

ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MONTPELLIER

Stage d'élève-ingénieur Département Sciences et Technologies de l'Eau

ANNEE 2016-2017

*Contribution à l'établissement du bilan hydrique du
bassin versant de la vallée de Nohèdes et de Conat*

*Fédération des réserves Naturelles Catalanes
Réserves Naturelles de Nohèdes et de Conat*



Réserves Naturelles
CATALANES



Réserve Naturelle
NOHEDES



Réserve Naturelle
CONAT

Rocheteau Danièle

*Tuteur de stage : Alain Mangeot
Tuteur Polytech : Samer Majdalani*

ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MONTPELLIER
UNIVERSITE MONTPELLIER II SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC
Place Eugène Bataillon 34095 MONTPELLIER CEDEX 5
Tél. : 04 67 14 31 60 – Fax : 04 67 14 45 14
E-mail : scola@polytech.univ-montp2.fr



S
T
A
G
E

1^{er} juin-23 août 2017

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier mon tuteur de stage et Conservateur de la Réserve Naturelle de Nohèdes, Alain Mangeot, de m'avoir accueillie et suivie durant mon stage, et pour nos discussions intéressantes sur le terrain.

Mes remerciements vont également au Conservateur de la Réserve de Conat, David Morichon, pour m'avoir accompagné sur le terrain, et d'avoir suivi et apporté un avis critique sur mon travail.

Je remercie ensuite les employés de la Réserve Naturelle de Nohèdes, Maria Martin, Jeanet Dekker, et Olivier Salvador, avec qui partager les bureaux de la réserve fut un vrai plaisir.

Résumé

La Réserve Naturelle de Nohèdes, située dans le massif du Madres dans les Pyrénées Orientales (66), mène une étude hydrologique du bassin versant de la vallée de Nohèdes depuis 2009. La rivière de Nohèdes, affluent de la Têt, prend sa source dans cette vallée, et fait l'objet des différentes études réalisées depuis 2009. Le présent rapport est la continuité des travaux effectués lors de précédents stages en hydrologie [DUCROIX, 2009 ; SERVIERE, 2010 ; LE GUENANFF, 2013 ; CHAUBET, 2014 ; RIO, 2015 ; BALL, 2016], chacun de ces stages ayant pour objectif d'améliorer les connaissances du comportement hydrologique du bassin versant de la vallée de Nohèdes.

Cette étude cherche à compléter les travaux précédents en ce qui concerne les fonctions de stockage/déstockage et l'estimation des pluies en altitude du bassin versant. Pour cela, les courbes de tarages des cinq stations hydrométriques installées dans la vallée ont été enrichies grâce à quelques points de jaugeage supplémentaires. La contribution en débit et en lame d'eau des bassins versants de la vallée est calculée, et la pluviométrie estimée par l'application d'un facteur de correction de la pluie brute en altitude. De plus, un suivi de l'évolution des températures mesurées au stations hydrométriques de la rivière a été initié, et une perte de la rivière dans le karst découverte précédemment a été étudiée. Ce rapport contient également les résultat des recherches sur l'élaboration et la mise en place d'un protocole de suivi des surfaces immergées du cours d'eau en fonction des éclusées de la centrale hydroélectrique du village de Nohèdes.

Mots clés : hydrologie, climatologie, hydrogéologie, hydrométrie, Pyrénées Orientales, Réserves Naturelles de Conat et de Nohèdes, karst

Abstract

Since 2009, the Nature Reserve of Nohèdes, in the Madres Massif in the department of Pyrénées Orientales (66), is carrying an hydrological survey of the water catchment of the Nohèdes Valley. The river of Nohèdes, affluent of the Têt river, has its spring in this valley, and is the subject of different studies developed since 2009. This report is the extension of the work done in previous interships in hydrology [DUCROIX, 2009 ; SERVIERE, 2010 ; LE GUENANFF, 2013 ; CHAUBET, 2014 ; RIO, 2015 ; BALL, 2016], each of these internships having the objective to improve the knowledge on the hydrological behaviour of the water catchment of the Nohèdes valley.

This study aims to complement the previous work concerning the cycles of storage/destocking and the estimation of the rainfall in the height of the valley. To this end, the rating curves of the five hydrometric stations have been supplemented with some points measured by gauging. The flow and water sheet contributions of the valley's water catchments has been calculated, and the rainfall has been estimated by applying a correction factor. Moreover, a monitoring has been instigated on the temperatures of the river measured in the hydrometric stations, and the loss of the river in the karst has been studied. This report also contains the search results on the conception and application of a monitoring protocol of the submerged surfaces of the river depending on the hydropeaking induced by the hydroelectric plant.

Keywords : hydrology, climatology, hydrogeology, hydrometry, Pyrénées Orientales, Nature Reserve of Conat and Nohèdes, karst

Table des matières

Remerciements.....	2
Résumé.....	3
Abstract.....	3
Liste des annexes.....	7
Introduction.....	8
I- Présentation du stage.....	8
A. L'organisme d'accueil.....	8
B. La vallée de Conat et de Nohèdes.....	9
C. Études précédentes sur la vallée.....	10
II- Objectifs du stage.....	11
III- Quelques mots sur le projet GREEN.....	11
IV- Ajustement des courbes de tarage.....	12
A) Suivi limnimétrique.....	12
B) Les jaugeages.....	12
C) Ajustements sur Hydraccess.....	13
D) Traduction des cotes mesurées en débits.....	14
E) Discussion.....	14
V- Quantification de la perte entre Betllans et Conat.....	14
VI- Étude des fonctions de stockage/déstockage.....	17
A) Estimation de la capacité de stockage des sous-bassins versants en altitude.....	17
1. Présentation des sous-bassins versants.....	17
2. Jaugeages à l'exutoire des réservoirs.....	17
3. Tracé des contours des bassins versants.....	18
4. Étude des débits et lames d'eau.....	18
5. Evolution étonnante des températures.....	21
B) Estimation des pluies en altitude.....	23
1. Calcul du volume ruisselé.....	24
2. Calcul des cumuls de pluie.....	24
3. Correction des cumuls de pluie.....	26
C) Discussion et perspectives.....	27
VII- Exploitation des mesures de température.....	27
A) Remarque sur les températures négatives.....	28

1^{er} juin-23 août 2017

B) Études des moyennes.....	28
C) Étude du nombre d'heure par classe de température.....	29
D) Discussion et perspectives.....	30
VIII- Suivi des surfaces immergées en fonction des éclusées de la centrale électrique.....	31
Conclusion et perspectives.....	33
Bilan personnel.....	34
Bibliographie.....	36
ANNEXES.....	37

Liste des tableaux

Tableau 1: Débits mesurés autour de la perte.....	16
Tableau 2: Débits (en L/s) mesurés à l'exutoire de chaque réservoir et à la station du Clot.....	17
Tableau 3: Surface (en ha) de chaque bassin versant.....	19
Tableau 4: Mesures des températures à l'exutoire des réservoirs et de la station du Clot.....	21
Tableau 5: Températures mesurées en altitude.....	22
Tableau 6: Volume ruisselé à l'exutoire des bassins versants des stations hydrométriques pour chaque année hydrologique.....	24
Tableau 7: Classes de températures.....	30

Liste des illustrations

Illustration 1: Carte des Réserves Naturelles Catalanes.....	8
Illustration 2: Carte des stations hydrométriques de la vallée.....	9
Illustration 3: Courbe de tarage de la station du Clot.....	14
Illustration 4: Carte des points de mesure de débit au niveau de la perte.....	15
Illustration 5: Graphique des contributions des bassins versants entre Gorg Estelat et Betllans.....	19
Illustration 6: Graphique des contributions des bassins versants entreTorreles et Betllans.....	19
Illustration 7: Graphique des lames d'eau produites par les bassins versants de Gorg Estelat à Betllans	20
Illustration 8: Graphique des lames d'eau produites par les bassins versants entre Torrelles et Betllans	20
Illustration 9: Graphique des cumuls de pluie et de ruissellement à la station du Clot pour l'année hydrologique 2015/2016.....	25
Illustration 10: Graphique des cumuls de pluie et de ruissellement à la station de La Millada pour l'année hydrologique 2015/2016.....	26
Illustration 11: Graphique des cumuls de pluie et de ruissellement de la station du Clot pour l'année 2015/2016 (avec corrections).....	27

1^{er} juin-23 août 2017

Illustration 12: Graphique des cumuls de pluie et de ruissellement de la station de La Millada pour l'année 2015/2016 (avec corrections).....	27
Illustration 13: Graphique des moyennes annuelles des températures.....	28
Illustration 14: Graphique des moyennes hebdomadaires des températures de la rivière de Nohèdes aux stations hydrométriques pour l'année hydrologique 2015/2016.....	28
Illustration 15: Graphique des moyennes hebdomadaires des températures pour l'année hydrologique 2015/2016.....	29
Illustration 16: Graphique du nombre d'heure pour chaque classe de températures pour l'année hydrologique 2015/2016.....	30

Liste des annexes

Annexe 1 : Courbes de tarage

Annexe 2 : Carte géologique de la vallée de Conat et de Nohèdes

Annexe 3 : Carte des courbes isohyètes données par les modèles de MétéoFrance

Annexe 4 : Formules de calcul des ETP et ETR

Annexe 5 : Graphique des moyennes mensuelles des températures

Annexe 6 : Carte des températures en altitude

Annexe 7 : Photo d'un relevé de la sonde hydrométrique de Conat

Annexe 8 : Carte des trois sous-bassins versants et du bassin versant du Clot

Introduction

Dans le cadre de la formation de STE (Sciences et Technologies de l'Eau) de l'école d'ingénieur POLYTECH Montpellier, ce stage porte sur l'hydrologie de la vallée de Conat et de Nohèdes dans les Pyrénées Orientales (66). Plusieurs aspects du comportement hydrologique de la vallée sont étudiés durant ce stage, certains déjà étudiés lors de précédents stages et dont l'étude demande à être approfondie, et d'autres qui n'avaient pas encore été abordés.

I- Présentation du stage

A. L'organisme d'accueil

Les réserves naturelles de Conat et de Nohèdes ont été créées en 1986. Elles font partie de la Fédération des Réserves Naturelles Catalanes (FRNC), qui regroupe les neuf réserves naturelles nationales des Pyrénées Orientales montrées en illustration 1: les réserves d'Eyne, de Jujols, de Mantet, de Mas Larriou, de la Massane, de Prats, de Py, et celles de Conat et de Nohèdes. Ces deux dernières réserves couvrent plus de 2600 ha. Les objectifs qu'elles poursuivent sont les suivants :

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

Pour répondre à ces objectifs, il faut étudier les différents facteurs qui influencent les écosystèmes de la vallée : les facteurs biotiques (relations entre les espèces, ressources alimentaires...), mais aussi les facteurs abiotiques (influence du non-vivant tel que la structure du sol, le climat, la physico-chimie du milieu...).

Parmi les facteurs abiotiques se trouve le comportement hydrologique du bassin versant. C'est pourquoi, depuis 2009, plusieurs études ont été menées afin d'établir un bilan hydrique du bassin versant de la vallée.

