

ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MONTPELLIER

Stage de 4^{ème} année
Département Sciences et Technologies de l'Eau

LE GUENANFF Marion

ANNEE 2012-2013

***Contribution à l'établissement du bilan hydrique du
bassin versant de Nohèdes***

*Association Gestionnaire de la Réserve
Naturelle de Nohèdes*

Fédération des Réserves Naturelles Catalanes



Nom tuteur indus : MANGEOT Alain
Nom tuteur Polytech : SALLES Christian

Polytech' Montpellier
Réseau Polytech

Université Montpellier 2

Place Eugène Bataillon 34095 MONTPELLIER CEDEX 5

Tél : 04 67 14 31 60 – Télécopie 04 67 14 45 14

Courriel : scola@polytech.univ-montp2.fr



RAPPORT DE STAGE

Remerciements

Je tiens en premier lieu à adresser mes sincères remerciements à mon tuteur de stage, Alain Mangeot, conservateur de la Réserve Naturelle de Nohèdes, pour m'avoir accueillie et suivie durant mon stage, pour son intérêt, nos réflexions et tout simplement sa sympathie.

Mes remerciements vont également à :

- David Morichon, conservateur de la Réserve Naturelle de Conat, et Alain Champagnat, bénévole, pour m'avoir accompagnée et conseillée lors de mes prospections sur le terrain aux alentours de Conat ;
- Maria Martin, employée de la réserve, et Lina Martin, stagiaire, pour m'avoir accompagnée et aidée à la réalisation des jaugeages ;
- mes professeurs de Polytech'Montpellier, Luc Neppel et Christian Salles, pour avoir répondu à mes questionnements ;
- Antoine Guibert, ingénieur projet à Cayrol International et ancien STE, pour ses explications du fonctionnement de la centrale électrique de Nohèdes et ses corrections ; ainsi qu'à Nele Vandermeulen pour m'avoir permis de visiter la centrale ;
- Henri Salvayre, hydrogéologue maintenant à la retraite, pour ses conseils avisés quant à mes travaux ;
- Jeanet Dekker et Olivier Salvador, employés de la réserve, avec qui il fût agréable de partager les bureaux.

Un dernier mot pour les stagiaires de Nohèdes, à savoir Jérémy, Lucas et Yoann, avec qui il fût un grand plaisir de partager les locaux de la réserve, pour leur sympathie et leur bonne humeur de tous les jours, ainsi que pour m'avoir transmis un peu de leur science naturaliste.

Résumé

Le fonctionnement hydrologique des bassins versant est encore peu étudié dans les réserves naturelles. C'est pourquoi la Réserve Naturelle de Nohèdes (Pyrénées-Orientales, 66), sensibilisée par le sujet, a décidé de se lancer dans ce projet pionnier depuis 2009.

Cette étude concerne la vallée de Nohèdes, située sur le massif du Madres et parcourue par la rivière de Nohèdes, un des affluents principaux de la rive gauche de la Têt. Ce stage constitue la poursuite des travaux réalisés lors de précédents stages [DUCROIX, 2009 et SERVIERE, 2010] et apporte une contribution à l'établissement d'un bilan hydrologique global sur le bassin versant de la vallée de Nohèdes. Des sondes manométriques, enregistreuses du niveau de l'eau, avait été installée en décembre 2011 sur la rivière le long de la vallée et détectent toute réaction du régime hydraulique face aux évènements météorologiques.

La présente étude, par l'analyse des éléments hydrologiques à disposition, cherche à évaluer en termes de volume les entrées et les sorties d'eau sur le système. Les entrées d'eau sont quantifiées par le calcul de la pluie brute (précipitations) et des apports souterrains. Les sorties sont évaluées à travers la détermination de la pluie nette (pluie ruisselée et recueillie par la rivière) par l'analyse des hydrogrammes (issus des enregistrements des sondes) et l'estimation de l'évapotranspiration, ainsi que les infiltrations. Cependant, les échanges d'eau à travers le karst du massif du Coronat ne peuvent être affirmés ou infirmés étant donné le manque d'enregistrements. L'accumulation de données permettra par la suite de préciser le fonctionnement de ces échanges d'eau et d'obtenir des bilans interannuels.

Mots clés : hydrométrie, hydrologie, hydrogéologie, géologie, climatologie

Abstract

Nowadays, the hydrological functioning of watersheds is little studied in natural reserves. That's why the Nature Reserve of Nohèdes (Pyrénées-Orientales, 66), sensitized by the subject, decided to embark on this pioneering project since 2009.

This study concerns the valley of Nohèdes, located on the Madres mountains and crossed by the river of Nohèdes, a major tributary of the left bank of the Têt. This course is the continuation of the work done in previous stages [Ducroix, 2009 and SERVIERE, 2010] and contributes to the establishment of a global water balance in the watershed of the valley of Nohèdes. Pressure sensors register the level of water. It was installed in December 2011 on the river along the valley and can detect any reaction of the hydraulic system to weather events.

This study, through the analysis of hydrological features available, seeks to assess in terms of volume inputs and outputs of water in the system. The water inlets are quantified by calculating the gross rainfall (precipitation) and underground flows. The outputs are evaluated through the determination of the net rainfall (rain that run-off and is collected by the river) through analysis of hydrographs (from records of sensors) and the estimation of evapotranspiration and infiltration. However, the exchange of water through the karst of the Coronat mountain cannot be affirmed or reversed given the lack of records. The accumulation of data will eventually clarify the operation of the exchange of water and get interannual balance.

Keywords : hydrometry, hydrology, hydrogeology, geology, climatology

Sommaire

REMERCIEMENTS	2
RESUME.....	3
ABSTRACT.....	3
LISTE DES TABLEAUX	5
LISTE DES FIGURES.....	5
LISTE DES EQUATIONS	6
LISTE DES ANNEXES	6
I. PRESENTATION DE LA RESERVE NATURELLE DE NOHEDES.....	7
I.1. PRESENTATION GENERALE	7
I.2. MISSIONS	7
II. PRESENTATION DU CONTEXTE DU STAGE ET DE LA ZONE D'ETUDE.....	8
II.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE	8
II.2. RESEAU HYDROGRAPHIQUE	8
II.2.1. Cours supérieur.....	8
II.2.2. Cours moyen.....	8
II.3. GEOLOGIE DU SITE D'ETUDE.....	8
II.3.1. Grandes lignes	8
II.3.2. Karst du mont Coronat.....	9
II.4. CLIMATOLOGIE	9
II.5. LA CENTRALE ELECTRIQUE	10
II.5.1. Présentation de la microcentrale.....	10
II.5.2. Débit moyen rejeté par la centrale	11
II.5.3. Périodes de fonctionnement de la centrale.....	11
II.6. ETAT DES CONNAISSANCES	12
III. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DU STAGE	16
IV. METHODOLOGIE	17
IV.1. MESURE DE HAUTEUR D'EAU	17
IV.2. MESURE DE DEBIT.....	17
IV.2.1. Matériel utilisé.....	17
IV.2.2. Choix de la section de jaugeage	18
IV.2.3. Bonnes pratiques.....	18
IV.2.4. Dépouillement des jaugeages	19
IV.3. INSTALLATION D'UNE STATION HYDROMETRIQUE	19
IV.3.1. Description d'une station traditionnelle	19
IV.3.2. Contraintes d'implantation	19
V. RESULTATS ET ANALYSE	21
V.1. VERIFICATION DES SONDES.....	21
V.2. CONVERSION HAUTEUR D'EAU - DEBIT	22
V.2.1. Etablissement des courbes de tarage.....	22
V.2.2. Courbe de tarage.....	23

V.2.3. Critiques des courbes de tarage	24
V.3. ANALYSE DES HYDROGRAMMES	25
V.3.1. Analyse générale	25
V.3.2. Autres observations	28
V.3.3. Conclusion générale sur les débits.....	28
V.4. ANALYSE DES HYDROGRAMMES DE CRUE	29
V.4.1. Schéma de Maillet	29
V.4.2. Temps de propagation	31
V.5. BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE NOHEDES	31
V.5.1. Estimation de la pluie brute	32
V.5.2. Estimation de la pluie nette	33
V.5.3. Estimation de l'évapotranspiration	34
V.5.4. Coefficient de ruissellement	36
V.5.5. Résultats et interprétations	36
V.5.6. Critique des résultats	39
V.5. MISE EN PLACE DE LA 5 ^{EME} STATION	40
VI. CONCLUSION	41
VII. PERSPECTIVES	42
VII.1. COURBES DE TARAGE	42
VII.2. ETUDE DE LA GEOLOGIE	42
VII.2.1. Perte supposée de la rivière	42
VII.2.2. Karst du mont Coronat.....	43
VII.2.3. Faille de Merens.....	43
VII.3. CLIMATOLOGIE.....	43
VIII. BILAN PERSONNEL	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	45

Liste des tableaux

TABEAU 1 : RENDEMENTS DES DIFFERENTS COMPOSANTS DE LA CENTRALE DE NOHEDES	11
TABEAU 2 : PERIODES TARIFAIRES IMPOSEES PAR EDF	11
TABEAU 3 : CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS DRAINES PAR LES STATIONS HYDROMETRIQUES.....	13
TABEAU 4 : RESULTATS DE L'ANALYSE DES HYDROGRAMMES DE CRUE PAR LA LOI DE MAILLET.....	30
TABEAU 5 : ESTIMATION DES MOYENNES INTERANNUELLES	36
TABEAU 6 : ESTIMATION DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES DE L'ANNEE 2012	37
TABEAU 7 : PLUIES NETTES MENSUELLES	39
TABEAU 8 : OBJECTIFS DE COMPLETION DES COURBES DE JaugeAGES	42
TABEAU 9 : LISTE DES TACHES ET DE REPARTITION DU TEMPS DU TRAVAIL	44

Liste des figures

FIGURE 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DES RESERVES NATURELLES DES PYRENEES-ORIENTALES	7
FIGURE 2 : DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE SUR 20 ANS.....	10
FIGURE 3 : PRISE D'EAU – ESTANY DEL CLOT	
FIGURE 4 : TURBINE PELTON – CENTRALE DE NOHEDES	11

FIGURE 5 : VISUALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	14	
FIGURE 6 : CARTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	15	
FIGURE 7 : SONDE OTT ORPHEUS MINI	FIGURE 8 : CONNEXION SONDE - PC.....	17
FIGURE 9 : MOULINET SUR PERCHE	18	
FIGURE 10 : RECUPERATION DE DONNEES BRUTES – SONDAS MANOMETRIQUES – JANVIER-MAI 2013	21	
FIGURE 11 : ENREGISTREMENTS DE COTES ET DE TEMPERATURES DE LA STATION <i>LA MILLADA</i> – AOUT-DECEMBRE 2012	22	
FIGURE 12 : COURBE D'ÉTALONNAGE DE LA STATION HYDROMETRIQUE DU <i>REPARTITEUR DE DEBIT</i>	24	
FIGURE 13 : PROFIL EN TRAVERS DE LA STATION DU <i>REPARTITEUR DE DEBIT</i>	24	
FIGURE 14 : ALTERNANCES JOUR/NUIT – STATION DU <i>REPARTITEUR</i>	25	
FIGURE 15 : ECLUSEES JOURNALIERES ET PERIODE D'ARRÊT DE LA CENTRALE – STATION DE <i>BETLLANS</i>	27	
FIGURE 16 : ANALYSE DES HYDROGRAMMES <i>LA MILLADA</i> – <i>BETLLANS</i>	27	
FIGURE 17 : ANALYSE D'UN HYDROGRAMME DE CRUE – STATION DU <i>REPARTITEUR</i> – 20/09/12 AU 19/10/12.....	30	
FIGURE 18 : CARTE DES COURBES ISOHYETES DU MASSIF DU MADRES (AVEC LIMITE DE LA RESERVE NATURELLE DE CONAT)	32	
FIGURE 19 : REPRESENTATION DES COURBES ISOHYETES SOUS MAPINFO	33	
FIGURE 20 : FAUSSE POINT DE CRUE – STATION DE <i>TORRELLES</i>	34	
FIGURE 21 : APPORTS D'EAU VERS LE BASSIN VERSANT DU <i>REPARTITEUR DE DEBIT</i>	38	

Liste des équations

ÉQUATION 1 : FORMULE DE LA PUISSANCE THEORIQUE	11
ÉQUATION 2 : CALCUL DU DEBIT REJETE PAR LA CENTRALE DE NOHEDES	11
ÉQUATION 3 : INTERPOLATION PAR AJUSTEMENT POTENTIEL.....	23
ÉQUATION 4 : EXTRAPOLATION PAR LA FORMULE DE MANNING-STRICKLER.....	23
ÉQUATION 5 : LOI DE VIDANGE D'UN RESERVOIR, LOI DE MAILLET	29
ÉQUATION 6 : DETERMINATION DE K.....	29
ÉQUATION 7 : DETERMINATION DE LA CAPACITE D'EMMAGASINEMENT	30
ÉQUATION 8 : BILAN SUR LES PRECIPITATIONS	32
ÉQUATION 9 : CALCUL DE LA PLUIE BRUTE INTERANNUELLE	33
ÉQUATION 10 : CALCUL DE LA PLUIE NETTE.....	33
ÉQUATION 11 : FORMULE DE THORNTHWAITE	34
ÉQUATION 12 : ESTIMATION DE L'ETP D'UN BASSIN VERSANT POUR UNE TRANCHE D'ALTITUDE	35
ÉQUATION 13 : ESTIMATION DES MOYENNES INTERANNUELLES D'ETP D'UN BASSIN VERSANT DONNE	35
ÉQUATION 14 : FORMULE DE TURC	35
ÉQUATION 15 : ESTIMATION DES MOYENNES INTERANNUELLES D'ETR POUR UN BASSIN VERSANT DONNE	36
ÉQUATION 16 : CALCUL DU COEFFICIENT DE RUISSELEMENT	36

Liste des annexes

ANNEXE 1 : HYDROGRAMMES – 03/12/11 AU 31/05/12	47
ANNEXE 2 : HYDROGRAMMES – 31/05/12 AU 27/11/12	48
ANNEXE 3 : HYDROGRAMMES – 27/11/12 AU 26/05/13	49
ANNEXE 4 : HYDROGRAMMES – 26/05/13 AU 24/08/13	50
ANNEXE 5 : COURBE D'ÉTALONNAGE DE LA STATION HYDROMETRIQUE DE <i>TORRELLES</i>	51
ANNEXE 6 : COURBE D'ÉTALONNAGE DE LA STATION HYDROMETRIQUE DE <i>LA MILLADA</i>	51
ANNEXE 7 : COURBE D'ÉTALONNAGE DE LA STATION HYDROMETRIQUE DE <i>BETLLANS</i>	52

I. Présentation de la Réserve Naturelle de Nohèdes

I.1. Présentation générale

La réserve naturelle de Nohèdes, voisine de celles de Conat est de Jujols, a été créée par décret ministériel en 1986, grâce à la ténacité de l'Association Charles Flahault. L'organisme local de gestion déléguée par voie de convention est l'Association Gestionnaire de la Réserve Naturelle de Nohèdes (AGRNN). Elle est adhérente à la Fédération des Réserves Naturelles Catalanes (FRNC), au même titre que les Réserves Naturelles de : le Mas Larrieu, la forêt de la Massane, Prats-de-Mollo-la-Preste, Py, Mantet, Jujols, Conat et la vallée d'Eyne. La FRNC est co-gestionnaire des réserves naturelles adhérentes.



Figure 1 : Situation géographique des Réserves Naturelles des Pyrénées-Orientales

I.2. Missions

La réserve naturelle de Nohèdes est principalement préoccupée par la protection du patrimoine naturel présent dans son périmètre, passant par l'étude de la faune et de la flore locale, mais aussi de tous les facteurs influençant leur développement. Aussi, le conservateur de la réserve est très sensible et inscrit l'hydrologie parmi ses objectifs d'étude. En effet, l'hydrologie du bassin versant est encore très peu connue bien que celle-ci conditionne le maintien et/ou le comportement des populations végétales ou animales peuplant les forêts et les cours d'eau, de par son fonctionnement complexe.

II. Présentation du contexte du stage et de la zone d'étude

II.1. Situation géographique

La présente étude concerne la vallée de Nohèdes, située en milieu montagnard sur le massif du Madres-Coronat, à l'ouest de Prades, dans le département des Pyrénées-Orientales de la région du Languedoc Roussillon. Elle englobe la commune de Nohèdes, le hameau de Betllans ainsi que la commune de Conat.

La zone d'étude s'étend du village de Conat à 533 m d'altitude aux sommets de la vallée avec le *roc Negre* à 2 459 m.

II.2. Réseau hydrographique

L'hydrosystème de la vallée de Nohèdes est particulièrement complexe. De manière synthétique, il suit un axe nord ouest – sud est. La rivière de *Callan*, appelée plus couramment rivière de Nohèdes, parcourt la vallée sur un linéaire de 21 km pour se jeter dans la Têt dont elle est l'un des principaux affluents de la rive gauche.

Le réseau hydrographique est représenté en Figure 5.

II.2.1. Cours supérieur

Le cours supérieur est limité à l'aval par la retenue artificielle appelée *Estany del Clot*. La partie haute du bassin versant est constitué de granite, alimentant les lacs glaciaires, le *Gorg Blau* à 2 200 m et le *Gorg Estelat* à 2 000 m d'altitude, par écoulement souterrain le long de fissures. Depuis ces deux lacs, l'écoulement est caractérisé par une succession de régimes torrentiels et de rivière. Un répartiteur de débit, placé en amont de l'*Estany del Clot*, permet d'alimenter l'étang, tout en maintenant un débit réservé minimum de 50 L/s dans la rivière, assurant son bon fonctionnement biologique. Celle-ci se sépare plus loin, formant la *Ribera Camps Reals* et la *Ribera de L'Home Mort*.

II.2.2. Cours moyen

Les deux cours d'eau conservent un écoulement torrentiel jusqu'à leur confluence à *Montellà*, puis jusqu'à la confluence de la *Ribera de Torrelles*. Cette dernière prend sa source vers 1 750 m d'altitude. Une alternance d'écoulements torrentiels et de rivière sont observés jusqu'à la limite de la commune de Conat, parcours caractérisé par une pente moyenne plus douce.

II.3. Géologie du site d'étude

La géologie est représentée en Figure 6.

II.3.1. Grandes lignes

La réserve occupe une vallée aux terrains de nature différente. En effet, on distingue deux catégories de terrains séparés par la faille de Merens d'orientation est-ouest, parcourant le fond de vallée entre

Nohèdes et Conat. Cette faille d'origine hercynienne se développe sur une centaine de kilomètres. Le nord de la faille, soit le versant sud, se compose de roches de type schisteuses et imperméables. Le sud de la faille, soit le versant nord, est constitué de roches calcaires de perméabilité importante causée par l'érosion karstique.

