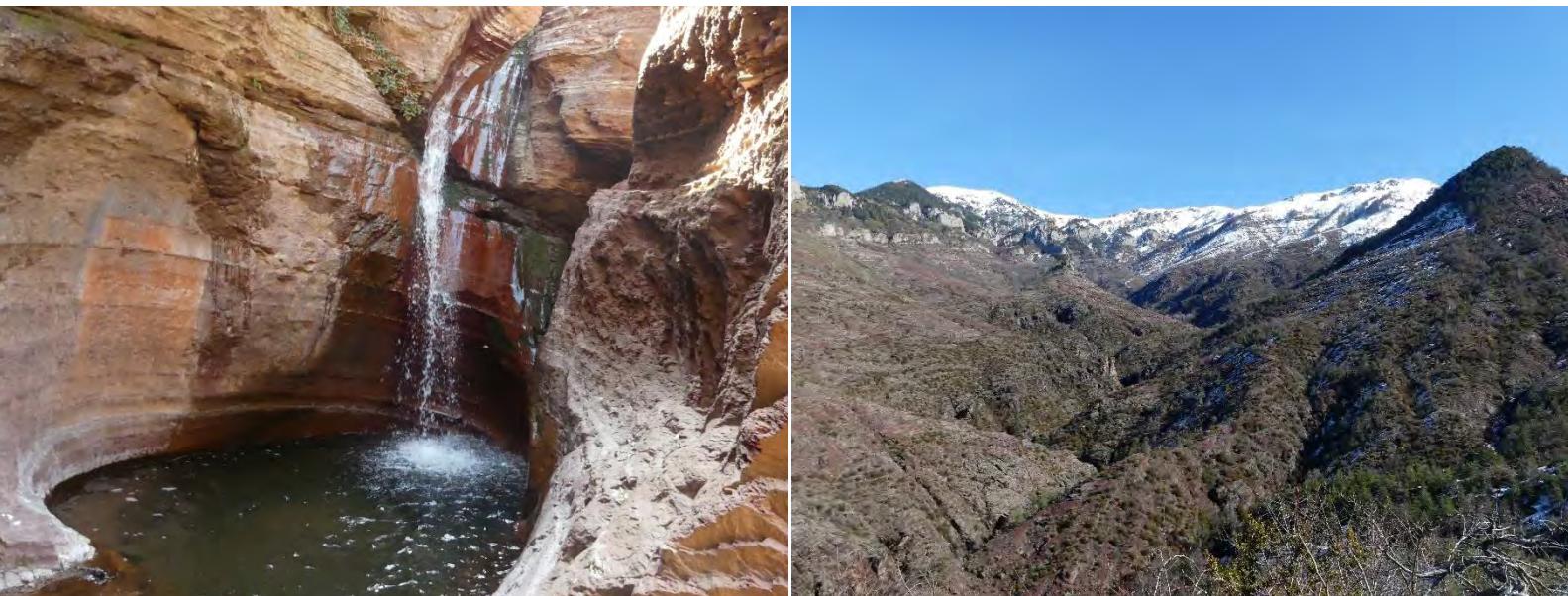




Premier travail sur l'objectif 2.13 du plan de gestion de la Réserve des gorges de Daluis – Etude hydrogéologique et estimation du bilan hydrologique de 4 bassins versants.



AGIR pour la
BIODIVERSITÉ
Provence-Alpes-Côte d'Azur

Objet social de l'association

L'association locale de la Ligue pour la Protection des Oiseaux en région Provence-Alpes-Côte d'Azur est une association à but non lucratif qui a pour but d'agir pour l'oiseau, la faune sauvage, la nature et l'homme, et lutter contre le déclin de la biodiversité, par la connaissance, la protection, l'éducation et la mobilisation.

Nom du représentant légal de l'association

François Grimal, Président

Direction de l'association

Amine FLITI, Directeur

Magali GOLIARD, Directrice

Adresse du siège social

LPO PACA

Villa Saint Jules
6, avenue Jean Jaurès
83400 HYERES

Coordonnées téléphoniques

Tél. : 04.94.12.79.52

Fax. : 04.94.35.43.28

E-mail : paca@lpo.fr

Site : <http://paca.lpo.fr>

SIRET : 350 323 101 00062

Code APE : 9499Z

Rédaction / Suivi du projet

Théo ARMANDO / Cécile Lemarchand, Aymeric Saulnier

Cartographie / illustration

Théo ARMANDO

Date

Avril 2021

Citation recommandée

LPO PACA (2021). Premier travail sur l'objectif 2.13 du plan de gestion de la Réserve des gorges de Daluis – Rapport hydrogéologique et estimation du bilan hydrologique de 4 bassins versants : 94 pages.

Photos de couverture

Paysage de la Réserve naturelle régionale des gorges de Daluis © Cécile LEMARCHAND

Cascade du bassin du Talon © Théo ARMANDO

Paysage du bassin d'Amen © Théo ARMANDO

Remerciements

Je remercie Cécile Lemarchand de m'avoir accueilli et fait confiance en me proposant des missions diversifiées qui m'ont permis d'élargir mon champ de connaissances.

Merci aussi de m'avoir rendu moins ignorant dans la reconnaissance des oiseaux à l'occasion des repas partagés au parc de la Roudoule et des sorties terrains.

Merci à Aymeric Saulnier pour sa gentillesse et sa générosité, d'avoir partagé ses fameux croquants aux amandes, ses agrumes, son repas et même ses goûts musicaux lors des moments les plus privés ;). Merci aussi d'avoir mis à profit tes talents d'orateur pour expliquer simplement la géologie et l'histoire du paysage lors de balades très instructives.

Merci à Cécile et Aymeric d'avoir toujours été présents pour répondre à mes questions et sollicitations.

Merci également à toute l'équipe des services civiques, Jessica, Aurane, Audrey, et particulièrement à Marie dont j'ai apprécié la fraîcheur et l'énergie.

Je remercie aussi Stéphanie Larbouret, Iris Silveira et Pierre-Antoine Grapeloup avec qui les occasions d'échanges furent plus rares, mais dont la bienveillance évidente a participé à la qualité de mon service civique.

La disponibilité et la prévenance de Benjamin Salvarelli et de toute l'équipe de la LPO paca m'ont apporté une sérénité appréciable dans les démarches administratives.

Je remercie aussi tous ceux qui m'ont apporté leur aide dans la réalisation de mes missions en me prodiguant des conseils ou des données. Je remercie donc Laurent Camera d'avoir pris le temps de dispenser de nombreux conseils que je n'ai pas tous pu mettre en application faute de temps. Je remercie Frederic Liebault, Philippe Audra et surtout Philippe Schoeneich pour les conseils et remarques qu'ils m'ont apporté pour aborder ma mission d'étude hydro et hydrogéologique.

Merci aussi à :

- Aurélie Johanet pour ses conseils en SIG ;
- Perrine Barreda et Raphaëlle Dreyfus du SMIAGE ainsi que Margaux Brunet de la CCAA et Guy Maunier maire de Daluis, pour les données hydrologiques et météorologiques ;
- Laura Granato de la RNR de Saint-Morin pour m'avoir communiqué l'étude hydrogéologique réalisée sur sa Réserve.
- David SOLLIMA de la REAAM de m'avoir fait parvenir des rapports de délimitation de points de captage très utiles à mon étude.

Je remercie enfin ma grand-mère Danielle Eyssautier de m'avoir nourri, logé, blanchi durant ces 6 mois, ainsi que mon oncle Didier Eyssautier et sa compagne Marie Paule Gastaud qui par leur gentillesse et leur humour ont participé à rendre ces 6 mois très agréables.

Synthèse

Le massif du Dôme de Barrot se situe au nord-ouest du département des Alpes-Maritimes. Il est constitué de deux ensembles géologiques formés à partir de dépôts sédimentaires de nature bien distincts.

- L'ensemble inférieur est constitué de dépôts sédimentaires d'origine continentale, la roche dominante est la pélite. Cet ensemble est plutôt imperméable malgré sa fracturation assez marquée. La pélite est surplombée d'une couche de grès à la base de laquelle on trouve des sources.
- L'ensemble supérieur est constitué de dépôts sédimentaires d'origine marine avec des calcaires, dolomies et cargneules poreuses et intensément fracturés par l'orogenèse Alpine. Cette fracturation permet une porosité et une perméabilité à grande échelle. La nature des roches et l'érosion qu'elle subit produit une bonne porosité et perméabilité à petite échelle. Cela fait de l'ensemble supérieur un aquifère fissuré à nappe libre. Les sources se concentrent d'ailleurs à la base de cet ensemble supérieur.

Cette étude s'appuie en grande partie sur les données existantes pour estimer le bilan hydrologique. Cette estimation se fait à l'échelle de 4 bassins-versants pour lesquels la géologie, la pédologie, l'occupation du sol et le climat sont étudiés, car ce sont des facteurs qui influencent le bilan hydrologique. Chacun des termes du bilan hydrologique ont été estimé à partir des quelques données en notre disposition.

L'estimation des précipitations est le fruit du croisement des données climatologique des stations météo les plus proches du secteur avec les projections d'un modèle climatiques régional et des données bibliographiques. Les précipitations annuelles moyennes sont d'environ 1050mm pour la pluie et 135mm pour la neige (équivalent eau). La prise en compte de la neige s'est avérée très compliquée, c'est pourquoi, les résultats sont souvent compris dans un intervalle de confiance.

Le ruissellement a été estimé à partir d'un module prenant en compte 6 paramètres, afin de s'adapter au mieux au spécificité de chaque bassin. Le ruissellement est particulièrement important à cause du relief escarpé et des affleurements de pélite sur lesquels les écoulements sont très rapides. Le ruissellement représente de 35% à 65% des précipitations selon les bassins.

L'évapotranspiration a été calculée par les formules de Thornthwaite et Turc, puis le résultat a été pondéré par la surface forestière présente sur chacun des bassins. L'évapotranspiration représente entre 45% et 65% des précipitations, en fonction de la couverture végétale de chaque bassin.

L'étude des variations de stock d'eau souterrain, est paradoxale ; d'un côté, la part des infiltrations devrait être négligeable car le ruissellement et l'évapotranspiration représentent à eux seuls la totalité des précipitations annuelles moyennes ; d'un autre côté, la trentaine de prélèvements d'eau souterraine déclarée prouvent que ce territoire recèle un volume d'eau souterrain conséquent. L'explication la plus probable, est qu'une part non négligeable de l'alimentation en eau des ressources souterraines provient des précipitations neigeuses, qui sont mal voire pas prises en compte dans l'estimation du

ruissellement et de l'évapotranspiration. Il semble donc que l'alimentation des aquifères dépende en grande partie des précipitations neigeuses.

Cela pose la question du changement climatique qui risque d'entrainer une diminution conséquente des précipitations neigeuses (environ -30% d'ici 30 ans et -60% d'ici 60 ans selon le GIEC, RCP4.5). La baisse des précipitations solides risque donc d'entrainer une baisse de la recharge des aquifères qui ont un rôle essentiel dans le soutien des débits d'étiage et dans l'alimentation en eau potable des communes.

Cette étude montre les limites d'une analyse en l'absence de données in situ. Les perspectives de recherches sont encore nombreuses et passionnantes, mais nécessitent des données locales. L'acquisition de stations météo et hydrologique permettrait de mettre en relation les pluies et les fluctuations du débit pour essayer de mieux comprendre les dynamiques de circulation de l'eau entre ce qui ruisselle rapidement en surface, ce qui circule dans le sol, et ce qui s'infiltra dans la roche pour ressortir bien plus tard. La mise en place d'instruments permettrait également de connaître réellement les précipitations, l'évapotranspiration et bien d'autres données utiles en hydrogéologie, mais plus généralement des données essentielles au suivi du changement climatique.

Table des matières

III SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	12
III-1 Contexte géographique et environnemental.....	13
III-1.1 Localisation et topographie du site d'étude	13
III-1.2 Climat	14
III-1.3 Faune & Flore : Une biodiversité adaptée à un milieu sec et minéral.	15
III-2 Contexte géologique et géomorphologique	16
III-2.1 Cadre géologique :	16
III-2.1.1 Caractéristique litho stratigraphique	17
III-2.1.2 Caractéristiques structurales.....	19
III-2.1.3 Formations superficielles récentes : nature, épaisseur extension et perméabilité du recouvrement	19
III-2.2 Données géomorphologiques	20
III-3 Contexte hydrogéologique général	21
IV DONNEES ET METHODE.....	24
IV-1 Facteurs influençant le bilan hydrologique	25
IV-1.1 La morphométrie	25
IV-1.1.1 Calcul de l'emprise des bassins-versants sur ArcGIS	25
IV-1.1.2 Calcul des paramètres morphométriques de chaque bassin.....	27
IV-1.1.3 Temps de Concentration.....	29
IV-1.2 L'occupation du sol	30
IV-1.3 La Géologie	32
IV-1.3.1 Estimation du volume de roche	32
IV-1.3.2 Recherche de données de porosité et de perméabilité dans la bibliographie.....	41
IV-1.4 Le facteur sol	43
IV-1.4.1 Estimer le volume de sol	43
IV-1.4.2 Expérience pour estimer la capacité de rétention en eau des sols	45
IV-2 Calcul des termes qui composent le bilan hydrologique.....	48
IV-2.1 Les Précipitations.....	48
IV-2.1.1 Précipitations pluvieuses	48
IV-2.1.2 Précipitations neigeuses	49
IV-2.2 Le coefficient de ruissellement	50

IV-2.3 L'évapotranspiration	53
IV-2.4 Stock & Variation de l'eau dans le sol et le sous-sol	54
V RESULTATS : LE BILAN HYDROLOGIQUE.....	57
V-1 Précipitations	58
V-2 Ruissellement	59
V-3 Evapotranspiration	60
V-4 Variation du stock d'eau	61
V-4.1 Infiltration et Résurgence Δ (les flux).....	61
V-4.1.1 Capacité de stockage de l'eau dans le sol et sous-sol (Stock)	62
VI LIMITES, AMELIORATIONS ET PERSPECTIVES	66
VI-1 Limites.....	66
VI-1.1 Limites des données.....	66
VI-1.2 Limites des traitements	66
VI-2 Améliorations.....	68
VI-2.1 Végétation.....	68
VI-2.2 Géologie	68
VI-2.3 Sols.....	68
VI-2.4 Précipitations	69
VI-2.5 Coefficient de ruissellement.....	69
VI-2.6 Evapotranspiration	69
VI-2.7 Variation stock d'eau du sol et sous-sol	69
V-3 Perspectives.....	70
VII CONCLUSION	73

I INTRODUCTION

Cette étude a été initiée afin d'amorcer le travail sur l'objectif 2.13 du plan de gestion de la Réserve naturelle régionale des gorges de Daluis (2016-2021). L'objectif 2.13 consiste à étudier l'hydrologie et l'hydrogéologie du massif du Dôme de Barrot ([Annexe1](#)). Une étude précise de l'hydrologie et de l'hydrogéologie nécessiterait des données locales provenant de stations hydrologiques et météorologiques, ainsi que la réalisation d'expériences et analyses terrain, comme le suivi de traceur fluorescent, par exemple. En plus des outils et moyens conséquents que demande une telle étude, elle nécessite également un suivi sur le long terme pour connaître les dynamiques saisonnières sur une année au minimum. Compte tenu de l'absence d'instruments de mesures in situ et de la courte durée de cette étude (6 mois), les objectifs ont été adaptés.

Cette première approche peut être considérée comme un travail préparatoire pour évaluer l'intérêt de faire des études plus poussées nécessitant des investissements en temps, matériels, et expertises plus importants.

Concrètement, cette étude a consisté à recueillir et traiter les données disponibles en lien avec l'hydrologie et l'hydrogéologie. Les rares données disponibles ne permettent pas d'étudier précisément le secteur, mais afin de répondre à un objectif clair et concret, ces données ont été mobilisées dans l'estimation du bilan hydrologique par bassin versant. Le manque de données terrain, conduit à estimer le bilan hydrologique de manière indirecte par l'utilisation de formule et méthode. Le manque de données in situ constitue une limite importante de ce travail. Pour obtenir les résultats rechercher à partir des rares données disponibles, il a fallu utiliser des formules et méthodes simplifiés qui donnent des résultats peu fiables.

Le « bilan hydrologique » renseigne sur le devenir des précipitations une fois tombées, entre la part qui ruisselle, s'évapotranspire et la variation de stocks d'eau souterraine. Ces variables dépendent de plusieurs facteurs d'influences : morphométrie, occupation du sol, pédologie, géologie, climats.

Le bilan hydrologique se calcule à l'échelle du bassin-versant. Le massif du Dôme de Barrot est composé d'une vingtaine de bassins qui rejoignent le Var ou le Cians. L'étude de l'ensemble de ces bassins n'est pas réalisable sur les 6 mois de l'étude. Ainsi, seuls les 4 bassins situés en partie sur la Réserve naturelle des gorges de Daluis sont étudiés.

- L'ambition première de cette étude est de faire une synthèse des connaissances disponibles grâce à une recherche bibliographique sur l'hydrogéologie du secteur.
- La seconde ambition est d'estimer le bilan hydrologique à l'échelle de 4 bassins-versants situés sur le versant ouest du Dôme de Barrot, en prenant en compte la complexité des différents facteurs qui influencent le devenir des précipitations sur chaque bassin.

Pour débuter cette étude, il convient de définir quelques termes.

- Bassin versant
- Bilan hydrologique
- Ruissellement
- Infiltration
- Aquifère
- ...

Pour se familiariser avec les termes abordés dans ce document voici quelques liens vers des lectures éclairantes :

- [https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre1/main.html#:~:text=Le%20cycle%20hydrologique%20est%20un,1%2D2\).&text=Suivant%20les%20conditions%20donn%C3%A9es%2C%20elle,s'infiltrer%20dans%20le%20sol.](https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre1/main.html#:~:text=Le%20cycle%20hydrologique%20est%20un,1%2D2).&text=Suivant%20les%20conditions%20donn%C3%A9es%2C%20elle,s'infiltrer%20dans%20le%20sol.)
- <https://echo2.epfl.ch/e-drologie/resumes/chapitre1/resume1.html>
- http://geo.univ-batna2.dz/sites/default/files/geo/files/cours_hydrologie_2021.pdf

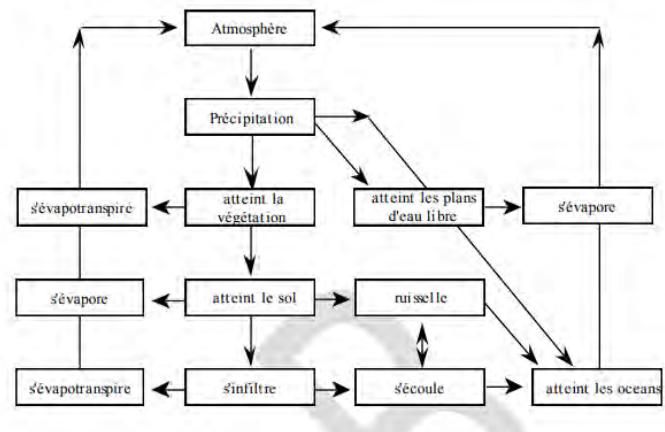
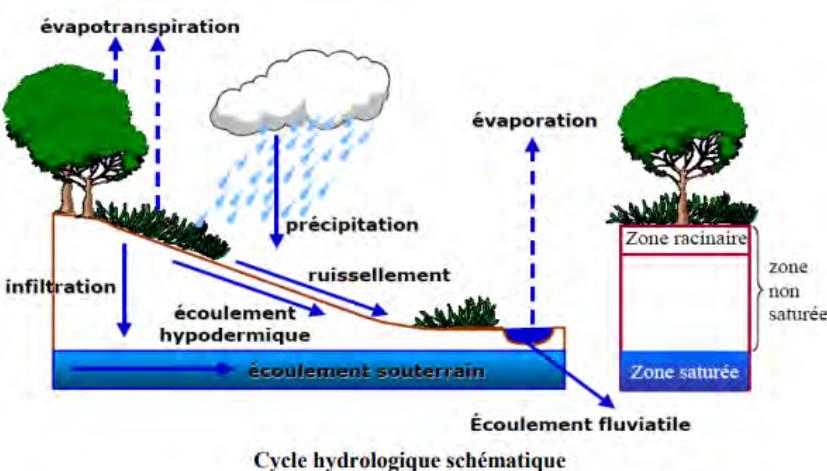


Figure 1 : Schéma des éléments qui constituent le Bilan hydrologique (Source : cours_hydrologie_2021.pdf)

II SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Le secteur d'étude est constitué de 4 bassins-versants situés à l'ouest du massif du Dôme de Barrot. Ces bassins sont affluents de la partie supérieure du Var. Leur relief est prononcé avec de fortes dénivellations. Les fortes pentes favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration, en conséquence la végétation est adaptée à un milieu sec et minéral. Néanmoins, le diagramme ombrothermique ne présente pas de période de sécheresse. Et pour cause le climat est sous influence méditerranéenne et montagnarde. Les précipitations neigeuses et pluvieuses y sont plutôt importantes et se manifestent souvent par des événements intenses. Le fort ensoleillement favorise des températures élevées, particulièrement sur les secteurs avec des affleurements de pélite qui absorbe beaucoup de chaleur.

D'un point de vue géologique, le massif est constitué d'une épaisse couverture sédimentaire qui peut être divisée en 2 grands ensembles. L'ensemble inférieur est composé de sédiments d'origine continentale ; il est constitué en majorité de pélite et de grès, cet ensemble est qualifié de tégument, car lors de l'orogenèse Alpine il est resté solidaire du socle cristallin en se déformant de manière ductile. L'ensemble supérieur est composé de sédiments d'origine marine, il est principalement constitué de roche carbonaté (cargneule, calcaire et dolomie) qui lors de la surrection des Alpes, se sont désolidarisés de l'ensemble inférieur provoquant des fractures et déformations. Comme souvent c'est une couche intercalée de Gypse qui a favorisé le décollement entre l'ensemble supérieur et l'ensemble inférieur. De par sa nature calcaire et son comportement mécanique cassant, l'ensemble supérieur est propice à la formation d'aquifères ; Contrairement à l'ensemble inférieur composé en majorité de pélite plutôt imperméable et moins fortement fracturé car resté solidaire du socle cristallin.

II-1 Contexte géographique et environnemental

II-1.1 Localisation et topographie du site d'étude

Le massif du Dôme de Barrot se situe au nord-ouest du département des Alpes-Maritimes à proximité des Alpes-de-Haute-Provence.

Il forme un grand bombement entaillé à ses extrémités Est et Ouest par les gorges du Cians et de Daluis. Les bassins-versants étudiés se situent à l'ouest du bombement du Dôme de Barrot (Fig.2). Ils présentent une dénivellation importante, l'altitude de ces bassins est comprise entre 650 et 2135 mètres d'altitude. Ce sont des bassins plutôt allongés avec des versants raides et des cours d'eau encaissés qui alimentent la partie amont du Var. Ils s'étendent principalement sur les communes de Daluis et de Guillaumes, excepté le haut du bassin de Chaudan et du Talon qui se situent sur la commune de La Croix-sur-Roudoule.

Les bassins d'études ont été choisis pour leur proximité avec la RNR des gorges de Daluis. Ainsi, comme évoqué précédemment, la RNR des gorges de Daluis se caractérise par une forte dénivellation ce qui a une influence sur son climat et ses milieux. Cette Réserve s'étend sur 1082 ha.

