

# ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MONTPELLIER

Stage de 4<sup>e</sup> année  
Département Sciences et Technologies de l'Eau

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

**RIO Marlène**

ANNEE 2014-2015

Fédération des Réserves Naturelles Catalanes

Réserves naturelles de Conat et de Nohèdes



Réserves Naturelles  
CATALANES



Réserve Naturelle  
NOHEDES



Réserve Naturelle  
CONAT

Tuteur Polytech : Christian Salles

Tuteur de stage : Alain MANGEOT

**Polytech' Montpellier**  
Réseau Polytech

Université Montpellier

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



UNIVERSITÉ  
DE MONTPELLIER



POLYTECH'  
MONTPELLIER

RAPPORT DE STAGE

Citation

**RIO, M.** — 2015 —Contribution à l'établissement du bilan hydrique du bassin versant de la vallée de Conat et de Nohèdes. École polytechnique universitaire de Montpellier, département sciences et technologies de l'eau. Montpellier. 48p.

# Remerciements

---

Mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont permis d'atteindre mes objectifs dans le cadre de ce stage :

- Alain MANGEOT et David MORICHON, conservateurs des réserves de Nohèdes et Conat, qui m'ont accompagné tout au long de mon travail
- Le personnel de la réserve, Jeanet DEKKER, Maria MARTIN et Olivier SALVADOR, avec qui il fut très agréable de travailler
- Chrystelle BANCON, Bernard LASSERRE, Sandra VANEXTER et Sophie DELPOUX, travaillant à Polytech Montpellier et au département chimie du laboratoire Hydrosience, pour le prêt du matériel, la réalisation d'analyses chimiques, leurs conseils et leur gentillesse
- Severin PISTRE, Pascal BRUNET et Xavier DUREPAIRE, spécialisés en hydrogéologie au laboratoire Hydrosience de Montpellier, pour leur aide et leurs conseils
- Daniel CAUMONT, spéléologue et fondateur du CLPA à Montpellier, pour sa disponibilité, ses conseils et son aide
- Bart RAYMARKERS, spéléologue, pour nous avoir accompagné dans la grotte d'En Gerner mesurer le débit de la rivière souterraine
- Charles OBLED, Professeur à l'INPG et ENSE3, David PENOT et Rémy GARCON, travaillant au département de surveillance – DDM d'EDF, pour leurs renseignements et les précieuses données qu'ils nous ont fournies
- Jean PAGES, adjoint au maire de Ria, pour nous avoir permis d'accéder au captage AEP de la ville de Ria

Je souhaite également sincèrement remercier l'ensemble du personnel des réserves naturelles de Nohèdes et Conat pour leur soutien lors de mes problèmes de santé. Mes pensées vont tout particulièrement à Jeanet DEKKER, qui m'a accompagné dans les durs moments.

## Résumé

---

La rivière de Nohèdes, puis du Callan, est un affluent du fleuve têt, qui chemine à travers les Pyrénées Orientales. Depuis 2009, une étude hydrologique a été lancée par la réserve naturelle de Nohèdes et cinq sondes mesurant les hauteurs d'eau et les températures au pas de temps horaire ont été installées. La réserve naturelle de Conat s'est jointe au projet en 2014. Ce stage contribue à l'établissement du bilan hydrique de la vallée ainsi qu'à l'étude des écoulements souterrains du massif karstique du Mont Coronat.

Dans un premier temps, le bilan hydrique est établi grâce au principe de conservation de la masse. Les volumes d'eau entrant dans le système sont les précipitations, quantifiées grâce au modèle SPAZM d'EDF, ainsi que les apports potentiels provenant de bassins versants voisins. Une partie de cette masse d'eau ressort du système par évapotranspiration et par écoulements à l'exutoire du bassin versant. La pluie nette est calculée à partir des hydrogrammes fournis par les courbes de tarage des stations hydrométriques. Enfin, les infiltrations continues, les pertes de la rivière ainsi que les restitutions du karst représentent les variations de stock, de l'ordre de 5 000 000 m<sup>3</sup> sur le bassin versant étudié.

Dans un second temps, l'étude du réseau souterrain se poursuit, apportant de nouveaux éléments et réévaluant la ressource contenue sous le karst. Si elle était exploitée, elle permettrait d'alimenter plus de 86 000 habitants en eau potable.

**Mots-clés :** Pyrénées-Orientales – Vallée de Nohèdes et de Conat - Hydrologie – Hydrogéologie – Climatologie - karst

## Abstract

---

The Nohèdes river is one of the Têt's tributaries, flowing through the eastern Pyrenees. In 2009, the Nohèdes nature reserve started an hydrological study and installed five probes on the watershed to measure water levels and temperatures at each hour. The Conat nature reserve joined the project in 2014. This internship contributes to the establishment of the water balance in the valley and to the study of karstic underground flows.

Firstly, the water balance is established with the mass conservation principle. Water volumes entering the watershed are rainfalls, calculated by the EDF's SPAZM model, and other watersheds contributions. Some of this water evaporates or runoffs out of the system. These flows are quantified thanks to flow rating curves and hydrographs. Finally, stock variations are composed by infiltration, losses and flows back from the karst. They are estimated at 5 000 000 m<sup>3</sup> on the watershed.

Secondly, underground flows are studied, new elements are discovered and the karst water supply is reevaluated. If it was exploited, it could supply more than 86 000 inhabitants with potable water.

**Keywords :** Eastern Pyrenees – Nohèdes and Conat's Valley – Hydrology – Hydrogeology – Climatology - Karst



# Table des matières

---

Remerciements .....	1
Résumé .....	3
Abstract .....	3
Table des matières .....	4
Table des tableaux.....	6
Table des figures.....	6
Table des équations.....	7
Introduction .....	8
<b>I. Structures d'accueil .....</b>	<b>9</b>
<b>II. Contexte de l'étude .....</b>	<b>9</b>
1. Géologie .....	10
2. Hydrographie .....	11
<b>III. Objectifs du stage.....</b>	<b>11</b>
<b>IV. Etablissement du bilan Hydrique.....</b>	<b>12</b>
1. Etude des précipitations .....	12
a. Analyse des données des pluviomètres .....	12
b. Estimation des précipitations sur l'ensemble du bassin versant.....	14
2. Calculs d'ETP et ETR .....	15
a. Evapotranspiration Potentielle.....	15
b. Evapotranspiration réelle.....	16
c. Résultats .....	16
3. Etude des débits.....	17
a. Matériel et méthodes.....	17
b. Mise à jour des courbes de tarage .....	19
c. Etude des hydrogrammes.....	19
d. Calcul des pluies nettes .....	21
e. Evaluation des pertes.....	22
4. Synthèse.....	24
a. Bilan hydrique sur le bassin versant de Betllans.....	24

b.	<i>Bilan sur les zones perméables du karst</i>	25
c.	<i>Vérification des résultats</i>	27
<b>V.</b>	<b>Etude du réseau souterrain</b>	<b>27</b>
1.	Provenance de l'eau de la rivière souterraine de la grotte d'En Gorner	27
a.	<i>Analyses chimiques de l'eau</i>	27
b.	<i>Etude de la rivière souterraine d'En Gorner</i>	31
2.	Localisation de la résurgence du réseau souterrain	32
a.	<i>Choix du traceur</i>	33
b.	<i>Choix du site d'injection et de la quantité de traceur</i>	33
c.	<i>Choix des sites d'observation</i>	33
d.	<i>Choix des moyens et fréquence d'observations</i>	34
e.	<i>Protocole de terrain</i>	35
f.	<i>Protocole d'analyse</i>	35
g.	<i>Contacts</i>	35
	<b>Conclusion</b>	<b>36</b>
	<b>Perspectives</b>	<b>37</b>
	Avant l'été 2016	37
	Stage 2016	37
	A long terme	37
	<b>Bilan personnel</b>	<b>38</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>39</b>

## Table des tableaux

---

Tableau 1 : Cumuls mensuels interannuels (village de Nohèdes) .....	13
Tableau 2 : Cumuls mensuels interannuels (microcentrale EDF) .....	13
Tableau 3 : Comparaison des moyennes interannuelles de pluviométries obtenues avec les modèles SPAZM et AURELHY .....	14
Tableau 4 : Comparaison des volumes de pluies brutes (m <sup>3</sup> ) calculés en corrigeant Aurelhy et avec les données SPAZM pour l'année 2012 .....	14
Tableau 5 : Températures mensuelles interannuelles à la microcentrale.....	16
Tableau 6 : Pluie brute, ETP et ETR obtenus pour chaque sous bassin versant .....	16
Tableau 7 : Pluies nettes (m <sup>3</sup> ) sur la période du 01/08/2014 au 01/08/2015 .....	22
Tableau 8 : Comparaison des débits mesurés dans le ruisseau d'Evol .....	23
Tableau 9 : Contribution de chaque type de sol à l'écoulement du ruisseau d'Evol .....	24
Tableau 10 : Bilans hydriques 2012, 2013 et 2014 sur le bassin versant de Betllans.....	25
Tableau 11 : Bilan hydrique réalisé sur les zones perméables du Mont Coronat.....	26
Tableau 12 : Bilan hydrique réalisé sur les zones perméables du BV de Betllans .....	27
Tableau 13 : Duretés et Alcalinités des eaux prélevées .....	29
Tableau 14 : Mesures réalisées dans la rivière de Nohèdes et dans la grotte d'En Gorner ...	32
Tableau 15 : Liste des tâches effectuées .....	38

## Table des figures

---

Figure 1 : Présentation des réserves naturelles des Pyrénées Orientales.....	9
Figure 2 : Présentation du contexte géographique de l'étude .....	9
Figure 3 : Géologie de la zone d'étude .....	10
Figure 4 : Présentation du contexte hydrographique.....	11
Figure 5 : Comparaison des cumuls de pluie annuels au village de Nohèdes et à la microcentrale EDF .....	13
Figure 6 : Localisation des pluviomètres utilisés par SPAZM autour du bassin versant .....	15
Figure 9 : Allure du profil de concentration en sel en fonction du temps lors d'un jaugeage par dilution .....	18
Figure 10 : Limnigrammes des stations hydrométriques .....	20
Figure 11 : Illustration du gel de la sonde à Torrelles, engendrant des débits irréels .....	21
Figure 12 : Débit de la perte entre la Millada et Betllans sur l'année hydrologique 2014-2015 .....	22
Figure 13 : Profils de conductivité et température du ruisseau d'Evol	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 14 : Relation établies entre la pluviométrie annuelle à Nohèdes et sur le bassin versant de Betllans .....	25
Figure 15 : Correction des zones perméables du Mont Coronat.....	26
Figure 16 : Profils de concentrations en ions calcium et magnésium sur le bassin versant...	29
Figure 17 : Profils des concentrations en ions .....	30
Figure 18 : Profil de concentration du Lithium 6 sur le bassin versant .....	30
Figure 19 : Profil de concentration de l'Aluminium sur le bassin versant .....	31
Figure 20 : sortie terrain dans la grotte d'En Gorner.....	32
Figure 21: Localisation de la résurgence du réseau souterrain .....	34

## Table des équations

---

Équation 1 : Bilan hydrique .....	12
Équation 2 : Calcul d'ETP : formule de Thornthwaite .....	15
Équation 3 : Calcul d'ETR : formule de Turc.....	16
Équation 4 : Calcul du débit (jaugeage par dilution) .....	19
Équation 7 : Calcul de la pluie nette annuelle .....	21
Équation 8 : Dissolution des carbonates de calcium.....	26
Équation 9 : Dissolution des carbonates de magnésium.....	28
Équation 10 : Réaction acido-basique de formation des bicarbonates .....	28

## Annexes

---

Annexe 1 : Caractéristiques techniques du vélocimètre FW01 .....	40
Annexe 2 : Courbe de tarage de la station Clot .....	41
Annexe 3 : Courbe de tarage de la station Torelles.....	41
Annexe 4 : Courbe de tarage de la station la Millada.....	42
Annexe 5 : Courbe de tarage de la station Betllans.....	42
Annexe 6 : Courbe de tarage de la station Conat .....	43
Annexe 8 : Mesures effectuées dans le ruisseau d'Evol .....	44
Annexe 10 : Localisation des points de prélèvements pour les analyses chimiques de l'eau	46
Annexe 11 : Résultats des analyses chimiques réalisées à Hydrosciences .....	46
Annexe 12 : Présentation de l'outil Optiprotect'eau.....	48

# Introduction

---

Au cœur des Pyrénées Orientales et partie intégrante du bassin versant du fleuve Têt, la vallée de Nohèdes et de Conat présente un intérêt exceptionnel, tant sur le plan de la biodiversité que sur celui de la ressource en eau. De nombreuses espèces endémiques y sont présentes, telles que l'Euprocte, le Desman ou encore l'Alysson des Pyrénées. Cette plante à floraison en grappes blanches n'a pour l'instant été observée nulle part ailleurs.

S'étendant du village de Ria à 346 m d'altitude, jusqu'au sommet du Roc Nègre culminant à 2459 m, elle est à la fois soumise à un climat océanique et méditerranéen. Cela lui confère une grande diversité d'habitats, que les deux réserves naturelles de Nohèdes et de Conat ont pour mission de préserver. 2 686 ha sont ainsi concernés par une protection de la faune, de la flore, du sol et des eaux.

Un accent particulier est porté sur ces deux derniers points, en raison des différentes structures géologiques telles que le massif karstique du Mont Coronat. Ses roches calcaires renferment une ressource en eau considérable qu'il est indispensable de préserver, tant pour maintenir le bon équilibre écologique du massif qu'en vue d'une potentielle exploitation de la masse d'eau.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce stage d'hydrologie, poursuivant l'étude lancée en 2009 dont le but est d'établir le bilan hydrique du bassin versant. Les axes de travail s'orientent selon plusieurs thématiques, faisant appel à de nombreuses compétences acquises en formation à Polytech Montpellier. D'autres sont développées sur le terrain, avec l'aide du personnel de la réserve naturelle.

Ce rapport s'articule selon plusieurs parties ; le contexte du stage est décrit en premier lieu, suivi des objectifs. Les méthodes employées et les résultats obtenus sont ensuite décrits par thématique de travail, puis résumés en conclusion. Des perspectives sont également proposées pour la suite de l'étude. Un bilan clôture ce rapport, décrivant l'apport personnel de ce travail au sein des réserves naturelles de Nohèdes et de Conat.

## I. Structures d'accueil

Les réserves naturelles de Nohèdes et de Conat ont été créées en 1986 et sont membres de la fédération des réserves naturelles catalanes, de même que celles de Jujols, Forêt de la Massane, Mantet, Mas Larrieu, Prats-de-Mollo-la-Preste, Py et Vallée d'Eyne, localisées sur la Figure 1. Les réserves de Banyuls et Nyer sont gérées par le CG66.

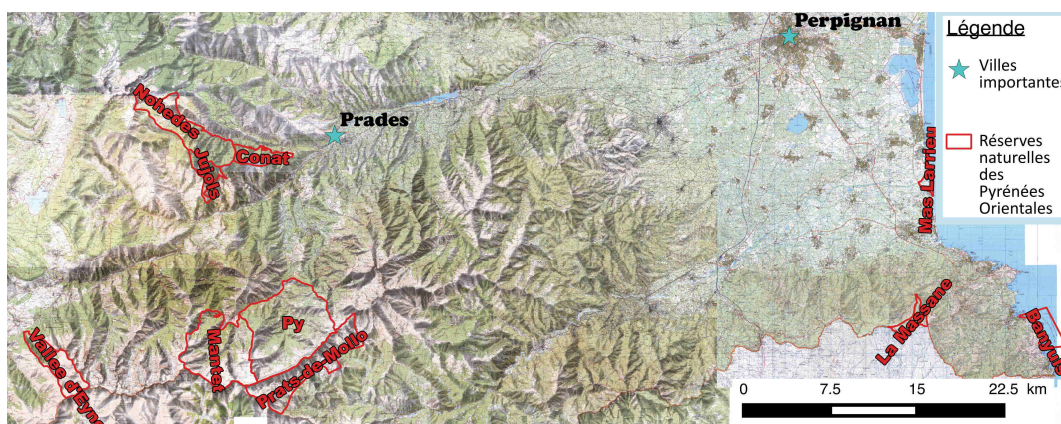


Figure 1 : Présentation des réserves naturelles des Pyrénées Orientales

Les conservateurs des réserves de Nohèdes et de Conat sont respectivement Alain Mangeot et David Morichon, dont les axes de travail sont les suivants :

- Etude, suivi, protection du patrimoine naturel et culturel, maintien de la biodiversité
- Gestion du territoire tenant compte des différents acteurs locaux
- Communication et partage avec le public

## II. Contexte de l'étude

La Figure 2 présente la géographie de la zone d'étude.

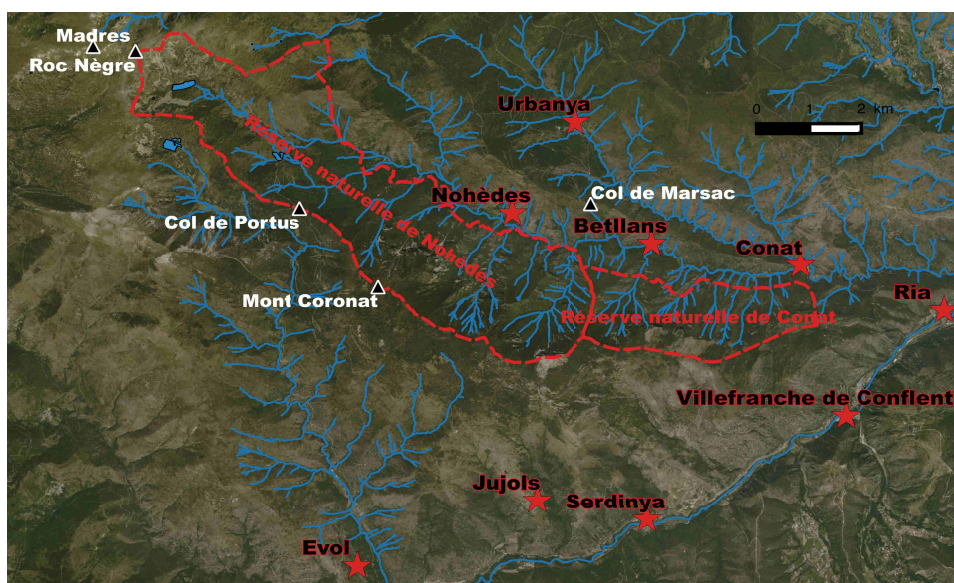


Figure 2 : Présentation du contexte géographique de l'étude



## 1. Géologie

La géologie du site d'étude est présentée sur la Figure 3. On y retrouve principalement 3 types de roches :

- Des roches magmatiques imperméables (granites) sur le haut du bassin versant
- Des roches métamorphiques (schistes)
- Des roches sédimentaires (calcaire)

La faille de Merens sépare selon une orientation est-ouest les schistes imperméables des calcaires perméables. Le massif karstique du Mont Coronat forme d'épais plis synclinaux couchés les uns sur les autres et s'étend sur plus de 30 km entre Villefranche de Conflent et Fontrabieuse. Les deux fleuves qui le traversent sont l'Aude à l'Ouest (du Sud au Nord) et la Têt à l'Est (d'Ouest en Est) (SALVAYRE, 2010).

Deux résurgences ont été localisées près de Ria-Sirach et draineraient l'ensemble du karst :

- La résurgence d'En Gorner se situe en rive droite du fleuve Têt et est située 200 m en aval du pont d'En Gorner. Il est important de préciser que ses eaux ne proviennent pas de la rivière souterraine de la grotte d'En Gorner.
- La résurgence de Ria est située en amont du même, en rive gauche. Un captage a été mis en place pour alimenter la ville de Ria en eau potable. D'après Mr Salvayre, cette résurgence serait alimentée par la rivière souterraine de la grotte d'En Gorner, qui serait en partie composée des pertes de la rivière de Nohèdes et du ruisseau d'Evol (SALVAYRE, 2010). Il est possible qu'une partie des eaux de la grotte rejoignent directement le fleuve Têt.

