

ÉCOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MONTPELLIER

S
T
A
G
E

Stage de 4^e année
Département Sciences et Technologies de l'Eau

ANNÉE 2013-2014

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

Fédération des réserves naturelles catalanes

Réserves naturelles de Conat et de Nohèdes



Aurore CHAUBET

Tuteurs de stage : Alain MANGEOT – David MORICHON

Tuteur Polytech : Christian SALLES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MONTPELLIER
UNIVERSITÉ 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

**CONTRIBUTION A L'ÉTABLISSEMENT DU BILAN
HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA VALLÉE
DE CONAT ET DE NOHÈDES**

AUORE CHAUBET

2014

Citation

Chaubet, A. — 2014 — Contribution à l'établissement du bilan hydrique de la vallée de Conat et de Nohèdes. École polytechnique universitaire de Montpellier, département sciences et technologies de l'eau. Montpellier. 54 p. + 7 p. annexes

Remerciements

Ce rapport fait la synthèse du travail effectué au cours de ces trois mois de stage au sein des réserves naturelles de Conat et de Nohèdes. Je tiens sincèrement à remercier les personnes m'ayant aidées dans la réalisation de ce dossier ainsi que celles m'ayant accompagnées sur le terrain :

- Alain MANGEOT et David MORICHON, responsables de mon stage qui m'ont guidée, éclairée et accompagnée tout au long de ce stage. Je tiens surtout à les remercier pour leur accueil et leur sympathie à mon égard ;

- Christian SALLES, mon tuteur de stage de Polytech' Montpellier pour ses réponses à nos questionnements ;

- Alain CHAMPAGNAT, bénévole habitant le hameau de *Betllans*, m'ayant accompagné dans la réalisation de jaugeages, aidé dans la réalisation de la station de suivi limnimétrique de Conat ;

- Jeanet DEKKER et Olivier SALVADOR, employés de la réserve naturelle de Nohèdes, avec qui partager les bureaux fut agréable ;

- Christine DESOUCHES et Pascal VEYRUNES, contacts de Météo France, qui m'ont permis d'accéder à des informations essentielles pour l'avancement de mon travail ;

- Fabrice CAROL, directeur du syndicat mixte du bassin versant de la Têt, pour le temps qu'il m'a accordé ;

- Clément et Toni, stagiaires des réserves naturelles de Conat et de Nohèdes, pour leur aide, leur sympathie au quotidien et surtout le partage de leur foi en la nature.

Résumé

L'étude hydrologique de la rivière de Nohèdes et du réseau karstique du mont Coronat a débuté en 2009, conduite par le gestionnaire de la réserve naturelle de Nohèdes. À partir de 2014, le gestionnaire de la réserve naturelle de Conat s'associe à l'étude notamment par l'installation d'une station de suivi limnimétrique au village.

Le présent rapport de stage poursuit les travaux réalisés par les précédents stagiaires (Ducroix, 2009 ; Servièrè, 2010 ; Le Guenanff, 2013). Il est une contribution à l'établissement du bilan hydrique de la vallée de Nohèdes.

Ce stage s'intéresse à l'évaluation de tous les termes du bilan des précipitations, soit les volumes d'eau entrants et sortants dans le bassin versant. Les entrées d'eau sont caractérisées par la lame d'eau brute précipitée ainsi que par les éventuelles fuites du réseau souterrain vers le réseau hydrographique. Pour ce qui est des sorties, elles comptent la lame d'eau nette recueillie à l'exutoire du bassin versant déterminée avec les hydrogrammes, les pertes par évapotranspiration et les infiltrations.

Enfin, les perspectives d'une étude approfondie du réseau karstique du mont Coronat sont posées pour permettre de comprendre le fonctionnement de celui-ci et pour éventuellement capter ces eaux pour l'alimentation du bassin démographique de Prades.

Mots-clés : Pyrénées-Orientales — massif du Madres-Coronat — hydrologie — hydrogéologie — climatologie — karst

Abstract

The hydrological study of the Nohèdes river and the mont Coronat karst network started in 2009, initiated by the manager of the Nohèdes nature reserve. In 2014, nature reserve of Conat manager joins the study by the implementation of a water level tracking station.

This study takes place in the continuity of previous works made by Polytech Montpellier trainees' (Ducroix, 2009; Servièrè, 2010; Le Guenanff, 2013). This training period will be a contribution to the establishment of the water balance of Nohèdes area.

A particular attention is given to the identification of water volume inputs and outputs in the watershed. Water inputs are characterized by the gross rainfall annual volume and some underground flows. Water losses are quantified through net rainfall volume analyse such as evapotranspiration and water infiltration.

Then, prospects of a developed study of a karst network are given to understand karst functioning so as a possible exploitation of this water supply for Prades area.

Keywords: Pyrénées-Orientales — massif du Madres-Coronat — hydrology — hydrogeology — climatology — karst

Table des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

Introduction..... 7

I. Présentation des organismes d'accueil 8

A. La réserve naturelle de Nohèdes8

B. La réserve naturelle de Conat9

II. Contexte du stage 10

A. Situation géographique10

B. Contexte géologique.....10

C. Hydrographie de la zone d'étude11

D. Météorologie13

E. Etat des connaissances16

III. Objectifs du stage..... 17

IV. Matériel et méthodes 18

A. Mesure des hauteurs d'eau.....18

B. Mesure des débits18

1. *Choix de la section de jaugeage*18

2. *Utilisation du moulinet*19

3. *Dépouillement des jaugeages*20

4. *Réalisation des courbes de tarage*20

C. Installation d'une station hydrométrique21

D. Calcul du bilan hydrique22

1. *Calcul de la pluie brute*22

2. *Calcul de la pluie nette*23

3. *Calcul de l'ETP*24

4. *Calcul de l'ETR*.....24

5. *Calage d'isohyètes fictives*.....25

V. Résultats et interprétations.....	27
A. Vérification des sondes	27
B. Conversion hauteur-débit : courbe de tarage	27
C. Analyse des hydrogrammes calculés	29
D. Bilan hydrique sur la vallée de Nohèdes.....	34
1. Bilan en terme de pluie brute et de pluie nette.....	34
2. Calage des isohyètes fictives pour l'année 2013.....	35
3. Rôle du karst dans le bilan hydrique.....	39
E. Synthèse des résultats : les axes de la collaboration avec le SMBVT	41
1. Le rapport : « Le réseau karstique du massif du Coronat»	41
2. Les axes de la collaboration avec le SMBVT	42
Conclusion	43
Perspectives.....	44
Bilan personnel	47
Bibliographie.....	49
Liste des abréviations.....	51
Table des figures	51
Table des tableaux	52
Table des équations	52
Glossaire	53
Annexes	54

Introduction

Afin de construire mon parcours professionnel, j'ai choisi de réaliser mon stage de quatrième année au sein des réserves naturelles de Conat et de Nohèdes.

Les réserves naturelles nationales sont des espaces dédiés à la préservation de la diversité biologique et géologique. Ces espaces sont consacrés à la protection durable des milieux et des espèces présentes sur leur territoire en alliant réglementation et gestion active. Elles ont pour objectif la « conservation de la faune, de la flore, du sol, des eaux, des gisements de minéraux et de fossiles et, en général, du milieu naturel présentant une importance particulière ou qu'il convient de soustraire à toute intervention artificielle susceptible de les dégrader ».

Chaque conservateur de réserve naturelle se doit de rédiger un plan de gestion d'une durée de validité de cinq ans dans lequel apparaissent une analyse de l'état initial, des objectifs de gestion, un calendrier opérationnel et les modalités d'évaluation de ce plan.

Le plan de gestion de la réserve naturelle de Nohèdes consacre un volet à la protection et à la gestion de la ressource en eau. Il paraît important de noter qu'à ce jour, c'est une des seules réserves à avoir défini un objectif de connaissance et de protection sur cette ressource. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce stage. Il s'agit là d'établir le bilan hydrique de la vallée. C'est un enjeu important dans la gestion des deux réserves puisque la ressource hydrique influence fortement le maintien et le comportement des espèces vivantes.

Le territoire des deux réserves s'étendant sur 2 686 ha avec une amplitude d'altitudes allant de 600 m à 2 459 m au sommet du *Roc Nègre*, il présente une très large gamme d'habitats. La richesse en terme de biotopes s'accompagne d'une biodiversité exceptionnelle autant pour la flore que pour la faune. De nombreuses espèces présentes au sein des deux réserves sont protégées au niveau français ou européen et certaines font l'objet d'un suivi tout particulier comme *Calotriton asper* (Euprocte des Pyrénées).

Ce stage présentait des intérêts multiples comme mettre à profit les connaissances acquises au cours de ces quatre années universitaires, développer des facultés de réflexion et d'analyse d'un problème mais aussi participer à des activités de la réserves sans lien direct avec l'hydrologie (participation à des suivis).

Ce dossier rend compte du travail réalisé au cours des trois mois de stage autour de la thématique suivante :

Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin-versant de la vallée.

I. Présentation des organismes d'accueil

A. La réserve naturelle de Nohèdes

La réserve naturelle de Nohèdes a été créée en 1986 avec la parution dans le journal officiel de la république du décret n°86-1150. Ce décret sert de base pour la délimitation des frontières de la réserve mais aussi, pour la réglementation applicable au sein de cette dernière. Le fonctionnement de la réserve naturelle est financé concomitamment par l'État, l'Europe, la région Languedoc-Roussillon et le département des Pyrénées-Orientales. Les organismes de gestion délégués par voie de convention sont l'Association gestionnaire de la réserve naturelle de Nohèdes (AGRNN) et la Fédération des réserves naturelles catalanes (FRNC).

La Fédération des réserves naturelles catalanes (FRNC) a pour membre les gestionnaires des réserves de : Conat, Forêt de la Massane, Jujols, Mantet, Mas Larrieu, Nohèdes, Prats-de-Mollo-la-Preste, Py et Vallée d'Eyne comme présenté sur la figure 1. La FRNC est co-gestionnaire de toutes les réserves naturelles adhérentes. Les réserves de Banyuls-Cerbère et de Nyer sont quant à elle gérées directement par le CG66.

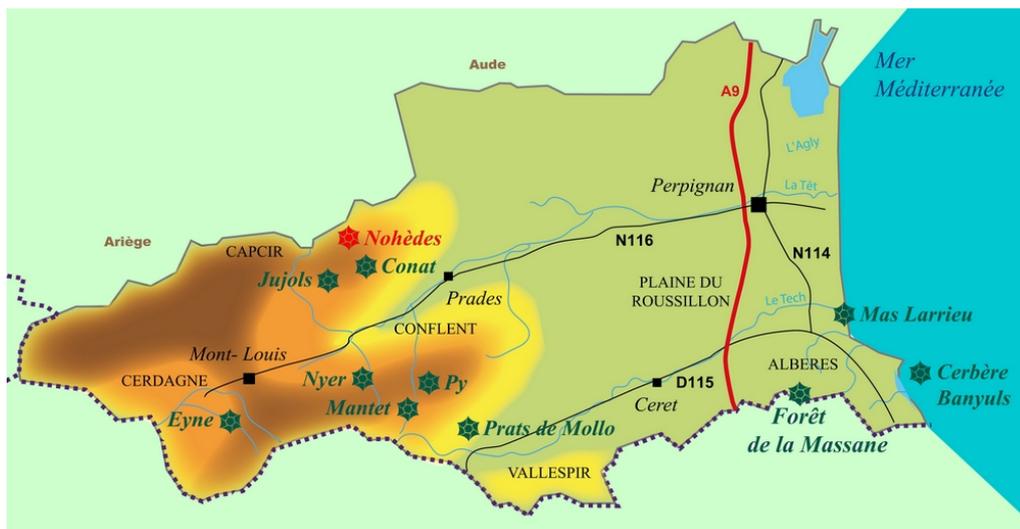


Figure 1. Carte des réserves naturelles adhérentes à la FRNC

Les objectifs décrits dans le plan de gestion de la réserve naturelle de Nohèdes sont les suivants :

- protection du patrimoine naturel et culturel en cherchant à concilier le maintien de la biodiversité avec le développement d'activités économiques ;
- étude et suivi du patrimoine ;
- gestion du territoire de concert avec les acteurs locaux ;
- communication et partage autour du patrimoine naturel et culturel de Nohèdes.

L'étude de l'hydrologie du bassin versant (BV) fait partie intégrante des objectifs d'étude de la réserve naturelle de Nohèdes (Mangeot, 2011). L'hydrologie y est encore peu connue mais elle conditionne le maintien et le comportement d'espèces vivantes du fait de sa complexité.

B. La réserve naturelle de Conat

La réserve naturelle de Conat a également été créée en 1986 par parution dans le journal officiel du décret n°86-1148. Son organisme gestionnaire local est la mairie de Conat. La gestion effective a été relativement longue à se mettre en place étant donné que le premier conservateur, David Morichon, n'a pris ses fonctions qu'en 2011. Avant cela, la gestion était assurée à minima par les municipalités successives du village. La réserve naturelle de Conat est adhérente à la FRNC depuis 2010.

Les objectifs de la réserve naturelle de Conat sont sensiblement les mêmes que ceux de la réserve de Nohèdes. Il s'agit de faire un recensement le plus exhaustif possible de toutes les espèces présentes dans la réserve afin de mettre en place des protocoles de suivi et de protection si cela s'avère nécessaire. Il est impératif de mener ces actions de concert avec les acteurs locaux pour faire comprendre à tout un chacun l'importance de ce travail de maintien de la biodiversité.

Le premier plan de gestion était un support pour, d'une part, acquérir des connaissances et, d'autre part, améliorer la visibilité de la réserve naturelle notamment en délimitant ses frontières.

II. Contexte du stage

A. Situation géographique

Le suivi hydrologique est réalisé dans la vallée du *Callan* au sein du massif du Madres-Coronat dans le département des Pyrénées-Orientales (figure 2). Le cheminement de l'eau est suivi depuis le point le plus haut que représente le Roc Nègre à 2 459 m d'altitude jusqu'au village de Conat situé à 533 m.



Figure 2. Localisation du site d'étude

B. Contexte géologique

La géologie du secteur d'étude est relativement complexe car plusieurs formations se recourent.

La vallée du *Callan* est séparée en deux par la faille de Mérens qui la coupe selon une orientation est-ouest. Le compartiment nord de la faille se compose de roches schisteuses (imperméables) alors que celui au sud de celle-ci présente des terrains calcaires très perméables (induit par la formation d'un réseau karstique). La faille de Mérens traverse la rivière à plusieurs reprises en amont du village de Conat.

Le versant nord de la vallée est occupé par les calcaires et les dolomies du mont Coronat. Cette entité géologique fait partie intégrante du synclinal de Villefranche s'étendant sur une trentaine de kilomètres de longueur selon un axe est-ouest. Un réseau karstique s'est développé au sein de ces calcaires datés du Dévonien. Ce réseau est composé de plusieurs niveaux du fait de l'histoire géologique de la région (figure 3).

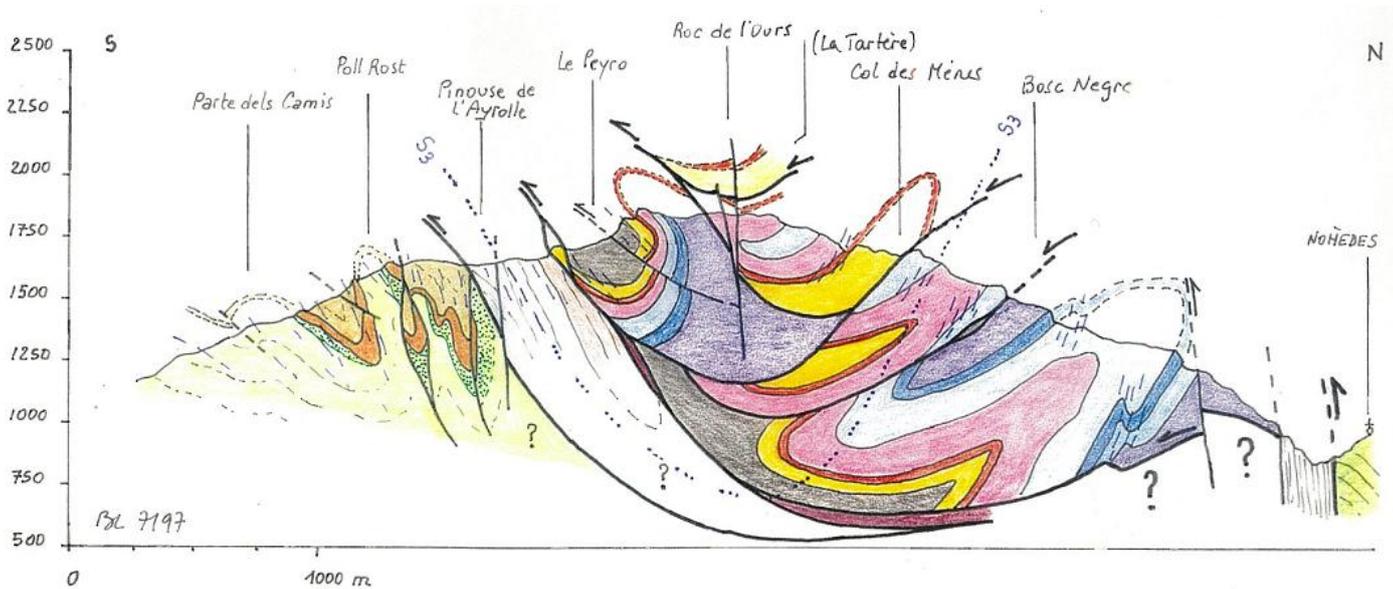


Figure 3. Coupe géologique du massif karstique au droit du village de Nohèdes (Laumonier, 1997)

Il est drainé par une résurgence en rive gauche de la Têt en amont du village de Ria. Il s'agit de la résurgence de Ria, alimentée par la grotte souterraine d'*En Gorner*. Le détail de la géologie est visible sur la figure 4.

C. Hydrographie de la zone d'étude

Le réseau hydrographique de la vallée est relativement complexe (figure 5).

Il est important de noter que le *Callan*, aussi appelé rivière de Nohèdes dans sa partie amont, est le principal cours d'eau étudié lors de ce projet. Après avoir suivi un linéaire de 21 km, la rivière se jette dans la Têt dont elle est l'un des affluents majeur en rive gauche. Seuls les cours supérieurs et moyens sont situés sur le territoire de la réserve naturelle de Nohèdes.

- Cours supérieur

Le cours supérieur est limité à l'aval par l'*Estany del Clot*. À l'amont, est présente une succession de sources alimentant une rivière dont l'écoulement est parfois torrentiel. En effet, ceci est dû à une succession d'auges glaciaires (*Gorg Blau* à 2 200 m, *Gorg Estelat* à 2 000 m, *Pla del Mig* à 1 900 m et *Pla del Clot* à 1 670 m) séparés par des versants abrupts. Les terrains sont constitués de granites jusqu'au *Pla del Mig* puis, de roches métamorphiques dans la partie plus basse.

Au niveau du *Pla del Clot*, un réservoir tampon dénommé *Estany del Clot* a été mis en place afin d'alimenter la microcentrale hydroélectrique située à Nohèdes.

- Cours moyen

Le cours moyen est décrit jusqu'à la commune de Conat. À l'amont, celui-ci se décline en deux cours d'eau s'écoulant sur des terrains morainiques : *Ribera dels Camps Reals* et *Ribera de l'Home Mort*. Ces deux s'unissent pour former la rivière du *Callan* dont le principal affluent est la *Ribera de Torrelles* prenant sa source à 1 750 m d'altitude. Dans cette portion, les écoulements sont torrentiels et de rivière. La pente moyenne est bien plus douce que celle observée sur le cours supérieur.