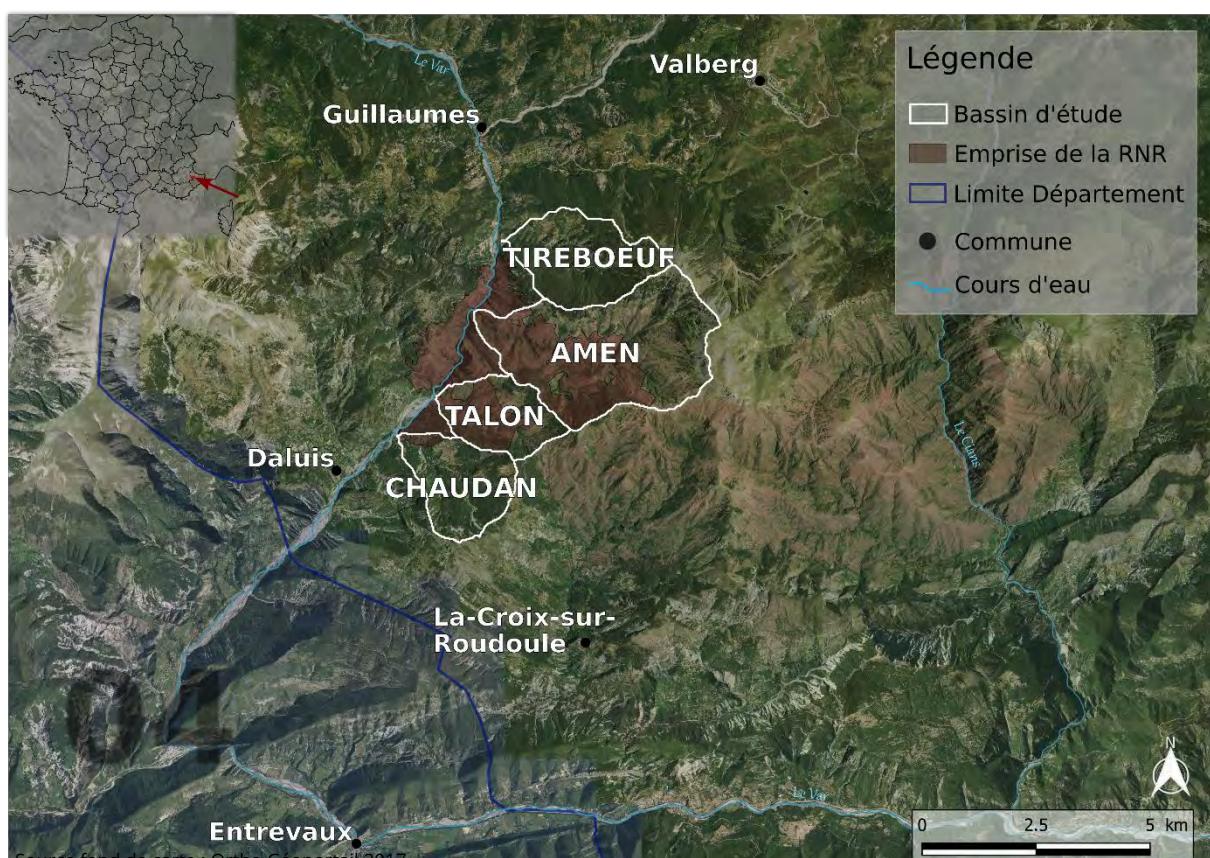


Figure 2 : Vue aérienne du massif du Dôme de Barrot entre Cians et Var montrant l'emprise des 4 bassins étudiés.

II-1.2 Climat

Situé entre la mer Méditerranée et les Alpes, ce massif subit des influences contrastées ; on qualifie son climat de montagnard à caractère méditerranéen. Ce climat se définit par un été chaud et un hiver doux et sec. Une multitude de microclimats résultent cependant des fortes variations de topographie, géologie, exposition et occupation du sol qui ont une influence déterminante sur les climats locaux. Si bien, que les valeurs climatiques normalisées ne sont pas représentatives des grandes variabilités microclimatiques qui règnent sur ce territoire. Le climat méditerranéen y est toutefois plus influent avec des précipitations brèves et intenses. Ce régime de précipitations en averses entraîne un important ruissellement de surface, ainsi qu'un fort accroissement du risque de crues. Les précipitations sont les plus importantes à l'automne (Fig.3). Les précipitations neigeuses tombent principalement entre Décembre et Mars. La neige équivaut à 135mm d'eau par an environ (Fig.4). La dénivellation importante du secteur d'étude conduit à des différences notables de précipitation neigeuse entre le haut et le bas des bassins. L'influence des deux climats implique l'existence d'un fort gradient pour les températures extrême. L'influence montagnarde a pu conduire à des températures moyennes de -4.6°C pour le mois de janvier. Inversement, l'influence méditerranéenne favorise des moyennes mensuelles pouvant atteindre 27°C à Guillaumes en juillet. Bien que le graphique ombrothermique (Fig.3) ne fasse pas ressortir de période de sécheresse, la sécheresse est une réalité à cause d'un ruissellement rapide et d'un fort ensoleillement (RNR gorges de Daluis, 2015).

Le faible albedo de la pélite fait qu'elle吸orbe une grande partie des rayonnements solaire, en conséquence, la température augmente de manière significative les jours de beau temps dans les secteurs de pélite.

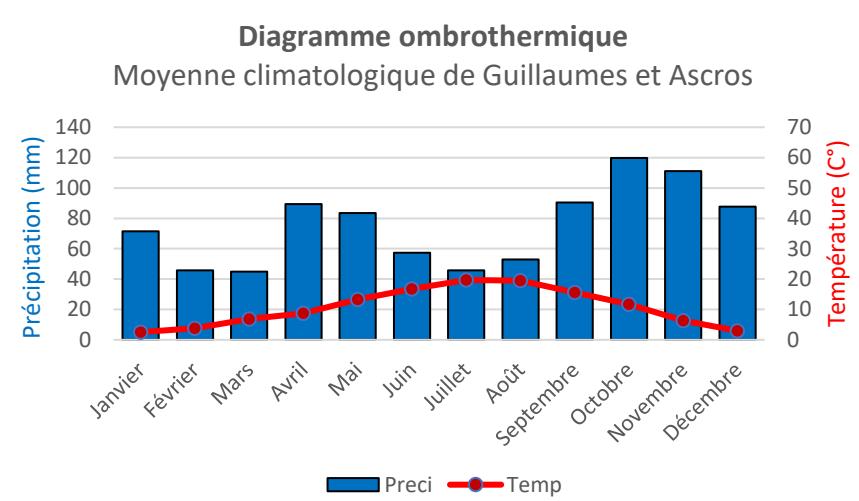


Figure 3 : Diagramme ombrothermique obtenu à partir des données de Météo-France en faisant la moyenne des valeurs de Guillaumes et Ascros.

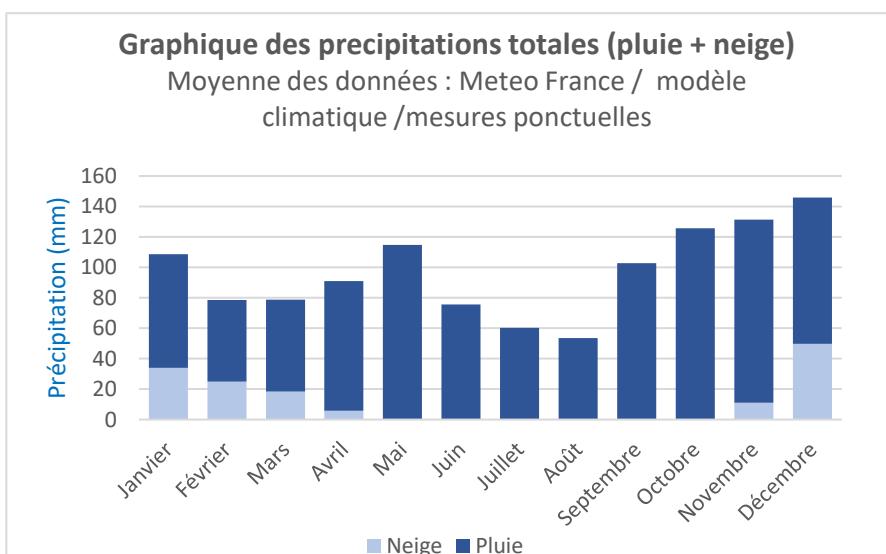
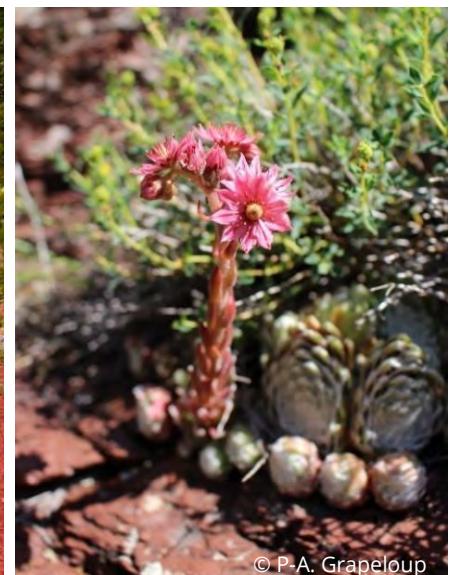


Figure 4 : Graphique obtenu en compilant les données de météo France avec les données de référence de modèles régionaux du climat. Pour les précipitations neigeuses des données ponctuelles sur la commune de Beuil ont également été prises en compte.

II-1.3 Faune & Flore : Une biodiversité adaptée à un milieu sec et minéral.

Sur le secteur d'étude, le Var et ses affluents sont profondément encaissés. Cet encaissement empêche la végétation de puiser dans la nappe alluviale. En conséquence, la végétation est constituée de plantes qui supportent la sécheresse. Les pinèdes, les maquis, les matorrals et les fourrés couvrent plus de 80% du secteur (RNR, 2015). La forte dénivellation favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration susceptible de recharger les réserves du sol. Les sols sont d'ailleurs peu épais et peu évolués. En témoigne la présence de thym, joubarbe et euphorbe épineuse qui s'accommode des sols fins et bien drainés.



Photos 1 : A gauche : paysage de fourrés sur pélite avec au premier plan des plants de thym en fleur. A droite une Joubarbe en fleur © P-A. Grapeloup.

La présence de grandes parois rocheuses permet l'installation d'espèces rupestres assez remarquables. Le maillot des pélites et le spéléomante de Strinati affectionnent les fines fractures humides issues de la schistosité de la pélite. Les anfractuosités de la roche servent aussi de gîte aux hirondelles des rochers, au petit rhinolophe, au tichodrome échelette et bien d'autres. L'érosion a aussi formé des aires suffisamment larges pour accueillir des espèces plus imposantes comme l'aigle royal, le grand-duc, ou encore le grand corbeau.



Photos 2 : Espèces observables sur les parois du secteur d'étude. A gauche : le maillot des pélites ©O. Gargominy ; à droite : un tichodrome échelette © Christophe Mercier.

II-2 Contexte géologique et géomorphologique

Cette partie s'appuie sur le travail de J.P Ivaldi concernant les sources de la commune de Beuil. ([Ivaldi, 1996](#))

II-2.1 Cadre géologique :

Le Dôme de Barrot appartient à la chaîne Alpine, plus précisément à la partie externe de cette chaîne qualifiée de zone Alpine externe.

Cette zone Alpine externe est constituée d'un socle cristallin recouvert par une épaisse couverture sédimentaire de plusieurs centaines de mètres. Cette couverture sédimentaire présente deux originalités notables :

- Premièrement, l'originalité vient de **la variabilité de ses lithofaciès**. C'est-à-dire la variation d'épaisseur et surtout de nature des sédiments qui constituent cette couverture sédimentaire. Ces deux caractères (épaisseur et nature des sédiments) influencent fortement les caractéristiques de potentiels aquifères. Deux grands lithofaciès se distinguent au sein de cette couverture sédimentaire :
 - Un ensemble inférieur constitué de formations sédimentaires, déposées essentiellement en **milieu continental** entre -305Ma et 240/233Ma. Il s'agit des formations de pélite et de grès.
 - Un ensemble supérieur constitué de formations sédimentaires déposées principalement en **milieu marin** entre -240/-233 Ma et -35/30Ma. Il s'agit des formations de dolomie, gypse, cargneule, et calcaires.
- Deuxièmement, l'originalité de la couverture sédimentaire réside dans **l'hétérogénéité de son comportement mécanique** lors de la formation des Alpes, entre 96 Ma et aujourd'hui. Ainsi, la couverture sédimentaire peut être séparée en deux, d'après son comportement mécanique qui a réagi de deux manières distinctes lors du raccourcissement crustal génératrice de la chaîne des Alpes :
 - L'ensemble inférieur qualifié de « tégument » est resté solidaire du socle cristallin sous-jacent en étant irrégulièrement déformé de façon ductile.
 - L'ensemble supérieur qualifié de « couverture décollée » s'est désolidarisé et déformé plus ou moins indépendamment. Cette déformation s'exprime par l'intermédiaire de plis et de failles de géométrie variée.Cette désolidarisation survenue à la base de l'ensemble sédimentaire supérieur a provoqué des ouvertures (fracture) dans la roche qui ont un rôle majeur dans la formation d'éventuels systèmes aquifères et dans la localisation de leurs exutoires.

Pour résumer, le socle cristallin (vestige du massif hercynien) est recouvert par une épaisse couverture sédimentaire. Cette couverture sédimentaire peut être séparée en deux ensembles d'après des critères de lithofaciès et de comportement mécanique.

La porosité et la perméabilité à l'échelle de l'échantillon comme à l'échelle du massif sont plus importantes pour la formation supérieure d'origine continentale.

- A l'échelle de l'échantillon, l'ensemble supérieur est constitué de roche assez poreuse et perméable, contrairement à l'ensemble inférieur principalement composé de pélite à porosité et perméabilité assez faible.
- A l'échelle du massif, l'ensemble supérieur s'est désolidarisé lors de la formation des Alpes, la pression tectonique a entraîné la formation de fractures et failles pouvant accueillir d'éventuels aquifères ; Contrairement à l'ensemble inférieur (tégument) au comportement mécanique ductile qui s'est déformé en restant solidaire du socle cristallin. Néanmoins la tectogenèse a entraîné une fracturation non négligeable de la formation de pélite qui permet une circulation souterraine de l'eau à grande échelle malgré l'imperméabilité de cette roche à l'échelle de l'échantillons.

II-2.1.1 Caractéristique litho stratigraphique

Le Dôme de Barrot est en général associé au massif de l'Argentera-Mercantour qu'on considère comme son prolongement. Le Dôme de Barrot correspond à une **intumescence** du vieux socle Permien au milieu des formations plus récentes du Secondaire et du Tertiaire qui l'entourent.

Les différentes formations constituant le log lithostratigraphique de la zone étudiée sont décrites de manière simplifiée en suivant un ordre chronologique allant des plus anciennes aux plus récentes (Fig.5) :

a) Le tégument

Le tégument correspond à l'ensemble inférieur, il constitue la base de la couverture sédimentaire qui recouvre le socle cristallin. Au Dôme de Barrot ; le tégument est constitué de formations détritiques d'âge Permien, d'épaisseur et de faciès variés déposées en milieu continental et sous un climat tropical dans des plaines d'inondations irrégulièrement subsidentes (Vernet, 1957). Le haut de cet ensemble est complété par des formations triasiques fluviatiles.

- Les formations permianes sont constituées d'arkose, de grès et de pélites, ces dernières localement gréuses ou carbonatés de couleur dominante rouge, plus rarement verte, en relation avec l'oxyde de fer qu'elles renferment.
- Les formations triasiques non décollées (tégmentaires) sont constituées de poudingues, de grès, de quartzite, de pélites bariolées.

L'interface entre le Permien et le Trias non décollé constitue un niveau où émerge de nombreuses sources dans la zone Barrot-Argentera-Mercantour.

b) La couverture décollée

Elle est constituée de formations d'âge Triasique, Jurassique, Crétacé, Paléogène (ensemble supérieur). Sur le secteur d'étude, seules les formations Triasique et Jurassique participent à l'alimentation des aquifères.

Le Trias décollé débute par des cargneules dites « inférieures » parfois associées à des évaporites (gypse).

Les cargneules inférieures et supérieures correspondent à des faciès tectoniques. Elles se sont formées au détriment des calcaires et dolomies par fracturation hydraulique durant la tectogenèse alpine. C'est-à-dire que la formation des Alpes a entraîné une circulation d'eau sous pression qui a transformé des roches calcaires et dolomitiques en cargneules. Les cargneules et les évaporites ont favorisé le décollement de la couverture sédimentaire supra-tégumentaire. Leur faciès dominant est bréchique, vacuolaire. Elles constituent, au même titre que les roches carbonatées, un milieu aquifère macro-fissuré discontinu.

Les cargneules inférieures présentent fréquemment un important niveau de sources à leur base, au contact de la formation pélitique imperméable (et triasique à niveau argileux).

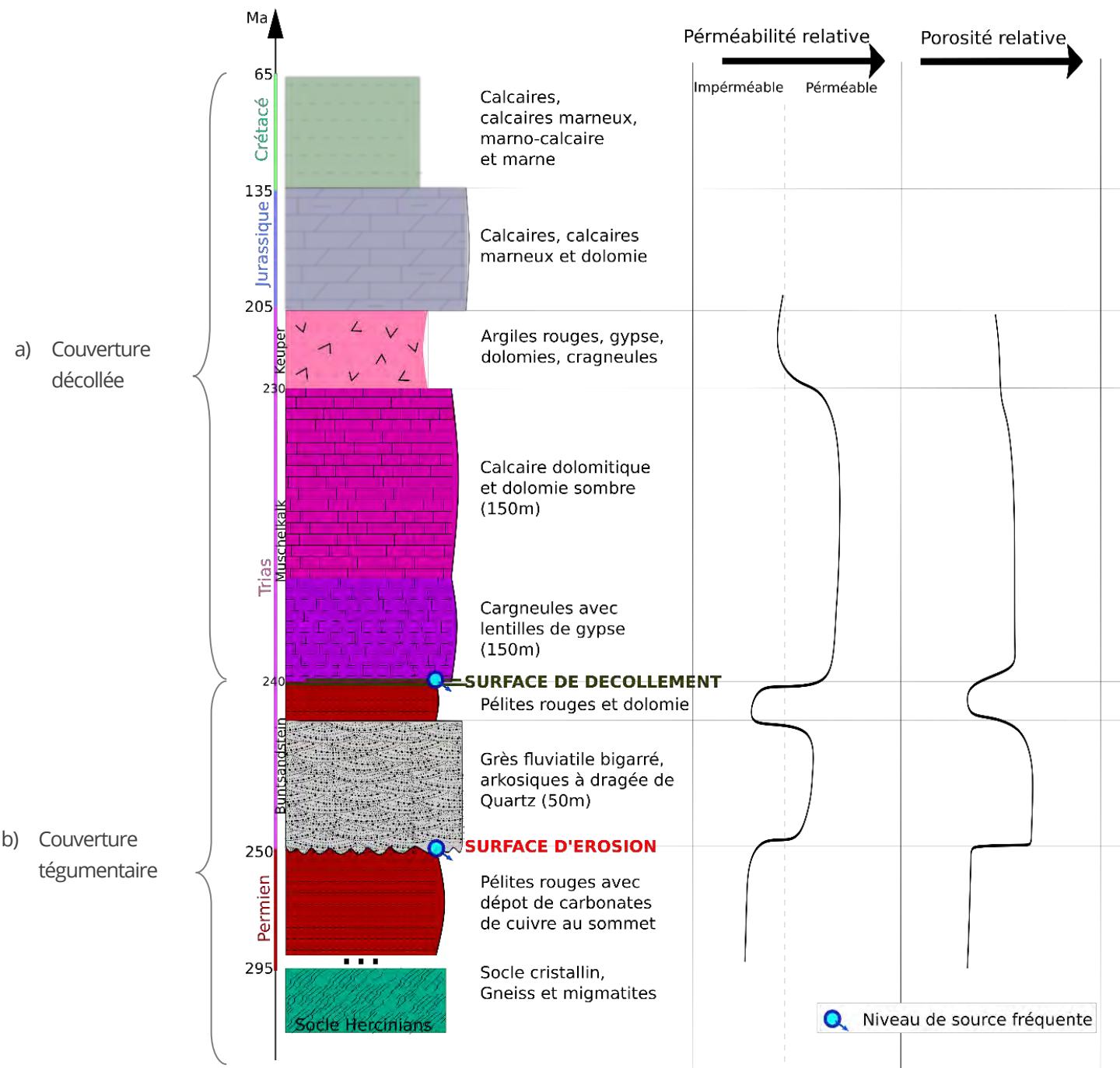


Figure 5 : Log stratigraphique simplifié des roches présentes sur le secteur d'étude ; Valeur relative de la porosité et perméabilité des différentes formations géologiques.

II-2.1.2 Caractéristiques structurales

Le tégument permo-triasique du Dôme de Barrot est relativement peu déformé. Les surfaces de stratification sont peu ou pas plissées en dehors du bombement d'ensemble du Dôme de Barrot. Néanmoins, au cours de la constitution de la chaîne Alpine, la déformation ductile due à la compression des roches a conduit à un raccourcissement de 30% environ de sa couverture initiale. La déformation du Dôme de Barrot apparaît sous la forme d'une multitude de failles locales de rejet réduit, de l'ordre d'une dizaine de centimètres à quelques dizaines de mètres et d'un nombre plus restreint de failles importantes. Ces failles sont organisées en un double système NW-SE (formation des Pyrénées) et NE-SW (formation des Alpes). Les directions NE-SW sont dominantes. Ces différentes échelles de failles présentent autant d'axes de circulation de l'eau malgré l'imperméabilité de la pélite.

Alors que le raccourcissement subi par le tégument lors de l'orogenèse alpine a été absorbé par l'apparition d'une schistosité, celui de la couverture décollée sus-jacente s'est traduit par l'apparition de plis anticlinaux et synclinaux dont la longueur d'onde et l'amplitude varient fortement dans le plan horizontal, mais aussi et surtout dans le plan vertical.

II-2.1.3 Formations superficielles récentes : nature, épaisseur extension et perméabilité du recouvrement

Les formations récentes sont surtout représentées par des éboulis, des colluvions, des alluvions et quelques dépôts glaciaires épars qui recouvrent les ensembles sédimentaires inférieurs et supérieurs. Ces dépôts datent généralement du Quaternaire, mais peuvent remonter localement jusqu'à l'Oligocène.

Les éboulis sont fréquents chaque fois que des formations dures dominent des formations plus tendres, par exemple :

- Des Conglomérat, grès ou arkose triasique dominant → des pélites permienne,
- Des Cargneules, calcaires ou dolomie du Trias dominant → des pélites triasique
- Du Calcaire du Malm domine → des marnes noires callovo-oxfordienne.

Les éboulis constitués de Trias calcaréo-dolomitique sont souvent cimentés et constituent des brèches de pente. Des cônes actifs existent également.

Ces formations atteignent fréquemment des épaisseurs de plusieurs mètres. Leur perméabilité comme leur porosité sont très bonnes.

II-2.2 Données géomorphologiques

Une forme superficielle du karst doit être signalée en raison de son influence sur la pénétration et la circulation des eaux de pluie et de fonte des neiges : ce sont les reliefs ruiniformes qui se développent au dépend des calcaires et des dolomies du trias moyen.



Photo 3 : Photo du haut du bassin d'Amen montrant un relief ruiniforme dans de la cargneule constellée de forme d'érosions hydrochimique et hydraulique. © Théo Armando.

II-3 Contexte hydrogéologique général

Caractères généraux du système aquifère

Le système d'aquifère peut être assimilé dans son ensemble à un aquifère à nappe libre et localement d'aquifère multicouche. Bien que l'on ne dispose pas de résultats de suivi de traçage fluorescent, l'analyse de la suite lithostratigraphique Permienne, Triasique et Jurassique le montre. Cette suite est une combinaison de formations hydrogéologiques perméables entre lesquelles peuvent s'intercaler des formations semi-perméables voire imperméables.

Seule la couverture décollée nous intéresse dans le cadre de cette étude, car elle seule peut accueillir un aquifère. Son épaisseur est de l'ordre de 100 à 700m. Dans cette couverture, les formations perméables sont constituées par les cargneules, calcaires et dolomies du Trias (100 à 200m), les calcaires du Lias (50 à 60m), du Dogger (100 à 150m) et du Malm (50 à 100).

Les formations semi-perméables et imperméables sont les argilites vertes et lie-de-vin rhétiennes épaisses en moyenne de 10 à 20m mais parfois absentes et remplacées localement par des marnes. Cette formation peu perméable ne figure pas sur notre secteur d'étude d'après la carte géologique.