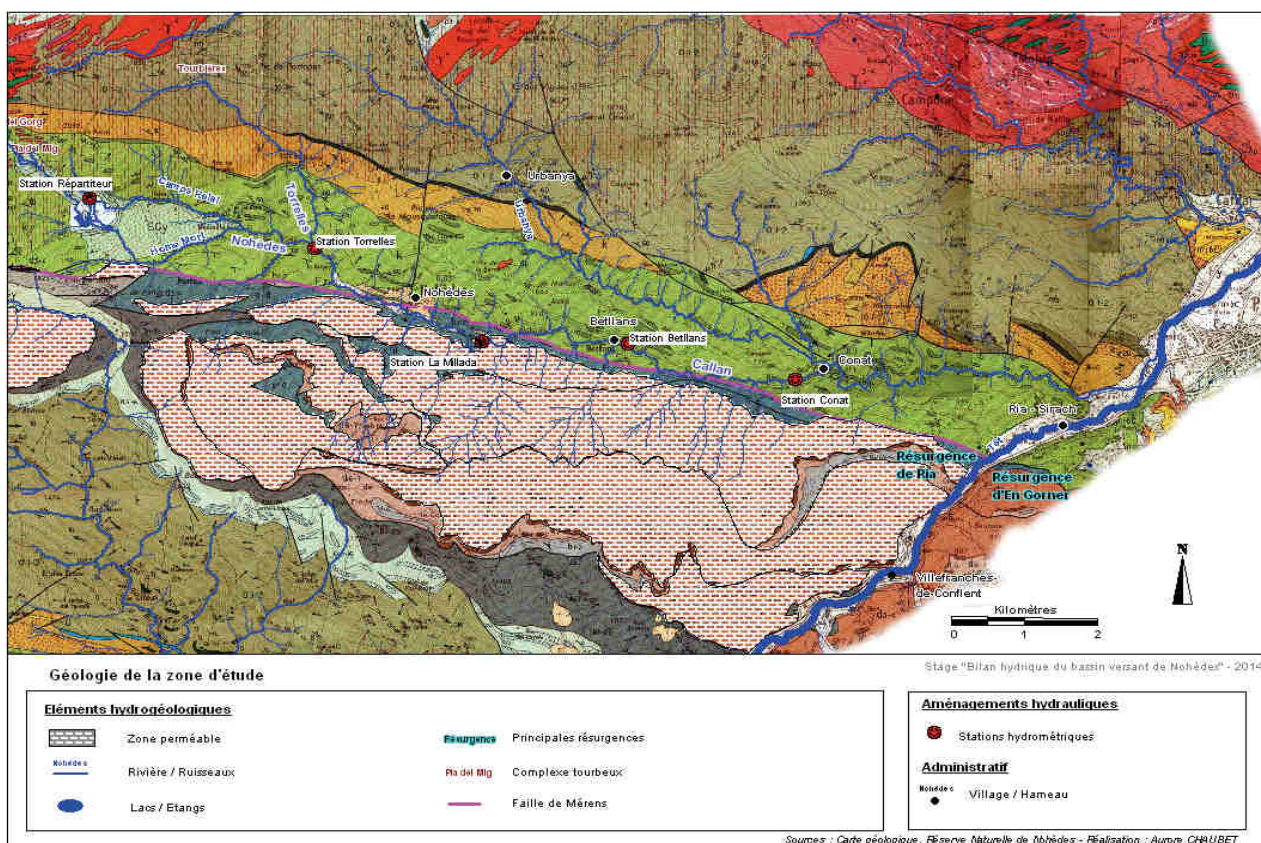
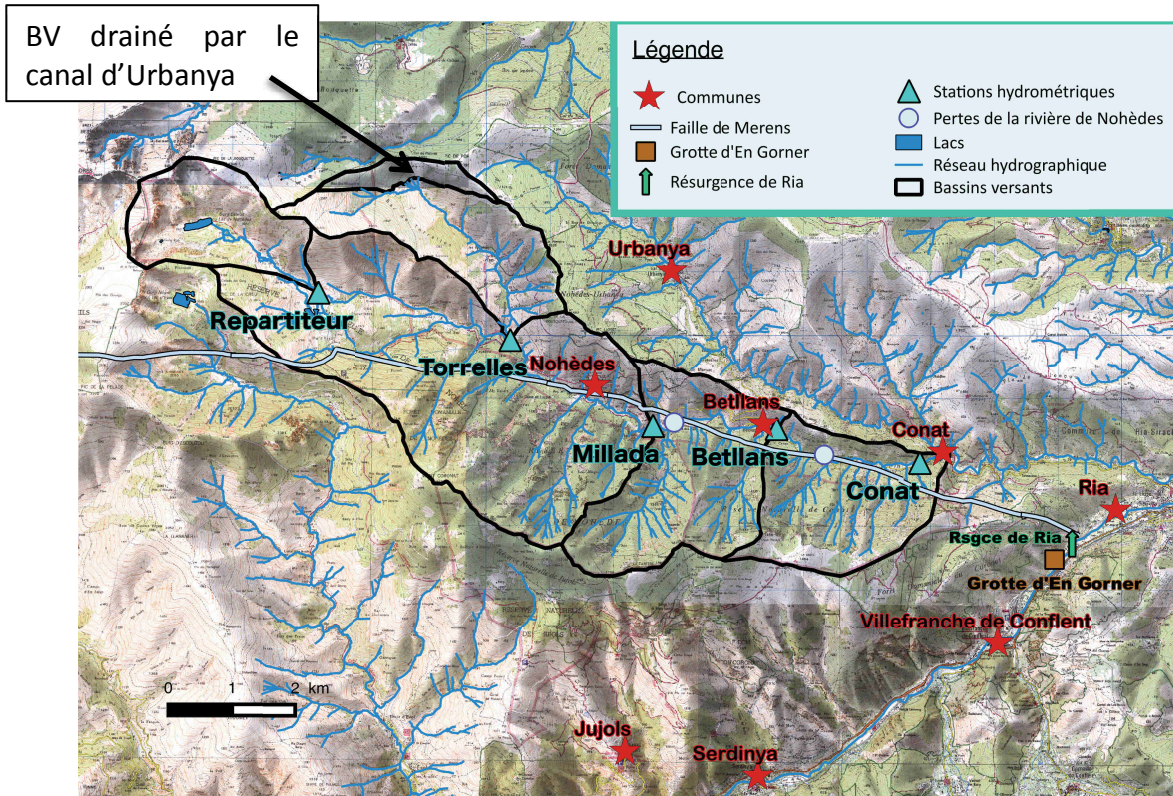


Figure 3 : Géologie de la zone d'étude



## 2. Hydrographie

Le cours d'eau principal de la vallée est la rivière de Nohèdes, puis du Callan, d'un linéaire de 21 km, sur laquelle plusieurs stations hydrométriques sont installées. Cinq sous bassins versants sont ainsi étudiés, comme le montre la Figure 4. Nous y voyons apparaître la modification apportée en 2014 qui supprime la partie drainée par le canal d'Urbanya.



En amont du répartiteur, de nombreuses sources provenant d'arènes granitiques alimentent les écoulements et le *Gorg Estelat*. La station est au niveau de l'*Estany Del Clot*, artificiellement formé pour alimenter la microcentrale électrique située 2 km en amont du village de Nohèdes. L'eau est acheminée gravitairement par une conduite de 4,4km, puis rejetée dans la rivière à un débit d'environ 70 L/s lorsque les turbines fonctionnent.

De même que sur le haut du bassin versant, le cours moyen est caractérisé par des écoulements torrentiels. Il est formé par 3 apports principaux ; la *Ribera Dels Camps Reals*, la *Ribera De l'Home Mort* et la *Ribera de Torrelles*. Les pertes supposées alimenter le karst sont situées sur ce cours moyen, entre les stations Millada et Conat.

## III. Objectifs du stage

L'objectif général de l'étude est d'établir le bilan hydrique du bassin versant, étendu jusqu'à Conat et tenant compte de la haute vallée d'Evol.

La compréhension du fonctionnement hydrologique du site permettra de mieux le protéger. En effet, cela influe en grande partie sur l'équilibre écologique et l'importante ressource en eau contenue dans le massif karstique, qui semble très vulnérable.



Faisant suite aux travaux déjà réalisés depuis 2009 (DUCROIX, 2009 ; SERVIERE, 2010, LE GUENANFF, 2013 ; CHAUBET, 2014), les missions de ce stage sont les suivantes :

- Recalculer les pluies brutes sur l'ensemble du bassin versant
- Compléter les courbes de tarage des 5 stations hydrométriques
- Evaluer le rôle de la faille de Merens en étudiant les hydrogrammes entre Betllans et Conat
- Vérifier l'existence d'une connexion entre la haute vallée d'Evol et le réseau karstique du mont Coronat
- Confirmer le lien entre les pertes de la rivière de Nohèdes avec la rivière souterraine d'En Gorner
- Réaliser des mesures de débit dans la rivière souterraine de la grotte d'En Gorner
- Etablir un protocole permettant de localiser, si elle existe, la résurgence du réseau souterrain dans le lit mineur du fleuve Têt
- Définir la cartographie des zones de vulnérabilité du massif karstique

## IV. Etablissement du bilan Hydrique

Le bilan hydrique s'appuie sur le principe de conservation de la masse : à l'échelle du bassin versant, l'eau qui entre dans le système vaut celle qui sort additionnée à celle qui est stockée. Cela se traduit par l'Équation 1 :

Équation 1 : Bilan hydrique

$$PB = PN + ETR + Pertes \text{ (Infiltrations et pertes de la rivière)}$$

PB étant la pluie brute, PN la pluie nette, c'est à dire l'eau s'écoulant à l'exutoire du bassin versant, ETR l'évapotranspiration réelle, et I l'infiltration dans le sol.

### 1. Etude des précipitations

Les précipitations de la vallée de Nohèdes et de Conat dépendent du fort gradient altitudinal et des influences méditerranéennes et océaniques selon les versants et l'exposition.

#### a. Analyse des données des pluviomètres

Depuis 1960, les précipitations sont mesurées dans la vallée ; jusqu'en 1983, le pluviomètre était situé dans le village de Nohèdes. A partir de 1984, il a été déplacé à la microcentrale, 2 km en amont. En 2006, la microcentrale a fait faillite, et aucune donnée n'a été relevée jusqu'en 2009 où un pluviomètre manuel a été installé à la maison de la réserve naturelle.

Depuis 2010, le bassin versant est équipé de deux pluviomètres : un manuel situé à la maison de la réserve, à 955 m d'altitude, et un automatique situé à la microcentrale EDF, à 995 m d'altitude.

Grâce à une convention établie l'année passée entre la réserve naturelle et EDF, nous avons accès à la pluviométrie et aux températures relevées automatiquement à la

microcentrale. Nous disposons de données au pas de temps horaire, que nous traitons à l'aide d'une routine écrite sous Visual Basic Of Application.

Les cumuls mensuels interannuels mesurés au village de Nohèdes sont présentés dans le Tableau 1 et montrent des précipitations plus importantes sur la période 2009-2014 qu'entre 1960 et 1983.

Tableau 1 : Cumuls mensuels interannuels (village de Nohèdes)

	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
<b>1960-1983</b>	39,3	41,7	45,4	68,7	69,4	64,5	54,2	57,6	57,3	64,6	67,2	70,9	700,9
<b>2009-2014</b>	36,7	29,3	78,9	68,6	59,3	56,5	59,3	29,4	42,6	70,4	101,8	36,0	716,7

Les cumuls mensuels interannuels mesurés à la microcentrale sont présentés dans le Tableau 2. Ici aussi, les années 2010 à 2014 ont été plus pluvieuses que 1984-2007.

Tableau 2 : Cumuls mensuels interannuels (microcentrale EDF)

	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
<b>1984-2007</b>	72,4	51,7	52,9	85,3	97,9	63,1	43,1	60,2	64,8	78,2	67,3	79,6	817,3
<b>2010-2014</b>	45,9	41,6	102,4	76,0	79,5	70,7	67,5	41,0	48,4	102,3	153,7	36,1	865,0

Sur la période 2011-2014, les précipitations ont été mesurées aux deux pluviomètres. La Figure 5 compare leurs cumuls annuels, montrant qu'il pleut environ 150 mm d'eau de plus à la microcentrale chaque année. Cela est principalement dû aux 40 m d'altitude séparant les deux sites de mesure, illustrant le fort gradient auquel est soumis la vallée, et aux influences océaniques qui s'accroissent d'est en ouest. Par ailleurs, nous notons que l'écart se creuse lorsque l'année est plus sèche, comme en 2012. La comparaison des cumuls mensuels montre également que la pluviométrie peut être plus importante à Nohèdes lors de mois secs.

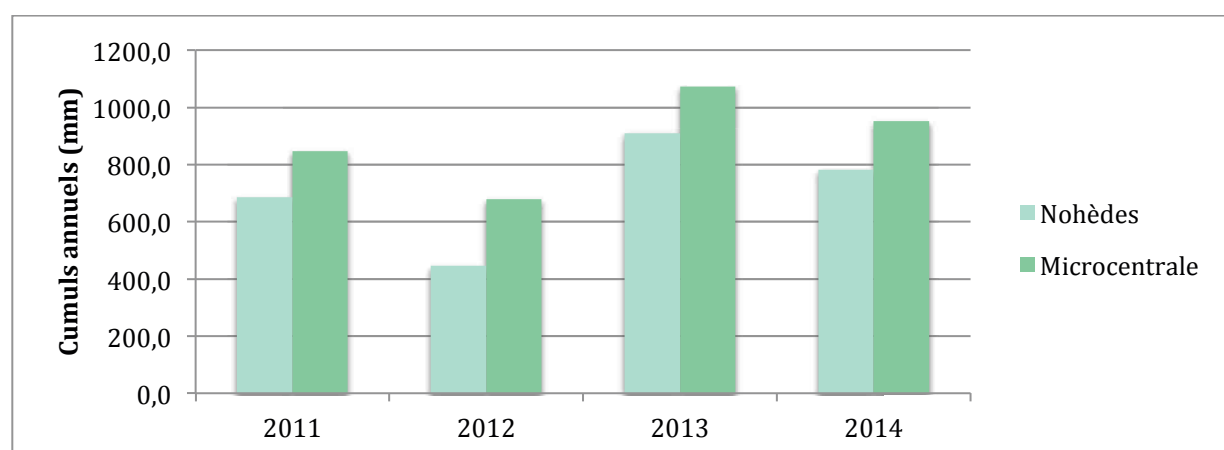


Figure 5 : Comparaison des cumuls de pluie annuels au village de Nohèdes et à la microcentrale EDF

Les pluviométries relevées sur les deux sites doivent donc être différenciées et ne peuvent être réunies pour des statistiques sur la période 1960-2014.

## *b. Estimation des précipitations sur l'ensemble du bassin versant*

Bien qu'ils donnent de précieuses informations quant à la pluviométrie autour de 1000m d'altitude, les deux pluviomètres ne permettent pas de connaître les cumuls précipités sur le reste du bassin versant.

Précédemment, des courbes isohyètes ont été construites avec le modèle Aurelhy de météoFrance, à partir de pluviométries interannuelles. Le bilan hydrique a ensuite été réalisé sur l'année 2012, en appliquant un coefficient correctif de 0,64 à toutes les isohyètes car c'était une année très sèche (LE GUENANFF, 2013).

En 2014, ces isohyètes ont été approximées différemment pour réaliser le bilan hydrique sur une année et non à partir de moyennes interannuelles : un coefficient de ruissellement théorique a été déterminé pour chaque sous bassin versant avec la méthode du SCS. Cela reste très empirique et dépend de la modélisation des différents types de sol (CHAUBET, 2014).

EDF a récemment développé une nouvelle banque de données sur les massifs montagneux, nommée SPAZM, que nous utilisons cette année. Elle résulte du travail réalisé par Mr Frédéric Gottardi lors de sa thèse, qui a différencié plusieurs types de temps pour classer les précipitations en montagne (GOTTARDI, 2009). Nous avons pu obtenir une extraction de cette base de données sur notre bassin versant, nous donnant les moyennes annuelles et interannuelles de pluies sur la période 1948-2012. Ces données ont été traitées grâce à une routine VBA, sous Excel.

Le Tableau 3 compare les pluies SPAZM et AURELHY.

**Tableau 3 : Comparaison des moyennes interannuelles de pluviométries obtenues avec les modèles SPAZM et AURELHY**

	<b>Pluies SPAZM (mm)</b>	<b>Pluies AURELHY (mm)</b>	<b>Différence (%)</b>
<b>Clot</b>	1137,8	1197,7	5
<b>Torrelles</b>	811,6	921,1	12
<b>Millada</b>	872,4	901,8	3
<b>Betllans</b>	855,1	857,3	0
<b>Conat</b>	843,0	836,2	1

Les deux modèles sont cohérents entre eux, les pluies brutes estimées par le modèle SPAZM sont en moyenne inférieures de 4% à celles données par Aurelhy. Cet écart est plus important en altitude, au Clot et à Torrelles, et diminue par la suite.

EDF nous ayant fournis les moyennes de pluies journalières pour chaque année, les volumes de pluie brute ont été calculés pour 2012. Le Tableau 4 compare les volumes obtenus avec la correction de M.LE GUENANFF et ceux nouvellement calculés.

**Tableau 4 : Comparaison des volumes de pluies brutes (m<sup>3</sup>) calculés en corrigeant Aurelhy et avec les données SPAZM pour l'année 2012**

	<b>Aurelhy corrigé</b>	<b>SPAZM</b>	<b>CR calculé en 2012</b>	<b>Nouveau CR</b>
<b>Clot</b>	2 844 366,00	3 547 965,31	1,28	1,03
<b>Torrelles</b>	3 117 899,00	3 325 400,93	0,36	0,34
<b>Millada</b>	14 995 682,00	18 980 905,65	-	-
<b>Betllans</b>	17 954 918,00	23 374 394,01	0,35	0,27

Cela confirme que le coefficient correctif appliqué aux isohyètes d'Aurelhy sous estimait fortement les pluies brutes. Le coefficient de ruissellement sur haut du bassin versant est toujours supérieur à 1, ce qui peut avoir plusieurs explications :

- Les pluies brutes sont sous estimées ; la densité de postes en altitude est très faible, la région et plus particulièrement le massif du Madres a été peu équipé en stations météo entre 1948 et aujourd'hui. L'installation d'une station météo en altitude, même quelques années seulement, pourrait corriger ce problème. La Figure 6 situe les pluviomètres utilisés dans le modèle SPAZM pour calculer les pluies sur le bassin versant.

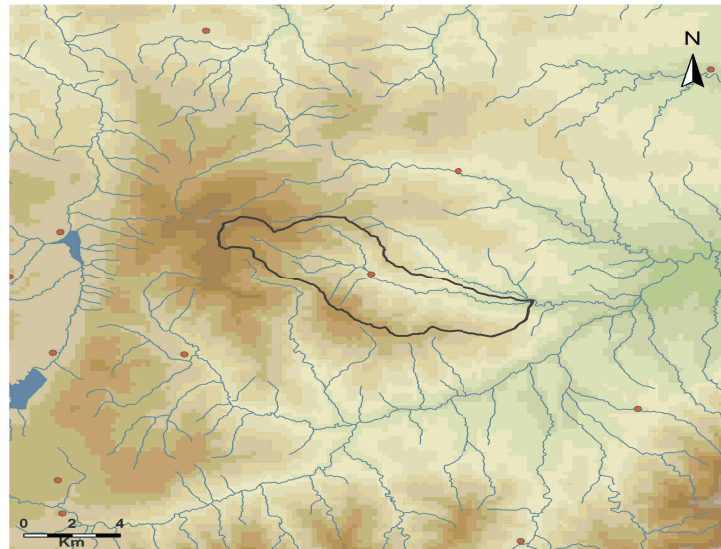


Figure 6 : Localisation des pluviomètres utilisés par SPAZM autour du bassin versant

- Les pluies nettes sont surestimées, notamment en hautes eaux, à cause des incertitudes de jaugeages et de construction des courbes de tarage.

Cependant, une valeur proche de 1 reste cohérente, les sols en altitude étant favorables à l'écoulement (CHAUBET, 2014).

## 2. Calculs d'ETP et ETR

L'évapotranspiration désigne les pertes d'eau sur un bassin versant, dues à la transpiration des végétaux et à l'évaporation des surfaces d'eau libre et contenues dans le sol. On distingue la quantité d'eau évaporée et transpirée pour le couvert végétal du bassin, l'Evapotranspiration Réelle, et la quantité d'eau maximale perdue de la même manière pour un couvert végétal de gazon : l'Evapotranspiration Potentielle.