II.3.2. Karst du mont Coronat

Le massif karstique du mont Coronat, situé sur le versant nord de la vallée, fait partie du synclinal de Villefranche-de-Conflent, massif le plus important des karsts de la périphérie du massif du Canigou. Ces karsts se développent essentiellement dans les calcaires du Dévonien et constituent des structures complexes de synclinaux couchés les uns sur les autres sur d'importantes épaisseurs. Le massif karstique du synclinal de Villefranche s'étend d'est en ouest de Villefranche à Fontrabieuse sur plus de trente kilomètres de longueur. Il culmine au pic de la Pelade à 2 370 m d'altitude. Il mesure 4 km de largeur à Villefranche-de-Conflent et seulement quelques centaines de mètres à Fontrabieuse [SALVAYRE, 2010]. Il est drainé par deux résurgences de part et d'autre de la Têt en amont du village de Ria, avec la résurgence d'*En Gornier* rive droite et celle de *Ria* rive gauche (voir Figure 6). Cependant, l'origine exacte de l'eau acheminée jusque ces résurgences est jusqu'à présent ignorée.

A l'échelle du bassin versant de Nohèdes, on constate que le réseau karstique capte une partie importante des précipitations puisque les ravins qui parcourent le versant sont toujours secs. Les eaux infiltrées traversent les roches carbonatées perméables probablement jusqu'au substrat schisteux imperméable. On peut ensuite imaginer que ces eaux suivent un réseau axial, orienté vers l'est – sud est, le long du Synclinal, pour déboucher aux sources de Ria [MANGEOT, 2011].

Aussi, de nombreuses résurgences s'activent le long de la faille de Merens lors de fortes précipitations et peuvent débiter plusieurs dizaines ou centaines de litres par seconde, laissant supposer une mise en charge du karst entraînant son débordement.

II.4. Climatologie

Le climat des Pyrénées-Orientales est très contrasté. Le Madres, en particulier, se situe à la charnière entre l'influence méditerranéenne et océanique. Ainsi, la vallée de Nohèdes est soumise dans ses parties basses à un climat doux méditerranéen tandis ses sommets sont souvent le siège de perturbations océaniques. De plus, une multitude de microclimats liés au jeu de l'exposition, de l'altitude et des vents sont présents.

C'est pourquoi la vallée est non seulement soumise à un gradient pluviométrique d'altitude, mais aussi à un gradient décroissant d'ouest en est, engendré par des précipitations océaniques notamment en altitude, entraînées par les vents de Tramontane. Deux autres types de précipitations sont également présentes sur la vallée, mais de façon moindre. Il s'agit des perturbations méditerranéennes et des précipitations thermiques se produisant l'après-midi ou en fin de journée.

Du fait de l'amplitude altitudinale de la zone d'étude, un gradient thermique est également présent. Des vents forts de Tramontane provenant du nord-ouest entraînent des températures d'autant plus froides en altitude.

Deux pluviomètres sont installés sur le bassin versant. La réserve dispose d'une station pluviométrique, située à la maison de la réserve dans le village lui-même, relevée quotidiennement par un employé de la réserve. Une station enregistreuse de MétéoFrance, relevant les températures et les précipitations, est placée au niveau de la microcentrale électrique de Nohèdes mais les données ne sont pas à disposition de la réserve.

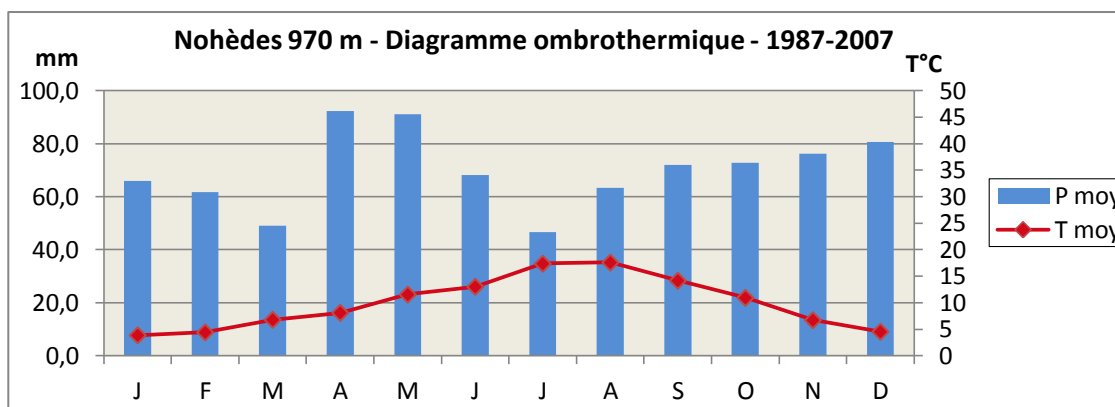


Figure 2 : Diagramme ombrothermique sur 20 ans

II.5. La centrale électrique

La rivière de Nohèdes comporte plusieurs ouvrages hydrauliques dont la microcentrale hydroélectrique en est l'élément le plus important. En période de fonctionnement, cette centrale constitue un acteur important dans le régime hydraulique de la rivière de Nohèdes en y rejetant un certain débit. Il est donc indispensable d'en connaître le fonctionnement pour une interprétation correcte des hydrogrammes par la suite.

II.5.1. Présentation de la microcentrale

Construite en 1975, la centrale est gérée par l'entreprise Cayrol International depuis 2008. Il s'agit d'une centrale de « retenue », d'une puissance installée¹ de 400 kW, permettant de turbiner (via une turbine Pelton²) les eaux de l'étang artificiel *Estany del Clot* (1 650m d'altitude). Une conduite forcée de 4,4 km permet l'acheminement de l'eau jusqu'à la centrale avec une hauteur de chute nette de 680 m. La microcentrale fonctionne par éclusées ou en continu selon le niveau du lac afin d'éviter son assèchement et d'assurer son bon fonctionnement écologique. Le niveau du lac est mesuré à l'aide d'une sonde de niveau piézo-électrique (sensibilité au cm), l'information étant transmise jusqu'à la centrale via un système de transmission radio. La régulation des éclusées se fait automatiquement.

¹ Dans le cas des centrales dites de « retenue », la puissance installée ne correspond pas à la puissance disponible. Ainsi, la puissance installée est celle, théorique (ou encore nominale), issue de la conception même de la centrale, alors que la puissance disponible est celle véritablement utilisable. La puissance disponible fluctue et est fixée par le taux de remplissage du lac et la hauteur de chute.

² Une turbine Pelton, utilisée pour les hautes chutes d'eau et les petits débits, est constituée d'une roue à augets mise en mouvement par un jet provenant d'un ou de plusieurs injecteurs. Le débit est réglable à l'aide d'un pointeau mobile à l'intérieur de l'injecteur.

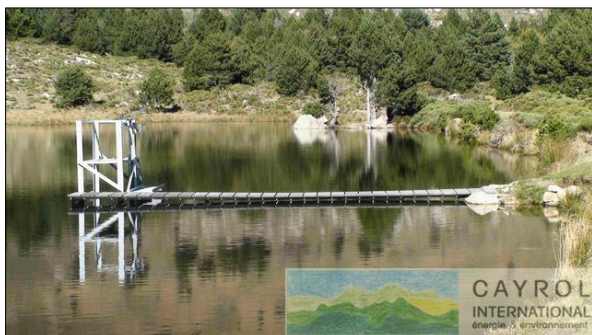


Figure 3 : Prise d'eau – Estany del Clot



Figure 4 : Turbine Pelton – Centrale de Nohèdes

II.5.2. Débit moyen rejeté par la centrale

Calcul de la puissance engendrée par la centrale :

$$P = Q * h * 9,81 * rdt$$

Équation 1 : Formule de la puissance théorique

P : Puissance en kW (puissance nominale de 400 kW) ;

Q : débit en m³/s ;

h : hauteur de chute nette en m (680 m) ;

rdt : rendement des différents appareils.

Ci-dessous le rendement des différents appareils :

Appareils	Rendement
Turbine	0,90
Alternateur	0,967
Transformateur	0,98

Tableau 1 : Rendements des différents composants de la centrale de Nohèdes

$$Q = \frac{P}{h * rdt} = \frac{400}{680 * 9,81 * 0,90 * 0,967 * 0,98} = 0,071 \text{ m}^3/\text{s}$$

Équation 2 : Calcul du débit rejeté par la centrale de Nohèdes

Théoriquement, la centrale rejette un débit autour des 70 l/s dans la rivière de Nohèdes durant les heures de fonctionnement.

II.5.3. Périodes de fonctionnement de la centrale

Périodes	Dates	Horaires
Période d'hiver	Novembre à Mars inclus	
Heures de pointe d'hiver	Décembre à Février inclus	8h-10h _ 18h-20h
Heures pleines d'hiver		6h-22h
Heures creuses hiver		22h-6h
Période d'été	Avril à Octobre inclus	
Heures pleines été		6h-22h
Heures creuses été		22h-6h

Tableau 2 : Périodes tarifaires imposées par EDF

A noter : La centrale ne fonctionne pas pendant la période estivale du 15 juillet au 15 septembre.

En général, la centrale fonctionne peu de mi-septembre au 31 octobre. En novembre, la priorité est donnée aux heures pleines de 6h à 22h. De décembre à fin février, la centrale fonctionne en priorité pendant les heures de pointe, qui sont définies par EDF qui envoie à la centrale un signal 175 Hz. Si le débit entrant dans l'*Estany del Clot* est suffisant, la centrale va alors fonctionner durant les heures pleines de la journée, c'est-à-dire de 6h à 8h, de 10h à 18h, et de 20h à 22h. Les heures creuses, de 22h à 6h, viennent alors en dernier, la centrale étant très souvent arrêtée durant cette période. De mars à mi-juillet, elle fonctionne généralement à pleine puissance (en continu) du fait du trop-plein d'eau engendré par la fonte des neiges et du sous-équipement de la centrale (équipée pour 75 l/s).

Le fonctionnement de la centrale est parfois ponctué par des coupures, dues à des problèmes d'exploitation ou de coupures du réseau EDF, sur des périodes allant jusqu'à 2 jours. De tels événements se sont souvent produits de décembre 2012 à avril 2013. De novembre à décembre, le froid ou le vent peuvent perturber l'émetteur radio en transmettant une information de niveau erronée et occasionner également un arrêt du turbinage.

II.6. Etat des connaissances

Depuis et même avant la création de la réserve, le terrain a été exploré et étudié par plusieurs professionnels, chacun spécialisé dans leur domaine.

Ainsi, l'hydrosystème de la vallée fut parcouru et décrit par Joël Moubayed [MOUBAYED, 1998; BREIL-MOUBAYED, 2004].

Point de vue géologie, les affleurements furent étudiés par Gérard Guitard avec la carte géologique de Prades [GUITARD, 1998] et la géomorphologie par Marc Calvet et Magali Delmas [CALVET, 2012]. Bernard Laumonier, quant à lui, s'intéressa plus particulièrement à la structure du synclinal de Villefranche et réalisa plusieurs coupes transversales de celui-ci [LAUMONIER, 1975, 1984, 1998, 2004]. De nombreux travaux furent également menés sur la structure du karst par Henri Salvayre [SALVAYRE, 1978, 1981, 2010] et Bart Raymaekers avec l'exploration de la grotte *Cova de les Encantades* [RAYMAEKERS, 2005].

Ensuite, l'hydrologie du bassin versant de la vallée de Nohèdes fût étudiée plus précisément à travers deux stages menés par Pierre-Loup Ducroix en 2009 et Magalie Servière en 2010, tous deux élèves-ingénieurs de Polytech'Montpellier, et les bases du projet furent posées.

La première étude [DUCROIX, 2009] avait en partie pour but de caractériser les échanges karst-rivière, la rivière chevauchant des terrains à dolomies du Dévonien entre Nohèdes et Betllans. Il fut démontré, suite à une campagne de conductivité et de mesure de débit, que cet apport par le karst était quantitativement faible mais physico-chimiquement important. En outre, elle a mis en évidence dans un méandre s'enfonçant dans le karst une perte d'eau, inconnue jusqu'alors, qui affectait le débit du cours d'eau.

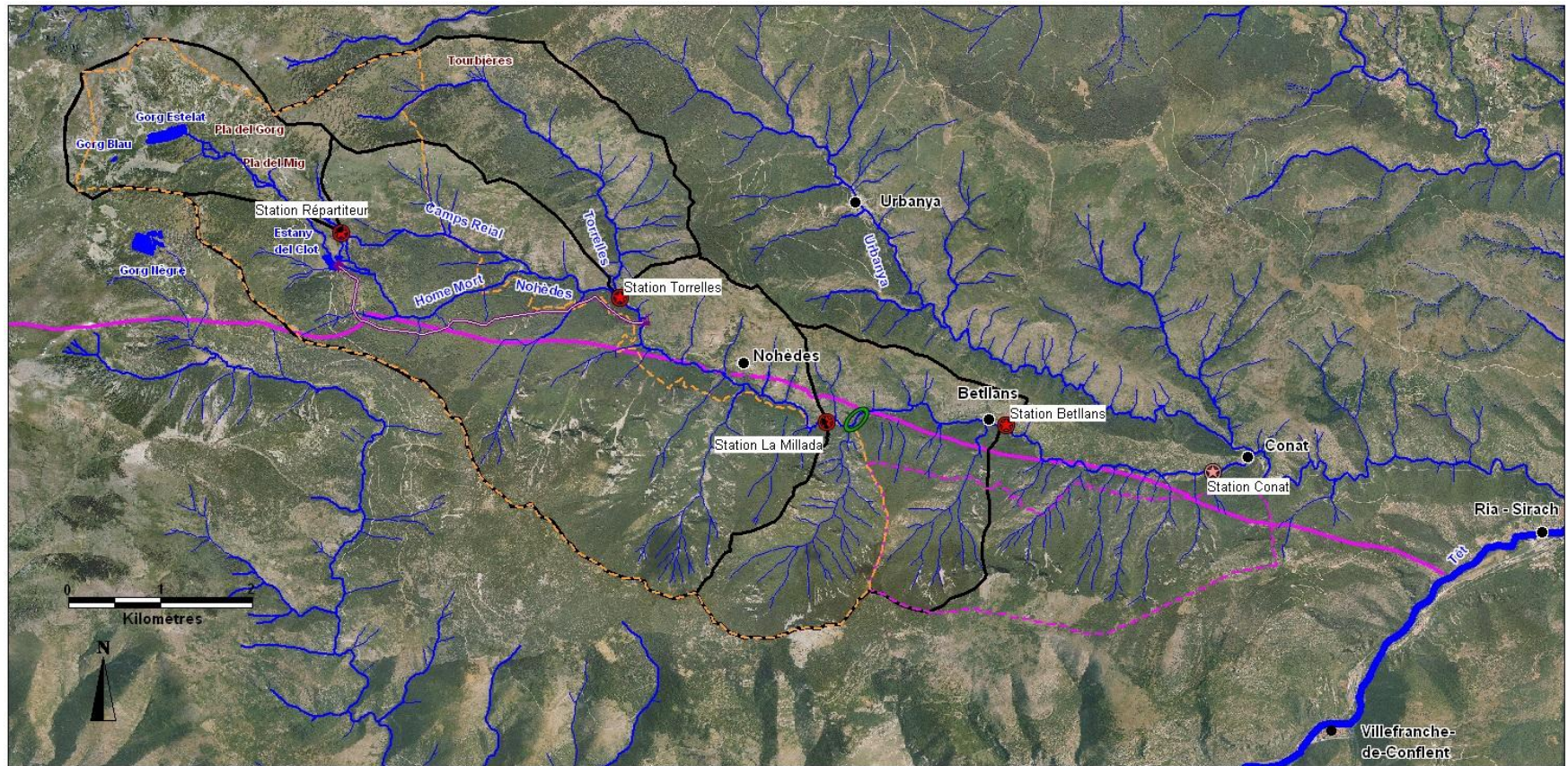
Pour préciser le bilan hydrique du bassin versant, quatre sondes enregistreuses au pas de temps horaire ont été mises en place fin 2011, en application d'un protocole de suivi hydrologique continu [SERVIERE, 2010].

3 juin - 30 août 2013

Les quatre sondes constituent les quatre stations hydrométriques citées dans le tableau ci-dessous.