Les différents ensembles carbonatés (Trias moy-sup, Lias, Dogger et du Malm) constituent autant de réservoirs. Dans ces réservoirs, les types de vides sont des microfissures (joints de stratification et diaclases) et macrofissures (vides créés par la cagneyulation, failles). Les **réservoirs aquifères sont en conséquence de type fissuré, le milieu discontinu**. Ils sont compartimentés par le jeu de plis et de failles. (Fig.6)

Ces réservoirs sont conjointement ou séparément sollicités en fonction de l'altitude des sources, de la géométrie du découpage des surfaces de stratification, du degré et du niveau d'érosion des formations sédimentaires. (Ivaldi, 1998)

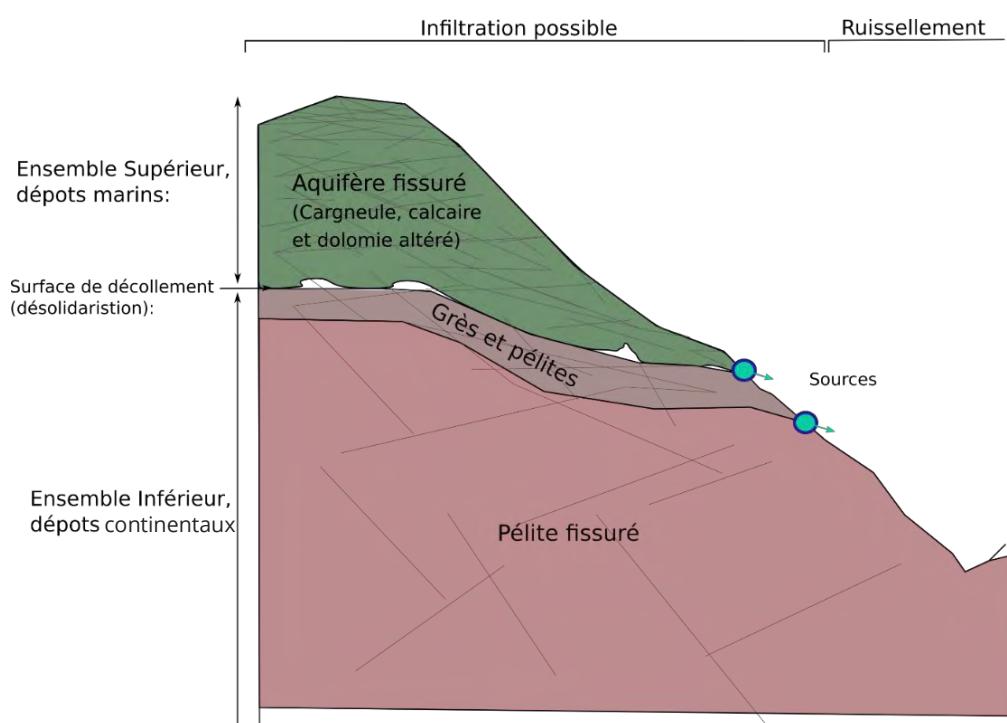


Figure 6 : Coupe simplifiée des ensembles géologiques d'après leur propension à accueillir des aquifères.

L'aquifère fissuré : Son réservoir utile est constitué par 200 mètres de cargneule, calcaire et dolomie parfois épaisse par le jeu de la tectonique ductile.

La perméabilité des formations hydrogéologiques constituant le réservoir est réalisée à toutes les échelles par les joints de stratification, diaclases, failles, fractures et vacuoles hydrauliques des cargneules. La perméabilité en grande partie est liée à la fissuration et à la karstification des roches. Dans ce type de milieu naturel, les perméabilités en grande partie, liées à la fissuration et la karstification des roches sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-6} m/s.

L'action mécanique et chimique des eaux de surface et des eaux souterraines a abouti au cours du temps à la formation de relief ruiniforme, karstifié en surface, de puits, conduits et cavités organisées en un réseau souterrain guidant la circulation verticale et horizontale des eaux en profondeur.

La nappe sollicitée à savoir celle de l'aquifère du trias moy-sup, est libre compte tenu de la forme des reliefs du niveau d'érosion dans la zone. Il en est de même des nappes des aquifères du Lias et du Malm.

L'alimentation de l'aquifère est réalisée par l'infiltration des eaux de pluie et de fonte des neiges sur l'ensemble des reliefs carbonatés fissurés affleurant.

Résumé : Partie II-2

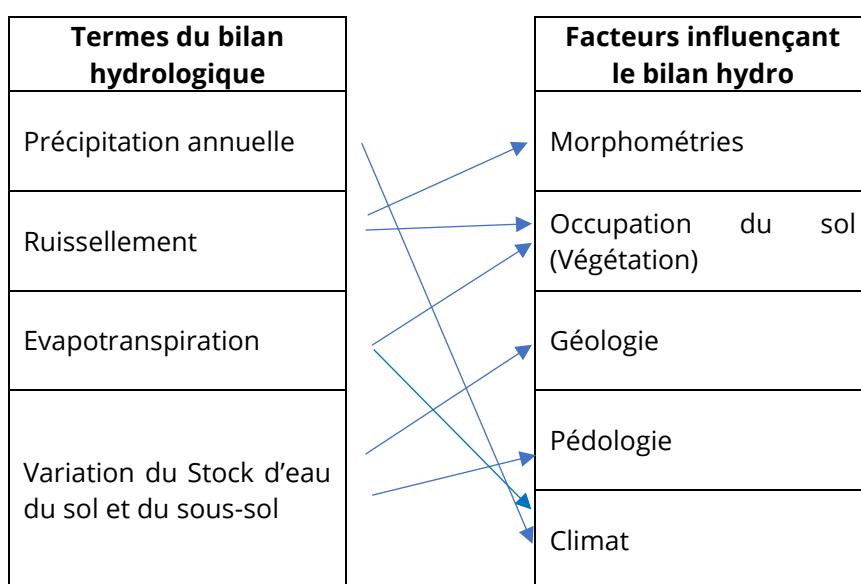
Le secteur est composé d'un ensemble sédimentaire d'origine continental composé en majorité de pélite qui s'est déformé de manière ductile lors de l'orogenèse. Son comportement mécanique ductile a limité sa fracturation, néanmoins cette roche imperméable et parcourue par des microfissures qui rendent le massif perméable à grande échelle. Malheureusement, il est très compliqué d'estimer la quantité d'eau pouvant circuler ou être stockée dans les fractures de cet ensemble pétrographique. C'est pourquoi cet ensemble inférieur (pélite) n'est pas considéré comme un aquifère. Contrairement à l'ensemble supérieur constitué de roche carbonatée qui peut accueillir de potentiel aquifère. L'épaisseur de roche concernée représente environ 200 mètres. Dans cet ensemble le fonctionnement hydrogéologique est permis par la porosité et perméabilité naturelles accentuées par l'érosion karstique ainsi que par la fracturation engendrée par l'orogenèse Alpine. L'ensemble supérieur accueille des aquifères à nappe libre se formant dans un milieu fissuré.

III DONNEES ET METHODE

Pour estimer les différents termes de l'équation du bilan hydrologique, il faut décrire les caractéristiques du milieu sur lequel s'applique cette équation. Ainsi, après une précipitation, la part de l'eau qui ruisselle, s'évapore ou s'infiltre n'est pas la même si la pente est forte ou faible (facteur morphométrique), si l'occupation du sol est forestière ou rase (Végétation) ou encore si le substrat est perméable ou imperméable (Géologie). Tout l'objectif du bilan hydrologique est d'étudier pour chaque bassin les différents facteurs pouvant influencer le devenir d'une goutte d'eau. Pour cette étude, 4 bassins-versants ont été étudiés en priorité.

Cette partie présente les différents traitements qui ont été appliqués, soit pour estimer directement un des termes du bilan hydrologique, soit pour obtenir des informations sur des facteurs utiles à l'estimation d'un ou plusieurs des termes du bilan hydrologique (Tbl.1). Ainsi, cette partie méthode comprend également des résultats intermédiaires nécessaires à l'estimation du bilan hydrologique.

Tableau 1 : Le bilan hydrologique est influencé par plusieurs facteurs, il faut d'abord trouver et traiter les données sur les facteurs d'influences, pour pouvoir ensuite estimer le bilan hydrologique.



La première étape consiste à recueillir des données sur tous les facteurs pouvant influencer le bilan hydrologique. Puis d'effectuer des traitements pour que ces données soient à l'échelle du bassin versant, ainsi que d'autres traitements intermédiaires à l'estimation du bilan hydrologique.

La seconde étape est de calculer les différents termes du bilan hydrologique.

III-1 Facteurs influençant le bilan hydrologique

RESUME

Cette partie présente :

- Les traitements et calculs effectués sur SIG et Excel pour obtenir les caractéristiques morphométriques de chaque bassin-versant utile pour estimer le coefficient de ruissellement.
- Les traitements effectués sur SIG et Excel pour connaître l'occupation du sol de chaque bassin versant dont dépend l'estimation du coefficient de ruissellement et l'évapotranspiration.
- Les nombreux traitements réalisés pour estimer le volume de roche, ainsi que les recherches bibliographiques sur leur porosité et perméabilité afin d'évaluer leur capacité de stockage en eau.
- Les expérimentations faites pour estimer la capacité de rétention en eau du sol.

III-1.1 La morphométrie

Résumé

Cette partie présente la méthode appliquée pour obtenir l'emprise des 4 bassins d'étude grâce à ArcGI ; ainsi que les différentes variables calculées pour décrire la morphométrie des bassins. La description morphométrique des bassins permet d'estimer le temps de concentration qui est utile pour la compréhension du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique.

On entend par morphométrie, tous les paramètres qui composent la géométrie du bassin-versant. Ainsi, la surface, le périmètre, la pente moyenne et d'autres paramètres sont calculés pour chaque bassin-versant. La description morphométrique des bassins-versants présente un **intérêt** car elle influence le calcul du ruissellement, donc mécaniquement de l'infiltration. De la géométrie du bassin dépend la vitesse d'écoulement jusqu'à l'exutoire. Si le bassin est de petite superficie avec une pente forte, alors l'écoulement sera rapide, en conséquence l'infiltration sera limitée ([BRGM, 2007](#)).

Le calcul de la morphométrie se déroule principalement sur SIG ou sur Excel à partir de données obtenues grâce au SIG.

III-1.1.1 Calcul de l'emprise des bassins-versants sur ArcGIS

L'étape indispensable pour débuter cette étude est de connaître l'emprise exacte des bassins-versants sur lesquels porte cette étude.

Le périmètre des bassins-versants est calculé grâce au jeu d'outils hydrologie du logiciel ArcGIS, à partir d'un MNT de 25m de résolution. Il faut d'abord effectuer les traitements suivants sur le MNT :

- Remplissage des cuvettes qui fausseraient les résultats d'écoulement
- Calcul de la direction des flux pour connaître la direction d'écoulement des précipitations
- Calcul de l'accumulation des flux pour faire ressortir les cours d'eau. ([Fig.7](#))

Il faut ensuite positionner les exutoires à partir desquels sont générés les Bassins-versants. Pour cela, un point symbolisant l'exutoire est positionné à la confluence des cours d'eau, puis grâce à la fonction « bassin » d'ArcGIS un raster est créé regroupant tous les pixels qui drainent l'eau dans la direction de cet exutoire. Tous ces pixels forment le bassin versant.

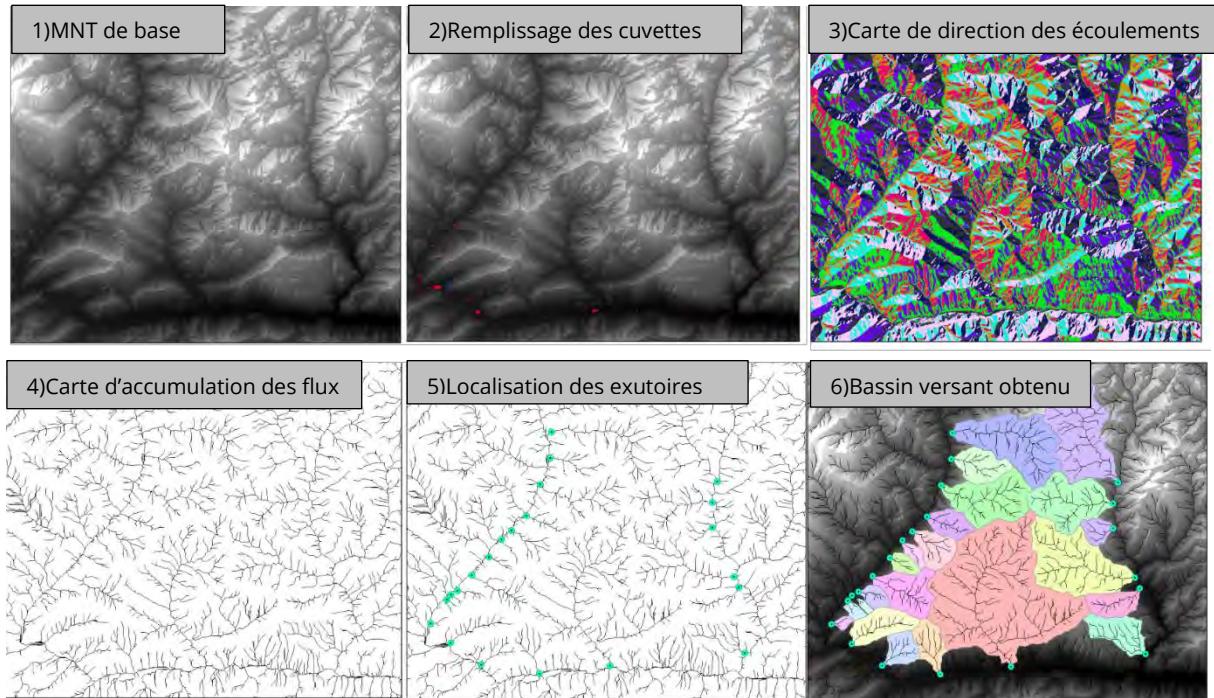


Figure 7 : Succession des traitements réalisés pour aboutir à une délimitation des bassins-versants.

Cette opération a été faite pour 20 bassins-versants tout autour du Dôme de Barrot. Pour les bassins situés du côté ouest et sud du massif, leur exutoire correspond à la confluence avec le fleuve Var ; pour les bassins situés du côté Est du massif, les exutoires se situent à la confluence du Cians.

L'emprise de 20 bassins-versants a été définie, mais, dans le cadre de cette étude, seuls 4 bassins sont étudiés précisément (Fig.8). Il s'agit de bassins affluents du fleuve Var qui couvrent en partie la RNR des gorges de Daluis. La suite de l'étude concerne seulement ces 4 BV.

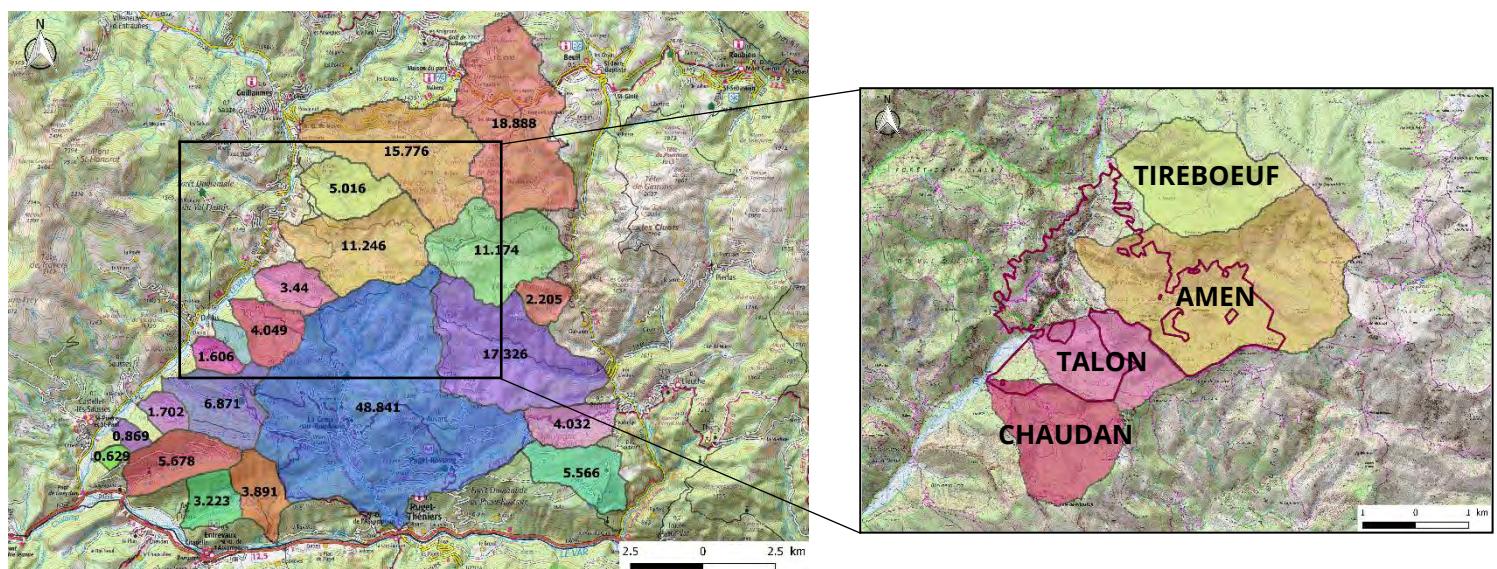


Figure 8 : A gauche : l'emprise des 20 bassins calculée grâce à ArcGIS avec leur superficie écrite en noir. A droite : les 4 bassins pour lesquels le bilan hydrologique est estimé.

III-1.1.2 Calcul des paramètres morphométriques de chaque bassin

Tableau 2 : La partie supérieure de ce tableau décrit la géométrie de chaque bassin à partir de quelques paramètres morphométriques. La partie basse du tableau présente le temps de concentration de chaque bassin pour différentes méthodes de calcul.

Caractéristiques		Unité	Valeur				
Nom	Notation		Amen	Talon	Tireboeuf	Chaudan	Roudoule
Surface	S ou A	Km ²	11	3,44	5,01	4,05	49
Périmètre	P	Km	20	9,9	12,45	10,4	43,5
Altitude	Maximale:Hmax	m	2082	1555	2038	1613	2129
	Minimale:Hmin		732	680	751	660	411
	Moyenne:Hmoy		1431	1112	1370	1179	1074
	H5%		1900	1410	1850	1470	1525
	H95%		1010	800	960	820	575
Longueur du cours d'eau principal	L	Km	6,12	3	3,79	3	11,5
Indice de compacité	Grevelius (Kc)		1,69	1,49	1,56	1,45	1,74
Rectangle équivalent	Longueur	Km	6,61	3,06	3,94	3,15	14,60
	Largeur		3,32	1,85	2,24	2,01	7,00
Pente moyenne	P	m/m	0,22	0,29	0,34	0,32	0,15
Pente moyenne (ArcGis)	P%	%	53	55	49	48	49
TEMPS DE CONCENTRATION							
Temps de concentration	Tc Giandotti	min	46	30	31	30	82
	Tc Kirpich	min	29	15	17	14	54
	Tc Passini	min	56	26	30	27	139
	Tc Ventura	min	54	26	29	27	138
Temps de concentration moyen	Tc moyen	min	46	24	27	25	103
Ecart type de Tc	+ ou -	min	12	7	6	7	42

Le tableau 2 ci-dessus, reprend quelques paramètres mesurés pour chaque bassin-versant. Parmi ces paramètres, certains comme la superficie, le périmètre, le rectangle équivalent, le coef de Gravelius et la pente des bassins entrent dans l'estimation du bilan hydrologique. D'autres paramètres comme le temps de concentration pourraient servir aux expérimentations terrain pour estimer le ruissellement et discriminer les autres types d'écoulement plus lents (écoulements hypodermiques et souterrains).

Tableau 3 : Récapitulatif des paramètres morphométriques calculés et des données, formules et outils utilisés.

Indices morphométriques calculés	Notation	Formule ou type de calcul	Données + logiciel utilisé
Emprise des BV		Traitements SIG	MNT 25 + ArcGIS (jeu d'outils hydrologie)
Surface des BV (Km ²)	S	Calcul Table attributaire	Bassin Vectorisé + Arc Map.
Périmètre (Km ²)	P	Calcul Table attributaire	Bassin Vectorisé + Arc Map.
Pente moyenne	Pente %	Traitements SIG	MNT 25 + Arcgis
Indice de compacité	Kc	$= 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}}$	Bassin Vectorisé + Excel
Rectangle équivalent (Km)	Longeur	$= Kc * \frac{\sqrt{S}}{1.128} * 1 + \sqrt[2]{1 - (\frac{1.128}{Kc})}$	Données créées +Excel
	Largeur	$= Kc * \frac{\sqrt{S}}{1.128} * 1 - \sqrt[2]{1 - (\frac{1.128}{Kc})}$	Données créées +Excel
Dénivelé		$= Alt_{max} - Alt_{min}$	MNT 25 + Arcgis
Indice de pente global	Ig	$= \frac{H5\% - H95\%}{Longueur}$	Données créées + Excel

L'indice de compacité est calculé par la formule de Gravelius (Kc) afin de décrire la forme des bassins. Plus l'indice de compacité est proche de 1, plus la forme du bassin est ronde (compacte). C'est un paramètre intéressant car il est en relation avec la vitesse de drainage d'un bassin. Plus un bassin versant est compact plus la vitesse de drainage sera rapide (débit de pointe élevé). Ainsi, pour une même superficie, une crue sera plus rapide sur un bassin arrondi que sur un bassin allongé ([Lambert, 1996](#)). Ce paramètre rentre dans l'estimation du coefficient de ruissellement car le drainage étant plus rapide dans un bassin arrondi, les précipitations ont plus tendance à ruisseler qu'à s'infiltrer.

La répartition de la surface des bassins versants par tranche d'altitude de 50 mètres a également été calculée. ([Annexe 2](#))

Grâce au calcul des caractéristiques morphométriques des bassins-versants, il est possible de calculer de manière théorique des variables hydrologiques telles que le temps de concentration, le débit moyen, maximum ou minimum.

III-1.1.3 Temps de Concentration

Le temps de concentration est défini comme le temps nécessaire à une goutte d'eau de pluie pour parcourir la distance depuis le point le plus éloigné de l'exutoire d'un bassin jusqu'à celui-ci. Il pourrait s'avérer utile dans l'estimation du coefficient de ruissellement.

$$Tc \text{ Giandotti} = 60 * \frac{0.4\sqrt{(S)} + 0.0015L}{0.8\sqrt{P} * L}$$

$$Tc \text{ Kirpich} = 0.0195 * \left(\frac{L}{\sqrt{P}}\right)^{0.77}$$

$$Tc \text{ Passini} = 0.14 * \frac{(S * L)^{1/3}}{\sqrt{P}}$$

$$Tc \text{ Ventura} = 7.62 * \left(\frac{S * 100}{P}\right)^{0.5}$$

Tc = Temps de concentration en minutes (min)
S = Surface (ha)
P = Pente (m/m)
L = Plus grande longueur hydrologique (m)

III-1.2 L'occupation du sol

Résumé

Grâce aux données de la *BD_forêt_v2*, l'occupation du sol a été calculé pour chaque bassin en valeur et en pourcentage. Ainsi, la couverture de « forêt fermée de pins sylvestre » représente 11% du bassin d'Amen et 55% du bassin de Chaudan ; les « landes » recouvrent 55% du bassin d'Amen et seulement 4% de celui de Chaudan. La connaissance de la couverture du sol est indispensable à l'estimation du ruissellement, car l'eau ruisselle mieux en l'absence de végétation. De plus, le calcul de l'occupation du sol par bassin est utile à l'estimation de l'évapotranspiration qui augmente avec la présence de forêt.

L'occupation du sol est un facteur essentiel dans l'estimation du bilan hydrologique. En effet, le type d'occupation du sol influence l'écoulement de l'eau. Sur une surface forestière l'eau aura tendance à s'infiltrer, car la végétation ralentit son écoulement permettant au sol plus épais d'absorber une part d'eau importante ; contrairement à une surface de roche affleurante où l'eau aura tendance à ruisseler rapidement. Ainsi, la *BD_forêt_v2* a été utilisée pour calculer au mieux le coefficient de ruissellement par bassin versant en prenant en compte la proportion des différents types d'occupation du sol.