### a. Evapotranspiration Potentielle

Nous utilisons ici la formule de Thornthwaite, que présente l'Équation 2, pour calculer l'ETP sur chaque sous bassin versant. Un gradient adiabatique de 0,6°C/100m est appliqué. Le logiciel QGis a été utilisé pour reprendre et compléter les calculs déjà effectués.

Équation 2 : Calcul d'ETP : formule de Thornthwaite

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

$t_i$  : moyenne interannuelle des températures du mois

$I$  : indice thermique annuel

$a = 0,016 * I + 0,5$

$F$  : Facteur correctif

A.CHAUBET a utilisé en 2014 les températures moyennes interannuelles mesurées à la microcentrale sur la période 1987-2007, présentées dans le Tableau 5 avec celles de 2010-2014, dont nous disposons aujourd'hui.

Tableau 5 : Températures mensuelles interannuelles à la microcentrale

	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Annuelle
<b>1987-2007</b>	3,88	4,44	6,81	8,12	11,57	13,03	17,39	17,6	14,18	10,96	6,74	4,55	9,98
<b>2010-2014</b>	3,25	3,00	5,77	8,98	11,20	14,88	16,97	17,12	14,27	11,47	6,58	4,11	9,8

Les ordres de grandeur sont les mêmes sur les deux périodes, les écarts restant inférieurs à 15%. Les températures mesurées entre 1987 et 2007 peuvent donc être réutilisées pour calculer l'évapotranspiration potentielle.

### b. Evapotranspiration réelle

L'ETR est très difficile à estimer, surtout sur un massif karstique. Nous utiliserons l'Équation 3 de Turc présentée ci-dessous, en gardant à l'esprit qu'elle est imprécise sur un bassin versant montagneux. Le gradient adiabatique est réappliqué ici.

Équation 3 : Calcul d'ETR : formule de Turc

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

P : Pluie moyenne interannuelle (calculée avec SPAZM)  
L = 300 + 25\*T + 0,05\*T<sup>3</sup>  
T : température moyenne interannuelle

### c. Résultats

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Pluie brute, ETP et ETR interannuelles obtenus pour chaque sous bassin versant

	Pluies SPAZM (m3/an)	ETP (m3/an)	ETR (m3/an)	Pourcentage d'eau réellement évapotranspirée
<b>Clot</b>	4 373 029,93	1 600 180	1 366 832	31
<b>Torrelles</b>	3 816 166,68	2 445 595	1 932 544	51
<b>Millada</b>	22 271 688,62	13 155 181	10 583 845	48
<b>Betllans</b>	27 552 496,92	17 120 858	13 668 597	50
<b>Conat</b>	31 682 779,23	20 515 740	18 854 779	60

Les valeurs d'ETP sont supérieures aux ETR, ce qui est cohérent. La proportion d'eau évapotranspirée par rapport à la pluie brute est faible en haute altitude et augmente sur la partie basse du bassin versant.

Les 31% obtenus sur le bassin versant du Clot confirment que le coefficient de ruissellement ne peut valoir 1 ; cela signifierait qu'aucune évapotranspiration n'aurait lieu.

### 3. Etude des débits

Les mesures de débits et les relevés de hauteurs d'eau permettent la construction des courbes de tarage. Les pluies nettes les pertes dans le karst se déduisent alors des hydrogrammes de chaque station.

#### a. Matériel et méthodes

##### **Sondes OTT Orpheus mini et échelles limnimétriques**

Chaque station hydrométrique est équipée d'une échelle limnimétrique ainsi que d'une sonde enregistreuse OTT Orpheus mini, qui relève automatiquement les hauteurs d'eau ainsi que les températures au pas de temps horaire. Les données sont ensuite récupérées par communication infrarouge à l'aide du logiciel Hydras 3.

##### **Jaugeage au vélocimètre**

###### *Matériel utilisé*

La réserve naturelle possède depuis le lancement de cette étude un moulinet sur perche. Nous avons malheureusement constaté qu'il a été endommagé, rendant toute mesure impossible.

Un vélocimètre portable FW01 a été commandé dans le courant du mois de juillet pour réaliser les mesures. Une hélice est placée au bout d'une sonde télescopique qui mesure la vitesse de rotation à l'aide d'un palpeur magnétique. Les valeurs des vitesses instantanée et moyenne sur une durée définie sont ensuite affichées sur le boîtier. L'appareil est également équipé d'un capteur de température. Ses caractéristiques techniques sont disponibles en annexe 1.



Figure 7 : Utilisation du vélocimètre

###### *Section de jaugeage*

La section de jaugeage doit rassembler les caractéristiques suivantes :

- Etre proche de l'échelle limnimétrique
- Présenter des vitesses d'écoulement parallèles entre elles et perpendiculaires à la section (absence de zone d'eau morte, de contre courant et de tourbillons)
- Vitesses d'écoulement assez importantes (sensibilité du vélocimètre à 0,1 m/s)
- Ecoulement non influencé par des obstacles tels que des rochers

###### *Dépouillement des jaugeages*

Le dépouillement des jaugeages se fait grâce à une routine VBA écrite sous Excel, car le module DEPJAUGE du logiciel Hydraccess utilisé les années précédentes ne traite pas les données d'un vélocimètre. La méthode de la double intégrale est utilisée pour calculer le débit : une première intégration du profil de vitesse est réalisée sur chaque verticale, donnant le profil de débits unitaires, intégré par la suite sur toute la section par la méthode des trapèzes.



## Jaugeage par dilution

### Matériel utilisé

Du Chlorure de sodium est utilisé pour cette méthode, qui consiste à injecter des ions dans la rivière pour ensuite établir le profil de conductivité en fonction du temps. Ces mesures sont possibles grâce à l'emprunt à Polytech Montpellier d'un conductimètre Hach HqD30. Nous utilisons ensuite la table de conversion proposée par IFREMER, calculant la salinité d'une solution en fonction de sa conductivité et de sa température.



Figure 8 : Jaugeage au sel (station de Betllans)

### Conditions de jaugeage

Afin d'estimer au mieux le débit de la rivière, il est important de choisir une distance suffisante entre le point d'injection et celui de mesure de la conductivité. En effet, elle doit permettre le bon mélange du sel, pour obtenir une concentration égale sur toute la section d'écoulement au point de mesure. Pour un torrent de montagne, une estimation rapide est proposée par Day :  $L_{bm}=25B$ , avec  $B$  [m] la largeur moyenne du cours d'eau (LE COZ et Al, 2011). Le tronçon de mélange doit également comporter le moins de zones d'eau morte possible. De plus, l'injection doit se faire si possible au centre de la rivière dans une zone où la vitesse du courant est forte, de même que les mesures de conductivité.

### Dépouillement des jaugeages

Ici aussi, le dépouillement est réalisé sur Excel. Le principe utilisé est celui de la conservation de la masse ; celle injectée en amont doit être égale à celle retrouvée en aval. Pour calculer cette dernière, nous intégrons le profil de concentration en fonction du temps, qui présente l'allure montrée en Figure 9.

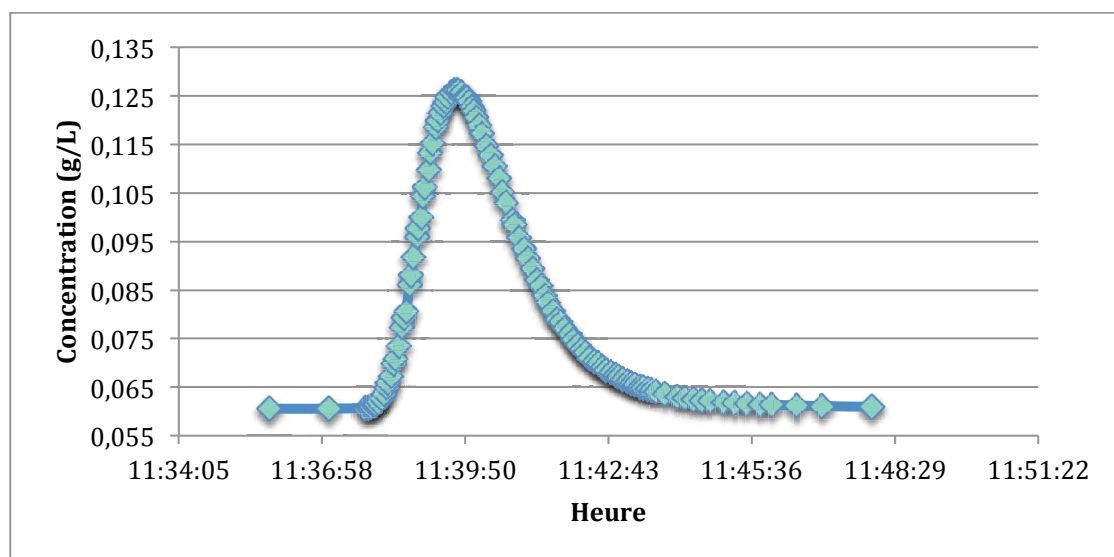


Figure 9 : Allure du profil de concentration en sel en fonction du temps lors d'un jaugeage par dilution

Le débit se calcule alors selon l'Équation 4:

Équation 4 : Calcul du débit (jaugeage par dilution)

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

Q : débit (L/s)

$M_{\text{injectée}}$  : masse de sel injectée (g)

$C(t)$  : Concentration à l'instant t (g/L)

## b. Mise à jour des courbes de tarage

### Utilisation du logiciel Hydraccess

Le module CALIBRA du logiciel Hydraccess permet de construire les courbes de tarage à partir des jaugeages réalisés. Les courbes sont biunivoques : une seule hauteur d'eau correspond à un débit donné et réciproquement.

L'interpolation entre les points connus est un ajustement potentiel de la forme :

Équation 5 : Ajustement potentiel

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

Q est le débit ( $m^3/s$ ), H la hauteur lue à l'échelle (cm),

$H_0$  la hauteur pour laquelle le débit s'annule (cm).

p est la variable d'ajustement

Afin de couvrir tout le marnage, les extrapolations du haut et du bas des courbes de tarage se font par la formule de Manning-Strickler :

Équation 6 : Extrapolation de Manning-Strickler

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

Q est le débit ( $m^3/s$ ), K le coefficient de Strickler,

i la pente de la ligne d'eau (m/m),  $R_h$  le rayon

hydraulique (m) et S la section mouillée ( $m^2$ )

### Vérification des courbes de tarage

Les courbes de tarage ont été construites les années précédentes avec des jaugeages réalisés au moulinet. Les crues durant l'année peuvent faire varier les sections des stations et le moulinet peut être imprécis, c'est pourquoi nous avons réalisé de nouveaux jaugeages par dilution et vérifié la validité des courbes, présentées en annexes 2, 3, 4, 5 et 6.

Les tarages construits pour les stations de Betllans, la Millada et le Clot semblent valides, car les jaugeages sont situés sur les courbes. Cependant, cela concerne l'étiage et nous ne pouvons vérifier pour l'instant la validité des courbes en hautes eaux.

La courbe de tarage de la station Torrelles est très imprécise car elle ne tient compte que de 3 jaugeages, datant de 2010. De plus, la mesure réalisée en 2015 se situe au dessus de la courbe, ce qui indique une sous estimation des débits.

Enfin, à Conat, le jaugeage au sel réalisé ne correspond pas à la mesure réalisée l'année dernière au moulinet pour la même hauteur d'eau. Les débits sont surestimés en basses eaux, ce qui reste à confirmer en faisant d'autres jaugeages par dilution.

Les courbes n'ont pas été reconstruites cette année car nous n'avons pas réalisé assez de jaugeages.

## c. Etude des hydrogrammes

### Vérification du bon fonctionnement des sondes

Les limnigrammes obtenus pour l'année 2014 sont présentés sur la Figure 10.



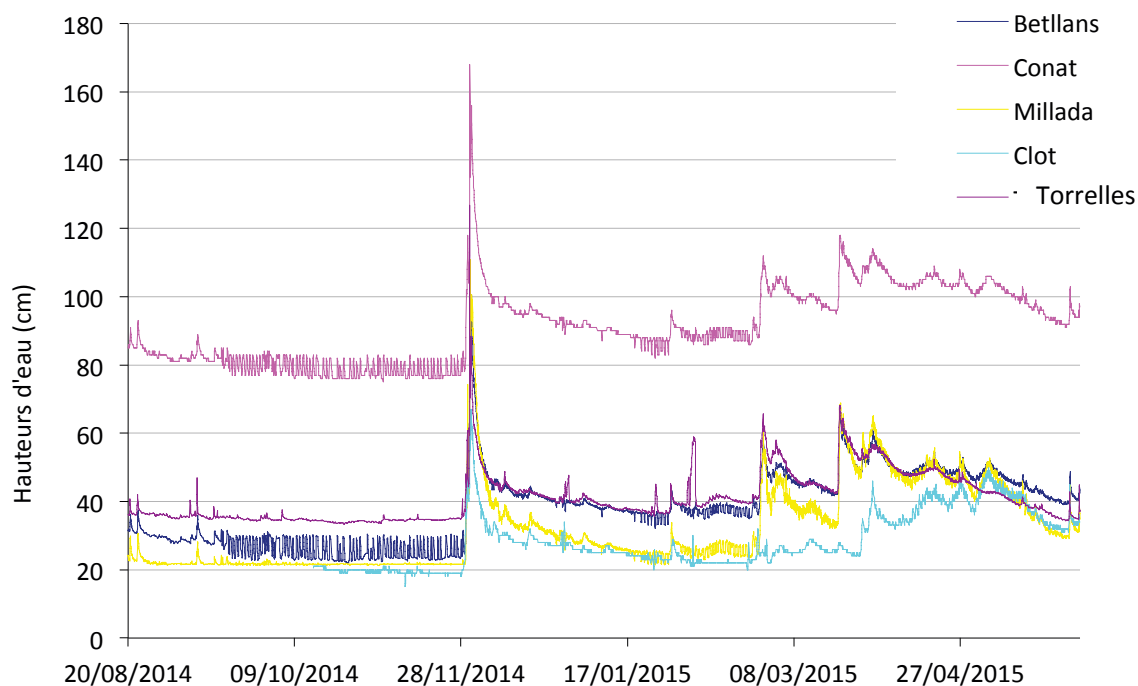


Figure 10 : Limnigrammes des stations hydrométriques

Les limnigrammes suivent les mêmes tendances, les sondes fonctionnent donc correctement. Les stations Clot et Conat présentaient les limnigrammes à l'envers : une correction a du être apportée par rapport à une hauteur de référence.

### **Interprétations de l'allure des hydrogrammes**

Les hydrogrammes obtenus pour la période du 01/08/2014 au 01/08/2015 sont présentés en annexe 7 et servent de support aux commentaires ci-dessous.

Du 01 Août au 28 Novembre 2014 la période est sèche, la perte entre Millada et Betllans est fonctionnelle car le débit est plus important en amont. Concernant le tronçon Betllans-Conat, il est impossible de conclure car la courbe de tarage de Conat est trop imprécise.

De même que les années précédentes, des pluies très importantes ont lieu durant les mois de Novembre et Décembre et les débits maximums de l'année sont relevés durant cette période. La crue de fin Novembre est un événement rare, des débits bien supérieurs aux maximums des autres années ont été observés :  $1,28 \text{ m}^3/\text{s}$  au Clot,  $1,67 \text{ m}^3/\text{s}$  à Torrelles,  $4,44 \text{ m}^3/\text{s}$  à la Millada,  $4,18 \text{ m}^3/\text{s}$  à Betllans et  $2,57 \text{ m}^3/\text{s}$  à Conat. Cette faible valeur par rapport aux stations en amont suppose la présence d'une perte importante entre Betllans et Conat. A la suite de cette crue, le débit à Betllans devient supérieur à celui de la Millada, laissant penser que le karst s'est chargé et restitue de l'eau au niveau de la perte.

Nous devons cependant tenir compte des imprécisions dues au tarage, qui peuvent remettre en cause ces conclusions.

Les mois de Janvier à Mars 2015 présentent des anomalies sur les hydrogrammes en raison de températures égales à 0 : les sondes gèlent et enregistrent des débits inexistants. Ce phénomène est bien visible sur la station de Torrelles, comme le montre la Figure 11.

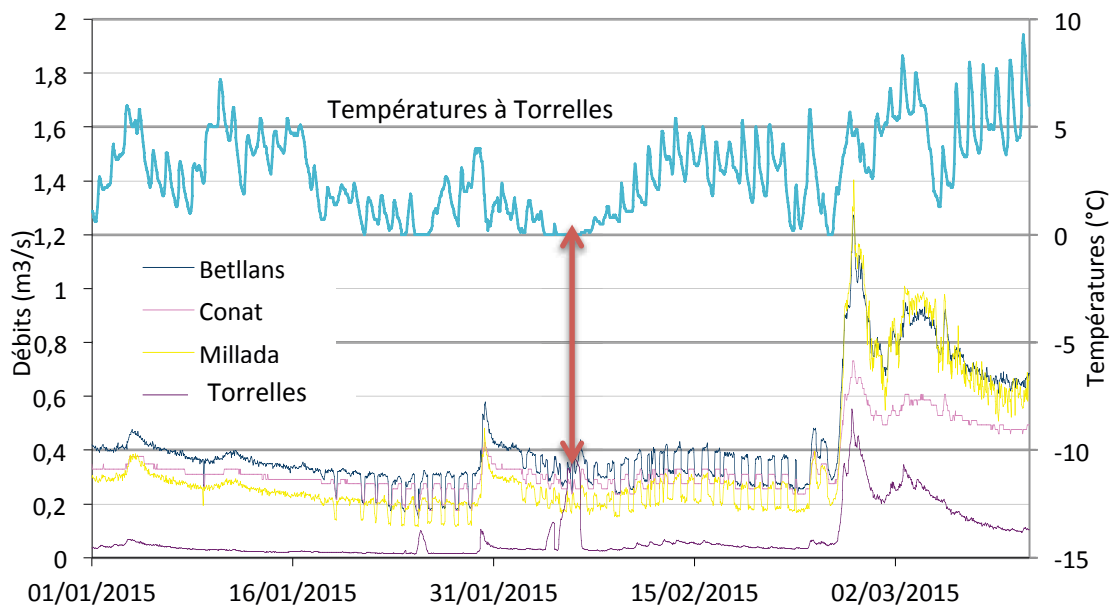


Figure 11 : Illustration du gel de la sonde à Torrelles, engendrant des débits irréguliers

Sur cette période, la station Clot révèle des débits faibles qui ne suivent pas les autres tendances : cela est dû à l’emménagement d’eau sur le haut du bassin versant sous forme de neige.

A partir du mois d’Avril, les débits augmentent sans pluies très importantes, en raison de la fonte des neiges. Ce phénomène est particulièrement visible sur la station du Clot, où le débit augmente jusqu’à 684 L/s le 04 Mai.

Durant les périodes de fonctionnement de la microcentrale, lorsque le débit est supérieur à 50 L/s au Clot (valeur du débit réservé au répartiteur) les oscillations dues aux éclusées sont visibles sur les stations Millada, Clot et Betllans. Les amplitudes de ces oscillations sont de bons indicateurs de la précision des courbes de tarage : elles doivent être de l’ordre de 70 L/s, et diminuer en allant vers l’aval.

Nous remarquons que sur certaines périodes, comme à l’étiage, les éclusées sont bien visibles à Betllans et Conat mais très peu à la Millada. Les tarages doivent donc être vérifiés par d’autres jaugeages au sel.

#### d. Calcul des pluies nettes

Les pluies nettes sont calculées du 01/08/2014 au 01/08/2015 à partir des hydrogrammes en les intégrant par rapport au temps, selon l’Équation 7 suivante :

Équation 7 : Calcul de la pluie nette annuelle

$$PN (m^3 / an) = \int Q (t) dt$$

Les valeurs pour lesquelles les sondes affichaient des températures inférieures à 0,5°C ont été enlevées. Les calculs n’ont pas été faits pour les stations Clot et Conat, car les sondes n’ont pas fonctionné en continu sur la période étudiée. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Pluies nettes (m<sup>3</sup>) sur la période du 01/08/2014 au 01/08/2015

Torrelles	Millada	Betllans
1 935 400	12 812 494	12 489 718

Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues pour l'année 2013, mais supérieures aux pluies nettes de 2012. Elles suivent donc les tendances pluviométriques. Ces résultats seront à comparer avec les années suivantes.