- Réseau hydrographique souterrain

Le réseau souterrain du mont Coronat est encore peu connu mais il semblerait qu'il soit considérable. L'étude des échanges entre le karst et le réseau de surface (Ducroix, 2009) a permis de mettre en évidence une perte dans la rivière de Nohèdes en amont de *Betllans*.

Cependant, il est certain que le réseau karstique absorbe la majeure partie des précipitations survenant sur les terrains calcaires du mont Coronat, les ravins parcourant son bassin versant étant toujours à sec (sauf lors de très fortes pluies). Ces eaux traverseraient les roches carbonatées jusqu'au substrat imperméable (schiste) et s'écouleraient suivant l'axe du synclinal pour ressurgir à Ria.

De plus, lors de fortes précipitations, il a été remarqué que de nombreuses résurgences s'activaient le long de la faille de Mérens. Ceci pourrait être le résultat d'une décharge du karst.

- Prélèvements

Plusieurs prélèvements d'eau sont réalisés sur le territoire étudié. La microcentrale de Nohèdes détourne une partie des eaux au niveau d'un répartiteur de débit situé en amont de l'*Estany del Clot*. Ces eaux servent au remplissage de l'étang. Une conduite forcée d'une longueur de 4,4 km permet l'acheminement des eaux de l'étang jusqu'à la centrale avec une hauteur de chute de 680 m. La microcentrale fonctionne en continu ou par éclusées en fonction du niveau d'eau dans la retenue (pour éviter son assèchement). Toutefois, à chaque

période de fonctionnement, il y a un rejet théorique proche de 70 l/s qui intervient dans le *Callan*, en amont du village de Nohèdes.

Par ailleurs, sur la partie haute du sBV de *Torrelles*, le canal d'Urbanya vient capter les eaux des précipitations. Cela avait été omis lors des précédents travaux provoquant une erreur dans l'estimation de la surface d'alimentation du sBV de *Torrelles* et, par conséquent, de la pluie brute rattachée.

D. Météorologie

La vallée de Nohèdes se trouve sous l'influence d'un régime de précipitations de type méditerranéen dans sa partie basse et océanique dans sa partie haute. À ceci s'ajoute les régimes spécifiques de certaines zones dépendant de leur ombrage, de leur pente, de leur altitude... Le climat de la zone étudiée est très contrasté, ce qui se traduit par un fort gradient pluviométrique.

Un pluviomètre a été installé dans le village de Nohèdes. Celui-ci permet de suivre les précipitations quotidiennes tout au long de l'année. L'étude des précipitations a montré que le village de Nohèdes était sous un régime océanique à influence méditerranéenne. Ce régime se caractérise par de fortes précipitations en mars et avril ainsi qu'à l'automne (tableau 1). Un autre pluviomètre est également présent dans le secteur d'étude. C'est une station enregistreuse d'EDF placé à proximité de la microcentrale hydroélectrique de Nohèdes. Les données récoltées par cette station ne sont pas mises à la disposition de la réserve naturelle.

Tableau 1. Moyennes interannuelles des précipitations

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	total
Moyenne 1984-2013	64,5	47,6	59,3	82,0	91,9	62,4	45,0	53,5	60,4	78,8	71,1	68,0	786,8
Moyenne 1960-2006	51,7	53,7	46,7	76,0	82,4	64,8	50,9	59,1	64,2	69,3	70,9	72,6	762,2

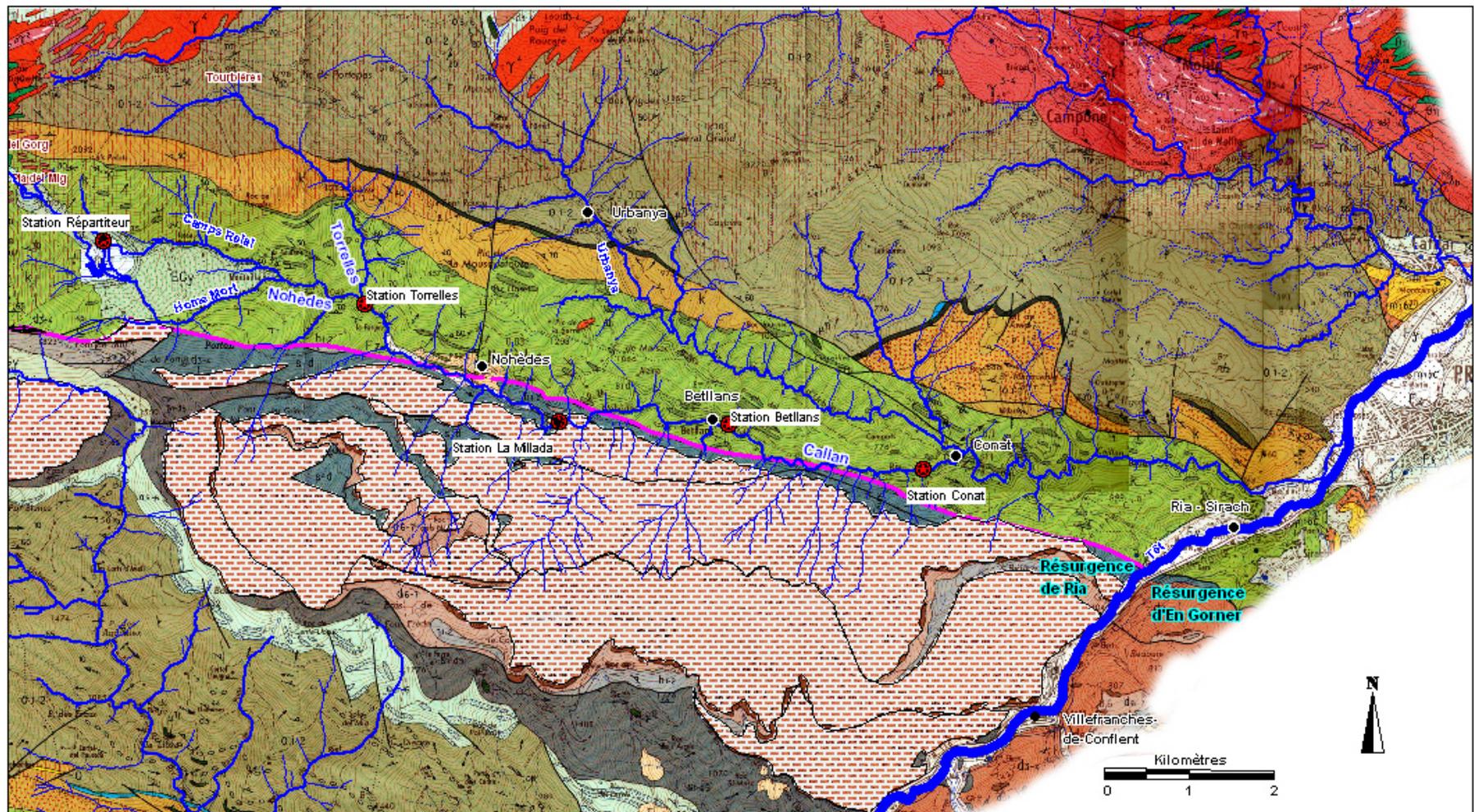
En plus du gradient de pluviométrie, la vallée subit également un gradient de température du fait de la gamme d'altitudes présentes et de la diversité des expositions de versants abrupts.

Afin d'établir le calcul des évapotranspirations, les données de températures mesurées à Nohèdes sont disponibles (tableau 2).

Tableau 2. Moyenne interannuelle des températures à Nohèdes

Période : 1987 - 2007

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
Tmin	-0,28	-0,07	2,05	3,68	6,98	9,92	11,74	12,08	9,07	6,57	2,44	0,47	9,98
Tmax	8,05	8,95	11,57	12,56	16,15	16,15	23,03	23,13	19,29	15,34	11,04	8,63	
Tmoy	3,88	4,44	6,81	8,12	11,57	13,03	17,39	17,60	14,18	10,96	6,74	4,55	



Stage "Bilan hydrique du bassin versant de Nohèdes" - 2014

Géologie de la zone d'étude

Éléments hydrogéologiques

-  Zone perméable
-  Rivière / Ruisseaux
-  Lacs / Etangs

-  Principales résurgences
-  Complexe tourbeux
-  Faille de Mérens

Aménagements hydrauliques

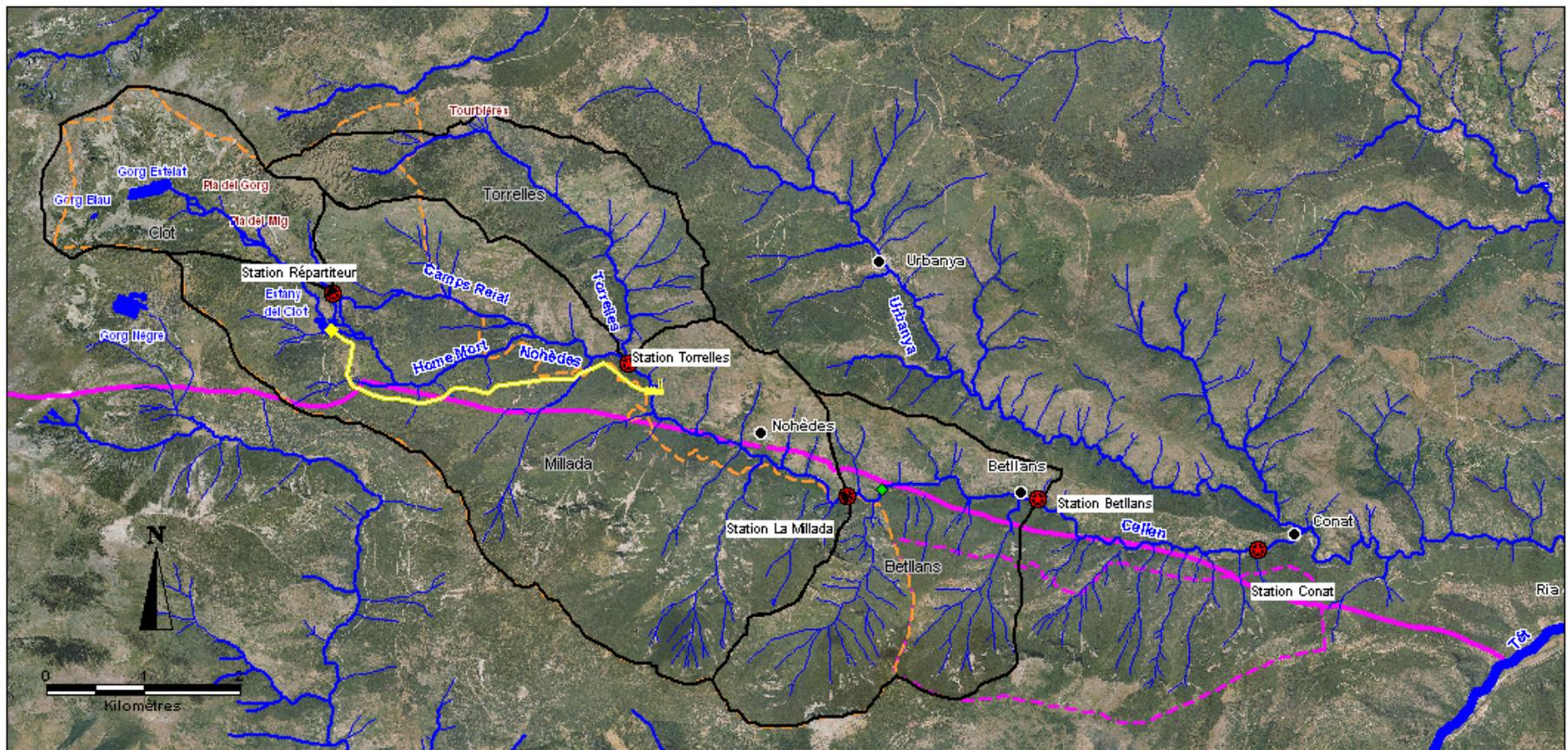
-  Stations hydrométriques

Administratif

-  Village / Hameau

Sources : Carte géologique, Réserve Naturelle de Nohèdes - Réalisation : Aurore CHAUBET

Figure 4. Géologie de la zone d'étude



Stage "Bilan hydrique du bassin versant de Nohèdes" - 2014

Présentation de la zone d'étude

Aménagements hydrauliques	Éléments hydrogéologiques	Administratif
Stations hydrométriques	Zone de pertes supposées dans le karst	Village / Hameau
Microcentrale électrique de Nohèdes	Rivière / Ruisseaux	Limite de la Réserve Naturelle de Nohèdes
Conduite forcée	Lacs / Etangs	Limite de la Réserve Naturelle de Conat
Prise d'eau de la centrale	Pila del Mig: Complexe tourbeux	
	Limite des BV propres à chaque station hydrométrique	
	Faille de Mérens	

Sources : Orthophoto®, Réserve Naturelle de Nohèdes - Réalisation : Aurore CHAUBET

Figure 5. Réseau hydrographique

E. Etat des connaissances

Les connaissances rattachées au territoire des réserves naturelles de Conat et de Nohèdes s'accroissent d'année en année au fur et à mesure d'études réalisées par divers acteurs : spécialistes, stagiaires, passionnés. Depuis la mise en place des réserves naturelles, les domaines d'études se sont diversifiés et les connaissances se sont affinées afin de caractériser au mieux tous les enjeux présents sur ces zones.

L'hydrobiologie du réseau hydrographique de surface a été décrite par J. Moubayed (Moubayed, 1998) puis par l'étude de Breil-Moubayed (Breil-Moubayed, 2004). Pour ce qui est du réseau souterrain, les diverses études de H. Salvayre ont permis d'améliorer les connaissances (Salvayre, 2010). Plusieurs spéléologues ont également pu explorer une partie de ce réseau karstique dont B. Raymaeckers faisant une étude approfondie de la *Cova de les Encantades* (Raymaeckers, 2005).

La géologie a été très étudiée autant pour ce qui est de l'orogénèse par M. Calvet (Calvet, 2012) que les affleurements représentés sur la carte géologique de Prades par G. Guitard (Guitard, 1998). Des études approfondies de la structure du synclinal de Villefranche ont été réalisées par B. Laumonier desquelles est ressortie la réalisation de coupes géologiques (Laumonier, 1997 ; 2004).

Pour ce qui est de l'hydrologie, trois stages ont eu lieu en partenariat avec Polytech Montpellier.

La première étude menée par P.-L. Ducroix avait pour but de caractériser les échanges entre le karst et la rivière de Nohèdes (Ducroix, 2009). Il est ressorti de cette étude que l'échange du karst était relativement faible du point de vue quantitatif mais, très important d'un point de vue physico-chimique. Il a également pu mettre en évidence la présence d'une perte dans un méandre s'enfonçant dans le karst affectant le débit du cours d'eau.

La seconde étude a été réalisée par M. Servièrè. La finalité était de préciser le bilan hydrique de la vallée à travers la mise en place de quatre stations de suivi limnimétrique (Servièrè, 2010).

Enfin, M. Le Guenanff s'est également intéressée au bilan hydrique de la vallée de Nohèdes dans la continuité de l'étude précédente (Le Guenanff, 2013).

Pour ce qui est du climat, J.-P. Vigneau a consacré sa thèse à la caractérisation de celui-là sur le département des Pyrénées-Orientales avec un intérêt particulier à la caractérisation des régimes en altitude (Vigneau, 1986). Ce travail réalisé avant la création des réserves naturelles est d'une grande importance pour expliquer en particulier les gradients de pluviométrie. C. Roux est venu compléter cette analyse (Roux, 2010).

III. Objectifs du stage

Ce stage s'inscrit dans une démarche de détermination de l'hydrologie de la vallée de Conat et de Nohèdes souhaitée et mise en place par le gestionnaire de la réserve naturelle de Nohèdes depuis 2009 et s'étoffant au fur et à mesure des stages réalisés par différents étudiants de Polytech Montpellier.

Outre les apports en connaissance pure sur le fonctionnement hydrologique dans le périmètre considéré, cette étude évalue l'intérêt du réseau karstique du mont Coronat qui abrite une réserve d'eau potentiellement exploitable. Si cet intérêt était démontré, il faudrait alors mettre en place toutes les mesures nécessaires à la protection de ce site vis-à-vis de différentes sources de pollution. À terme, ce réseau karstique pourrait alimenter les villages du bassin démographique de Prades.

Cette étude a également pour but de connaître le fonctionnement général du réseau. Ce dernier est soumis à la diversité de substrat que l'on retrouve dans le bassin versant, imposant des conditions de stockage des eaux différentes.

Suite aux différents travaux réalisés par les précédents stagiaires, les missions qui sont prioritaires pour le stage sont les suivantes :

- installer et tarer une 5^e station de suivi limnimétrique au village de Conat ;
- compléter les courbes de tarage des quatre stations en place ;
- évaluer le rôle de la faille de Mérens coupant le cours d'eau entre les stations de *Betllans* et de Conat ;
- évaluer les lames d'eau théoriques pour les sous bassins versants définis en amont des stations de suivi ;
- estimer la contribution des différentes formations géologiques à l'écoulement total ;
- évaluer les volumes d'eau captés par le karst ;
- établir les axes d'une collaboration avec le syndicat mixte du bassin-versant de la Têt.

IV. Matériel et méthodes

A. Mesure des hauteurs d'eau

Les quatre stations hydrométriques existantes sont équipées chacune d'une échelle limnimétrique et d'une sonde enregistreuse OTT Orpheus Mini. La sonde est placée dans un tube crépiné afin d'éviter son usure prématurée (par contact avec des pierres pendant un épisode de crue) voire son emportement par le courant.

Cette sonde permet de relever avec un pas de temps horaire les hauteurs d'eau ainsi que la température. Ceci est rendu possible par la présence d'une cellule de mesure de la pression hydrostatique à membrane céramique et d'une sonde de température.

Les différentes hauteurs d'eau sont calculées par la formule suivante :

$$H = \frac{P_{hydro} - P_{atm}}{\rho g}$$

avec :

H : hauteur d'eau au dessus de la sonde

P_{hydro} : pression hydrostatique

P_{atm} : pression atmosphérique

g : accélération de la pesanteur

ρ : masse volumique de l'eau

Équation 1. Formule de l'hydrostatique

Les données enregistrées sont récupérées par communication infrarouge à l'aide du logiciel Hydras3.

B. Mesure des débits

La mesure des hauteurs d'eau n'étant pas exploitables directement, il faut établir des courbes de tarage (relation hauteur-débit) sur chacune des stations de suivi limnimétrique. Pour cela, des mesures de débit sont réalisées pour différentes hauteurs d'eau lues à l'échelle, en prenant soin de couvrir le plus grand marnage possible (plus particulièrement en période d'étiage et de crue).

1. Choix de la section de jaugeage

La méthode de jaugeage par extrapolation du champ de vitesse a été choisie pour réaliser ce travail. Elle repose sur la mesure partielle du champ de vitesse sur une section du cours d'eau à proximité de la station de suivi limnimétrique. La mesure peut être plus éloignée s'il n'existe pas d'apport ni de perte d'eau entre la section de jaugeage et la station.

Plusieurs critères sont à prendre en compte pour le choix de la section de jaugeage en plus de la proximité avec la station limnimétrique. La section doit se trouver dans un bief rectiligne et son emplacement doit être choisi pour être influencée au minimum par des obstacles pouvant modifier le régime hydraulique (rochers...). Dans le même sens, il faut

éviter les zones où l'écoulement est convergent ou divergent, les zones mortes et les zones où se produisent des courants « retours ».

Les vitesses sont relevées ponctuellement sur différentes verticales de la section, à plusieurs profondeurs comme représentées sur la figure 6.