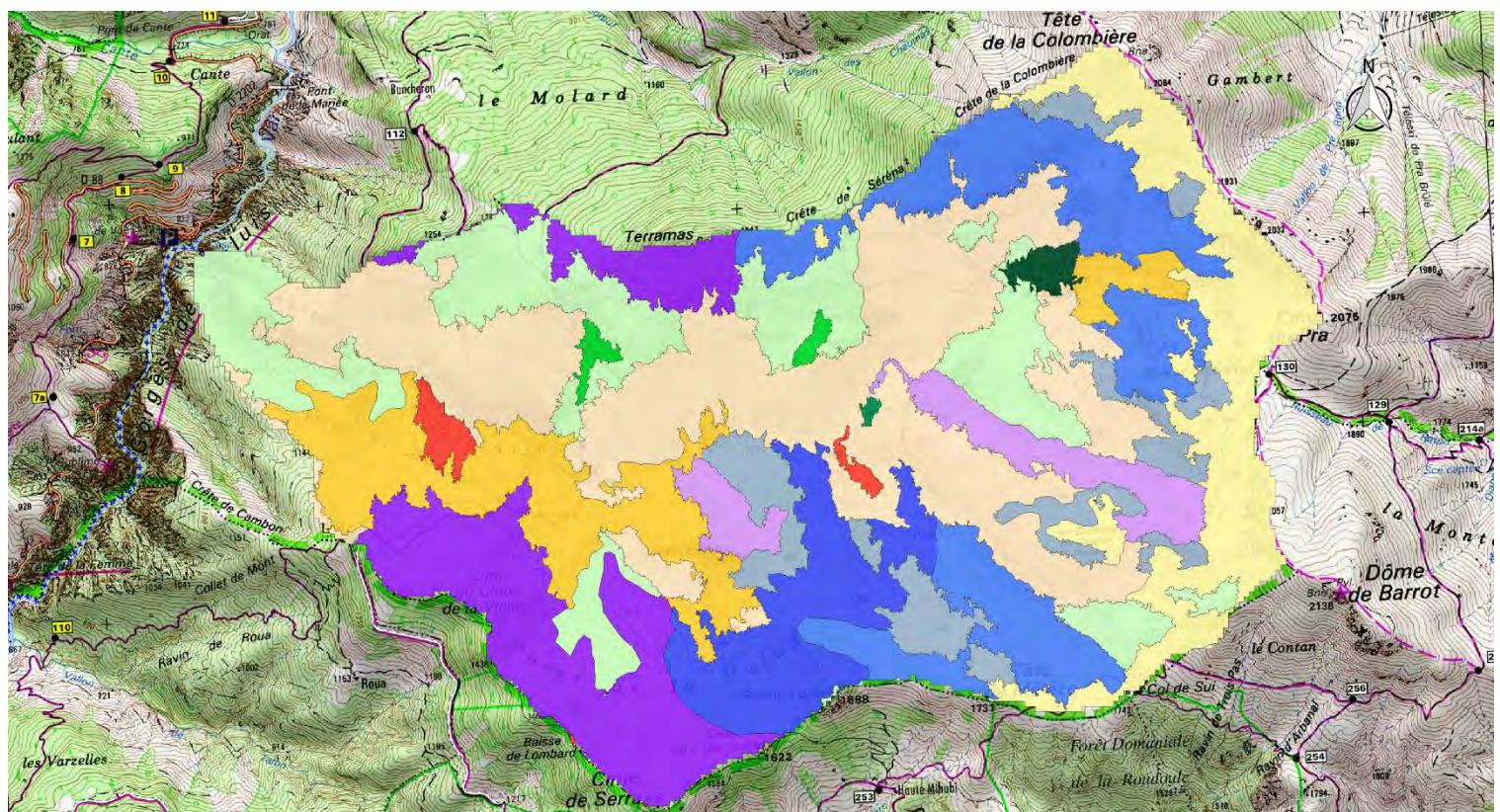
Ainsi, la couche *BD forêt_v2* a été découpée d'après l'emprise des différents bassins d'étude ([Fig.9](#)). La superficie de chaque polygone a été calculée puis la superficie des polygones appartenant à la même classe d'occupation du sol a été sommée. Le tableau ci-dessous montre la superficie que couvre chaque classe d'occupation du sol par bassin versant ([Tbl.4](#)).

Tableau 4 : Surface occupés par chaque classe d'occupation du sol par bassin.

Types de végétation			Surface (m ²)			
CODE_TFV	TFV	ESSENCE	Amen	Talon	Tireboeuf	Chaudan
FF1-00	Forêt fermée de feuillus purs en îlots	Feuillus	7 999	0	0	0
FF1-00-00	Forêt fermée à mélange de feuillus	Feuillus	53 795	0	0	0
FF1G01-01	Forêt fermée de chênes décidus purs	Chênes décidus	59 373	0	458 281	0
FF2-00-00	Forêt fermée à mélange de conifères	Conifères	721 431	0	0	0
FF2-52-52	Forêt fermée de pins sylvestres purs	Pins sylvestres	1 259 308	1 148 032	1 778 875	2 215 926
FF2-63-63	Forêt fermée de mélèzes purs	Mélèzes	1 297 848	0	733 250	0
FF2-80-80	Forêt fermée à mélange de pins purs	Pins mélangés	431 877	0	0	0
FF31	Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants et conifères	Mixte	0	21 956	151 505	350 300

FF32	Forêt fermée à mélange de conifères prépondérants et feuillus	Mixte	92 500	285 483	75 451	718 244
FO1	Forêt ouverte de feuillus purs	Feuillus	1 585 763	598 549	629 388	92 014
FO2	Forêt ouverte de conifères purs	Conifères	705 864	29 865	228 987	187 474
FO3	Forêt ouverte à mélange de feuillus et conifères	Mixte	1 058 382	241 050	0	0
LA4	Lande	NC	2 808 757	1 012 771	96 210	187 032
LA6	Formation herbacée	NC	1 161 814	63 520	165 523	86 389
?	Indifférencié	Indifférencié			600 000	200 000

A partir de ces valeurs d'occupation du sol en m², la proportion en pourcentage de chaque classe d'occupation du sol a été calculée ([Annexe 3](#)).



Légende

Classes d'occupation du sol

- Forêt fermée à mélange de conifères
- Forêt fermée à mélange de conifères prépondérants et feuillus
- Forêt fermée à mélange de feuillus

- Forêt ouverte à mélange de feuillus et conifères
- Forêt ouverte de conifères purs
- Forêt ouverte de feuillus purs en îlots
- Forêt fermée de mélèze pur
- Forêt fermée de pin sylvestre pur

500 0 500 m

Figure 9 : Carte issue de la BD_Forest_v2 découpée à l'échelle du bassin d'Amen. La superficie de chaque classe d'occupation du sol est connue.

III-1.3 La Géologie

Résumé

Cette partie présente l'intérêt d'estimer le volume des roches, puis la méthode mise en place pour y parvenir. L'intérêt est d'estimer le volume des potentiels aquifères. La méthode est assez approximative, elle consiste à :

- Estimer la surface totale (surface qui affleure + surface souterraine) de chaque couche géologique grâce à la carte géologique du BRGM et d'hypothèses simplificatrices sur la disposition des couches ;
- Puis de multiplier la surface de chaque couche géologique par son épaisseur moyenne estimée en croisant les données d'épaisseur trouvées dans la bibliographie ([Ivadi, 1998](#), [Magnan, 2007](#), [Jourdon, 2014](#)) et les données l'épaisseur obtenue en traçant des transects sur ArcGIS.
- Enfin, les données de volume de chaque formation géologique sont mises en relation avec les données de porosité trouvées dans la bibliographie dans le but d'estimer la capacité de stockage potentielle des roches en eau.

III-1.3.1 Estimation du volume de roche

Parmi les objectifs de cette étude, figure l'estimation du volume des roches. Acquérir une approximation du volume des roches est utile pour mesurer la variation de stock d'eau.

On entend par variation des stocks d'eau, le volume d'eau qui est stocké dans les aquifères ainsi que le volume d'eau exporté via les différentes résurgences (sources). En effet, dans la mesure du bilan hydrologique il est indispensable de connaître le comportement de la roche face aux précipitations. :

- Est-ce que l'eau s'infiltre rapidement et après un bref parcours souterrain résume en totalité par des sources ?
- ou bien, est-ce que l'eau s'infiltre pour être stockée en grande partie dans les vides des formations rocheuses, et seule une petite partie ressort par les sources ?
- ou encore, est-ce que les roches du bassin empêchent l'eau de s'infiltre conduisant à l'écoulement de la totalité de l'eau ?

Pour déterminer laquelle de ces hypothèses s'applique le mieux aux bassins d'étude, il est nécessaire d'étudier la nature des roches. La circulation de l'eau dans le sous-sol dépend de deux paramètres essentiels que sont la porosité et la perméabilité qui varient en fonction des roches qui composent les bassins versants.

Pour estimer la quantité d'eau qui s'infiltre, qui est stockée et qui ressurgit, il ne suffit pas d'étudier la nature des roches, il est nécessaire de connaître le volume de chaque formation rocheuse par bassin.

Maintenant que l'intérêt de l'estimation du volume des roches est explicité, la suite de cette partie décrit la méthodologie suivie pour estimer le volume des formations rocheuses.

III-1.3.1.1 / 1^{er} étape : Calculer la surface des ensembles géologiques qui affleurent à partir de la carte géologique, pour chaque bassin

La première étape est d'estimer la surface des différentes formations géologique à partir de la carte géologique, et cela pour chaque bassin-versant. Plus concrètement cette étape se déroule en 3 temps, comme présenté sur la [figure 10](#).

La carte géologique du BRGM est découpée par bassin versant sur ArcGIS → la surface (m^2) de chaque polygone est calculée depuis la table attributaire de chaque couche précédemment découpée → Ensuite la table attributaire est ouverte sous format Excel afin de sommer les surfaces de tous les polygones appartenant au même ensemble géologique (Formule SOMME SI).

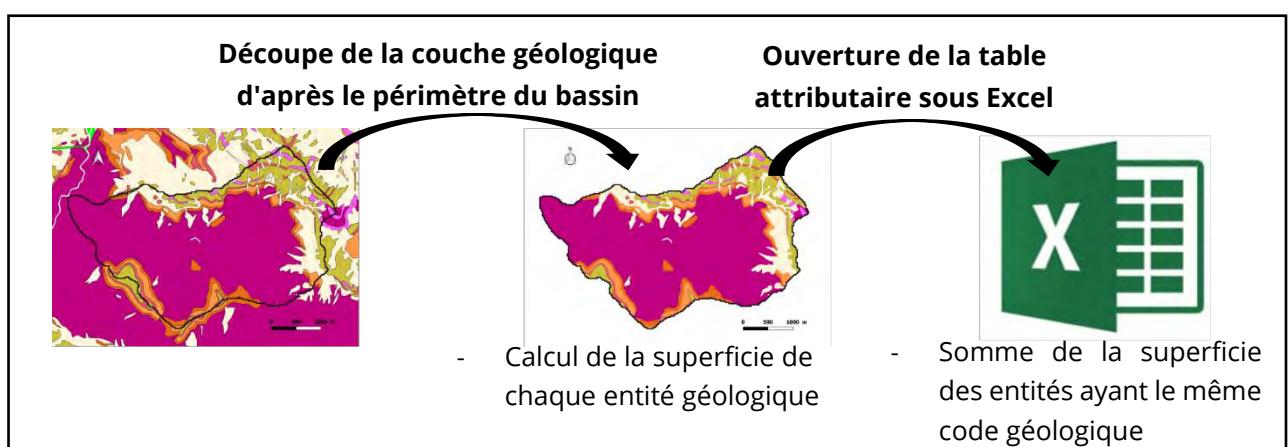


Figure 10 : Etapes vers le calcul de la surface affleurante de chaque formation géologique pour chaque bassin. Le bassin d'Amen sert à illustrer les étapes de cette méthode.

Cette première étape est simple et fiable, si tant est que la carte géologique du BRGM soit correcte. Les formations géologiques qui couvrent moins de 3% du bassin n'ont pas été prises en compte. La prise en compte de toutes les petites formations géologiques complique inutilement les calculs. Cette limite de 3% a été fixée arbitrairement en estimant qu'une roche qui occupe moins de 3% du bassin n'influence pas de manière notable le bilan hydrologique. Il est important de noter que la somme des roches qui couvrent plus de 3% des bassins représente plus de 90 % de chaque bassin. Cette simplification entraîne une non prise en compte de 1% à 10% de la surface, selon les bassins. Le tableau ci-dessous (Tbl.5) montre la part qu'occupe chaque formation géologique dans chacun des bassins versants étudiés. Par exemple, la pélite occupe 63.7 % du bassin d'Amen et 70.6% du bassin du Talon, contre seulement 3.4% du bassin de Tirebœuf.

**Tableau 5 : Tableau associant à chaque formation géologique la part qu'elle occupe par bassin versant.
Données issues de la carte géologique du BRGM.**

Notation	Description	Code	Amen	Talon	Tireboeuf	Chaudan
j7-n2	Portlandien-Berriasiens : calcaires marmoreens	148				4,0
j4-5_TN	Callovien -Oxfordien : ""Terres noires""	166				3,0
j4-6	Callovien et Oxfordien non différenciés : calcaires et calcaires marneux	167				
j4-5	Callovien et Oxfordien non différenciés : calcaires et calcaires marneux	167				
j2_4a	Bajocien-Bathonien : marno-calcaires Cancellophycus	177				4,6
I2	Sinemurien : calcaires à Gryphées	187				3,7
t6-7	Keuper : argiles rouges, gypses, dolomies, cargneules	194				11,8
t3-5_GK	Muschelkalk : gypses et cargneules	200				5,2
t3-5_CD	Muschelkalk : calcaires et dolomies	199		10,3	5,9	16,6
t1-2_gQ	Trias inférieur (grès bigarre provençal) : grès arkosiques et dragées de quartz	205		5,4	3,5	3,7
t1-2_sD	Werfénien : pélites, dolomies	204		5,5	4,4	7,1
r	Permien : pélites rouges	206		63,7	70,6	3,4
Ef	Eboulis fixes, généralement anciens, localement gros éléments	23		11,0	12,0	51,5
						50,2

III-1.3.1.2 / 2ème étape : Estimer la surface totale des roches, en prenant en compte le prolongement des roches en souterrain.

Cette deuxième étape consiste à déduire de la carte géologique du BRGM la surface totale de chaque formation géologique. Etant donné que la surface affleurante est déjà connue, il reste à estimer la surface qui se prolonge en souterrain. Cette estimation repose sur l'hypothèse que les formations géologiques qui affleurent se prolongent de manière continue et linéaire en souterrain. Ainsi, compte tenu de cette hypothèse, la surface totale d'une formation géologique est égale à sa propre surface affleurante, **plus** la surface affleurante des formations plus récente qui la recouvrent. Cette simplification est possible car sur les bassins étudiés la disposition des couches respecte la logique chronologique qui veut que les couches plus récentes recouvrent les couches plus anciennes. De plus, il n'y a pas d'accidents géologiques majeurs qui auraient conduit à une stratification totalement chaotique. Ainsi, il semble que les formations géologiques soient disposées de manière relativement ordonnée, ce qui justifie notre hypothèse simplificatrice.

En pratique cette étape se passe sur Excel. Le champ « Code » figurant sur le tableau ci-dessus (Tbl.5) indique **la chronologie relative** des formations géologiques. Ainsi, ce code permet d'ordonner chronologiquement les formations géologiques. Le code le plus élevé est 206 pour la pélite Permienne, car il s'agit de la formation la plus ancienne, et le code le plus bas est 23 & 14, il correspond aux éboulis Quaternaires qui sont les formations les plus récentes. La présence de ces codes permet d'appliquer une formule Excel simple consistant à sommer la surface affleurante

des formations géologiques à condition qu'elles aient un code inférieur à la formation étudiée. En effet, qui dit code inférieur dit roche plus récente donc roche qui recouvre la formation étudiée. Grâce à cette formule le calcul de la superficie totale des différentes formations géologiques est rapide car il suffit de dérouler la formule.

$$\text{FORMULE EXCEL} = \text{SOMME.SI} (\text{Codes geol} < \text{Code étudiés})$$

Attention, en appliquant cette méthode la surface totale est surestimée à cause des éboulis. Ainsi, le calcul de la surface totale des formations géologiques peut se faire automatiquement sur Excel dans un premier temps. Mais, dans un second temps, il faut prendre en compte la part des éboulis qui ne recouvre pas réellement la formation étudiée. Prenons le cas d'une formation géologique qui se situe sur les crêtes d'un bassin ; disons que cette formation est couverte par un petit éboulis ; seule la surface de cet éboulis devrait être prise en compte, mais avec la méthode automatique sur Excel, c'est la totalité de la surface des éboulis du bassin qui est pris en compte, alors que la majorité des éboulis se trouve probablement sous la couche étudiée. Afin d'éviter ce problème, la surface des éboulis qui se situe au-dessous de la couche étudiée est soustraite de la surface totale précédemment obtenue. L'estimation de la superficie des éboulis se situant en dessous de la formation étudiée se fait manuellement sur SIG pour chaque formation de chaque bassin (Fig.11).

La surface totale des différentes formations géologiques est alors obtenue.

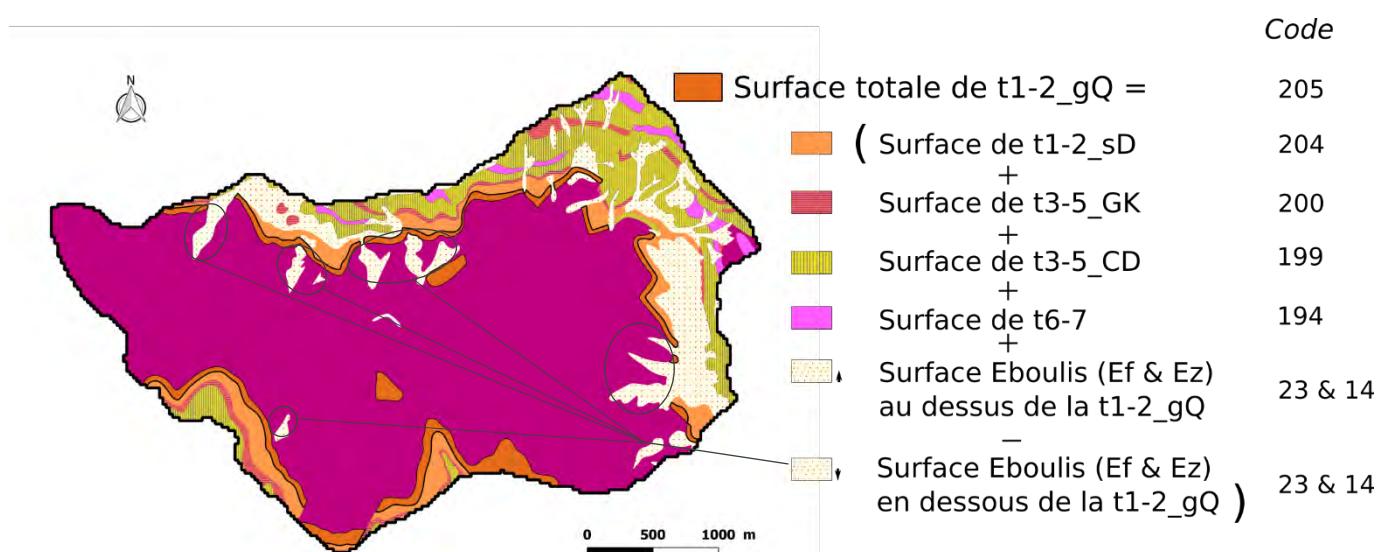


Figure 11 : Représentation de la méthode de calcul de la superficie totale (affleurement + sous terrain) d'une formation géologique. Ici le calcul de la surface totale concerne la formation t1-2_gQ (code 205) du bassin d'Amen. La surface totale de la formation t1-2_gQ est égale à la somme de la surface des formations plus récente qui ont donc un « code » inférieur ; à cela il faut soustraire la part des éboulis qui se situent sous la couche étudiée (cerclé en noir sur l'illustration).

La marge d'erreur pour les valeurs de surface totale est probablement assez importante. Cette erreur vient principalement de l'incertitude sur la disposition souterraine des couches géologiques. Cette marge d'erreur est difficilement quantifiable justement à cause de l'absence de connaissance suffisante sur la disposition géologique souterraine. Certains paramètres comme l'inclinaison des différentes couches géologiques auraient pu être pris en compte dans le calcul de la surface totale. La prise en compte de ce paramètre aurait permis, en théorie, d'être plus représentatif. Néanmoins, étant donné que les connaissances sur l'inclinaison des différentes couches géologiques est très imprécise, il est préférable de ne pas l'inclure. Cette simplification est donc revendiquée, car elle évite d'additionner les marges d'erreur en prenant en compte des multitudes de paramètres dont les valeurs sont incertaines.

La difficile prise en compte des éboulis entraîne également une marge d'erreur. Les affleurements rocheux étant discontinus et s'étalant à des altitudes diverses, il est souvent difficile de savoir la part des éboulis qui se situe au-dessus ou en dessous de la formation considérée. En recouvrant d'autres formations géologiques, les éboulis agissent comme un masque qui limite les connaissances des autres roches. Ainsi, plus la surface des éboulis est importante, moins les autres roches sont connues. La marge d'erreur dépend donc de la part qu'occupent les éboulis par bassin. Il a été décidé arbitrairement que la marge d'erreur est égale à la surface des éboulis par bassin versant divisé par 2 ([Tbl. 6](#)).

Tableau 6 : Marge d'erreur venant de l'estimation de la superficie totale des formations géologiques.

Bassins	Marge d'erreur (+ ou -)
Amen	5%
Talon	5%
Tirebœuf	25%
Chaudan	

Le bassin de Chaudan est recouvert à 53% par des éboulis ([Fig. 12](#)). Les éboulis cachent la majorité des affleurements rocheux et empêchent donc d'estimer leur superficie totale. De plus, la géologie du bassin de Chaudan est assez différente des 3 autres bassins d'étude.

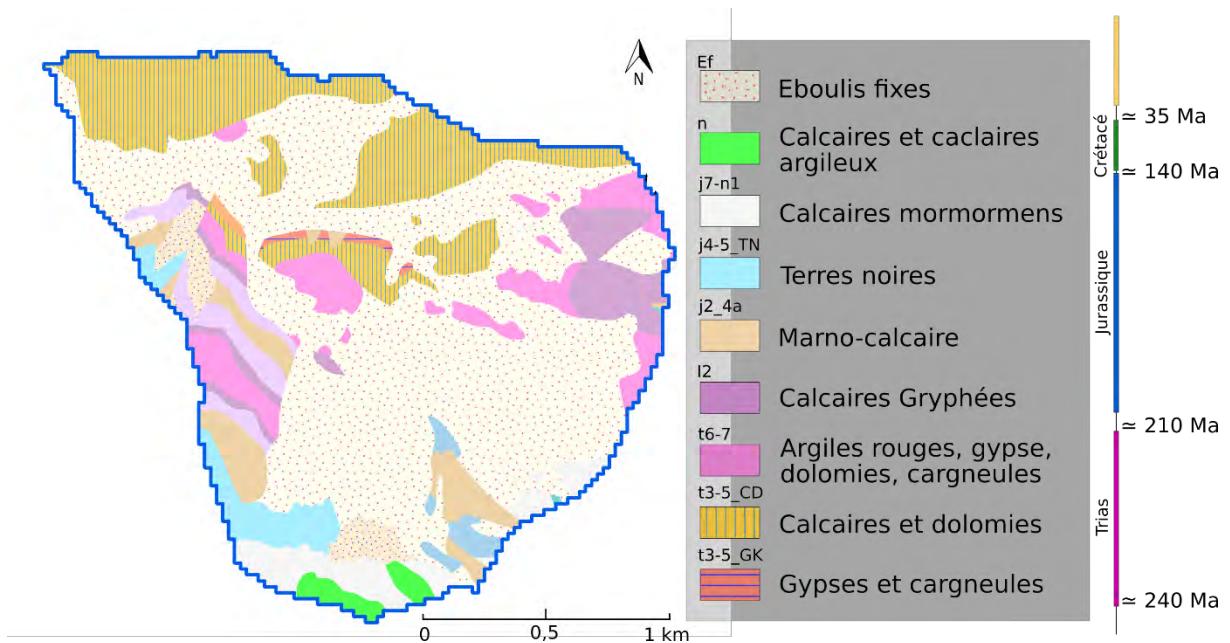


Figure 12 : Carte géologique pour le bassin de Chaudan. Cette carte illustre que le bassin de Chaudan est recouvert en majorité par des éboulis qui cachent les affleurements des autres formations géologiques ce qui rend impossible l'estimation de leur surface totale.

Comme le montre la [figure 12](#), le bassin de Chaudan constitué de roches carbonatées plus récentes datant du Jurassique et Crétacé, contrairement aux 3 autres bassins composés à plus de 95 % de roches du Trias et du Permien. Compte tenu de la singularité géologique du bassin de Chaudan et de l'importante couverture d'éboulis qui complique l'estimation de la surface totale de roche, il a été décidé de ne pas estimer le volume de ce bassin.

Maintenant que la superficie totale est calculée, il ne reste plus qu'à estimer l'épaisseur moyenne de chacune des formations géologiques pour obtenir leurs volumes.

III-1.3.1.3 / 3ème étape : Estimer l'épaisseur des différentes formations géologiques d'après 2 méthodes.

- La première méthode repose sur le croisement de données **bibliographiques**.
- La seconde méthode repose sur des mesures par **transect** de l'épaisseur des formations géologiques par bassin.