Stations	Altitude (m)	Surface drainée (ha)	Nature des terrains drainés
<i>Répartiteur</i>	1 685	386	Granite et Schiste
<i>Torrelles</i>	1 008	556	Schiste
<i>La Millada</i>	764	2 646	Granite, Schiste et Calcaire
<i>Betllans</i>	642	3 318	Granite, Schiste et Calcaire

Tableau 3 : Caractéristiques des bassins versants drainés par les stations hydrométriques



Stage "Bilan hydrique du bassin versant de Nohèdes" - 2013

Présentation de la zone d'étude

Aménagements hydrauliques

- Stations hydrométriques
- Future station hydrométrique
- Conduite forcée
- Prise d'eau de la centrale
- Microcentrale électrique de Nohèdes

Éléments hydrogéologiques

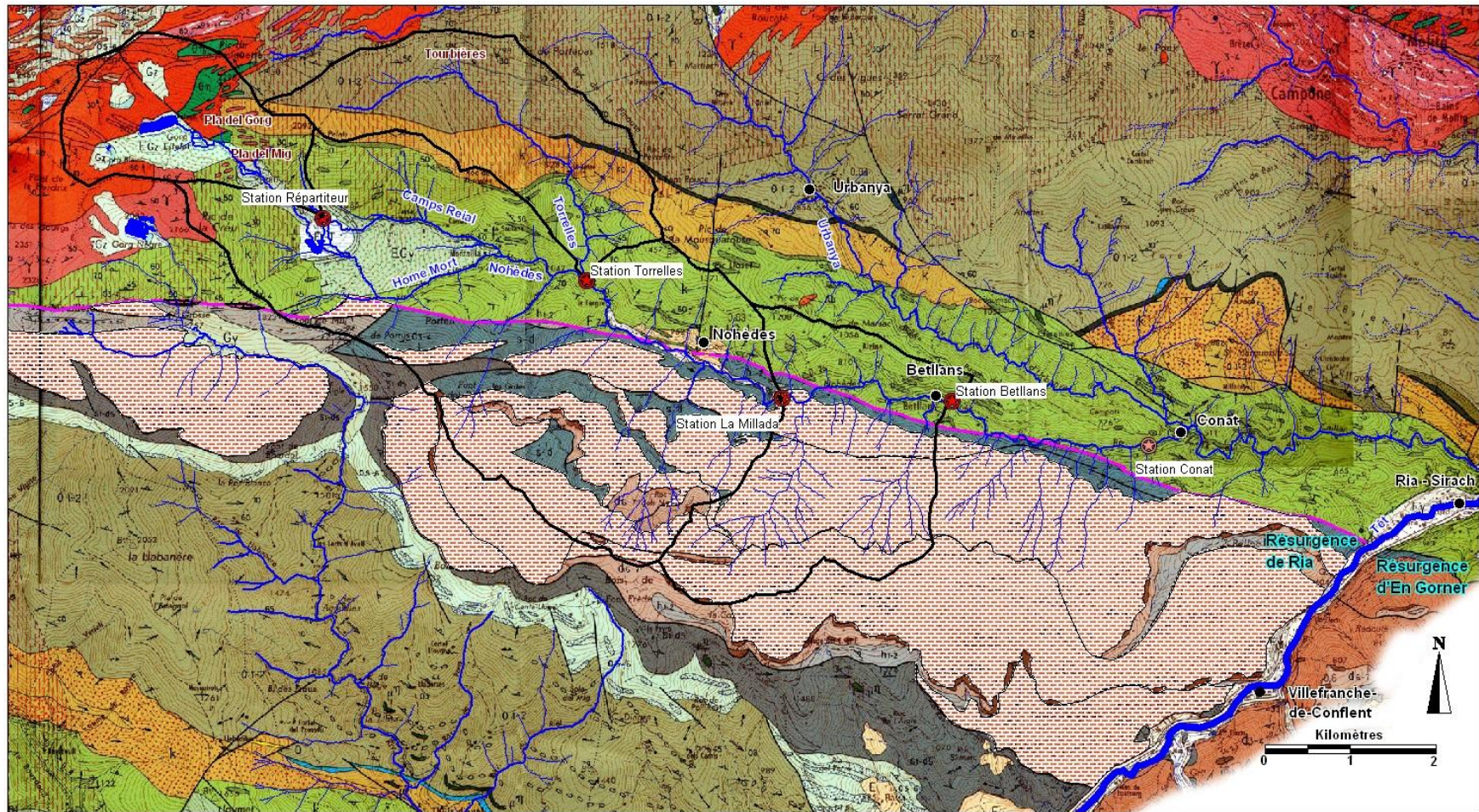
- Zone de pertes supposées dans le karst
- Nohèdes**
 Rivière / Ruisseaux
- Lacs / Etangs
- Pla del Mig**
 Complexe tourbeux
- Limite des bassins versants propres à chaque station hydrométrique
- Faille de Mérens

Administratif

- Nohèdes**
 Village / Hameau
- Limite de la Réserve Naturelle de Nohèdes
- Limite de la Réserve Naturelle de Conat

Sources : Orthophoto®, Réserve Naturelle de Nohèdes - Réalisation : Marion LE GUENANFF

Figure 5 : Visualisation de la zone d'étude



Stage "Bilan hydrique du bassin versant de Nohèdes" - 2013



Présentation de la zone d'étude




Éléments hydrogéologiques

-  Zone perméable
-  Nohèdes
Rivière / Ruisseaux
-  Lacs / Etangs

Résurgence Principales résurgences

-  Ria del Mig
Complexe tourbeux
-  Limite des bassins versants propres à chaque station hydrométrique
-  Faille de Mérens

Aménagements hydrauliques

-  Stations hydrométriques
-  Future station hydrométrique
- Administratif**
-  Nohèdes
Village / Hameau

Sources : Carte géologique, Réserve Naturelle de Nohèdes - Réalisation : Marion LE GUENANFF

Figure 6 : Carte géologique de la zone d'étude

III. Problématique et objectifs du stage

Ce stage s'inscrit dans une problématique générale de compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la vallée de Nohèdes. Bien que l'hydrologie soit souvent peu étudiée dans les réserves naturelles, c'est une problématique que la Réserve Naturelle de Nohèdes cherche à exploiter à travers cette étude. Celle-ci fait ainsi partie d'un projet plus vaste s'étalant sur plusieurs stages.

Le fonctionnement hydraulique souterrain au niveau des terrains calcaires est encore inconnu, bien que celui-ci présente un enjeu fort. En effet, le massif calcaire du *Mont Coronat* est soupçonné d'abriter un réseau karstique considérable. Il est alors important de poursuivre les investigations qui permettront de mieux connaître ce réseau dans le but de préserver la ressource en évitant toute pollution de celle-ci notamment. Aussi, la quantification des eaux d'infiltration non restituée directement dans la rivière de Nohèdes permettra d'estimer le volume de la ressource.

Aussi, cette étude permet d'apporter quelques éclaircissements sur le fonctionnement hydrologique en général, notamment sur le stockage de l'eau par les accumulations neigeuses hivernales, par les zones humides ou par les altérites du plateau granitique sommital.

Le but de cette étude est donc de contribuer à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de Nohèdes. Suite aux études réalisées par Pierre-Loup Ducroix et Magali Servièrre, se dégagent les objectifs principaux suivants à traiter durant le stage :

- Tarer la 4^{ème} station de suivi limnigraphique (répartiteur de *l'Estany del Clot*) ;
- Evaluer les lames d'eau théoriques pour les sous-bassins versants définis en amont des stations de suivi limnimétrique et comparer avec les données du suivi limnimétrique ;
- Caler la carte des isohyètes générée par le modèle numérique de MétéoFrance avec les données pluviométriques disponibles ;
- Déterminer la localisation optimale d'une éventuelle cinquième station pour compléter le suivi hydrologique du cours d'eau principal.

IV. Méthodologie

IV.1. Mesure de hauteur d'eau

Chaque station hydrométrique est équipée d'une échelle limnimétrique ainsi que d'une sonde enregistreuse OTT Orpheus Mini.

OTT Orpheus Mini est équipée d'une cellule de mesure de la pression hydrostatique à membrane céramique, ainsi que d'une sonde de température. Un câble muni d'un capillaire de mise à l'air libre assure la compensation de la mesure avec les variations barométriques de la pression atmosphérique. Une unité de communication infrarouge permet d'établir une connexion avec un ordinateur portable lors de la récupération des données et de la mise en service.

La sonde est placée dans un tube crépiné de façon à être protégée de tous obstacles (branchages...) pouvant être entraînés par le courant.



Figure 7 : Sonde OTT Orpheus Mini



Figure 8 : Connexion sonde - PC

IV.2. Mesure de débit

En vue d'établir une relation hauteur d'eau – débit (courbe de tarage) d'une station hydrométrique, il est indispensable de mesurer ponctuellement le débit, correspondant à une cote lue à l'échelle ou relevée par la sonde, au moyen d'un jaugeage. La méthode dite par exploration du champ des vitesses sera employée ici. Cette technique permet de mesurer ponctuellement la vitesse de l'eau à différentes profondeurs le long de plusieurs verticales judicieusement choisies pour une section donnée du cours d'eau.

IV.2.1. *Matériel utilisé*

Les jaugeages sont réalisés au moyen d'un moulinet sur perche, muni d'une hélice 2030R General Oceanics.

Pour une mesure correcte, le moulinet est placé face au courant. Un compteur, situé dans le support de l'hélice, permet d'obtenir le nombre de tours pendant une durée définie. La vitesse est déduite grâce à la courbe d'étalonnage fournie par le constructeur.

Avant toute mesure, le moulinet est rempli d'eau du robinet afin de minimiser la différence de pression osmotique. Après utilisation, un entretien de l'appareil est indispensable afin d'éviter tous dépôts ou prolifération d'algues et de garantir son bon fonctionnement. Pour ce faire, il est vidé puis un mélange vinaigre blanc – eau est introduit pendant quelques heures. Le moulinet est stocké vide.



Figure 9 : Moulinet sur perche

IV.2.2. Choix de la section de jaugeage

Un intérêt tout particulier doit être porté au choix de la section de mesure pour permettre un jaugeage de qualité. Une section doit répondre aux critères suivants [Banque HYDRO., 1998] :

- ✓ Le bief de mesure doit être le plus rectiligne possible et l'emplacement de la section ne doit pas être sous l'influence d'obstacles situés à l'amont ou à l'aval qui pourraient entraîner des perturbations hydrauliques.
- ✓ L'écoulement doit être le plus régulier possible. Il est préférable d'éviter les zones convergentes ou divergentes, ainsi que les sites où se produisent des courants de retour ou des zones d'eaux mortes.
- ✓ La section doit être un compromis entre une profondeur suffisante pour l'immersion complète de l'appareil de mesure et la réalisation de plusieurs points de mesure sur une même verticale avec des vitesses mesurables.

IV.2.3. Bonnes pratiques

Pour des mesures de qualité lors du jaugeage, la section de mesure doit être perpendiculaire à l'écoulement. Aussi, le jaugeur doit se placer de manière à ne pas gêner l'écoulement. Autant que possible, il se placera en aval et en décalé, le plus loin du point de mesure.

Il n'y a pas de règles en vigueur en ce qui concerne le choix des verticales et le nombre de points par verticales. Ces paramètres sont déterminés par le jaugeur, en plaçant les verticales extrêmes au plus près des bords de la section de façon à minimiser l'influence des coefficients de rive. Le nombre de points par verticales doit permettre une représentation la plus fidèle possible de la réalité. Ils peuvent être répartis régulièrement sur la verticale avec des mesures plus nombreuses dans la moitié basse. De même, il convient de se rapprocher au maximum des limites de surface et de fond de façon à réduire les coefficients et les effets de surface [Banque HYDRO., 1998].

Cependant, la rivière de Nohèdes présentant un écoulement torrentiel et étant constituée d'une succession de vasques, le choix des sections de jaugeage est très limité. C'est pourquoi il est difficile de trouver une section « parfaite » et que cela nécessite souvent un déplacement vers l'amont ou l'aval de la station de jaugeage. Aussi, la présence de galets dans le fond du cours d'eau rend difficile l'approche du moulinet et la mesure de vitesse proche des limites de fond.

IV.2.4. Dépouillement des jaugeages

Le dépouillement des jaugeages ainsi réalisés se réalise sous le logiciel Hydraccess dans le module DEPJAUGE. Les profils des vitesses sur les verticales, ainsi que le profil des débits laminaires sur la section, sont interpolés à partir des points mesurés au moyen d'une fonction spline.

Toutes les données enregistrées jusqu'à présent sont stockées dans une banque de données (BDD d'Hydraccess), sous le nom *BDD_Nohedes_2013_LeGuenanff*, présente sur le réseau informatique de la réserve.

IV.3. Installation d'une station hydrométrique

En vue de compléter le suivi hydrique du bassin versant de Nohèdes, l'implantation d'une station supplémentaire en aval est nécessaire. Celle-ci servirait à établir un bilan hydrologique sur une plus grande surface. Aussi, la rivière de Nohèdes traverse la faille de Merens en aval du hameau de Betllans, où une source est présente. Il serait alors possible d'étudier en détail l'impact de celle-ci sur le régime hydraulique de la rivière.

IV.3.1. Description d'une station traditionnelle

Une station hydrométrique se définit comme un site de détermination du débit grâce à une relation considérée comme univoque entre hauteur et débit et à partir d'un ensemble d'équipement. Une telle station est constituée de :

- ✓ Un site avec une ou plusieurs sections de contrôle³ ;
- ✓ Une échelle limnimétrique ;
- ✓ Un appareil enregistreur.

IV.3.2. Contraintes d'implantation

A défaut de trouver un site idéal pour l'implantation d'une station hydrométrique, particulièrement sur les rivières de montagne, celle-ci doit répondre le plus possible à certains critères hydrauliques (Banque HYDRO., 1998] :

- ✓ **Fidélité** : La relation hauteur débit doit être le plus univoque possible. Pour cela, la station doit se trouver à l'amont d'une section de contrôle de forme constante et l'écoulement au droit de la station doit être uniforme et permanent.

³ Une section de contrôle correspond à une singularité (seuil ou rétrécissement) engendrant un changement du régime d'écoulement. La présence d'un seuil provoque un ralentissement de l'écoulement en amont, le tronçon se trouve alors sous le contrôle d'une section où s'effectue le changement de régime. Ainsi, toute modification de l'écoulement en aval sera sans influence sur la cote du plan d'eau à l'amont de la section de contrôle.

3 juin - 30 août 2013

- ✓ **Sensibilité** : A une faible variation du débit doit correspondre une variation suffisamment grande de la hauteur d'eau. On recherche une section de pente et de largeur faibles.
- ✓ **Accessibilité** : Une station doit être accessible en toutes circonstances, notamment en crue, ne pas être trop loin de la route ou d'un parking et ne présenter aucun risque pour les employés.
- ✓ **Contraintes techniques** : La station doit être implantée de manière à pouvoir résister aux embâcles et aux crues exceptionnelles. Pour cela, le matériel se doit d'être solidement fixé à un support droit et les appareils être placés au-dessus de la ligne des plus hautes eaux.

V. Résultats et analyse

V.1. Vérification des sondes

Tout d'abord, la récupération de données se fait sous le logiciel Hydras3, développé par la société OTT. Les données peuvent ensuite être exportées en format excel.

Avant de procéder à toute interprétation des données enregistrées par chaque sonde manométrique, il est indispensable d'en vérifier la véracité.

Les premiers résultats (voir Figure 10) révèlent des incohérences. Les courbes des stations de *Torrelles*, de *La Millada* et de *Betllans* suivent la même allure mais de manière opposée à la courbe de la station du *Répartiteur*. Le fait que les hauteurs d'eau chutent brutalement lors d'un épisode pluvieux pour les trois premières stations citées témoigne d'un inversement de ces courbes. Un tel évènement est particulièrement visible courant mars. Afin de remédier à ce problème, le paramétrage des sondes doit être révisé. La vérification du paramétrage de chaque sonde a en effet permis de détecter une erreur et d'y remédier. La transformation des courbes erronées en hauteurs d'eau réelles est possible par l'application d'une relation linéaire ($Y = A \cdot X + B$).

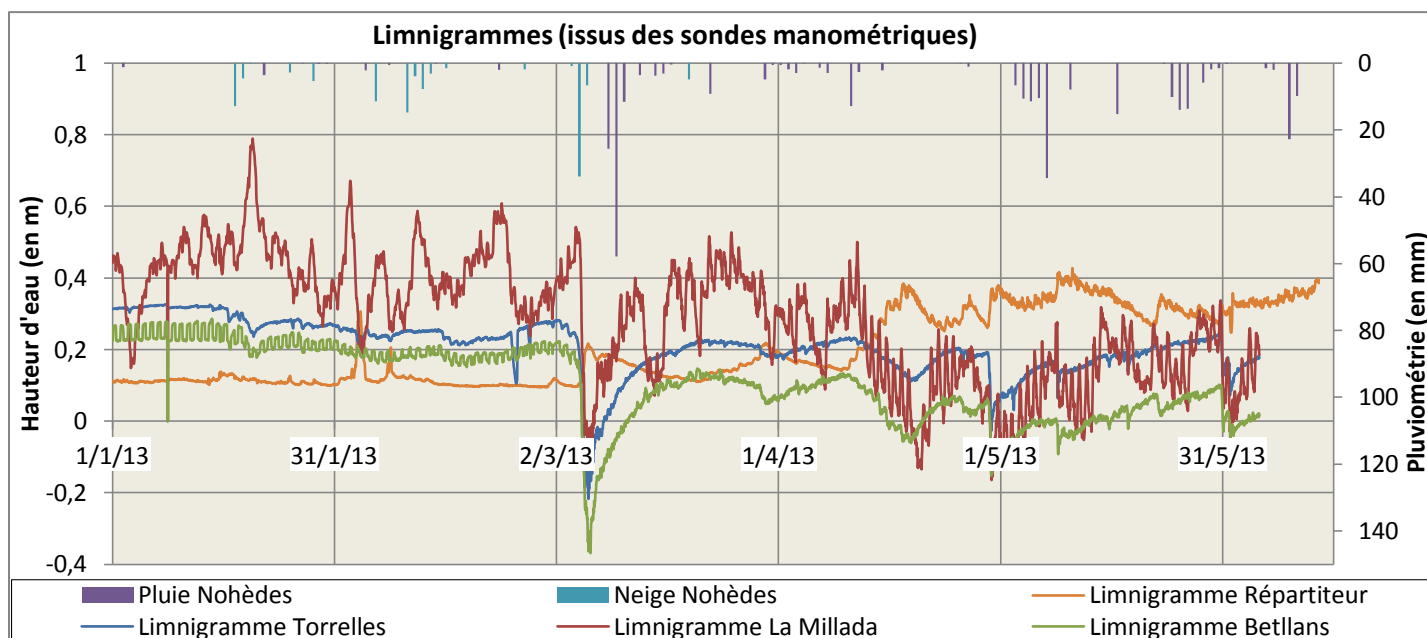


Figure 10 : Récupération de données brutes – Sondes manométriques – Janvier-Mai 2013

Après application de la relation linéaire, on remarque qu'une incohérence subsiste toujours pour les données de la station de *La Millada*.

Outre les fluctuations induites par la pluviométrie, des oscillations journalières bien marquées se sont produites de mi-mars à fin septembre 2012, entrecoupées de brèves périodes stables. Après transformation des cotes relevées en débits (voir V.2.), on remarque que leurs amplitudes sont autour des 200 l/s. Celles-ci reprennent de mars à début juin 2013 (dernières données disponibles) avec des amplitudes pouvant aller jusque 500 l/s. Ces phénomènes ne sont pas en corrélation avec le fonctionnement de la centrale puisque celle-ci est à pleine puissance ou à faible activité durant ces

périodes. De plus, les débits observés aux stations de *Torrelles* en amont et de *Betllans* en aval sont stables et non soumis à de telles oscillations.

De début septembre 2012 à fin janvier 2013, des variations plus importantes et non journalières de la tendance des débits sont observées. De telles variations ne peuvent être expliquées par la pluviométrie ou la centrale électrique.

A partir de mi-avril 2013, des oscillations journalières très importantes, d'amplitude allant parfois jusque 1 500 l/s, sont enregistrées.

Par contre, on note que la courbe de cotes relevées par l'appareil est inversement proportionnelle aux températures (voir Figure 11), révélant clairement un dysfonctionnement de la sonde en elle-même. Même si l'inversement n'est pas totalement parfait, celui-ci reste flagrant. La sonde de *La Millada* est donc renvoyée au fournisseur pour réparation le 3 juillet 2013. La sonde, après remplacement de la membrane de mesure et du circuit imprimé, est reçue le 30 juillet puis remise en place le 31. Par conséquent, les données antérieures à cette date sont inexploitable.