### e. Evaluation des pertes

#### Rivière de Nohèdes

Une perte a été mise en évidence entre la Millada et Betllans, d'un débit moyen de 48 L/s (CHAUBET, 2014). Cette perte a été requantifiée entre le 01/08/2014 et le 01/08/2015, donnant un débit d'environ 53 L/s, ce qui appuie le résultat précédent.

Ce débit a été calculé en ne considérant que les périodes où la perte est positive, et il devient de l'ordre de 20 L/s lorsque l'on considère également les périodes où le karst restitue de l'eau à la rivière.

La Figure 12 donne l'allure du débit de la perte en fonction du temps.

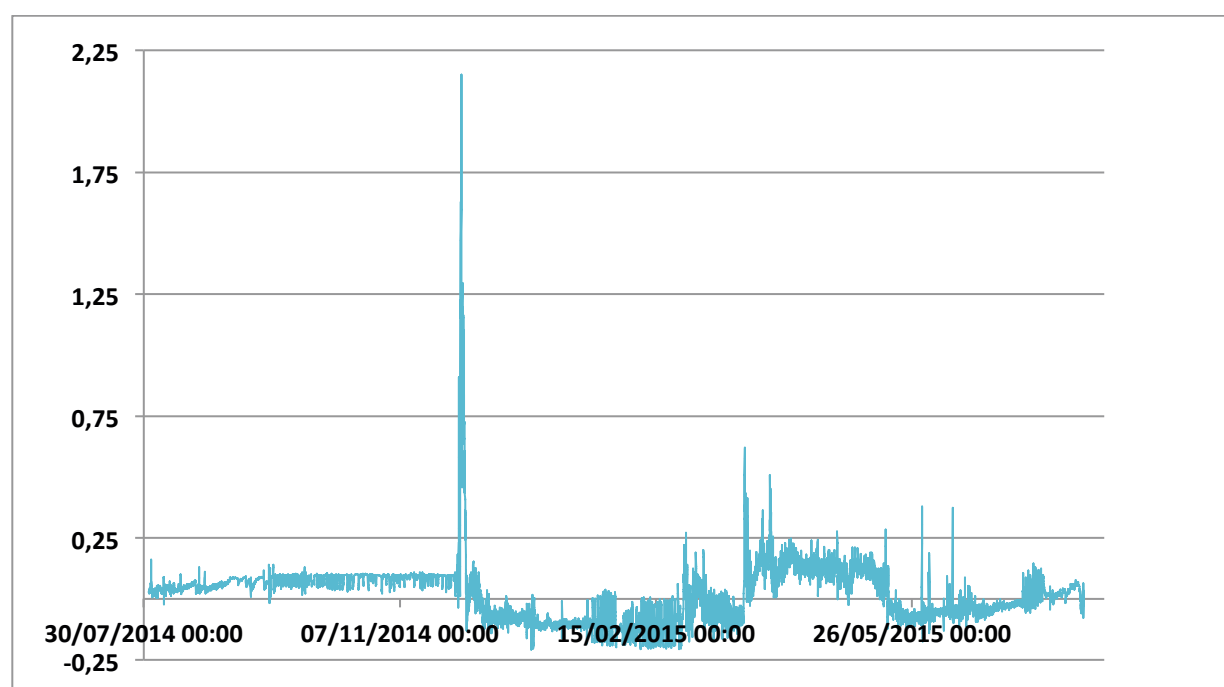


Figure 12 : Débit de la perte entre la Millada et Betllans sur l'année hydrologique 2014-2015

Le profil ressemble beaucoup à celui de l'année précédente, le débit de la perte est maximal lors des pluies importantes du mois de Novembre, puis devient négatif. Le karst est chargé suite aux épisodes pluvieux et restitue de l'eau à la rivière.

Les hydrogrammes disponibles entre Betllans et Conat semblent mettre en évidence une deuxième perte. Celle-ci n'est pas quantifiable pour l'instant, en raison du trop faible nombre de données disponibles et de la forte imprécision de la courbe de tarage de Conat.

## Ruisseau d'Evol

Afin d'étudier les échanges entre la haute vallée d'Evol et le karst du Mont Coronat, nous avons réalisé des mesures de débits et les profils de conductivité et de température dans le ruisseau d'Evol. Les résultats bruts obtenus sont présentés en annexe 8.

### Etude des débits

Les débits mesurés sont présentés dans le Tableau 8. Les points de mesures se situaient aux endroits suivants :

- A l'amont du ruisseau, après la convergence des 3 apports du haut bassin versant
- En amont de la fontaine des Doux
- En aval de cette même résurgence
- Au refuge de la Mouline, à partir duquel le ruisseau ne s'écoule plus sur du calcaire

Tableau 8 : Comparaison des débits mesurés dans le ruisseau d'Evol

Aval de la convergence des 3 ruisseaux	Amont de la Fne des Doux	Aval de la Fne des Doux	Refuge de la Mouline
40 L/s	37 L/s	61 L/s	59 L/s

Le débit est conservé entre l'amont et la résurgence ; en effet, l'incertitude de mesure ne permet pas de dire que 3 L/s soit une différence significative. De même, aucune perte n'est mise en évidence entre l'aval de la résurgence et la Mouline.

Nous remarquons que la fontaine des Doux augmente le débit de 39,3%, ce qui représente un apport important.

Ces résultats ne montrent pas de perte du ruisseau d'Evol vers le karst du Mont Coronat. Cependant, il se peut qu'une perte existe périodiquement. D'autres jaugeages seront à réaliser pour confirmer ou non ce résultat.

En vérifiant avec les mesures de conductivités, l'apport de la Fontaine des Doux représente 39,1% du débit total du cours d'eau. Cela correspond à nos mesures de débits, la méthode du jaugeage au sel présente donc une faible incertitude.

### Etude de la conductivité et de la température

Les localisations des sites de mesures sont présentées en annexe 9.

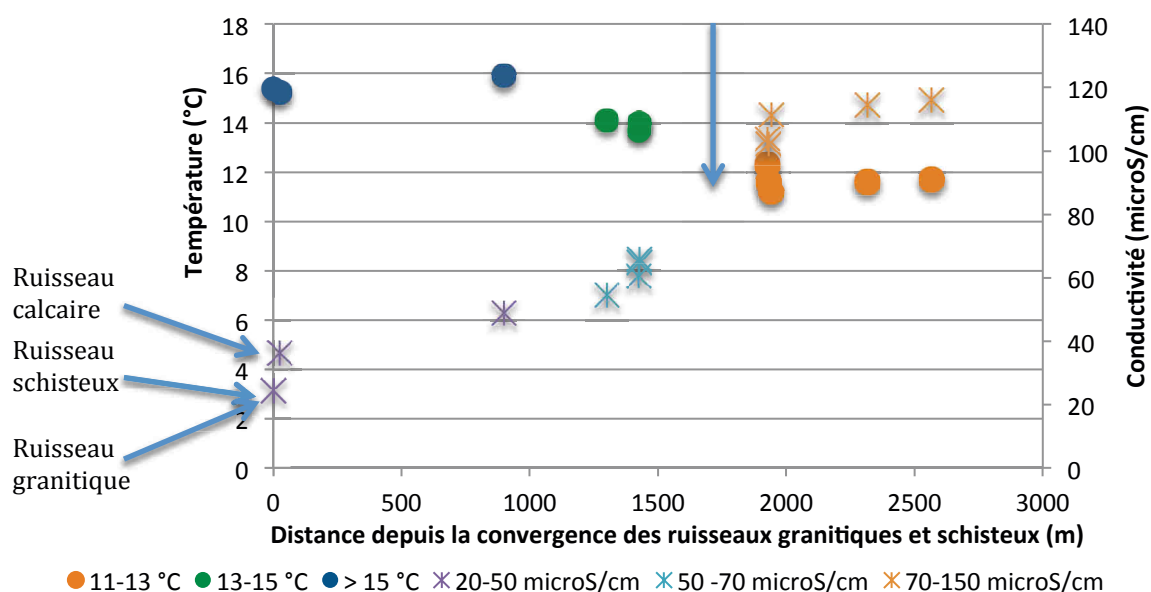


Figure 13 : Profils de conductivité et température du ruisseau d'Evol

La Figure 13 montre que plusieurs facteurs augmentent la conductivité :

- la dissolution des minéraux lors du passage de l'eau sur le calcaire
- l'apport de sources ou de résurgences karstiques telles que la fontaine Grosse et la fontaine des Doux.

La température diminue de l'amont vers l'aval, passant de 15,9 °C à 11,7 °C. L'eau provenant des résurgences est entre 6 et 8 °C.

Connaissant les conductivités de chaque ruisseau amont et le débit à leur convergence, l'apport de chacun a pu être quantifié, comme le montre le Tableau 9.

Tableau 9 : Contribution de chaque type de sol à l'écoulement du ruisseau d'Evol

	Granite	Schiste	Calcaire	Convergence
Conductivité	20,46	30,2	114,9	36,3
%	51,8	35,1	13,1	100
L/s	20,8	14	5,2	40

L'apport du ruisseau calcaire représente une faible proportion des écoulements du ruisseau d'Evol. A la sortie de Fontaine Grosse, la conductivité était de 85  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , contre 114,9 juste avant la convergence. Cela signifie que l'eau s'est chargée rapidement en cheminant sur le calcaire.

La conductivité de la Fontaine des Doux est en moyenne de 163  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , l'eau est donc karstique avec un faible temps de séjour dans le réseau souterrain.

## 4. Synthèse

### a. Bilan hydrique sur le bassin versant de Betllans

Le bilan hydrique est réalisé à l'échelle annuelle. Nous pouvons l'établir pour le sous bassin versant de Betllans car nous possédons des chroniques de débits complètes sur cette station de 2012 à 2014. De plus, la courbe de tarage y semble toujours valable.

Nous possédons la pluviométrie SPAZM sur ce bassin versant jusqu'en 2012, et celle relevée à Nohèdes jusqu'en 2014. Nous avons établi une relation linéaire entre les précipitations relevées à Nohèdes et celles estimées sur l'ensemble du bassin versant afin d'avoir une idée des pluies de 2013 et 2014. La Figure 14 montre la relation trouvée.

Le coefficient  $R^2$  de 0,9 traduit une assez bonne estimation, d'autant que la relation semble de plus en plus valable pour des pluviométries importantes. La relation a été établie avec les données du pluviomètre de Nohèdes car elle est plus robuste qu'avec les données de la microcentrale.

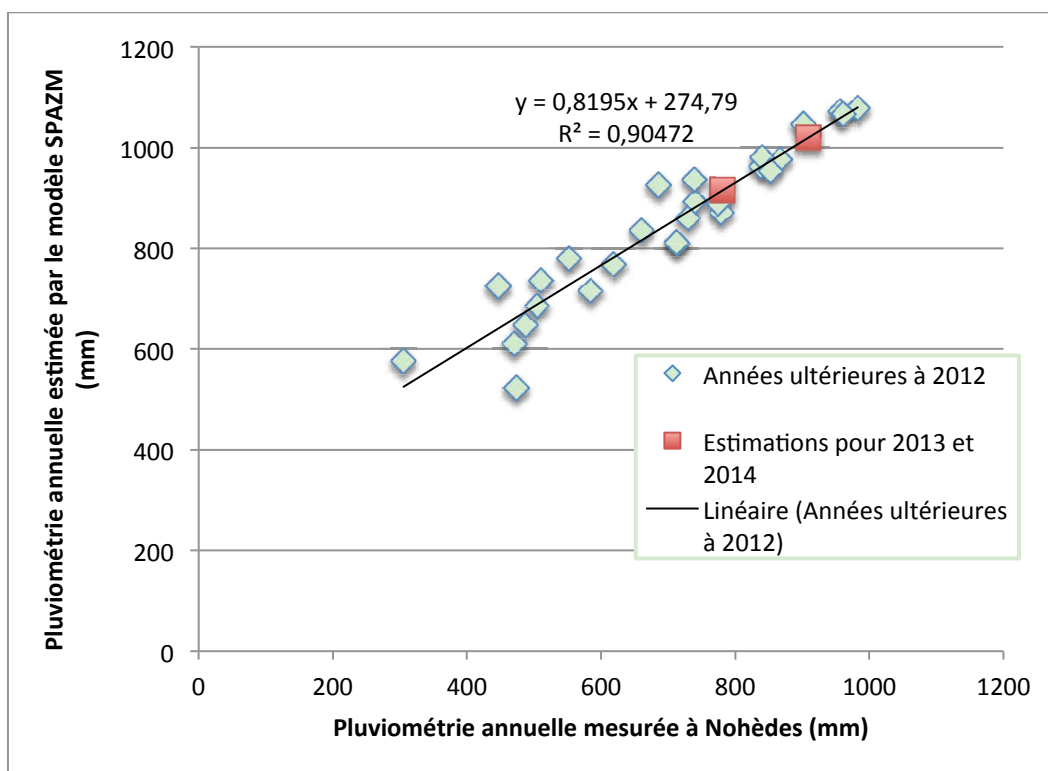


Figure 14 : Relation établies entre la pluviométrie annuelle à Nohèdes et sur le bassin versant de Betllans

Le Tableau 10 résume les bilans 2012 à 2014.

Tableau 10 : Bilans hydriques 2012, 2013 et 2014 sur le bassin versant de Betllans

	Pluie brute (mm)	Pluie brute (m3)	Pluie nette (m3)	Cr	ETR (m3)	Pertes (m3)
<b>2012</b>	724,5	23 345 394	6 520 934	0,28	13 088 176	3 736 284
<b>2013</b>	1019,9	32 863 998	13 196 612	0,40	14 166 144	5 501 242
<b>2014</b>	923,1	29 744 835	10 977 212	0,37	13 810 381	4 957 242

L'année 2012 a été une année très sèche, au contraire de 2013. Les pertes dans le karst, qu'elles soient par infiltration continue ou par les pertes de la rivière de Nohèdes, semblent donc comprises entre 3 700 000 et 5 600 000 m<sup>3</sup> chaque année.

### *b. Bilan sur les zones perméables du karst*

A.CHAUBET a réalisé en 2014 le bilan hydrique sur les zones perméables du massif karstique, montrant qu'environ 9 400 000 m<sup>3</sup> s'infiltrent chaque année (CHAUBET, 2014). L'hypothèse était que toute l'eau qui tombe sur le karst s'infiltré.

Ce calcul a été mené en considérant uniquement les zones perméables, mais il existe des écoulements allant de surfaces imperméables vers les surfaces perméables, ce qui augmente la quantité d'eau infiltrée. Ainsi, les surfaces d'infiltration ont été redessinées avec le logiciel QGis, comme le montre la Figure 15, et croisées avec les courbes isohyètes fournies par Aurelhy.

Il pourra être intéressant à l'avenir de refaire ce calcul avec les pluies données par le modèle SPAZM sur ces surfaces.



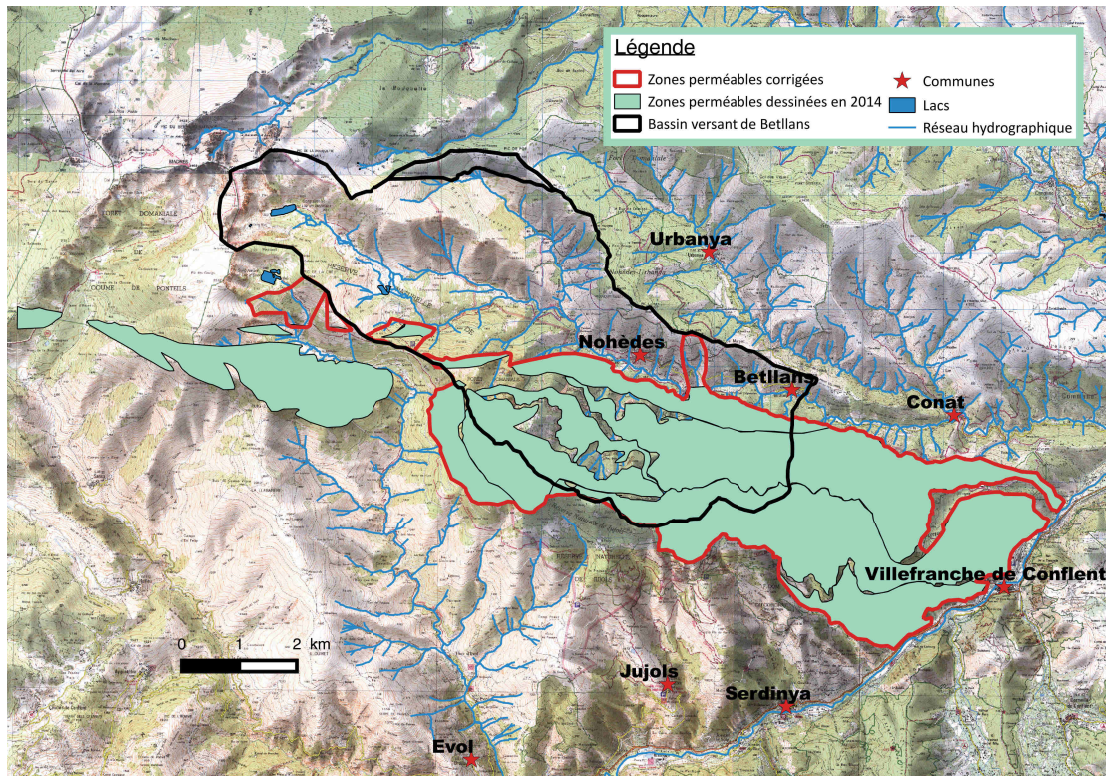


Figure 15 : Correction des zones perméables du Mont Coronat

Les zones perméables de la haute vallée d’Evol ne sont pas prises en compte car aucune perte de la rivière d’Evol n’a été mise en évidence précédemment.

La pluie brute moyenne interannuelle a été calculée en considérant sur chaque aire la lame d’eau moyenne entre les isohyètes supérieure et inférieure.

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Bilan hydrique réalisé sur les zones perméables du Mont Coronat

Pluie brute (m3)	ETR (m3)	Pertes (m3)
17 859 211	11 553 168	6 306 044

Le volume d’eau infiltré correspond à l’alimentation de 86 300 habitants en eau potable et est inférieur à celui estimé par A.CHAUBET car elle prenait en compte une partie des zones perméables de la vallée d’Evol.

En ayant réalisé ce même bilan uniquement sur les zones perméables de la vallée d’Evol, nous obtenons une infiltration moyenne de 110 L/s, ce qui semble plus important que le débit de la résurgence de la fontaine des Doux. Deux hypothèses sont possibles :

- Il existe une connexion entre la haute vallée d’Evol et le karst du Mont Coronat, qui n’a pas été mise en évidence lors de nos mesures
- Le débit moyen de la résurgence est bien de l’ordre de 110 L/s et aucune connexion n’existe, mais notre mesure ponctuelle en période d’été ne permet pas de le confirmer

Dans le cas où la première hypothèse serait vraie, le bilan réalisé en tenant compte de toutes les zones perméables donne un volume d’infiltration d’environ 11 000 000 m<sup>3</sup>/an, soit de quoi alimenter 151 000 habitants consommant quotidiennement 200 L d’eau.

### c. Vérification des résultats

Afin de vérifier la cohérence de nos résultats, nous avons calculé la proportion de zones perméables sur le bassin versant de Betllans et redessiné les isohyètes. Le bilan hydrique a donc été reconduit sur ce périmètre, conduisant aux résultats du Tableau 12.

Tableau 12 : Bilan hydrique réalisé sur les zones perméables du BV de Betllans

	Surface (km <sup>2</sup> )	Pluie brute (m <sup>3</sup> )	ETR (m <sup>3</sup> )	Pertes (m <sup>3</sup> )
<b>BV de Betllans entier</b>	32,2	27 552 497	13 668 597	5 000 000
<b>Zones perméables sur le BV</b>	12,24	9 651 250	5 210 648	4 440 602
<b>Proportion zones perméables /BV</b>	38%	35%	38%	89%

Ces résultats montrent qu'environ 89% des pertes sur le bassin versant entier sont dues aux infiltrations continues sur les zones perméables, les 11% restant provenant de la perte de la rivière de Nohèdes entre la Millada et Betllans. Cela représente un débit moyen de 20 L/s, correspondant à ce que nous avons calculé avec les hydrogrammes.