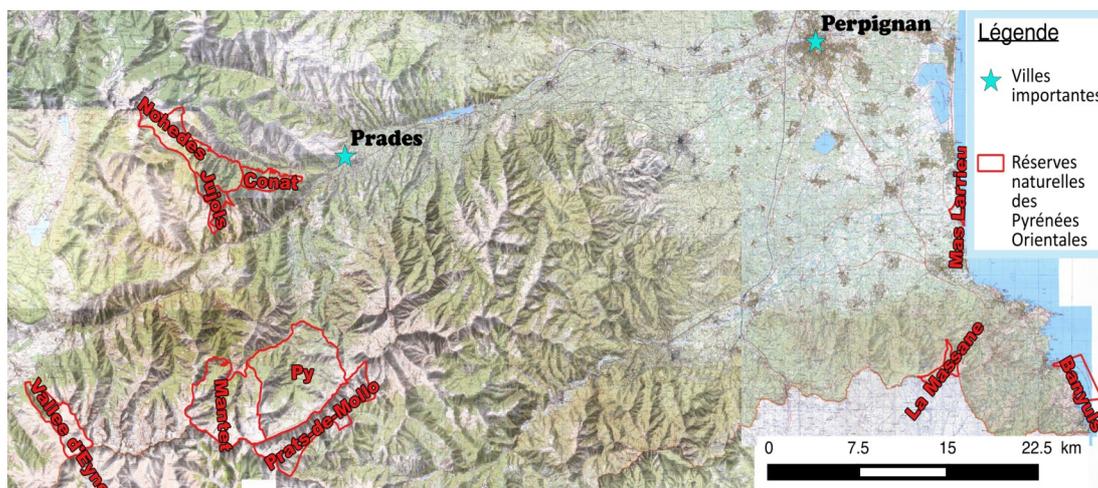


Illustration 1: Carte des Réserves Naturelles Catalanes

B. La vallée de Conat et de Nohèdes

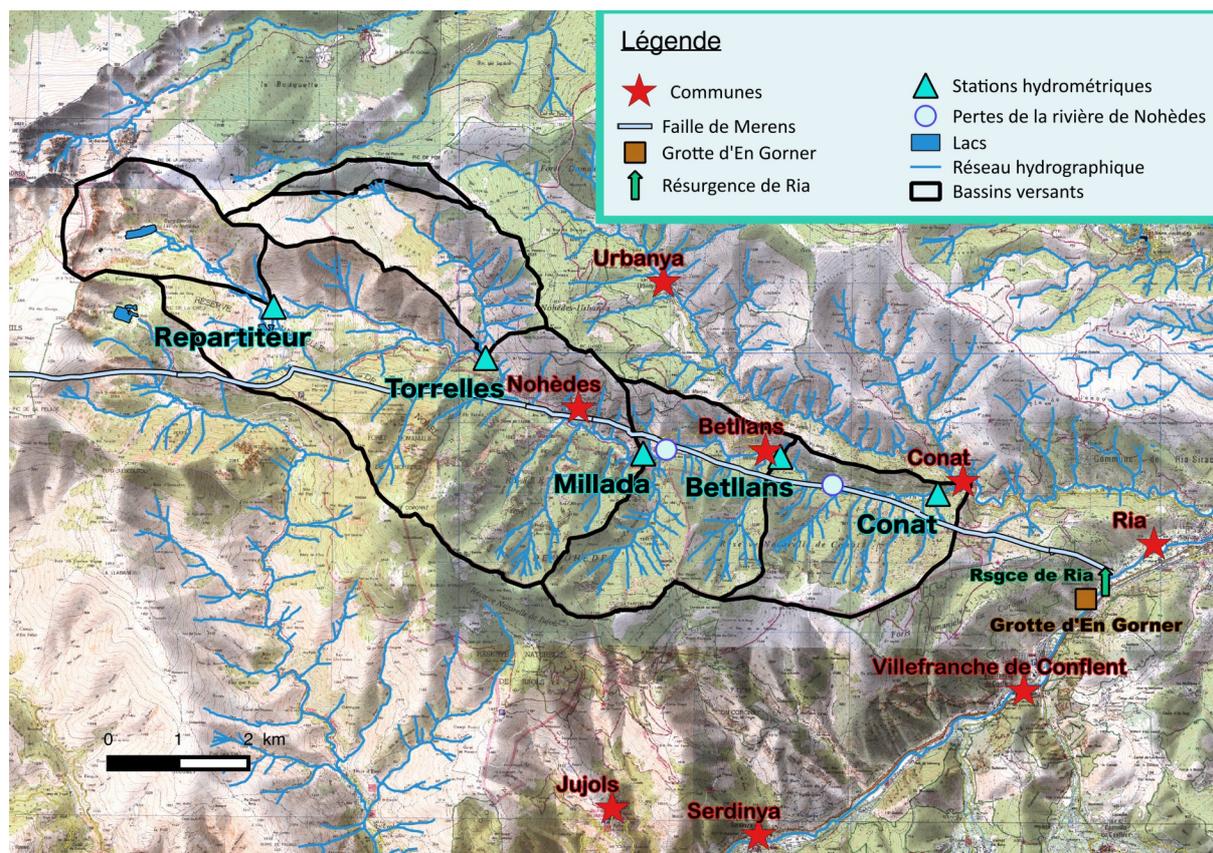


Illustration 2: Carte des stations hydrométriques de la vallée

La vallée de Conat et de Nohèdes est très particulière. En effet, elle est coupée par la faille de Mérens selon l'axe Est-Ouest, laissant au Nord un sol à dominance schisteuse, donc imperméable, et au Sud, des roches essentiellement calcaires. Ces roches calcaires ont formé un large réseau karstique qui est assez méconnu, ce qui est d'ailleurs problématique car la rivière principale de la vallée, la rivière de Nohèdes, traverse plusieurs fois la faille, favorisant des échanges entre la rivière et le karst. Le manque d'informations sur le réseau karstique rend impossible la détermination du trajet de l'eau transférée par la rivière. Au cours des études qui ont été faites depuis 2009, deux points de transferts de la rivière au karst ont été répertoriés (illustration 2): entre les stations Millada et Betllans [DUCROIX, 2009], et entre les stations Betllans et Conat [RIO, 2015]. Un massif granitique (le Madres) occupe la tête du bassin versant. Cette caractéristique est importante si l'on s'intéresse aux ruissellements qui se produisent dans le bassin versant suite aux précipitations. De plus, le climat de la vallée est soumis à des influences méditerranéennes, océaniques, et même subalpines dans les hauteurs. Les conditions particulières qui en découlent permettent le développement d'une grande diversité d'espèces, dont certaines sont endémiques à la vallée.

Même si son appartenance aux Réserves Naturelles de France la protège en grande partie des pollutions humaines qui peuvent perturber le milieu ainsi que les espèces qu'elle abrite, la réserve de Nohèdes subit des pressions anthropiques qui peuvent notamment influencer les mesures et études hydrologiques qui vont être faites sur la vallée. Il s'agit principalement de deux ouvrages hydrauliques.

1^{er} juin-23 août 2017

Le village d'Urbanya, situé dans la vallée voisine (illustration 2), a aménagé un canal dans les années 1850 prélevant les écoulements sur le bassin versant de Nohèdes car les sources situées sur son territoire ne suffisaient pas à alimenter en eau tout le village. Ce canal draine le haut du bassin versant de la rivière de Torrelles, affluent de la rivière de Nohèdes. L'impact de ce canal est surtout visible en période d'étiage, car l'apport de la rivière de Torrelles est presque inexistant. Lors de l'étude, il faut garder en mémoire que le comportement de ce cours d'eau est subordonné à l'existence du canal, et que le bassin versant réagirait différemment en l'absence de cet ouvrage.

L'impact le plus important est provoqué par le fonctionnement de la microcentrale électrique du village de Nohèdes. Lors de sa construction en 1974, la tourbière qui se trouvait au Clot a été aménagée en réservoir tampon afin de garantir un débit suffisant pour faire fonctionner la centrale (environ 70L/s). Un répartiteur de débit a été installé en amont de cet étang de manière à laisser un débit de 50 L/s réservé au cours d'eau. Théoriquement, la centrale peut fonctionner en continu lorsque le débit incident dépasse 120 L/s (50 L/s + 70 L/s). En période sèche, les apports dans le réservoir étant inférieurs au débit alimentant la conduite forcée, la centrale fonctionne par intermittence - ou éclusées. Ces éclusées provoquent une brusque montée des eaux en aval de la restitution, pouvant fausser les mesures de débit qui sont prises au moment du rejet. En outre, les battements occasionnés peuvent affecter la vie dans le cours d'eau (invertébrés, amphibiens, flore aquatique...).

C. Études précédentes sur la vallée

Au fil des années, différentes études de la vallée ont permis à la réserve d'enrichir ses connaissances, et ainsi de répondre à l'un des objectifs qu'elle s'est fixée. Différents chercheurs se sont penchés sur la géologie de la vallée, notamment son orogénèse [CALVET 2012], ses affleurements [GUITARD et al., 1998], et la structure du synclinal de Villefranche ainsi que de la faille de Mérens [LAUMONIER 1997, 2004].

En ce qui concerne l'étude hydrologique de la vallée, la réserve possède une description du réseau hydrographique de surface (illustration 2) [MOUBAYED 1998, BREIL-MOUBAYED 2004] ainsi qu'une étude du réseau souterrain [SALVAYRE 2010]. Cette étude complète les données obtenues lors d'explorations spéléologiques du réseau karstique [RAYMAECKERS 2005]. De plus, les six stages effectués par des étudiants de Polytech STE (Sciences et Technologies de l'Eau) depuis 2009 ont également étendu le savoir hydrologique sur la vallée de Nohèdes.

En 2009, P-L. DUCROIX a confirmé l'existence d'échanges entre la rivière et le réseau karstique en mettant en évidence une faible infiltration de la rivière dans le karst. Des mesures de conductimétrie ont montré à quel point la structure du karst est complexe, et aussi que les périodes de l'année (hautes eaux, basses eaux) influencent la nature des échanges (infiltration ou percolation).

En 2010, M. SERVIERE a contribué à la mise en place des quatre premières stations hydrométriques (Le Clot, Torrelles, La Millada, et Betllans). Elles sont composées d'une échelle limnimétrique, et d'une sonde qui mesure la hauteur d'eau et la température avec un pas de temps horaire. La mise en service des sondes a été faite en décembre 2011. Grâce à des jaugeages au moulinet, les premières courbes de tarage des stations ont été tracées.

1^{er} juin-23 août 2017

En 2013, le stage de M. LEGUENANFF a préparé l'installation de la cinquième et dernière station hydrométrique située en amont du village de Conat. Les courbes de tarages des autres stations ont été affinées, et l'estimation de l'évapotranspiration a permis d'obtenir des valeurs de pluie nettes au niveau des quatre premières stations.

Au cours de l'été 2014, A. CHAUBET a complété les courbes de tarage, précisé le bilan hydrique en prenant en compte les pertes dans le karst, et affiné l'estimation de l'évapotranspiration. La dernière station hydrométrique (Conat) a été installée au mois d'août 2014.

Lors de la quatrième étude, M. RIO a effectué les premiers jaugeages au sel afin de compléter les jaugeages lors des périodes où le moulinet n'est pas adapté (crues, étiage). L'application du modèle SPAZM d'EDF a permis de mieux caractériser les précipitations dans la vallée.

Enfin, en 2016, à l'occasion du stage de C. BALL, la méthode de jaugeage au moulinet a été abandonnée au profit du jaugeage au sel. Une deuxième perte entre les villages de Betllans et Conat a été mise en évidence, mais le débit infiltré n'a pas pu être mesuré. Par ailleurs, la comparaison des cumuls de pluie et des volumes ruisselés au niveau des stations hydrométriques a montré que les précipitations en altitude étaient sous-estimées par les modèles utilisés par MétéoFrance.

II- Objectifs du stage

De même que pour les six autres stages qui ont eu lieu depuis 2009, ce stage a un objectif principal : approfondir le bilan hydrologique de la vallée. Dans la continuité des études précédentes, il se scinde en plusieurs points :

- Compléter les courbes de tarage des 5 stations en période d'étiage et de crue
- Quantifier la deuxième perte entre Betllans et Conat
- Caractériser et évaluer les fonctions de stockage/déstockage hydrique lors des cycles annuels (précipitations neigeuses, gel, lacs, zones humides...)
- Proposer et tester un protocole de suivi de la surface immergée d'un tronçon de cours d'eau en fonction des éclusées de la microcentrale électrique
- Elaborer des outils pour suivre la température des 5 stations selon les périodes de l'année (saisons, années, mois, semaines)

III- Quelques mots sur le projet GREEN

Le projet GREEN ou projet de Gestion et de mise en Réseau des Espaces Naturels Pyrénéens a débuté en 2016. Ses objectifs sont d'améliorer les connaissances et la conservation des différents écosystèmes Pyrénéens, notamment les lacs et zones humides, et de mettre en place un réseau de ces connaissances entre les différents partenaires de ce projet. Ces partenaires sont FORESPIR, la Red de los Espacios Naturales Protegidos del País Vasco y de Navarra, les Conservatoires des Espaces Naturels d'Ariège et de Midi-Pyrénées, le Parc National des Pyrénées, l'ONF (Office National des Forêts), le CRPF (Centre Régional de la Propriété Forestière) Midi-Pyrénées, les Parcs Naturels d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici, del Cadi-Moixeró, de l'Alt Pirineu, de los valls del

1^{er} juin-23 août 2017

Comapedrosa i del vall de Sorteny, le Parc Naturel Régional des Pyrénées Catalanes, et bien sûr, le FRNC (Fédération des Réserves Naturelles Catalanes) dont fait partie la réserve de Nohèdes.

Plusieurs lacs ont été sélectionnés pour faire partie de la campagne de mesure dans le but d'effectuer un « état des lieux » de la faune et de la flore des lacs Pyrénéens, et le Gorg Estelat en fait partie. Ainsi, le 2 août 2017, des intervenants du Conservatoire Botanique National des Pyrénées et du Conservatoire des Espaces Naturels d'Occitanie sont venus dans la réserve. Des plongeurs ont exploré le lac afin d'inventorier la flore aquatique. Pour la faune, ce sont surtout les coléoptères qui étaient recherchés dans les sédiments autour du lac. Puis, en suivant un protocole, des échantillons de sédiments ont été prélevés autour du lac afin d'identifier ensuite les différentes espèces d'invertébrés présentes, ainsi que leur diversité. Les plongeurs étaient équipés d'un GPS bathymétrique et d'un appareil qui mesurait la température et la conductivité en surface.

IV- Ajustement des courbes de tarage

Avant de pouvoir ajuster la courbe de tarage d'une station, il est nécessaire de connaître plusieurs couples hauteur/débit au niveau de cette station. Ces couples sont obtenus par jaugeage.

A) Suivi limnimétrique

La réserve de Nohèdes possède cinq stations limnimétriques dotées chacune d'une échelle limnimétrique et d'une sonde mesurant la hauteur d'eau dans le cours d'eau au pas de temps horaire. Les mesures enregistrées par les sondes sont récupérées directement sur ordinateur par un capteur infrarouge grâce au logiciel OTT. Les données récupérées sont ensuite importées, grâce au logiciel Hydraccess, dans la base de données qui contient toutes les mesures relevées sur les sondes. Il est également possible d'exporter les données récupérées sur un tableur afin de les manipuler plus facilement.

Les sondes étant en fonctionnement depuis fin 2011 – sauf celle de Conat qui a été inaugurée en août 2014 – la réserve possède aujourd'hui presque sept ans de mesures, bien que les données ne soient pas continues pour chaque station, à cause de pannes ou d'un dysfonctionnement. Néanmoins, elles sont suffisamment étendues pour obtenir un suivi des débits au cours du temps grâce aux courbes de tarage.

B) Les jaugeages

Les données de jaugeages sont de deux sortes : les données obtenues grâce au moulinet (entre 2009 et 2015), et celles obtenues par dilution de sel, suite à l'abandon de la méthode du moulinet (depuis 2015).

Les courbes de tarage ont été enrichies au fil des ans par les différents stagiaires qui ont travaillé sur ce sujet. Cependant, elles auraient besoin de points de jaugeage supplémentaires, notamment pour les valeurs extrêmes de la plage de variation des hauteurs d'eau. Ces valeurs extrêmes sont observées principalement lors des pluies automnales, au moment de la fonte du manteau neigeux au printemps (hautes eaux), ou en été lorsque le temps est sec (basses eaux). Malheureusement, ce stage a eu lieu de juin à août, et aucune période de hautes eaux n'a été observée durant cette période. Les courbes de tarages ont donc été extrapolées à partir d'une certaine hauteur d'eau. En revanche, la saison a permis de rajouter quelques points de basses eaux pour plusieurs station.

1^{er} juin-23 août 2017

La station de Conat étant la plus récente (2014), des jaugeages étaient nécessaires pour préciser la courbe de tarage, même en-dehors des valeurs extrêmes. À côté de cela, des jaugeages effectués au Clot dans le cadre de l'étude du stockage/déstockage d'eau en altitude (cf. VI fonction de stockage/déstockage) ont permis de rajouter quelques points à la courbe de tarage de cette station. Enfin, quelques jaugeages sur d'autres stations ont pu être faits également.

C) Ajustements sur Hydraccess

Une base de données contenant toutes les informations hydrologiques de la vallée de Nohèdes a été complétée au fil des stages depuis 2009. Cette base de données contient notamment les points des courbes de tarage obtenues grâce au logiciel Hydraccess.

À l'aide du module CALIBRA, le logiciel Hydraccess interpole et extrapole les points de jaugeage afin de tracer les courbes de tarage. Ces courbes sont biunivoques, c'est-à-dire qu'une valeur de hauteur d'eau ne correspond qu'à une seule valeur de débit, et vice-versa.

Interpolation

Pour ajuster la courbe de tarage entre deux points de jaugeage, le logiciel interpole grâce à un ajustement potentiel :

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

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

Extrapolation

Comme les valeurs extrêmes de la courbe de tarage sont très rarement observées, il est nécessaire d'extrapoler les points de jaugeage afin de couvrir les basses et hautes eaux. C'est la relation de Manning-Strickler qui est 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)

Voici en illustration 3 la courbe de tarage de la station du Clot. Les courbes des autres stations sont en annexe 1.