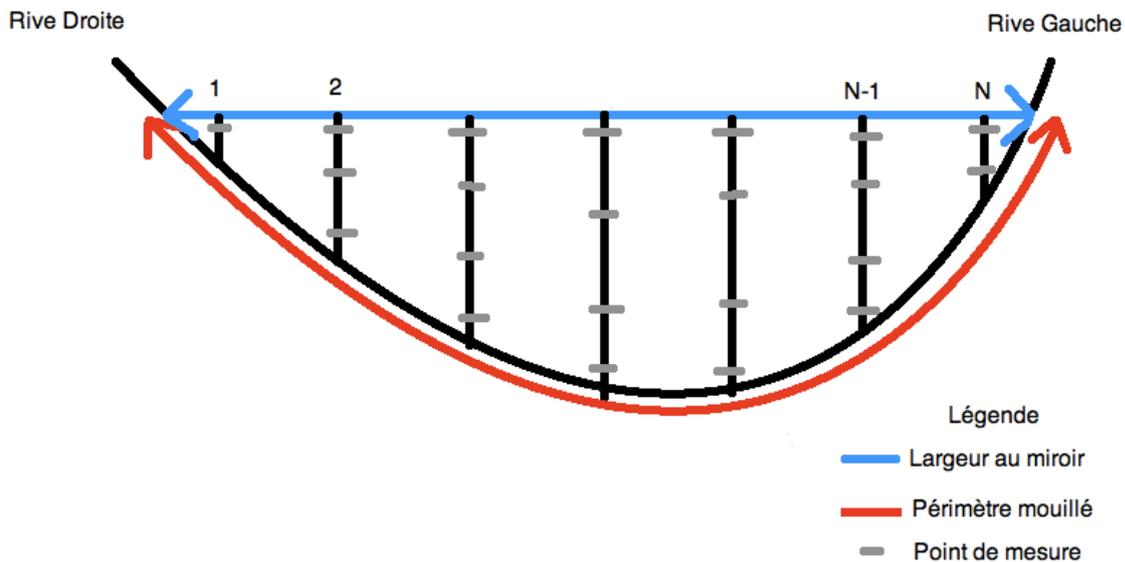


Figure 6. Schéma d'un jaugeage

Le choix du nombre de verticales se fait à l'appréciation de l'expérimentateur mais se doit de rendre compte le plus fidèlement possible de la section étudiée. Pour ce qui est du nombre de vitesses mesurées sur une verticale, le plus judicieux est de réaliser une mesure en surface, une au fond et deux points intermédiaires (20% et 80% de la profondeur). Pour cela, il faut que la section de mesure présente une profondeur d'eau suffisante.

2. Utilisation du moulinet

Le matériel utilisé pour la mesure de la vitesse est un moulinet sur perche doté d'une hélice 2030-R de la marque General Oceanics.

Le moulinet est placé dans le sens du courant (perpendiculairement à l'écoulement) de telle façon que l'expérimentateur ne perturbe pas l'écoulement à proximité de ce dernier. Un compteur donne le nombre de tours effectués par l'hélice sur une durée choisie (si possible identique pour toutes les mesures d'un même jaugeage). La documentation technique du moulinet permet de déterminer la vitesse de l'eau grâce à une courbe d'étalonnage (annexe 1).

Afin de conserver une grande précision dans les mesures de vitesse, il est indispensable de remplir d'eau du robinet le moulinet avant toute utilisation (en faisant attention de ne pas laisser de bulle d'air qui pourrait fausser la mesure de faibles vitesses). Ceci permet d'éliminer des erreurs dues aux différences de pression osmotique entre l'eau de

la rivière et le moulinet. Après chaque jaugeage, il est indispensable de laver l'appareil avec une solution diluée d'acide acétique (vinaigre blanc) afin de limiter la prolifération d'algues et le dépôt de matières minérales qui pourraient obstruer l'axe de rotation du compteur. Cette opération de trempage doit durer plusieurs heures. Pour ce qui est du stockage, il faut prendre soin de bien vider le moulinet.

3. Dépouillement des jaugeages

Afin de déterminer le débit circulant dans la section choisie, il est nécessaire de calculer dans un premier temps les débits unitaires sur chacune des verticales puis, le débit global en intégrant ces débits unitaires sur la largeur de la section.

Le calcul étant relativement lourd, le choix a été fait d'utiliser le logiciel HydrAccess pour réaliser cette étape avec le module DEPJAUGE. Il est important de saisir les profondeurs en prenant comme référence le fond étant donné que la technique du moulinet sur perche est utilisée. Il y a donc une étape de conversion de la profondeur lue sur la perche¹.

Le module fournit les profils des vitesses sur chacune des verticales et le profil des débits unitaires sur la section.

Les jaugeages ainsi dépouillés sont stockés dans une base de données créée initialement par Pierre-Loup Ducroix en 2009 et mise à jour par toutes les personnes ayant travaillé sur le projet hydrologie jusqu'à présent. Cette base de données est mise à disposition sur le réseau informatique de la réserve naturelle de Nohèdes.

4. Réalisation des courbes de tarage

Lorsque plusieurs jaugeages ont été réalisés sur une même station et que le profil en travers au droit de l'échelle limnimétrique est connu, il est possible de réaliser la courbe de tarage de la station. Il faut s'assurer d'avoir une gamme assez large de régimes d'écoulement afin de couvrir le plus grand marnage possible.

Pour ce faire, le module CALIBRA sous HydrAccess a été choisi. Les courbes de tarage calculées à partir de ce module sont biunivoques : il ne correspond qu'un seul débit à une hauteur d'eau et réciproquement.

Tout d'abord, une interpolation du groupe de jaugeage est nécessaire. La méthode de l'ajustement potentiel a été utilisée pour l'ajustement des précédentes courbes de tarage. Il en sera de même pour la station de Conat. L'ajustement potentiel est de la forme :

¹ Si la profondeur totale est de 15 cm et que deux mesures sont faites à 4,5 cm et 10 cm de la surface, il faudra alors saisir dans HydrAccess 10,5 cm et 5 cm.

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

avec

Q : débit du cours d'eau (m³/s)

H : hauteur d'eau lue à l'échelle (cm)

H₀ : hauteur pour laquelle le débit s'annule (cm)

Équation 2. Interpolation potentielle

Une extrapolation vers les très hautes eaux et les très basses eaux est ensuite réalisée afin d'obtenir une courbe de tarage couvrant tout le marnage. L'ajustement selon la formule de Manning-Strickler a été choisi, il est du type :

$$Q = K * i^{0,5} * Rh^{2/3} * S$$

avec :

Q : débit du cours d'eau (m³/s)

K : coefficient de Strickler

i : pente de la ligne d'eau (m/m)

Rh : rayon hydraulique (m) avec $Rh = S/\chi$

S : section mouillée (m²)

χ : périmètre mouillé (m)

Équation 3. Interpolation de Manning-Strickler

Dans les extrapolations proposées par le module CALIBRA, le paramètre $K * i^{0,5}$ est fixé. En effet, il est calculé pour le plus grand débit jaugé puis considéré comme constant. Ceci est possible car les constantes géométriques sont fournies directement par le module à partir du profil en travers.

C. Installation d'une station hydrométrique

Une des missions proposée au cours de ce stage a été l'implantation d'une station de suivi limnimétrique à l'entrée ouest du village de Conat.

La station est constituée des éléments suivants :

- * au moins une section de contrôle ;
- * une échelle limnimétrique ;
- * une sonde enregistreuse.

Le choix de l'emplacement avait été effectué au préalable par M. Le Guenanff, A. Mangeot et D. Morichon respectant au maximum les critères suivants (Banque hydro, 1998):

- * fidélité : la relation entre la hauteur et le débit se doit d'être biunivoque. Il faut que l'écoulement au droit de la station soit uniforme et permanent ;
- * sensibilité : une faible variation de débit doit créer une grande variation de hauteur lue sur l'échelle (pente faible, largeur faible, rugosité du lit forte) ;

- * accessibilité : l'accès à la station doit se faire en toutes circonstances (crue, étiage) sans risques pour les employés ;
- * contrainte technique : la lecture des hauteurs doit pouvoir être réalisée quelque soit la période de l'année. De plus, le système complet doit résister à l'emportement en cas de crue. Pour cela, la station sera fixée solidement à un support rocheux et, les appareils sensibles seront placés au dessus de la ligne de plus hautes eaux.

Les plans du support d'accueil de l'échelle limnimétrique et de la sonde sont disponibles en annexe 2. Ils ont été réalisés à l'aide du logiciel Google SketchUp avec la collaboration d'Alain Champagnat.

D. Calcul du bilan hydrique

Le bilan hydrique d'un bassin versant peut s'établir de la façon suivante :

$$\text{Pluie brute} = \text{pluie nette} + \text{pertes} + \text{variation du stock}$$

La pluie brute (PB) est la lame d'eau précipitée. Elle est mesurée à l'aide d'un pluviomètre généralement.

La pluie nette (PN) est la lame d'eau précipitée qui a rejoint l'exutoire. Elle est déterminée sur chacune des stations de suivi limnimétrique.

Les pertes se traduisent par des phénomènes d'évapotranspiration se produisant sur l'ensemble du massif. En effet, les processus d'évaporation et de transpiration sont prédominants : jusqu'à deux-tiers de l'eau précipitée peut retourner ainsi dans l'atmosphère. Il faut donc quantifier ces volumes de perte. Deux types d'évapotranspiration existent :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond au volume d'eau qui s'évaporerait si la quantité d'eau disponible n'était pas limitante (comme sur une masse d'eau vaste : lac, mer) ;
- l'évapotranspiration réelle (ETR) est la quantité d'eau réellement évapotranspirée compte tenu de la disponibilité en eau et du climat.

La variation de stock se visualise à l'échelle du bassin versant. Il s'agit de phénomène de stockage de la neige ou encore de pertes dans le réseau souterrain.

1. Calcul de la pluie brute

Au cours de ce stage, les lames d'eau précipitées sur les bassins versants des quatre stations de suivi ont été estimées.

Pour cela, le calage des isohyètes calculés selon le modèle de Météo France Aurelhy sur les données de 1971 à 2000 (figure 7) sur le bassin versant a été réalisé, en utilisant une projection de Lambert II pour caler quatre points connus de la zone. Ainsi, le tracé des courbes isohyètes sous forme de polygones a été effectué.

Les volumes de pluies brutes ont été calculés de la façon suivante :

$$V_{PB} = \sum(A * 10 * \bar{P} * C)$$

avec

A : aire correspondante à l'isohyète (ha)

\bar{P} : lame moyenne précipitée sur l'aire (mm)

C : coefficient correctif

Équation 4. Calcul du volume de pluie brute interannuel

Le coefficient correctif C résulte du fait que la pluie moyenne interannuelle relevée au pluviomètre du village n'est pas égale à la pluie retrouvée sur les courbes isohyètes au même lieu. Ainsi, afin d'appliquer le modèle à n'importe quelle année, la mesure ponctuelle relevée au pluviomètre est rapportée systématiquement à la lame d'eau de 715 mm correspondante sur les isohyètes. La moyenne interannuelle des lames d'eau relevées au pluviomètre est de 786,8 mm sur la chronique 1984-2013. Il existe un grand écart entre la valeur déterminée sur l'isohyète et la valeur expérimentale issue du relevé quotidien. L'erreur sur les précipitations en altitude semble encore plus grande que celle constatée au village, mais, à ce jour, aucune solution n'a été trouvée pour adapter de façon cohérente le coefficient correctif avec l'altitude.

Les chroniques utilisées dans les deux cas ne sont pas les mêmes : 1971-2000 pour Aurehly, 1984-2013 pour le pluviomètre. Cela peut être une source d'erreur car, cela impose l'hypothèse que les précipitations sont invariantes au cours d'une échelle de temps courtes (une quarantaine d'années).

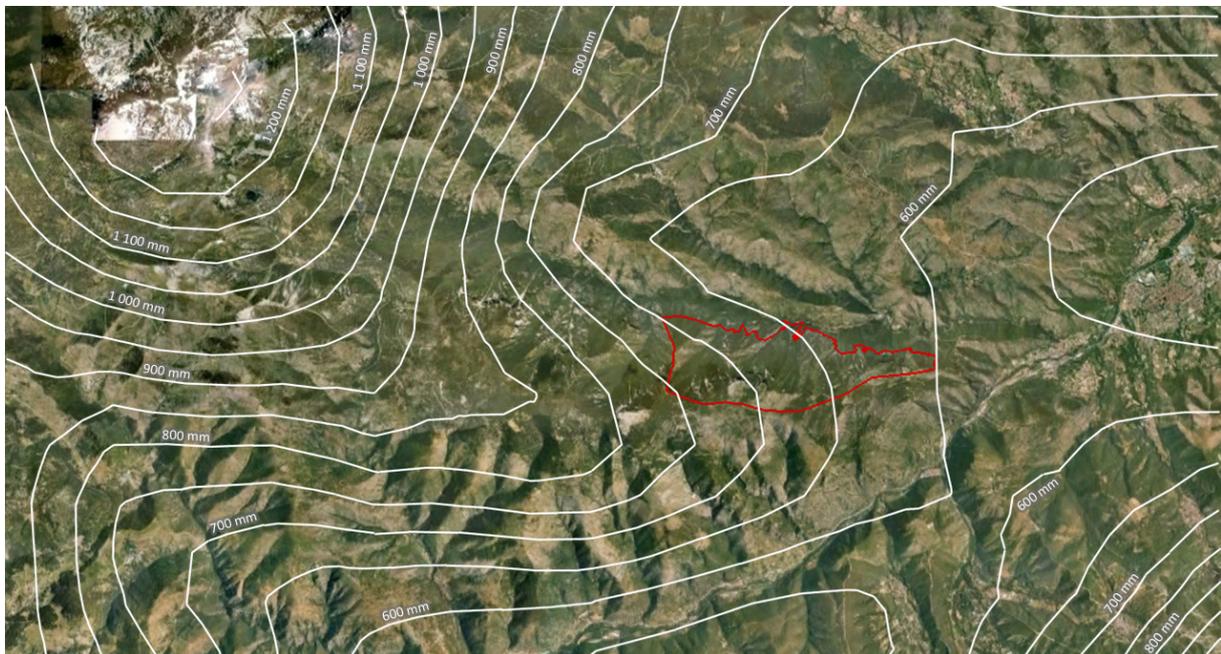


Figure 7. Courbes isohyètes selon le modèle Aurehly

2. Calcul de la pluie nette

La pluie nette a été calculée en appliquant la méthode des rectangles sur les hydrogrammes calculés sur chacune des stations de suivi. Ceci paraissait suffisamment

précis étant donné que les mesures sont relevées au pas de temps horaire. Les volumes bruts ont été déduits des débits calculés suivant les courbes de tarage de la façon suivante :

$$V = \sum Q * \Delta t$$

avec

Q : débit calculé avec les courbes de tarage (m³/s)

Δt : pas de temps de la chronique (s)

Équation 5. Calcul du volume de pluie nette annuel

3. Calcul de l'ETP

Pour calculer l'ETP, le logiciel MapInfo été utilisé afin de déterminer les aires correspondantes à chaque classe d'altitude (chaque classe prenant en compte 100 m de dénivelé). Une fois ces aires appréciées, l'ETP mensuelle a été calculée suivant la formule de Thornthwaite. Cette dernière n'étant pas utilisable en tant que telle en zone de montagne, chaque classe d'altitude s'est donc vue attribuée une température calculée selon un gradient adiabatique (0,6 °C/100 m) afin de la corriger. Cette approximation est une source d'erreur dans l'estimation de l'évapotranspiration car sur le versant exposé au nord le gradient est plus faible contrairement à celui exposé au sud. La classe de référence choisie était celle de 900-1000 m (altitude de la station météorologique de Nohèdes). Un indice thermique annuel par classe d'altitude a ainsi pu être déterminé. L'ETP est calculé selon la formule suivante :

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

avec

t_i : moyenne interannuelle des températures du mois (°C)

$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 * t_i)^{1,514}$: indice thermique annuel

$a = 0,016 * I + 0,5$: fonction approché de I

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

Équation 6. ETP par la formule de Thornthwaite

Pour interpréter les résultats, l'ETP annuelle sous forme de volume d'eau est calculée en faisant la somme des ETP mensuelles ramenées à la surface de chaque sous bassin-versant.

4. Calcul de l'ETR

L'ETR est calculé à partir de la formule de Turc. Cette dernière traduit un déficit d'écoulement sous certaines conditions comme l'absence d'échanges souterrains à la frontière du bassin-versant ou la possibilité de négliger la variation de la réserve en eau souterraine. Ces deux paramètres ne sont dans notre cas certainement pas vérifiés à cause des spécificités du réseau karstique. En effet en fonction des conditions météorologiques (fortes précipitations, sécheresse), ce dernier est capable de se charger ou au contraire de se vidanger.

Le calcul est tout de même réalisé afin de comparer ces résultats avec l'ETP calculée précédemment. La formule est la suivante :

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

avec

P : pluie moyenne annuelle

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

T : température moyenne annuelle

Équation 7. ETR selon la formule de Turc

Un gradient adiabatique des températures a également été utilisé pour ce calcul. Les problèmes soulevés par l'utilisation de ce gradient lors du calcul de l'ETP restent valables dans ce cas. L'ETR est calculée uniquement sur un pas de temps annuel contrairement à l'ETP qui est déterminée à une échelle mensuelle.

5. Calage d'isohyètes fictives

Les courbes isohyètes de pluies brutes calculées à partir de moyennes interannuelles ne sont pas pertinentes lors du calcul des coefficients de ruissellement en altitude. En effet, seules les données de pluies nettes annuelles sont disponibles, le suivi ayant démarré uniquement en 2012. Ainsi, le calcul de la lame d'eau brute annuelle paraît judicieux. Pour cela, une interpolation linéaire est réalisée à partir de données mesurées en trois points de référence constituant un gradient d'altitude important :

- le sBV du *Clot* sur lequel est calculée la lame d'eau moyenne interannuelle précipitée par le modèle Aurehly grâce à la formule suivante :

$$L = \frac{\sum S * \bar{P}}{\sum S}$$

avec

L : lame d'eau annuelle (mm)

S : surface rattachée l'isohyète (ha)

\bar{P} : lame d'eau de l'isohyète sur Aurehly (mm)

Équation 8. Lame d'eau brute

- le village de Nohèdes où la lame d'eau est mesurée au pluviomètre ;
- le village de Eus situé à flanc de colline en aval du bassin de Prades pour lequel Météo France a fourni les données issues de leur station météorologique.

Les données pour les villages de Nohèdes et de Eus sont utilisables directement. Pour ce qui est du sBV du *Clot*, il faut se baser sur les données de pluies nettes relevées à la station de suivi. A cette lame d'eau, un coefficient de ruissellement estimé est appliqué. Cette estimation est issue de la méthode du SCS par l'intermédiaire du Curve Number (CN) avec laquelle il est possible de calculer la pluie brute correspondante. Le CN est un paramètre adimensionnel qui est fonction de l'humidité initiale, le type et l'occupation d'un sol.

Afin d'estimer le CN avec précision, il faut attribuer une valeur pour chaque type d'habitat : pelouse, forêt, lande, tourbières,... Pour cela, il est nécessaire de recouper la cartographie des habitats de la réserve avec le territoire du sBV du *Clot* à l'aide du logiciel MapInfo. Ensuite, en se référant à la table mise au point par Van Te Chow (USDA-SCS, 1985) le CN est attribué. Le coefficient global est obtenu de la façon suivante :

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n CN_i * S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

avec

CNi : curve number du type de sol i

Si : surface rattachée au type de sol i

n : nombre de type de sol recensés

Équation 9. Curve number

À l'aide des données recueillies à l'exutoire et du CN, les précipitations potentielles sont calculées par la formule suivante :

$$Q = \frac{(P-0,2 S)^2}{P+0,8 S}$$

avec

Q : lame d'eau à l'exutoire (mm)

P : lame d'eau précipitée (mm)

S : absorption potentielle maximale du BV (mm)

Équation 10. Pluie nette à l'exutoire

Cela a été réalisé à l'aide du logiciel suivant : http://zonums.com/online/hydrology/curve_number.