La méthode des transects consiste pour chaque formation géologique à tracer plusieurs transects partants de la base et allant jusqu'au sommet de l'affleurement étudié. A partir de ce transect et du MNT on obtient le dénivelé entre la base et le sommet de la couche, autrement dit l'épaisseur de la couche. Cette épaisseur n'est pas constante c'est pourquoi l'épaisseur retenue est le fruit de la moyenne d'une dizaine de transects tracés à plusieurs endroits de la formation étudiée (Fig.13). L'avantage de cette méthode, et que contrairement à la première méthode (bibliographie), les valeurs d'épaisseur peuvent varier d'un bassin à l'autre.

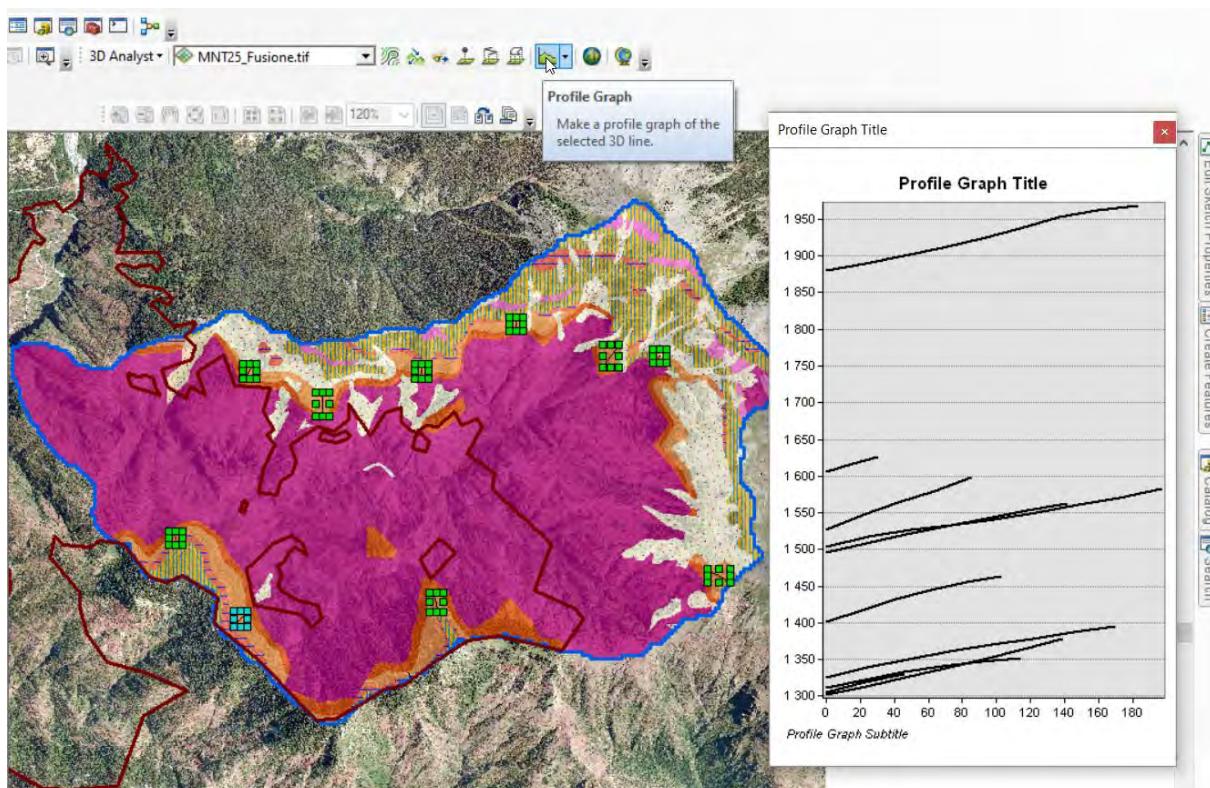


Figure 13 : Capture d'écran de la carte géologique pour le bassin d'Amen depuis l'interface ArcGIS. Les rectangles verts encadrent les transects tracés pour estimer l'épaisseur de la formation t1-2_sD. Le graphique à droite représente le profil de chacun de ces transects. L'épaisseur moyenne pour cette formation sur le bassin d'Amen est de 60 m avec une amplitude de 25 à 100 selon l'emplacement du transect.

Il est important de noter que cette approche n'est pas issue d'un protocole établi ou extrait de la bibliographie ; c'est une méthode originale réalisée seulement dans le cadre de cette étude. Il faut donc rester prudent dans l'utilisation de ces résultats.

Dans la bibliographie les auteurs donnent des fourchettes d'épaisseur, mais jamais d'épaisseur précise (Ivaldi, 1998 ; Durand & Gand, 2007 ; Jourdonet al, 2014). Ce qui est normal, car comme constaté, l'épaisseur d'une couche géologique est très variable, même à l'échelle d'un bassin-versant. Mais ces fourchettes d'épaisseur étant larges, cela entraîne inexorablement une approximation importante. Comme le montre le tableau (Tbl.7) ci-dessous pour la méthode 1, la fourchette d'épaisseur des formations géologiques peut aller du simple au quintuple. Les résultats obtenus par la méthode 2, de manière manuelle et localisée donnent des résultats d'épaisseur avec une amplitude réduite. C'est pourquoi, les résultats issus de la méthode 2 sont privilégiés.

Tableau 7 : Les épaisseurs moyennes figurant dans la dernière colonne (la méthode 2), ont été obtenues en faisant la moyenne des épaisseurs obtenues sur les 3 bassins d'étude.

Description roches	Epaisseur (Méthode 1 : Biblio)		Epaisseur (Méthode 2 : Transect Argis)
	Fourchette (m)	Moyenne (m)	Moyenne (m)
Keuper : argiles rouges, gypse, dolomies, cargneules (t6-7)	50-200	125	75
Muschelkalk : calcaires et dolomies (t3-5_CD)	50-300	145	63
Muschelkalk : gypses et cargneules (t3-5_GK)	20-100	20	31
Werfénien : pélites, dolomies (t1-2_sD)	20-100	46	47
Trias inférieur (grès bigarré provençal) : grès arkosiques et dragées de quartz (t1-2_gQ)	10-50	29	40

La finalité de cette démarche étant de connaître la capacité de stockage en eau des roches, seul le volume des roches pouvant accueillir de potentiels aquifères a été calculé (Tbl.8). Le volume de la pélite n'a donc pas été estimé. Il semblerait, en effet, que la pélite ne puisse pas accueillir d'aquifère compte tenu de sa forte imperméabilité relative. L'imperméabilité de la pélite est relative car la roche est fortement fracturée ce qui permet une infiltration de l'eau malgré l'imperméabilité de la roche en tant que telle. Concernant les éboulis, il serait intéressant d'estimer leur volume. Pour cela il faudrait estimer l'épaisseur de la couverture d'éboulis.

Tableau 8 : Résultats obtenues pour le calcul de la surface affleurante, surface totale, épaisseur, et volume des formations géologiques qui composent chaque bassin-versant.

							Methode 1				Methode 2						
							Notation	Description	Code	Code Leg	Surface affleur (m²)	Surface total (m²)	Epaisseur (m)	Volume Min (m³)	Volume Moy (m³)	Volume Max (m³)	Epaisseur (m)
Amen	Ef	Eboulis fixes,	22	23	1 233 000	1 233 000											
	Ez	Eboulis recent	13	14	64 736	64 736											
	t6-7	Keuper : argile	193	194	145 859	1 023 595	50-200	51 179 759	127 949 396	204 719 034	40	40 943 807					
	t3-5_CD	Muschelkalk :	199	199	1 153 676	2 177 271	50-300	108 863 574	315 704 363	653 181 441	90	195 954 432					
	t3-5_GK	Muschelkalk :	201	200	256 008	2 433 279	20-100	48 665 589	48 665 589	243 327 945	25	60 831 986					
	r	Permien : peli	209	206	7 160 467	11 660 955											
	hydro	Ryseau hydro	999	274	5 295	5 295											
	t1-2_gQ	Trias inferieur	207	205	608 193	3 660 488	10-50	36 604 879	105 239 026	183 024 393	50	183 024 393					
	t1-2_sD	Werfenien : p	206	204	619 015	3 052 295	20-100	61 045 897	139 896 846	305 229 483	60	183 137 690					
Talon	Ef	Eboulis fix s, g	22	23	411 193	411 193											
	Ez	Eboulis mcent	13	14	53 672	53 672											
	t6-7	Keuper : argile	193	194	14 986	14 986	50-200	749 285	1 873 212	2 997 140	30	449 571					
	t3-5_CD	Muschelkalk :	199	199	203 901	218 886	50-300	10 944 323	31 738 535	65 665 935	50	10 944 323					
	t3-5_GK	Muschelkalk :	201	200	59 602	278 489	20-100	4 177 333	5 569 777	27 848 883	20	5 569 777					
	r	Permien : p lit	209	206	2 427 142	3 440 000											
	t1-2_gQ	Trias inflrieur	207	205	119 639	949 581	10-50	9 495 809	27 537 845	47 479 044	30	28 487 426					
	t1-2_sD	Werf_nien : p	206	204	149 865	829 942	20-100	16 598 840	38 177 331	82 994 199	30	24 898 260					
Tireboeuf	Jz	Czne torrentie	11	12	2 734	2 734											
	Ef	Eboulis fix s, g	22	23	2 581 900	2 581 900											
	Ez	Eboulis r cent	13	14	40 708	40 708											
	t6-7	Keuper : argile	193	194	591 233	3 216 574	50-200	160 828 701	402 071 753	643 314 804	110	353 823 142					
	t3-5_CD	Muschelkalk :	199	199	830 261	4 046 835	50-300	202 341 735	586 791 030	1 214 050 408	50	202 341 735					
	t3-5_GK	Muschelkalk :	201	200	260 561	4 307 396	20-100	86 147 923	172 295 846	430 739 614	60	258 443 769					
	r	Permien : p lit	209	206	169 298	5 016 250											
	t1-2_gQ	Trias infrieur	207	205	184 661	4 846 952	10-50	48 469 521	140 561 612	242 347 607	40	193 878 085					
	t1-2_sD	Werf_nien : p	206	204	354 895	4 662 291	20-100	93 245 823	209 803 102	466 229 115	50	233 114 557					



Il est difficile d'**estimer une marge d'erreur** étant donné qu'elle vient en grande partie du manque de connaissances de la disposition souterraine des différentes formations géologiques et également d'une difficulté à connaitre l'épaisseur moyenne des différentes formations. La marge d'erreur induite par les traitements et simplifications réalisés est assez importante également.

- La surface des affleurements est sous-estimée d'environ 5% à cause de la non-prise en compte des roches occupant moins de 3 % de la surface du bassin.
- La surface totale est probablement sous-estimée car l'inclinaison des roches n'est pas prise en compte. Pour une inclinaison moyenne des couches de 30% cela entraîne une sous-évaluation d'environ 10 % de la surface totale des formations.
- Les valeurs d'épaisseur des roches sont comprises dans un intervalle assez large, allant du simple au quintuple.

En prenant en compte ces différentes marges d'erreur, les résultats sont compris dans l'intervalle :

$$[\text{résultat} - 50\% < \text{Résultat} < \text{résultat} + 100\%]$$

La simplification dans l'estimation de la surface totale et les incertitudes dans l'épaisseur des formations conduit à une approximation non négligeable. **Les valeurs de volume obtenues donnent un ordre de grandeur.**

Pour la suite du travail, le volume moyen de roche par bassin est obtenu en faisant la moyenne de valeurs moyennes de la méthode 1 et 2.

Maintenant que le volume des différentes formations géologiques a été estimé. Il reste à étudier leurs propriétés en termes de porosité et perméabilité pour estimer leur capacité d'absorption en eau et leur propension à se laisser traverser par l'eau.

III-1.3.2 Recherche de données de porosité et de perméabilité dans la bibliographie

*Pourquoi chercher à connaître la **porosité** des roches ?*

La porosité correspond à la part de vide présente dans les roches qui peut potentiellement accueillir de l'eau. Donc en connaissant le volume des roches et leur porosité il est possible d'estimer le volume d'eau pouvant être stocké.

*Pourquoi chercher des données de **perméabilité** ?*

Ces données pourraient permettre d'estimer le volume d'eau qui s'infiltra et le volume d'eau qui ressurgit ; donc la variation de stock d'eau dans la roche.

La lecture de nombreux articles en géologie a permis de recueillir des valeurs de perméabilité et de porosité pour plusieurs types de roches (Tbl.9). Malheureusement aucune étude mesurant la perméabilité et la porosité des roches n'a été trouvée précisément sur notre secteur d'étude. Les valeurs recueillies fournissent un ordre de grandeur, mais pas de données précises. En général il s'agit d'une amplitude de valeurs très large. Par exemple, pour le calcaire et la dolomie karstifiée la perméabilité va de 10^{-5} à 10^1 . Pour la porosité les données sont plus précises, mais l'amplitude reste relativement large. Dans le cas où plusieurs sources de données ont été trouvées pour un même type de roche, l'amplitude la plus large des données a été conservée. Autre point négatif, les données obtenues ne correspondent pas exactement aux roches présentes sur le secteur. De fait, les données trouvées dans la bibliographie sont associées aux roches présentes sur le secteur, sans que ces deux roches soit exactement pareilles. Ainsi, plusieurs données ont été trouvées sur la dolomie fracturée, ces données ont logiquement été associées à la formation t3-5_CD (Muschelkalk : calcaire et dolomie). Malgré des associations approximatives, aucune valeur n'a été trouvée pour certaines formations. Par exemple, aucune des données trouvées ne peuvent être rattachées à la formation « t1-2_sD » appelée Werfénien : pélites, dolomies.

Tableau 9 : Extrait du tableau associant des valeurs de porosité et perméabilité à chaque formation géologique. Source : Gelhar et al, 1992.

Notation	Description	Code	Code	Surface (%)	Perméabilité moyenne (m/s)	Porosité moyenne (%)
t6-7	Keuper : argiles rouges, gypse, dolomies, cargneules	193	194	34	10^{-4}	0.5 - 12
t3-5_GK	Muschelkalk : gypses et cargneules	201	200	9		
t3-5_CD	Muschelkalk : calcaires et dolomies	199	199	78	10^{-5}	1.5 - 12
t1-2_gQ	Trias inférieur (grès bigarre provençal) : grès arkosiques et drages de quartz	207	205	13	$10^{-4} - 10^{-10}$	8 - 38
t1-2_sD	Werfenien : pélites, dolomies	206	204	23		
r	Permien : pélites rouges	209	206	282	$10^{-9} - 10^{-13}$	0.5 – 7.5
Ef	Eboulis fixes, généralement anciens, localement gros éléments	22	23	246		

Conclusion partie III-1.3

La méthode pour estimer la surface des roches et les valeurs de porosité et perméabilité trouvées sont très approximatives. Les résultats varient du simple au sextuple ; à cette amplitude de valeur se rajoute une marge d'erreur conséquente. La non prise en compte de certains paramètres comme l'inclinaison des roches ou les roches occupant moins de 3% des bassins induit probablement une sous-estimation du volume des roches.

III-1.4 Le facteur sol

Résumé

Le sol a un rôle dans le bilan hydrologique car il retient une partie de l'eau précipitée. Le volume du sol et ses propriétés sont donc étudiés pour estimer le volume d'eau qu'il est en capacité de retenir. Le volume des sols est estimé à partir de la carte des sols produite par IGCS qui donne l'épaisseur des sols et la BD_forêt_v2 qui donne les surfaces. Le volume des sols (Surface x Epaisseur) est obtenu en distinguant les bassins en deux classes d'occupation du sol :

- Les surfaces de forêt fermée sont associées à un sol de 35cm d'épaisseur
- Le reste des surfaces plus ouvertes sont associées à un sol de 10cm d'épaisseur.

Une fois le volume de sol connu il reste à déterminer leur capacité à retenir de l'eau. Pour cela 16 échantillons de sols ont été prélevés.

- Le premier test déduit de la texture des sols leurs capacité à retenir l'eau.
- Le deuxième test ne déduit pas, mais induit de la pesé d'échantillons de sol qui ont été chauffé et imbibé leur capacité à retenir l'eau. Comparer la perte de masse après chauffe et le gain de masse après rinçage permet d'induire la capacité de chaque échantillon de sol à retenir l'eau.

III-1.4.1 Estimer le volume de sol

Le sol influence le bilan hydrogéologique en retenant une partie de l'eau précipitée. Bien entendu, selon le type de sol la quantité d'eau retenue n'est pas la même. Un sol argileux met du temps à absorber de l'eau, mais une fois absorbée, une grande quantité est retenue. Contrairement à un sol sableux dans laquelle l'eau s'infiltra rapidement, mais la quantité retenue est faible. Les objectifs sont :

- Premièrement, d'identifier les types de sol présents sur les bassins et d'estimer leur volume grâce aux données SIG et à la bibliographie.
- Deuxièmement, d'estimer la capacité de rétention en eau des différents types de sol grâce à des expérimentations terrain et labo sur des échantillons de sol.

Les données pédologiques sont très rares. La seule donnée spatiale trouvée est la carte des sols (1 : 250 000) issu du IGCS. Le secteur d'étude est couvert par 2 grands types de sols nommés UCS 33 et UCS 44. Pour avoir plus d'informations sur la donnée sol voir [l'annexe 4](#).

Les sols présents sur la Réserve sont peu épais. D'après le groupement d'intérêt scientifique « Gis Sol » plus de 50% de la superficie des UCS présents sur le site d'étude sont composés de sols de moins de 10 cm d'épaisseur. Concernant les sols qui couvrent le reste des UCS, leur épaisseur est également réduite. Ainsi, le Rendisol dont l'épaisseur est d'environ 35cm couvre 25% de l'UCS°33 et 15% de l'UCS n°44. ([Annexe 5](#)). Ces données se vérifient plutôt bien sur le terrain, les sols sont fins, voire inexistant sur la majorité du bassin d'Amen et du Talon à cause des affleurements rocheux et particulièrement de la pélite.

A partir de ces données d'épaisseur approximatives et de la superficie des bassins il est déjà possible d'estimer le volume de sol.

Pour que le calcul du volume de sol s'adapte à chaque bassin, l'occupation du sol est prise en compte grâce à la *BD_forêt_v2*, qui possède une bonne résolution spatiale.

Ainsi grâce au travail réalisé sur la donnée *BD_Forêt_v2*, on connaît assez précisément l'occupation du sol pour chaque bassin.

Étant donné que la formation d'un sol dépend grandement de la végétation qui le recouvre, il est pertinent de déduire de la couverture végétale le type de sol en présence et son épaisseur.

Les 15 classes d'occupation du sol de la *BD_forêt_v2* ont été simplifiées en 2 grandes classes. La première grande classe regroupe toutes les forêts fermées ; pour cette classe l'épaisseur du sol est fixée à 35cm. La seconde grande classe regroupe les forêts ouvertes les landes et les zones sans végétation, qui sont associées à un sol très fin estimé à 10 cm ([Tbl.10](#)) ([GisSol](#)).

Tableau 10 : Estimation du volume de sol présent sur chaque bassin.

Occupation du sol simplifié par bassin	Pédologie UCS	Volume (m ³) du sol selon l'occupation du sol (forêt : H=35cm / Lande : H=10cm)			
		Amen	Talon	Tirebeouf	Chaudan
Forêts fermées donc sol	Régosol (30%), lithosol (20%), calcasol (15%), rendisol (15%) sol peu épais et peu évolué entre 10 et 35cm d'épaisseur	1 373 446	509 415	1 316 827	1 149 564
Lande, forêt ouverte donc sol fin voire inexistant	Lithosol (60%) et rendisol (20%) sol peut évolué et très peu épais	732 058	194 576	112 011	55 291
Volume de sol total :		2 105 504	703 990	1 428 837	1 204 855

Cette estimation « grossière » donne une première approximation du volume de sol par bassin versant. Cette approche simplificatrice présente des limites. En effet, la diversité d'épaisseur des sols qui composent les bassins est simplifiée à seulement 2 classes. Néanmoins, cette simplification repose sur des données fiables d'occupation du sol, ainsi que sur les données d'épaisseur du sol disponible.

Dans la perspective d'améliorer ce travail, il serait utile de mesurer à plusieurs endroits l'épaisseur du sol. Il faudrait également affiner les classes d'épaisseur de sol en fonction de la végétation. Par exemple, les surfaces identifiées comme « lande et formation herbacée » sur la *BD Forêt_v2* correspondent à des affleurements de pélite donc une épaisseur de sol de 0 à 2cm.

III-1.4.2 Expérience pour estimer la capacité de rétention en eau des sols

Compte tenu de l'absence de données disponibles et de la forte variabilité dans la capacité de rétention en eau des sols, il a été jugé nécessaire d'avoir une approche locale, en étudiant des échantillons de sols prélevés sur le terrain. Pour résumer cette approche :

- Une première **phase sur SIG** a consisté à superposer la carte géologique à celle de la végétation (BD_Forêt_v2). De manière simplifiée, le sol est la combinaison de l'altération de la roche mère et de la dégradation de la matière organique, principalement végétale. Ainsi, les différentes combinaisons Géologie/Végétation ont été repérées, car théoriquement chacune de ces combinaisons donnent un sol différent. ([Annexe 6](#))
- Une deuxième **phase terrain** a consisté à recueillir des échantillons de sol pour différentes combinaisons géologie/végétation. Pour chaque point d'échantillonnage, deux prélèvements de sol sont réalisés. Chaque point de prélèvement est géolocalisé et une description brève de la végétation et de l'aspect du sol est faite ([Annexe 7](#)). En tout, 8 points d'échantillonnage donc 16 prélèvements ont été réalisés, le 23 décembre 2020.
Le prélèvement se fait à l'aide d'une pelle à main pour mettre le sol dans un sac de congélation zippé. Le sol est prélevé sur une surface d'environ 10 cm² sur la profondeur maximale atteignable avec cet outil. La profondeur de prélèvement est contrainte par la présence de la roche-mère ou de caillou ou encore par la densité du réseau racinaire.
- Une troisième **phase d'expérimentation** a consisté en deux expériences maison. Les 16 prélèvements de sol sont pesés. Puis, les prélèvements sont séparés en 2 groupes pour avoir un prélèvement de chaque point d'échantillonnage par groupe ; Autrement dit le groupe 1 : (p1 ,p2, p3, p4, p5, p6, p7, p8) et le groupe 2 (p1bis, p2bis, p3bis ...p8bis). ([Fig.14](#))

→Expérimentation n°1 : Le test de texture

Ce test sert à connaître la proportion de sable, limon-argile et matière organique dans chaque échantillon de sol. A partir de la texture du sol, il est possible d'estimer la capacité de rétention en eau du sol. Pour cela, chaque prélèvement du groupe 1 est versé dans un bocal hermétique, qui est ensuite rempli d'eau et secoué énergiquement, puis la solution est laissée décanter. Après 4 jours de décantation, une ségrégation granulométrique s'est produite, avec les particules les plus grossières (graviers, sables) au fond du bocal, les particules plus fines (limon-argile) au-dessus et la matière organique en suspension. Il reste à mesurer l'épaisseur de chaque dépôt selon sa catégorie granulométrique, puis de le rapporter à l'épaisseur totale du dépôt pour connaître la teneur de sable, argile et matière organique. Une fois les teneurs connues, il ne reste plus qu'à appliquer la formule suivante :

$$W330 = 257,6 - (2 \times Sa) + (3,6 \times Ar) + (29,9 \times MO)$$
$$W15000 = 26 + (5 \times Ar) + (15,8 \times MO)$$

avec :

- W330 teneur en eau à -330 hPa (en mm/m)
- W15000 teneur en eau à -15 000 hPa (en mm/m)
- Ar : teneur en argile (en %)
- Sa : teneur en sable (en %)
- MO : teneur en matière organique (en %)

Équation 1 : Cette équation repose sur la texture du sol. W330 correspond à la capacité de stockage en eau du sol.

W 11500 correspond à la quantité d'eau du sol à partir de laquelle la végétation ne parvient plus à prélever de l'eau.

→Expérimentation n°2 : Evaluer la capacité de stockage du sol par pesée

Ces tests consistent à mesurer l'humidité que peut contenir les échantillons de sol en les pesant après chauffage puis rinçage. En effet, selon la nature du sol sa capacité à retenir de l'eau est très différente. Ainsi, un sol argileux peut contenir près de la moitié de son poids en eau alors qu'un sol sableux retient peu d'eau. Pour mettre en avant ces différences et surtout les quantifier, les prélèvements du groupe2 sont chauffés dans une poêle durant 25 minutes environ, puis pesés. On considère qu'après 25 minutes la quantité d'eau restante est dérisoire, ou tout du moins inférieure à ce qu'elle peut être durant les périodes de forte sécheresse. Ensuite les sols sont rincés abondamment à l'eau et pesés à intervalles de temps régulier (3h / 12h / 24h).