## V. Etude du réseau souterrain

### 1. Provenance de l'eau de la rivière souterraine de la grotte d'En Gorner

#### a. Analyses chimiques de l'eau

Les analyses chimiques ont pour but de valider la connexion entre les pertes de la rivière de Nohèdes et le réseau souterrain. Le projet initial consistait à suivre les teneurs en azote et phosphore le long de la rivière de Nohèdes et dans la grotte d'En Gorner. Ces espèces chimiques ont été choisies car elles ne sont naturellement pas présentes dans les eaux souterraines, alors que la rivière de Nohèdes en contient à cause des eaux usées du village.

Un premier calcul théorique a estimé la concentration en ammonium dans la rivière à  $7,2 \cdot 10^{-5}$  g<sub>NH<sub>4</sub></sub>/L. Les mesures devant être réalisées par spectrophotométrie, cette concentration est en dessous de la gamme de mesure.

Le projet a donc été modifié pour connaître avec précision la composition chimique de l'eau en différents points du bassin versant et déterminer les marqueurs qu'il serait plus judicieux de suivre.

#### Matériel et méthodes d'analyse

L'annexe 10 localise les 5 sites de prélèvements choisis :

- Une station de référence « eau de rivière » dans la *Ribera de l'Home mort*
- Une deuxième station de référence « eau de rivière » dans le ruisseau d'Evol, en amont d'une éventuelle perte rejoignant En Gorner
- Une station d'évaluation en amont de Nohèdes, en aval de la bergerie de Montellà et de la microcentrale EDF.



- Une station d'évaluation en aval du village, à la station hydrométrique de la Millada, juste avant la perte.
- Enfin, une dernière station d'évaluation à la résurgence de Ria.

Il n'a malheureusement pas été possible de réaliser une analyse dans la rivière souterraine de la grotte d'En Gerner. En fonction des résultats obtenus, cela pourra être à prévoir ultérieurement.

Les flacons d'échantillonnage ainsi que les pipettes et les filtres ont été emprunté au laboratoire Hydrosience à Montpellier, qui a également réalisé les analyses. Les prélèvements ont été réalisés selon le protocole proposé par l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2006).

#### Mesure de l'alcalinité (TAC)

Le TAC est mesuré avec un titrateur automatique METTLER TOLEDO Rondolino G20. Une mesure de pH est réalisée puis les espèces alcalines sont dosées par un acide fort. Le point équivalent est détecté par pHmétrie (environ pH = 4,5).

#### Analyse des éléments majeurs (anions et cations)

Les éléments majeurs sont quant à eux mesurés grâce à une chromatographie ionique DIONEX ICS-1000. Cette méthode consiste à séparer les ions d'une solution en la faisant passer dans une colonne contenant une phase stationnaire chargée (résine échangeuse d'ions). En sortie de colonne, chaque espèce séparée donne un signal de conductivité qui permet d'identifier l'ion et de connaître sa concentration.

#### Analyse des éléments traces

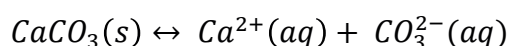
Une ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) THERMO ICAP Q permet de connaître les concentrations en éléments traces présents dans les eaux testées. Tout d'abord, la solution est vaporisée puis les éléments sont ionisés par une torche à plasma. Ensuite, un filtre de masse extrait l'espèce que l'on souhaite analyser en fonction de son rapport masse/charge. Un détecteur détermine ensuite sa concentration initiale.

### **Résultats et interprétations**

#### Dureté et alcalinité

La dureté d'une eau (ou Titre Hydrotimétrique) est déterminée par sa teneur en ions calcium et magnésium. Les eaux de rivières sont généralement assez douces, au contraire des eaux karstiques, riches en carbonates de calcium et de magnésium dissous selon les équations suivantes :

Équation 8 : Dissolution des carbonates de calcium

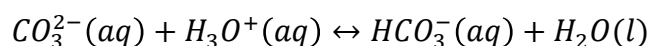


Équation 9 : Dissolution des carbonates de magnésium



Les ions carbonates ainsi libérés se transforment en hydrogénocarbonates pour des pH inférieurs à 8,3 (ce qui concerne nos prélèvements), selon l'équation de réaction acido-basique suivante :

Équation 10 : Réaction acido-basique de formation des bicarbonates



L'alcalinité (ou Titre Alcalimétrique Complet) désigne ici la quantité d'ions  $\text{HCO}_3^-$  contenue dans l'eau. Les duretés et alcalinités des eaux prélevées sont présentées dans le Tableau 13 ci-dessous.

Tableau 13 : Duretés et Alcalinités des eaux prélevées

	<i>Ruisseau d'Evol</i>	<i>Ribera de l'Homme Mort</i>	<i>Amont Nohèdes</i>	<i>Millada</i>	<i>Résurgence de Ria</i>
TH totale (°F)	3,31	2,10	2,41	6,11	16,70
TAC (°F)	3,8	2,8	4,8	6,8	17,7

Ces résultats sont cohérents ; les eaux de surface s'écoulant sur du granite ou du schiste sont très douces et de faible alcalinité, l'eau de la résurgence de Ria présente une dureté caractéristique d'un aquifère karstique (entre 16 et 18°F) et une alcalinité plus forte.

#### Éléments majeurs

L'analyse des ions a révélé deux erreurs dans la balance ionique pour les prélèvements de la rivière de l'Homme Mort et à l'amont de Nohèdes. Les concentrations obtenues par chromatographie étant les mêmes que celles obtenues par spectrométrie de masse, l'erreur provient sûrement de la mesure de TAC. Cependant, les conclusions énoncées ci-dessus restent valables.

De plus, la Figure 16 montre que les concentrations mesurées en calcium et magnésium sont cohérentes : les eaux de la résurgence de Ria sont très chargées, au contraire des eaux de surface. Les écoulements ayant lieu sur des terrains calcaires comme le ruisseau d'Evol présentent également des concentrations plus élevées. Ces cations proviennent de la karstification.

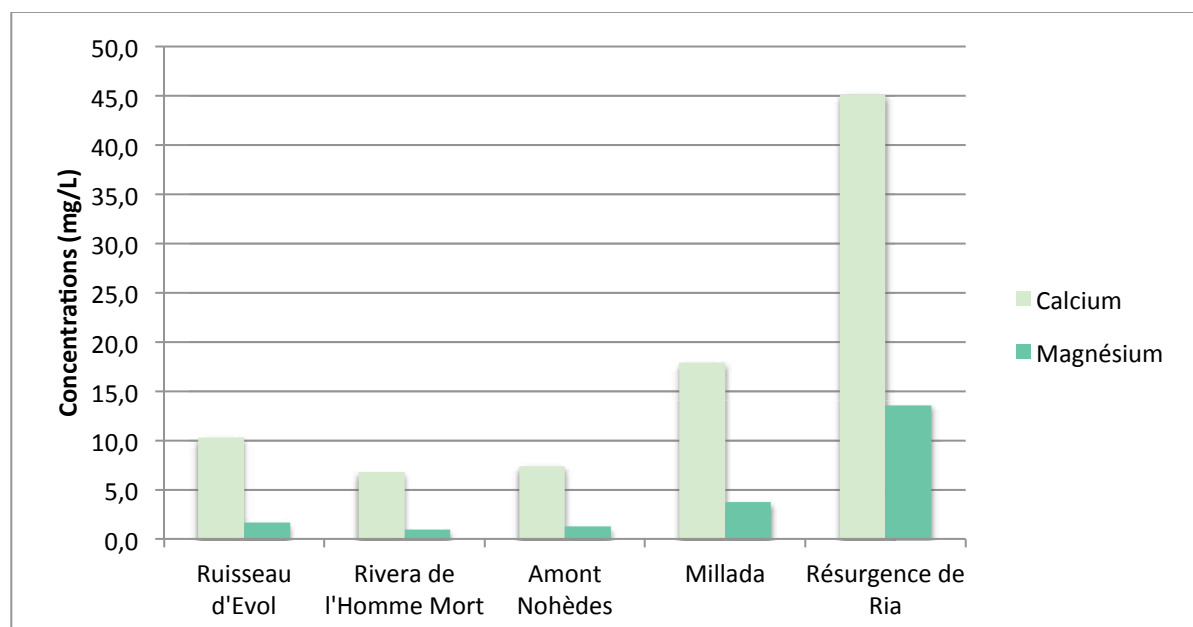


Figure 16 : Profils de concentrations en ions calcium et magnésium sur le bassin versant

Les résultats obtenus pour les autres éléments majeurs sont présentés en annexe 11 et résumés dans la Figure 17 ci-dessous.

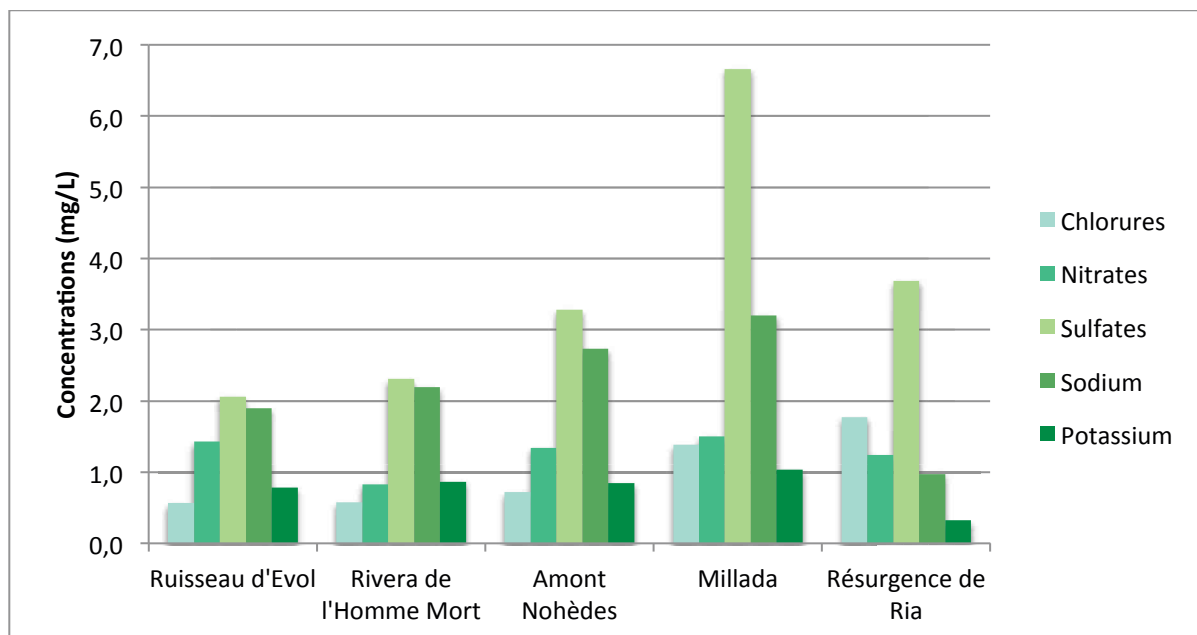


Figure 17 : Profils des concentrations en ions

Toutes les espèces présentent un gradient de concentration amont-aval entre la rivière de l'homme mort et la Millada. A l'exception des ions chlorures, les concentrations sont plus faibles à la résurgence de Ria.

Aucun de ces composés ne semblent pouvoir servir de marqueur pour le suivi des écoulements souterrains car les concentrations sont trop faibles.

#### Eléments traces

De nombreuses espèces chimiques ont été analysées grâce à la spectrométrie de masse et peuvent être regroupées en fonction de leurs profils de concentration.

Plusieurs composés présentent un gradient de concentration de l'amont vers l'aval, montrant que l'eau se charge au contact des roches au fur et à mesure de son écoulement sur le bassin versant. C'est par exemple le cas du sodium, du potassium ou encore du Lithium, comme le montre la Figure 18 suivante.

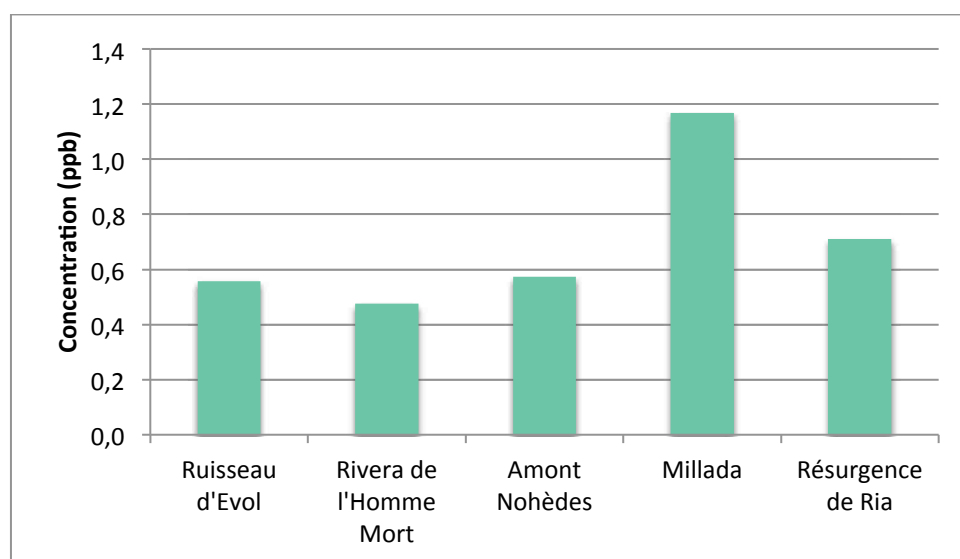


Figure 18 : Profil de concentration du Lithium 6 sur le bassin versant

Le lithium possède deux isotopes :  ${}^7\text{Li}$  provient de la dissolution primaire des roches,  ${}^6\text{Li}$  apparaît lorsque des minéraux secondaires se forment (MILLOT, 2013). L'étude isotopique du lithium pourrait permettre par la suite d'identifier la provenance des eaux du réseau souterrain.

D'autres composés, issus de la dissolution de roches magmatiques et/ou métamorphiques, présentent une concentration plus importante sur le haut du bassin versant, puis se dégradent au cours de l'écoulement. C'est le cas du Fer, du Vanadium et de l'aluminium, dont les concentrations sont présentées en Figure 19. Nous y voyons que la concentration est plus importante dans la Ribera de l'Homme mort, qui s'écoule sur des roches métamorphiques, que dans le ruisseau d'Evol, s'écoulant sur des terrains calcaires.

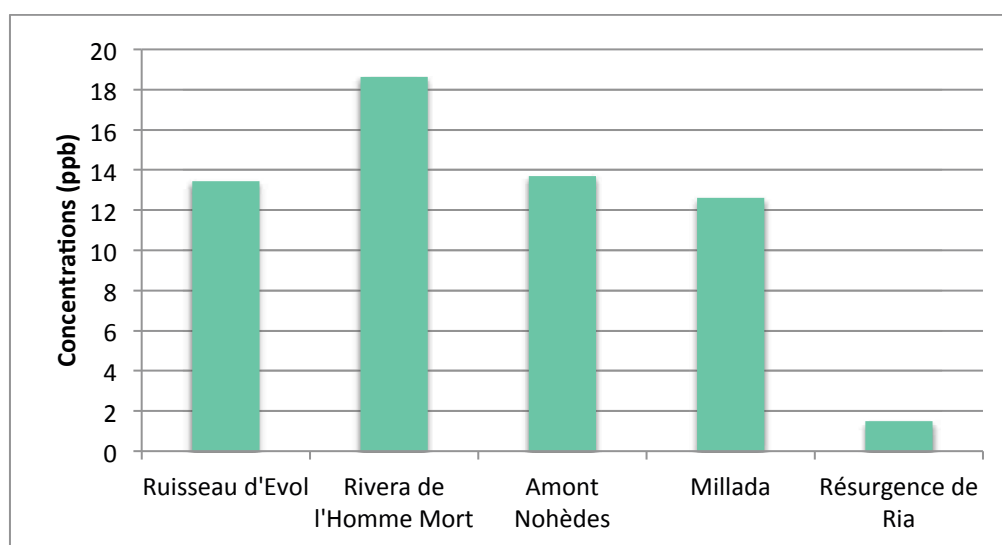


Figure 19 : Profil de concentration de l'Aluminium sur le bassin versant

Les analyses ont également révélé des profils similaires en ce qui concerne les terres rares. Ainsi, l'Yttrium et les Lanthanides semblent être plus présents sur le haut du bassin versant et diminuer à partir de la Millada.

Les concentrations observées sont dans les ordres de grandeurs auxquels nous nous attendions et ne permettent pas de caractériser spécifiquement l'eau de rivière par rapport à l'eau souterraine. Même si certains éléments sont présents dans la rivière et très peu à Ria, nous ne savons s'ils proviennent de l'infiltration ou de la dissolution des roches souterraines.

Pour valider les connexions entre les pertes de la rivière de Nohèdes et la rivière souterraine de la grotte d'En Gorner, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- Des suivis isotopiques
- Des traçages artificiels, en fixant un fluorimètre dans la rivière souterraine.

### *b. Etude de la rivière souterraine d'En Gorner*

Afin de mieux caractériser les écoulements dans le massif karstique, nous nous sommes rendus dans la grotte d'En Gorner avec un spéléologue et avons réalisé un jaugeage au sel dans la rivière, accessible après 2 km de conduits souterrains.

Nous avons également mesuré le débit dans la rivière de Nohèdes la veille, aux stations hydrologiques de Conat, Betllans et la Millada, pour estimer les pertes en période d'étiage et pouvoir comparer les résultats obtenus.



Figure 20 : sortie terrain dans la grotte d'En Gorner

Le Tableau 14 reprend les débits et les conductivités mesurées.

Tableau 14 : Mesures réalisées dans la rivière de Nohèdes et dans la grotte d'En Gorner

	Millada	Betllans	Conat	En Gorner
Débit (L/s)	101	104	74	69
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	100,3	114,6	145	216,4

Les débits mesurés dans la rivière de Nohèdes sont faibles et confirment l'étiage. La perte semble uniquement située entre Betllans et Conat et s'élève environ à 30 L/s. En considérant qu'elle rejoint intégralement la grotte d'En Gorner, cela représente environ 40% du débit de la rivière souterraine.

La conductivité au niveau de la perte est comprise entre 115 et 145  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En considérant que l'eau karstique provenant des infiltrations du haut bassin versant est d'environ 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (valeur mesurée à la résurgence de Ria), l'eau de la rivière souterraine est composée entre 40 et 55 % d'eau de rivière.

D'autres mesures seront à réaliser dans des conditions de débit différentes afin de confirmer ces premiers constats.

## 2. Localisation de la résurgence du réseau souterrain

L'objectif est de savoir si le réseau souterrain ressort dans le lit de la Têt ou s'il rejoint le karst noyé situé sous le fleuve. Cela nous informera quant à la vulnérabilité de la ressource et à son accessibilité. En effet, si l'on souhaite l'exploiter, il sera plus aisé d'installer un forage en amont d'une résurgence, à une faible profondeur, que d'atteindre un écoulement souterrain très profond, situé plus bas que le niveau du fleuve. Celui-ci sera d'autant plus vulnérable à l'infiltration d'une pollution.

La méthode retenue pour la localisation de la résurgence est le traçage à la fluorescéine avec utilisation de fluocapteurs. De nombreuses solutions ont été trouvées quant à la mise en place de ce projet, cependant le manque de temps et de budget pour l'achat de charbon actif n'ont pas permis sa réalisation. Un traçage a déjà été réalisé par des spéléologues sur le même site mais nous ne connaissons ni les objectifs ni les résultats de cette opération.

Dans le cas où cela ne répond pas à nos questionnements, le protocole pouvant être mis en place dans un prochain stage est le suivant :

### *a. Choix du traceur*

La fluorescéine semble le traceur le plus adapté car il est très soluble ( $s = 600\text{g/L}$  à  $20^\circ\text{C}$ ), présente une faible adsorption, est facilement détectable (seuil de détection d'environ  $0,001\ \mu\text{g/L}$  au spectrofluorimètre) et est visible à l'oeil nu pour de faibles concentrations ( $50$  à  $100\ \mu\text{g/L}$ ). De plus il est le moins coûteux à l'achat et à l'analyse et ne présente aucune toxicité pour l'homme et les animaux.

Il est à noter que la fluorescéine se dégrade lors d'une exposition aux UV, pour un pH acide (inférieur à 7) et en contact avec des espèces oxydantes (Chlore par exemple) ou des micro-organismes (DORFLIGER, 2010).