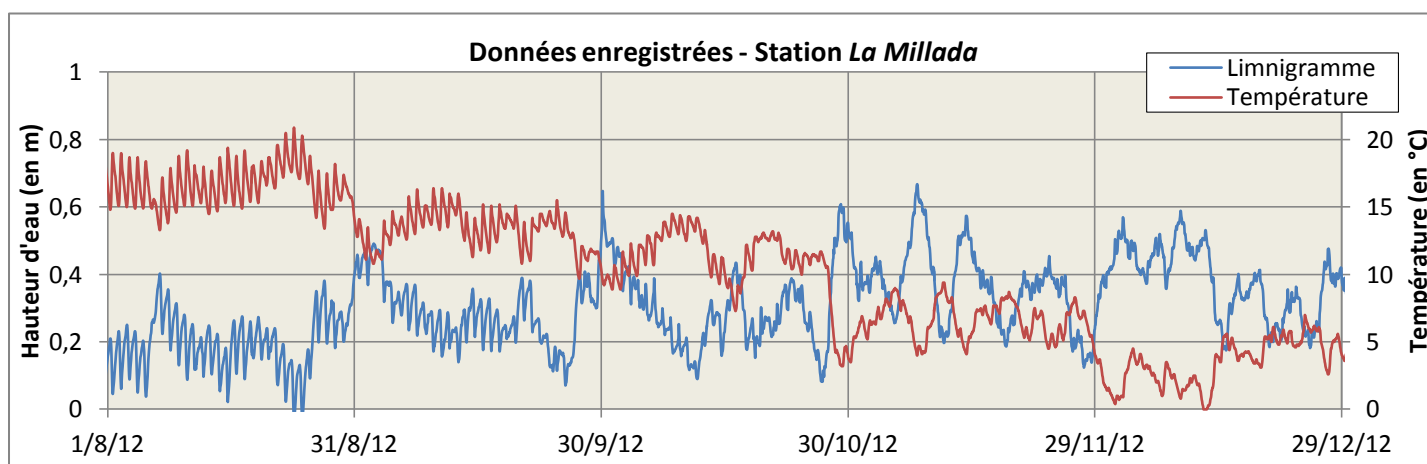


Figure 11 : Enregistrements de cotes et de températures de la station *La Millada* – Août-Décembre 2012

V.2. Conversion hauteur d'eau - débit

V.2.1. *Etablissement des courbes de tarage*

Pour une même station limnigraphique, plusieurs jaugeages doivent être effectués à différents régimes d'écoulement dans le but de couvrir au maximum le marnage et d'aboutir à une courbe de tarage la plus proche possible de la réalité. Après la réalisation de ces jaugeages au niveau de la station du *Répartiteur*, il est possible d'établir de manière correcte une courbe de tarage sous le logiciel Hydraccess dans le module CALIBRA. Seules les courbes de type biunivoques, c'est-à-dire pour lesquelles à une cote correspond un seul débit et inversement, peuvent être gérées sous ce module.

Un ajustement de formules mathématiques au groupe de jaugeages permet d'établir la courbe d'étalonnage par interpolation et extrapolation.

- Interpolation

Le groupe de jaugeages réalisé est interpolé par un ajustement potentiel de la forme :

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

Équation 3 : Interpolation par ajustement potentiel

Q : Débit du cours d'eau en m³/s ;

H : Hauteur d'eau à l'échelle en cm ;

H₀ : Valeur de la cote pour laquelle le débit s'annule.

Les paramètres de l'ajustement *a*, *H₀* et *p* sont calculés par CALIBRA.

- Extrapolation

Cependant, les jaugeages réalisés ne couvrent pas la totalité du marnage. La courbe de tarage ainsi établie est alors extrapolée vers le haut ou vers le bas afin d'obtenir une courbe de tarage théorique. Un ajustement par la formule de Manning-Strickler est effectué sous la condition de disposer d'un bon profil en travers rattaché à l'échelle. L'ajustement avec la formule de Manning-Strickler est le suivant :

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

Équation 4 : Extrapolation par la formule de Manning-Strickler

Q : Débit du cours d'eau en m³/s ;

K : Coefficient de Strickler, $K = 1/n$, *n* étant la rugosité de Manning ;

i : Pente de la ligne d'eau au niveau de la section en m/m ;

Rh : Rayon hydraulique de la section du cours d'eau en m, *Rh* est le rapport de la section mouillée divisée par le périmètre mouillé ;

S : Section mouillée du cours d'eau en m².

Ne disposant d'une mesure fiable de la pente de la ligne d'eau *i*, le terme $K * \sqrt{i}$, qui intègre à la fois les informations de pente et de rugosité, sera employé pour utiliser cette formule. Ce terme, dans de bonnes conditions, doit être plus ou moins constant, ou au moins tendre vers une constante pour les cotes élevées. Les « constantes géométriques » *Rh* et *S* sont déduites par CALIBRA à partir du profil en travers en fonction de la cote.

V.2.2. Courbe de tarage

Seule la courbe de tarage de la station hydrométrique du Clot a été entièrement réalisée. Pour les autres stations, les jaugeages ont été effectués en 2010 par Magali Servière mais les courbes ont été légèrement remaniées cette année sous Hydraccess.

Les courbes de tarage des autres stations hydrométriques sont disponibles en annexe. Ci-dessous la courbe de la station du Répartiteur de débit, ainsi que son profil en travers.

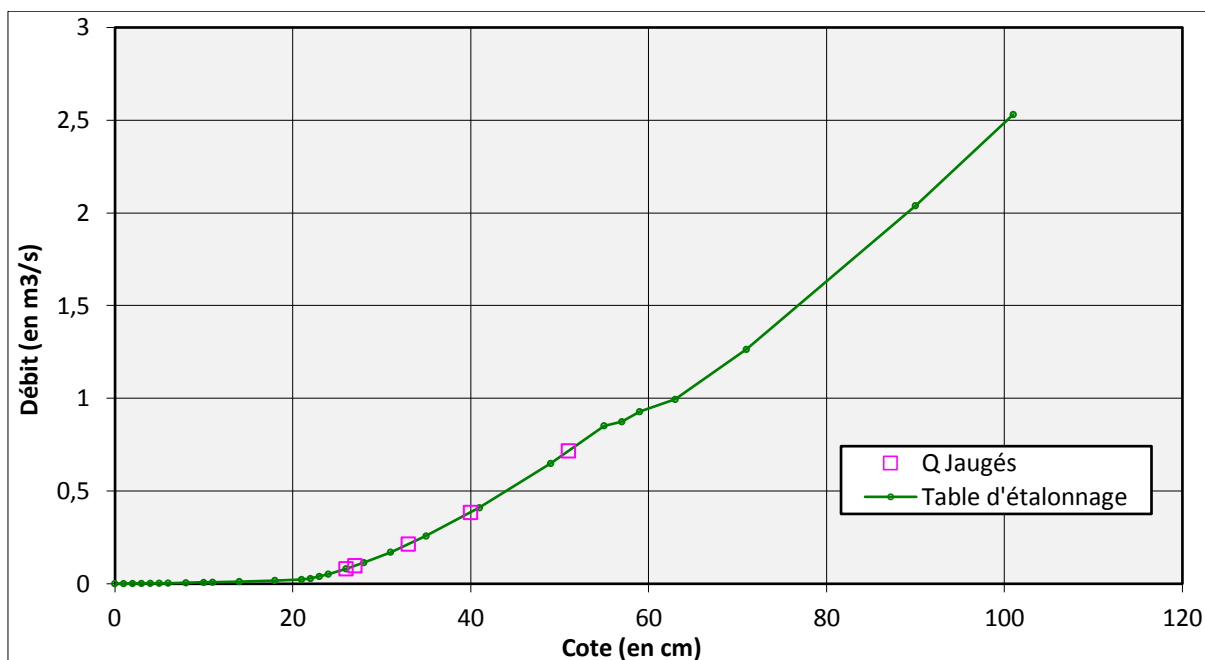


Figure 12 : Courbe d'étalonnage de la station hydrométrique du *Répartiteur de débit*

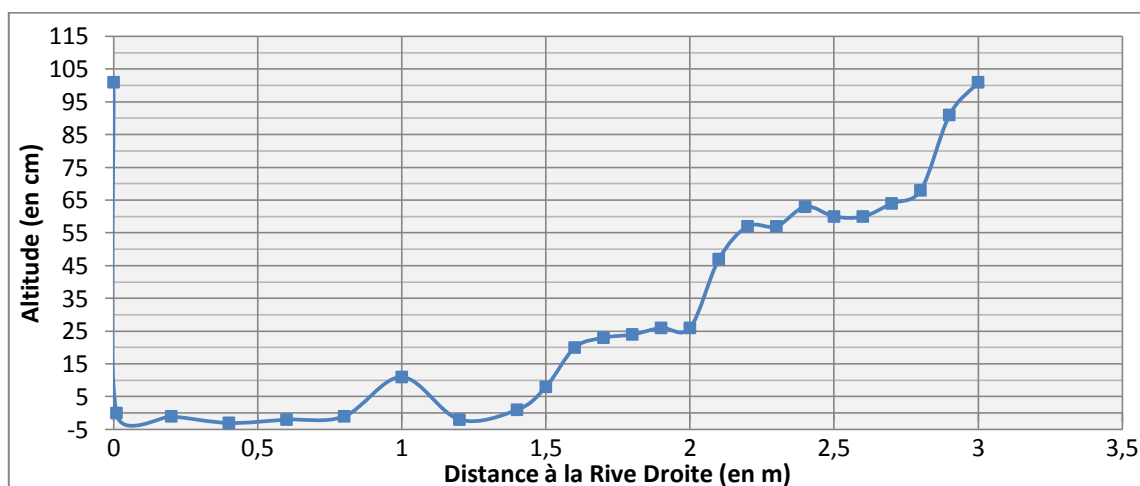


Figure 13 : Profil en travers de la station du *Répartiteur de débit*

V.2.3. Critiques des courbes de tarage

La courbe d'étalonnage de la station du *Répartiteur* doit cependant être prise en compte en considérant les sources d'erreur suivantes :

- ✓ Cinq jaugeages ont été réalisés, d'amplitude allant de 26 à 51 cm de hauteur d'eau, allant respectivement de 86 à 715 l/s. La totalité du marnage n'est pas couverte.
- ✓ Une imprécision de plus ou moins 10% autour des valeurs mesurées de débit par les jaugeages est couramment admise [Banque HYDRO., 1998].
- ✓ Tous les jaugeages ont été réalisés en période de crue, ne permettant pas d'admettre avec certitude que la relation est bien univoque. En cas d'effet d'hystérésis, à une hauteur d'eau donnée peuvent correspondre plusieurs débits. Dans ce cas, les courbes de tarage en période de crue et de décrue seraient différentes.
- ✓ Le moulinet, ne détectant pas les vitesses inférieures à 0,1 m/s, entraîne une imprécision de la mesure en cas de présence de « zones mortes ».

- ✓ Pour l'extrapolation vers le haut, le terme $K * \sqrt{i}$ a été estimé, en utilisant le profil en travers et le plus haut débit jaugé, puis fixé, alors que celui-ci varie en fonction de la cote. Il en est de même pour l'extrapolation vers le bas.
- ✓ La lecture du niveau de l'eau est imprécise, allant de $\pm 0,5$ à ± 2 cm.

En ce qui concerne les autres courbes d'étalonnage, les erreurs suivantes doivent être prises en compte :

- ✓ Les courbes ayant été réalisées en 2010, celles-ci connaissent les mêmes sources d'erreurs que citées précédemment.
- ✓ De plus, elles mériteraient d'être vérifiées et complétées par des jaugeages supplémentaires, en particulier celle de *Torrelles*.

V.3. Analyse des hydrogrammes

V.3.1. Analyse générale

Les hydrogrammes sont en Annexes 1, 2, 3 et 4. Des numéros permettent de relier les commentaires ci-dessous aux courbes.

- Station hydrométrique du Répartiteur de débit

Les débits observés sont en corrélation avec la pluviométrie et présentent en plus des effets d'emménagement et de fonte des neiges. En période sèche, le débit varie entre 20 et 30 l/s et un débit maximum de 850 l/s se produit le 11 mai et le 16 juin 2013.

Selon l'hydrogramme, la fonte des neiges provoque des oscillations journalières du débit correspondant aux alternances jour / nuit. La journée, la hausse des températures et l'ensoleillement entraînent une accélération de la fonte des névés et donc du débit, phénomène se stoppant la nuit. La pluie accélérant davantage la fonte, ces alternances sont amplifiées lors des épisodes pluvieux, sans doute par la tombée de pluie le jour et de neige la nuit. Un extrait, en Figure 14, indique que les amplitudes peuvent atteindre les 5 l/s.



Figure 14 : Alternances jour/nuit – Station du Répartiteur

Cependant, on remarque que les répercussions de la crue très importante du 6 mars 2013 (voir 7), sont moindres sur les débits du *Répartiteur*. En effet, alors que les autres hydrogrammes augmentent de manière impressionnante tant en rapidité qu'en amplitude (maximum de 1 500 l/s à *Torrelles* et

3 100 l/s à *Betllans*) suite à l'épisode pluvieux de 57,9 mm relevé le 6 mars à minuit, le débit au *Répartiteur* n'atteint que les 250 l/s. Etant donné l'enneigement des sommets à cette époque et la fonte des neiges qui n'est pas encore enclenchée, les précipitations sont stockées sous forme de neige sur les hauteurs du bassin versant du *Répartiteur*, celui-ci étant plus haut que celui de *Torrelles*. C'est pourquoi les effets de cette précipitation ne se font que très peu ressentir au niveau de la station hydrométrique du *Répartiteur*.

On note une augmentation « anormale » des débits le 29 novembre 2012 (voir ④). Or, celle-ci n'a aucune répercussion sur la station de *Betllans* en aval. Par ailleurs, on remarque qu'à cette date la sonde avait enregistré des températures de 0°C. Ceci prouve que, la rivière étant en période d'étiage, l'eau a gelé jusqu'au niveau de la membrane de la sonde et perturbé ses mesures, causant une fausse pointe de crue. Ce phénomène se produit encore les 30 janvier (voir ①) et 16 avril 2012 (voir ②) et les 3 et 7 février 2013 (voir ⑤).

- Station hydrométrique de *Torrelles*

Les débits observés sont globalement en corrélation avec la pluviométrie et ne présentent pas d'oscillations journalières anormales. En période sèche (en général juillet-août), le débit minimal est de 5 l/s. Un maximum de débit de 1 500 l/s est enregistré le 6 mars 2013 (voir ⑦) et constitue un évènement rare.

Bien que le bassin versant drainé par le bassin versant de *Torrelles* soit plus grand que celui drainé par la station du *Répartiteur*, on note que les débits de *Torrelles* sont globalement plus faibles. En effet, le bassin versant de *Torrelles* étant moins haut avec une altitude maximum de 2 232 m, celui-ci est moins soumis au gradient de pluviométrie (voir courbes des isohyètes Figure 18).

Aussi, la station est moins soumise aux oscillations journalières dues à la fonte des neiges. Avec un bassin versant moins haut, les tendances d'enneigement sont moindres.

Les 4 et 21 février 2012 (voir ①), on relève 2 fausses pointes de débit, causées par un gel de la sonde.

- Station hydrométrique de *Betllans*

La station de *Betllans* se situe en aval du canal de fuite de la microcentrale électrique de Nohèdes. En toute logique, le régime hydraulique doit être soumis aux périodes de fonctionnement de la centrale. De plus, elle est également placée en aval des pertes supposées dans le karst et de failles recoupant la rivière.

De décembre à mi-janvier 2012, les débits observés sont stables ou ponctués par la pluviométrie.

De mi-janvier à mi-mars 2012, des oscillations journalières sont observées. Les débits augmentent brutalement d'environ 100 l/s le matin à une heure variant entre 6h et 13h, pour rester à leur maximum jusqu'à minuit en général. Deux augmentations sont parfois visibles sur une journée à des heures correspondant plus ou moins aux périodes de pointe en heure d'hiver et donc aux éclusées de la centrale. Les employés de la centrale ne conservant pas d'historique de fonctionnement, il n'est pas possible de connaître les heures exactes de mises en marche et d'arrêt de cette dernière. Par conséquent, un éventuel décalage dans le temps n'est pas décelable.

De mi-mars à fin juin 2012, période de fonte des neiges, un retour à la stabilité indique que la centrale turbine à pleine puissance en continu, le niveau de l'*Estany del Clot* déborde. De juillet à novembre 2012, les faibles débits observés reflètent un arrêt de la centrale durant cette période d'étiage.

De début fin octobre 2012 à début mars 2013, les oscillations reprennent, signe de reprise de l'activité de la centrale, bien que celles-ci soient parfois masquées par une forte pluviométrie début mars. Les arrêts de turbinage sont visibles pendant les mois de novembre, décembre et janvier. En parallèle, on remarque sur l'hydrogramme en Figure 15 que les amplitudes des éclusées semblent être de 120 l/s, alors que le débit de production est normalement de 70 l/s. Cette anomalie peut être causée par une imprécision du tarage, en particulier pour les faibles débits.

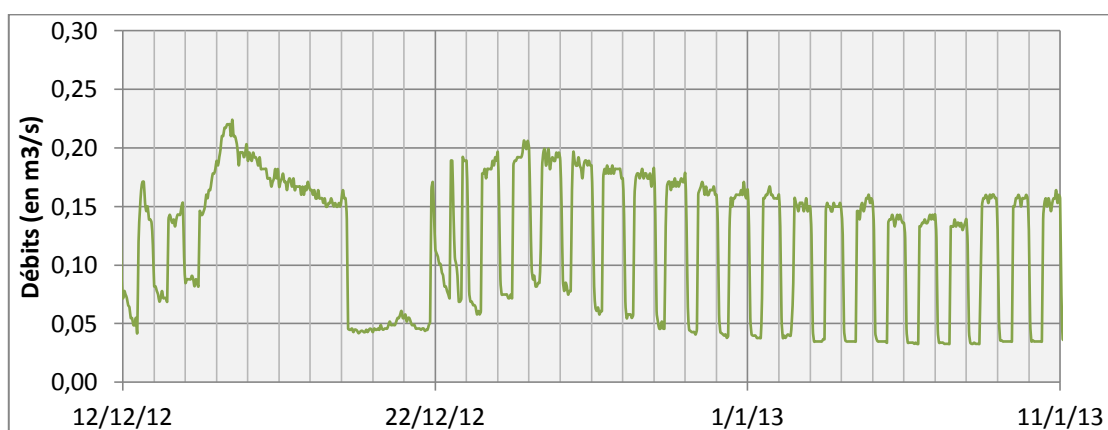


Figure 15 : Eclusées journalières et période d'arrêt de la centrale – Station de Betllans

Depuis mars 2013, les débits ne sont plus influencés par la centrale qui fonctionne à pleine puissance.