Ces expérimentations présentent **des limites**. Le test du bocal est difficile à interpréter, car la ségrégation granulométrique après décantation ne forme par des couches nettes et régulières ; de plus il est difficile de distinguer les différentes couches granulométriques à travers le bocal. Malgré ces difficultés la teneur en argile, sable et matière organique a été calculée mais de manière assez incertaine.

Pour l'expérimentations n°2, les mesures de poids ne sont pas complètes car 2 échantillons ont été perdus suite à des erreurs de manipulation.

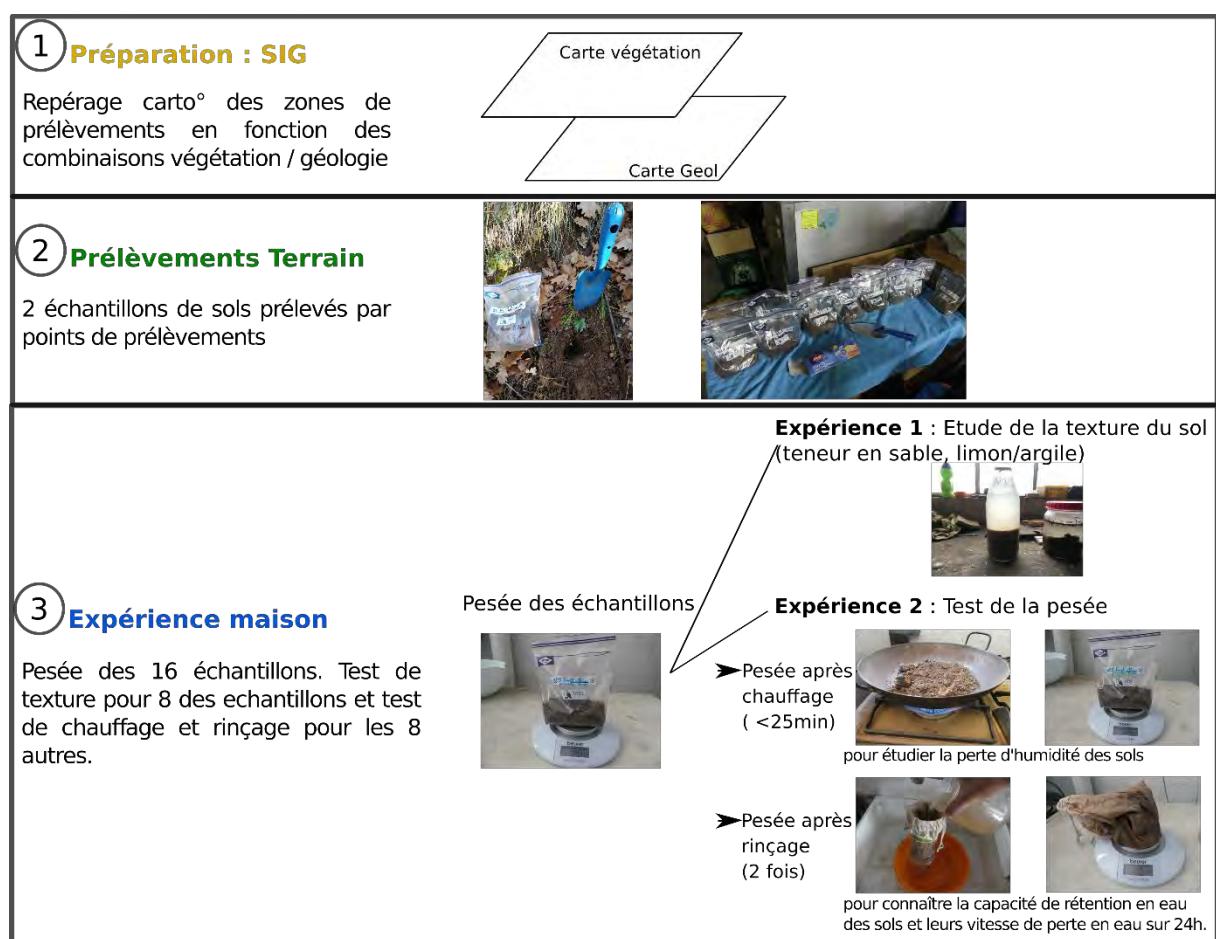


Figure 14 : Synthèse schématique de la méthode suivie pour étudier le sol.

Cette partie présentait le travail de traitement et de mise en forme des données utiles à l'estimation du bilan hydrologique.

La partie suivante décrit la méthode appliquée pour estimer chaque terme du bilan hydrologique.

III-2 Calcul des termes qui composent le bilan hydrologique

Résumé :

Cette partie présente les données, formules, traitements et stratagèmes utilisés pour estimer les différents termes du bilan hydrologique que sont :

- **les précipitations** (moyenne pondérée de différentes données : Météo France, Drias, Scampéi, Biblio)
- **les coefficients de ruissellement** à partir d'un module prenant en compte plusieurs paramètres permettant d'adapter le calcul aux spécificités de chaque bassin
- **L'évapotranspiration** estimée par des formules donnant des résultats jugés peu fiables donc délaissés au profit de cartes d'ETR (EvapoTranspiration Réel) produites par le BRGM. Ces résultats sont pondérés par l'occupation forestière qui influence positivement l'évapotranspiration.
- **les variations de stock d'eau dans le sol et sous-sol** sont difficilement quantifiables à partir des vagues connaissances sur les propriétés des roches. Face à ces difficultés, une approche alternative a consisté à estimer l'infiltration minimale à partir des volumes de prélèvement au point de captage.

III-2.1 Les Précipitations

III-2.1.1 Précipitations pluvieuses

Les précipitations sont la valeur d'entrée du bilan hydrologique. C'est une donnée essentielle, car c'est à partir des valeurs de précipitations qu'est déduite la part d'eau qui ruisselle, s'infiltra et s'évapotranspire. Les stations météo sont assez éloignées du secteur d'étude, pour pallier ce manque de données in situ les précipitations ont été estimées par différentes méthodes :

- La première méthode pour estimer le volume de précipitations consiste à regarder les **valeurs climatologiques des stations météo** les plus proches. Ces stations sont celles d'Ascros (1173m) et de Guillaumes (790m). On entend par valeur climatologique des moyennes sur 30 années de relevé météo. ([Info climat, 2021](#))
- La seconde méthode consiste à trouver des **études climatologiques déjà réalisées**. La donnée la plus intéressante est la carte des précipitations moyennes annuelles de la période 1967-1996 dans les Alpes Maritimes ([Chamoux, 1998](#)) ([Annexe 8](#)).
- La dernière méthode s'appuie sur les données de projection des modèles climatiques. Les précipitations moyennes sur 30 ans ont été mesurées grâce aux **données de référence de différents modèles climatiques** d'après les [scénarios du GIEC](#) du rapport 2001 et 2007. Ces données sont accessibles sur la [plateforme Scampéi](#). Puis les mêmes traitements

ont été réalisés à partir des données du modèle ALADIN-CNRM¹ pour les scénarios issus du dernier rapport du GIEC (RCP). Ces données sont accessibles via la [plateforme du Drias](#). Pour obtenir une valeur de précipitation moyenne sur un an, il faut sommer les valeurs de précipitation journalière sur les 30 années de référence, puis diviser ce résultat par 30 pour arriver aux précipitations annuelles.

$$\text{Précipitation annuelle moyenne} = \frac{\sum \text{précipitation journalière}}{\text{nombre d'années}}$$

La valeur de précipitation moyenne annuelle retenue pour l'étude du bilan hydrologique est calculée en faisant la moyenne des valeurs obtenues par les différentes méthodes présentées précédemment.

III-2.1.2 Précipitations neigeuses

Les précipitations neigeuses et pluvieuses sont étudiées de manière distincte car leur comportement est bien différent.

- Les précipitations neigeuses sont elles aussi obtenues à partir des modèles climatiques.
- Grâce au travail bibliographique, une donnée extrêmement ponctuelle et locale a également été recueillie dans le rapport de « Délimitation des périmètres de protection des captages de la Fuont de l'Oule » sur la commune de Beuil ([JP. Ivaldi, 1998](#)). ([Annexe 9](#))

Concrètement les données issues des projections des modèles climatiques se présentent sous la forme de tableau Excel. Les colonnes correspondent aux différents scénarios et les lignes aux valeurs journalières. Ainsi, chaque case est une valeur journalière de précipitation pour un scénario et un modèle climatique. Ce tableau présente des projections sur au moins 30 années. Le tableau se compose donc au minimum de 30 X 365 soit 10950 lignes.

Les résultats obtenus par ces différentes méthodes sont présentés dans la partie résultats.

¹Les données les plus fiables sont issues du modèle numérique [ALADIN](#). Depuis le début des années 2000, ALADIN est utilisé au CNRM comme **Modèle Régional de Climat**. ALADIN permet d'explorer la **représentation du climat et du changement climatique à plus fine échelle**.

III-2.2 Le coefficient de ruissellement

Il existe de nombreux tableaux de coefficient de ruissellement attribuant à différents types d'occupation du sol un coefficient de ruissellement. Parfois le critère pente est ajouté au critère d'occupation du sol. Néanmoins, très peu de modèles calculent le coefficient de ruissellement de manière précise.

Le modèle le plus complet trouvé prend en compte 5 facteurs (nature du terrain, superficie et indice de compacité du bassin, pente moyenne, intensité moyenne des averses, occupation du sol et saison) (Tbl.11). Ces critères sont associés à un coefficient ; pour connaître le coefficient de ruissellement, il faut additionner les coefficients associés à chaque facteur (DDTM34, 2014).

Tableau 11 : Modèle choisi pour calculer le coefficient de ruissellement (DDTM34, 2014).

Nature du terrain	Terrain sableux perméable (été)	Terrain perméable non saturé	Terrain peu perméable non saturé ou perméable moyennement saturé	Terrain imperméable ou saturé (hiver)			
Coefficient	0.65	0.75	0.85	0.95			
Superficie du bassin versant	$A > 1000 \text{ km}^2$	$1000 \text{ km}^2 > A > 50 \text{ km}^2$		$50 \text{ km}^2 > A$			
		Kc > 2	Kc < 2	Kc > 2			
Coefficient	0.85	0.9	0.95	0.95			
Pente moyenne	$I < 1\%$	$1\% < I < 10\%$	$10\% < I$				
Coefficient	0.8	0.9	1				
Intensité de l'averse	$i < 15 \text{ mm/h}$	$15 \text{ mm/h} < i < 40 \text{ mm/h}$	$i > 40 \text{ mm/h}$				
Coefficient	0.7	0.8	0.9				
Cultures		Forêt dense	Boisé et cultivé	Cultures à forte demande en eau	Cultures à faible demande en eau	Végétation maigre et clairsemée	Sol dénudé
Coefficient	été	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.95
	hiver	0.6	0.7	0.85		0.95	1

Kc = indice de compacité de Gravelius

Parmi ces facteurs d'influence, la moitié varie en fonction du bassin étudié (Occupation du sol, Superficie et Compacité, Pente moyenne), les autres facteurs sont inchangés pour tous les bassins étudiés (Intensité averses, Nature du terrain, Saison).

A l'intérieur même d'un bassin, le ruissellement n'est pas uniforme sur toute sa surface. L'occupation du sol influence beaucoup le ruissellement. Ainsi pour cette étude l'occupation du sol des bassins est divisée en 3 types d'occupation du sol :

- Forêt dense
- Végétation maigre et clairsemée
- Sol dénudé

Pour connaître la superficie que représentent ces 3 classes d'occupation du sol par bassin, ces 3 classes ont été associées à la BD_Forêt_v2. Après analyse les classes d'occupation du sol ont été regroupées de la manière suivante ([Tbl.12](#)).

Tableau 12 : Mise en relation des classes de la BD_Forêt_v2 avec les 3 classes imposées par le modèle de calcul du coefficient de ruissellement.

Classes pour le calcul du coef de ruissellement	Classes de la BD_forêt_v2
Forêt dense	Forêt fermée feuillus
	Forêt fermée feuillus
	Forêt fermée feuillus
	Forêt fermée conifères
	Forêt fermée mixte
	Forêt fermée mixte
	Forêt ferme non compté
Végétation maigre et clairsemée	Forêt ouverte feuillus
	Forêt ouverte conifères
	Forêt ouverte mixte
Sol dénudé	Lande
	Formation herbacée

Il peut sembler étonnant d'associer la classe « Sol dénudé » avec les classes « landes » et « Formation herbacée », mais ces 2 dernières classes correspondent sur le terrain aux affleurements de pélite qui constituent bel et bien une surface de « sol dénudé ».

Le coefficient de ruissellement est calculé pour chacune de ces classes, puis pondéré par la part qu'elle occupe dans la superficie de chaque bassin.

Chaque bassin est associé à un coefficient de ruissellement qui est obtenu en faisant la moyenne pondérée des 3 coefficients de ruissellement obtenus.

Formule :

$$C_{eq} = \frac{\sum C_i * A_i}{A}$$

C_{eq} = coefficient de ruissellement du bassin

C_i = coefficient de ruissellement pour la surface A_i

A = surface totale du bassin

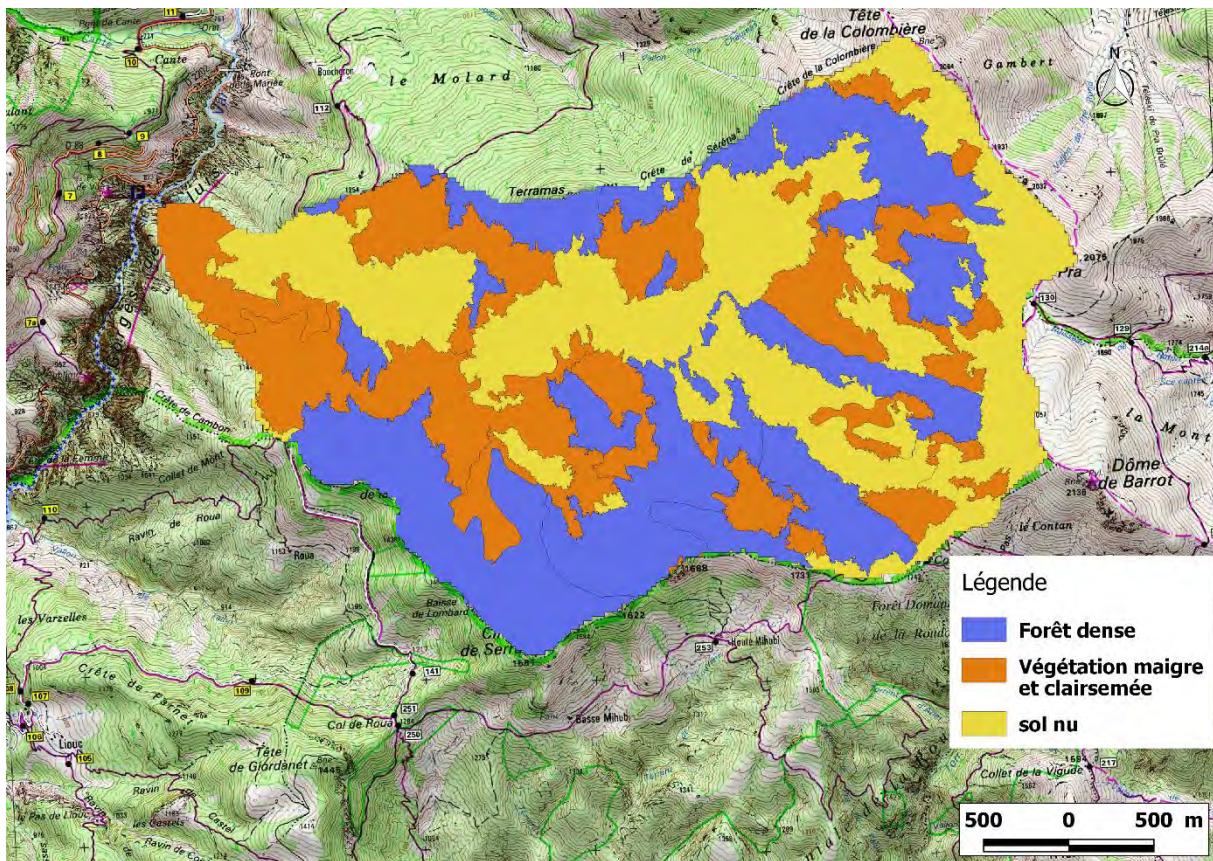


Figure 15 : Simplification en 3 classes de l'occupation du sol afin d'estimer le coefficient de ruissellement pour chacune de ces 3 classes. Cette illustration montre le bassin d'Amen mais ce travail a également été fait sur les 3 autres bassins.

Les résultats obtenus par cette méthode sont comparés avec les nombreux tableaux donnant des valeurs de coefficient ruissellement en fonction de la pente et de l'occupation du sol.

Une rapide comparaison semble indiquer une petite sous-évaluation du ruissellement par cette première méthode. Ainsi, il peut être envisagé de prendre en compte les valeurs trouvées dans les tableaux donnant des coefficients de ruissellement (Tbl.13).

Type de sol	Pente [%]	Coefficient de ruissellement C_r		
		Forêts	Prés et champs	Terrains nus
Fort taux d'infiltration Sols légers et léger-macro	1	0.01	0.02	0.13
	4	0.04	0.07	0.23
	10	0.07	0.13	0.34
	30	0.13	0.25	0.55
	50	0.17	0.33	0.69
Taux d'infiltration moyen Sols moyens	1	0.04	0.07	0.16
	4	0.12	0.16	0.28
	10	0.21	0.28	0.41
	30	0.39	0.48	0.66
	50	0.51	0.62	0.83
Faible taux d'infiltration Sols lourds	1	0.09	0.15	0.18
	4	0.19	0.25	0.32
	10	0.31	0.37	0.48
	30	0.51	0.60	0.70
	50	0.65	0.76	0.90

Tableau 13 : Valeurs de coefficient de ruissellement selon la pente, la nature et la couverture du sol. (Bussard, 2005).

III-2.3 L'évapotranspiration

Des valeurs d'évapotranspiration ont été obtenues grâce à des formules et grâce à la bibliographie. Compte tenu de l'absence de station météo à proximité du secteur d'étude, l'ETP a été estimée à l'aide de deux formules requérant peu de données en entrée. L'ETP a été estimé par la formule de Thornthwaite et de Turc.

Formule de Thornthwaite

$$ETP(m) = 16 * \left[\frac{10 * \bar{T}(m)}{I} \right]^a * F(m, \phi)$$

Avec:

- ETP(m) : l'évapotranspiration moyenne du mois m (m = 1 à 12) en mm,
- \bar{T} : moyenne interannuelle des températures du mois, °C
- a : $0.016 * I + 0.5$
- I indice thermique annuel :

$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m) \quad i(m) = \left[\frac{\bar{T}(m)}{5} \right]^{1.514}$$

- $F(m, \phi)$: facteur correctif fonction du mois (m) et de la latitude:

Formule de Turc

$$ETP (\text{mm/ mois}) = K (Iga + 50) t/(t + 15)$$

Avec :

- k = 0,37 pour février k = 0,40 pour les autres mois
- t : température moyenne mensuelle
- Iga : radiation globale solaire mesurée ou calculée par :
 $Iga = Io(0.18 + 0.62 h/H)$
- h : durée **d'insolation effective**
- Io : radiation maximale théorique
- Io et H sont donnés par des tables en fonction de la latitude.
(SOGREAH, 1994)

La formule de Thornthwaite requiert des données de température moyenne mensuelle. Ces données ont été obtenues en faisant la moyenne des moyennes climatologiques des températures sur Guillaumes (790m) et Ascros (1173m).

Pour la formule de Turc la durée d'insolation effective a été obtenue en faisant la moyenne des données d'ensoleillement de la Commune de Valberg et de Mougins.

Le résultat le plus intéressant de la recherche bibliographique sur l'évapotranspiration a été trouvé dans des cartes de France réalisées par le BRGM séparant la France par des isochrones en plusieurs classes d'ETP (Evapotranspiration Potentielle) et d'ETR (Evapotranspiration Réel). L'ETP et l'ETR sont estimés selon 3 formules différentes (Thornthwaite, Turc et Pennan) ([Annexe 10](#)). Le résultat est donné dans 3 cartes d'ETR et 3 cartes d'ETP, il suffit de faire la moyenne des résultats obtenus par les différentes méthodes.

A partir d'un coefficient de végétalisation, il est possible d'ajuster l'estimation de l'ETR en fonction de la couverture végétale de chaque bassin ([Zhang ; 2001](#)).

- « w » correspond au coef de végétalisation qui varie de 0.5 à 2.
- « ET » est l'évapotranspiration réelles. « E_0 » est l'évapotranspiration potentielle.

$$\frac{ET}{P} = \frac{1 + w \frac{E_0}{P}}{1 + w \frac{E_0}{P} + \left(\frac{E_0}{P} \right)^{-1}},$$

III-2.4 Stock & Variation de l'eau dans le sol et le sous-sol

Déduire l'infiltration à partir des mesures de débit des points de captage souterrain

L'estimation de l'infiltration à partir des propriétés des roches s'est avérée impossible compte tenu des données très imprécises de volume et de perméabilité des roches. C'est pourquoi une autre approche a été tentée qui s'appuie sur des données disponibles et concrètes.

Ces données sont les mesures de prélèvement d'eau depuis les captages souterrain (BNPE).

En abordant les choses par cet angle il est possible d'avoir une idée de la quantité d'eau qui s'infiltra et qui résume par unité de surface. En effet, toute l'eau qui résume des points de captage s'est forcément infiltrée. De plus, il est évident que le volume qui s'infiltra est plus important que le volume qui résume. Ainsi, les mesures au point de captage permettent de connaître le volume minimum d'infiltration voire l'infiltration réelle si la totalité de l'eau qui s'infiltra → résume.

Ce problème peut être difficile à appréhender car il combine la dimension spatiale et temporelle.

Concernant l'aspect temporel, c'est simple, le bilan hydrologique étant mesuré sur 1 année, le reste des calculs repose aussi sur cette période de 1 an.

Ainsi le volume annuel total d'eau qui sort des sources est calculé à partir du débit moyen des sources, ce volume est comparé au volume d'eau total précipité sur une année calculé grâce aux précipitations annuelles moyennes.

Reste l'**aspect spatial** qui induit des approximations. Pour comparer des volumes d'eau entrée (pluies) et sortie (source) il faut que la surface qui reçoit l'eau de pluie soit égale à la surface qui alimente les sources. Le périmètre qui alimente les sources est appelé bassin d'alimentation (impluvium). Le bassin d'alimentation est estimé comme étant égal au bassin versant de surface. Cette simplification serait aberrante dans un massif très karstifié, mais dans le cas présent, cette simplification ne semble pas absurde.

Estimation de la part des précipitations qui ressort par les captages :

A l'échelle du massif du Dôme de Barrot :

La BNPE (Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau) recueille les données relatives aux prélèvements sur la ressource en eau. Cette base de données donne une idée de la quantité d'eau prélevée en souterrain. Bien sûr, de nombreuses sources s'écoulent sans être captées et d'autres sources sont captées, mais ne sont pas renseignées à la BNPE. Ainsi les données de la BNPE sont partielles ([Annexe 11](#)).

Elles permettent néanmoins d'obtenir un ordre de grandeur. Ainsi d'après la BNPE le volume capté en 2018 par les 38 captages d'eau souterraine situés dans le massif du dôme de barrot représente environ 1 500 000 m³. En rapportant ce volume d'eau capté à la superficie du massif du Dôme du Barrot, cela équivaut de 5 à 8 litres d'eau par mètre carré et par an. La part d'eau prélevée par captage souterrain représente 0.5% - 1% de l'eau précipitée sur une année.

Formule :

$$\text{Volume resurgence/an/m}^2 = \frac{\text{Volume annuel du captage}}{\text{Surface du bassin d'alimentation}}$$

$$\text{Part des précipitations annuelles prélevées par captage} = \frac{\text{Volume resurgence}}{\text{Volume précipité}}$$

A l'échelle des 10 points de captage dont la localisation est connue (Annexe 12)

Le bassin d'alimentation des points de captage a été estimé comme équivalent au bassin versant de surface. Le volume d'eau capté par année est rapporté à la superficie du bassin d'alimentation de chaque point de captage, ce calcul donne le volume d'eau capté par mètre carré et par an. Etant donné que le volume précipité par mètre carré et par an est connu (1050mm/an) il suffit de diviser le volume précipité/m²/an par le volume capté/m²/an pour connaître la part des précipitations qui sont captées.