1^{er} juin-23 août 2017

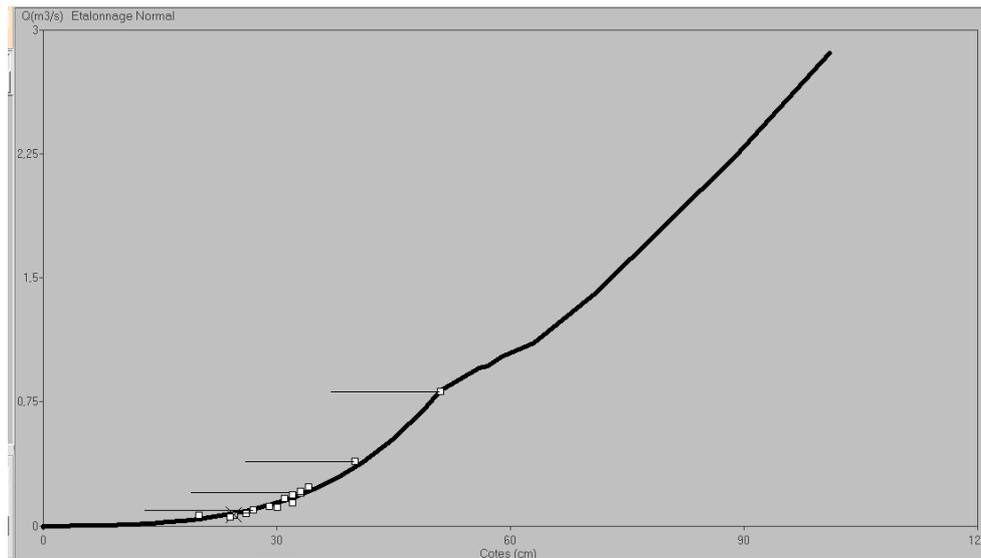


Illustration 3: Courbe de tarage de la station du Clot

Lorsqu'on compare cette courbe avec la courbe de tarage obtenue en 2016, on peut voir que la courbe n'a pas subi beaucoup de changements en un an : les jaugeages qui ont été fait durant ce stage concordent bien avec la courbe de tarage obtenue précédemment, ce qui montre la précision des méthodes de jaugeage. On observe encore une sorte de palier juste après le dernier point de jaugeage, donc au début de l'extrapolation en hautes eaux. Cela est probablement du au fait que les méthodes utilisées pour l'interpolation et l'extrapolation sont différentes, ce qui rend plus difficile le raccordement lors de l'affinage.

D) Traduction des cotes mesurées en débits

L'ajustement des courbes de tarage permet de traduire les hauteurs d'eau mesurées par les sondes hydrométriques en débits. On obtient ainsi un suivi horaire des débits. Par la suite, ces débits seront utilisés pour calculer le volume ruisselé à chaque station, pour obtenir les lames d'eau apportées par les bassins versants correspondants à chaque station, ou encore pour comparer le volume ruisselé avec la pluviométrie.

Étant donné que les courbes de tarage nécessitent d'être complétées, les débits obtenus ne sont pas forcément fiables, et il faut être vigilant quant à leur interprétation.

E) Discussion

La période du stage est trop courte pour faire assez de jaugeages pour obtenir des courbes de tarage les plus précises possible. Il manque encore des points dans les valeurs extrêmes de hauteur d'eau, il faudrait pour cela faire des jaugeages régulièrement durant toute l'année, et surtout en période de crue.

V- Quantification de la perte entre Betllans et Conat

1^{er} juin-23 août 2017

À ce jour, deux pertes de la rivière dans le karst ont été mises en évidence : la première entre les stations de La Millada et de Betllans, répertoriée en 2009, la seconde entre les stations de Betllans et de Conat, mise en évidence en 2015.

On rappelle que l'infiltration de l'eau de la rivière dans le réseau karstique est favorisée au recoupage de la rivière par la faille de Mérens qui marque le passage d'un milieu schisteux à un milieu calcaire. Afin de détecter ce changement de milieu, de l'acide chlorhydrique avait été utilisé en 2016. L'endroit à partir duquel la perte peut se trouver est donc connu avec précision (point 1 de l'illustration 4), il reste alors à déterminer sur quelle longueur de la rivière se fait l'échange, et quelle quantité d'eau est infiltrée.

Méthode :

On peut voir sur la figure ci-dessous que la rivière traverse la faille de Mérens plusieurs fois. Les mesures ont été faites de manière à encadrer tous les recoupages : La première mesure est faite juste en amont du premier croisement (point 1), et la dernière mesure est juste après le dernier croisement. Une autre mesure est prise après le premier croisement.

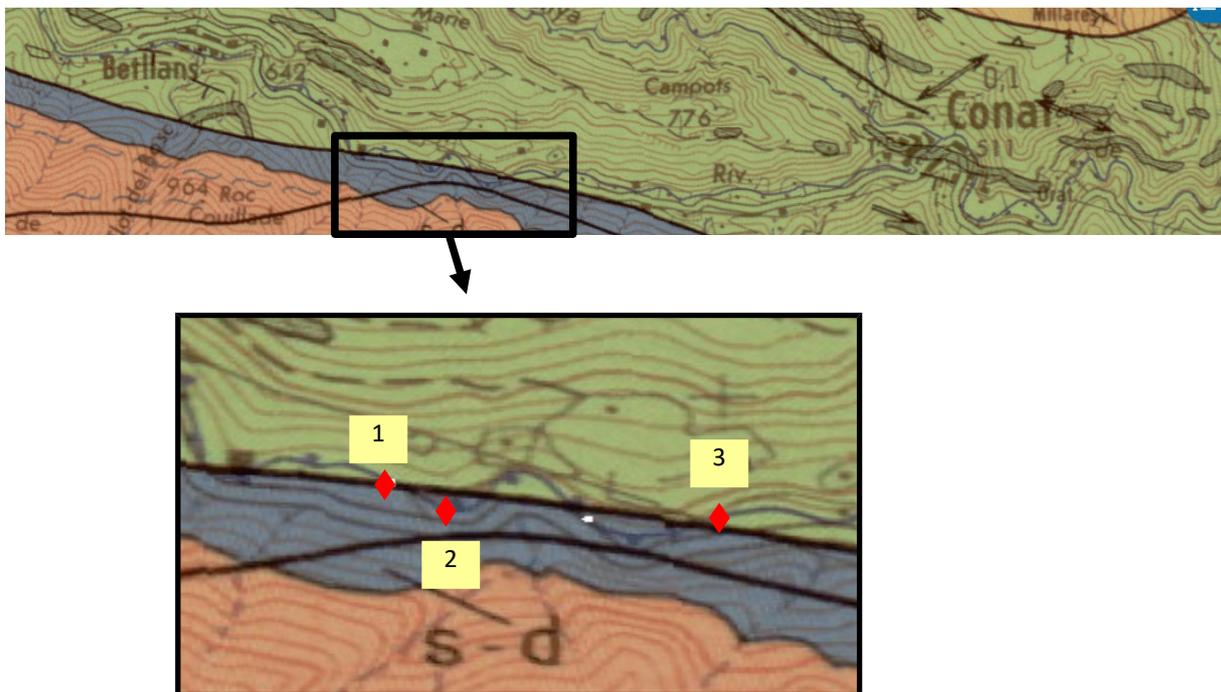


Illustration 4: Carte des points de mesure de débit au niveau de la perte

Lors des premiers jaugeages, seuls les débits aux points 2 et 3 ont été mesurés, alors que les débits aux trois points et à la station de Conat ont été mesurés un mois plus tard lors de la deuxième campagne de jaugeages.

1^{er} juin-23 août 2017

	Point 1	Point 2	Point 3	Conat
22/06/2017	Pas de mesure	222 L/s	146 L/s	Pas de mesure
21/07/2017	79 L/s	74 L/s	64 L/s	79 L/s

Tableau 1: Débits mesurés autour de la perte

On peut remarquer que les débits observés sont très différents entre les deux journées de jaugeages. Cela est dû au fait qu'il y a eu plusieurs orages au début du mois de juin, ce qui a augmenté le niveau des réservoirs en altitude, leur permettant de fournir un débit important à la rivière. En revanche, un mois plus tard, le temps était plutôt sec, et donc le stock d'eau en altitude était bas, d'où un débit bien inférieur observé dans la rivière. L'hypothèse selon laquelle le débit prélevé dans la rivière par la perte varie en fonction du stock en altitude, donc (entre autres) de la pluviométrie, est possible.

Lors de l'étude de la première perte de la rivière dans le karst située entre les stations de La Millada et de Betllans, il avait été observé que la quantité d'eau infiltrée variait en fonction de la période. C'est-à-dire qu'en période d'étiage, le débit perdu sera inférieur au débit perdu en période de crue. Ce même phénomène est observé dans le tableau 1: en juin, le débit infiltré entre les stations 2 et 3 est de 76 L/s, alors qu'en juillet, le débit perdu au même endroit est de 10 L/s, soit presque 8 fois moins.

Cependant, le débit infiltré étant très important en juin, il reste à vérifier que les mesures effectuées en juin sont faussées par les éclusées de la micro-centrale électrique située en amont de la commune de Nohèdes. En effet, la micro-centrale fonctionne avec un débit d'environ 80 L/s. Comme les mesures ont été faites de l'aval vers l'amont, il est possible que le rejet de la centrale ait atteint la perte entre les deux jaugeages. Le débit mesuré au point 2 serait alors influencé par l'éclusée, alors que le débit mesuré au point 3 n'aurait reçu aucun impact du rejet.

Les relevés des sondes ne montrant aucune augmentation soudaine des niveaux d'eau au moment des jaugeages, l'hypothèse des éclusées n'a pas pu être confirmée. Néanmoins, la valeur de débit infiltré lors de cette première campagne de jaugeage au niveau de la perte reste suspecte car très élevée. Il faudra attendre la prochaine période de où le débit est du même ordre de grandeur qu'à la date de jaugeage afin de faire d'autres jaugeages, et ainsi vérifier si cette valeur est fiable.

En revanche, les valeurs de débits obtenues lors des derniers jaugeages effectués en juillet sont cohérentes : le débit diminue entre les deux premiers recoupages de la rivière et de la faille de Mérens (entre les points 1 et 2), puis le débit baisse encore après les deux autres traversées de la faille. Un jaugeage au village de Conat le même jour montre que le débit est remonté à la même valeur qu'au point 1. Les apports d'eau après la perte sont donc assez importants pour restaurer le débit de la rivière à sa valeur avant le traversée de la faille de Mérens.

Bien sûr, les conclusions précédentes ne sont valables que pour la période d'étiage, et encore, il faudrait plus de mesures à cette période afin de vérifier le raisonnement précédent. Le comportement de la rivière à la traversée de la faille est donc inconnu en période de crue.

1^{er} juin-23 août 2017

VI- Étude des fonctions de stockage/déstockage

Cette étude consiste à faire le bilan hydrique de la vallée. Elle se divise en deux sous-études : l'estimation de la capacité de stockage et de déstockage des réservoirs en altitude, et l'estimation des précipitations sur la vallée de Nohèdes.

A) Estimation de la capacité de stockage des sous-bassins versants en altitude

1. Présentation des sous-bassins versants

La rivière de Nohèdes est alimentée par trois grands réservoirs qui stockent l'eau apportée par les précipitations, et fournissent leur trop-plein à la rivière. Ces réservoirs sont les bassins versant du Gorg Estelat, du Pla del Gorg, et du Pla del Mig dont les contours sont montré en annexe 8.

Le Gorg Estelat est un lac situé à 2000 m d'altitude, au pied du Pic du Madres d'environ 4 ha de surface.

Le Pla del Gorg est en contrebas du Gorg Estelat, à environ 1980 m. Il s'agit d'un vaste replat glaciaire largement occupé par une tourbière, un milieu humide très fragile, et par conséquent préservé et très étudié pour sa diversité en faune et en flore.

Le Pla del Mig (1950 m) est de même un replat glaciaire : les glaciers ont érodé le schiste, mais ont laissé les roches granitiques qui sont plus résistantes à l'érosion.

2. Jaugeages à l'exutoire des réservoirs

Afin d'étudier la capacité de chacun de ces réservoirs et les relations qu'ils entretiennent, il est important de connaître leur contribution au cours d'eau. Pour cela, des jaugeages ont été faits à l'exutoire de chaque réservoir, ainsi qu'à la station du Clot qui reçoit tous les apports des réservoirs. Ces mesures de débit ont été faites avec un décalage d'un mois environ de manière à avoir des mesures pour différentes hauteurs d'eau.

Les débits en litres par seconde obtenus par jaugeages pour chaque réservoir se trouvent dans le tableau 2 ci-dessous :

	Gorg Estelat	Pla del Gorg	Pla del Mig	Clot
06/06/2017	101	128	143	138
05/07/2017	38	49	59	63
14/08/2017	21	27	31	33

Tableau 2: Débits (en L/s) mesurés à l'exutoire de chaque réservoir et à la station du Clot

On voit bien l'évolution des débits fournis par les réservoirs en fonction de la période : le temps est de plus en plus sec de juin à août, et donc les réservoirs transmettent de moins en moins d'eau.

Une erreur de jaugeage a peut-être été faite lors des mesures de juin, car le débit à l'exutoire du Pla del Mig est supérieur au débit à la station du Clot (valeurs **en rouge** dans le tableau 2). Or, aucune perte n'est possible sur la section, les substrats schisteux ne s'y prêtant pas. De plus, les jaugeages

1^{er} juin-23 août 2017

suivants ne montrent pas de diminution du débit entre ces deux exutoires. Il s'agit donc sans doute d'une erreur de mesure.

3. Tracé des contours des bassins versants

Comme aucune étude de la vallée à cette altitude n'a été faite, il n'y a pas de données sur les bassins versants, des différents réservoirs, notamment leur surface. Grâce au logiciel QGIS, les contours des bassins versants ont été tracés, et l'aire de chaque bassin versant a été calculée. Seul le bassin versant du Clot avait déjà été tracé dans les études précédentes. Cependant, ce tracé était incomplet : il manquait une partie du bassin versant. C'est pourquoi le bassin versant du Clot a été entièrement retracé sur le logiciel, avec les bassins versants des réservoirs.

Les cartes topographiques de la vallée présentent quelques erreurs. Le tracé du cours d'eau en amont de l'étang du Clot sur la carte topographique est incertain, ce qui a remis en cause l'emplacement de son exutoire. Un repérage GPS a permis d'obtenir le parcours réel du cours d'eau, et ainsi de placer avec exactitude l'exutoire du bassin versant.