Une fois ce travail réalisé, une interpolation linéaire entre deux points successifs est faite. Le même nombre d'isohyètes que comprenait initialement le modèle Aurehly est conservé afin de rattacher la même surface à chaque classe de lame d'eau. Ce type d'interpolation a été choisi du fait de l'absence de données de précipitations intermédiaires mais aussi, d'une incertitude quant au poids à donner en altitude.

Pour compléter cette démarche, il faudrait reconduire les calculs pour des années sèches et humides. Pour cela, le CN doit être modifié en appliquant les formules suivantes :

$$CN_{sec} = \frac{4,2 * CN}{10 - 0,058 * CN} \quad \text{et} \quad CN_{humide} = \frac{23 * CN}{10 + 0,13 * CN}$$

Équation 11. Calage du curve number en condition sèche et humide

La suite de la démarche reste identique à celle présentée plus haut.

V. Résultats et interprétations

A. Vérification des sondes

Les données acquises par les sondes depuis la fin du mois d'août 2013 ont été vérifiées sous le logiciel Hydras3. Les limnigrammes observés sont les suivants :

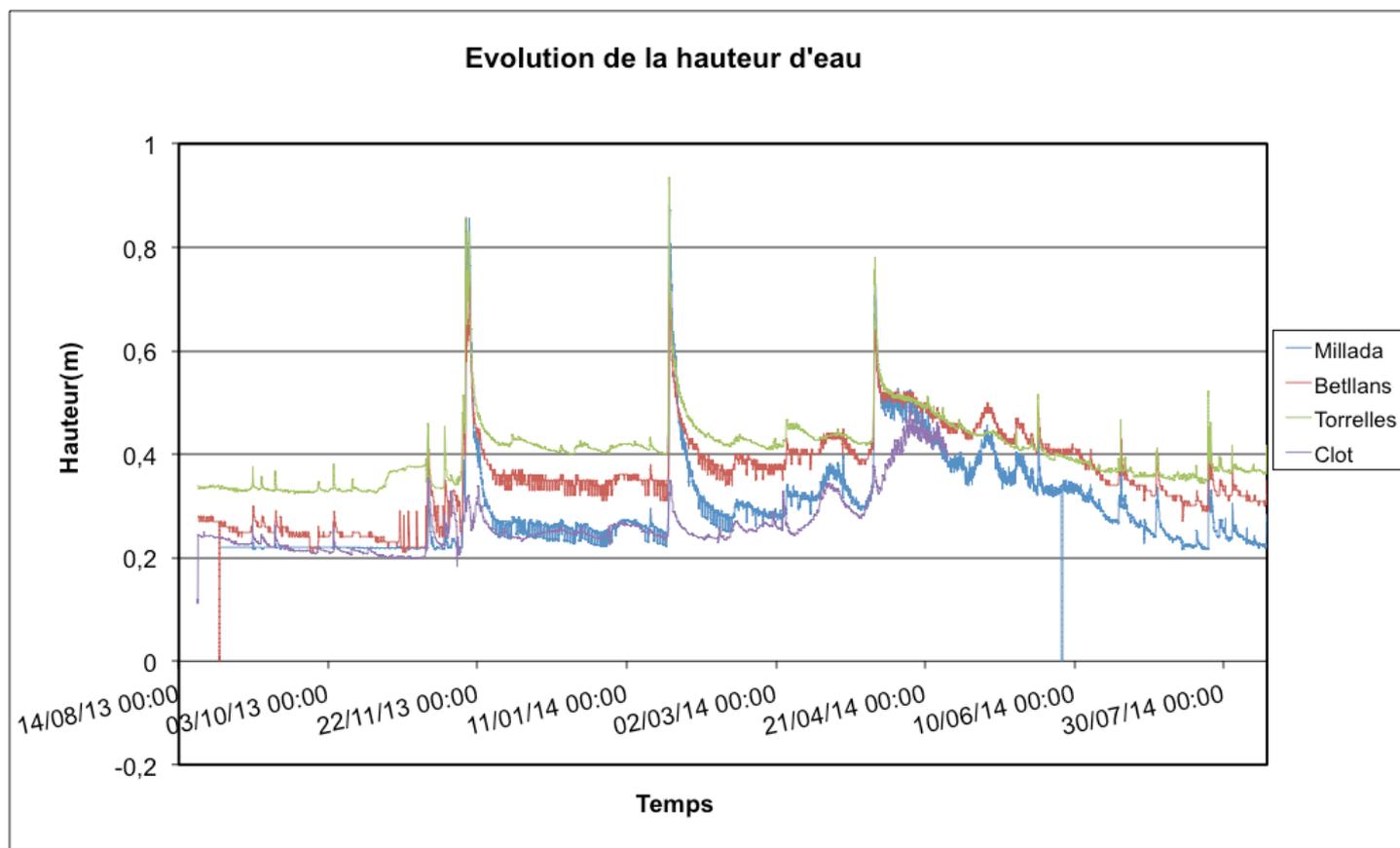


Figure 8. Limnigrammes des quatre stations de suivi

Les quatre limnigrammes suivent les mêmes tendances en ce qui concerne les hauteurs d'eau mesurées. Il est important de noter que les épisodes de crue sont représentés par des pics de hauteurs qui se « déplacent » dans le temps en fonction de la situation géographique de la station.

A la vue du graphique, les sondes paraissent bien calibrées. Cependant, celle située au *Clot* n'enregistre plus de données depuis le 28 avril 2014. En conséquence, elle a été renvoyée au fournisseur pour être réparée.

B. Conversion hauteur-débit : courbe de tarage

La réalisation de courbes de tarage des quatre premières stations a été effectuée par les précédents stagiaires en hydrologie. Cette année, uniquement celle de la station de suivi de Conat a été calculée.

Ci-dessous sont présentés le profil en travers et la courbe théorique de tarage (figures 9 et 10).

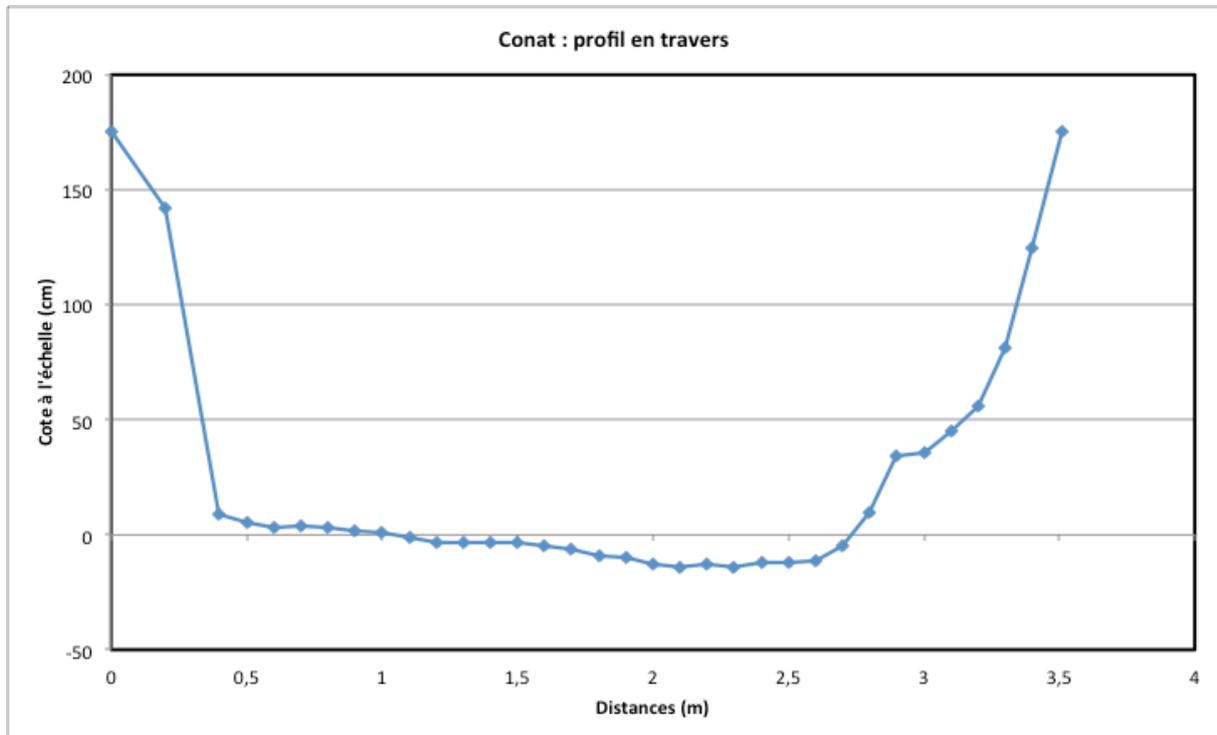


Figure 9. Profil en travers

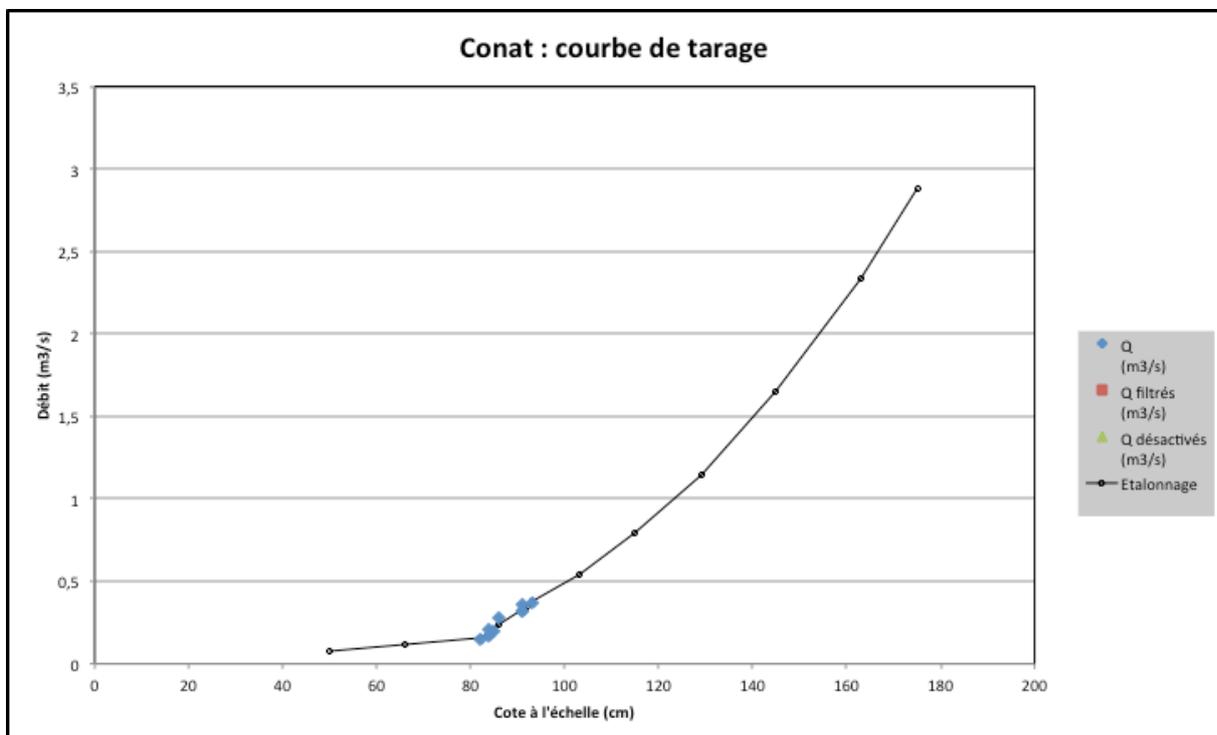


Figure 10. Courbe de tarage

La courbe de tarage ainsi réalisée n'est pas précise car la gamme de hauteurs d'eau jaugées varie seulement de 82 à 94 cm. Seule une très faible partie du marnage a été évaluée.

Aucune valeur de débit réelle en très basses eaux ni en hautes eaux n'a pu être jaugée. De plus, la mesure des débits au moulinet admet des erreurs de l'ordre de 10% (Banque hydro, 1998), surtout lorsque les vitesses mesurées sont relativement faibles comme à Conat. Dans les zones mortes, le moulinet n'indique pas de vitesse ce qui augmente également les imprécisions sur l'estimation du débit. La lecture de l'expérimentateur à l'échelle est elle aussi source d'erreur étant donné que l'évaluation se fait à $\pm 0,5$ cm en eau calme et jusqu'à ± 2 cm en cas de fortes perturbations de surface.

Les imprécisions naissent aussi de l'extrapolation réalisée. En effet, le terme $K * i^{0,5}$ est dans un premier temps estimé puis, considéré constant pour les extrapolations vers les basses eaux comme pour les hautes eaux.

Enfin, l'absence de phénomènes d'hystérésis n'est pas démontrée ce qui compromettrait l'hypothèse d'une relation biunivoque entre la hauteur d'eau lue et le débit calculé. Il se peut qu'il y ait une allure de courbe de tarage différente en période de crue et en période de décrue. Cependant, les stations ont été placées au mieux pour éviter ce problème.

C. Analyse des hydrogrammes calculés

Les hydrogrammes obtenus à partir des courbes de tarage sont visibles en annexe 3, 4 5 et 6. Une analyse de ces derniers est conduite station par station.

* Station du répartiteur :

La station du répartiteur (*Clot*) est située à 1 685 m d'altitude. Elle subit l'effet d'emmagasinement et de déstockage des précipitations solides. C'est une station qui est placée en amont du captage d'alimentation de la microcentrale électrique. Il est important de noter que du 15 juillet au 15 septembre, et lorsque le débit est inférieur à 50 l/s, ce prélèvement n'a pas lieu. Ceci est le cas du 16/09/13 au 16/11/13. Pendant toute cette période d'étiage, le cours d'eau n'est pas soumis aux éclusées.

En période d'étiage le débit minimal observé est proche de 20 l/s. Ces valeurs débits sont retrouvées pendant les mois de septembre et d'octobre.

Le débit maximal observé est de 731 l/s. Il apparaît le 15/04/14 à la suite d'un très fort épisode pluvieux concomitant à la fonte des neiges d'altitude. Cette fonte est très visible du fait des alternances jour/nuit pendant lesquelles les débits sont fortement modifiés (figure 11). En effet, la journée l'énergie thermique du soleil provoque une accélération de la fonte des neiges et la nuit ce phénomène est stoppé. Ainsi, toutes les pointes quotidiennes de débits se produisent en fin de journée.

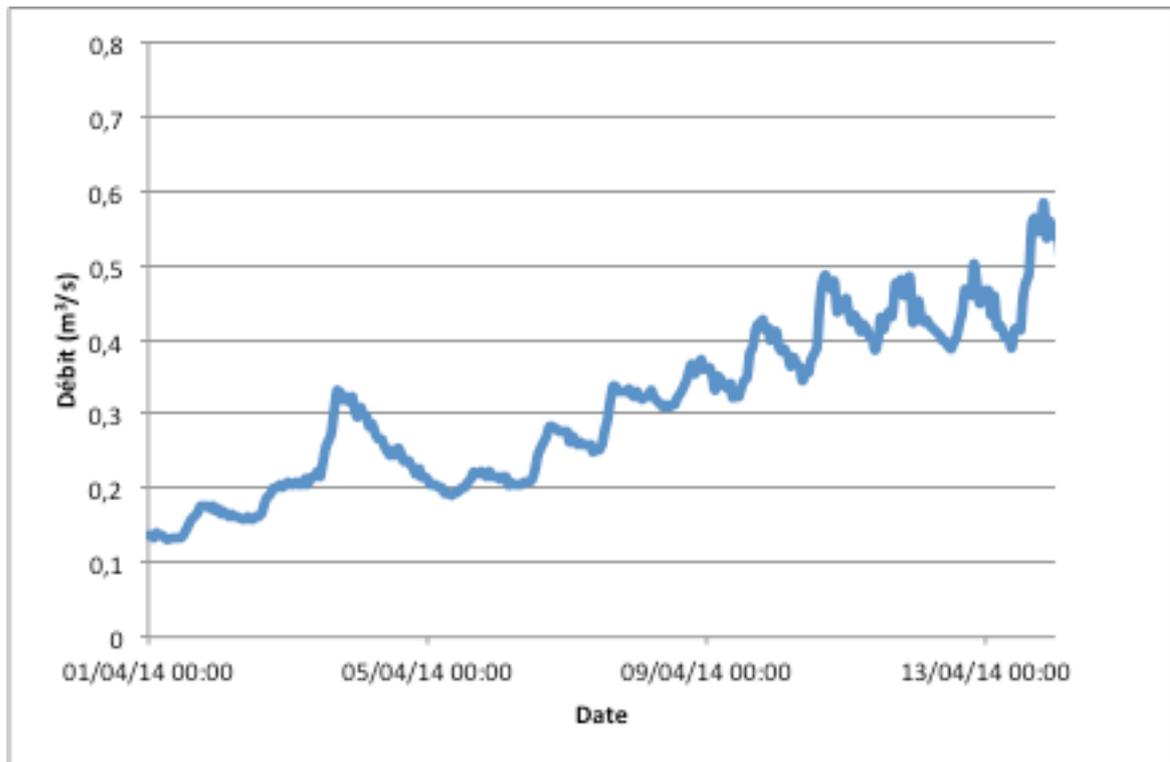


Figure 11. Alternance jour/nuit de la fonte des neiges

La crue du 26/01/2014 est quant à elle un exemple de l'emmagasinement de la neige que l'on peut observer en altitude. Alors que les trois stations en aval subissent de fortes crues, la station du *Clot* ne subit qu'une faible pointe de débit de 250 l/s environ. Les précipitations pluvieuses relevées au village devaient être neigeuses en altitude. Ainsi, elles n'ont eu que peu d'effets sur le débit mesuré à la station.

* Station de *Torrelles*

La station de *Torrelles* présente des débits relativement faibles. Ceci est principalement dû à la faible surface de son bassin versant et aux prélèvements réalisés au profit du canal d'Urbanya.

Le débit minimal observé est de 8 l/s en période d'étiage. Le débit maximal est lui de 1,65 m³/s, il a été observé au mois de janvier suite à un fort épisode pluvieux (45 mm au village). C'est un événement que l'on peut qualifier de rare.

Le débit de la station de *Torrelles* suit assez fidèlement les précipitations observées. La fonte des neiges influence peu le débit mesuré à cette station, contrairement aux observations faites précédemment à la station du *Clot*. L'exposition et une altitude maximale plus faible sont des paramètres pouvant expliquer ceci.

De manière générale, c'est une station qui est relativement stable en terme de débit. Elle peut être utilisée pour la détection des crues de faible intensité.

* Station de *Millada*

La station de *Millada* se situe en aval du rejet de la microcentrale. Ainsi, il est facile de détecter les périodes de fonctionnement et d'arrêt de celle-ci. À l'arrêt, la présence de pics correspond à des réponses à des épisodes pluvieux (figure 12). Les variations de 2 l/s constatées sont dues à la précision de la mesure de hauteur et de la courbe de tarage associée à la station.