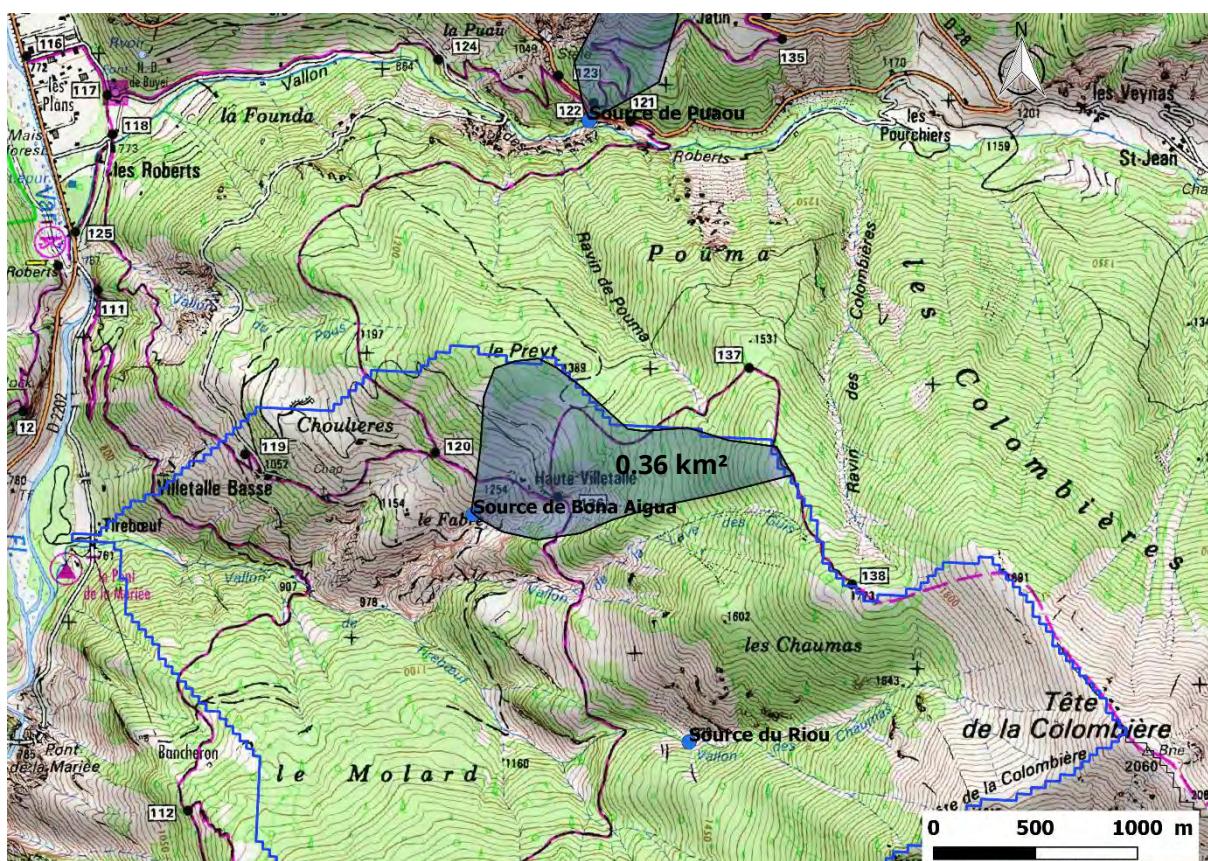


Figure 16 : Les points bleus sont des sources, le polygone à fond bleu au centre de la carte correspond au bassin d'alimentation estimé de la source de Bona Aigua. Le débit de la source est rapporté à la superficie de son bassin d'alimentation pour estimer le part des précipitations qui ressurgit par cette source. Cette méthode a été appliquée pour 8 autres sources pour avoir une idée approximative de l'infiltration.

Conclusion

Les quatre paragraphes suivants reprennent chacun des termes qui composent le bilan hydrologique :

- Face à l'absence de données in situ permettant de connaître précisément les quantités de précipitations, celles-ci ont été estimées en compilant différentes sources données. (Météo France, projection climatique, bibliographie).
- Le coefficient de ruissellement est estimé à partir d'un module prenant en compte plusieurs variables (Nature du terrain, superficie & compacité du bassin, Pente moyenne, Intensité averse, Occupation du sol). L'étude de la morphométrie et de l'occupation du sol s'avère donc indispensable à l'estimation du ruissellement.
- L'évapotranspiration a d'abord été estimée grâce aux formules de Turc et Thornthwaite à partir des rares données disponibles qui sont malheureusement assez éloignées du site d'étude. Des cartes de l'ETR calculée par le BRGM suivant plusieurs méthodes semblent donner des valeurs plus fiables.
- Le manque d'informations sur les propriétés des roches empêche de déduire les variations de stock d'eau du sol et sous-sol. Mais il est possible d'induire l'infiltration minimum à partir des mesures de prélèvement d'eau au point de captage connus.

IV RESULTATS : LE BILAN HYDROLOGIQUE

Résumé :

Les précipitations pluvieuses annuelles moyennes sont d'environ 1050mm sur la totalité du secteur d'étude. Étant donné que les bassins s'étendent entre 650 et 2140 mètres d'altitude, une partie des précipitations tombe sous forme solide. Les données météo sur les précipitations neigeuses sont inexistantes. Mais, d'après les modèles climatiques régionaux ainsi que des mesures ponctuelles sur la commune de Beuil, il tomberait environ 135mm² de précipitations solides. Soit près de 90% des précipitations tombent sous forme liquide (pluie) et environ 10% sous forme solide (neige).

Pour les 4 bassins étudiés, entre 40% et 60% des précipitations ruissellent jusqu'au Var. Le ruissellement est remarquablement important car les pentes sont fortes sur tous les bassins ; mais particulièrement sur les bassins d'Amen et du Talon où les affleurements de pélite fournissent une zone lisse et quasi imperméable où l'eau s'écoule très rapidement.

L'évapotranspiration représente environ 50% des précipitations d'après les formules théoriques (Thornthwaite, Turc et Penman) pondéré par la couverture végétale.

Pour récapituler, sur 1050 mm de précipitations, environ 50% ruissellent et 50% s'évapotranspirent ; *N'y a-t-il donc aucune infiltration ?*

L'étude du débit des sources montre pourtant que les captages d'eau souterraine prélèvent annuellement l'équivalent de 0.5% à 2.5% des précipitations annuelles. Étant donné que l'eau captée est loin de représenter la totalité des eaux souterraines, il est évident que les infiltrations dépassent les 0.5% à 2.5%. L'explication la plus probable est que l'alimentation des eaux souterraines se fait surtout via les précipitations neigeuses. Or, les précipitations neigeuses ne sont ni prises en compte dans l'évapotranspiration ni dans le calcul du coefficient de ruissellement. Cette mauvaise prise en compte des précipitations neigeuses amène à surestimer le ruissellement et l'évapotranspiration tandis que l'infiltration est sous-estimée. Ainsi, une meilleure prise en compte de la neige dans le bilan hydrologique serait à l'avantage des infiltrations. **De ce point de vue, le changement climatique est très préoccupant, car il risque de réduire fortement les précipitations neigeuses (Annexe 13). Si, comme le montrent ces résultats, l'alimentation des réserves en eau souterraine dépend fortement des précipitations neigeuses alors la raréfaction de la neige risque de mettre en péril l'alimentation des captages et réduire les débits d'étiage. Une diminution des débits d'étiage aurait bien évidemment des conséquences sur tous les écosystèmes aquatiques et ripisylves.**

Abordons maintenant point par point les valeurs obtenues pour les différents termes qui composent l'équation du bilan hydrologique.

² Equivalent eau liquide (mm)



IV-1 Précipitations

Les précipitations pluvieuses sont estimées à 1050 mm par an.

Comme évoqué dans la partie méthode, cette valeur a été calculée en croisant plusieurs sources.

Tableau 14 : Compilation des sources et valeurs utilisées pour obtenir les précipitations pluvieuses annuelles moyennes.

Sources des données de précipitations pluvieuses	Précipitations pluvieuses annuelles moyennes (mm)
Climatologie Météo France : - Guillaumes (790m / 1981-2010) - Ascros (1173m / 1981-2010)	910 890
Bibliographie : Carte d'interpolation des précipitations (Chamoux, 1998)	950 à 1200
Modèle climatique (années de référence) : - Scampei (GIEC 2001 – 2007) - Drias (GIEC 2014)	1070 1040

Les précipitations neigeuses représentent environ 135mm. Cette valeur vient des données de modèles climatiques qui ont été comparées à des mesures empiriques sur la commune de Beuil.

Tableau 15 : Compilation des sources et valeurs utilisées pour obtenir les précipitations neigeuses annuelles moyennes.

Sources des données de précipitation neigeuse	Précipitation neigeuse annuelle moyenne (équivalent en mm d'eau liquide)
Modèle climatique (années de référence) : - Scampei (GIEC 2001 – 2007) - Drias (GIEC 2014)	88 149
Mesure empirique Beuil (1600m) hiver 1997-1998 (Ivaldi, 1998)	170

Les précipitations sont les données d'entrée, on s'intéresse ensuite au devenir de l'eau précipitée.



IV-2 Ruissellement

Le ruissellement est important sur les bassins d'étude car les pentes sont fortes, les sols sont peu épais voire inexistant et même imperméables sur certains bassins où la pélite affleure ; autant de caractéristiques qui font du bassin d'Amen et du Talon des zones particulièrement propices au ruissellement. Le ruissellement a été estimé par 2 méthodes. La première méthode s'adapte à chaque bassin en prenant en compte plusieurs paramètres ; mais cette méthode semble sous-estimer le ruissellement réel. La seconde méthode prend en compte les deux paramètres essentiels (pente et type d'occupation du sol).

Tableau 16 : résultats des coefficients de ruissellement par bassin versant.

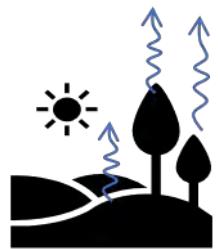
Résultat Coefficient de ruissellement (Ruissellement/Précipitation)				
	Amen	Talon	Tireboeuf	Chaudan
Methode 1	0,50	0,48	0,38	0,36
Methode 2	0,66	0,64	0,55	0,54
Moyenne Méthode	0,58	0,56	0,46	0,45

Le constat est clair ; le ruissellement est particulièrement élevé dans ces bassins. Malheureusement la comparaison à d'autres bassins est compliquée car la plupart des données disponibles concernent des coefficients de ruissellement instantanés à l'échelle d'un événement pluvieux intense et non une moyenne annuelle. Voici les rares données de comparaison trouvée : le coefficient d'écoulement annuel moyen de la Loire est de 0.32. Pour un petit bassin-versant ce coefficient se situe généralement autour de 0.36 à 0.40 ([M. Guigo, 1975](#)).

La comparaison avec d'autres bassins est difficile, mais les fortes pentes et la présence d'affleurements de pélite entraînent forcément un ruissellement remarquable. D'ailleurs, le bassin d'Amen est propice aux crues soudaines qui ont déjà causé la mort de plusieurs canyoneurs.

Ces données de ruissellement s'appliquent bien aux précipitations liquides. Pour les précipitations solides les dynamiques ne sont pas les mêmes. Il convient donc d'estimer le bilan hydrologique pour les périodes de neige. Il est probable qu'une couverture neigeuse entraîne une infiltration plus importante et un ruissellement bien moindre que pour la pluie.

Pour l'instant aucun modèle neige n'a été trouvé pour estimer le bilan hydrologique pour les mois enneigés



IV-3 Evapotranspiration

Le volume d'eau qui est réémis dans l'atmosphère par la transpiration des plantes ou par sublimation et vaporisation est estimé à 550 mm/an ([BRGM](#)).

ETPotentielle

Tableau 17 : Résultats des valeurs d'ETP selon les méthodes utilisées.

Sources	Méthode	Valeur de l'ETP (mm)
BRGM, 1971	Thornthwaite	700 - 800
	Turc	950 - 1000
	Pennan	950
Calcul personnel	Thornthwaite	350
	Turc	850

ETRéelle

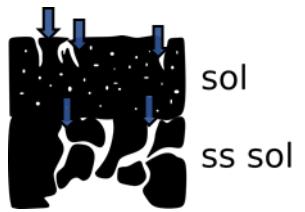
Tableau 18 : Résultats des valeurs d'ETR selon la méthode utilisée.

Sources	Méthode	Valeur de l'ETR (mm)
BRGM, 1971	Thornthwaite	500 - 550
	Turc	550 - 600

Mais ce résultat ne prend pas en compte les différences de végétation donc de sol entre les bassins d'étude. Or, la végétation a une importance non négligeable dans l'évapotranspiration. Ainsi, en climat tempéré, plus une surface est boisée plus l'évapotranspiration est importante ([Zhang, 2001](#)). Cela vient en grande partie des racines, car plus les racines plongent profond pour récupérer de l'eau, plus l'évapotranspiration est élevée. En pondérant l'ETR par un coefficient de végétalisation on obtient des valeurs d'évapotranspiration plus précises ([Tbl.19](#)).

Tableau 19 : Part des précipitations qui s'évapotranspirent par bassin-versant en prenant en compte la végétation.

	Amen	Talon	Tireboeuf	Chaudan
ETR/P	0.60	0.61	0.63	0.65



IV-4 Variation du stock d'eau

Cela prend en compte :

- Infiltration (Recharge)
- Résurgence naturelle ou captage (Vidanges et prélèvement)
- Stockage

IV-4.1 Infiltration et Résurgence Δ (les flux)

Le volume d'eau souterrain capté de manière officielle représente entre 1% et 3% des précipitations totales. Cela signifie qu'au moins 1% à 3% des précipitations s'infiltraient dans le sol pour ressurgir plus tard par les points de captage. Il est évident qu'une part importante des eaux de source ne sont ni captées, ni mesurées. Ainsi, le volume d'eau qui s'infiltra est bien supérieur aux données obtenues. La donnée obtenue permet d'avoir une valeur plancher pour l'infiltration. Le BRGM estime que dans les régions à faible infiltration le coefficient d'infiltration est de 0.3. Jean pierre Ivaldi qui a travaillé dans le secteur du Dôme de Barrot estime que le coefficient est de 0.2 ([Ivaldi, 1998](#)). Mais compte tenu de la forte raideur des pentes moyennes (48% à 55%), la quasi-totalité des précipitations sous forme liquide ruisselle rapidement en conséquence l'infiltration est jugée négligeable par le BRGM ([BRGM, 2007](#)).

Ainsi, il est probable que l'eau qui s'infiltra provienne en grande partie des précipitations neigeuses, qui en fondant progressivement ont le temps de s'infiltrer dans le sol. Cette couverture neigeuse contribue certainement en grande partie à la recharge souterraine. **Cela pose la question du changement climatique qui risque d'entrainer d'ici 2030 une baisse de 30% à 42% des précipitations neigeuses selon les scénarios du GIEC (RCP2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). Dans le futur « lointain » (2060-2100) les précipitations solides risquent de diminuer de 60% à 80% en moyenne sur l'année. (Données Régionales_ALADIN_CNRM). La baisse des précipitations neigeuses pourrait avoir des conséquences préoccupantes sur les eaux souterraines qui garantissent un débit d'étiage durant les périodes de sécheresse et alimentent certaines communes en eau potable ou irrigation.**

Le rôle important des précipitations neigeuses dans la recharge des aquifères des secteurs pentus reste hypothétique. Si cette hypothèse se confirme, la recharge en eau sera diminuée dans les bassins d'études qui sont particulièrement raides ; mais, pas forcément dans la totalité du massif qui présente des surfaces moins raides donc plus propices à l'infiltration par les précipitations pluvieuses. En effet, les modèles prévoient une diminution de la neige, mais pas des précipitations pluvieuses, qui ont même tendance à légèrement augmenter. Ainsi, la part des infiltrations venant de la neige risque de diminuer, mais sera peut-être compensé par une augmentation des précipitations liquides. Une diminution du volume de neige ne bouleversera donc pas forcément le régime hydrologique ou la ressource en AEP (Alimentation en eau potable).

IV-4.1.1 Capacité de stockage de l'eau dans le sol et sous-sol (Stock)

IV-4.1.1.1 Le Sous-Sol

Si les valeurs de porosité des roches correspondent au vide pouvant accueillir de l'eau alors les bassins d'étude peuvent accueillir l'équivalent de 1 à 53 années de précipitations.

Tableau 20 : Nombre d'années de précipitations que les roches des différents bassins peuvent stocker en fonction de la porosité moyenne des roches.

Bassin versant	Surface (Km ²)	Volume de roche (m ³)	Volume d'eau stocké en équivalent années de précipitations (année)	
			Porosité minimale (2.6%)	Porosité maximale (17.4%)
Amen	11	913 919 491	2	14
Talon	3.44	124 081 568	1	6
Tireboeuf	5	1 614 078 865	8	53

Le volume d'eau pouvant être stocké dans les roches est probablement sous-évalué, car le volume de roche a été plutôt sous-évalué.

Les formations rocheuses qui composent chacun des bassins peuvent théoriquement contenir des quantités impressionnantes d'eau. Une bonne partie de l'eau souterraine est probablement stockée dans des microfissures ou bien retenue par capillarité ; cette eau est probablement piégée dans la roche et ne participe pas directement à l'alimentation des sources. La majorité de l'eau stockée dans les roches l'est à tout petite échelle et il n'est pas correct de s'imaginer de grands lacs souterrains. Ainsi pour une roche gorgée d'eau avec une porosité de 10%, la quantité d'eau contenue dans 100Kg de roche équivaut à 0.5 Litres. La réalisation de tests de porosité permettrait d'affiner les mesures.

IV-4.1.1.2 Le sol.

Des difficultés et approximations dans la réalisation des tests ont conduit à des résultats peu fiables. En conséquence les résultats présentés sont limités.

Les sols contenant le plus d'eau correspondent au prélèvement P2 et P3, car après avoir été chauffés, ils ont perdu 21% de leur masse initiale.

Compte tenu des résultats obtenus, il n'est pas possible d'ajuster aux caractéristiques de chaque bassin le calcul du volume d'eau stocké dans le sol. Ainsi, le résultat se limite à estimer un volume global d'eau stockée par unité de sol à l'échelle des 4 bassins d'études. Il ressort après avoir chauffé les échantillons de sols prélevés le 23 décembre 2020, qu'ils étaient composés de 14% d'eau en

moyenne. Ce résultat est à mettre en relation avec les pluies antécédentes et les autres variables météorologiques (température, vent, ensoleillement).

En comparant le poids des échantillons après chauffage et leur poids 24h après avoir été imbibés, il en ressort que le poids des échantillons a augmenté entre 16% et 41%, selon les sols. La capacité de rétention en eau des sols dépend donc de la nature de chaque sol. 24 heures après une forte averse les sols fins sur pélite peuvent contenir 24% de leur poids en eau. Le sol forestier (P5) peut contenir 41% de son poids en eau.

Tableau 21 : Résultats issus des pesées des échantillons de sol.

Description terrain	Echantillons	Expérimentation n°2 : Poids des échantillons et capacité de rétention en eau				
		Poids après prélèvement (23/12/20) (g)	Poids après chauffage (g)	% d'eau perdu	Poids 24h après trempage (g)	Tx de variation : Du poids après chauffage au poids 24h après trempage
Pélites et grès, sol fin sans végétation	P1	274			331	
	P1bis	422	388	-8%	510	+24%
	P2	513				
	P2bis	229	180	-21%		
Eboulis de grès, sol fin petite forêt de chêne,	P3	603			622	
	P3bis	320	253	-21%	330	+23%
	P4	494				
	P4bis	438	374	-15%		
Eboulis, sol forestier noir, forêt fermée de pins sylvestre	P5	303			445	
	P5bis	424	365	-14%	623	+41%
Cargneule, dolomie et gypse, sol <10cm, Forêt de pins	P6	462			521	
	P6bis	686	612	-11%	774	+21%
Eboulis, sol localement épais, lande arbustive	P7	243			264	
	P7bis	748	682	-9%	813	+16%
	P8	652				
	P9		273			
	P9bis	452	408	-10%		

Dans une situation imaginaire où les sols sont asséchés puis de fortes précipitations arrivent et détrempent les sols, alors 24h après la pluie le sol retient toujours 25% de son poids en eau, soit entre 4% et 7% des précipitations annuelles totales. Le tableau ci-dessous explicite ces valeurs par bassin :

Tableau 22 : Estimation de la capacité de rétention du sol.

	Amen	Talon	Tirebeouf	Chaudan
Surface des Bassins (Km ²)	11,25	3,44	5,02	4,05
Volume de pluie annuel (m ³ /ans)	11 812 500	3 612 000	5 271 000	4 252 500

Volume de sol total (m ³)	2 105 504	703 990	1 428 837	1 204 855
Volume d'eau contenu dans le sol 24h après le détrempage (m ³)	526 376	175 998	357 209	301 214
Part des précipitations annuelles absorbée par un sol sec	4%	5%	7%	7%

Sur le bassin d'Amen et du Talon le sol est moins épais, en conséquence sa capacité de rétention est moins importante que pour le bassin de Tirebœuf ou Chaudan.

Sur la durée, la capacité de rétention en eau des sols est variable. Selon les sols l'eau s'échappe plus ou moins rapidement et en plus ou moins grande quantité.

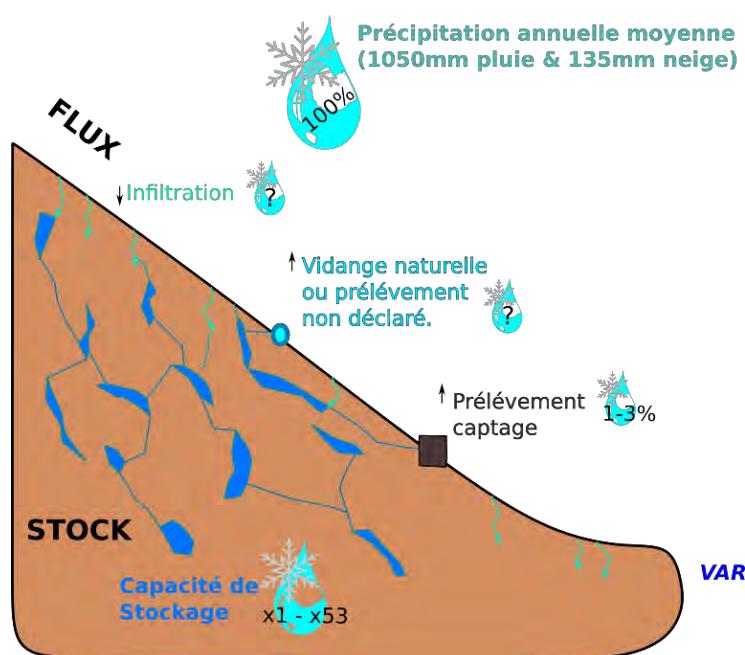


Figure 17 : Schéma montrant le parcours souterrain que peut suivre l'eau précipitée. Une partie de l'eau s'infiltra (certainement plus de 3% des précipitations s'infiltrent), une partie des infiltrations se vidange par les sources et une partie est captée (les captages officiels prélèvent entre 1 et 3% de l'eau précipitée). L'eau ne fait pas que passer, une partie est stockée dans les pores et fractures de la roche.

Tableau 23 Résultats compilé du bilan hydrologique

Bassins	Amen	Talon	Tireboeuf	Chaudan
Précipitation total (mm)	1050	1050	1050	1050
Ruisseaulement (%)	50-58%	48-56%	38-46%	36-45%
Evapotranspiration (%)	52-60%	52-61%	52-63%	52-65%
Δ Stock souterrain (%)	-18 à -2%	-17% à +0%	-9% à +10%	-10% à +12%

Le tableau ci-dessous compile les résultats du bilan hydrologique. Dans ces mesures les précipitations neigeuses ne sont pas prises en compte, car les formules utilisé pour estimer le ruissellement et l'évapotranspiration ne prennent pas en compte la neige. Pour le ruissellement l'amplitude des valeurs se situe entre :

Resultat méthode 1 – résultat méthode 1 pondéré par les données du tableau

Pour l'évapotranspiration le résultat est de 52% pour chaque bassin l'effet végétation n'est pas pris en compte la deuxième valeur prend en compte la part qu'occupe la forêt par bassin.

La variation de stock est estimée à partir des valeurs de ruissellement et d'évapotranspiration. C'est valeur ne sont pas réalistes.

V LIMITES, AMELIORATIONS ET PERSPECTIVES

Résumé

Les limites viennent du manque de données in-situ et des approximations faites dans les calculs du volume de roche et de sol. Les perspectives d'améliorations sont la mise en place de station météo et hydrologique pour avoir des données précises.