### *b. Choix du site d'injection et de la quantité de traceur*

L'injection de fluorescéine se fera dans la rivière souterraine de la grotte d'En Gorner. La quantité à prévoir dépend des paramètres suivants :

- Débit du fleuve Têt
- Bruit de fond naturel
- Seuil de détection de nos instruments de suivi

Le débit du fleuve Têt est en moyenne de  $11\ \text{m}^3/\text{s}$  à Rodès. Durant l'été, le débit d'étiage d'environ  $7,5\ \text{m}^3/\text{s}$ .

Le bruit de fond naturel représente la concentration en espèces chimiques initialement présentes dans la rivière susceptibles d'occuper les sites du charbon actif. Il sera déterminé grâce à un témoin, placé dans la rivière avant la réalisation du traçage. Cependant, le bruit de fond est généralement très faible concernant la fluorescéine.

Concernant le seuil de détection de nos mesures, il dépend des outils dont nous disposons. Pour une détection visuelle, la concentration doit être d'environ  $100\ \mu\text{g/L}$  (DORFLIGER, 2010) tandis qu'un spectrofluorimètre possède généralement un seuil de détection de  $0,001\ \mu\text{g/L}$ . Ces concentrations concernent l'éluat dans lequel sera plongé chaque fluocapteur.

Disposant de tous ces éléments, Mr Caumont nous conseille d'utiliser au minimum  $3\ \text{kg}$  de fluorescéine pour une première localisation qualitative de la résurgence.

La réserve naturelle possède déjà un kilo de fluorescéine.

### *c. Choix des sites d'observation*

Il semble judicieux d'étendre notre zone d'étude le long du fleuve Têt entre Villefranche de Conflent et peu après le captage de Ria, à la limite de la couche calcaire, comme le montre la Figure 21. En effet, les écoulements souterrains étant mal connus et semblant avoir des directions peu prévisibles, il est important de considérer un assez grand tronçon du fleuve. Bien que la commune de Ria-Sirach repose sur une couche de sédiments perméable, il est peu probable qu'elle soit en contact avec le karst, car le schiste imperméable semble les séparer. Il n'est donc pas nécessaire de disposer des fluocapteurs jusqu'à la commune de Ria.



Le nombre de sites et la localisation des capteurs sont limités par les conditions d'accès à la rivière, sa morphologie et son hydrologie ainsi que par les contraintes d'analyse, notamment les coûts. Leur nombre devra cependant être assez important pour une localisation assez précise de la résurgence. Sachant que le tronçon entre Villefranche de Conflent et le captage de Ria est d'environ 1,7km, si nous voulons localiser la résurgence au minimum à 250m près, il faut considérer 7 sites d'observation.

Des prospections sur le terrain seront nécessaires, ainsi qu'un témoin placé en aval du fleuve Têt, aux alentours du captage de Ria.

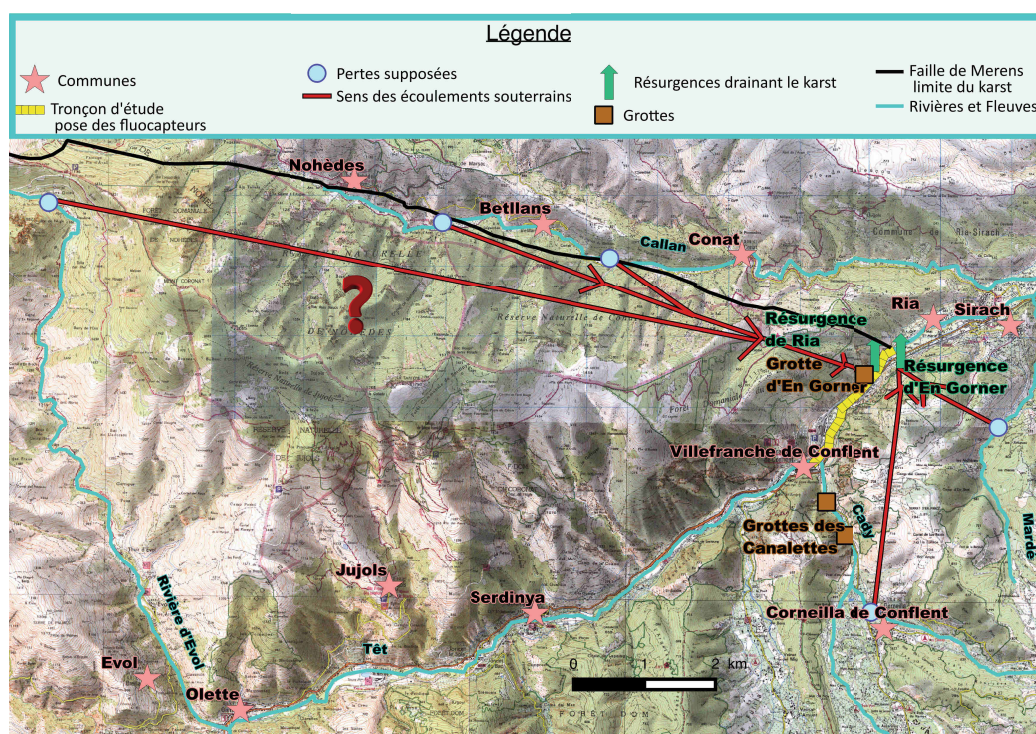


Figure 21: Localisation de la résurgence du réseau souterrain

#### d. Choix des moyens et fréquence d'observations

##### **Fabrication des fluocapteurs**

Le matériel nécessaire est le suivant :

- Grillage garde-manger (environ 15 cm sur 15 cm pour 1 fluocapteur)
- Tubes PVC de 10-15 cm de long, d'environ 5 cm de diamètre percés de trous
- Agrafes
- Charbon végétal (l'équivalent en volume d'une boîte d'allumettes par fluocapteur)
- Ficelles et supports

Le charbon végétal est disposé dans le grillage, refermé en petit sac à l'aide d'agrafes. Ceci est ensuite fixé dans un tube de PVC afin de protéger le fluocapteur. Il peut alors être fixé dans la rivière.

Les fluocapteurs seront laissés 1 semaine puis remplacés la semaine suivante. Si les premiers fluocapteurs sont positifs, le suivi pourra être arrêté.

### *e. Protocole de terrain*

Préalablement à la mise en œuvre du traçage à la fluorescéine, les collectivités locales (mairies, services de l'Etat) ainsi que les autres usagers de la rivière doivent être prévenus. Il faut également informer les exploitants des captages AEP susceptibles d'être impactés.

#### ***Mise en place des fluocapteurs***

Les fluocapteurs doivent être fixés au fond de la rivière, dans un endroit où l'eau est bien mélangée. Ils peuvent être accrochés sur des cailloux avec une ficelle, ou fixés sur des supports pour être certain de ne pas les perdre. Si les conditions de terrain ne le permettent pas, les fluocapteurs pourront être placés sur les berges, l'idéal étant qu'un maximum de l'écoulement soit en contact avec le fluocapteur.

#### ***Injection du traceur***

La fluorescéine devra être apportée sur le terrain sous forme d'une solution préalablement préparée. La fluorescéine tache énormément, il faut prévoir des habits adéquats et mettre des bâches en plastique avant de manipuler pour protéger le laboratoire. La personne qui manipule et injecte la fluorescéine ne pas être celle qui manipule les fluocapteurs et les échantillons car cela fausserait les mesures.

#### ***Prélèvement des fluocapteurs***

Les fluocapteurs seront prélevés au bout d'une semaine puis remplacés par d'autres. Une fois le fluocapteur récupéré, le charbon actif est mis dans un grand tube à essai, dans lequel on verse de l'alcool puis deux pastilles de potasse caustique, avant de refermer avec un bouchon en caoutchouc. L'idéal serait également de faire régulièrement un prélèvement d'eau de la rivière pour être ensuite analysés au spectrofluorimètre (à la maison de l'eau à Montpellier).

### *f. Protocole d'analyse*

Les échantillons seront ensuite stockés dans des flacons à l'abri de la lumière avant d'être acheminés à Montpellier au laboratoire Hydrosiences où ils seront analysés au spectrofluorimètre. Les résultats doivent toujours être comparés avec ceux du témoin.

### *g. Contacts*

Les personnes suivantes peuvent apporter leurs conseils et leur aide :

- Daniel Caumont, ancien président et fondateur de la section spéléologique du CLPA de Montpellier et ancien secrétaire général de la Fédération Spéléologique de l'Hérault. Il est d'accord pour fournir une partie du matériel et apporter son aide pour la fabrication et la disposition des fluocapteurs.  
Téléphone : 06 07 68 05 08, e-mail : [danielcaumont@yahoo.fr](mailto:danielcaumont@yahoo.fr)
- Pascal Brunet, ingénieur au laboratoire Hydrosiences de Montpellier.  
Il est d'accord pour permettre la réalisation des analyses spectrofluorimétriques au laboratoire Hydrosiences.  
Téléphone : 0467149039, e-mail : [brunet@msem.univ-montp2.fr](mailto:brunet@msem.univ-montp2.fr)



# Conclusion

---

Cette étude a été menée dans la continuité des travaux réalisés depuis 2009 et a apporté de nouveaux éléments.

Tout d'abord, l'analyse des données des deux pluviomètres de Nohèdes et de la microcentrale a révélée une différence d'environ 150 mm/an, illustrant le fort gradient de pluviométrie de la vallée. Les pluies brutes à l'échelle du bassin versant calculées par le modèle SPAZM d'EDF ont été obtenues et comparées aux valeurs fournies par le modèle Aurelhy de météoFrance, montrant une cohérence entre les deux bases de données.

Les routines VBA utilisées pour parvenir à ces conclusions seront réutilisables lorsque d'autres données seront disponibles.

Grâce à l'analyse des hydrogrammes de chaque station hydrométrique, une perte périodique de la rivière entre la Millada et Betllans a été de nouveau observée, et une deuxième perte entre Betllans et Conat a été mise en évidence. Par ailleurs, l'étude des débits et des conductivités du ruisseau d'Evol n'ont pas montré de perte qui rejoindrait le karst du Coronat, d'autres mesures sont à faire pour le confirmer.

Les volumes annuels de pluie nette de chaque station ont été calculés à partir des hydrogrammes, permettant d'obtenir des coefficients de ruissellement sur chaque sous bassin versant. Ils se révèlent du même ordre de grandeur que ceux obtenus les années précédentes, et le coefficient au Clot est toujours supérieur à 1. Il sera donc nécessaire de compléter la courbe de tarage et de recalculer le coefficient de ruissellement avec les pluies annuelles estimées par le modèle SPAZM.

Le bilan hydrique pour les années 2012 à 2014 a été réalisé sur le bassin versant de Betllans avec les données de pluies brutes données par EDF montrant qu'entre 3 700 000 et 5 600 000 m<sup>3</sup> d'eau rejoignent le karst chaque année, par infiltrations continues et par pertes de la rivière.

De plus, les zones perméables du Mont Coronat ont été redessinées en tenant compte des écoulements allant des surfaces imperméables vers les surfaces perméables. Dans le cas où les écoulements souterrains de la vallée d'Evol ne seraient pas connectés au massif du Mont Coronat, environ 6 300 000 m<sup>3</sup> rejoindraient chaque année le réseau souterrain par infiltrations continues, soit de quoi alimenter plus de 86 000 habitants consommant quotidiennement 200L d'eau.

Parallèlement à cela, des analyses chimiques ont été réalisées sur l'ensemble du bassin versant pour caractériser les écoulements souterrains rejoignant la grotte d'En Gorner. Les résultats n'ont montré aucun marqueur pouvant être utilisé pour caractériser une eau spécifique, d'autres solutions sont donc à envisager.

La rivière souterraine d'En Gorner présente à l'étiage un débit d'environ 70 L/s, qui semble composé à 40 % d'eau de surface.

A l'issue de ce stage, le fonctionnement hydrique de la vallée est mieux compris. Cependant, les conclusions obtenues sont encore à confirmer et de nombreux mystères restent à éclaircir.

# Perspectives

---

## Avant l'été 2016

Les courbes de tarage des stations Clot, Millada et Betllans ont besoin d'être vérifiées en hautes eaux et celles de Torrelles et Conat doivent être refaites. L'acquisition d'un conductimètre et la réalisation de plusieurs jaugeages au sel dans différentes conditions de débit sont donc les priorités pour le personnel de la réserve avant l'été 2016.

Il serait également intéressant de faire des jaugeages dans le ruisseau d'Evol, aux mêmes endroits que ceux déjà réalisés.

## Stage 2016

Plusieurs missions sont à mener durant l'été 2016. Tout d'abord, concernant l'établissement du bilan hydrique de la vallée :

- Faire des jaugeages sur toutes les stations hydrométriques, prioritairement à Torrelles et Conat, pour réajuster les courbes de tarage
- Quantifier la perte entre Betllans et Conat par l'étude des hydrogrammes
- Réaliser d'autres séries de jaugeages et de mesures de conductivités dans la haute vallée d'Evol afin de vérifier qu'aucun écoulement ne rejoint le karst du Mont Coronat
- Définir la provenance des eaux de Fontaine Grosse par des mesures de conductivité et de débit, notamment au niveau de la perte amont

Concernant l'étude des écoulements souterrains, d'autres objectifs sont visés :

- Réaliser, le cas échéant, le traçage à la fluorescéine depuis la grotte d'En Gorner pour localiser, si elle existe, la résurgence dans le lit du fleuve Têt
- Etablir un protocole permettant de valider la connexion entre la rivière de Nohèdes et la grotte d'En Gorner
- Cartographier les zones de vulnérabilité du massif karstique à l'aide du module vulnérabilité intrinsèque du logiciel Optiprotect'eau, développé par Severin PISTRE, enseignant chercheur à Hydrosience. L'annexe 12 présente l'outil en question.

Mr PISTRE est intéressé par l'application du module de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque sur le massif du Coronat. Ce pourrait être l'objet d'un stage à Hydrosience, en parallèle avec le stage réalisé à la réserve.

## A long terme

- Réaliser des coupes géologiques précises sur le bassin versant pour mieux comprendre les directions des écoulements souterrains et délimiter le bassin d'alimentation de la résurgence de Ria
- Mettre en place une station de suivi météorologique sur le haut du bassin versant

## Bilan personnel

Ce stage m'a apporté beaucoup de connaissances techniques en hydrologie ainsi qu'en hydrogéologie et en climatologie. Ce fut pour moi l'occasion de découvrir et d'approfondir plusieurs disciplines. J'ai pu appliquer les compétences acquises en formation à Polytech, lors de jaugeages sur le terrain, et au bureau, notamment en écrivant des programmes VBA. J'ai également découvert de nouveaux outils de travail, comme les logiciels hydraccess, mapinfo et Qgis.

Travailler en autonomie m'a permis d'organiser mon temps pour atteindre mes objectifs. Cela m'a par ailleurs amené à solliciter et à travailler en relation avec différentes personnes.

Le travail réalisé a poursuivi celui commencé en 2009 et a ouvert de nouvelles pistes pour la suite de l'étude. Des erreurs ont été corrigées et certains points ont été éclaircis.

Le Tableau 15 résume les tâches réalisées chaque semaine.

**Tableau 15 : Liste des tâches effectuées**

	<b>Liste des tâches effectuées</b>
Semaine 1	Prise en main des logiciels Hydraccess et Hydras 3 Relevé des sondes Elaboration du protocole de prélèvement pour les analyses chimiques
Semaine 2	Recherches bibliographiques Rédaction du protocole de traçage à la fluorescéine Tracé des hydrogrammes Interprétation des résultats
Semaines 3 à 6	Hospitalisation et arrêt maladie
Semaine 7	Rencontre avec plusieurs professeurs et chercheurs à Hydrosciences Prélèvements d'eau pour les analyses chimiques Réception et prise en main du nouveau vélocimètre
Semaine 8	Contact avec EDF pour données de pluviométrie (SPAZM) Traitement des données des pluviomètres (VBA) Interprétation des résultats des analyses chimiques
Semaine 9	Essais de jaugeages au sel et au vélocimètre Création de modèles de dépouillement des jaugeages (VBA) Réception et traitement des données SPAZM (VBA)
Semaine 10	Prise en main des logiciels Qgis et Mapinfo Jaugeages (Clot, Torrelles, Millada, Betllans, vallée d'Evol) Calculs d'ETP et ETR
Semaine 11	Rédaction du rapport Réalisation de cartes avec QGis Jaugeages (Millada, Betllans, Conat, Grotte d'En Gorner) Calcul des pluies nettes
Semaine 12	Rédaction du rapport Relevé des sondes et tracé des derniers hydrogrammes Réalisation de cartes avec Qgis et du bilan hydrique sur les zones perméables

## Bibliographie

---

**Agence de l'eau Loire-Bretagne** – 2006 – Guide du prélèvement d'échantillons en rivière. 134p.

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

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

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

**Gottardi, F** – 2009 – Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français - Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG. 261p.

**Le Coz, J. et Al** – 2011 – Guide technique pour le contrôle des débits réglementaires - Onema, Cemagref, 128p.

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

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

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

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

**Millot, R.** – 2013 – Les isotopes du lithium: exemples d'applications en géochimie. Earth Sciences. Université d'Orléans. 89p et annexes.

### Applications

- Courant rivière
- Canaux d'irrigation
- Assainissement
- Etudes hydrologiques
- Canaux de ventilation
- Climatisation
- Cheminées



### Présentation

Le FW01 est un vélocimètre portable permettant la mesure des vitesses d'écoulement d'eau ou d'air.

Constitué d'un boîtier d'affichage LCD rétro-éclairé, d'une sonde télescopique et de différentes hélices, cet appareil léger et peu encombrant répond à différents besoins de mesure de vitesse des fluides.

Les différentes hélices se fixent au bout de la sonde, il n'y a aucun contact électrique, la

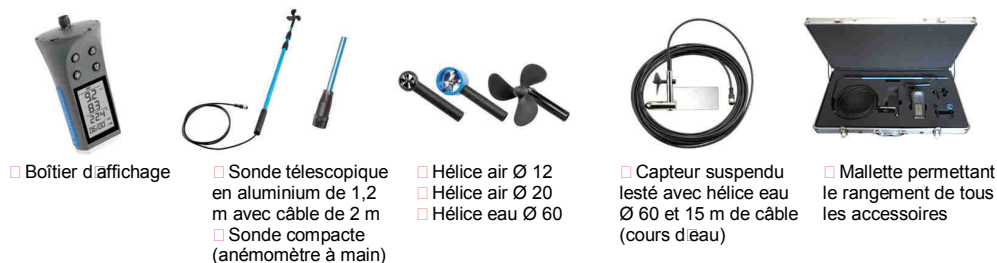
vitesses de rotation est mesurée par un palpeur magnétique.

L'utilisateur choisit le type de vitesse, instantanée, moyenne, minimum ou maximum, mesurée sur une période réglable de 3s à 24h, ainsi que l'unité de mesure (cm/s, m/s, km/h □). La mesure de température intégrée à la sonde, peut être convertie en température ressentie.

### Les accessoires

En version de base, le FW01 est livré avec une sonde télescopique, une hélice air de Ø 20, une hélice eau de Ø 60 et la mallette de transport.

D'autres accessoires sont disponibles en option.