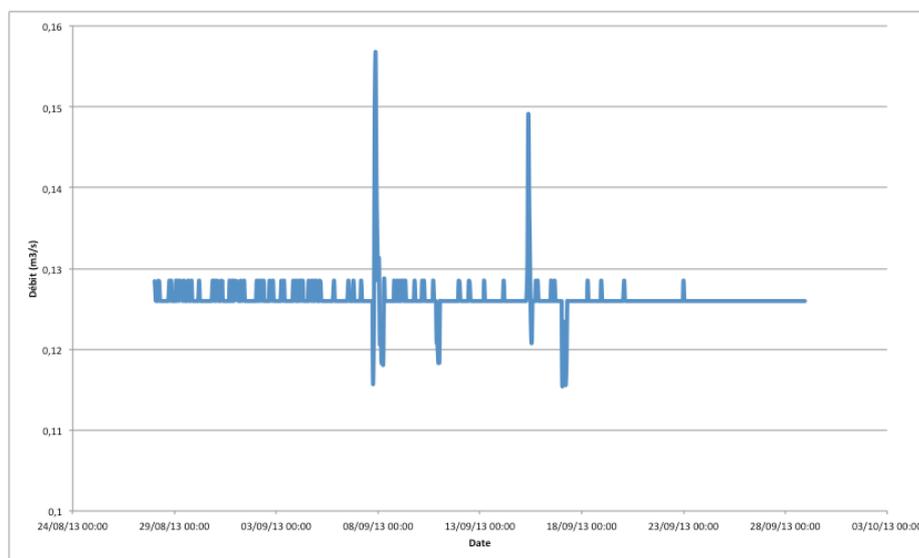


Figure 12. Hydrogramme à Millada durant l'arrêt de la microcentrale

Lorsque la microcentrale est en fonctionnement, des cycles journaliers sont visibles. La centrale rejette un débit proche de 90 l/s entre 10 h et minuit comme présenté sur la figure 13. Cette valeur est supérieure au 70 l/s que fournit théoriquement la microcentrale. Ceci provient à la fois d'erreurs dans les courbes de tarage et dans l'estimation du débit de fonctionnement de l'unité. La nuit, la centrale étant arrêtée, le débit de la rivière redevient « normal ».

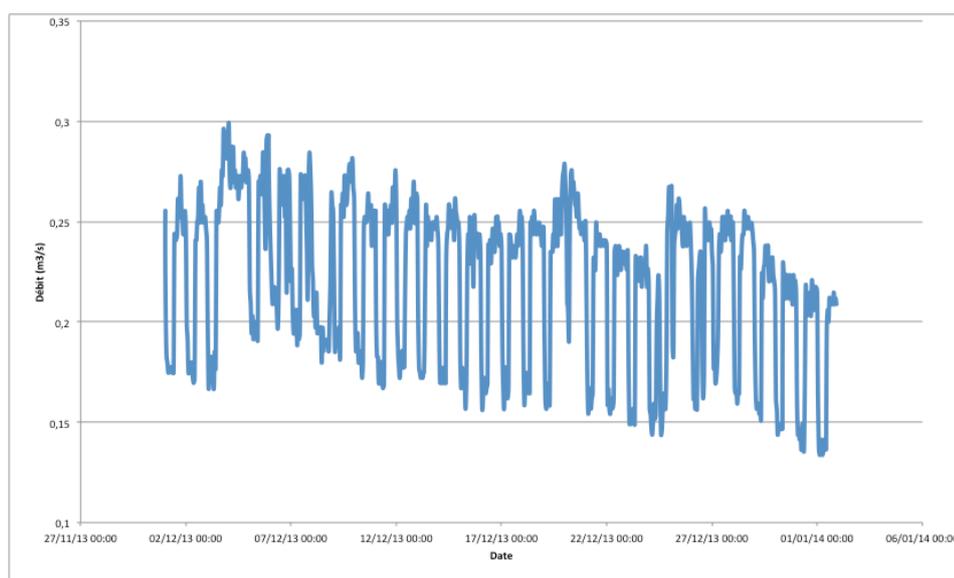


Figure 13. Hydrogramme à Millada lors du fonctionnement de la microcentrale

Lorsque le débit au répartiteur est supérieur à 120 l/s (50 l/s de débit réservé et 70 l/s de débit de fonctionnement), la centrale fonctionne sans arrêt. L'influence de cette dernière sur les hauteurs d'eau mesurées dans la journée n'est plus détectable. Cela semble apparaître à compter du mois de mars jusqu'au mois de juin. Le 15 juillet, la microcentrale est arrêtée du fait d'un règlement sur le fonctionnement, seul un faible débit reste en circulation pour prévenir de la formation de rouille qui se déverserait dans le cours d'eau à la reprise de l'exploitation.

Le débit maximal observé pour cette station de suivi est de 3,61 m³/s le 25 janvier 2014. Cela fait suite à un épisode pluvieux de forte intensité.

* Station de *Betllans*

La station de *Betllans* suit les mêmes tendances que la station de *Millada* pour ce qui est de l'influence du fonctionnement ou non de la microcentrale électrique.

Le décalage temporel entre les deux stations est d'environ une heure car les débits de pointe de chaque crue se produisent dans le même intervalle de temps ou avec un intervalle de décalage (Figure 14).

Sur la période étudiée, le débit de pointe observé de 2,1 m³/s. Il s'est produit le 19 novembre 2013.

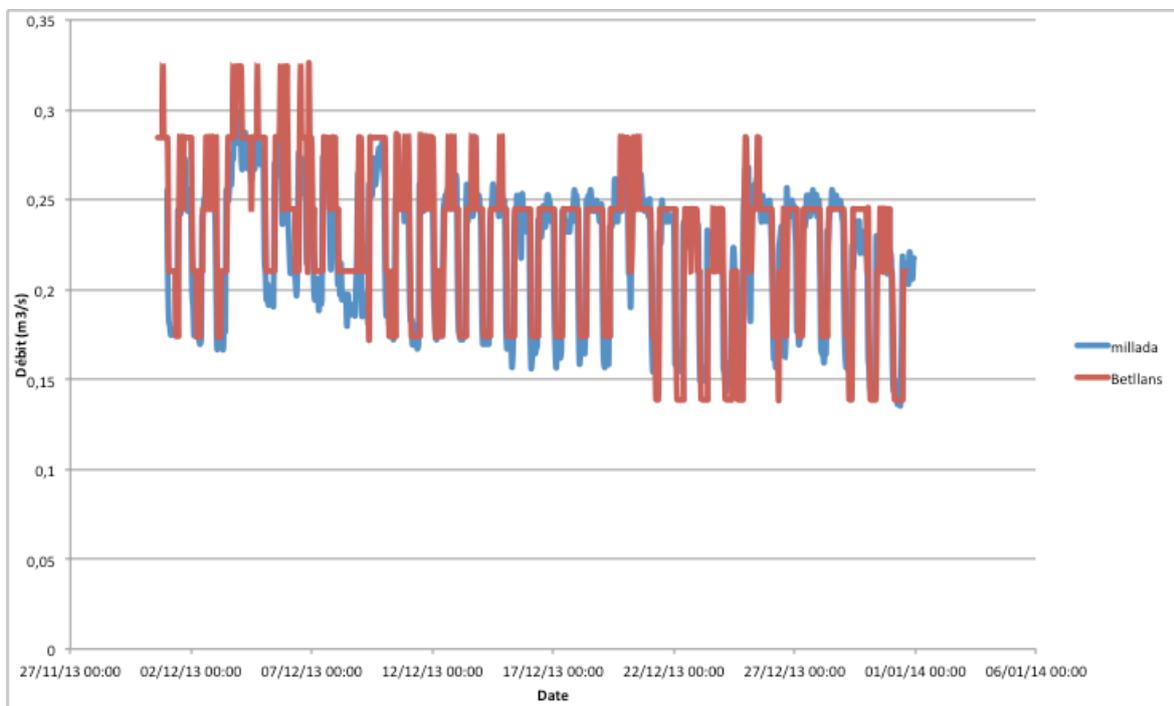


Figure 14. Comparaison des débits entre Millada et Betllans (fonctionnement discontinu de la microcentrale)

Cette courbe rend compte des imprécisions des courbes de tarage : les amplitudes des oscillations devraient être strictement identiques entre les deux stations.

* Quantification de la perte d'eau

Lorsque l'étiage est sévère, des mesures réalisées par Pierre-Loup Ducroix en 2009 montraient la présence d'une perte entre les stations de *Millada* et de *Betllans* avec des débits faibles, de l'ordre d'une vingtaine de litres par seconde. Les chroniques présentées figure 15 viennent donc appuyer ces observations.

À la limite des deux formations géologiques que sont le schiste et le calcaire, la présence d'une communication avec le réseau karstique est démontrée : en basses-eaux l'eau s'écoulant sur les terrains calcaires s'infiltré en profondeur en suivant la couche imperméable schisteuse. Cette perte d'eau est bien visible en conditions d'étiage non sévère. Le débit de perte est proche d'une centaine de litres par seconde durant cette période.

Lorsque les premières pluies apparaissent, s'accompagnant d'épisodes de crues des pointes sur le débit de la perte apparaissent, très bien corrélées avec les précipitations. Ces pointes semblent très peu réalistes. Il semblerait qu'elles résultent d'erreurs dans les courbes de tarage des stations en hautes eaux.

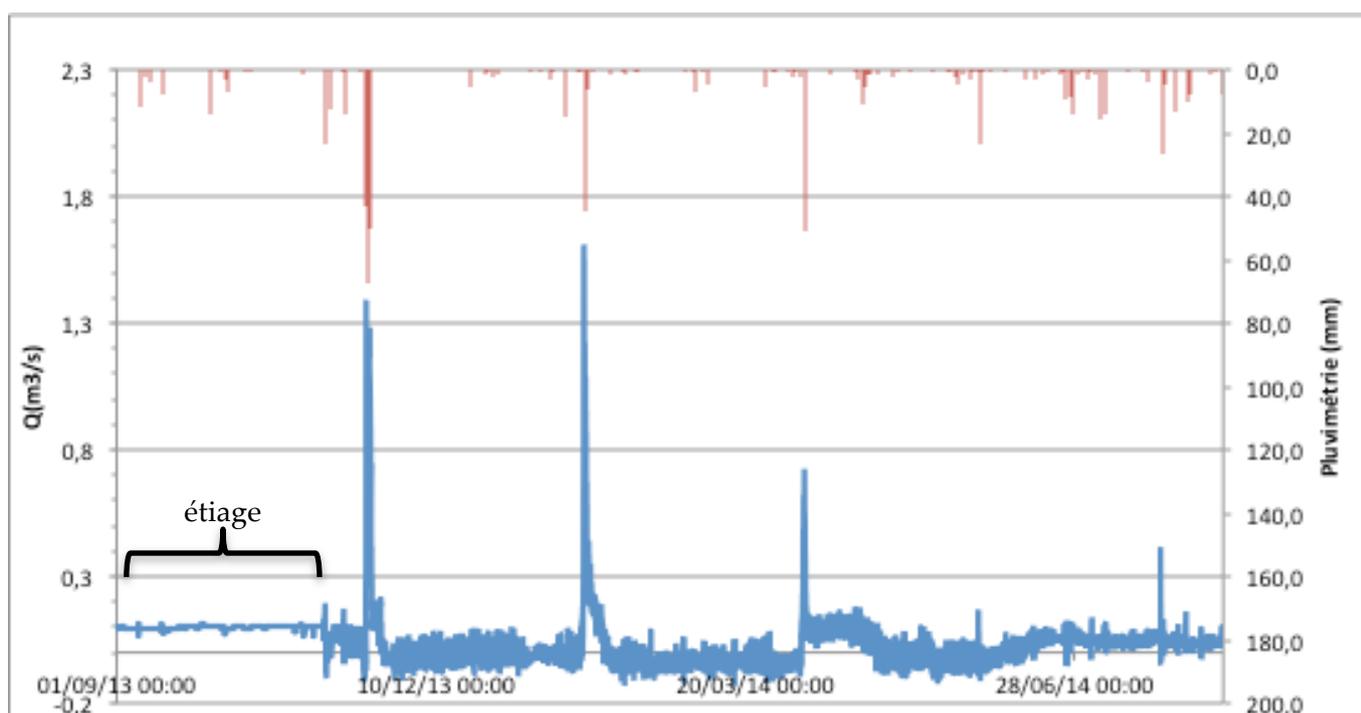


Figure 15. Débit de la perte et pluviométrie

Suite à ces crues, le débit de perte oscille grandement autour d'une valeur proche de zéro. Plusieurs hypothèses émergent de ce constat :

- lorsqu'il y a des précipitations, le karst se sature peu à peu et, l'eau n'est pas capable de s'infiltrer davantage ;
- lorsque le réseau karstique atteint une certaine charge, celui-ci est capable d'alimenter la rivière ;

- les pluies s'écoulant sur le sous-bassin-versant de *Betllans* et alimentant la rivière contrebalancent en partie la perte.

En effectuant le bilan des volumes retrouvés sur chacune des stations par la méthode des rectangles, le résultat montre qu'il s'écoule davantage d'eau à la station de *Millada* qu'à celle de *Betllans* sur la période étudiée (du 28/08/13 au 13/08/14). Le débit moyen de perte est évalué à 48 l/s. Ceci confirmerait bien la présence de périodes pendant lesquelles il n'y a pas de prise d'eau à la limite des deux formations géologiques, voire qu'il y ait une alimentation de la rivière par le réseau karstique. En effet, au regard des chroniques, il existe des périodes où le débit calculé à *Betllans* est supérieur à celui de *Millada*. Cependant, ces périodes n'ont pas d'explications météorologiques car elles sont très longues (mois de février et de mars 2014). Cela résulte certainement des courbes de tarage.

D. Bilan hydrique sur la vallée de Nohèdes

1. Bilan en terme de pluie brute et de pluie nette

Les résultats de l'année précédente (Le Guenanff, 2013) montraient plusieurs faiblesses au niveau du calcul : la lame d'eau brute avait été sous estimée étant donné que le choix avait été fait de prendre la valeur basse de l'isohyète rattaché à une certaine aire. Ainsi, toutes les valeurs de pluies brutes ont été sous estimées de 25 mm (le modèle Aurehly donnait des isohyètes espacés d'une lame d'eau de 50 mm). De plus, la surface du bassin-versant de la vallée de *Torrelles* a été surévaluée. Le canal d'*Urbanya* capte une partie des eaux s'écoulant sur la partie haute du versant. Ainsi, la surface des BV de *Torrelles*, *Millada* et *Betllans* s'est vue réduite après correction cette anomalie. La surface supplémentaire entraînait une surévaluation de la pluie brute de près d'un million de mètre cube, ce qui entraîne logiquement une diminution du coefficient de ruissellement calculé. Les isohyètes des deux situations sont visibles sur les figures 16 et 17. Les résultats sont regroupés dans le tableau 3.

Tableau 3. Pluie brute, pluie nette et coefficient de ruissellement sur les sous-bassins-versants

Station	Pluie brute (m ³)	Pluie nette (m ³)	CR 2013 corrigé	CR 2013 (avec Urbanya)	CR 2012
Clot	5 957 299	6 198 764	1,04	1,04	1,33
Torrelles	5 626 978	3 061 444	0,54	0,45	0,36
Betllans	36 008 699	13 198 104	0,37	0,36	0,35

En altitude, le coefficient de ruissellement (CR) est très grand et sans trop de doute surestimé. Ceci peut s'expliquer par une sous estimation de la pluie brute en altitude. Ce même problème ayant été constaté au niveau du pluviomètre il semblerait que, avec le climat régnant en altitude, cette erreur y soit amplifiée. Toutefois, l'ordre de grandeur du coefficient de ruissellement est toujours le même, l'erreur commise est donc systématique mais, non résolue à ce jour.

Pour ce qui est des stations de *Torrelles* et de *Betllans*, l'effet d'absorption du karst est bien visible à *Betllans*. Cela provoque une diminution du coefficient de ruissellement durant l'année 2013.

Grâce à ces résultats, il paraît clair que l'erreur commise dans l'estimation du coefficient de ruissellement sur le BV de *Torrelles* par l'interception dans le canal d'Urbanya est non négligeable.

2. Calage des isohyètes fictives pour l'année 2013

Dans un premier temps, les aires correspondantes à chacun des types de végétation ont été calculées (tableau 4).

Tableau 4. Évaluation du curve number spécifique à chaque type de sol

Type	Surface (ha)	Curve Number
Lac/Étang	4,83	100
Landes	117,09	60
Pelouses	127,27	72
Forêt	48,29	60
Tourbières	1,49	90
Éboulis	54,04	100
Falaises	30,19	100

Le CN global calculé à partir de ces données est de 73. Une valeur élevée comme celle-ci rend compte d'un fort ruissellement à l'échelle du bassin-versant. Ceci se confirme en calculant la pluie brute (tableau 5).

Tableau 5. Valeur de PB calculée et CR associé

PB (m ³)	PN (m ³)	CN (/)	CR (/)
6 611 655	6 198 764	73	0,94

Lorsque le modèle est appliqué à l'ensemble du bassin-versant pour l'année civile 2013, les coefficients de ruissellement sont les suivants (tableau 6) :

Tableau 6. Coefficient de ruissellement des trois sous-bassins-versants en 2013

Station	Pluie brute (m ³)	Pluie nette (m ³)	CR
Clot	6 611 655	6 198 764	0,94
Torrelles	6 154 408	3 061 444	0,50
Betllans	38 623 963	13 198 104	0,34

Les résultats obtenus sont fortement corrélés avec ceux calculés à partir du modèle Aurehly précédemment. Cela laisse penser que la valeur proche de 1 au *Clot* n'est pas une aberration, c'est simplement le résultat de sols favorables au ruissellement de l'eau. Ces résultats seront à vérifier lorsqu'une nouvelle chronique de mesures sera à disposition.

Avec ce modèle fictif, la pluie annuelle retrouvée au sommet du massif du Madres serait de 1 765 mm au lieu de 1 250 mm présentés sur le modèle Aurehly. Cette valeur est loin d'être aberrante, étant donné que C. Roux estime qu'il pleuvrait environ 1 450 mm à 2 450 m d'altitude. Étant donné que l'année 2013 était particulièrement humide, il est logique de retrouver une lame d'eau plus grande.

Le calcul a été conduit pour l'année 2012 également. Celle-ci est considérée comme sèche, le CN a donc été recalculé, le coefficient vaut dans ce cas 54. La baisse remarquée s'explique par la plus grande faculté du sol à se laisser infiltrer par l'eau, celui-ci étant plus sec. Les coefficients de ruissellements sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7. PB et CR pour l'année 2012

Station	Pluie brute (m ³)	Pluie nette (m ³)	CR
Clot	4 673 867	3 798 896	0,81
Torrelles	3 870 977	1 119 294	0,29
Betllans	23 545 669	6 238 498	0,26

Il existe une forte influence de la condition d'humidité initiale. Lorsque l'année est sèche, les coefficients de ruissellement diminuent ce qui signifie qu'il y a moins de ruissellement des eaux. L'écart entre les BV de *Betllans* et de *Torrelles* est moins significatif.

En comparant les résultats obtenus par vérification du bilan hydrique avec ceux calculés à l'aide des isohyètes fictifs, les ordres de grandeurs sont les mêmes pour l'année 2013. Pour 2012, il paraît important de noter que la valeur retrouvée au *Clot* est supérieure à celle calculée en 2013 par vérification du bilan. Cela n'est pas cohérent étant donné que sur un sol sec, l'eau peut s'infiltrer davantage que sur un sol humide. Cette erreur n'apparaît plus sur le modèle fictif.

Cependant, les résultats obtenus avec cette méthode sont très théoriques et découlent d'une estimation des CN sur des milieux non décrits par Van Te Chow. Ainsi, malgré leur cohérence entre-eux, il se peut que leur estimation soit erronée.