On note deux pointes de débit les 5 et 12 février 2012 (voir ①), non liées à la pluviométrie. Les courbes révèlent encore une fois un gel de l'appareil.

- Etude de la perte entre La Millada et Betllans

La sonde de *La Millada* mise en place le 31 juillet 2013, les résultats de deux semaines de mesures ont pu être analysés. On rappelle que la rivière chevauche une zone calcaire entre les stations de *La Millada* et *Betllans*.



Figure 16 : Analyse des hydrogrammes *La Millada* – *Betllans*

D'après la figure 16, les débits de *La Millada*, en amont, peuvent être supérieurs à ceux de *Betllans* de presque 100 l/s. Cette différence paraît trop importante pour être causée uniquement par une infiltration dans le karst. De plus, le bassin versant drainé par la station de *Betllans* est 1,25 fois plus grand que celui de *La Millada* et doit donc recevoir beaucoup plus d'eau.

On remarque que les débits relevés sont inférieurs aux plus faibles débits jaugés pour ces stations et qu'un défaut dans l'extrapolation vers le bas des courbes est certainement en cause.

V.3.2. Autres observations

- Aux alentours des 11-18 avril 2013 (voir ⑧), on constate une hausse des débits au niveau des 3 stations hydrométriques. La pluviométrie est nulle à ces périodes et l'eau n'est pas gelée. Il est tout de même noté dans le carnet de relevés climatologique, tenu par le personnel de la réserve, un ciel voilé, des brumes, des vents ainsi que de petites averses à cette période. L'hypothèse de précipitations d'altitude n'est alors pas à exclure. Aussi, une hausse des températures aurait aussi très bien pu accélérer la fonte des neiges et engendrer ce phénomène. En effet, les mesures de température au niveau de la station du *Répartiteur* indiquent une hausse de la température de l'eau en journée à partir du 10 avril. On relève 2,4°C le 8, 3,6°C le 10 et 4,9°C le 18, à 14h.
- Le 2 juin 2012 (voir ③), on relève la présence d'une pointe de crue au niveau de toutes les stations hydrométriques et de 1 076 l/s à *Betllans*. Cette crue n'est pas en corrélation avec la pluviométrie de Nohèdes et aucun gel des sondes n'a été constaté. Cependant, le carnet d'observations indique des averses orageuses à cette même période. Des précipitations d'altitudes d'intensité plus importantes que celles relevées Nohèdes sont vraisemblablement à l'origine de la crue.
- On remarque aux mois de mai et de juin 2013 (voir ⑨ et ⑩), à deux reprises, que les débits au *Répartiteur* ont une tendance à l'augmentation alors que les autres stations sont en décroissance. Ce phénomène a pour origine une hausse des températures, accélérant de manière importante la fonte des neiges sur le bassin versant du *Répartiteur*, celui-ci accumulant davantage de neige que le bassin versant de *Torrelles*.

V.3.3. Conclusion générale sur les débits

Les hydrogrammes nous indiquent que la période sèche se situe globalement entre juin et septembre. On note que la fonte des neiges s'enclenche mi-mars pour prendre fin vers la fin du mois de juin en 2012 et 2013, de par l'augmentation générale des débits de plusieurs centaines de litres à la seconde durant cette période.

Cependant, les bassins versants du *Répartiteur* et de *Torrelles* ne réagissent pas de la même manière aux accumulations neigeuses et à la fonte. En effet, le bassin versant du *Répartiteur* est globalement beaucoup plus haut. Celui-ci connaît donc des températures plus basses ainsi qu'une forte pluviométrie proportionnellement à sa surface. Les accumulations neigeuses se font alors en quantité beaucoup plus grande. Il peut en effet parfois neiger au *Répartiteur* alors qu'il pleut à *Torrelles*. C'est pourquoi, lors des hausses de températures, le phénomène de fonte au *Répartiteur* est retardé par l'inertie de la neige alors qu'il s'enclenche plus rapidement ailleurs.

Concernant la perte supposée dans le karst, il est tout de même possible que des échanges d'eau se produisent avec la mise charge et/ou la décharge du karst ainsi qu'avec la perte au niveau de la faille de Merens. Cette faille alimente probablement le karst profond du synclinal de Villefranche et l'eau captée par le karst doit rejoindre à l'aval la résurgence de Ria (voir Figure 6). Cette géomorphologie (karst) et cette tectonique (faille de Merens) particulières du lit de la rivière de Nohèdes pourraient éventuellement avoir un effet tampon sur le débit.

Le fait de retrouver les oscillations journalières sur *Betllans*, provoquées par les éclusées de la centrale, semble compromettre cette thèse de perte ou de gain d'eau à ce niveau. Néanmoins, il n'est pas à écarter la supposition d'échanges avec le karst en quantité stable (et non en proportion). Ainsi, une quantité à peu près stable d'eau serait perdue ou gagnée au niveau des zones karstiques et de la faille selon l'état de charge du karst. L'excédent de débit rejeté par la centrale ne serait pas absorbé et « lissé ». Ceci pourrait expliquer le fait de retrouver des oscillations journalières en aval de cette zone. Cependant, ne disposant d'aucune information provenant de *La Millada*, il n'est pour l'instant pas possible de se prononcer définitivement.

V.4. Analyse des hydrogrammes de crue

Les hydrogrammes de crue, et en particulier leur courbe de décrue et de tarissement, renferment beaucoup de renseignements quant aux bassins versants, notamment en ce qui concerne leur rapidité de restitution.

Un hydrogramme de crue est caractérisé par une courbe de concentration, un débit de pointe, une courbe de décrue et une courbe de tarissement.

V.4.1. Schéma de Maillet

L'application du schéma de Maillet consiste à analyser les courbes de décrue et de tarissement et à ainsi identifier chaque composante du débit total (ruissellement superficiel, écoulement souterrain) à la vidange d'un réservoir. Le débit de vidange d'un réservoir pour un écoulement non perturbé est :

$$Q(t) = Q_0 * e^{-k(t-t_0)}$$

Équation 5 : Loi de vidange d'un réservoir, loi de Maillet

Q_0 : Débit au temps t_0 en m^3/s ;

t_0 : Temps du début du tarissement en j ;

k : Coefficient de tarissement (ou constante de vidange caractéristique du réservoir considéré) en j^{-1} .

Le tracé de $\ln(Q)$ permet de différencier en théorie trois pentes, représentant le ruissellement superficiel, les écoulements hypodermiques et souterrains. La constante k est différente pour chaque type d'écoulement et correspond à la pente de l'équation :

$$\ln(Q) = (\ln(Q_0) + t_0k) - kt$$

Équation 6 : Détermination de k

Les ordres de grandeur admis pour k [LARUE & GIRET, 2004] sont :

- $3 > k > 0,5$: Ruissellement superficiel, directement conditionné par le volume des pluies ;
- $5 > k > 0,1$: Ecoulement hypodermique ou ressuyage des sols ;

3 juin - 30 août 2013

- $0,1 > k > 0$: Tarissement de nappe phréatique.

Ensuite, la « capacité d'emmagasinement » du bassin à l'instant t_0 , homogène à un volume, permet d'évaluer le volume d'eau disponible pour l'écoulement de base de la courbe de tarissement. Elle est définie par :

$$\text{Capacité d'emmagasinement} = \int_{t_0}^{\infty} Q(t)dt = \frac{Q_0}{k}$$

Équation 7 : Détermination de la capacité d'emmagasinement

Etant donné qu'il n'est pas possible de définir une borne supérieure de l'intégrale à cause de précipitations « parasites », l'expression Q_0/k , plus simple, sera utilisée.

Un hydrogramme de crue est analysé de la manière ci-dessous :

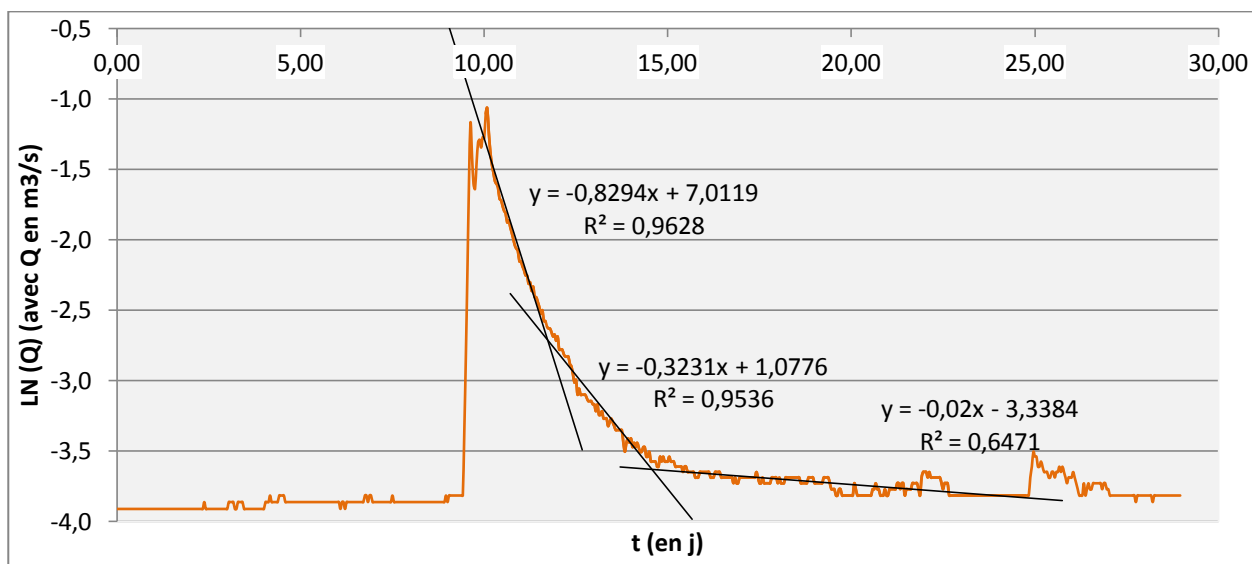


Figure 17 : Analyse d'un hydrogramme de crue – Station du Répartiteur – 20/09/12 au 19/10/12

Trois hydrogrammes de crue ont ainsi été analysés. Les résultats sont les suivants :

Date	Bassin versant	Coefficient de tarissement (j-1)	Coefficient de corrélation R2	Mode d'écoulement	Capacité d'emmagasinement (m3)
30 sept - 1 oct 2012	Répart	0,8294	0,96	Ruissellement direct	x
1 - 4 oct 2012	Répart	0,3231	0,95	Hypodermique	x
4 - 14 oct 2012	Répart	0,02	0,65	Tarissement	120 960
6 - 7 mars 2013	Torrelles	0,5268	0,92	Ruissellement direct	x
10 - 14 mars 2013	Torrelles	0,1546	0,98	Hypodermique	x
14 - 24 mars 2013	Torrelles	0,0584	0,86	Tarissement	328 438
6 - 7 mars 2013	Betllans	0,4467	0,92	Ruissellement direct	x
7 - 14 mars 2013	Betllans	0,1312	0,98	Hypodermique	x
14 - 23 mars 2013	Betllans	0,0393	0,66	Tarissement	1 622 473

Tableau 4 : Résultats de l'analyse des hydrogrammes de crue par la loi de Maillet

Les capacités d'emmagasinement calculées permettent d'estimer le volume des réservoirs. La capacité du bassin versant du *Répartiteur*, calculée en période d'étiage, correspond au réservoir que constituent les formations granitiques des hauts plateaux. Le coefficient de corrélation étant très médiocre (0,65), ce résultat reste néanmoins à appréhender avec précaution. A noter que ce volume d'eau, engendrant l'écoulement de base, a pour origine les précipitations survenant en dehors du bassin versant topographique et s'infiltrant dans le granite (voir V.5.5.).

Le bassin versant de *Torrelles*, constitué essentiellement de schiste, n'est pas en relation avec un réservoir souterrain. La capacité calculée correspondrait en fait au réservoir que constitue les masses denses de végétation, emmagasinant de l'eau et la restituant petit à petit. Le coefficient de tarissement est alors plus élevé car l'écoulement est plus rapide. Par contre, cette capacité est calculée après un épisode pluvieux amorçant la fonte des neiges. Le volume est par conséquent fortement surestimé. De plus, il devrait normalement être plus petit que celui du *Répartiteur*, raccordé à un véritable réseau souterrain.

La capacité d'emmagasinement du bassin versant de *Betllans* est également surestimée pour la même raison.

Cependant, ces résultats constituent une première estimation et nécessitent d'être vérifiés par l'analyse d'autres hydrogrammes de crue, survenant par exemple en automne où ils ne seront pas influencés par la fonte des neiges.

V.4.2. Temps de propagation

Les hydrogrammes de crue permettent normalement d'évaluer le temps de propagation *tp* d'une crue. Le temps de propagation correspond à la durée qui sépare le passage de la pointe de crue entre deux sections du cours d'eau. Pour les écoulements superficiels, la vitesse de l'eau peut en théorie varier de 1 à une dizaine de m/s.

Par contre, les écoulements sont trop rapides pour être définis avec précision avec des sondes de pas de temps horaires. Pour faire correctement, il faudrait modifier le temps de scrutation des sondes à cinq minutes par exemple, juste avant la prévision de grosses précipitations.

V.5. Bilan hydrologique du bassin versant de Nohèdes

On cherche ici à effectuer un bilan hydrologique sur une durée de 1 an, de janvier à décembre 2012⁴, année particulièrement sèche. Les variables recherchées sont :

- ✓ La **pluie brute**, correspondant au volume de pluie précipité ;
- ✓ La **pluie nette**, correspondant au volume des précipitations participant à la crue ;
- ✓ Les **pertes**, correspondant au volume de pluie perdu, intercepté par la végétation, stocké dans le sol et à la surface du sol.

⁴ Les sondes manométriques ayant été mises en place en décembre 2011, seules les données de débits de l'année complète de 2012 sont disponibles.

Ce qui vérifie le bilan suivant :

$$\text{Pluie brute} = \text{Pluie nette} + \text{Pertes}$$

Équation 8 : Bilan sur les précipitations

V.5.1. Estimation de la pluie brute

Afin d'établir une relation pluie-débit, il est nécessaire de connaître la pluviométrie à l'échelle du bassin versant. Or, un seul poste de relevé pluviométrique est présent au niveau de la maison de la réserve de Nohèdes. Etant donné l'insuffisance des postes ainsi que le fort gradient de pluviométrie, les méthodes de spatialisation des pluies sur la surface du bassin versant (krigeage, méthode hypsométrique...) ne sont pas adaptées. L'étude ci-présente s'appuiera donc sur un modèle établi par Météo France. Il s'agit d'une image.JPEG représentant les courbes isohyètes sur le massif du Madres et correspondant à une moyenne interannuelle sur une période de 30 ans.



Figure 18 : Carte des courbes isohyètes du massif du Madres (avec limite de la Réserve Naturelle de Conat)

La carte des courbes isohyètes a donc été calée sous MapInfo en tant qu'image raster. Pour ce faire, il a fallu lui implémenter une projection Lambert II Carto – Paris, la même projection utilisée pour les fonds de cartes ou autres tables sous MapInfo, en procédant à un calage de 4 points fictifs. Puis, les courbes sont représentées par des polygones sur le bassin versant. Les sous-bassins versants, appartenant à chaque station hydrométrique, ont également été représentés par des polygones à l'aide des courbes de niveau et en suivant les lignes de crêtes de la carte IGN (voir Figure 19).

Il est ensuite possible d'estimer la pluie brute pour chacun des bassins versants. Le recoupage des polygones représentant les courbes isohyètes avec ceux représentant les sous-bassins versants permet de calculer des aires. Les aires sont ici calculées en hectares avec le mode CartesianArea().

Cependant, il est primordial d'appliquer un coefficient adapté à la pluviométrie de l'année d'étude pour procéder à une comparaison correcte. La pluviométrie annuelle de 2012 étant de 445 mm (enregistrée par le pluviomètre de Nohèdes) et le pluviomètre se situant sur la courbe de 700 mm (courbes isohyètes de Météo France), un coefficient de 0,64 a été attribué à toutes les courbes.

Le calcul de la pluie brute pour un bassin versant est le suivant :

$$PB (m^3) = \sum (A_{iso} * 10\,000 * P_{iso} * 0,64)$$

Équation 9 : Calcul de la pluie brute interannuelle

A_{iso} : Aire du polygone issu des courbes isohyètes en ha représentant la pluie P_{iso} au sein du polygone représentant le bassin versant en question ;

P_{iso} : Pluie brute en mm.

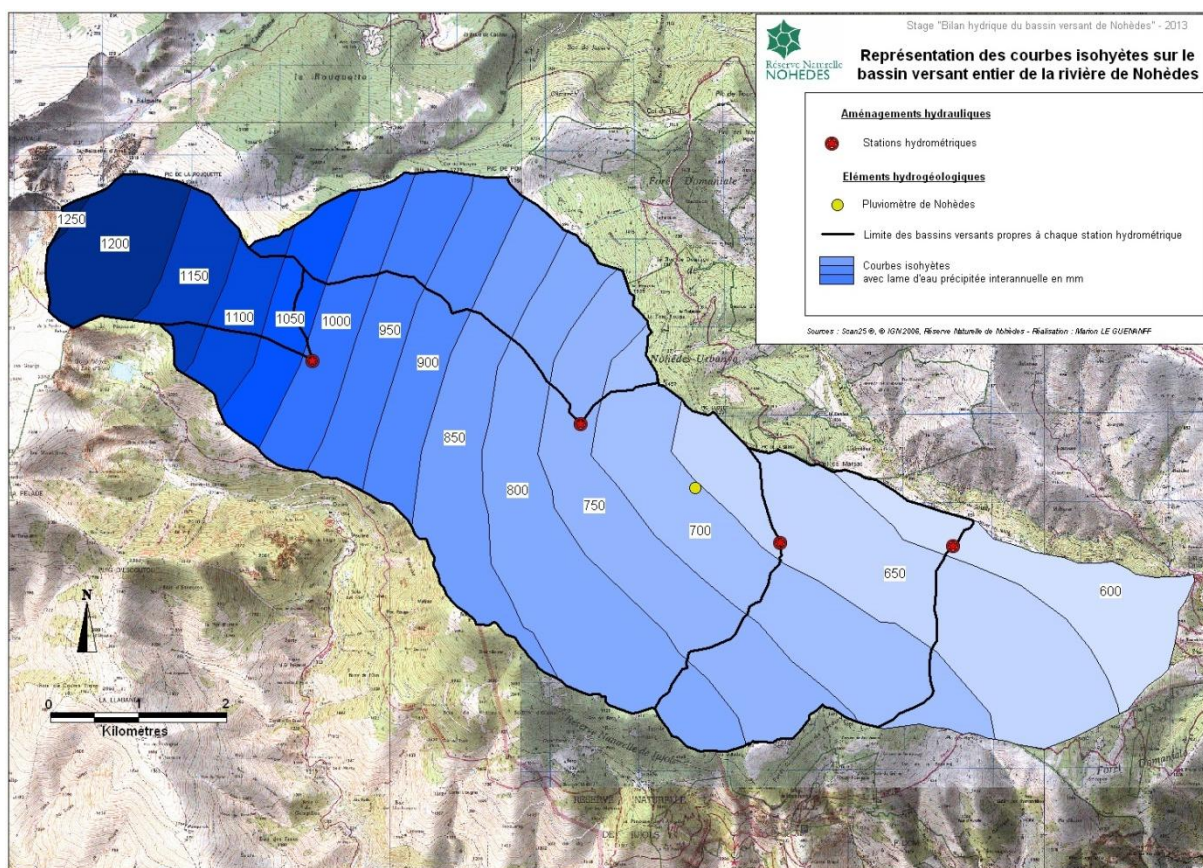


Figure 19 : Représentation des courbes isohyètes sous MapInfo

V.5.2. Estimation de la pluie nette

La pluie nette, encore appelée pluie efficace ou pluie ruisselée, est quant à elle estimée à partir des hydrogrammes. Le pas de temps étant de 1h, celui-ci est suffisamment petit pour permettre l'utilisation de la méthode des rectangles, correspondant à l'intégrale des débits. Les erreurs sont dans ce cas minimisées. La formule suivante est utilisée :

$$PN (m^3) = \sum (Q * d)$$

Équation 10 : Calcul de la pluie nette

Q : Débit en m^3/s issus de la conversion des hauteurs d'eau enregistrées par les sondes ;

d : Durée en s correspondant à la cadence de scrutation de la sonde (ici 1 h, soit 3 600 s).