Une distinction a été faite entre les tracés topographiques et climatiques des bassins versants. En effet, les crêtes au limites des bassins versants sont soumises à des vents violents qui rabattent le pluie et la neige vers la vallée. L'aire du bassin versant calculée à partir du tracé topographique est donc sous-estimée. Ainsi, un tracé topographique et climatique a été fait pour chaque bassin versant. La surface rajoutée par la prise en compte du climat est d'une dizaine d'hectares pour le Clot, donc un peu moins pour les autres bassins versants. Afin d'avoir des résultats plus réalistes, les calculs qui suivent ont été faits en prenant les aires des bassins versants climatiques.

4. Étude des débits et lames d'eau

Les débits mesurés en juin aux exutoires des bassins versants ont été mis en relation avec les débits des chaque station hydrométrique, obtenus par traduction des courbes de tarage. Afin d'éviter des erreurs, la valeur de débit prise pour la station du Clot est le débit traduit, et non pas le débit mesuré qui était aberrant (voir tableau 2). Pour chaque station, la valeur de débit utilisée dans les calculs est la moyenne des débits traduits de la journée du 06 juin 2017. Pour cela, il faut admettre l'hypothèse selon laquelle les débits mesurés à l'exutoire des différents réservoirs le 06 juin 2017 sont constants durant toute la journée. La courbe de tarage de la station de Conat n'étant pas encore assez robuste, les débits des stations ont été pris jusqu'à la station de Betllans.

Comme les bassins versants des réservoirs en altitude et celui de la station de Torrelles sont indépendants, il y a donc deux types de contributions : une provenant de Torrelles, et l'autre provenant du Clot, et qui comprend par conséquent les contributions des Pla del Mig et del Gorg, et du Gorg Estelat. La contribution de chaque bassin versant a alors pu être tracée dans les illustrations 5 et 6.

Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de la vallée de Nohèdes et de Conat

1^{er} juin-23 août 2017

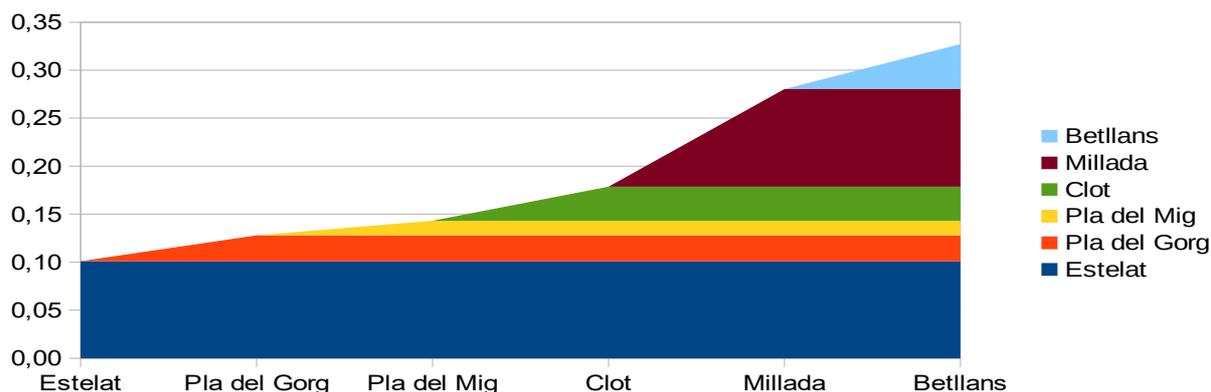


Illustration 5: Graphique des contributions des bassins versants entre Gorg Estelat et Betllans

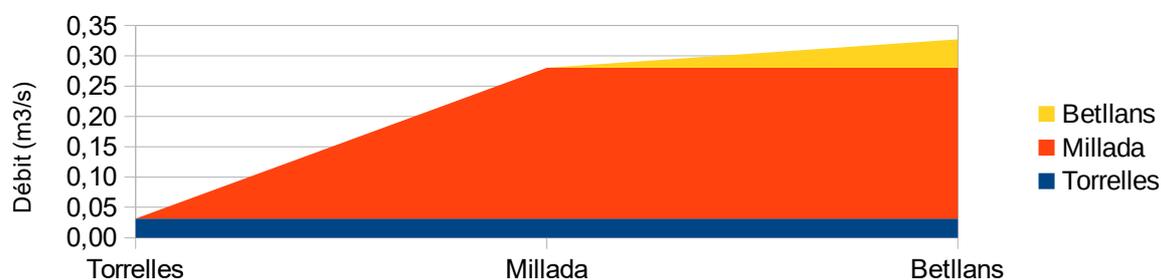


Illustration 6: Graphique des contributions des bassins versants entre Torrelles et Betllans

Grâce aux aires des bassins versants données par le logiciel QGIS, les lames d'eau écoulées le 06 juin 2017 par chaque bassin versants ont pu être calculées à partir des débits précédents (illustrations 7 et 8). Les surfaces se trouvent dans le tableau 3.

Gorg Estelat	Pla del Gorg	Pla del Mig	Clot	Torrelles	Millada	Betllans	Conat
186	274	353	414	470	2552	3222	3758

Tableau 3: Surface (en ha) de chaque bassin versant

1^{er} juin-23 août 2017

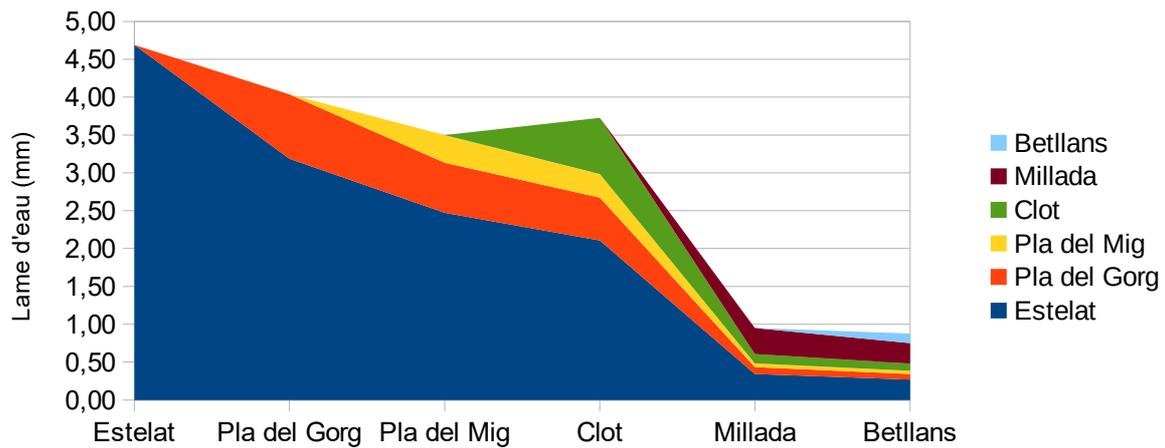


Illustration 7: Graphique des lames d'eau produites par les bassins versants de Gorg Estelat à Betllans

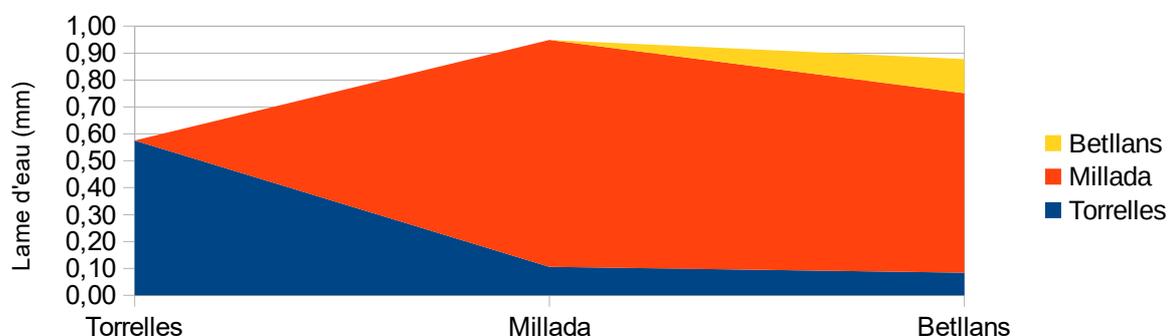


Illustration 8: Graphique des lames d'eau produites par les bassins versants entre Torrelles et Betllans

Tant les graphiques des débits que ceux des lames d'eau montrent que la plus grande contribution provient des bassins versants les plus hauts, ce à quoi l'on pouvait s'attendre. En effet, le bassin versant du Gorg Estelat est situé le plus en altitude, et c'est lui qui fournit la plus grande partie (environ 30 %) du débit observé à Conat. De même, les bassins versants du Pla del Gorg, Pla del Mig, et du Clot produisent une lame d'eau bien plus élevée que les autres bassins versants, alors que leurs surfaces sont bien plus faibles. On peut remarquer que le bassin versant de Torrelles, bien qu'ayant une surface du même ordre de grandeur que les précédents, produit une lame d'eau très fine. Cela est très probablement causé par le drainage du haut du bassin versant par le canal d'Urbanya qui dérive une part importante des écoulements hors du bassin versant.

Le bassin versant de La Millada, bien que 6 fois plus grand que celui du Clot (cf. tableau 3), représente un peu plus de 20 % du débit à Conat, il y a donc beaucoup de sources qui viennent accroître le débit de la rivière en aval des stations du Clot et de Torrelles.

Comme les contributions ont été divisées en deux (Torrelles et Clot), les lames d'eau et débits calculés pour La Millada comprennent les apports de l'autre bassin versant. Cela se voit bien dans les figures 8 et 10 : les contributions de la Millada sont bien plus élevées que celles de Torrelles car elles comprennent les apports du bassin versant du Clot en plus des apports latéraux du bassin versant de La Millada. De même pour le cas inverse (la contribution du bassin versant de Torrelles est compris dans les apports du bassin versant de la Millada) dans les figures 9 et 11, même si c'est moins évident

1^{er} juin-23 août 2017

étant donné que la contribution du bassin versant de Torrelles est très faible comparée à celle du bassin versant du Clot.

On peut remarquer que la lame d'eau produite à l'exutoire du bassin versant du Clot est supérieure à celle produite par le bassin versant du Pla del Mig. Probablement parce que ce dernier reçoit moins d'apport extérieurs que le bassin du Clot comme on peut le voir sur le graphique des contributions en débit (illustration 5).

5. Evolution étonnante des températures

L'appareil Hach utilisé pour les jaugeages enregistre automatiquement les températures en plus des valeurs de conductivité mesurées. C'est en regardant l'évolution des températures au fil des jaugeages qu'un phénomène surprenant a été remarqué : les températures allaient en augmentant avec l'altitude. Ces observations ont été faites entre le Gorg Estelat et la station du Clot. À partir de cette station, les températures évoluent normalement (en augmentant lorsque l'altitude diminue). Le tableau suivant regroupe l'évolution des températures aux exutoires des réservoirs et de la station du Clot, pour chaque campagne de jaugeage.

L'intervalle de temps entre la mesure de température au Clot, et la mesure au Gorg Estelat est le même pour chaque sortie, soit environ 3 heures. De plus, les trois jaugeages ont été faits aux mêmes moments de la journée pour chaque exutoire. On peut donc considérer que les conditions extérieures sont assez proches d'une mesure à l'autre pour permettre de comparer les températures.

	06/06/2017	05/07/2017	14/08/2017
Gorg Estelat (2000 m)	13,4	15,6	15,6
Pla del Gorg (1980 m)	11,9	12,5	12,3
Pla del Mig (1850 m)	10,7	11,6	11,7
Clot (1700 m)	10,9	11,0	11,6

Tableau 4: Mesures des températures à l'exutoire des réservoirs et de la station du Clot

L'hypothèse émise pour expliquer cette évolution contre-intuitive est que les apports au cours d'eau entre les exutoires des réservoirs (sources) sont suffisamment froids pour diminuer la température du cours d'eau, et que les réservoirs ont une capacité assez importante pour réguler la température de l'eau qu'ils contiennent, en recevant très peu d'influence de la température de l'air. Ainsi, il est possible que l'eau dans la tourbière reste à une température constante, qui est plus faible que celle du cours d'eau à cette période de l'année, ce qui implique que le cours d'eau est refroidi durant son passage dans la tourbière. De plus, le lac Estelat est très large mais peu profond, et donc très facilement réchauffé par le soleil.

On remarque d'après le tableau 4 que l'écart de température diminue avec l'altitude : on observe un très grand écart entre les exutoires du Gorg Estelat et du Pla del Gorg comparé à celui mesuré entre

1^{er} juin-23 août 2017

la station du Clot et l'exutoire du Pla del Mig. La principale cause de la diminution de la température au fil de l'eau se trouve donc probablement plus proche du Gorg Estelat que du Clot.

Afin de vérifier cette hypothèse, des mesures ont été faites autour du lac Estelat et au niveau de quelques sources dans les réservoirs, ainsi que dans les piézomètres installés dans la tourbière du Pla del Gorg. Le tableau ci-dessous donne les moyennes calculées à partir de ces mesures. Lorsqu'un nombre de mesures est indiqué dans le type de ressource, c'est la valeur de la moyenne des températures mesurées qui a été retenue. La carte des points de mesures créée sur QGIS se trouve en annexe 6.

Bassin versant	Type de ressource	Température (°C)
Gorg Estelat	Lac (20 mesures)	17,0
	Sources (11 mesures)	9,7
	Exutoire	20,0
Pla del Gorg	Cours d'eau (4 mesures)	14,6
	Sources (3 mesures)	6,4
	Tourbière (13 mesures)	13,4
	Exutoire	14,6
Pla del Mig	Cours d'eau (3 mesures)	15,5
	Sources (3 mesures)	10,3
	Exutoire	16,2

Tableau 5: Températures mesurées en altitude

Les mesures ont été faites au Gorg Estelat n'ont pas été faites le même jour que les autres mesures. Les températures ont été relevées le 17/07/2017 au Gorg Estelat, et le reste des mesures a été fait le 22/07/2017.

Le tableau 5 montre bien que les températures des sources sont bien plus froides que celles du lac et du cours d'eau. En revanche, les températures relevées dans les piézomètres de la tourbière sont du même ordre de grandeur que dans le cours d'eau. Cependant, les mesures ont été faites dans la partie supérieure de la tourbière, il est alors possible que les températures soient plus basses en

1^{er} juin-23 août 2017

profondeur. La couverture tourbeuse, de l'ordre du mètre d'épaisseur, repose sur un lit d'arènes granitiques, qui est très probablement le siège des principaux écoulements vers le cours d'eau. D'après les mesures, il est envisageable que la tourbière joue un rôle dans la diminution de la température du cours d'eau, néanmoins, il n'est pas possible à ce jour de le vérifier avec le matériel de la réserve car les sondes de température ne peuvent pas aller en profondeur.