□ Boîtier d'affichage

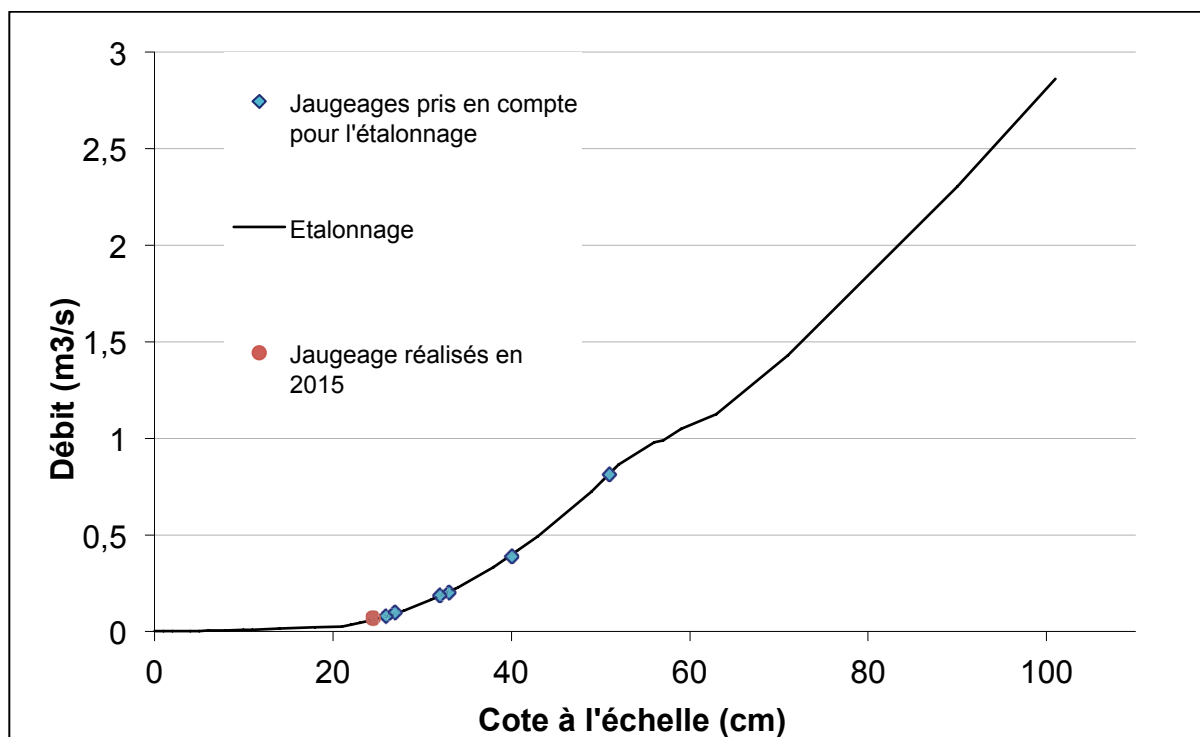
□ Sonde télescopique en aluminium de 1,2 m avec câble de 2 m  
□ Sonde compacte (anémomètre à main)

□ Hélice air Ø 12  
□ Hélice air Ø 20  
□ Hélice eau Ø 60

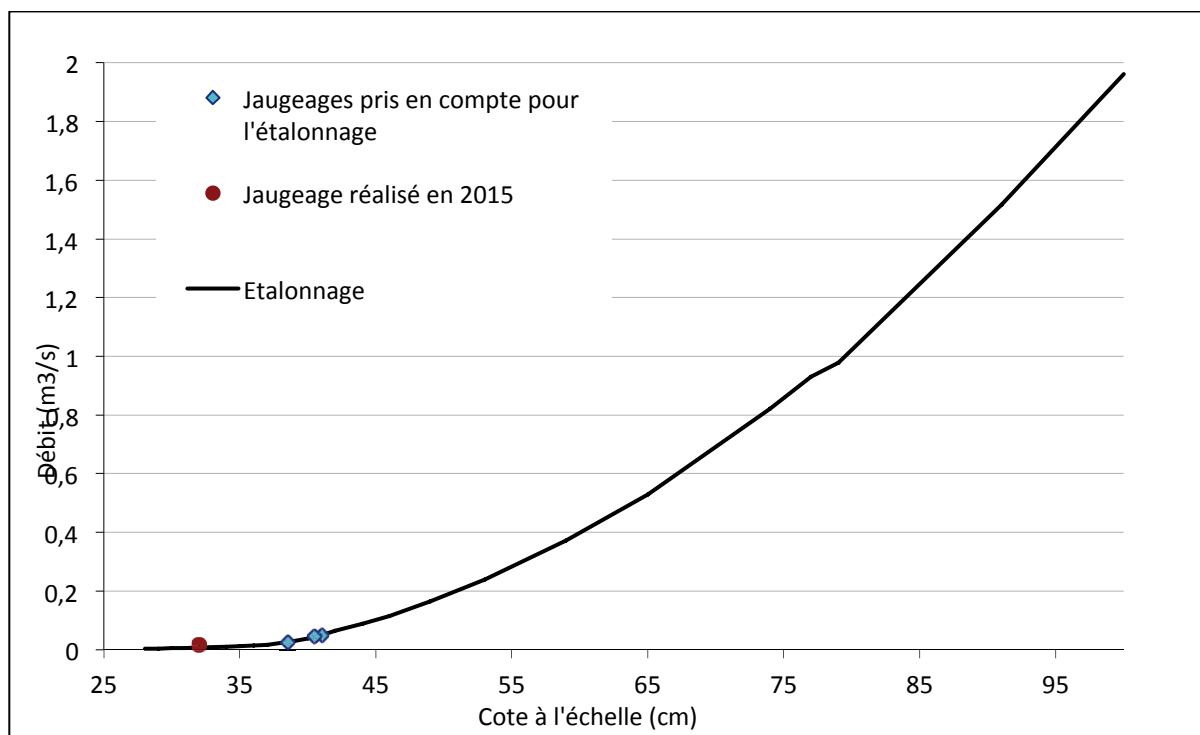
□ Capteur suspendu lesté avec hélice eau Ø 60 et 15 m de câble (cours d'eau)

□ Mallette permettant le rangement de tous les accessoires

### Annexe 2 : Courbe de tarage de la station Clot

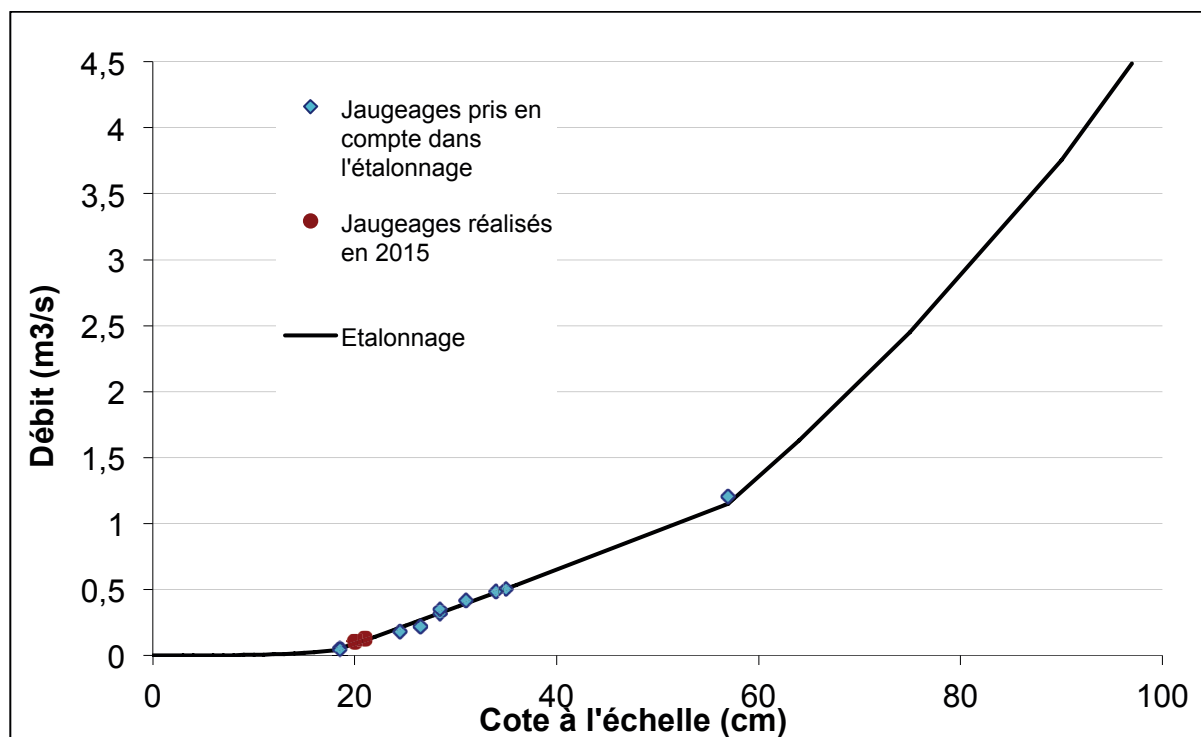


### Annexe 3 : Courbe de tarage de la station Torelles

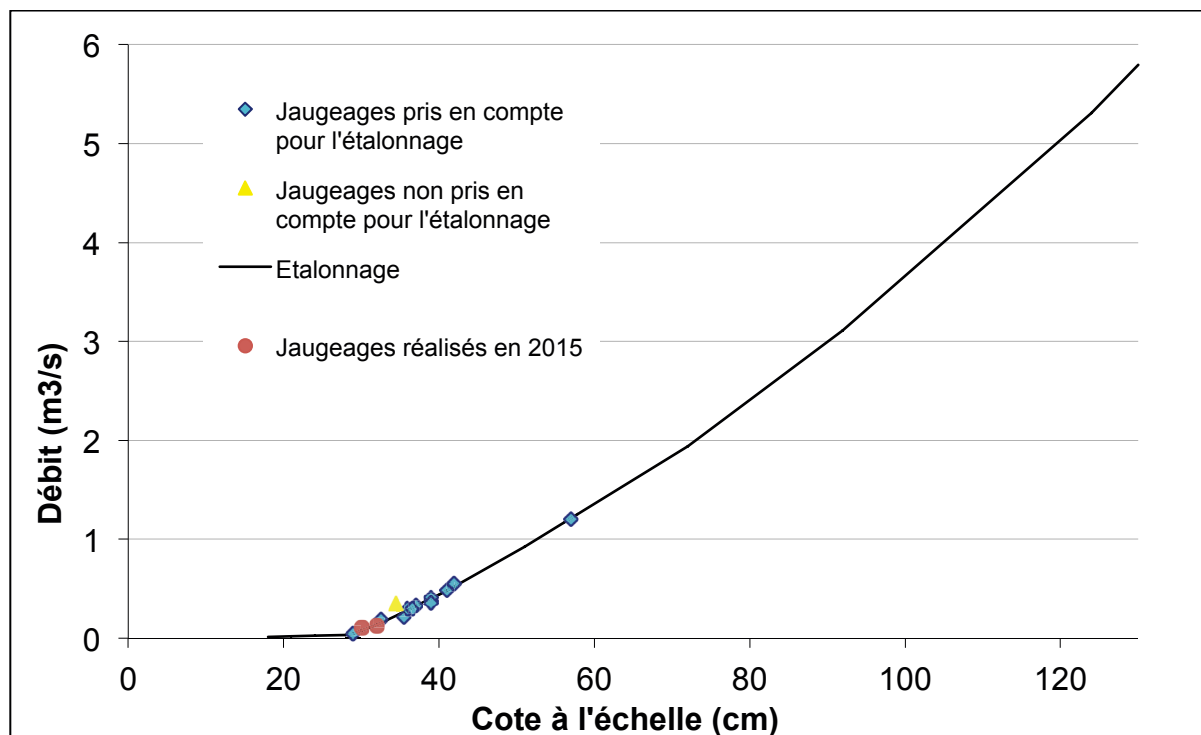




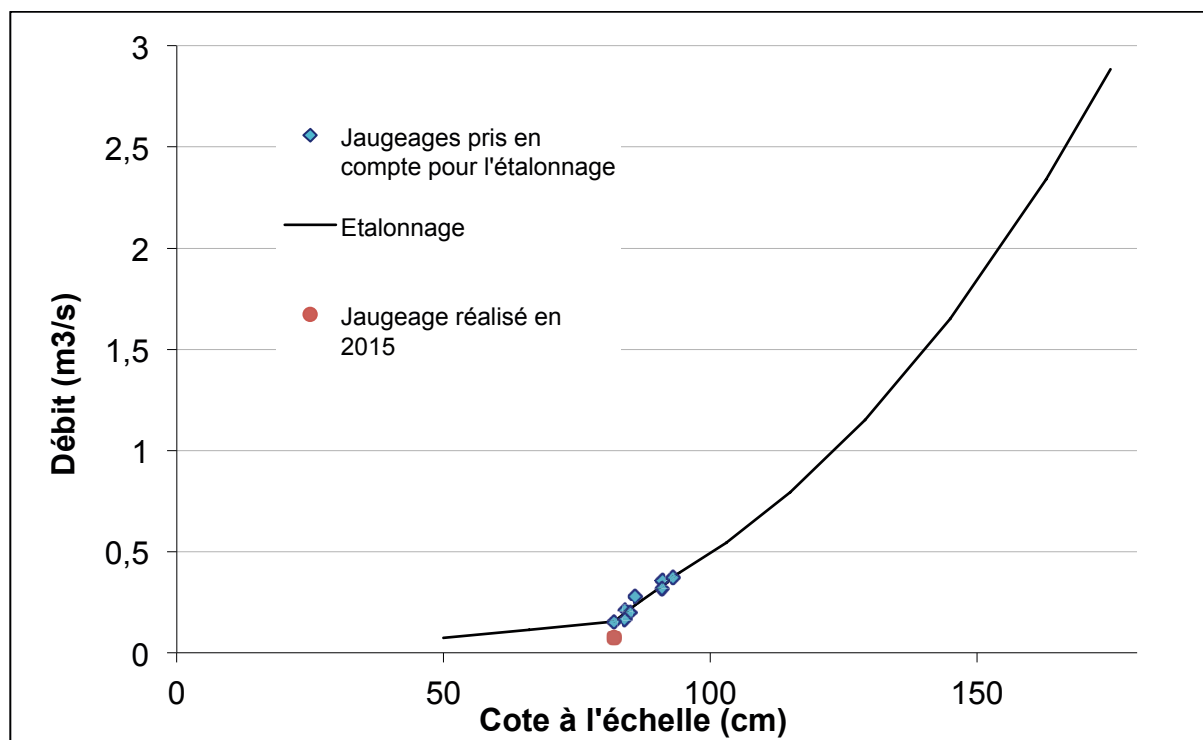
#### Annexe 4 : Courbe de tarage de la station la Millada



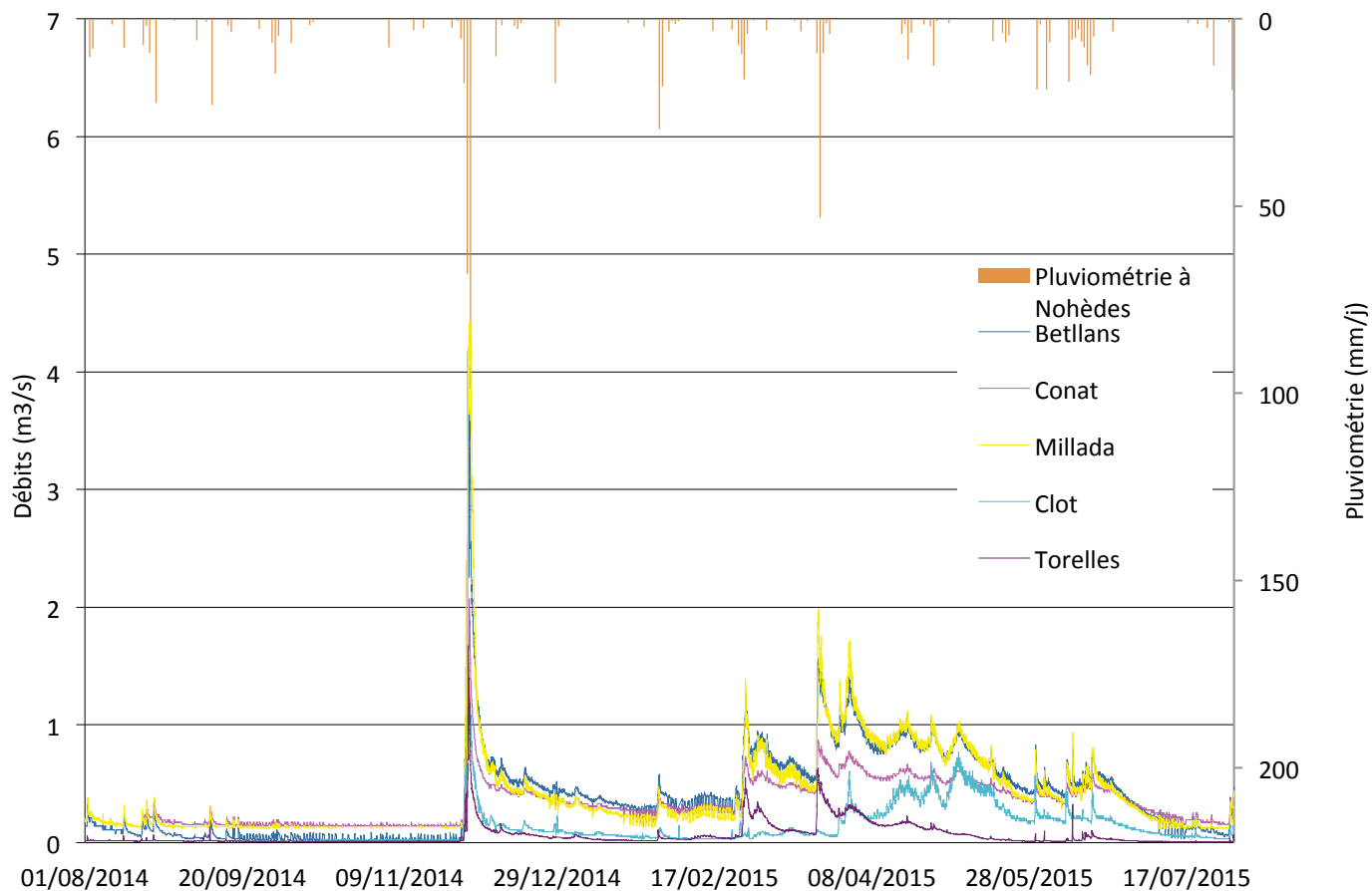
#### Annexe 5 : Courbe de tarage de la station Betllans