Etant donné que les hydrogrammes sont surestimés avec le gel des sondes, les fausses pointes de crue engendrées ne seront pas présent en compte dans les calculs de pluie nette. Ainsi, lorsqu'une

3 juin - 30 août 2013

sonde relève des températures de 0°C, les débits sont ramenés à 0 m³/s. Pour donner un exemple en termes de chiffres, la fausse pointe de crue illustrée en figure 20 aurait autrement causé une surestimation de 120 000 m³ dans le calcul de la pluie nette en l'espace de 4 jours.

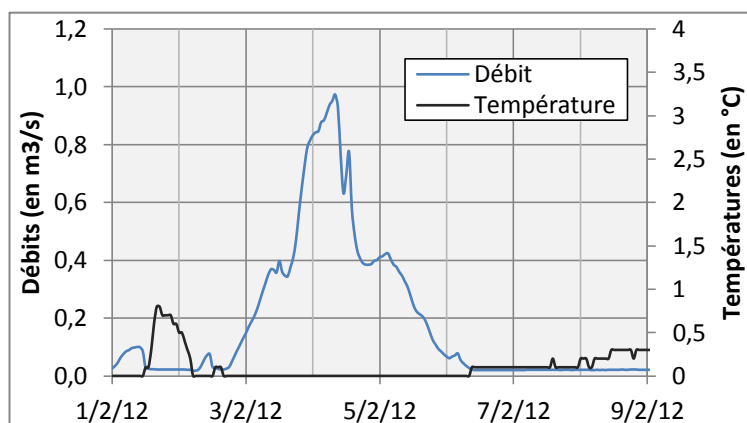


Figure 20 : Fausse pointe de crue – Station de Torrelles

V.5.3. Estimation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est le processus quantitativement le plus important lorsque l'on considère la transformation de la pluie en débit à l'exutoire d'un bassin versant. Théoriquement, sur les surfaces continentales, les deux tiers de l'eau de pluie tombant sur les bassins versants rejoignent l'atmosphère par évaporation et transpiration [OUDIN, 2004].

On distingue :

- ✓ L'évapotranspiration potentielle de référence (ETP ou ET0), représentant la quantité d'eau qui aurait pu s'évaporer si l'eau n'était pas un facteur limitant et avec un couvert végétal de référence de gazon ;
- ✓ L'évaporation réelle (ETR), quantité d'eau réellement évapotranspirée compte tenu de la disponibilité en eau.

Ainsi, on note que : $ETR \leq ETP$.

- Estimation de l'ETP moyenne annuelle par la formule de Thornthwaite

L'évapotranspiration n'est pas, comme la pluie, une variable directement mesurable à l'échelle du bassin versant. On a donc recours à une variable estimée, l'ETP, pour représenter la capacité évaporatoire de l'atmosphère. Aussi, le concept d'ETP est généralisé et a été développé pour des applications agronomiques, son utilisation à l'échelle du bassin versant est par conséquent non démontrée.

La formule de Thornthwaite, ne dépendant que de la variable climatique de température, sera utilisée ici. De cette manière, des valeurs moyennes inter-mensuelles d'ETP, à ne pas confondre avec une valeur d'ETP d'un mois donné, sont calculées comme suit :

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

Équation 11 : Formule de Thornthwaite

t_i° : Moyenne interannuelle des températures du mois en degrés Celsius. Si cette moyenne est nulle ou négative, l'ETP est nulle ;

$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 * t_i^\circ)^{1,514}$: Indice thermique annuel, somme des 12 indices thermiques mensuels ;

$a = 0,016 * I + 0,5$: Fonction de l'indice thermique annuel I ;

F : Facteur correctif qui correspond à la durée du mois et du jour. Il dépend du mois m et de la latitude ϕ du lieu.

Par contre, la formule de Thornthwaite n'est pas adaptée à un bassin versant de type montagnard, la moyenne interannuelle des températures variant considérablement avec l'altitude. Un gradient thermique adiabatique de 0,6 °C tous les 100 mètres est appliqué à l'échelle du bassin versant. Pour ce faire, les courbes d'altitudes sont représentées sous MapInfo par des polygones et une température leur est attribuée. Un indice thermique annuel I par classe d'altitude est calculé. C'est celui-ci qui est pris en compte dans l'estimation de l'ETP, bien que l'utilisation d'un indice thermique annuel pondéré donne des résultats à peu près semblables. L'ETP est donc calculée pour chaque tranche d'altitude et pour chaque mois, puis ramenée à un volume, pour un bassin versant donné, par la formule suivante :

$$ETP (m^3/mois) = A_{t_i^\circ} * ETP(mm/mois) * 10$$

Équation 12 : Estimation de l'ETP d'un bassin versant pour une tranche d'altitude

$ETP (m^3/mois)$: Volume d'ETP mensuelle correspondant à une tranche d'altitude présente au sein du bassin versant en question ;

$A_{t_i^\circ}$: Aire du polygone issu des courbes d'altitude en ha représentant une tranche de température moyenne mensuelle t_i° au sein du polygone représentant le bassin versant en question ;

$ETP(mm/mois)$: ETP mensuelle correspondant à une tranche d'altitude.

L'ETP annuelle est enfin calculée en sommant les volumes d'ETP de chaque tranche d'altitude et de chaque mois :

$$ETP (m^3/an) = \sum_{mois=1}^{12} \sum_{altitude=i}^n ETP(m^3/mois)$$

Équation 13 : Estimation des moyennes interannuelles d'ETP d'un bassin versant donné

- Estimation de l'ETR moyenne annuelle par la formule de Turc

Aussi, M. Turc propose une formule permettant d'évaluer une moyenne annuelle d'ETR. Il s'agit en fait du calcul d'un déficit d'écoulement qui n'est identifiable à l'ETR à condition qu'il n'y ait pas d'échanges souterrains à la frontière du bassin versant et que les variations de la réserve en eau souterraines soient négligeables. Le bassin versant de Nohèdes ne respectant pas ces conditions, il s'agit avant tout d'une estimation qui permettra une comparaison avec l'ETP de Thornthwaite. L'ETR moyenne annuelle est estimée comme suit :

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

Équation 14 : Formule de Turc

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

T : Température moyenne annuelle en °C ;

P : Pluie moyenne annuelle en mm.

Tout comme précédemment, un coefficient adiabatique thermique sera appliqué au bassin versant. La température moyenne annuelle sur la période 1987-2007 est de 9,98°C à 970 mètres d'altitude. L'ETR est donc calculée en termes de volume pour chaque tranche d'altitude puis sommée afin d'obtenir l'ETR pour chaque bassin versant de la façon suivante :

$$ETR (m^3/an) = \sum_{altitude=i}^n ETR(mm/an) * A_{t_i} * 10$$

Équation 15 : Estimation des moyennes interannuelles d'ETR pour un bassin versant donné

ETR (mm/an) : Volume d'ETR annuelle correspondant à une tranche d'altitude présente au sein du bassin versant en question.

V.5.4. Coefficient de ruissellement

Il est ensuite intéressant de calculer un coefficient de ruissellement *Cr*, utilisé pour caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler. Il est défini par le rapport entre la quantité d'eau ruisselée à la surface du sol (PN) et celles des précipitations (PB). Le *Cr* est calculé comme suit :

$$Cr = PN/PB$$

Équation 16 : Calcul du coefficient de ruissellement

V.5.5. Résultats et interprétations

- Moyennes interannuelles

Les moyennes interannuelles, calculées à partir de moyennes sur la période 1987-2007, sont les suivantes :

Stations	PB (m3)	Lame d'eau PB (m)	ETP (m3) Thornthwaite	ETR (m3) Turc
Répartiteur	4 444 322	1,15	1 594 770	1 363 555
Torrelles	4 871 717	0,88	2 834 709	2 389 287
La Millada	23 430 754	0,89	13 452 056	11 350 030
Betllans	28 054 560	0,85	15 847 548	13 381 734

Tableau 5 : Estimation des moyennes interannuelles

L'ETP calculée par la formule de Thornthwaite est plus élevée que l'ETR calculée par la formule de Turc, indiquant que ces résultats sont logiques. Cependant, il n'est pas possible de les prendre en compte dans les calculs de 2012 car ces données représentent des moyennes interannuelles et 2012 est une année beaucoup trop sèche pour permettre une comparaison.

L'ETP et l'ETR sont très certainement surestimées car, bien que les forêts présentes versant Nord constituent des « moteurs évapotranspiratoires », celles-ci ne sont pas fortement exposées au soleil et donc moins soumises à l'évapotranspiration. Les landes à genêts, présentes versant sud, n'ont quant à elles pas de grandes capacités évapotranspiratoires.

- Calculs sur 2012

Les paramètres hydrologiques de l'année 2012, calculés à partir des données relevées en 2012, sont les suivants :

Stations	PB (m3) avec coefficient	PN (m3)	Cr
<i>Répartiteur</i>	2 844 366	3 637 890	1,28
<i>Torrelles</i>	3 117 899	1 119 294	0,36
<i>La Millada</i>	14 995 682	x	x
<i>Betllans</i>	17 954 918	6 238 498	0,35

Tableau 6 : Estimation des paramètres hydrologiques de l'année 2012

D'après ces premiers résultats, la pluie brute est largement supérieure à la pluie nette pour les stations de *Torrelles* et *Betllans*. Concernant les coefficients de ruissellement, celui de *Betllans* et de *Torrelles* sont sensiblement identiques. Des infiltrations dans les terrains calcaires, présents uniquement sur le bassin versant de *Betllans*, ne sont donc pas mises en évidence. Autrement, une plus faible capacité à ruisseler de ce même bassin versant devrait être observée par un coefficient plus faible.

Une attention particulière se doit d'être apportée à la station du *Répartiteur* où la pluie nette est supérieure à la pluie brute. Cela révèle donc un apport d'eau supplémentaire à la pluviométrie représentée à l'échelle du bassin versant. Ces apports sont occasionnés par les phénomènes explicités ci-dessous.

D'une part, les sommets sont le siège d'écoulements souterrains provenant des plateaux d'altitude, signifiant que le bassin hydrologique (ou bassin versant réel) est plus grand que le bassin versant topographique pris en compte ici. En effet, le plateau du *Pla des Gourgs*, au-dessus du *Gorg Blau*, porte des restes probablement épais d'altérites⁵ et des arènes sableuses qui peuvent atteindre 50 m d'épaisseur et constituent un aquifère [CALVET, 2012]. Des écoulements se font également par les fissures du granite. Aussi, il existe une source au niveau du *Gorg Estelat*, apportant tout au long de l'année une eau souterraine directement dans le lac. D'ailleurs, celui-ci ne gèle jamais au niveau du point d'émergence de la source.

D'autre part, la climatologie et la géomorphologie particulières des sommets sont également en cause. En effet, les précipitations neigeuses sur le plateau sommital sont charriées vers le bassin versant par des vents forts de Tramontane, de directions allant du ONO au N, d'octobre à mai. On note d'ailleurs que les accumulations neigeuses ne sont jamais observées sur le plateau, les neiges étant immédiatement charriées. Ces phénomènes sont illustrés Figure 21.

Cependant, ce coefficient de 1,28, plus de trois fois plus fort que les autres, ne peut s'expliquer uniquement avec la contribution des plateaux et celui-ci semble surestimé. Le modèle des courbes isohyètes utilisé pour calculer la pluie brute est certainement en cause. En effet, il sous-estime fort probablement la pluviométrie en altitude car certains auteurs parlent de 2 900 mm en altitude alors que le modèle indique 1 250 mm. On remarque en Figure 17 que les courbes sont incomplètes en altitude, témoignant de leur faible fiabilité, du moins à ce niveau.

⁵ Roche meuble.

3 juin - 30 août 2013

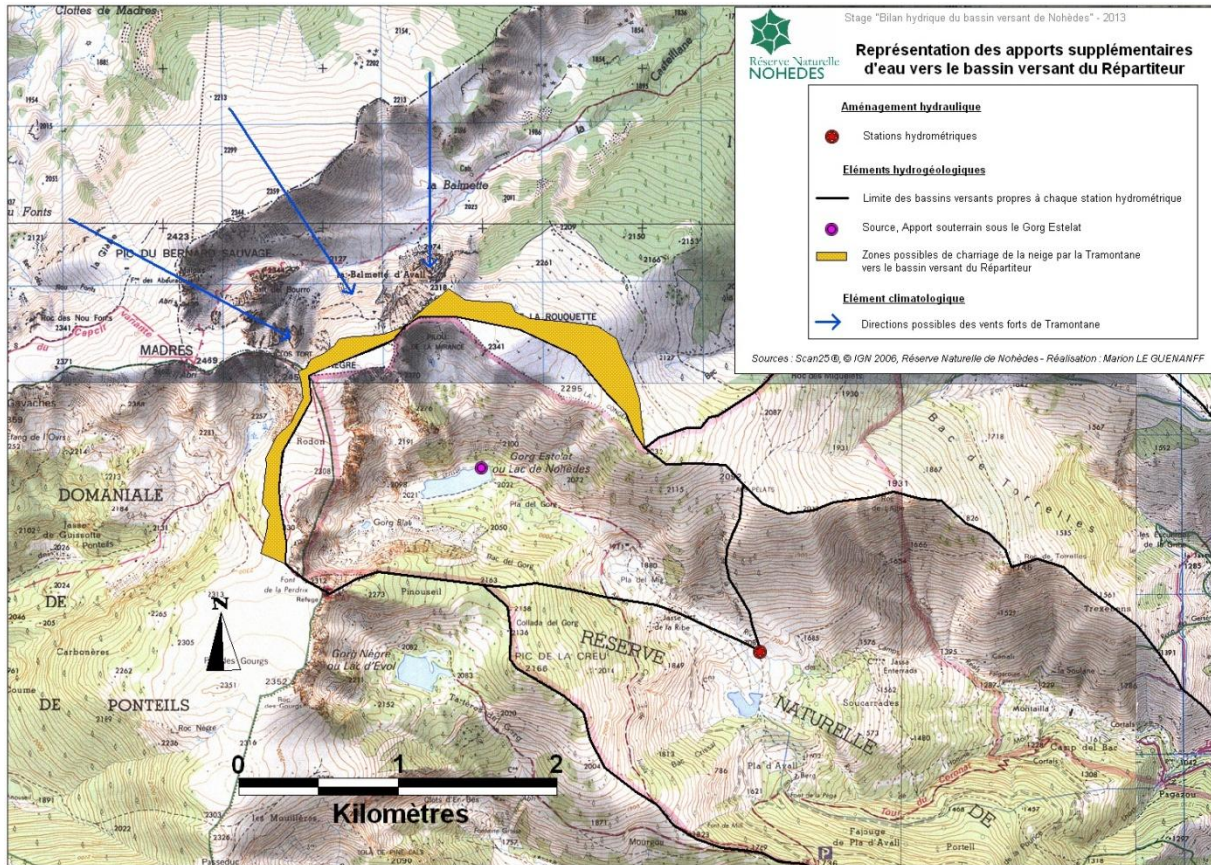


Figure 21 : Apports d'eau vers le bassin versant du Répartiteur de débit

- Contributions des bassins versants

Le tableau suivant représente les volumes de pluie nette pour chaque mois, calculés à partir des hydrogrammes, et pour chaque station hydrométrique. Les pluies nettes du Répartiteur et de Torrelles provenant de bassins versants différents, les pourcentages représentent la contribution de chacun de ces deux bassins versants à l'écoulement de la pluie nette de Betllans.

Mois	Stations				
	Répartiteur		Torrelles		Betllans
	PN (m3)	%	PN (m3)	%	PN (m3)
janv-12	240 570	47	91 922	18	506 686
févr-12	148 813	59	68 065	27	253 224
mars-12	325 501	48	153 796	23	674 345
avr-12	507 046	39	274 691	21	1 296 634
mai-12	1 098 652	63	240 505	14	1 756 847
juin-12	575 816	70	70 585	9	827 377
juil-12	145 976	118	24 235	20	124 168
août-12	62 431	119	18 094	35	52 272
sept-12	78 365	102	21 730	28	77 018
oct-12	144 306	92	32 670	21	156 589
nov-12	148 853	82	35 244	20	180 644
déc-12	161 561	49	87 757	26	332 694
janv-13	145 289	38	105 304	27	386 388
févr-13	104 501	14	253 768	35	729 857
mars-13	299 095	13	719 723	32	2 257 445
avr-13	894 647	39	539 276	23	2 308 702
mai-13	1 507 856	54	595 019	21	2 801 538
juin-13	1 529 543	69	289 357	13	2 221 729
juil-13	598 878	83	40 291	6	721 951

Tableau 7 : Pluies nettes mensuelles

De manière générale, on remarque que le bassin versant du *Répartiteur* contribue davantage aux écoulements de surface que celui de *Torrelles*. Bien que plus petit, il connaît en effet une pluviométrie plus importante, des apports neigeux supplémentaires entraînés par les vents de Tramontane et des apports par des écoulements souterrains.