La profondeur sur les bords du lac étant très faible (de l'ordre de 20 cm), les températures sont très subordonnées au rayonnement solaire, et donc aux heures auxquelles les mesures sont prises. Il serait intéressant d'avoir des mesures des températures au centre et au fond du lac, malheureusement, comme pour la tourbière, les sondes ne permettent pas des mesures en profondeur.

La visite de professionnels dans le cadre du projet de (GREEN) a été l'occasion d'explorer le Gorg Estelat lors d'une campagne de plongée. Les intervenants ont établi la bathymétrie du lac, qui n'avait jamais été faite. Les valeurs observées confirment que le lac est très facilement réchauffé par le soleil. En effet, la température en surface au centre du lac était d'environ 18°C, et la profondeur maximale du lac est de 2,5 m. Avant ces mesures, la profondeur maximale du lac était estimée à 3 m. Cela renforce la conclusion au sujet de l'évolution de la température de la sortie du lac jusqu'à la station du Clot : le lac peut être modélisé par une fine nappe d'eau qui se réchauffe très facilement sous l'effet du rayonnement solaire, son inertie thermique est faible.

B) Estimation des pluies en altitude

Le seul suivi pluviométrique accessible de la vallée se trouve au village de Nohèdes (altitude de 955 m). Il s'agit d'un pluviomètre manuel, relevé chaque jour par un employé de la réserve. Les données sont envoyées chaque mois à MétéoFrance. Une station automatique gérée par EDF est installée à 1,5 km à l'ouest du village, à proximité des bâtiments de l'usine hydroélectrique de Nohèdes, mais les données collectées ne sont pas en libre accès.

La pluviométrie est donc bien connue au village de Nohèdes, cependant, elle peut changer rapidement lorsqu'on s'éloigne du pluviomètre, d'autant plus qu'il s'agit d'une région montagneuse : la pluviométrie varie très brusquement sur des distances très faibles. Comme partout en milieu montagnard, la pluviométrie présente un gradient largement déterminé par l'altitude. Or, le bassin versant de Nohèdes culmine à plus de 2400 m d'altitude, la seule station pluviométrique de Nohèdes ne suffit donc pas pour décrire les pluies sur le bassin versant, si l'on veut une estimation fiable.

Lors des précédentes études, les pluies ont été estimées à partir des courbes isohyètes fournies par les modèles utilisés par MétéoFrance (annexe 3). Cependant, pour le bassin versant de Nohèdes, le cumul de pluie nette d'une année calculé à partir de l'un ou de l'autre modèle est inférieur au cumul ruisselé de la même année. Les pluies estimées par les courbes isohyètes sont donc sous-estimées puisque le volume ruisselé doit être inférieur aux précipitations.

Un facteur de correction est nécessaire afin d'avoir des estimations plus précises de la pluviométrie sur le bassin versant. La recherche de ce facteur de correction est l'objet de cette partie.

1. Calcul du volume ruisselé

À partir des débits traduits grâce aux courbes de tarage, on peut en déduire le volume ruisselé à l'exutoire de chaque station. On obtient ainsi les volumes ruisselés au niveau des stations pour

1^{er} juin-23 août 2017

chaque année hydrologique depuis 2011 (sauf pour la station de Conat). Le tableau suivant donne les volumes ruisselés de chaque station par année hydrologique, ainsi que le cumul de pluie mesuré au pluviomètre de Nohèdes.

Année hydrologique	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016
Cumul au pluviomètre de Nohèdes (955 m) (mm)	798	776	776	678
Volume ruisselé au Clot (10 ⁶ m ³)	6,3	2,4	4,0	3,5
Volume ruisselé à Torrelles (10 ⁶ m ³)	1,9	1,6	1,5	1,2
Volume ruisselé à La Millada (10 ⁶ m ³)	0,3	11,1	12,6	7,7
Volume ruisselé au Betllans (10 ⁶ m ³)	11,7	9,3	11,3	8,5
Volume ruisselé au Conat (10 ⁶ m ³)			<u>11,1</u>	<u>5,7</u>

Tableau 6: Volume ruisselé à l'exutoire des bassins versants des stations hydrométriques pour chaque année hydrologique

Les cases en rouge signifient qu'il n'y a pas de données sur la station pour l'année concernée, et les valeurs en rouge indiquent que les données de la station de l'année sont incomplètes. Comme les premières sondes n'ont pas été installées avant décembre 2011, il manque au moins 3 mois de mesures, c'est pourquoi toutes les valeurs de l'année 2011/2012 n'ont pas été mises dans le tableau.

Comme indiqué dans la partie sur l'étude de la perte, les débits obtenus grâce à la courbe de tarage de la station de Conat sont peu fiables. Toute interprétation des volumes ruisselés calculés à partir de ces débits (soulignées dans le tableau) serait hasardeuse.

On remarque une alternance entre une année plus humide (2012/2013 et 2014/2015) et une année plus sèche (2013/2014 et 2015/2016). Comme observé précédemment sur les graphiques des contributions, l'apport de la rivière de Torrelles est très petit devant celui du Clot.

2. Calcul des cumuls de pluie

Les pluies nettes ont été calculées selon la formule suivante : Pluie Nette = Pluie Brute – ETR

La fonction de transfert (infiltration de la pluie brute) n'a pas été calculée car cela demande des informations telles que la porosité des sols ou les conditions initiales d'humidité qui n'ont jamais été estimées ou mesurées. Il a donc été décidé de calculer les pluies nettes de deux façons : la première en supposant qu'il n'y a pas d'infiltrations sur tout le bassin versant, et la deuxième en supposant que le ruissellement se passe seulement sur les surfaces imperméables du bassin versant, et par conséquent que la pluie qui tombe sur les surfaces perméables est entièrement absorbée par le sol. On obtient alors un encadrement des pluies nettes réelles. Les sols des bassins versants du Clot et de

1^{er} juin-23 août 2017

Torrelles sont entièrement imperméables, il n'y a donc pas d'infiltration possible. C'est pourquoi l'encadrement n'a pas été fait pour ces deux bassins versants.

Grâce au logiciel QGIS, les aires des surfaces entre les courbes isohyètes, ainsi que celle entre les courbes de niveau (avec un espacement de 100 m) ont été calculées pour chaque bassin versant. Les aires entre les courbes de niveau ont été utilisées dans les calculs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) grâce à la formule de Thornthwaite, et de l'évapotranspiration réelle (ETR) grâce à la formule de Turc (annexe 4). Les aires entre les courbes isohyètes ainsi que les données du pluviomètre de Nohèdes ont permis de calculer les pluies brutes sur chaque bassin versant.

Les pluies nettes ont alors pu être obtenues à partir des valeurs de pluie brute et d'évapotranspiration calculées précédemment. Voici le graphique de comparaison des pluies nettes et du volume ruisselé au Clot pour l'année hydrologique 2015/2016 :

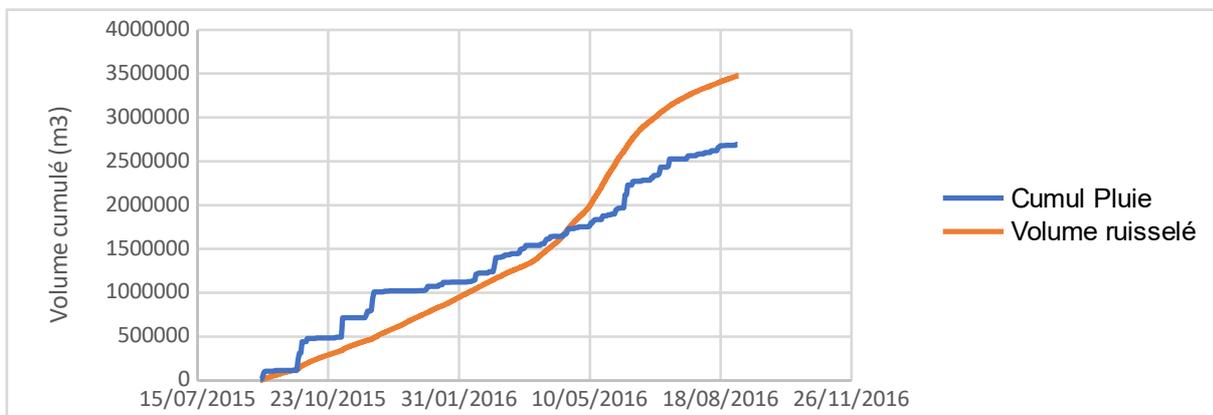


Illustration 9: Graphique des cumuls de pluie et de ruissellement à la station du Clot pour l'année hydrologique 2015/2016

On analysant le l'illustration 9, on voit bien que les pluies sont sous-évaluées, car le volume ruisselé dépasse le cumul des pluies, ce qui est impossible puisqu'il ne peut y avoir plus d'eau qui sort du bassin versant qu'il n'en rentre. Une correction des cumuls de pluie est donc nécessaire.

1^{er} juin-23 août 2017

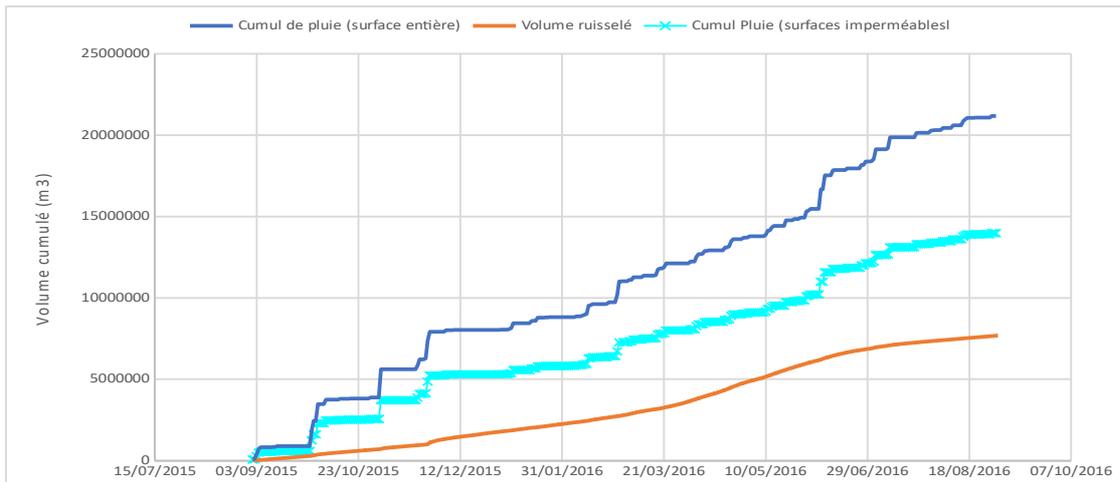


Illustration 10: Graphique des cumuls de pluie et de ruissellement à la station de La Millada pour l'année hydrologique 2015/2016

Le graphique ci-dessus montre que les pluies sont sous-estimées seulement en altitude où le gradient de pluviométrie est très élevé. À partir des stations du Clot et de Torrelles, les estimations données par les courbes isohyètes semblent plus fiables.

3. Correction des cumuls de pluie

Les valeurs de pluies brutes données par les isohyètes sont sous-estimées. Afin d'y remédier, un coefficient de correction a été appliqué à partir de ces valeurs, mais seulement à partir d'une certaine altitude car c'est en haute altitude que les pluies brutes sont mal estimées. Gottardi (2009) montre que les modèles de Météofrance sous-estiment systématiquement les précipitations en altitude, ce qui est mis en évidence sur le bassin versant de la présente étude. L'altitude limite choisie est celle de la station du Clot (1700 m). Toutes les valeurs au-dessus de cette altitude ont été corrigées. Les pluies nettes ont ensuite été calculées de la même manière que précédemment, mais en utilisant les pluies brutes corrigées.

1^{er} juin-23 août 2017

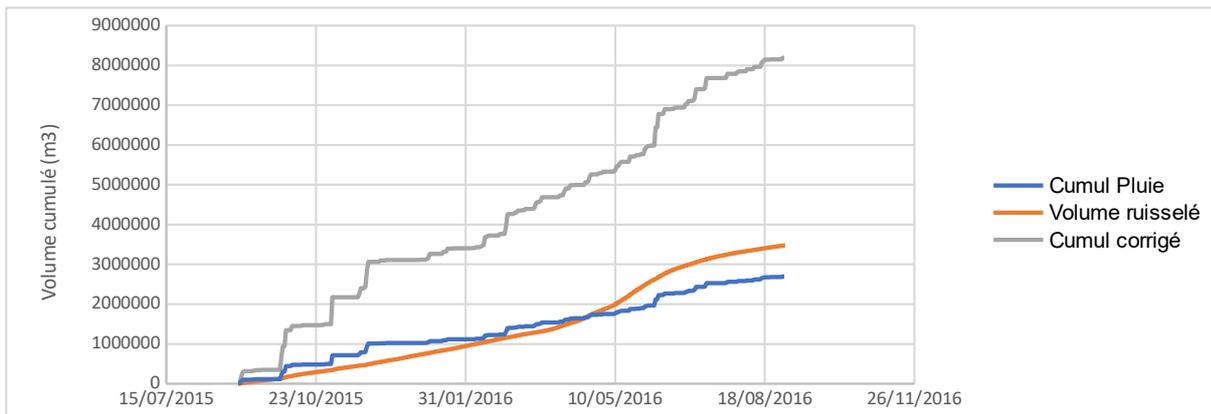


Illustration 11: Graphique des cumuls de pluie et de ruissellement de la station du Clot pour l'année 2015/2016 (avec corrections)

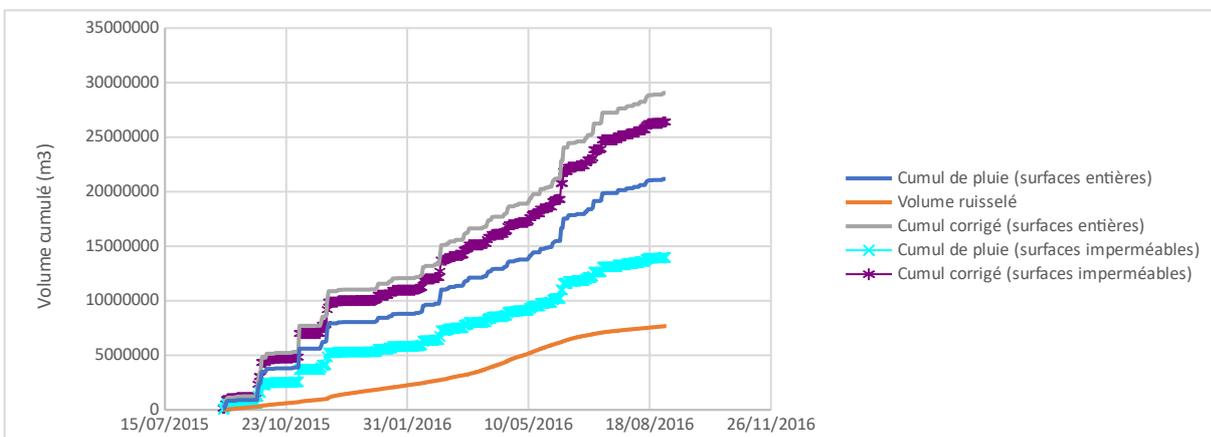


Illustration 12: Graphique des cumuls de pluie et de ruissellement de la station de La Millada pour l'année 2015/2016 (avec corrections)

C) Discussion et perspectives

Après correction des pluies nettes, le volume ruisselé correspond à environ 1/3 des cumuls de pluie. On peut donc considérer que la correction appliquée aux pluies est une correction crédible.