Représentation des courbes isohyètes sur le bassin versant entier de la rivière de Nohèdes

Aménagements hydrauliques

● Stations hydrométriques

Éléments hydrogéologiques

● Pluviomètre de Nohèdes

— Limite des BV propres à chaque station hydrométrique

■ Courbes isohyètes avec lame d'eau précipitée interannuelle en mm

Sources : Scan25 ©, © IGN 2006, Réserve Naturelle de Nohèdes -
Réalisation : Aurore CHAUBET

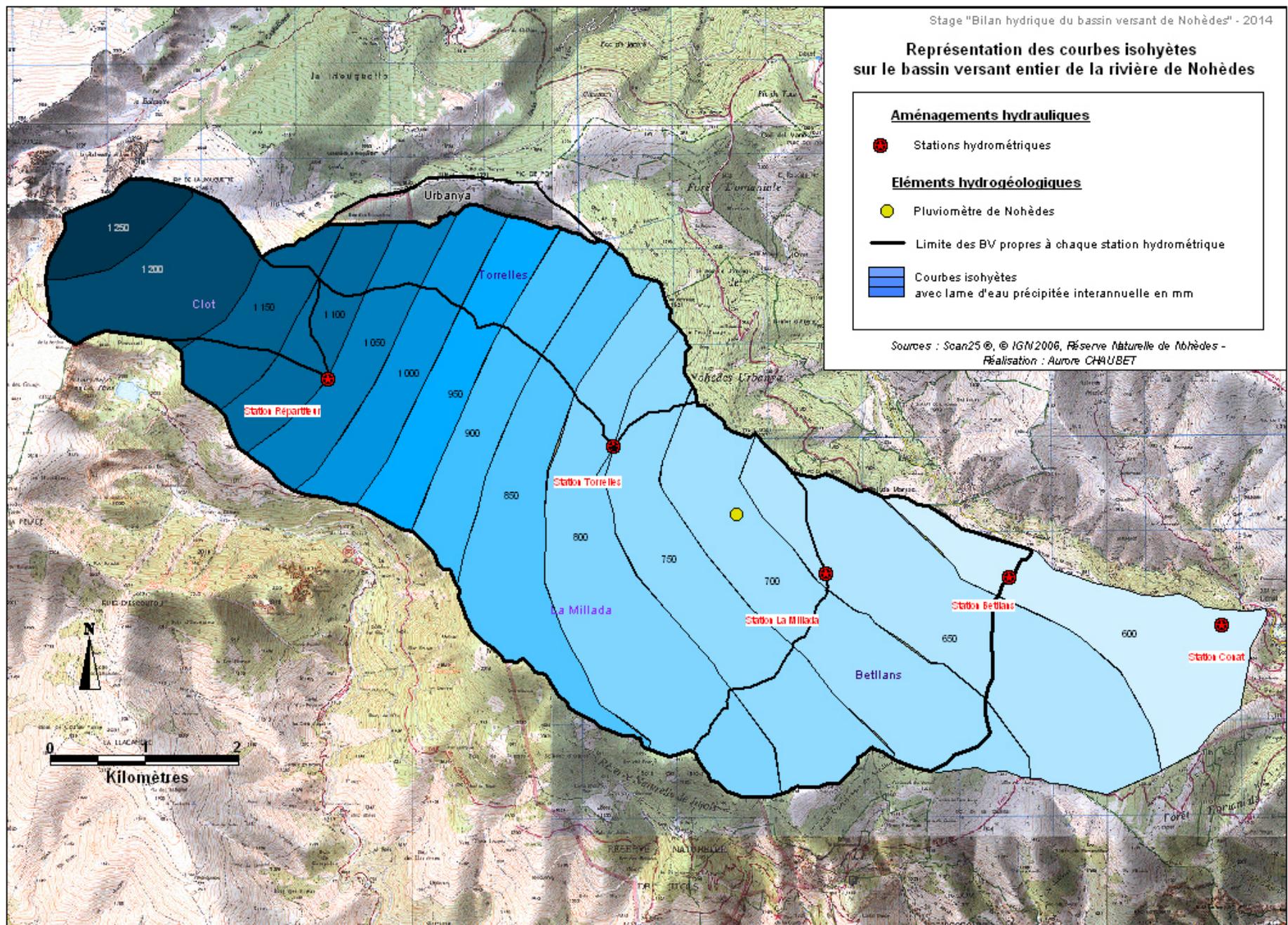


Figure 16. Courbes isohyètes de la vallée de Conat et de Nohèdes

**Représentation des courbes isohyètes
sur le bassin versant entier de la rivière de Nohèdes**

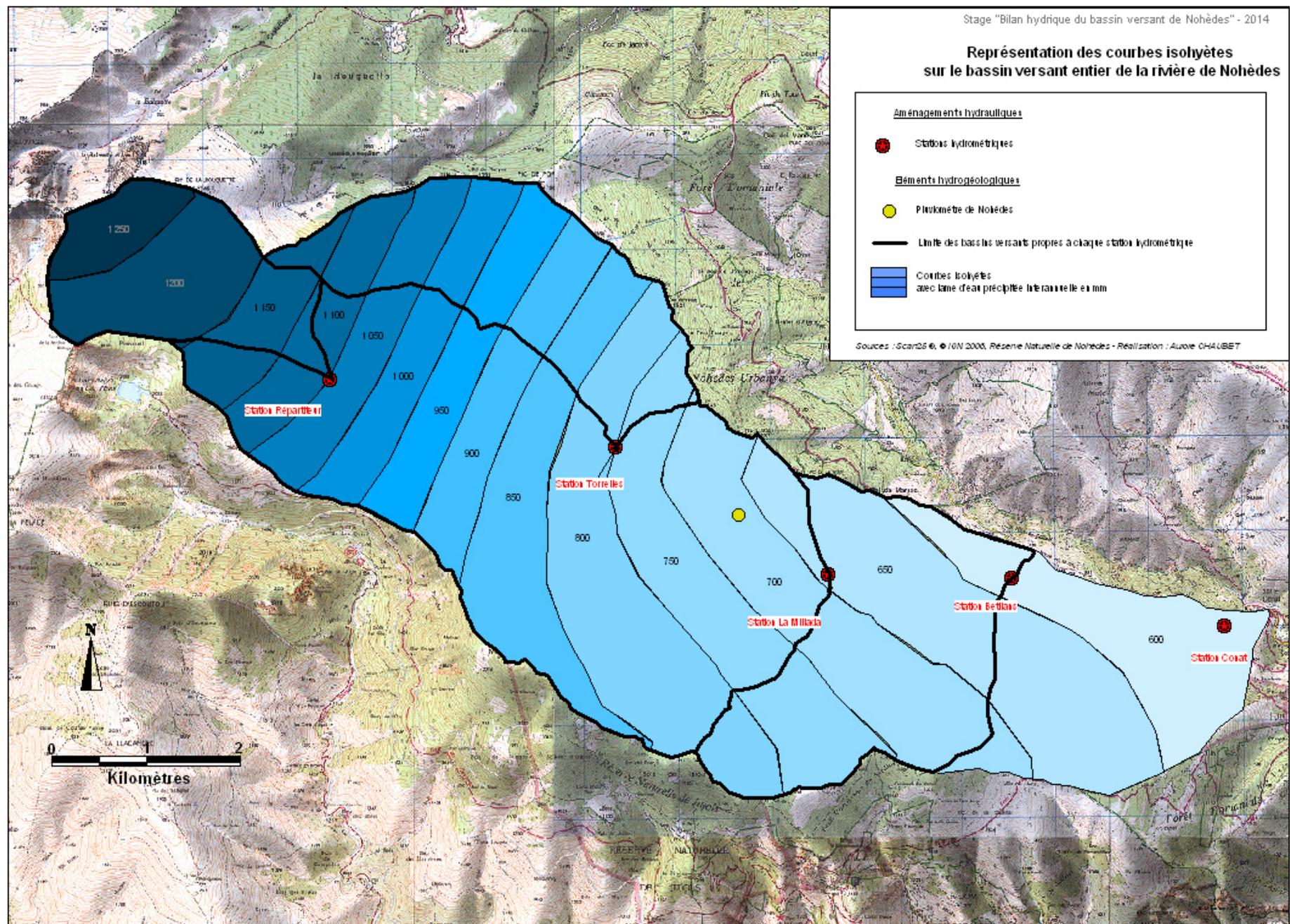


Figure 17. Courbes isohyètes sur les réserves de Nohèdes et de Conat (avec le canal d'Urbanya)

3. Rôle du karst dans le bilan hydrique

- Analyse des résultats

Les calculs d'ETP et d'ETR interannuelles à l'échelle des sous-bassins-versants avaient été effectués par M. Le Guenanff lors du précédent stage. Les surfaces des sBV ayant été modifiées par l'élimination de la zone drainée par le canal d'Urbanya et le calage de l'image raster ayant été réajusté, ETP et ETR ont été mise à jour comme présenté dans le tableau 8.

Tableau 8. ETP et ETR des quatre sous-bassin-versant

	Clot		Torrelles		Millada		Betllans	
	ETP	ETR	ETP	ETR	ETP	ETR	ETP	ETR
Avec Urbanya	1 594 770	1 380 494	2 834 709	2 434 322	13 452 056	11 570 672	15 847 548	13 657 129
Sans Urbanya	1 594 122	1 367 618	2 432 443	2 058 216	12 647 185	10 723 463	17 073 243	14 481 774

Le simple réajustement de l'image raster des isohyètes provoque des modifications dans ces calculs étant donné que les résultats obtenus au *Clot* sont modifiés. À *Betllans* l'évapotranspiration augmente, ceci s'explique par une sous-évaluation globale des surfaces dans le précédent calcul.

Le tableau 9 rassemble les données d'évapotranspiration et de pluies brutes calculées sur les zones perméables du massif du Madres-Coronat. Les calculs ont été étendus au delà des frontières des réserves naturelles en considérant que toutes les pluies s'abattant sur le massif karstique avaient un exutoire commun au niveau de la Têt entre Ria et Villefranche-de-Conflent (annexe 7).

Les calculs d'infiltration dans le karst ont été établis en faisant simplement la différence entre la pluie brute calculée et l'évapotranspiration réelle. Est sous-entendue l'hypothèse que toute l'eau précipitant sur les zones calcaires rejoint le réseau karstique, il n'y a pas d'écoulement de surface jusqu'à la rivière. Cette hypothèse est mise en défaut uniquement en cas de très fortes précipitations.

Tableau 9. ETP, ETR et PB des zones perméables

sBV	ETP (m ³)	ETR (m ³)	PB (m ³)	Infiltration karst (m ³)
Coronat	9 456 851	7 309 731	13 058 588	5 748 857
Millada	2 504 672	1 977 417	4 134 177	2 156 760
Betllans	2 637 711	2 000 779	3 425 425	1 424 646

Le volume total d'eau précipité sur les zones perméables s'élève à 20 600 000 m³ par an. Le volume d'eau réellement évapotranspiré est d'environ 11 200 000 m³. C'est ainsi près de 45 % de l'eau qui servirait à l'alimentation du réseau karstique.

En considérant une consommation domestique quotidienne de 200 l/personne, la capacité théorique de renouvellement de cette nappe approcherait les 130 000 habitants. Cela représente donc un enjeu économique de taille.

- Vérification du calcul : bilan hydrique sur le sBV de *Betllans*

Afin de vérifier le résultat obtenu ci-dessus, il paraît judicieux de réaliser le bilan hydrique du BV de *Betllans*. Si les données de pluies nettes avaient été disponibles sur le BV de *Millada*, il aurait également fallu entreprendre ce travail.

Tableau 10. Bilan hydrique du sBV de *Betllans*

	Interannuel			année hydro 2013 (ramenée à une moyenne interannuelle)
	PB	ETP	ETR	PN
BV total	27 535 006	17 073 243	14 481 774	11 890 184
Perméable	3 425 425	2 637 711	2 000 779	

Le tableau 10 reprend les valeurs moyennes interannuelles d'ETP, ETR et PB ainsi que la valeur de pluie nette de l'année hydrologique 2012-2013 ramenée à une valeur interannuelle (les chroniques de hauteurs d'eau étant trop courtes, il est impossible de réaliser des moyennes interannuelles). Le même coefficient correctif que celui utilisé dans le calcul de la pluie brute à partir des isohyètes est utilisé. Ceci est une source de grande imprécision : il y a le cumul de l'erreur de la courbe de tarage en hautes-eaux et de l'approximation du coefficient correctif des pluies nettes à celui des pluies brutes.

La différence entre la PB et la PN est de 15 644 822 m³. Ceci correspond aux pertes globales sur le bassin versant. Une fois l'évapotranspiration prise en compte, il reste un volume de 1 163 049 m³ (soit une infiltration annuelle de 37 l/s) qui correspondrait au volume infiltré dans le karst à l'échelle du BV. Cette valeur est très proche du débit de perte moyen calculé plus haut grâce aux chroniques de pluies nettes issues des stations de suivi limnimétrique.

La somme des pertes supposées des zones perméables présentes sur les sBV de *Millada* et de *Betllans* est de 3 581 406 m³. Ce volume et celui calculé au-dessus sont dans un ordre de grandeur assez similaire mais il est impossible de conclure quant à la validité de ces résultats très théoriques. Cependant, ils semblent tout à fait logiques en considérant que le karst peut aussi venir se vidanger dans le cours d'eau, notamment au niveau de la perte en cas de fortes précipitations. Ainsi, ce volume d'apport aurait tendance à faire augmenter le volume de pluie nette et, ainsi, minimiser les volumes absorbés par le karst.

E. Synthèse des résultats : les axes de la collaboration avec le SMBVT

Le travail ainsi réalisé par les réserves naturelles de Conat et de Nohèdes nécessite des moyens, tant humains que financiers, pour être perpétué. Dans cette optique, le développement de partenariats avec des acteurs locaux de l'eau comme le SMBVT est indispensable. Ceci permet à la fois de faire gagner en visibilité le projet et aussi de mobiliser des moyens pour une protection de la zone voire une exploitation de la ressource. En protégeant cette ressource, les réserves du mont Coronat renforcent leur image et affirment à toute leur utilité.

Afin d'établir avec le syndicat mixte du bassin-versant de la Têt les axes d'une collaboration à long terme avec les réserves naturelles de Conat et de Nohèdes, un rapport reprenant les éléments connus à ce jour autour du massif du Madres-Coronat a été rédigé.

1. Le rapport : « Le réseau karstique du massif du Coronat »

Beaucoup de connaissances concernant la géologie et l'hydrologie du mont Coronat ont été accumulées au fur et à mesure d'études menées sur le secteur. Ainsi, afin de présenter au SMBVT l'avancement concret de l'état des connaissances, un rapport synthétique a été rédigé.

L'axe majeur de rédaction du rapport était l'étude de la possibilité d'extraction des eaux karstiques en vue d'une exploitation pour l'alimentation en eau potable du bassin démographique de Prades. Il s'agissait également d'identifier les zones de vulnérabilité du réseau karstique afin de protéger la ressource.

Pour ce faire, les travaux réalisés par le BRGM portant sur l'étude du réseau karstique des Corbières (Dörfliger N., 2004), mais aussi sur des documents plus généraux détaillant davantage les méthodologies à mettre en œuvre (Bakalowicz M., 1999 ; Dörfliger N., 2009, 2010) ont été utilisés comme support.

Ainsi, figurent dans le rapport une présentation générale d'un massif karstique avec notamment ses caractéristiques et son fonctionnement mais aussi la démarche générale d'étude d'un karst en quatre phases : identification, caractérisation, démonstration et protection de la ressource. En outre figure l'inventaire des connaissances en ce qui concerne la géologie et l'hydrologie de la zone d'étude. Pour finir, sont présentées les perspectives d'études à mener pour arriver aux objectifs annoncés plus haut.

Les suites les plus importantes à mener semblent être :

- déterminer le débit en circulation en étiage dans la rivière souterraine d'*En Gornier* ;
- déterminer le point de résurgence des eaux circulant dans la rivière souterraine d'*En Gornier* à l'aide de fluorescéine ou par un suivi du TAC entre Villefranche-de-Conflent et Prades ;

- identifier la provenance des eaux qui surgissent à Ria par analyse de la signature isotopique ;
- vérifier la présence de la perte entre *Millada* et *Betllans* par traçage artificiel : suivi de la pollution azotée et phosphorée ;
- préciser la géologie du massif par la réalisation de coupes géologiques du synclinal de Villefranche.

Les zones les plus vulnérables sont les suivantes :

- formations calcaires affleurant sur le massif du mont Coronat sur lesquelles le pastoralisme est particulièrement développé ;
- rivière de Nohèdes qui subit des pressions multiples : pastoralisme en altitude, rejet anthropiques diffus des villages, rejet de la microcentrale hydroélectrique pouvant altérer la qualité des eaux ;
- captage pour l'alimentation en eau potable du village de Ria sujet à des pollutions anthropiques accidentelles.

2. Les axes de la collaboration avec le SMBVT

Suite à la réunion organisée avec le directeur du SMBVT le 14 août 2014, plusieurs axes de travail ont pu être mis en évidence :

- organisation d'une réunion avec le Sivom du Conflent, acteur principal de la gestion des eaux du bassin démographique de Prades ;
- récupération des données EDF de la station de suivi météorologique de Nohèdes ;
- réalisation de jaugeages sur le *Callan* à l'aide d'un courantomètre mis à disposition par le SMBVT ;
- aide technique à l'acquisition d'un conductimètre pour la réalisation de jaugeages au sel.

Conclusion

Cette étude hydrologique de la vallée du *Callan* a permis d'étoffer le bilan hydrique de la zone à partir des données à disposition : limnigrammes, chroniques de pluies et isohyètes.

Dans un premier temps, l'analyse des hydrogrammes sur chacun des sous-bassins-versants a permis de mettre en évidence la réponse spécifique de ces derniers à des précipitations liquides ou solides. L'évaluation des débits de crue et d'étiage a été réalisée par lecture directe sur les hydrogrammes. La pluie nette a été estimée en s'appuyant sur les courbes de tarage réalisées lors de précédents stages. La présence d'une perte entre les stations de *Millada* et de *Betllans* a été confirmée. Lors de faible étiage, son débit est de l'ordre d'une centaine de litres par seconde. Il est cependant difficile d'expliquer avec précision le mode de fonctionnement de celle-ci lorsque des précipitations apparaissent. Sans doute, cette perte se transforme en fuite lorsque le système karstique monte en charge.

Ensuite, le bilan hydrique sur chaque sous-bassin-versant a été réalisé afin d'estimer les coefficients de ruissellement mais aussi, pour vérifier la présence de cette perte par un autre mode de calcul. En considérant l'ensemble du BV de *Betllans*, le coefficient de ruissellement est de 0,37. Il est de 0,54 dans le BV de *Torrelles* et proche de 1 au *Clot*, BV le plus en altitude. Le BV de *Betllans* possède une large zone calcaire sur laquelle l'eau s'infiltrerait directement ; ceci explique le faible coefficient retrouvé. En altitude, le fort coefficient trouvé a conduit à un changement de raisonnement pour établir une correction du modèle de Météo France par une interpolation entre trois points (dont un fictif, issu de calculs théoriques). De cette manière, l'ordre de grandeur des coefficients de ruissellement est le même que ceux issues des données réelles. Ce travail a permis de valider les résultats obtenus par l'analyse des chroniques réelles.

Ensuite, la réalisation du bilan hydrique sur le massif du mont Coronat a donné une estimation de la quantité d'eau disponible pour une potentielle alimentation en eau potable du bassin démographique de Prades. La ressource est de l'ordre de 130 000 habitants desservables avec une consommation quotidienne de deux cents litres. De ce calcul a émergé une réflexion sur les actions à mener pour évaluer précisément la ressource ainsi que pour caractériser au mieux le réseau karstique dans le but de le protéger.

