydrologique

Actions réalisables à court et moyen terme :

- Réaliser des jaugeages en hautes eaux principalement mais aussi en basses eaux pour compléter et préciser les courbes de tarage des stations hydrométriques
- Installer une station pluviométrique en altitude pour recalibrer le modèle pluviométrique et mieux comprendre certains phénomènes qui nous échappent
- Installer un thermomètre enregistreur au village de Nohèdes mais également sur plusieurs transects définis (versant Sud, versant Nord, fond de vallée) afin de comprendre le modèle thermique du bassin versant et préciser les calculs d'évapotranspiration
- Réaliser des jaugeages au niveau des deux pertes déjà étudiées à différents débits pour mieux encadrer les valeurs des pertes
- Localiser précisément la troisième perte (entre Torrelles et Millada) et la jauger pour estimer les volumes d'eau perdus
- Poursuivre les études sur les zones aquatiques (lacs et tourbières) et en particulier le suivi des températures déjà amorcé depuis 2017 (possibilité de mettre des sondes enregistreuses si intérêt avéré)

Actions réalisables à moyen et long terme :

- Approfondir les calculs d'évapotranspiration : prendre en compte la végétation, le substrat et l'exposition, calculer l'ETR sur les zones perméables, travailler sur de nouvelles formules d'ETR et ETP (annuelles, mensuelles et journalières)
- Etudier les résurgences (restitution de l'eau à la rivière lors de fortes pluies) en termes de quantité et d'occurrence, et plus largement approfondir les connaissances sur le versant karstique du Coronat
- Développer la modélisation sur plusieurs aspects : impacts sur les écoulements, sur les régimes hydrologiques mais aussi sur l'écologie des cours d'eau (biodiversité, morphologie, qualité de l'eau...)
- Améliorer le modèle pluviométrique et climatique à l'aide de contacts compétents dans le domaine pyrénéen (proportionnalité des isohyètes, phénomènes locaux d'altitude, données d'enneigement...)
- Estimer les degrés d'imprécision des méthodes et du matériel utilisés pour obtenir les données scientifiques (sondes, pluviomètres, jaugeages, construction courbe de tarage, formules de calcul...)