Cependant, l'encadrement fait en prenant en compte toute la surface, puis seulement les surfaces imperméables pour le calcul de l'ETR n'est pas très précis. A. Chaubet, en 2014, avait fait une estimation des pluies nettes en se basant sur l'occupation des sols pour son calcul de l'évapotranspiration. Il serait intéressant de reprendre ses résultats en appliquant la correction afin de les comparer à ceux expliqués plus haut.

VII- Exploitation des mesures de température

1^{er} juin-23 août 2017

Les résultats présentés dans cette partie ont été calculés grâce à des programmes VBA (Visual Basic for Applications) sur le logiciel Excel, ce qui fait gagner beaucoup de temps de manipulation des données, et permet une mise à jour rapide des résultats lors de l'ajout de données. Une notice d'utilisation de ces programmes a été rédigée pour permettre aux employés de la réserve et aux futurs stagiaires de les utiliser plus facilement.

A) Remarque sur les températures négatives

Les sondes hydrométriques peuvent mesurer les températures sur une plage de -25°C à 70°C, à la condition que la sonde ne gèle pas. Or, la rivière de Nohèdes gèle sur plusieurs stations en hiver. Cela implique que les données enregistrées ne descendent pas en dessous de 0°C, température à laquelle le cours d'eau – et donc la sonde – gèle. La station de La Millada est une exception, car quelques températures négatives ont été relevées : même si les valeurs ne passent pas la barre du -2°C, la sonde enregistre quand même des températures négatives. Cela veut dire que le cours d'eau au niveau de cette station gèle à une température inférieure à 0°C. Il est possible que le cours d'eau soit suffisamment agité à l'endroit où la sonde est installée pour retarder le gel de la rivière. Cette hypothèse n'a cependant pas encore été vérifiée. Comme il n'y a pas de mesure des températures lorsque l'écoulement est interrompu par le gel, l'exploitation des données qui suit se fait donc exclusivement sur l'eau en mouvement.

B) Études des moyennes

Les moyennes des températures ont été faites sur différentes périodes, car les informations qu'elles donnent ne sont pas les mêmes selon la période. En effet, plus la période est courte, plus les moyennes varient rapidement. Au contraire, si la période s'élargit, on aura un aperçu plus global de l'évolution des températures. Ainsi, les moyennes annuelles, saisonnières, mensuelles et hebdomadaires ont été calculées pour chaque station.

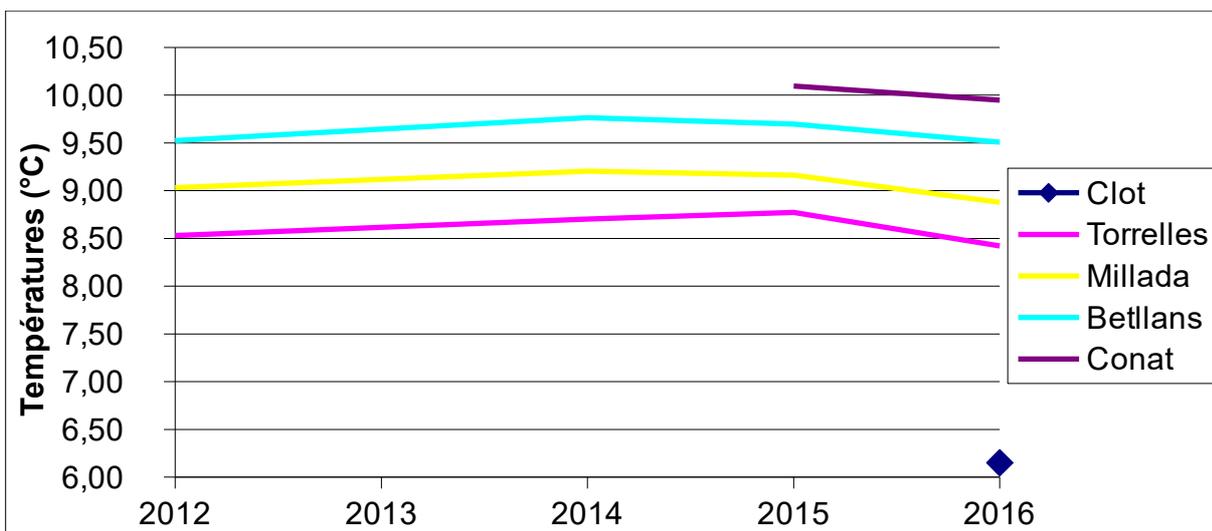


Illustration 13: Graphique des moyennes annuelles des températures

1^{er} juin-23 août 2017

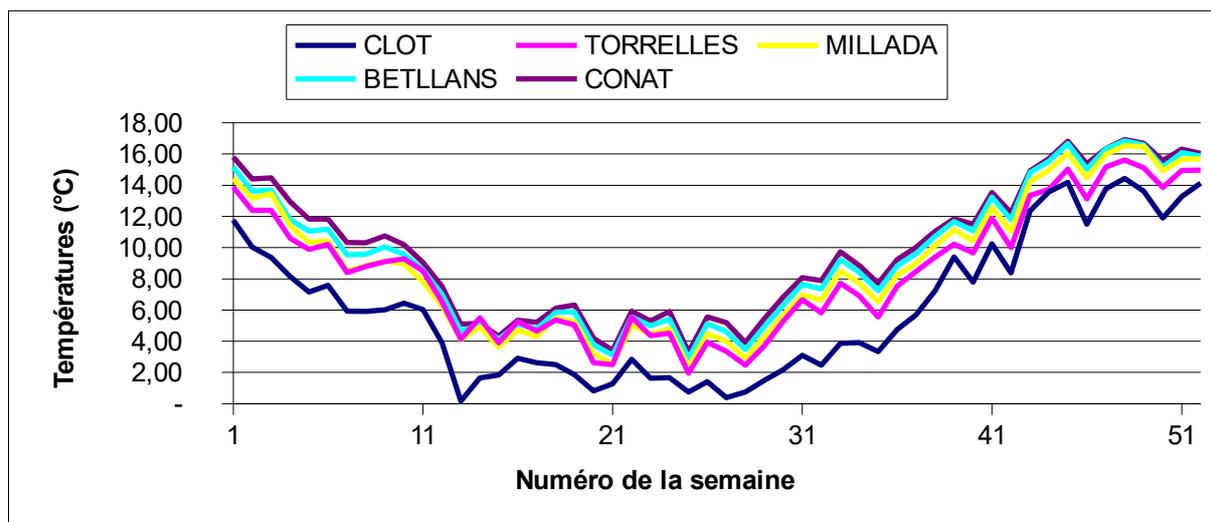


Illustration 15: Graphique des moyennes hebdomadaires des températures pour l'année hydrologique 2015/2016

On vérifie bien sur les deux tracés ci-dessus que la température est plus basse en altitude. On remarque également que la différence de température entre les stations est à peu près constante, mis à part pour la station du Clot qui se trouve bien plus en altitude que les autres stations.

Le graphique des moyennes annuelles (illustration 14) montre des courbes presque constantes. Une seule moyenne a été calculée pour la station du Clot car les données n'étaient pas complètes pour les autres années. De même, la courbe correspondant à la station de Conat ne commence qu'en 2015 car la sonde de cette station n'a été installée qu'en août 2014. Les données des températures de la sonde pour l'année 2014 ne forment donc pas une année complète.

Les valeurs en abscisse correspondent aux numéros des semaines d'une année hydrologique (semaine 1 = semaine du 1^{er} septembre). La dépression observée sur le graphique se produit donc bien en hiver (semaine 18 = semaine du 1^{er} janvier)

Le graphique des moyennes hebdomadaires (illustration 15) montre une évolution très différente des moyennes annuelles. En effet, on voit les variations de températures de la rivière provoquées – entre autres – par les conditions météorologiques (pluies, neige, gel, ...), et par l'évolution des températures extérieures. On remarque également que les stations subissent les mêmes variations, bien que pas toujours avec la même intensité.

C) Étude du nombre d'heure par classe de température

Afin d'avoir une idée de la répartition de la température de la rivière dans l'année, le nombre d'heures par classe de température a été calculé. Les classes ont été choisies en fonction des températures extrêmes sur l'ensemble de la base de données des températures. Comme expliqué au début de cette partie, les valeurs mesurées ne descendent pas (ou rarement) en-dessous de 0°C, et la température maximale mesurée est de 21,6°C à la station de La Millada. Les classes de températures ont alors été décidées comme suit :

1^{er} juin-23 août 2017

$0 \leq T$	$0 < T < 5$	$5 \leq T < 10$	$10 \leq T < 15$	$15 \leq T < 20$	$20 \leq T < 25$
------------	-------------	-----------------	------------------	------------------	------------------

Tableau 7: Classes de températures

Néanmoins, si jamais une température supérieure à 25°C est mesurée, le nombre et/ou l'intervalle de ces classes devront être adaptés.

Bien que les températures ne descendent pas (ou rarement) en dessous de 0°C, la classe « $0 \leq T$ » a été rajoutée afin de pallier aux incertitudes apportées par une valeur de température nulle (possibilité d'être une valeur négative). Cette classe ne comprend donc que des valeurs nulles (mis à part les quelques valeurs négatives mesurées à La Millada), mais indique en réalité le nombre de valeurs négatives ou nulles de la rivière.

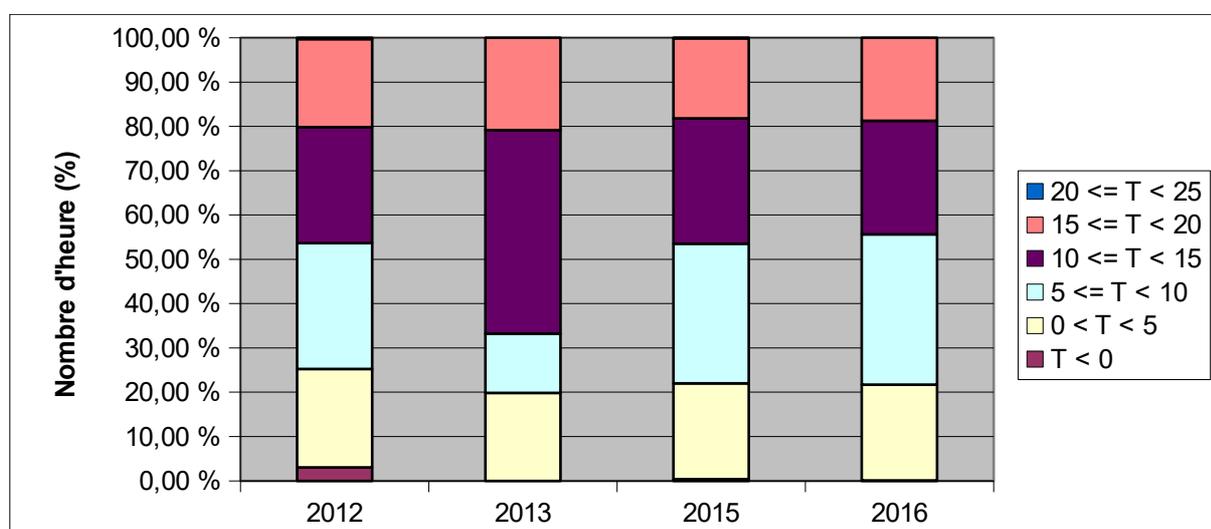


Illustration 16: Graphique du nombre d'heure pour chaque classe de températures pour l'année hydrologique 2015/2016

L'illustration 16 ci-dessus ne comporte pas de valeurs pour les années 2011 et 2014 car les données pour ces années étaient incomplètes.

D) Discussion et perspectives

Ces calculs des moyennes sur différentes périodes et du nombre d'heure par année et par classe de températures ouvrent de nouvelles perspectives d'étude pour la réserve.

En effet, les données calculées peuvent être utilisées pour compléter les connaissances sur la rivière, par exemple en calculant les écart-types mensuels, hebdomadaires, saisonniers, des températures sur chaque année d'étude pour étudier les variations de températures sur les mêmes périodes d'une année à l'autre. Les moyennes mensuelles et hebdomadaires calculées sur chaque année séparément peuvent être mise bout à bout afin de mieux observer les températures en début et en fin de l'année hydrologique (raccordement des extrémités des courbes).

Il est également possible de mettre en relation des notions d'hydrologie, en comparant les graphiques des moyennes avec la pluviométrie pour voir si la température de la rivière réagit aux

1^{er} juin-23 août 2017

précipitations. Ou encore des notions de biologie, par exemple en cherchant un lien entre la phénologie et les cycles de températures observés dans l'année, ou encore en mettant en corrélation la température et les conditions d'existence d'une espèce dans la rivière.

Un suivi sur le long terme des moyennes annuelles des températures de la rivière peut aussi permettre d'étudier les effets du réchauffement climatique sur la rivière.

calcul des écart-types, mise bout à bout des résultats pour chaque année (voir les raccordements aux extrémités), mise en relations avec le pluviométrie : température réagit aux précipitations ?, rapport avec la biologie (phénologie), changement climatique.

VIII- Suivi des surfaces immergées en fonction des éclusées de la centrale électrique

Cette partie du stage a été un peu mise à l'écart car un tel suivi n'aurait pas laissé assez de temps pour traiter les autres objectifs du stage. Néanmoins des recherches sur la faisabilité d'un protocole de suivi ont été faites.