Ainsi, de nombreux travaux restent à faire concernant principalement la géologie pour comprendre le fonctionnement général du réseau karstique du mont Coronat. Des études plus précises sur la contribution ou non de la rivière d'Évol doivent être également réalisées afin de délimiter le BV d'alimentation du karst. Enfin, reste à évaluer le rôle de la faille de Mérens qui recoupe le *Callan* entre les stations de *Betllans* et de *Conat*.

Perspectives

Le présent travail a permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de la région considérée, mais ne constitue pas un aboutissement. Certains aspects méritent d'être affinés, voire validés, d'autres n'ont pas été abordés et restent à explorer :

Courbes de tarage

Les courbes de tarage se doivent d'être vérifiées sans cesse car elles peuvent être modifiées suite à un changement du profil en travers de la rivière à proximité de la station de suivi limnimétrique. Une attention particulière devra être portée à la station de Conat qui ne présente que peu de points de mesure, et ceci sur une amplitude de marnage très faible. Le travail présenté dans le tableau 11 est donc à faire.

Tableau 11. Jaugeages à réaliser

	Clot	Torrelles	Millada	Betllans	Conat
Compléter en basses-eaux	★	★★	★	★	★★★
Compléter en hautes-eaux	★	★★	★★★	★★★	★★★
Vérifier	★	★★	★	★	★★

Légende : ★★★ : ordre de priorité

★ : jaugeage au sel

★ : jaugeage au sel ou courantomètre

★ : jaugeage au moulinet

Les sondes devront aussi être vérifiées, en particulier les baisses de tensions sur les piles pour limiter au maximum le risque d'absence de données de débits.

Le moulinet devra être vérifié en faisant le même jour un jaugeage au sel et un jaugeage au moulinet.

Géologie

* Réseau karstique du mont Coronat

Afin de caractériser le réseau karstique du mont Coronat et de comprendre son fonctionnement, des études approfondies de la géologie doivent être menées, dont notamment :

- localiser l'exutoire de la résurgence de Ria ;
- valider la connexion de la perte entre *Millada* et *Betllans* avec la rivière souterraine de la grotte d'*En Gorner* par traçage artificiel des matières azotées et phosphorées, et ainsi établir la vulnérabilité réelle de la ressource ;
- réaliser des coupes géologiques précises en amont et en aval du village de Nohèdes pour délimiter le bassin versant d'alimentation de la résurgence de Ria ;
- réaliser des mesures de débit dans la rivière souterraine de la grotte d'*En Gorner*.

* Faille de Mérens

Pour ce qui est du rôle de la faille de Mérens, il faudra interpréter les chroniques de débits entre *Betllans* et Conat afin de déterminer la présence éventuelle d'une perte ou d'une fuite. Cependant, en l'état actuel de la courbe de tarage de Conat, ce travail serait bien trop imprécis. Il est donc nécessaire de compléter ces courbes avant d'envisager l'analyse des hydrogrammes.

De plus, il pourrait être intéressant de réaliser une campagne de mesure de conductivité entre les stations de *Millada* et de Conat en hautes-eaux afin de détecter la présence éventuelle d'une fuite, mais aussi de faire un inventaire (et une quantification) des rejets ponctuels dans le cours d'eau.

Climatologie

Elle est relativement complexe au sein du domaine d'étude. Cette complexité mène à certaines approximations dans les calculs réalisés jusque là. Les solutions présentées ci-après permettraient de corriger quelques imprécisions :

- recalculer les pluies brutes selon le modèle Aurehly mis à jour (1981-2010) ;
- recalculer un modèle en recherchant auprès de Météo France davantage de stations de suivi météorologique dans la zone d'étude possédant des données annuelles de précipitation pour gagner en précision dans l'interpolation ou installer une station de suivi météorologique en altitude afin de connaître avec précisions les précipitations réelles ;
- demander l'accès aux données de la station météorologique EDF de Nohèdes pour comparer avec les mesures effectuées au pluviomètre de la réserve et, à plus long terme si les chroniques présentent peu de différences, éviter au personnel de la réserve le relevé quotidien ;
- réaliser un suivi de températures par classe d'altitude sur le versant exposé nord et celui exposé sud afin de gagner en précision sur les calculs d'ETP et d'ETR en installant un réseau de sondes de température selon un transect à déterminer ;
- installer une station de suivi météorologique en altitude.

Travail à réaliser à court terme : stage 2015

Plusieurs missions sont à mener prioritairement pour continuer la contribution à l'établissement du bilan hydrique de la vallée :

- réaliser le traçage à la fluorescéine à partir de la grotte d'*En Gornier* pour localiser, s'il existe, le point de résurgence des eaux dans la Têt. Pour cela, il faudra répartir judicieusement des fluocapteurs de long du fleuve ;
- faire des jaugeages en basses-eaux dans la rivière souterraine afin d'évaluer le débit de base en circulation ;
- compléter les courbes de tarage en hautes-eaux et en basses-eaux des stations de suivi limnimétriques existantes à l'aide de méthodes complémentaires au moulinet : jaugeage au sel, courantomètre ;

- évaluer le rôle de la faille de Mérens en étudiant les hydrogrammes entre les stations de *Betllans* et de Conat ;
- Vérifier l'existence d'une connexion entre le sBV de la haute-vallée d'Évol et le réseau karstique du mont Coronat en réalisant une série de jaugeages sur la zone calcaire de la rivière d'Évol pour identifier d'éventuelles pertes et fuites ainsi que réaliser le profil de conductivité ;
- définir la cartographie des zones de vulnérabilité du massif karstique en se basant sur la méthode Paprika.

Bilan personnel

Au cours de ce stage, j'ai pu agir en autonomie afin de partitionner mon temps, d'orienter mon travail en priorisant des tâches. Ainsi, j'ai découvert la complexité que représente l'étude du fonctionnement d'un bassin-versant du fait de sa pluridisciplinarité. J'ai pris en mains de nouveaux logiciels comme Hydras3 et HydrAccess qui m'ont permis de récupérer et de travailler les données relevées par les sondes OTT. En parallèle, j'ai pu participer à d'autres activités de la réserve de Nohèdes comme les suivis scientifiques ou la sensibilisation du public.

J'ai amené aux réserves un regard neuf sur le projet ayant permis la correction de petites erreurs commises précédemment. Le rapport rédigé sur le massif karstique leur servira de base dans la communication auprès de divers acteurs de l'eau impliqués dans le projet d'exploitation ou de protection de la ressource.

Une liste succincte des tâches que j'ai pu effectuer au cours de ce stage est présentée dans le tableau 12 ci-après :

Tableau 12. Liste des tâches

	Liste des tâches
Semaine 1	<ul style="list-style-type: none">- prise en main des logiciels Hydras3 et HydrAccess- relevé des sondes- jaugeages (Betllans, Millada, Torrelles)
Semaine 2	<ul style="list-style-type: none">- tracé des hydrogrammes- exploitation des résultats- contact Météo France, stations skis (lames d'eau), SMBVT (partenariat)
Semaine 3	<ul style="list-style-type: none">- pose échelle limnimétrique station Conat- jaugeage Conat- prise en main MapInfo (estimation des lames d'eau brutes sur Nohèdes)
Semaine 4	<ul style="list-style-type: none">- démonter sonde défectueuse Clot- jaugeage Conat- isohyètes Madres
Semaine 5	<ul style="list-style-type: none">- calcul ETP/ETR zones perméables Madres
Semaine 6	<ul style="list-style-type: none">- jaugeage Conat et préparation de la station de suivi- calcul de pluie brute avec modèle Aurehly mis à jour- rédaction d'une note d'information
Semaine 7	<ul style="list-style-type: none">- recherches bibliographiques sur le karst- rédaction du rapport sur le massif karstique

Semaine 8	<ul style="list-style-type: none"> - rédaction du rapport sur le massif karstique - jaugeages Conat, Clot et Betllans
Semaine 9	<ul style="list-style-type: none"> - réalisation de cartes sur MapInfo - recherches sur le modèle SIM Météo France - rédaction des rapports
Semaine 10	<ul style="list-style-type: none"> - rédaction rapports - jaugeage Conat - contact avec Météo France
Semaine 11	<ul style="list-style-type: none"> - rédaction rapport - calcul de l'isohyète fictif - rencontre avec le SMBVT - relevé des sondes
Semaine 12	<ul style="list-style-type: none"> - installation et paramétrage de la station de suivi limnimétrique - reprise des courbes de tarage sous HydrAccess - rédaction du rapport

Bibliographie

- Glossaire :

<http://hydrologie.org/glu/indexdic.htm>

- Présentation du contexte de l'étude

Breil, Moubayed, J. — 2004 — Bassins versants des rivières Nohèdes et Torreilles : Étude des incidences écologiques notamment sur les ressources trophiques de *Galemys pyrenaicus*, espèce de l'annexe II de la DHFF, la diversité spécifique et la distribution des invertébrés aquatiques suite au débroussaillage de la ripisylve. 97 p. et annexes

Calvet, M., Delmas, M. — 2012 — Itinéraires géomorphologiques dans la réserve naturelle de Nohèdes. Nohèdes : FRNC, AGRNN Médi-Terra, 68 p.

Ducroix, P. — 2009 — Caractérisation des échanges hydriques entre le karst du Mont Coronat et la rivière de Nohèdes. Montpellier. École polytechnique universitaire de Montpellier, département sciences et technologies de l'eau. 33 p. et annexes.

Guitard, G., et al. — 1998 — Carte géologique de la France. Prades. Orléans: B.R.G.M., 198 p.

Laumonier, B. — 1997 — La chaîne hercynienne de l'Est des Pyrénées : le massif du Canigou. École des Mines. Nancy. 76 p. et cartes.

Laumonier, B. — 2004 — Pliegues y cabalgamiento hercínico precoces en los Pirineos orientales: el ejemplo del sinclinal de Villefranche. Spanish Geological Congress. Zaragoza, Espagne, 12-15 juillet 2004. Poster

Le Guenanff, M. — 2013 — Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de Nohèdes. Montpellier. École polytechnique universitaire de Montpellier, département sciences et technologies de l'eau. 52 p.

Mangeot, A. et al. — 2011 — Plan de gestion 2012-2016. Nohèdes. AGRNN. 218 p.

Moubayed, J. — 1998 — Qualité globale de la vallée fluviale et mise en valeur écologique et biogéographique. Nohèdes. AGRNN. 49 p. + annexes

Raymaekers, B. — 2005 — Mémoire : *La cova de les Encantades* à Nohèdes. 40 p. et annexes

Roux, C., Barbero, M. — 2010 — "*Lecanora nohedensis* Cl. Roux et M. Barbero sp. nov., espèce nouvelle de lichen", Bull. Soc. Linn. Provence n°61, 11 p.

USDA-SCS — 1985 — National Engineering Handbook, Section 4 - Hydrology. Washington D.C, USDA-SCS

Servière, M. — 2010 — Fonctionnement du réseau hydrique de Nohèdes : élaboration d'un protocole de suivi hydrologique de la rivière de Nohèdes. Montpellier. École polytechnique universitaire de Montpellier, département sciences et technologies de l'eau. 88 p.

Vigneau, J.-P. — 1986 — Climat et climats des Pyrénées-Orientales, JPV éditeur, 594 p.

- Matériel et méthodes :

Banque HYDRO — 1998 — Charte qualité de l'hydrométrie – codes de bonnes pratiques. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. 49 p.

General Oceanics - General Oceanics digital flowmeter, mechanical & electronic operator manual. General Oceanics INC. 17 p.

OTT, Manuel d'utilisation — version 04-0206 — Enregistreur pour eaux souterraines OTT Orpheus Mini, OTT, 64 p.

http://zonums.com/online/hydrology/curve_number (consulté le 12/08/14)

- Rédaction du rapport sur le karst

Bakalowicz M. — 1999 — Guide technique n°3 : connaissance et gestion de la ressource en eaux souterraines dans les régions karstiques. 44 p.

Dörfliger N., Ladouche B., Le Strat P., et al. — 2004 — Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales - Rapport final de la phase I du projet « Évaluation des ressources en eau des Corbières ». Volume 1 - Moyens mis en œuvre et méthodologie de caractérisation. BRGM/RP-52918-FR. 107 p., 85 ill., 2 Ann.

Dörfliger N., Plagnes V. — 2009 — Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Avec la collaboration de K. Kavouri et J. Gouin. BRGM RP- 57527-FR. 105 p., 55 ill., 4 ann.

Dörfliger N. — 2010 — Guide méthodologique, Les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de Ph. Crochet, R. Guerin, N. Jozja, B. Marsaud, P-H. Mondain, Ph. Muet, V. Plagnes. BRGM RP- 58237-FR. 246 p., 82 ill., 5 ann.

Salvayre, H. — 2010 — Le livre des eaux souterraines des Pyrénées catalanes. Éd. Trabucaire. 240 p.

Liste des abréviations

AGRNN : association gestionnaire de la réserve naturelle de Nohèdes

BV : bassin-versant

CG66 : conseil général des Pyrénées-Orientales

ETP : évapotranspiration potentielle

ETR : évapotranspiration réelle

FRNC : fédération des réserves naturelles Catalanes

PB : pluie brute

PN : pluie nette

sBV : sous-bassin-versant

SCS : soil conservation service

SMBVT : syndicat mixte du bassin-versant de la Têt

Table des figures

FIGURE 1. CARTE DES RÉSERVES NATURELLES ADHÉRENTES À LA FRNC	8
FIGURE 2. LOCALISATION DU SITE D'ÉTUDE	10
FIGURE 3. COUPE GÉOLOGIQUE DU MASSIF KARSTIQUE AU DROIT DU VILLAGE DE NOHÈDES (LAUMONIER, 1997)	11
FIGURE 4. GÉOLOGIE DE LA ZONE D'ÉTUDE	14
FIGURE 5. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE	15
FIGURE 6. SCHÉMA D'UN JAUGEAGE	19
FIGURE 7. COURBES ISOHYÈTES SELON LE MODELE AUREHLY	23
FIGURE 8. LIMNIGRAMMES DES QUATRE STATIONS DE SUIVI.....	27
FIGURE 9. PROFIL EN TRAVERS.....	28
FIGURE 10. COURBE DE TARAGE	28
FIGURE 11. ALTERNANCE JOUR/NUIT DE LA FONTE DES NEIGES	30
FIGURE 12. HYDROGRAMME À MILLADA DURANT L'ARRÊT DE LA MICROCENTRALE	31
FIGURE 13. HYDROGRAMME À MILLADA LORS DU FONCTIONNEMENT DE LA MICROCENTRALE	31
FIGURE 14. COMPARAISON DES DÉBITS ENTRE MILLADA ET BETLLANS (FONCTIONNEMENT DISCONTINU DE LA MICROCENTRALE).....	32
FIGURE 15. DÉBIT DE LA PERTE ET PLUVIOMÉTRIE	33
FIGURE 16. COURBES ISOHYÈTES DE LA VALLÉE DE CONAT ET DE NOHÈDES.....	37
FIGURE 17. COURBES ISOHYÈTES SUR LES RÉSERVES DE NOHÈDES ET DE CONAT (AVEC LE CANAL D'URBANYA).....	38

Table des tableaux

TABLEAU 1. MOYENNES INTERANNUELLES DES PRÉCIPITATIONS	13
TABLEAU 2. MOYENNE INTERANNUELLE DES TEMPÉRATURES A NOHEDES	13
TABLEAU 3. PLUIE BRUTE, PLUIE NETTE ET COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT SUR LES SOUS-BASSINS-VERSANTS.....	34
TABLEAU 4. ÉVALUATION DU <i>CURVE NUMBER</i> SPÉCIFIQUE À CHAQUE TYPE DE SOL	35
TABLEAU 5. VALEUR DE PB CALCULÉE ET CR ASSOCIÉ.....	35
TABLEAU 6. COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT DES TROIS SOUS-BASSINS-VERSANTS EN 2013	35
TABLEAU 7. PB ET CR POUR L'ANNÉE 2012.....	36
TABLEAU 8. ETP ET ETR DES QUATRE SOUS-BASSINS-VERSANTS.....	39
TABLEAU 9. ETP, ETR ET PB DES ZONES PERMÉABLES.....	39
TABLEAU 10. BILAN HYDRIQUE DU SBV DE BETLLANS.....	40
TABLEAU 11. JAUGEAGES À RÉALISER	44
TABLEAU 12. LISTE DES TÂCHES.....	47

Table des équations

ÉQUATION 1. FORMULE DE L'HYDROSTATIQUE	18
ÉQUATION 2. INTERPOLATION POTENTIELLE.....	21
ÉQUATION 3. INTERPOLATION DE MANNING-STRICKLER.....	21
ÉQUATION 4. CALCUL DU VOLUME DE PLUIE BRUTE INTERANNUEL	23
ÉQUATION 5. CALCUL DU VOLUME DE PLUIE NETTE ANNUEL	24
ÉQUATION 6. ETP PAR LA FORMULE DE THORNTHWAITE.....	24
ÉQUATION 7. ETR SELON LA FORMULE DE TURC.....	25
ÉQUATION 8. LAME D'EAU BRUTE	25
ÉQUATION 9. <i>CURVE NUMBER</i>	26
ÉQUATION 10. PLUIE NETTE À L'EXUTOIRE	26
ÉQUATION 11. CALAGE DU <i>CURVE NUMBER</i> EN CONDITION SÈCHE ET HUMIDE	26

Glossaire

Courbe de tarage : courbe décrivant la relation expérimentale entre les hauteurs d'eau et les débits correspondants d'un cours d'eau ou d'un canal, établie à partir de mesures de vitesses à travers une section de référence.

Fuite : lieu où un réseau souterrain alimente un cours d'eau de surface.

Hydrogramme : expression des débits en fonction du temps, se rapportant à une station donnée et au cours d'une période déterminée.

Jaugeage : ensemble des opérations, des mesures et des calculs destinés à déterminer le débit d'un cours d'eau, d'un canal, d'une conduite, d'une source en un point donné.

Karst : région de calcaires et dolomites ayant une topographie souterraine particulière due à la dissolution de certaines parties du sous-sol (karstification) et au cheminement des eaux dans les galeries naturelles ainsi formées.

Karstification : processus particulier d'érosion commandé par la dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies). L'eau de pluie s'infiltré dans le sol où elle acquiert de l'acidité nécessaire à la mise en solution de la roche en se chargeant en CO₂.

Limnigramme : représentation de la variation des hauteurs d'un cours d'eau (ou du niveau d'un lac ou d'une retenue) en fonction du temps.

Pertes : lieu où un cours d'eau de surface, permanent ou temporaire, disparaît naturellement, en totalité ou partiellement, dans le sous-sol.

Section de contrôle : singularité modifiant le régime d'écoulement : le débit ne dépend que de la hauteur d'eau en amont de la section de contrôle. Toute modification du débit à l'aval sera sans influence sur l'amont.

Vulnérabilité : terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités anthropiques. C'est une propriété générale, non mesurable et sans dimension.