Annexe 6 : Courbe de tarage de la station Conat



Annexe 7 : Hydrogramme multistation sur la période du 01/08/2014 au 01/08/2015

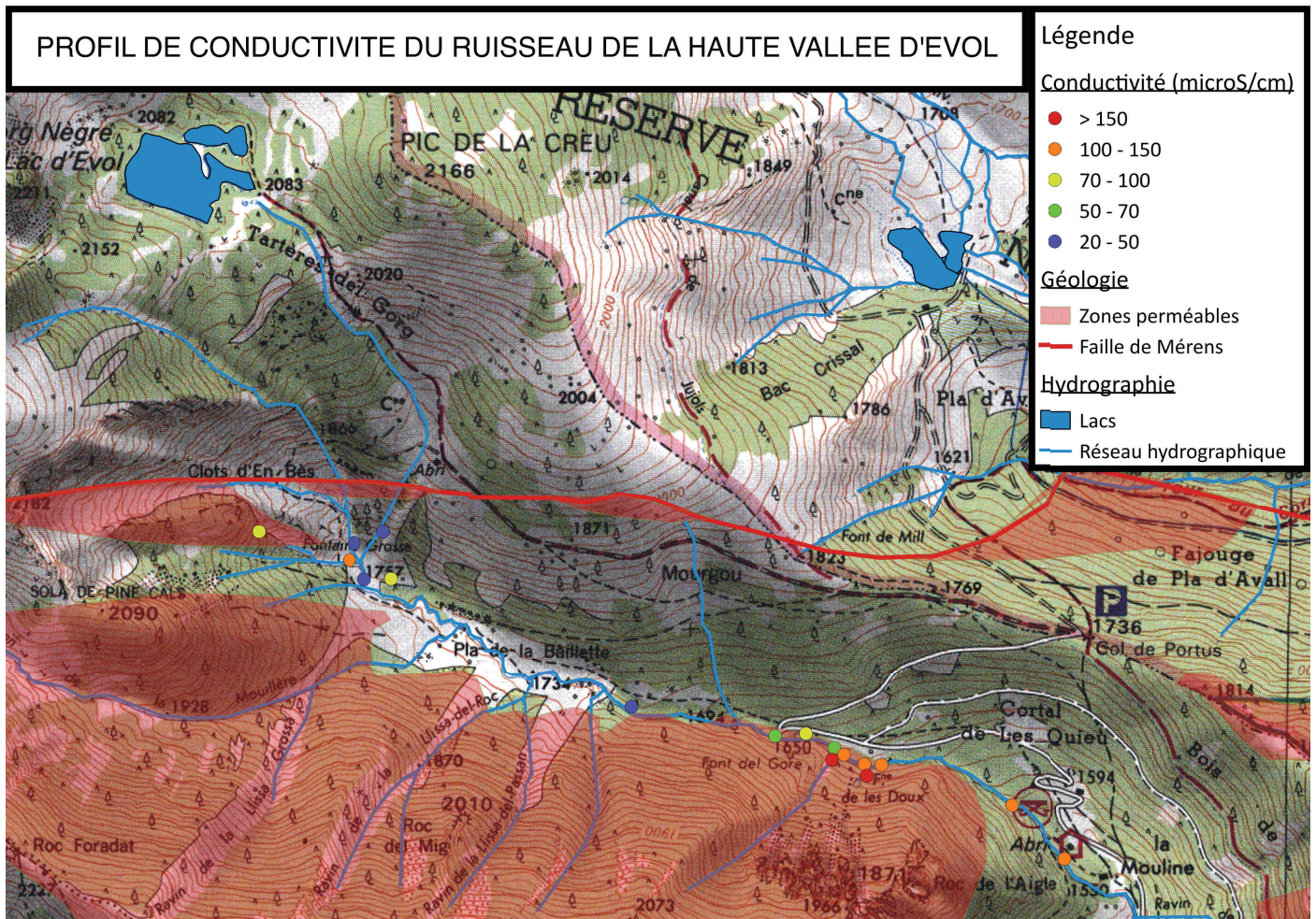


## Annexe 8 : Mesures effectuées dans le ruisseau d'Evol

Point numéro	Heure	Conductivité (microS/cm)	Température (°C)	Débit (L/s)	Remarques/localisation
I1	09:15	116,1	11,7	59	Aval refuge de la Mouline
C2	09:38	114,5	11,6	-	Cabane de l'éleveur
I3	10:00	111,2	11,2	61	Aval résurgence (Fne de les Doux, rive droite) La résurgence se décompose en plusieurs écoulements, deux principaux, un secondaire et de la percolation L'écoulement principal amont est le plus important
C3	10:00	159,9	7	-	Dans la partie la plus aval de la résurgence (écoulement principal aval)
C4	10:00	102,1	11,6	-	Dans le ruisseau, entre les deux écoulements principaux de la résurgence (juste en amont de l'écoulement principal aval)
C5	10:34	54,5	14,1	-	Virage épingle à cheveux (bien en amont des résurgences)
C6	10:41	98,1	10,4	-	Source repérée en rive gauche (qlq L/s)
C7	10:50	60,5	13,7	-	Amont de la petite source rive gauche
C8	10:52	64,7	14	-	Amont résurgence (amont des deux écoulements principaux rive droite), aval de la petite source rive gauche
C9	10:54	168,6	8,4	-	Dans l'écoulement secondaire de la résurgence (situé en amont des deux principaux)
C10	10:56	161,4	7,4	-	Dans la partie amont de la résurgence (écoulement principal amont)
C11	10:59	103,7	12,3	-	Juste en amont du point C4, entre les deux écoulements principaux (juste en aval du premier)
I12	11:23	65,7	14	37	Amont de la Fne de les Doux (amont de tous les écoulements rive droite)
C13	11:41	48,8	15,9	-	Amont virage épingle à cheveux
C14	12:06	96,4	12,3	-	Ruisselet rive gauche (partie haute du Pla de la Baillette)
C15	12:19	20,46	15,46	-	Ruisseau provenant du terrain

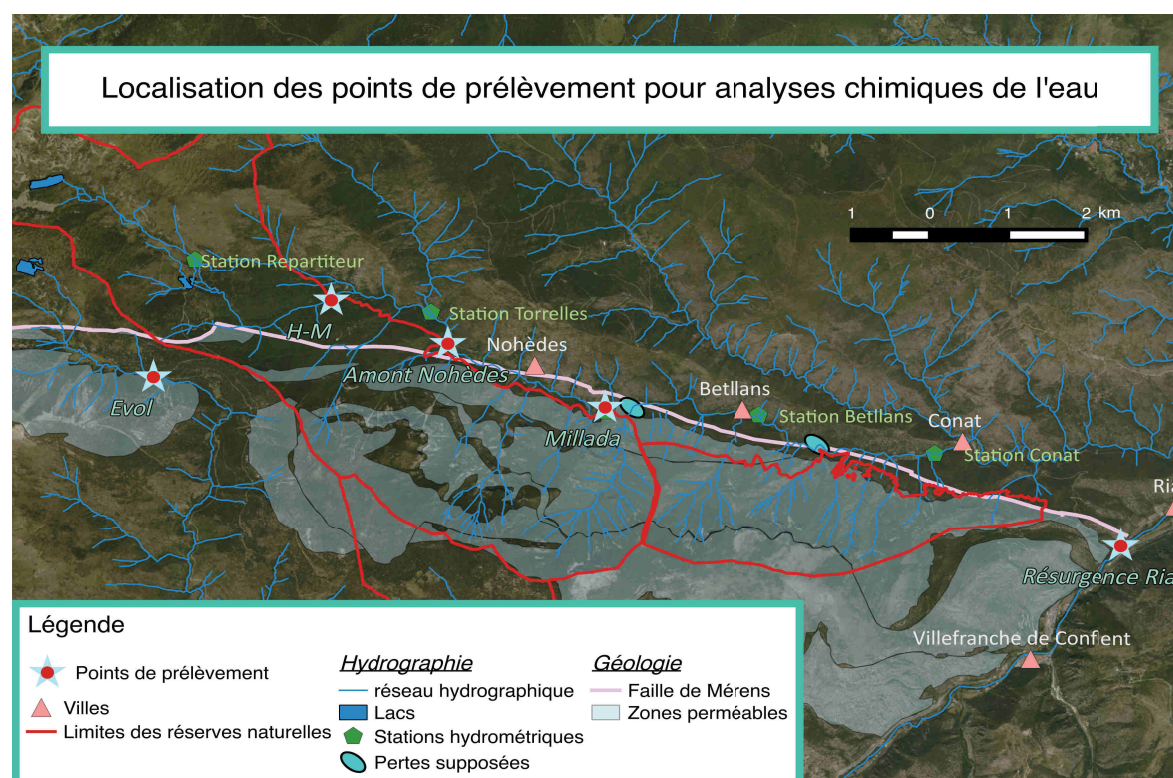
Point numéro	Heure	Conductivité (microS/cm)	Température (°C)	Débit (L/s)	Remarques/localisation
					granitique
C16	12:26	30,2	14,3	-	Ruisseau provenant du terrain schisteux
C17	12:28	114,9	13,8	-	Ruisseau provenant du terrain calcaire
C18	12:34	24,4	15,4	-	Aval convergence ruisseaux granite et schiste (amont de l'apport calcaire)
I19	12:35	36,3	15,2	40	Aval convergence des trois ruisseaux (granite, schiste, calcaire)
Font Grosse	13:19	85	6,3	-	Sortie Fontaine Grosse

Annexe 9 : Localisation des points de mesure dans le ruisseau d'Evol





## Annexe 10 : Localisation des points de prélèvements pour les analyses chimiques de l'eau



## Annexe 11 : Résultats des analyses chimiques réalisées à Hydrosociences

Éléments majeurs (chromatographie ionique)

Espèce chimique	Unité	Ruisseau d'Evol 16/07/2015	Ribera de l'Homme Mort 16/07/2015	Amont Nohèdes 16/07/2015	Millada 16/07/2015	Résurgence de Ria 15/07/2015
Cl <sup>-</sup>	mg/L	0,6	0,6	0,7	1,4	1,8
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	1,4	0,8	1,3	1,5	1,2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	2,1	2,3	3,3	6,7	3,7
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	10,3	6,8	7,4	17,9	45,1
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	1,7	1,0	1,3	3,8	13,6
Na <sup>+</sup>	mg/L	1,9	2,2	2,7	3,2	1,0
K <sup>+</sup>	mg/L	0,8	0,9	0,8	1,0	0,3

Éléments traces (Spectrométrie de masse)

Espèce chimique	Limite de détection	Limite de quantification	Ruisseau d'Evol	Ribera de l'Homme Mort	Amont Nohèdes	Millada	Résurgence de Ria
7Li	0,004	0,013	0,5569	0,4752	0,5732	1,1680	0,7106
11B	0,091	0,273	1,0107	1,4221	1,2822	1,7397	2,5175

Espèce chimique	Limite de détection	Limite de quantification	Ruisseau d'Evol	Ribera de l'Homme Mort	Amont Nohèdes	Millada	Résurgence de Ria
23Na	0,14	0,41	2012,0653	2263,4211	2855,0436	3296,0095	1092,2008
24Mg	0,08	0,25	1688,4784	963,8531	1287,3886	3685,6726	13784,2898
27Al	0,095	0,284	13,4512	18,6388	13,7061	12,6027	1,4782
29Si	20,15	60,46	4218,2928	4356,0731	5476,8225	5621,8742	2129,1707
39K	0,35	1,04	763,3062	897,3925	899,9719	1105,9433	358,7276
44Ca	1,40	4,21	10456,7679	6796,9810	7537,4625	18386,4857	44100,5257
51V	0,002	0,005	0,2383	0,4640	0,3717	0,3161	0,1091
52Cr	0,003	0,008	0,0195	0,0293	0,0293	0,0257	0,0861
55Mn	0,005	0,014	1,1669	0,2947	0,7125	0,5863	0,0571
56Fe	0,252	0,755	13,7100	36,9024	18,8138	7,1052	5,2941
59Co	0,000	0,000	0,0178	0,0175	0,0250	0,0226	0,0109
60Ni	0,004	0,012	0,0905	0,1237	0,1980	0,1826	0,0411
63Cu	0,005	0,014	0,1069	0,1702	0,2318	0,2655	0,0352
66Zn	0,001	0,003	0,1514	0,4022	0,2892	0,3744	0,9884
75As	0,005	0,014	0,7204	2,4147	2,2085	2,1698	0,1933
85Rb	0,001	0,004	0,5236	0,6893	0,7321	0,7844	0,1584
88Sr	0,004	0,012	24,8708	20,9783	29,9507	49,4482	38,0978
89Y	0,000	0,001	0,0299	0,0180	0,0248	0,0139	0,0203
95Mo	0,001	0,003	0,0891	0,1194	0,1184	0,2064	0,1032
111Cd	0,000	0,001	0,0036	0,0044	0,0046	0,0036	0,0025
118Sn	0,002	0,007	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
121Sb	0,001	0,002	0,0654	0,0415	0,0465	0,1149	0,0234
133Cs	0,000	0,000	0,0043	0,0037	0,0035	0,0093	0,0172
136Ba	0,020	0,061	4,1411	3,7354	4,1427	5,1348	2,8194
139La	0,00008	0,00023	0,0256	0,0245	0,0250	0,0097	0,0051
140Ce	0,00007	0,00022	0,0348	0,0293	0,0326	0,0132	0,0018
141Pr	0,00008	0,00025	0,0065	0,0065	0,0077	0,0026	0,0013
146Nd	0,00022	0,00067	0,0278	0,0235	0,0273	0,0111	0,0052
147Sm	0,00012	0,00037	0,0060	0,0048	0,0074	0,0025	0,0015
153Eu	0,00010	0,00030	0,0014	0,0012	0,0033	0,0010	0,0006
157Gd	0,00013	0,00038	0,0059	0,0049	0,0068	0,0026	0,0018
159Tb	0,00002	0,00007	0,0007	0,0007	0,0023	0,0004	0,0003
163Dy	0,00003	0,00010	0,0048	0,0033	0,0059	0,0024	0,0020
165Ho	0,00002	0,00006	0,0009	0,0007	0,0024	0,0006	0,0004
166Er	0,00010	0,00030	0,0028	0,0019	0,0039	0,0015	0,0012
169Tm	0,00002	0,00007	0,0004	0,0003	0,0017	0,0002	0,0002
172Yb	0,00006	0,00019	0,0023	0,0016	0,0036	0,0016	0,0011
175Lu	0,00003	0,00008	0,0004	0,0002	0,0017	0,0003	0,0002
205Tl	0,00012	0,00036	0,0018	0,0023	0,0039	0,0026	0,0009
208Pb	0,00018	0,00055	0,0369	0,1544	0,0485	0,0234	0,6723
232Th	0,00023	0,00068	0,0050	0,0073	0,0103	0,0056	<LQ
238U	0,00001	0,00004	0,0627	0,0446	0,0451	0,2349	0,3179



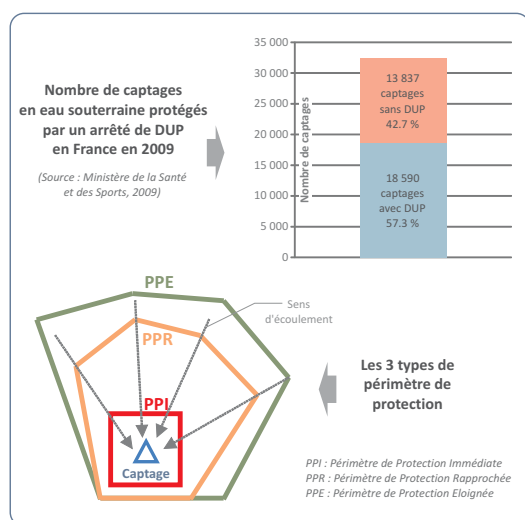
## Annexe 12 : Présentation de l'outil Optiprotect'eau

OPTI PROTEC EAU est un outil informatique d'aide à la décision dédié à la problématique de définition optimisée du Périmètre de Protection Rapprochée des captages d'eau destinée à la consommation humaine prélevant en eau souterraine



### Contexte

- En France, 57.3 % de captages en eau souterraine protégés par un arrêté de Déclaration d'Utilité Publique (DUP) en 2009
- Pourcentage de protection à nuancer : entre 15 et 20 % des arrêtés de DUP ont plus de 15 ans et sont obsolètes
- Plan National Santé Environnement de 2004 : Protéger 100 % des captages d'ici fin 2010
- Nombreuses difficultés d'ordre technique, économique, juridique, administratif, organisationnel et humain pour définir les périmètres de protection et plus particulièrement le Périmètre de Protection Rapprochée



### Objectifs de l'outil



- Disposer d'un soutien méthodologique et d'une homogénéisation de la démarche
  - Intégrant les aspects réglementaires, techniques, économiques, politiques, sociaux, etc.
  - Proposant une protection « minimale optimale »
  - Mettant en évidence les facteurs impactant le plus la zone de protection
- Appréhender les meilleurs choix techniques dans un minimum de temps
- Proposer une nouvelle offre de service et améliorer le rôle de conseil auprès des collectivités
  - Dans le cadre d'un avant-projet de type création d'un captage (test de différents scénarii)
  - Pour une protection existante (évolution de la protection)

### Utilisateurs potentiels de l'outil

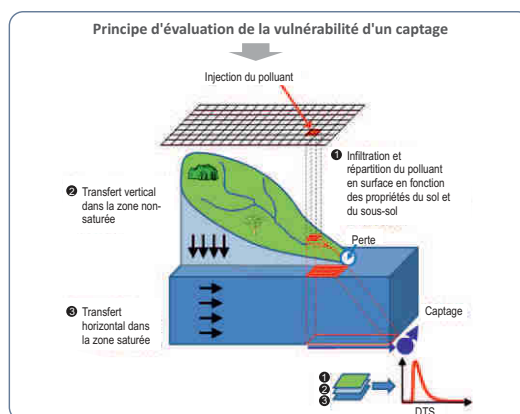


- Les **donneurs d'ordre** et les **collectivités** qui manquent le plus souvent de visibilité et de critères d'évaluation (contraintes et coûts économiques)
- Les **personnes privées responsables d'une production ou d'une distribution d'eau au public**
- Les **bureaux d'ingénierie** qui réalisent des études pour les maîtres d'ouvrage
- Les **hydrogéologues agréés** pour qui cet outil servira de guide et permettra d'appuyer leur expertise
- Les **services de l'Etat, collectivités territoriales et établissements publics** (Agences de l'Eau) qui interviennent dans la mise en place des périmètres de protection



### Un projet collaboratif de R&D

- 3 ans de développement
- 4 partenaires complémentaires pour créer un outil pluridisciplinaire :
  - **CEREG INGÉNIERIE** : Bureau d'études de taille moyenne pour les collectivités, aménageurs et industriels (diagnostic, études préliminaires, appuis techniques)
  - **VEOLIA ENVIRONNEMENT** : Opérateur des services de l'eau, gestionnaire d'unités de production d'eau et de captages AEP
  - **HYDROSCIENCES (UMR CNRS, IRD, UM1, UM2)** : Laboratoire de recherches en sciences de l'eau
  - **CIHEAM-IAMM** : Institut de formation et de recherche en agronomie, économie, sciences sociales et gestion du développement rural de l'espace méditerranéen



Un logiciel conçu par :

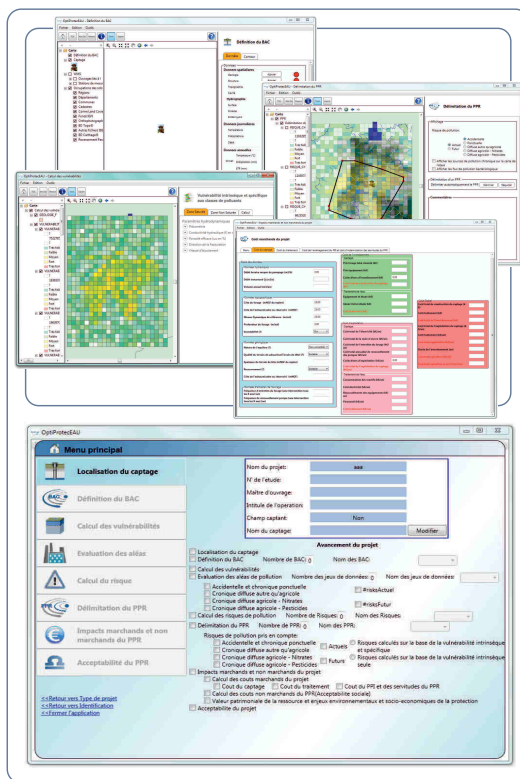
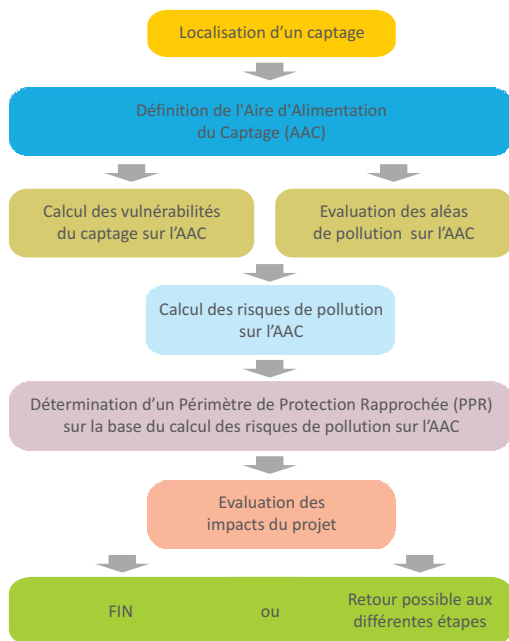
Développé avec ArcGIS par :

Avec un financement de :





## Fonctionnement de l'outil



## Points forts de l'outil

- Outil « tout-en-un » qui prend en compte :
  - Les aspects hydrogéologiques quel que soit le contexte
  - Les pollutions (flux et toxicité) quelle que soit leur nature (accidentelle, chronique, ponctuelle, diffuse) et leur origine (urbaines, industrielles, agricoles, etc.)
  - Les aspects économiques et sociaux (coût du captage et du traitement, coût des servitudes, acceptabilité sociale, valeur patrimoniale, etc.)
- Approche analytique de la vulnérabilité - intrinsèque et spécifique - maillée
- Prise en compte de l'évolution des activités et de l'occupation des sols
- Délimitation du PPR basé sur la notion de risque
- Restitution des résultats sous forme cartographique (SIG), outil convivial et facilement utilisable



## Limites de l'outil

- L'outil ne permet pas de calculer des concentrations de polluants au captage à partir des flux de pollution à la source
- L'outil n'est pas prévu pour réaliser des études « AAC » sur les captages prioritaires mais certains modules peuvent être utilisés

## Configuration requise

- Licence Arcview ou ArcGIS Engine
- Windows 7 et 8

## Mise en service de l'outil

Janvier 2014

Contact : Maëlle RENOULLIN  
Mail : maëlle.renoullin@cerreg-ingenierie.com  
Tél. 04.67.41.69.80

Un logiciel conçu par :

Développé avec ArcGIS par :