Tout d'abord, les recherches ont porté sur l'existence d'autres projets semblables qui auraient été menés sur des cours d'eau subissant des éclusées. Des études ont en effet été faites en France, notamment sur les rivières de la Dordogne (24). L'analyse de ces études a permis de repérer quelques paramètres qui caractérisent les variations provoquées par les éclusées dans un cours d'eau. Ces paramètres sont:

- La fréquence des variations de débits
- L'amplitude de ces variations
- Le débit minimum observé entre deux pics
- La vitesse à laquelle le niveau d'eau varie

De plus, afin d'évaluer l'impact des éclusées sur les espèces de la rivière, des échantillons de poissons ou d'invertébrés sont pris dans le cours d'eau.

Les résultats des recherches présentés ci-dessus montrent que des études de l'impact des éclusées ont déjà été effectuées. Cependant, aucune étude faisant un suivi des variations des surfaces immergées du cours d'eau en fonction des éclusées n'a été trouvée.

Il est très difficile d'évaluer la surface immergée d'un cours d'eau, car son fond est irrégulier et très variable selon la section étudiée. Il sera donc nécessaire d'émettre des hypothèses sur des paramètres du cours d'eau, comme la pente des bords, la forme de la surface vue du dessus (rectangle, ...), ou la forme du cours d'eau le long du tronçon étudié (courbe, ligne droite, ...). Ces hypothèses permettront ensuite une estimation plus aisée de la surface immergée après la mesure des profils des sections du tronçon.

1^{er} juin-23 août 2017

Il faut ensuite définir la longueur des tronçons à étudier et leur nombre, ainsi que différentes caractéristiques comme par exemple le nombre de profils par tronçon. Le plus délicat sera de trouver des tronçons de la rivière qui répondent aux contraintes définies précédemment.

Se pose enfin la question du suivi de l'évolution des surfaces immergées des tronçons choisis. On peut chercher les tronçons au niveau des sondes hydrométriques et estimer la surface immergée à l'aide des mesures de niveau d'eau et des profils mesurés, ou plutôt placer un dispositif qui prend régulièrement des photos vus du dessus du cours d'eau et estimer la surface immergée grâce à un quadrillage positionné sur les photos.

Ces idées seront à développer et à étudier dans le cadre d'un prochain stage en hydrologie.

Conclusion et perspectives

Les travaux réalisés durant ce stage ont permis d'approfondir les connaissances du comportement hydrologique du bassin versant de la vallée de Conat et de Nohèdes que se soit par la poursuite des mesures et suivis précédents, ou par la mise en place de nouveaux suivis.

Tout d'abord, ce stage a permis de compléter les courbes de tarage des stations hydrométriques, bien qu'elles ne soient pas encore très robustes, et qu'il faut donc prendre en compte les imprécisions que leur utilisation peut engendrer. Il est donc nécessaire de rajouter des points, notamment en hautes eaux. Par conséquent il serait intéressant qu'un stage se fasse durant une période plus grande ou à un moment différent, afin de couvrir les périodes de crue.

Il faudrait vérifier que les valeurs de températures négatives mesurées par la sonde de la Millada sont bien dues au fait que la sonde est placée dans un endroit où l'eau est assez agitée pour retarder le gel de la rivière. Si ce n'est pas le cas, il faudra envisager de renvoyer la sonde chez le fabricant afin de la faire tester, ou alors de remplacer la sonde. Les échelles limnimétriques des sondes auraient besoin d'être changées, car les graduations deviennent difficilement lisibles.

La notice d'utilisation du logiciel Hydraccess nécessiterait des précisions afin de permettre une prise en main plus rapide du logiciel.

La perte entre les stations de Betllans et de Conat a été quantifiée à environ 10 L/s. Cependant, cette valeur peut changer en fonction du débit de la rivière, il faut donc effectuer des jaugeages supplémentaires et à différentes saisons afin de mieux caractériser cette perte.

L'analyse des contributions de chaque bassin versant montre que les principaux apports de la rivière proviennent des bassins versants situés en altitude, ce qui renforce le besoin d'une meilleure connaissance de la pluviométrie en altitude. La correction de ces dernières par l'application d'un facteur à partir de 1700 m donne une estimation plus cohérente. Il serait intéressant de comparer ces estimations avec celles obtenues avec un ETR basé sur l'occupation des sols du bassin versant.

Les programmes de suivi des températures sont fonctionnels et leur utilisation permettra d'avoir une meilleure connaissance de l'évolution des températures dans le cours d'eau. Les explications sur l'évolution surprenante des températures entre le Gorg Estelat et la station du Clot sont encore à préciser, notamment par des mesures de température sur d'autres sources, et plus en profondeur dans la tourbière.

Enfin, les bases d'un protocole de suivi des surfaces immergées en fonction des éclusées de la centrale hydroélectrique ont été posées. Il reste à définir les différents paramètres et décider du mode de mesure, et surtout de mettre en place le protocole.

Les Réserves Naturelles de Nohèdes et de Conat tendent vers l'utilisation de logiciels libres (Libroffice). Il faudra donc étudier la faisabilité du passage vers les logiciels libres, notamment au niveau du logiciel Hydraccess, qui se base sur une base de donnée du logiciel Access de Microsoft Office. Le passage aux logiciels libres implique également d'adapter les programmes de suivi des températures - qui ont été codés sous Excel – au Visual Basic de Libroffice.

Bilan personnel

Ce stage m'a permis de m'immerger dans un environnement professionnel, ainsi que de travailler en autonomie pour organiser mon travail et préparer les sorties terrain. Il m'a fallu m'adapter à différents événements imprévus qui dérangeaient mon organisation, comme par exemple les intempéries, qui peuvent obliger à reporter une campagne de mesures, ou le dysfonctionnement d'un outil. La gestion de ces imprévus m'ont appris à mieux organiser mon temps de travail. J'ai également eu l'occasion d'apprendre à utiliser de nouveaux logiciels comme Hydraccess et les logiciels des sondes OTT et d'avoir un premier contact avec le SIG grâce au logiciel QGIS. Enfin, j'ai pu avoir un aperçu des nombreuses actions et études de la Réserve Naturelle de Nohèdes, et j'ai et même participé à certaines sorties sur le terrain, comme lors de la visite des intervenants du projet GREEN.

Semaine de stage	Tâches accomplies
1	Prise en main des logiciels OTT (Hydras3, Orpheus mini). Recherche sur le protocole de suivi de la surface immergée. Elaboration d'un planning des sorties terrain et organisation du travail à faire. Premiers jaugeages au sels sur les sous-bassins versants en altitude.
2	Prise en main du logiciel Hydraccess. Travail sur le programme VBA des températures, Relevé des sondes des stations hydrométriques et exploitations des données sur Excel
3	Prise en main du logiciel QGIS, tracé des BV des 4 réservoirs Jaugeages à Conat et Betllans
4	1ers jaugeages au niveau de la perte Début de la rédaction de la notice d'utilisation des programmes VBA, et continuation du codage
5	Tracé des aires des bassins versants en altitude sur QGIS et tracé des contours climatiques des BV Jaugeages au niveau de la perte, et des bassins versants en altitude Calcul des lames d'eau associées aux débits obtenus par jaugeage
6	Codage des programmes VBA (moyennes mensuelles) Mesure des températures des sources autour du Gorg Estelat et dans le lac
7	Tracé GPS du cours d'eau en amont de la station du répartiteur Ajustement des courbes de tarage sur hydraccess Calcul des volumes ruisselés pour chaque station et chaque année hydrologique
8	Estimation des précipitations en altitude, Début de la rédaction du rapport Jaugeages à la perte Ajustement des courbes de tarage Codage des programmes VBA,
9	Mise à jour des volumes ruisselés après l'ajustement des courbes de tarage Codage des programmes VBA et mise à jour de la notice Placement des mesures de températures sur QGIS Accompagnement de la sortie dans le cadre du GREEN
10	Tracé des aires entre les courbes de niveau sur QGIS (pour le calcul de l'ETR) pour chaque bassin versant.

1^{er} juin-23 août 2017

	Rédaction du rapport Jaugeages au stations de Conat, Betllans, et La Millada Dernière mise à jour de la notice d'utilisation des programmes VBA Calcul de l'ETR en ne prenant que les surfaces imperméables
11	Dernières mises à jour des courbes de tarage suite aux derniers relevés des sondes Mise à jour des volumes ruisselés Rédaction du rapport
12	Rédaction du rapport Organisation des fichiers à laisser pour la documentation de la réserve

Bibliographie

CHAUBET, A. 2014 : Contribution à l'établissement du bilan hydrique de la vallée de Conat et de Nohèdes. Ecole Polytechnique universitaire de Montpellier, département science et technologie de l'eau.

DUCROIX P., 2009. Caractérisation des échanges hydriques entre le karst du Mont Coronat et la rivière de Nohèdes. Ecole Polytechnique universitaire de Montpellier, département science et technologie de l'eau.

GUITARD, G., et al. (1998) Carte géologique de la France. Prades. Orléans: B.R.G.M., 198p.

LAUMONIER, B. (Spanish Geological Congress, Zaragoza, Espagne, 2004), Pliegues y cabalgamientos hercínicos precoces en los Pirineos orientales: el ejemplo del sinclinal de Villefranche. Poster.

LE GUENANFF, M. 2013 : Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de Nohèdes. Ecole Polytechnique universitaire de Montpellier, département science et technologie de l'eau.

OTT, Manuel d'utilisation (version 05-0109) de l'enregistreur pour eaux souterraines OTT Orpheus Mini.

RIO, M. 2015 : Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de la vallée de Nohèdes. Ecole Polytechnique universitaire de Montpellier, département science et technologie de l'eau.

SALVAYRE, H. (2010) Le livre des eaux souterraines des Pyrénées catalanes. Canet: Editions Trabucaire, 239p

SERVIERE, M. 2010 : Fonctionnement du réseau hydrique de Nohèdes ; élaboration d'un protocole de suivis de la rivière de Nohèdes. Ecole Polytechnique universitaire de Montpellier, département science et technologie de l'eau.

Sites visités :

Site de la réserve de Nohèdes: <http://www.reserves-naturelles.org/nohedes>

Site de la Fédération des Réserves Naturelles Catalanes: <http://www.catalanes.espaces-naturels.fr/>

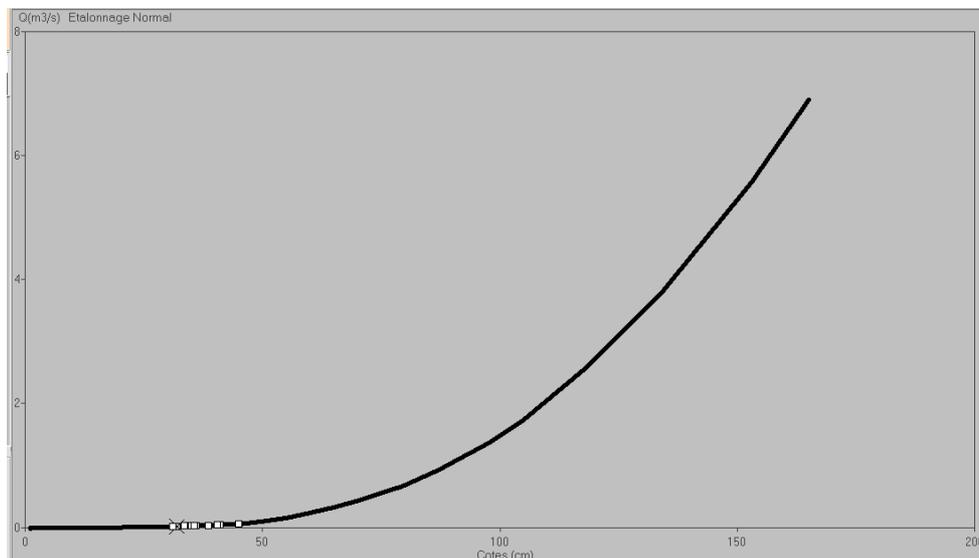
Documentation du site de l'EPTB Dordogne: <http://www.eptb-dordogne.fr/contenu/index/idcontenu/163>

Article sur l'effet des éclusées sur une rivière de l'Ardèche: <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1996/04/lhb1996048.pdf>