Annexes

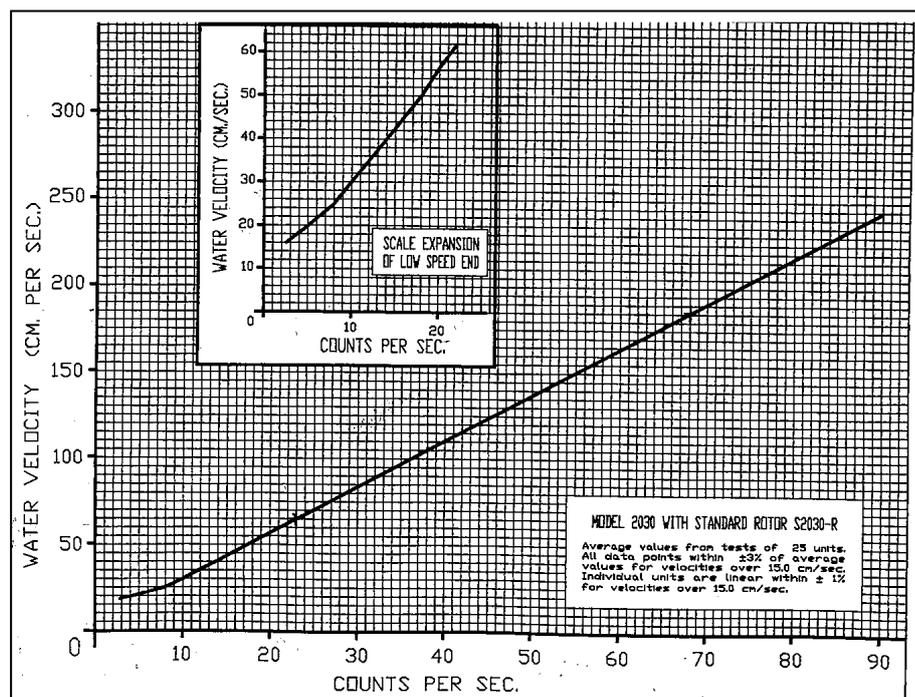
ANNEXE 1. CARACTÉRISTIQUES DU MOULINET : COEFFICIENTS ET COURBE D'ÉTALONNAGE.....	I
ANNEXE 2. PLAN DE MONTAGE DE LA STRUCTURE DE SUPPORT DE LA SONDE ET DE L'ÉCHELLE LIMNIMÉTRIQUE	II
ANNEXE 3. HYDROGRAMMES DU 1/09/13 AU 30/11/13	III
ANNEXE 4. HYDROGRAMMES DU 1/12/13 AU 28/02/14	IV
ANNEXE 5. HYDROGRAMMES DU 1/03/14 AU 31/05/14	V
ANNEXE 6. HYDROGRAMME DU 1/06/14 AU 13/08/14	VI
ANNEXE 7. ISOHYÈTES ET ZONES PERMÉABLES DU MASSIF DU MADRES	VII

Annexe 1. Caractéristiques du moulinet : coefficients et courbe d'étalonnage

Coefficients d'étalonnage	
De 0,1 à 0,8 tours /s	
A1	B1
0,200	0,100
0,200	0,100
De 0,9 à 1,8 tours/s	
A2	B2
0,250	0,050
0,250	0,050
De 1,9 à 9 tours/s	
A3	B3
0,269	0,032
0,269	0,032

Coefficients A et B de la relation : Vitesse de l'hélice = f (Nombre de tours de l'hélice),
 Vitesse mesurée (m/s) = A x Tours (Nb/s) + B

Courbe d'étalonnage du fournisseur :



Annexe 2. Plan de montage de la structure de support de la sonde et de l'échelle limnimétrique

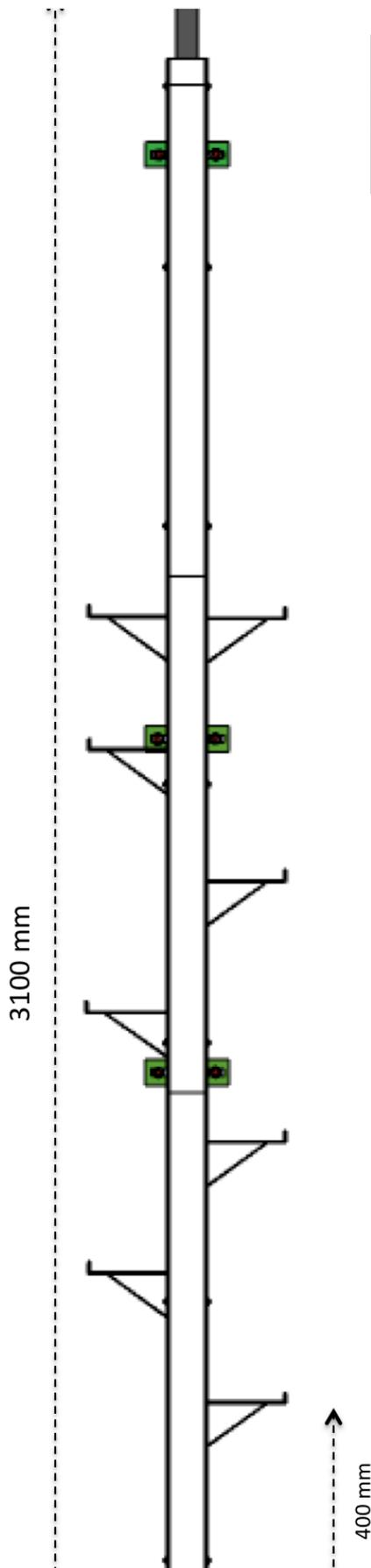
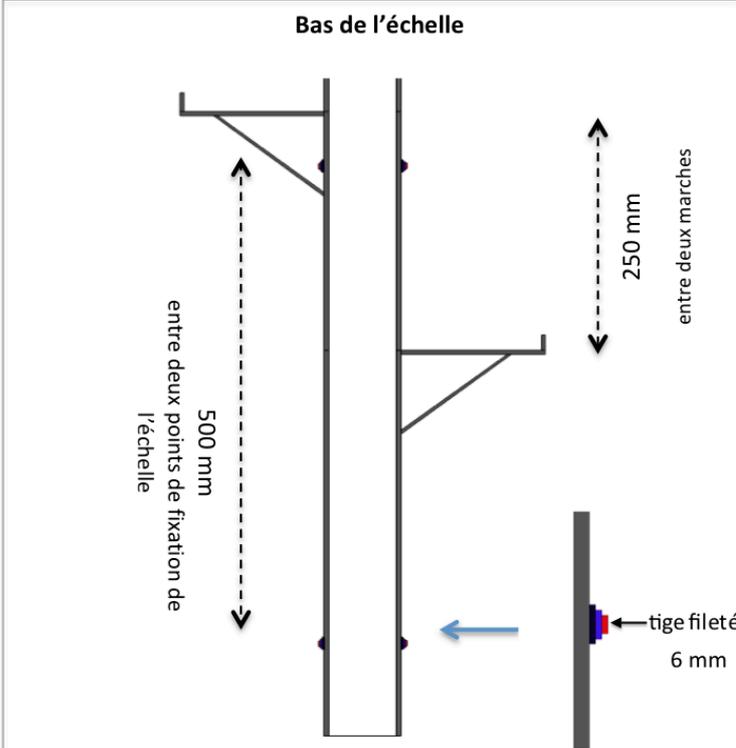
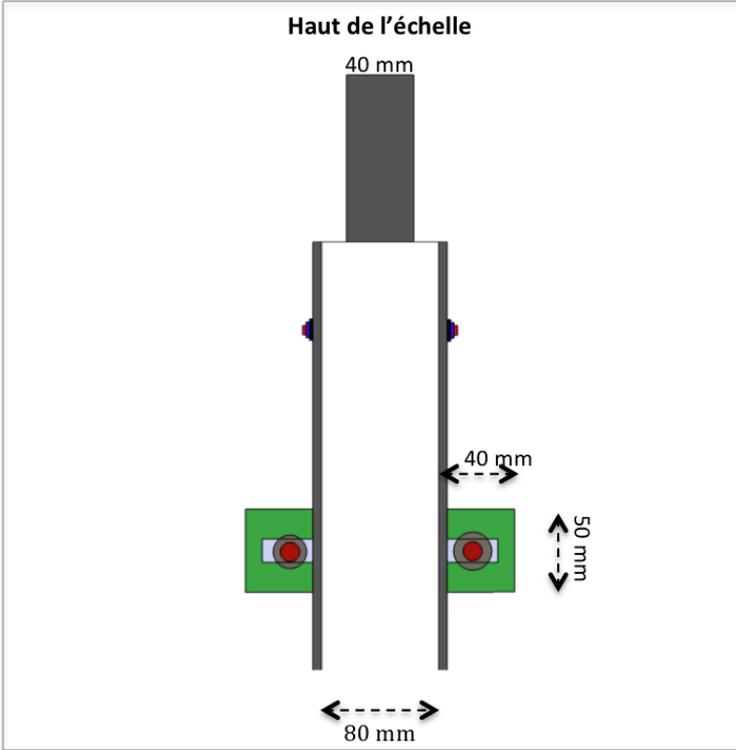
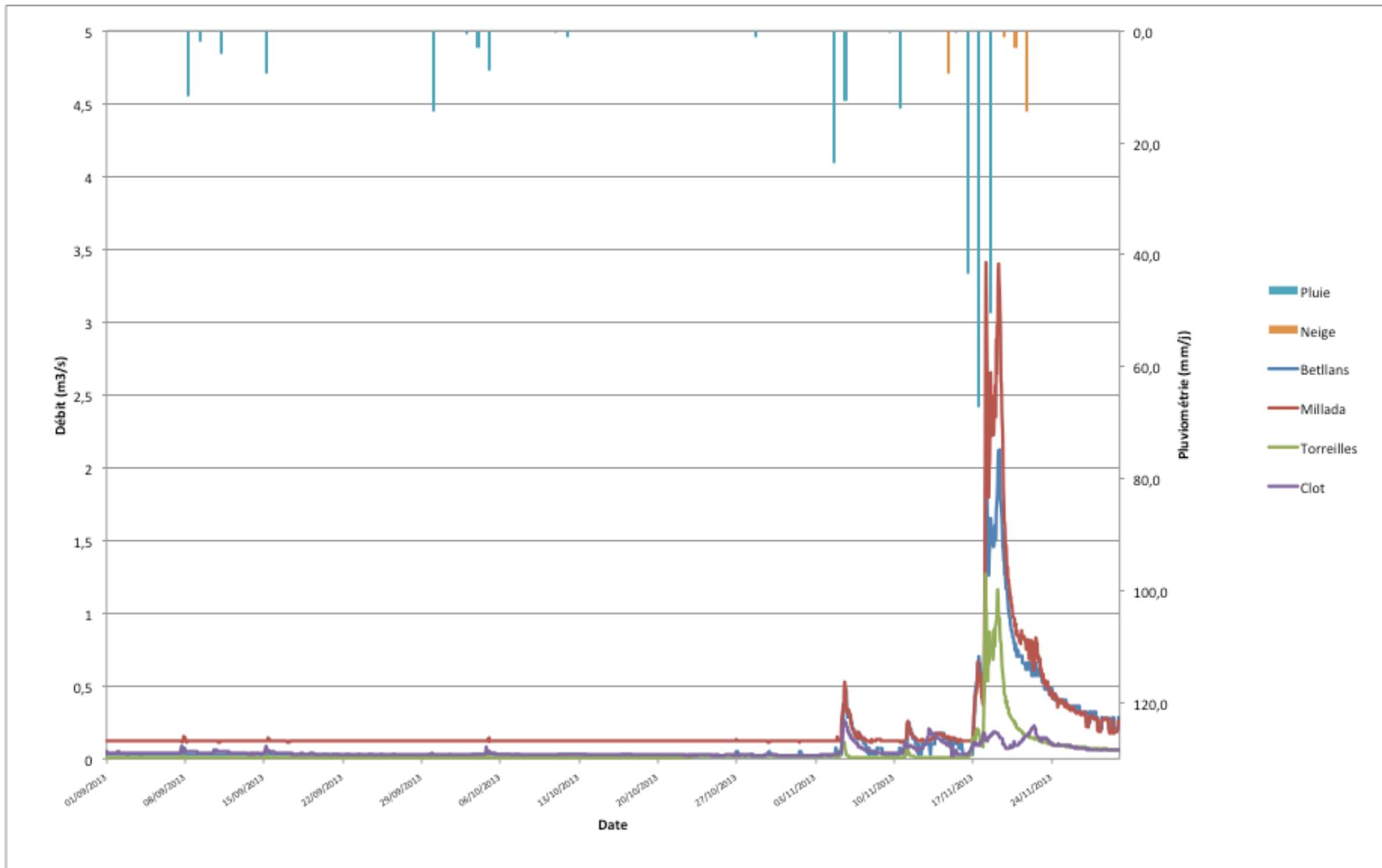
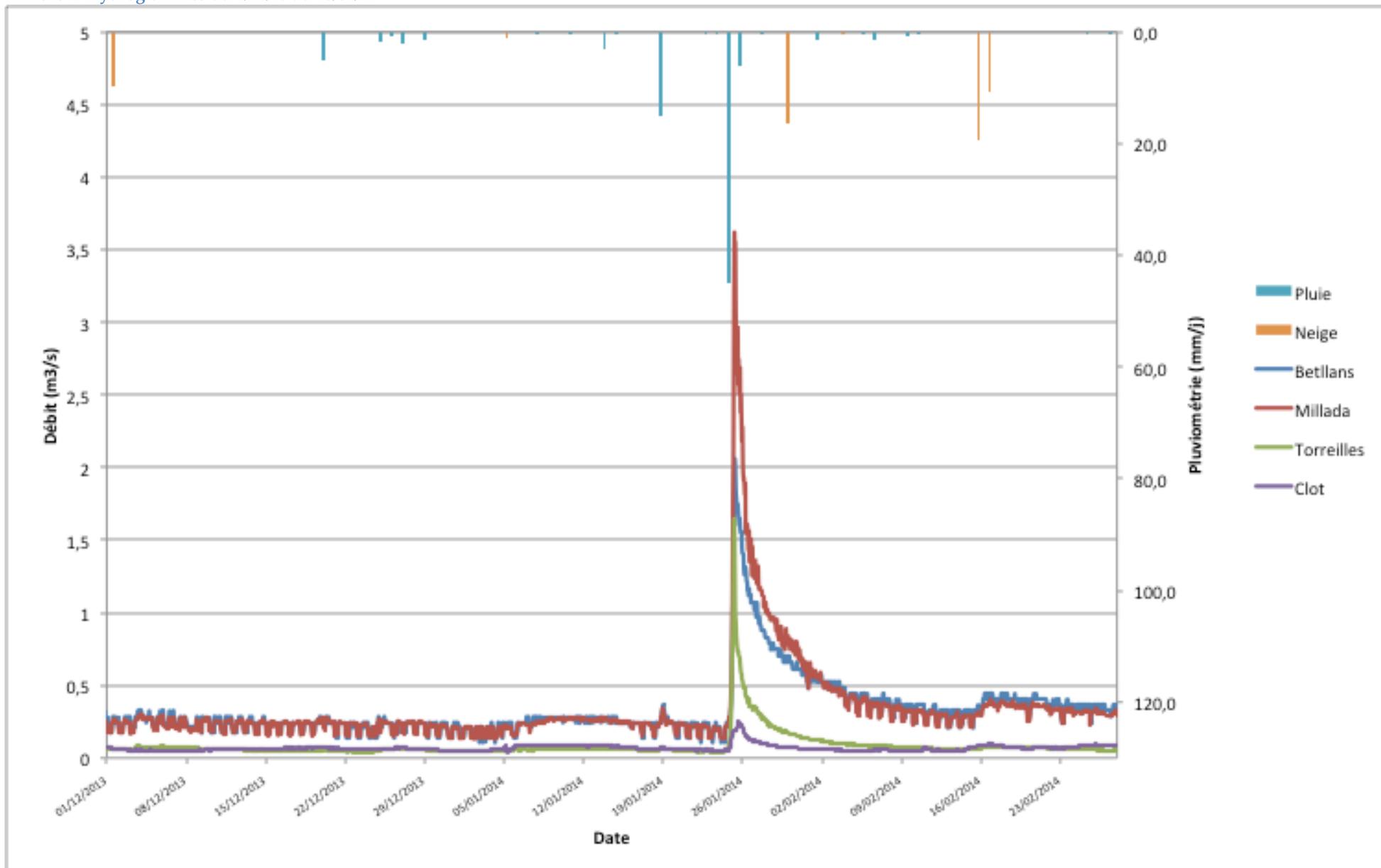


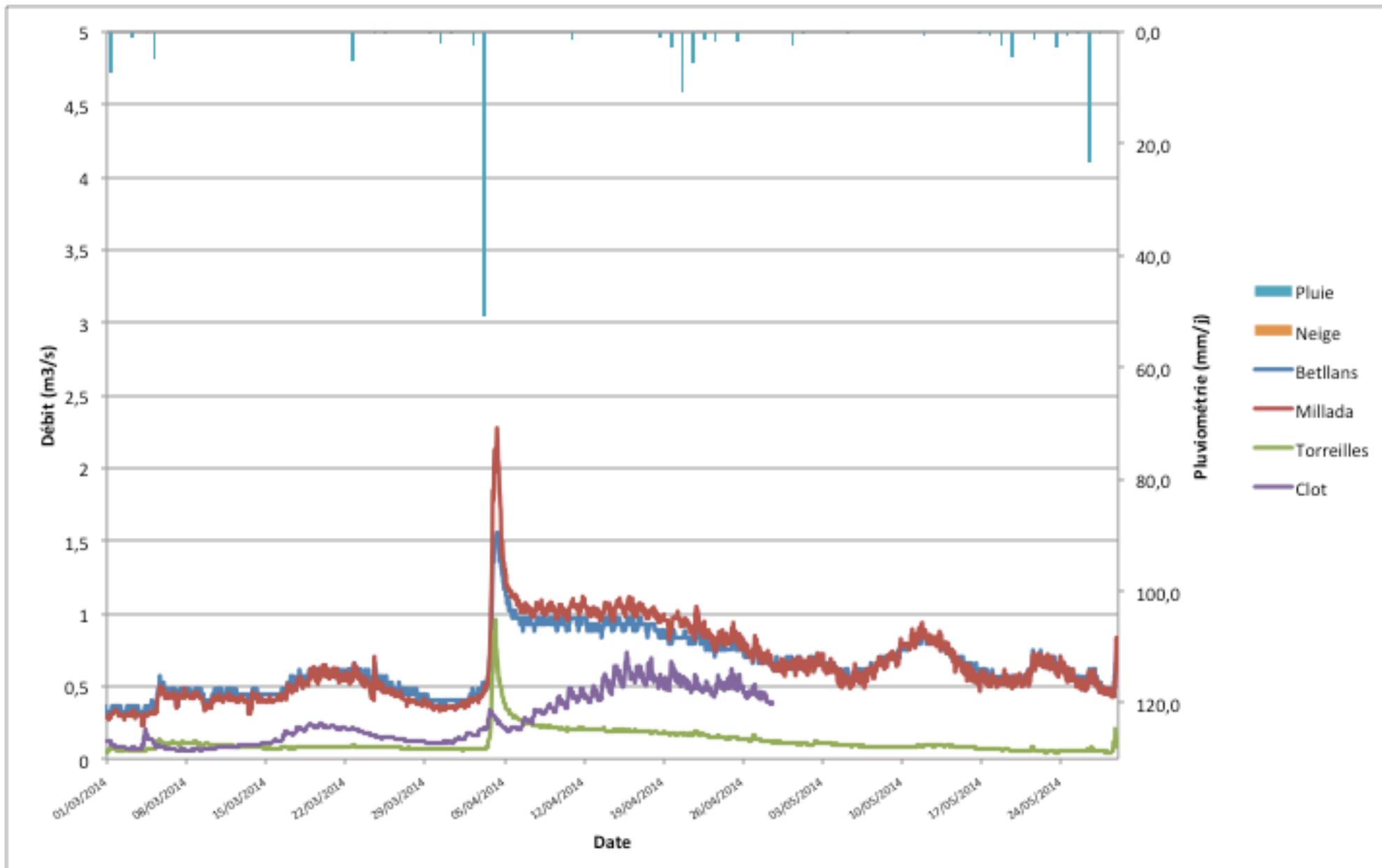
Schéma de l'échelle limnimétrique de Conat
réalisé avec Google SketchUp
Vue de face





Annexe 4. Hydrogrammes du 1/12/13 au 28/02/14





Annexe 6. Hydrogramme du 1/06/14 au 13/08/14