En période d'étiage, en particulier les mois de juillet, août et septembre 2012, ces résultats indiquent que le bassin versant du *Répartiteur* contribue à plus de 100 % à l'écoulement de *Betllans*. Durant cette période, les débits au *Répartiteur* varient de 10 à 50 l/s tandis qu'ils sont la plupart du temps autour des 15-30 l/s à *Betllans*. Ces débits sont inférieurs aux plus faibles débits jaugés et sont par conséquent peu robustes. Ils révèlent un défaut dans l'extrapolation des courbes vers le bas. En effet, le plus faible débit jaugé est de 83 l/s au *Répartiteur* et de 44 l/s à *Betllans*. Durant les périodes d'étiage, ces résultats ne sont donc pas à prendre en considération.

V.5.6. Critique des résultats

La robustesse de certains résultats semble à remettre en cause pour certains des calculs effectués. Notamment concernant la pluie brute interannuelle. En effet, seules les données de 2012 issues des stations hydrométriques peuvent être exploitées. Or, 2012 est une année très sèche, non représentative d'une moyenne sur 20 ans utilisée avec les courbes isohyètes. Cela rend le calcul de la PB incertain, même si un coefficient de correction a été attribué.

Aussi, la justesse des courbes isohyètes est incertaine, surtout en altitude où elles ne sont plus représentées au-delà de la limite supérieure du bassin versant du *Répartiteur*.

D'autre part, les données de la station de *La Millada* manquantes sur l'année de 2012, il n'est pas possible de mettre en évidence un éventuel emmagasinement d'eau de la rivière au niveau de son passage sur le karst par le calcul de la pluie nette. Si l'on suppose une infiltration à cet endroit, un emmagasinement durant une année sèche telle que 2012 semble plausible. En effet, en cas d'emmagasinement d'eau, la différence de la pluie nette de *La Millada* avec celle de *Betllans* pourrait être positive, même si le bassin versant de *Betllans* est plus grand et draine plus d'eau, et en cas de restitution négative. Pour cela, il faudrait procéder à une comparaison sur plusieurs années comportant des années sèches et des années pluvieuses.

Enfin, la fiabilité de la pluie nette est parfois remise en question, en particulier pour les faibles débits.

V.5. Mise en place de la 5^{ème} station

Après prospection de la rivière de Nohèdes entre Betllans et Conat, un emplacement a été retenu pour l'installation d'une cinquième station hydrométrique à proximité de Conat (voir Figure 5). Le site se situe au niveau d'un rétrécissement du cours d'eau, augmentant sa sensibilité. La station sera installée exactement au début de l'élargissement de la section, assurant un écoulement régulier non perturbé par des remous et une protection contre tout obstacle pouvant surgir lors de crues. L'échelle sera fixée à un support rocheux, de forme aplanie et suffisamment haut pour que les appareils électroniques puissent être placés au-dessus de la ligne des plus hautes eaux.

L'accès, par contre, est plus délicat car nécessite de remonter le cours d'eau en waders depuis Conat sur plusieurs centaines de mètres.

VI. Conclusion

Cette étude hydrologique du bassin versant de Nohèdes a permis d'apporter une contribution à l'établissement d'un bilan hydrologique à partir de l'étude des paramètres hydrologiques et des différents limnigrammes fournis par les sondes manométriques. Des phénomènes hydrogéologiques et climatologiques pouvant influencer les résultats ont été décrits et des suppositions ont été émises.

Ainsi, des moyennes interannuelles ont pu être estimées, à savoir l'évapotranspiration potentielle, en s'appuyant sur un gradient adiabatique de température ; l'évapotranspiration réelle, calculée à partir de ce même coefficient et de la pluie brute ; ainsi que la pluie brute, estimée à l'aide de courbes isohyètes.

D'une part, l'analyse des hydrogrammes, très riches, a permis d'étudier la réaction du bassin versant à la pluviométrie, grâce au pluviomètre installé au village de Nohèdes à 970 m d'altitude. D'autre part, les débits transitant dans la rivière ont pu être appréhendés. Il a été possible de quantifier les volumes énormes d'eau que la rivière peut drainer en période de crue, ainsi que ceux en période d'étiage. Toutefois, il ne faut pas oublier que ces valeurs se basent parfois sur des extrapolations vers le haut ou le bas des courbes de tarage.

De par cette analyse, il a également été possible de confirmer certaines hypothèses, comme la quantité impressionnante d'eau supplémentaire apportée au niveau du bassin versant du *Répartiteur* par les écoulements souterrains et la Tramontane, ainsi que du réservoir que constitue la végétation présente sur le bassin versant de la vallée de Torrelles.

Aussi, les limites des sondes ont été cernées. En effet, le gel peut entraîner une forte surestimation du débit et les capteurs sont parfois soumis à une dérive qu'il est nécessaire de rectifier manuellement.

Par contre, l'étude du fonctionnement de la perte supposée de la rivière dans les zones karstiques fût impossible étant donné le dysfonctionnement de la sonde de *La Millada*, placée à un endroit stratégique. Cette sonde réparée et remise en place cette année, l'enregistrement de nouvelles données permettra par la suite d'étudier en particulier les phénomènes se produisant à ce niveau.

VII. Perspectives

Comme dit précédemment, ce travail constitue une contribution et beaucoup de choses restent à faire.

VII.1. Courbes de tarage

Il est tout d'abord absolument essentiel de vérifier et compléter par des jaugeages les courbes de tarage. La priorité doit être donnée, dans la mesure du possible, aux stations hydrométriques ci-dessous :

Stations	A compléter en étiage	A compléter en crue	A vérifier
<i>Répartiteur</i>	x		
<i>Torrelles</i>	x	x	x
<i>La Millada</i>	x		x
<i>Betllans</i>	x		x

Tableau 8 : Objectifs de complétion des courbes de jaugeages

Ceci permettrait de vérifier l'exactitude des débits, et donc de la pluie nette, calculés dans ce rapport.

La réalisation de mesures pour les faibles débits est indispensable afin de pouvoir étudier correctement la réaction des bassins versants en période d'étiage et de préciser les phénomènes se produisant au niveau de la perte supposée. Aussi, des faibles débits sont observés en été durant plusieurs mois. Une imprécision de la courbe de tarage peut donc entraîner une erreur importante dans l'estimation de la pluie nette.

Pour la station de *Torrelles*, seuls trois jaugeages avaient été réalisés, soit trop peu pour l'établissement d'une courbe de jaugeage correcte.

En ce qui concerne la future station hydrométrique de Conat, tout reste à faire ; à savoir la mise en place de l'échelle limnimétrique et de la sonde, ainsi que des jaugeages en vue d'établir une courbe de tarage.

VII.2. Etude de la géologie

Pour ce qui est de la géologie en général, il serait intéressant d'évaluer le pourcentage de recouvrement de chaque grande formation géologique (granite, schiste et calcaire) sous MapInfo pour chaque bassin versant. Ainsi, il serait possible d'estimer la contribution des formations géologiques à l'écoulement total. Théoriquement, les résultats devraient aller dans ce sens : Granite > Schiste > Calcaire.

VII.2.1. Perte supposée de la rivière

Avec les enregistrements de la sonde de *La Millada*, il sera possible de vérifier s'il existe vraiment des échanges d'eau dus à la mise en charge et à la décharge du karst et également de préciser son fonctionnement.

VII.2.2. Karst du mont Coronat

A plus long terme et avec plus de données à disposition, il sera possible d'estimer une moyenne interannuelle du volume d'eau s'infiltrant dans le karst et qui n'est pas restitué dans la rivière, par la différence des moyennes de pluie brutes avec les moyennes de pluies nette et d'évapotranspiration.

Aussi, l'eau ainsi infiltrée est restituée au niveau de la source de Ria, près de Villefranche-de-Conflent. Cependant, le débit de cette source paraît trop faible pour être le seul exutoire des eaux stockées dans le massif calcaire. On suppose donc une restitution directe dans la rivière de la Têt, par en-dessous. Une campagne de conductivité le long de la Têt permettrait de confirmer cet apport.

VII.2.3. Faille de Merens

La future station hydrométrique de Conat se situe en aval d'une source et d'une zone où la rivière recoupe la faille de Merens. L'étude des hydrogrammes permettra d'évaluer l'impact de cette formation particulière en termes de volumes et de débits.

Aussi, il serait intéressant d'effectuer une campagne de conductivité sur le linéaire de la rivière Betllans – Conat, afin de pouvoir observer s'il existe un apport physico-chimique.

VII.3. Climatologie

Il serait fort appréciable de disposer de stations météorologiques automatiques complètes sur le bassin versant de la vallée de Nohèdes. Cela permettrait de :

- Avoir une idée plus précise du gradient de température, nécessaire au calcul de l'évapotranspiration. En effet, le gradient ici employé se base uniquement sur l'altitude alors que les vents de Tramontane contribuent fortement au refroidissement en altitude, mais également à un assèchement.
- Préciser l'évapotranspiration grâce à l'hygrométrie relevée.
- Vérifier et corriger le gradient de pluviométrie issu des courbes isohyètes.
- Etudier des réactions du bassin versant à la pluviométrie, en particulier lors des épisodes pluvieux d'altitude qui ne sont par conséquent pas détectables par le pluviomètre de Nohèdes.
- Connaître la direction des perturbations pluvieuses ou neigeuses grâce à la direction et à la force du vent et ainsi préciser le bilan hydrologique. Il serait de même possible de savoir à quelle période la neige peut être charriée vers le bassin versant.
- Enregistrer des données même en l'absence du personnel.
- Constituer moins de contraintes pour le personnel comparé au pluviomètre manuel utilisé jusqu'à présent.

VIII. Bilan personnel

Ce stage fût pour moi une opportunité de pousser la réflexion quant à la mise en place d'un bilan hydrologique. Il a ainsi fallu prendre en compte tous les facteurs pouvant influencer le fonctionnement du bassin versant, en passant par la géologie, l'hydrogéologie, la climatologie et le recouvrement végétal. J'ai également eu l'occasion d'être confrontée aux problèmes techniques pouvant survenir sur le matériel et d'aboutir à leur résolution. Aussi, j'ai pu m'initier à certains logiciels, à savoir le SIG de MapInfo, Hydraccess et Hydras3 pour le paramétrage et la collecte de données des sondes OTT. D'autre part, j'ai eu un aperçu du type d'activités que peut entreprendre une réserve naturelle, passant par le suivi scientifique et la sensibilisation, ainsi que ses acteurs et son mode de gestion. Enfin, ce stage a confirmé mon attrait pour l'hydrologie, qui aura certainement une place dans mon parcours professionnel futur.

Semaine	Liste des tâches
Semaine 1	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en main des logiciels Hydras3 et Hydraccess • Rédaction d'une notice d'utilisation simplifiée d'Hydras3 • Recherches bibliographiques
Semaine 2	<ul style="list-style-type: none"> • Récupération des données de hauteur d'eau enregistrées par les sondes • Reparamétrage des sondes • Conversion des limnigrammes en hydrogrammes sous Hydraccess • Interprétation des hydrogrammes
Semaine 3	<ul style="list-style-type: none"> • Visite de la centrale hydroélectrique de Nohèdes • Interprétation des hydrogrammes
Semaine 4	<ul style="list-style-type: none"> • Contact OTT pour sonde défectueuse • Jaugeages de la station du <i>Répartiteur</i>
Semaine 5	<ul style="list-style-type: none"> • Renvoi de la sonde défectueuse à OTT • Prise en main du logiciel SIG MapInfo • Estimation de la pluie brute à partir des courbes isohyètes sous MapInfo
Semaine 6	<ul style="list-style-type: none"> • Estimation de l'ETP par découpage des bassins-versants sous MapInfo
Semaine 7	<ul style="list-style-type: none"> • Etude de la géologie pour mettre en évidence les zones d'infiltration • Recherche de l'emplacement d'une 5^{ème} station limnigraphique • Jaugeage et élaboration de la courbe de tarage de la station du <i>Répartiteur</i>
Semaine 8	<ul style="list-style-type: none"> • Idem
Semaine 9	<ul style="list-style-type: none"> • Jaugeages de la station fictive de Conat • Rédaction du rapport
Semaine 10	<ul style="list-style-type: none"> • Rédaction du rapport • Calculs hydrologiques et interprétations • Jaugeage de la station du <i>Répartiteur</i> • Mise à jour des bases de données Hydraccess
Semaine 11	<ul style="list-style-type: none"> • Calculs temps de propagation et schéma de Maillet • Jaugeage de la station du <i>Répartiteur</i>
Semaine 12	<ul style="list-style-type: none"> • Récupération des dernières données sur les sondes • Complétion des interprétations • Finalisation du rapport

Tableau 9 : Liste des tâches et de répartition du temps du travail

Références bibliographiques

Réserve Naturelle de Nohèdes :

- ❖ MANGEOT, A., MARTIN, M. et SALVADOR, O. (2011) *Plan de gestion 2012-2016*. Nohèdes : A.G.R.N.N., Réserve naturelle de Nohèdes, 218p.
- ❖ <http://www.reserves-naturelles.org/reserves-naturelles>

Etudes précédentes sur le sujet du stage :

- ❖ DUCROIX, P. (2009) *Caractérisation des échanges hydriques entre le karst du mont Coronat et la rivière de Nohèdes*. Nohèdes: A.G.R.N.N., Ecole polytechnique universitaire de Montpellier, 40p.
- ❖ SERVIERE, M. (2010) *Fonctionnement du réseau hydrique de Nohèdes : élaboration d'un protocole de suivi hydrologique de la rivière de Nohèdes*. Nohèdes: A.G.R.N.N., Polytech Montpellier, 88p.

Centrale hydro-électrique de Nohèdes :

- ❖ <http://www.cayrolinternational.fr/>

Sonde OTT Orpheus Mini :

- ❖ OTT, *Manuel d'utilisation* (version 04-0206) : *Enregistreur pour eaux souterraines OTT Orpheus Mini*, OTT, 64p.

Moulinet 2030R General Oceanics :

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

Géomorphologie :

- ❖ CALVET, M. et DELMAS, M. (2012) *Itinéraires géomorphologiques dans la réserve naturelle de Nohèdes*. Nohèdes: F.R.N.C., Réserve naturelle de Nohèdes, Médi-Terra, 68p.

Géologie :

- ❖ LAUMONIER, B. (Spanish Geological Congress, Zaragoza, Espagne, 2004), *Pliegues y cabalgamientos hercínicos precoces en los Pirineos orientales: el ejemplo del sinclinal de Villefranche*. Poster.
- ❖ GUITARD, G., *et al.* (1998) *Carte géologique de la France. Prades*. Orléans: B.R.G.M., 198p.

Hydrogéologie :

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

Hydrométrie :

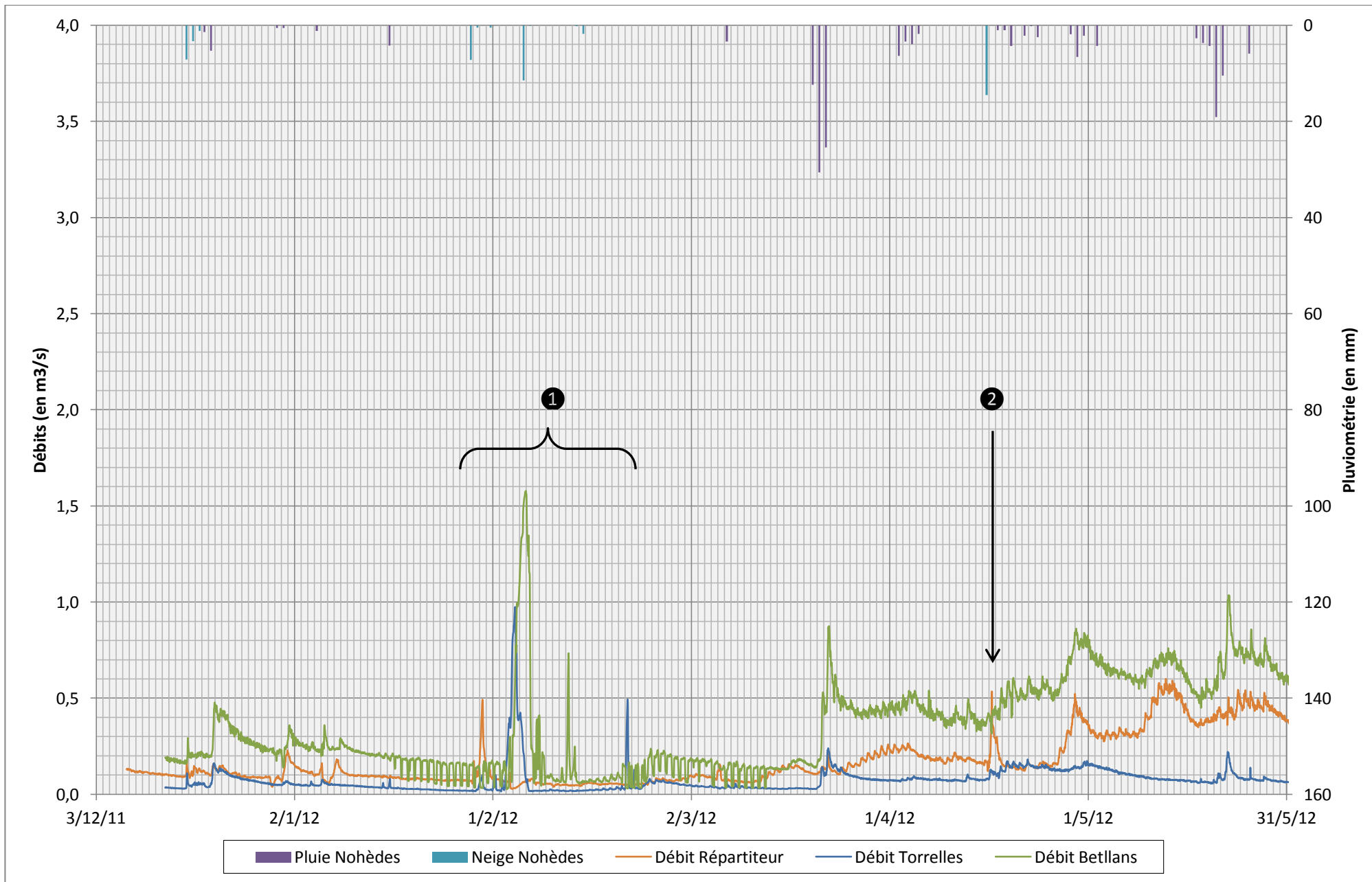
- ❖ Banque HYDRO (1998) *Charte qualité de l'hydrométrie – codes de bonnes pratiques*. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 49p.