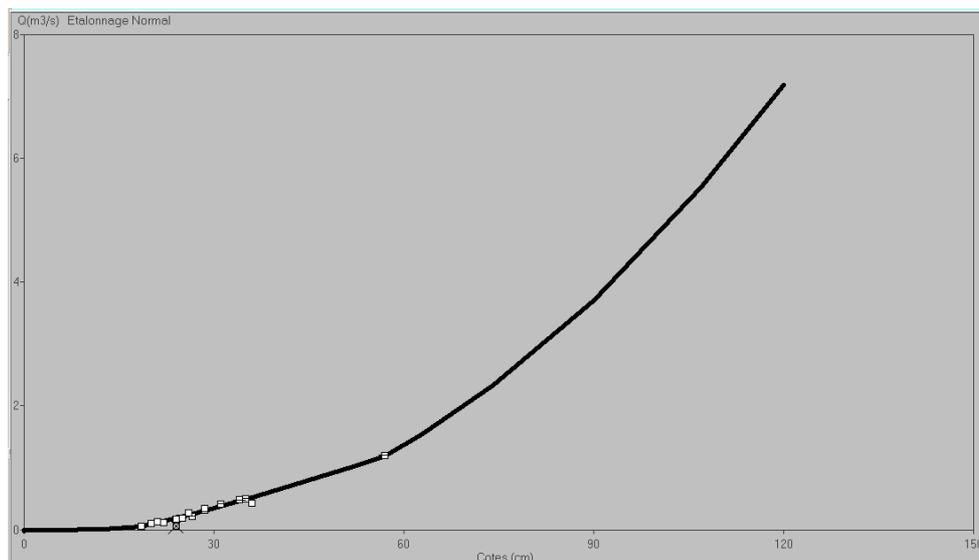
1^{er} juin-23 août 2017

ANNEXES

Annexe 1 : Courbes de tarage

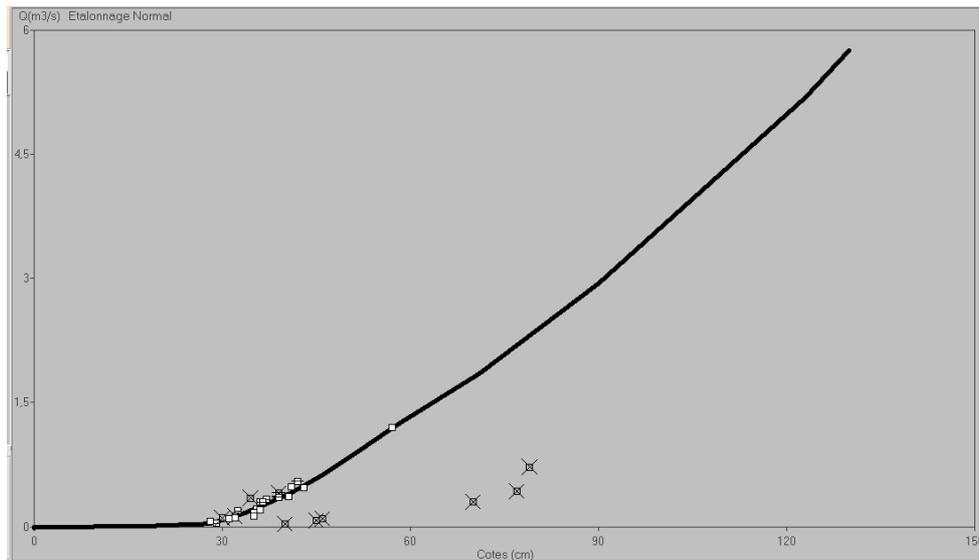


Courbe de tarage de la station de Torrelles

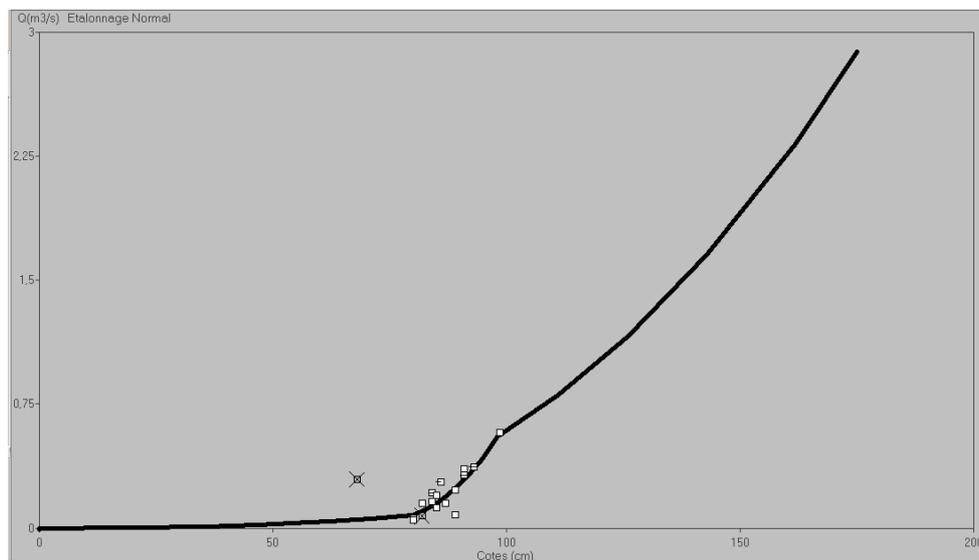


Courbe de tarage de la station de La Millada

1^{er} juin-23 août 2017



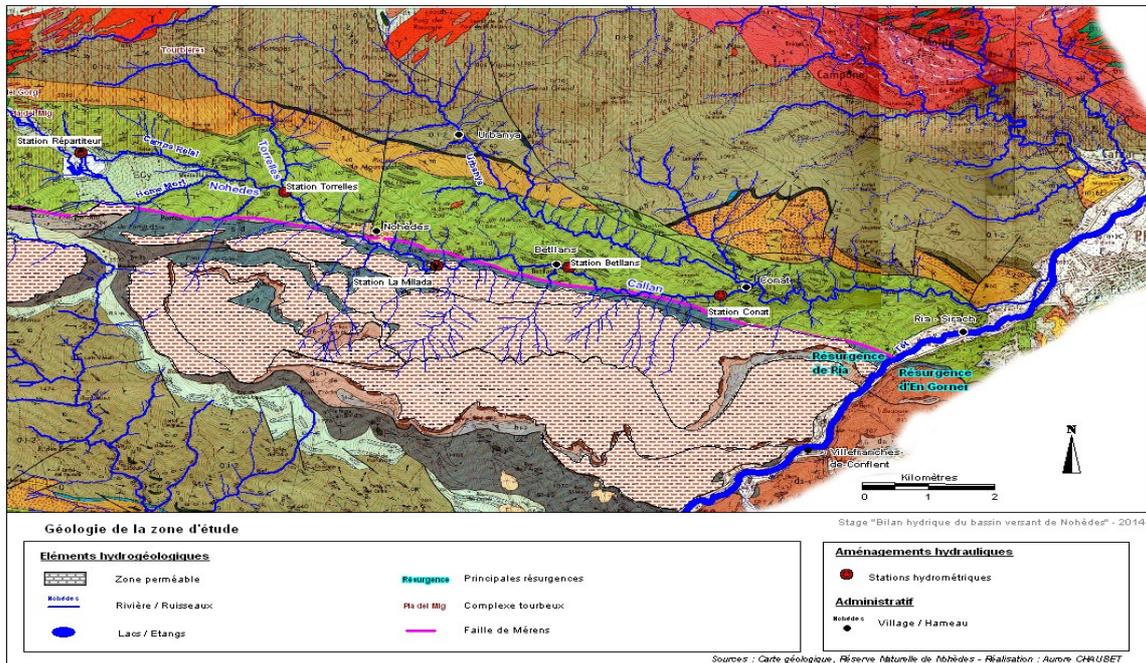
Courbe de tarage de la station de Betllans



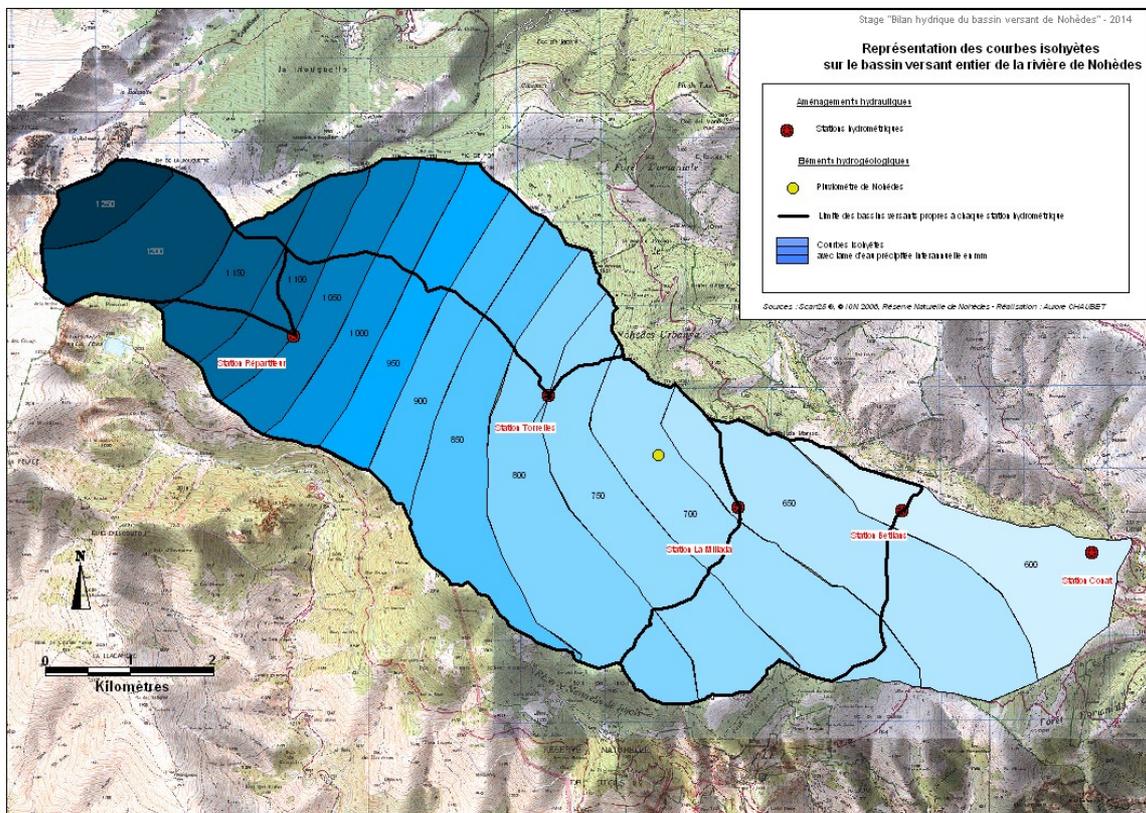
Courbe de tarage de la station de Conat

1^{er} juin-23 août 2017

Annexe 2 : Carte géologique de la vallée de Conat et de Nohèdes



Annexe 3 : Carte des courbes isohyètes donnée par les modèle MétéoFrance



1^{er} juin-23 août 2017

Annexe 4 : Formules de calcul des ETP et ETR

Formule de Thornthwaite : $ETP(mm/mois) = 16 * \left(\frac{10 * t_i}{I}\right)^a * F$

Avec t_i la moyenne interannuelle des températures du mois (°C)

$$I = \sum_1^{12} (0,2 * t_i)^{1,514} \text{ l'indice thermique annuel}$$

$a = 0,016 * I + 0,5$ la fonction approchée de I

F le facteur correctif correspondant à la durée réelle du mois et du jour

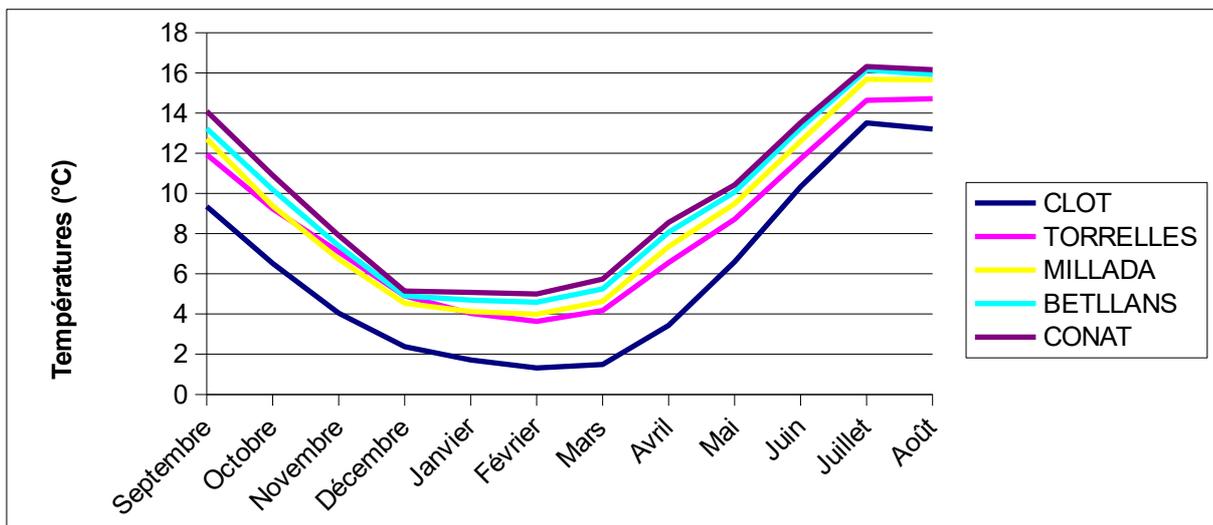
Formule de Turc : $ETR(mm/an) = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$

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

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

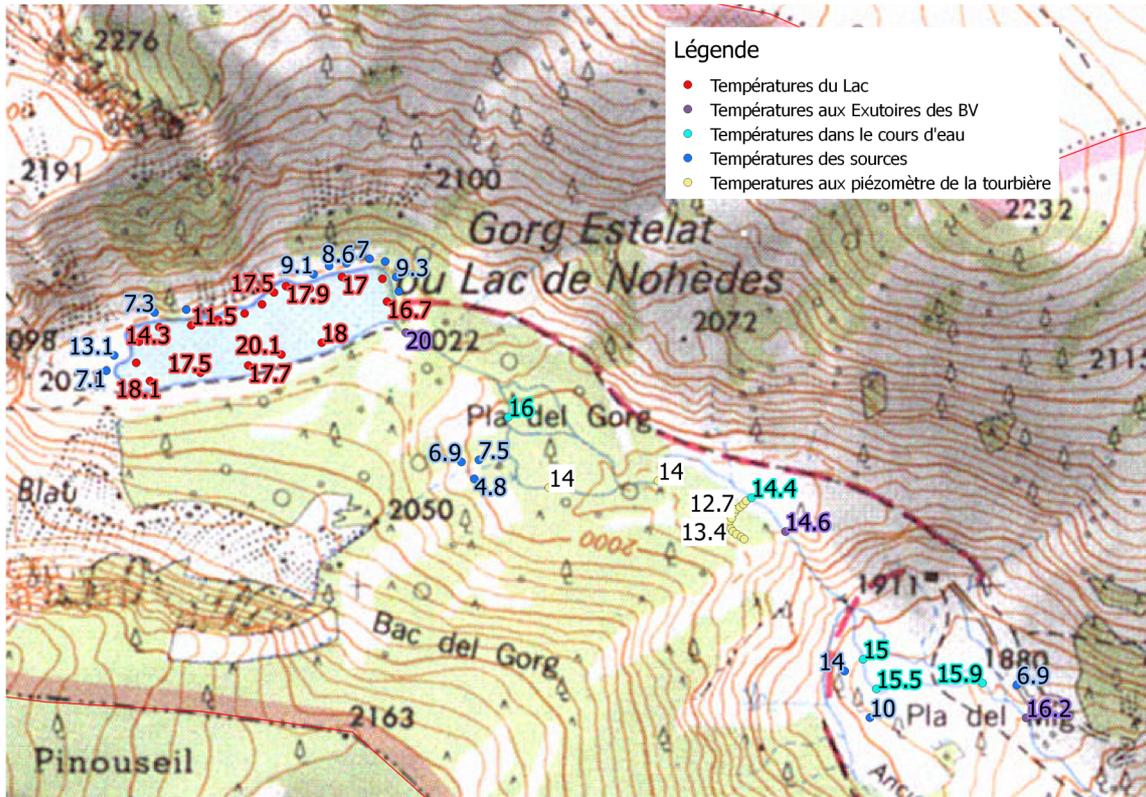
T la température moyenne annuelle

Annexe 5 : Graphiques des moyennes mensuelles des températures mesurées



Annexe 6 : Carte des températures en altitude

1^{er} juin-23 août 2017



Annexe 7 : Photo d'un relevé de la sonde hydrométrique de Conat



Annexe 8 : Carte des trois sous-bassins versants et du bassin versant du Clot

1^{er} juin-23 août 2017