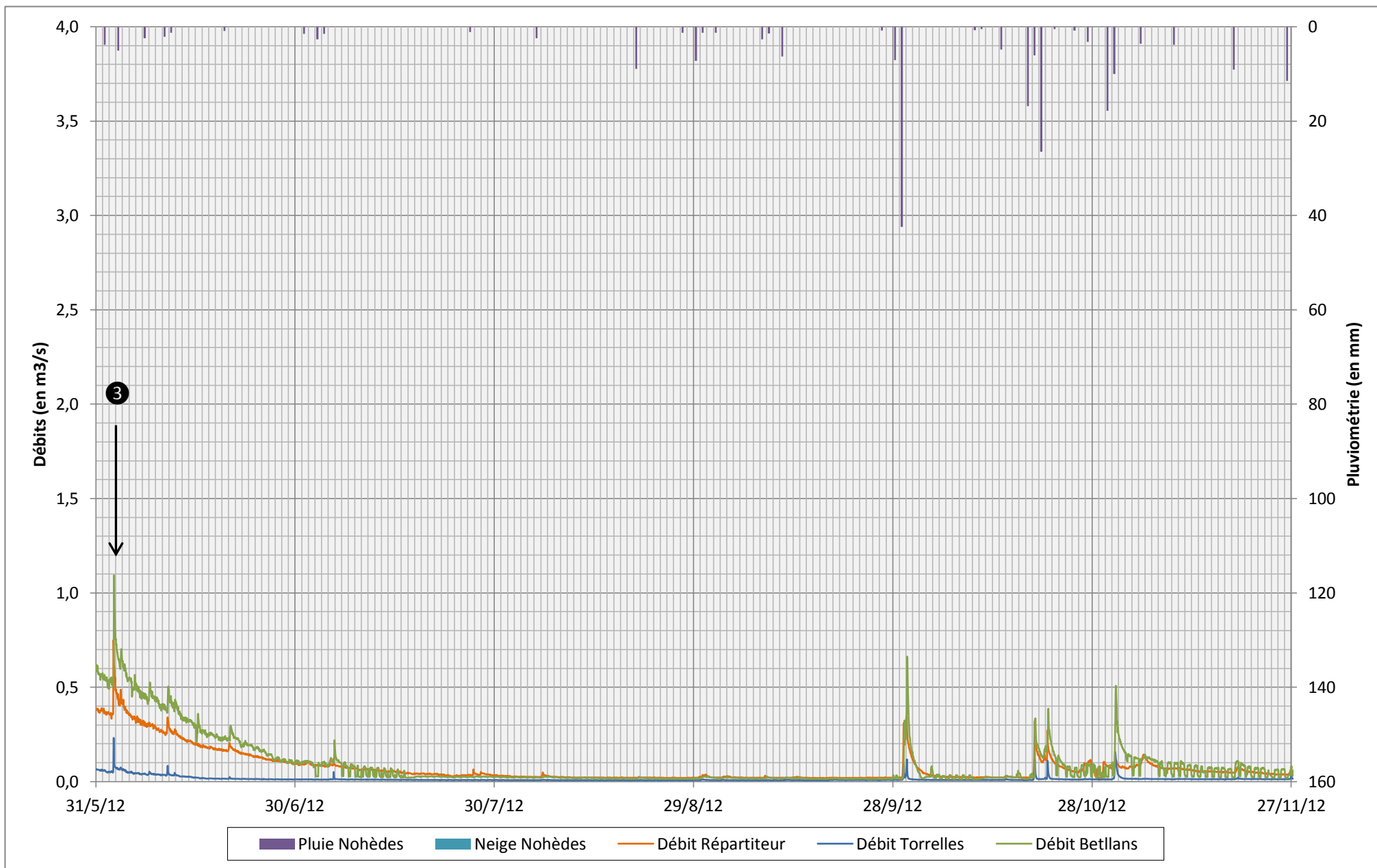
Hydrologie :

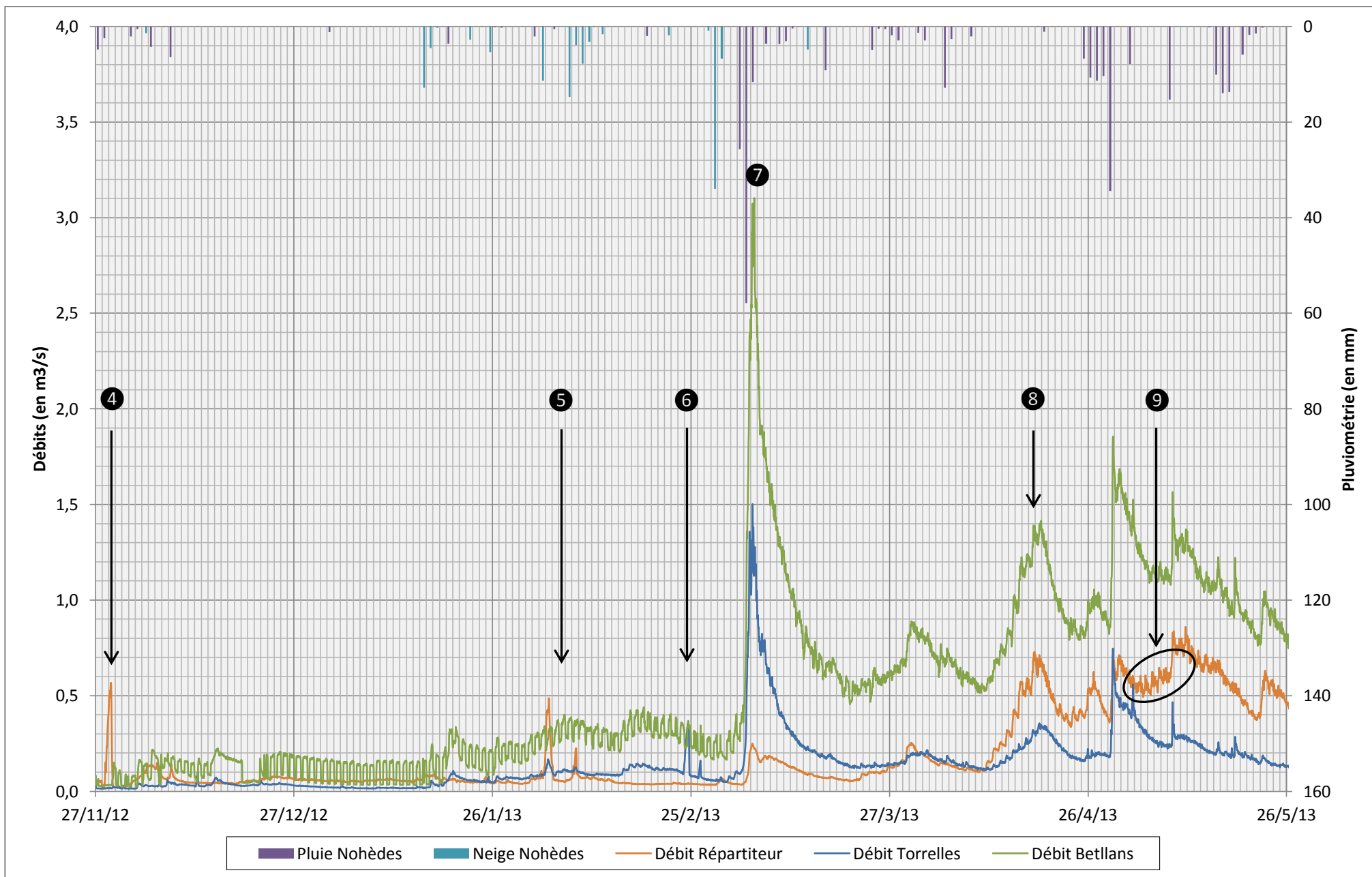
- ❖ NEPPEL, L. (2008-09) Cours d'hydrologie, photocopié : *Les données hydrologiques*. Polytech'Montpellier.

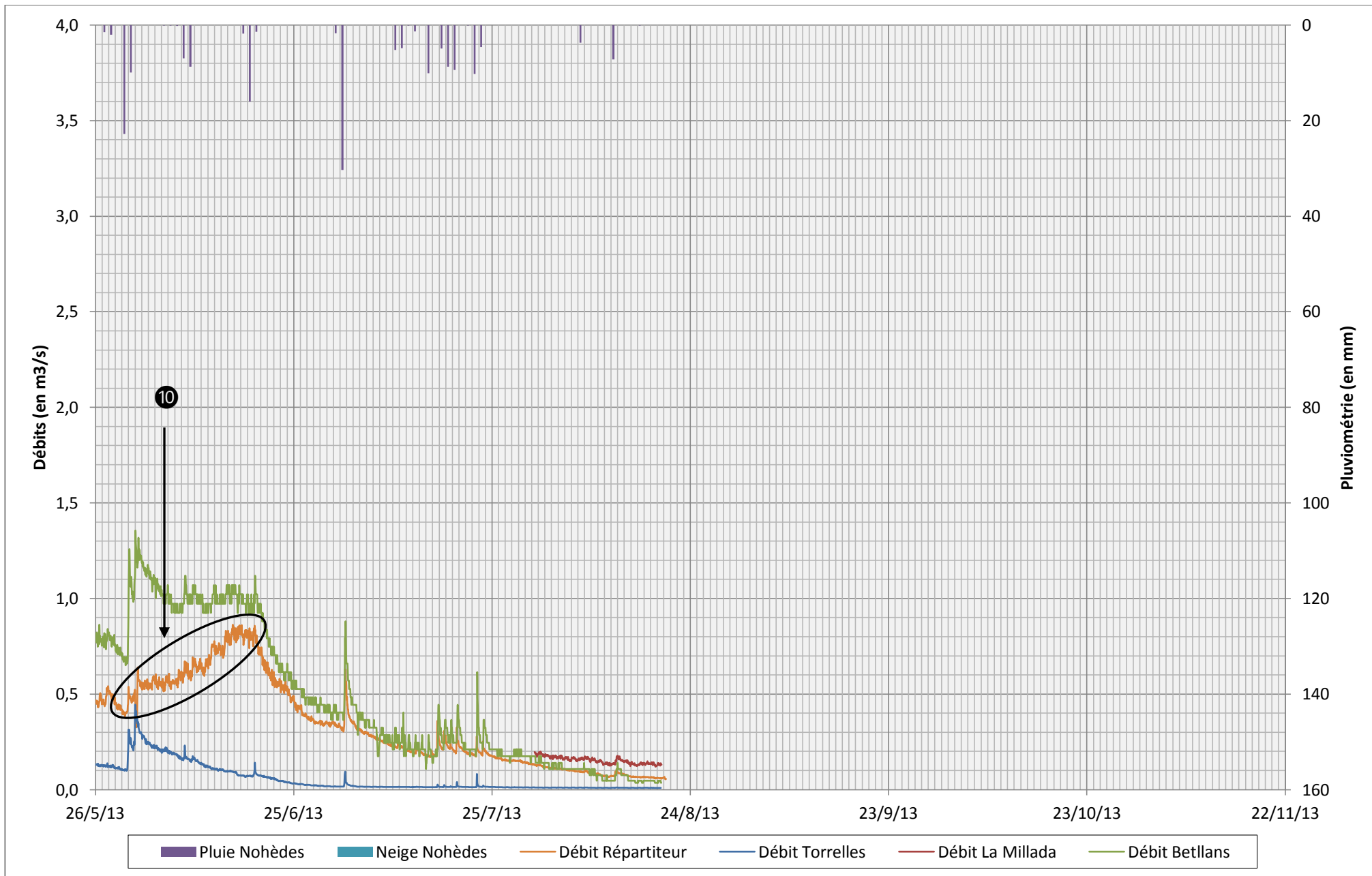
3 juin - 30 août 2013

- ❖ OUDIN, L. (2004) *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 495p.
- ❖ LARUE, J. et GIRET A. (2004) *L'assèchement de cours d'eau dans le bassin de la Maine entre 1989 et 1992*. Norois, p117-133.

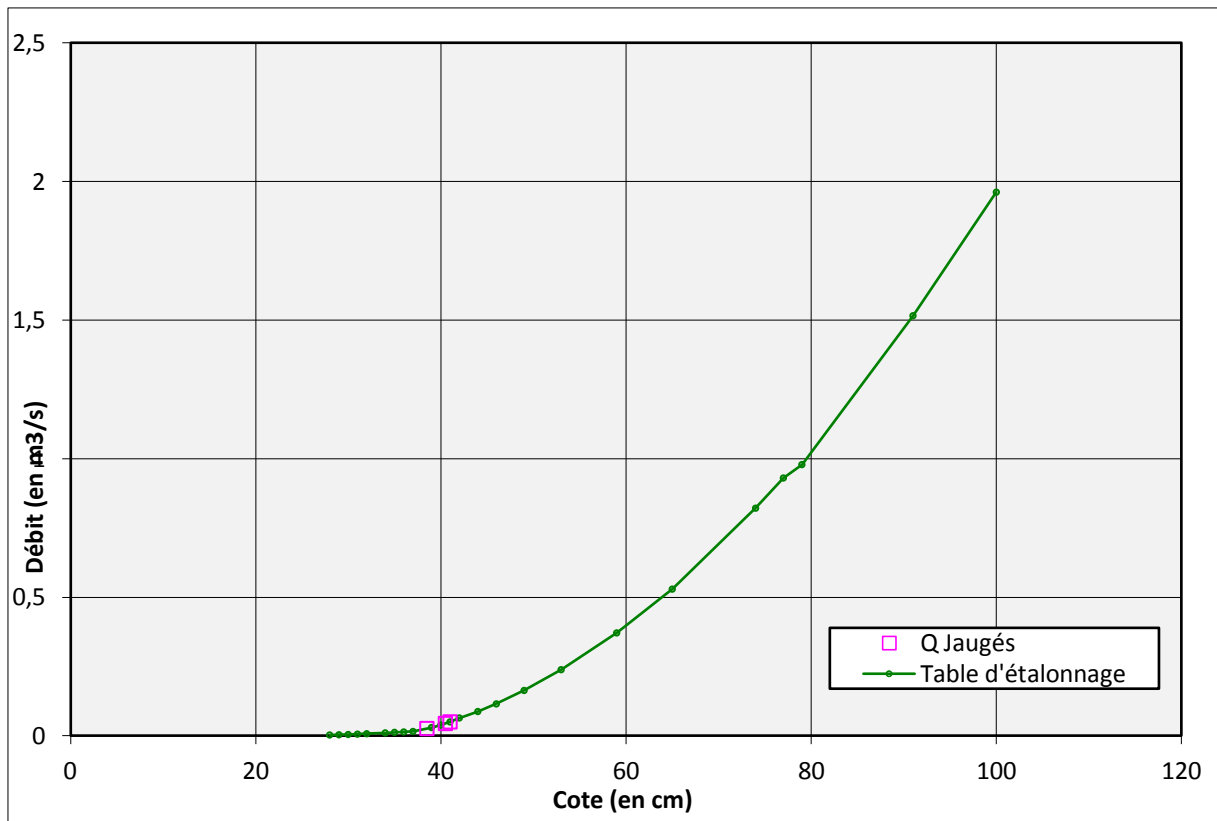




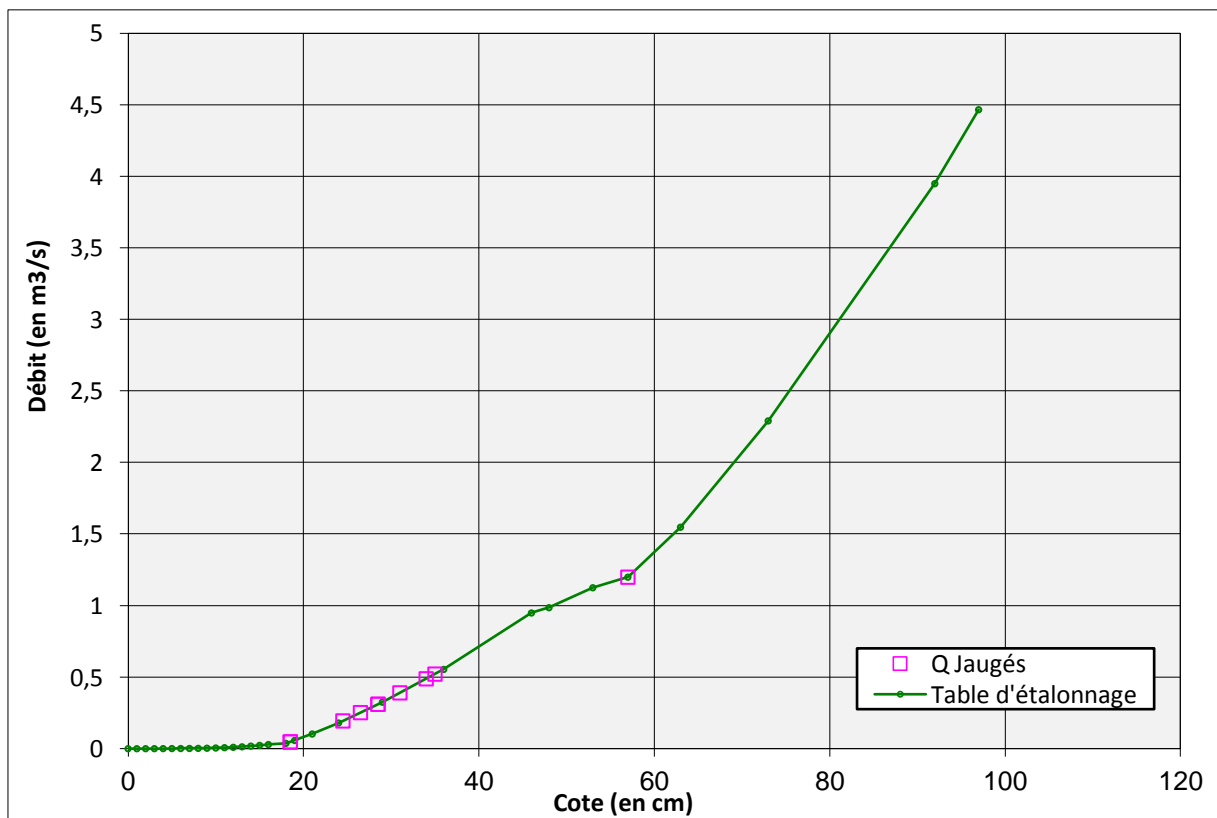




Annexe 5 : Courbe d'étalonnage de la station hydrométrique de *Torrelles*



Annexe 6 : Courbe d'étalonnage de la station hydrométrique de *La Millada*



Annexe 7 : Courbe d'étalonnage de la station hydrométrique de *Betllans*