V-1 Limites

V-1.1 Limites des données

La limite principale est que la plupart des résultats ont été obtenus en traitant des données cartographiques. L'occupation du sol est calculée à distance par SIG à partir de la carte *BD_Foret_v2* ; il en est de même pour la géologie avec la carte du BRGM et du sol avec la carte du Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP). La qualité de ces cartes n'a pas systématiquement été vérifiée en les comparant aux observations terrain. Malgré tout, ces cartes sont faites de manière rigoureuse, il est donc probable qu'elles correspondent à la réalité du terrain.

Le manque de données in-situ contraint à l'utilisation de données et formules théoriques, par exemple, les formules d'évapotranspiration ou les équations pour estimer le ruissellement. Les données climatiques reposent en grande partie sur des données un peu éloignées du secteur d'étude ou des données de projection (modèle climatique). Peu de données in situ, un climat local complexe lié à ses influences montagnardes et méditerranéennes ainsi qu'à une multitude de micro climats aboutissent à des résultats pas forcément fiables et représentatifs de la complexité du secteur. Cette étude ne s'est accompagné d'aucun investissement en matériel hormis 3 pluviomètres. Afin de réaliser soit même des mesures et d'engranger de la donnée, des laboratoires et prestataire ont été contacté. Le laboratoire Géoazure a été contacté pour mesurer la porosité et la perméabilité du sol et des roches, malheureusement, il s'agit de prestations payantes qui nécessitent de se rendre soit même au labo, ce qui n'était pas possible compte tenu du contexte sanitaire. Le coût de location d'instruments de mesure hydrologique est très élevé, le rapport coût/avantage à conduit à renoncer, pour le moment, à ces mesures.

V-1.2 Limites des traitements

Les données utilisées présentent donc des limites, mais les traitements réalisés sur ces données sont eux aussi critiquables.

L'estimation du volume de roche est particulièrement problématique, car il repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices qui ne sont pas représentatives de la réalité. Par exemple, les couches géologiques ne se prolongent sûrement pas de manière tout à fait continue et régulière en

souterrain. Autre exemple, pour estimer le volume du sol il est trop approximatif de prendre seulement 2 catégories de sol comme cela a été fait, alors que la réalité est bien plus complexe. Une autre limite réside dans la difficulté de prendre en compte la neige dans le bilan hydrologique.

V-2 Améliorations

V-2.1 Végétation

La *BD-Forêt_v2* présente quelques manques. Ces lacunes représentent moins de 5% de la surface des bassins. Mais il serait intéressant de combler ces vides de données en se rendant sur le terrain pour déterminer la végétation en présence et la renseigner sur SIG.

V-2.2 Géologie

La prise en compte des roches qui occupent moins de 3% de chaque bassin serait une petite amélioration ; mais cela ne changerait pas beaucoup les résultats finaux compte tenu des énormes marges d'erreur (-50% à +100%).

Pour réduire cette marge d'erreur, une des solutions serait de faire des campagnes de repérage terrain permettant de vérifier la qualité de la carte géologique et d'affiner nos connaissances sur l'épaisseur des couches géologiques. Néanmoins la réalisation d'un modèle 3D nécessiterait de faire une centaine de carottages ce qui est irréalisable.

Le calcul de la surface de roche totale est bien évidemment très approximatif. Les simplifications consenties pour estimer ces surfaces totales sont importantes. Bien que la disposition des couches semble assez régulière, la bibliographie nous apprend que cet ensemble s'est déformée et plissée lors de l'orogenèse alpine ([Ivaldi, 1998](#)). Il convient donc de réfléchir à une autre méthode pour estimer la surface totale et plus généralement le volume total de roche. Il pourrait être intéressant de demander aux exploitants de carrière s'ils ont une méthode d'estimation du volume des roches.

Les surfaces d'éboulis, d'alluvions, de colluvions n'ont pas été prises en compte pour l'instant. Il faut impérativement les prendre en compte, car dans certains bassins ces surfaces sont majoritaires. De plus, les éboulis sont très poreux donc ils peuvent probablement stocker une grande quantité d'eau.

V-2.3 Sols

L'estimation du volume de sol peut être affiné en allant sur le terrain pour estimer l'épaisseur des grands types de sols, puis en associant plus précisément les types de sols à un type de végétation de la *BD_forêt_v2* pour avoir une surface précise. Des valeurs d'épaisseur terrain combinées à un nombre de classes de sols plus important permettraient d'avoir des données plus précises. Etablir une carte des sols en croisant carte géologique et carte végétative, puis affiner sur le terrain en ajoutant des informations d'épaisseur et de texture.

Les expérimentations sur le sol pourraient être faites de manière plus rigoureuse et protocolée.

V-2.4 Précipitations

Il faudrait connaitre le gradient de précipitation sur le secteur d'étude pour la pluie et la neige. Il est trop approximatif d'avoir une valeur de précipitation unique pour tous les bassins d'étude quel que soit l'altitude. Cela est particulièrement problématique pour la neige, car un bassin comme Amen pour lequel 32% de sa surface se situe au-dessus de 1500 mètres ne reçoit pas la même quantité de neige que le bassin de Chaudan ou du Talon pour lesquels moins de 4% de leur surface dépasse les 1500m.

V-2.5 Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement est mesuré à l'aide de formules théoriques au lieu d'être mesuré sur le terrain. Un des éléments importants de ce calcul est l'occupation du sol. Des tableaux indiquent le coefficient de ruissellement associé à des types d'occupation du sol, mais ces types de sol ne correspondent pas forcément à la réalité du terrain.

V-2.6 Evapotranspiration

Les valeurs d'évapotranspiration potentielle pourraient facilement être mesurées sur le terrain plutôt que de les estimer par des formules mathématiques. Il suffit pour cela d'installer sur la Réserve un récipient remplie d'une quantité d'eau connue puis de mesurer l'évaporation sur une années.

V-2.7 Variation stock d'eau du sol et sous-sol

Le volume de sol, le volume de roche, la perméabilité et la porosité des roches, toutes ces données sont extrêmement approximatives, elles donnent des ordres de grandeur. Cette approximation vient d'un manque de connaissances qui a conduit à faire des simplifications.

La réflexion autour du volume prélevé des points de captages est un peu simpliste. Pour estimer ce que représente les prélèvements d'eau par rapport aux précipitations, il a été défini que le bassin d'alimentation des sources était équivalent au bassin versant. Or nous n'avons aucune connaissance sur le bassin d'alimentation réel des sources.

Une piste de travail serait d'interpréter les analyses chimiques présentes dans les rapports de délimitation des points de captage pour essayer d'en déduire le type de milieux que l'eau traverse et son temps de transit.

L'estimation de tous les paramètres évoqués aurait pu être faite à l'échelle d'une maille de 200/200m comme suggéré par Laurent CAMERA mais cela aurait pris bien plus de temps et le risque de faire des erreurs aurait été plus important.

V-3 Perspectives

Beaucoup d'éléments ont été calculés de manière détournée et théorique faute de données in-situ. Pour acquérir des données précises in-situ des investissements s'imposent.

- Mettre en place une station météo :

Connaître les variables météorologiques locales permettrait d'estimer plus précisément :

- les précipitations pluvieuses et neigeuses réelles.
- le gradient altitudinal de précipitations.
- l'évapotranspiration.

A long terme, ces données pourront être mises en relation avec le changement climatique.

Cout : 1300€ - 7000€ ([lien 1](#))



- Mettre en place des stations hydro :

Des stations hydrologiques placées à l'exutoire des bassins d'étude permettraient de connaître le coefficient de ruissellement de manière concrète. Ces données permettraient aussi d'étudier les écoulements hypodermiques et souterrains.



Cout : « Dans le cadre du réseau hydrométrique français, on estime que la création d'une [station hydrométrique coûte initialement environ 25 000 €](#) et que son coût annuel de fonctionnement (maintenance, téléphone, alimentation électrique...) revient à environ 1 000 €. Des solutions beaucoup moins coûteuses et plus légères peuvent également être mises en œuvre comme la pose de sondes de pression, qui permettent d'acquérir des données à des pas de temps infra-horaires » ([OFB, 2019](#)).

- Des mesures de débits in-situ

Même en l'absence de station hydro, il serait intéressant de mesurer sur le terrain le débit des différents bassins. La comparaison du débit des bassins avec leur superficie pourrait apporter des pistes de réflexion. De même que la réaction de leur débit après un évènement pluvieux.



- Estimer le coefficient de ruissellement en s'appuyant sur le temps de concentration.

Le temps de concentration peut s'avérer utile pour préparer une campagne de mesure du débit visant à estimer le coefficient de ruissellement. En effet, le temps de concentration permet de prendre en compte dans le calcul du coefficient de ruissellement la dernière goutte tombée le plus loin de l'exutoire

Par exemple, lors du calcul du débit d'un cours d'eau à l'occasion d'un événement pluvieux, le temps de concentration permet d'estimer la durée durant laquelle s'échelonnent les mesures de débit. Cette information pourrait aider au calcul du coefficient de ruissellement sur le terrain.

Le coefficient de ruissellement est le rapport entre le volume précipité et le volume ruisselé. Pour connaître le volume ruisselé il faut comparer le débit de base du cours d'eau au débit moyen sur la durée totale de l'événement pluvieux plus la durée du temps de concentration. Ensuite on divise le volume précipité par le volume ruisselé excédentaire.

$$\text{Coef de Ruissellement terrain} = \frac{D_0 - (D_{moy} + D_{tc})}{D_{préci}}$$

D_0 = Débit de base du cours d'eau (avant la pluie)

D_{moy} = Débit moyen entre le début des précipitations et la fin des précipitations

D_{tc} = Débit moyen sur le temps de concentration

$D_{préci}$ = Débit moyen précipité au cours de l'événement

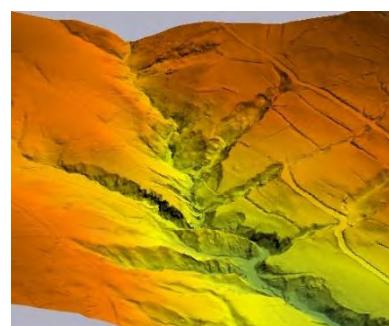
La connaissance du temps de concentration sert d'une part à définir durant combien de temps il faut faire des mesures du débit pour estimer la totalité ruissellement. Mais une fois le temps de concentration passé, il peut être pertinent de continuer les mesures pour essayer d'estimer le volume d'eau circulant plus lentement dans le sol ou le sous-sol. Les mesures peuvent être poursuivies jusqu'à atteindre le débit de base d'avant l'événement pluvieux.

Bien sûr, ces données dépendent de l'intensité des pluies et surtout de la saison, les résultats seront très différents si le sol est sec, saturé en eau ou enneigé.

- Obtenir LIDAR

Un lidar permettrait de connaître précisément la topographie du territoire. La comparaison de lidar permet de repérer les zones en érosion et les zones d'accumulations. Le Lidar permet aussi de faire des études sylvicoles en étudiant la hauteur des arbres et leur volume.

Cout : 300€ à 900€ / Km²



L'opération "LIDARAURA 2017" est cofinancée par l'Union européenne dans le cadre du FEDER

- Acheter une tarière pour carottage du sol

- Les 3 pluviomètres qui ont été achetés pourraient être utilisés pour étudier le gradient des précipitations sur la Réserve. Les données de précipitation pourraient être comparées à un hydrogramme pour estimer le coefficient de ruissellement, etc. Dans une perspective plus large, les données de précipitations pourraient être comparées aux observations du piège photo pour étudier une éventuelle relation entre l'activité des mammifères et les pluies antécédentes, ou encore l'activité des Syrphes et les pluies antécédentes.
- Un projet est en construction avec Polytech Nice Sophia et le BTS GEMEAU par l'intermédiaire respectivement de Pierre Brigode et Amandine Chier. Ce projet a pour

objectif de faire de la Réserve un support d'étude en encourageant la venue d'étudiant. La Réserve bénéficierait ainsi des connaissances apportées par les étudiants, en contrepartie la Réserve offre un beau territoire d'étude et une aide logistique pour faciliter la venue des étudiants. Ce projet ne fait que débuter, mais c'est une perspective encourageante pour poursuivre et étendre cette étude.

VI CONCLUSION

L'activité hydrogéologique se concentre très certainement dans l'ensemble de roches carbonatées d'origine marine qui coiffent le massif du Dôme de Barrot. Cet ensemble constitué de dolomie, cargneule, gypse et calcaire présente une porosité et une perméabilité naturelle accentuée par l'érosion hydraulique et hydrochimique. De plus, lors de la formation des Alpes, cet ensemble carbonaté s'est désolidarisé de l'ensemble sous-jacent qualifié de couche tégumentaire composé de grès et de pélites. La pression tectonique qui a conduit à la surrection du Dôme de Barrot a engendré l'ouverture de fractures pouvant accueillir de potentiels aquifères. Compte tenu de ces caractéristiques l'ensemble carbonaté qui représente une épaisseur allant de 200 à 700 mètres dans le secteur d'étude peut être qualifié d'aquifère de fracture à nappe libre, car l'eau n'est pas bloquée par des couches imperméables ([Ivaldi, 1998](#)). Ainsi, cet ensemble présente une perméabilité à l'échelle de l'échantillon de par sa nature intrinsèque, ainsi qu'une porosité à grande échelle grâce à l'érosion et aux fractures d'origine tectonique. Cela étant dit, nous disposons de trop peu d'informations pour évaluer de manière quantitative l'activité hydrogéologique. Ce manque de données a également conduit à laisser de côté l'ensemble tégumentaire composé de pélite et de grès. La formation de pélite qui est assez imperméable à l'échelle de l'échantillon a également subi une fracturation notable lors de l'orogenèse Alpine. Cette fracturation permet une circulation de l'eau en souterrain. Ainsi, bien que la pélite soit imperméable une étude de sa fracturation pourrait révéler une activité hydrogéologique insoupçonnée. Pour parvenir à estimer plus précisément l'activité hydrogéologique il serait utile d'accroître les connaissances sur les roches par des tests de porosité et perméabilité, ainsi que des expériences comme le suivi de l'eau souterraine par traceur fluorescent. Une autre perspective plus compliquée à mettre en place serait de réaliser plusieurs carottages de roche pour construire une modèle 3D montrant la géométrie des couches géologiques.

L'estimation du bilan hydrologique a permis de décrire la géologie, l'occupation du sol, la pédologie, et le climat des 4 bassins versants d'étude. Ces bassins se situent à l'ouest du Dôme de Barrot et en partie sur le périmètre de la RNR des gorges de Daluis. La connaissance du contexte des différents bassins permet d'estimer le devenir des précipitations une fois tombées au sol, entre la part qui ruisselle, la part qui s'évapotranspire et les variations de stock d'eau du sol et sous-sol.

Il en ressort que **les précipitations** liquides annuelles moyennes représentent 1050 mm et environ 135mm de précipitations solides.

Une fois tombée au sol, une grande partie de l'eau ruisselle jusqu'au Var. Plusieurs facteurs favorisent un **ruissellement** élevé :

- Un relief escarpé, des versants raides qui entraînent des écoulements rapides,
- Des affleurements de pélite imperméable qui fournissent de large surface au coefficient de ruissellement très élevé particulièrement dans le bassin d'Amen et du Talon ;
- Le régime des précipitations souvent courtes et intenses est aussi en la faveur d'un ruissellement important.

La rapidité et l'intensité du ruissellement ont d'ailleurs déjà surpris des canyoneurs entraînant des tragédies. Sur la totalité des précipitations liquides annuelles, un peu plus de 50% ruissellent sur le bassin d'Amen et du Talon et un peu moins de 50% sur celui de Tireboeuf et Chaudan (plus

forestier). En comparaison, sur les petits bassins versants le coefficient de ruissellement est en moyenne de 0.36 à 0.40 ([M. Guigo, 1975](#)). Donc le ruissellement sur ces 4 bassins d'étude est objectivement particulièrement important.

L'évapotranspiration a d'abord été calculée de manière théorique à l'aide des formules de Thornthwaite et Turc ; les valeurs d'ETR produites par le BRGM ont finalement été privilégiées. Pour ce secteur d'étude l'ETR est de 550mm/an environ ; soit 52% des précipitations annuelles qui s'évapotranspirent. Mais pour ajuster cette valeur aux spécificités de chaque bassin, la couverture forestière a été prise en compte ([Zhang, 2001](#)). La faible couverture forestière des bassins d'Amen et du Talon (35% et 42%) est favorable à un fort ruissellement, mais limite logiquement l'évapotranspiration ; contrairement aux bassins de Chaudan et Tirebeouf avec une part élevée de forêt fermée (85 et 78%). En valeur l'évapotranspiration se situe entre 60% et 65% mais ces valeurs sont certainement surestimées. L'absence de station météo et hydrologique à proximité immédiate du site d'étude nous a contraint à estimer les termes du bilan hydrologique de manière assez théorique ce qui peut aboutir à des résultats non représentatifs de la réalité. Ainsi, la mise en place d'instruments de mesures permettrait d'affiner nos connaissances.

En sommant la part d'eau qui ruisselle à la part d'eau qui s'évapotranspire on pourrait croire que **l'infiltration** est inexistante. Ce n'est bien entendu pas le cas ; d'ailleurs l'évapotranspiration est plus importante dans les zones forestières car les arbres ont la capacité d'aller puiser en profondeur de l'eau qui s'est donc infiltrée. Malgré tout, les formules appliquées pour calculer le ruissellement et l'évapotranspiration aboutissent à des résultats ne laissant pas de place à l'infiltration. Il est probable que cela vienne du fait que ces formules ne prennent pas en compte les précipitations neigeuses qui sont conséquentes dans ce secteur où près de 50% de sa surface se situe au-dessus de 1200m. Dans ce secteur au versant très raide les précipitations liquides ruissent rapidement ce qui limite fortement l'infiltration, contrairement à la neige qui en fondant plus progressivement favorise une meilleure pénétration de l'eau. La neige participe probablement en partie à la recharge des eaux souterraines. La présence d'eau souterraine est une évidence vu que les prélèvements au point de captages souterrains (BNPE) représentent sur l'année 2018 l'équivalent d'environ 2% des précipitations annuelles. Une meilleure prise en compte de la neige dans l'estimation du bilan hydrologique serait probablement à la faveur de l'infiltration. Cela pose la question du changement climatique qui d'après les données des modèles climatiques régionaux (ALADIN-CNRM / GIEC) risque d'entrainer une diminution de 30 % des précipitations solides dans une futur proche et une baisse de 60% dans un futur lointain.

Si la recharge en eau souterraine dépend effectivement en grande partie des précipitations neigeuses alors le changement climatique met en péril le maintien du débit d'étiage assuré par les eaux souterraines. Une baisse des cours d'eau aurait des conséquences dramatiques sur les écosystèmes aquatiques et ripisylves.

La relation entre précipitations neigeuses et infiltration reste à prouver. Néanmoins cette conséquence éventuelle du changement climatique doit encourager la mise en place de stations de mesures pour connaitre plus précisément la répartition de la ressource en eau.

Bibliographie

- VERNET J, 1957. Sur la tectonique du socle permo-werfénien du Dôme de Barrot. Tectonique. ffdumas-00979063f.
- IVALDI J.P, 1998. Délimitation des périmètres de protection des captages de la fuont de l'oule.
- JAMES O, 1976. Etude géologique des bordures du massif de l'Argentera et du Dôme de Barrot (Alpes-Maritimes). Rapports socle-couverture et relations entre les minéralisations et la structure. Tectonique. Université Nice Sophia Antipolis. Français. [\(tel-00822897\)](#).
- RNR gorges de Daluis, 2015. Plan de gestion 2016-2021 de la Réserve naturelle régionale des gorges de Daluis 31 SECTION A DIAGNOSTIC DE LA RN.
- VINCHON C, 1984. Sédimentogenèse et métallogenèse du Permien du Dôme de Barrot (Alpes-Maritimes, France) Comparaison avec les ensembles permiens voisins. Thèse d'Etat, Document du BRGM n° 70, 444 p.
- BORDET P, 1950. Le Dôme permien de Barrot et son auréole de terrains secondaires, Bull. Serv. Carte géol. Fr., t. XLVIII, n° 228.
- DURAND M & GAND G, 2007. Le Permien et le Trias du Dôme de Barrot (Alpes-Maritimes) Livret-guide de l'excursion annuelle de l'Association des Géologues du Permien et du Trias.
- SANCHEZ G, 2010. Chronologie et évolution des déformations de la croûte moyenne à la surface dans un prisme collisionnel en décrochement ; IŵpaĐts suā lalĞa sisŵo-gravitaire: Exemple des Alpes Sud-occidentales. Phd thesis, Université de Nice-Sophian Antipolis, 295 p.
- LAMBERT R, 1996. Géographie du cycle de l'eau, Editions Presses Universitaires du Mirail (PUM), Toulouse, 439 p.
- SIGES Seine-Normandie, 2020. Caractéristiques principales des nappes : les paramètres hydrodynamiques (définitions) -». Consulté le 20 novembre 2020. <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article313>.
- DURAND M, et GAND G, 2007. *Le Permien et le Trias du Dôme de Barrot (Alpes-Maritimes) Livret-guide de l'excursion annuelle de l'Association des Géologues du Permien et du Trias*.
- Risknat. Hydrologie, hydrogéologie - Compilation bibliographique | Alpes-Climat-Risques ». Consulté le 6 novembre 2020. http://www.risknat.org/alpes-climat-risques/Base_de_connaissances/2_Environnement_Analyse/24_Hydrologie_alpine.html.
- ISKANDAR A, 1990. Caractérisation de l'espace poreux de roches sédimentaires par l'étude d'équilibres capillaires. Géologie appliquée. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Français. ffpastel00569140f.
- BLAVOUX B, BRUSSET S, et al, 2006. « Etude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre (France) », 27.

SIGES Nord-Pas de Calais, 2020. « Caractéristiques hydrogéologiques ». Consulté le 5 novembre 2020.
<http://sigesnpc.brgm.fr/Caracteristiques-hydrogeologiques,32.html>.

DION J, et MOUSSU P. « hydrogéologie méthodologie et études de synthèse », s. d., 153.

DDTM34, 2014. Guide méthodologique pour la gestion des eaux pluviales dans les projets d'aménagement TOME 2 : Méthodes d'investigation et de dimensionnement.

MANGAN, 2007. Synthèse hydrogéologique et recherche de ressources en eau complémentaires.

VERNOUX J.F, et al, 2007. Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentations des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et études réalisées sur le bassin Seine-Normandie, rapport BRGM, 128 pages.

GUARDIA Pierre et IVALDI J.P, 1985. Les déformations schistogènes du tégument de l'Argentera (Alpes-Maritimes) : description, genèse et chronologie relative dans le cadre géodynamique des Alpes sud-occidentales.

CASTINY G, 1970. BRGM : Méthode d'évaluation rapide des ressources en eaux d'une région.

TRAORE H, 1976. Etude sédimentologique et géochimique du Dome de Barrot (Alpes Maritimes) - France. Géochimie. Universite Scientifique et Médicale de Grenoble. Français. fftel-00679251.

JOURDON A et al, 2014. Style of Alpine tectonic deformation in the Castellane fold-and-thrust belt (SW Alps, France): Insights from balanced cross-sections.

Table des illustrations

Table des Figures :

FIGURE 1 : SCHEMA DES ELEMENTS QUI CONSTITUENT LE BILAN HYDROLOGIQUE (SOURCE : COURS_HYDROLOGIE_2021.PDF)	11
FIGURE 2 : VUE AERIENNE DU MASSIF DU DOME DE BARROT ENTRE CIANS ET VAR MONTRANT L'EMPRISE DES 4 BASSINS ETUDES.....	13
FIGURE 3 : CE DIGRAMME OMBROTHERMIQUE EST OBTENU A PARTIR DES DONNEES DE METEO-FRANCE EN FAISANT LA MOYENNE DES VALEURS DE GUILLAUMES ET ASCROS.	14
FIGURE 4 : CE GRAPHIQUE EST OBTENU EN COMPILANT LES DONNEES DE METEO FRANCE AVEC LES DONNEES DE REFERENCE DE MODELES REGIONAUX DU CLIMAT. POUR LES PRECIPITATIONS NEIGEUSES DES DONNEES PONCTUELLES SUR LA COMMUNE DE BEUIL ONT EGALEMENT ETE PRISES EN COMPTE.....	14
FIGURE 5 : LOG STRATIGRAPHIQUE SIMPLIFIÉ DES ROCHES PRÉSENTES SUR LE SECTEUR D'ETUDE.....	18
FIGURE 6 : COUPE SIMPLIFIÉE DES ENSEMBLES GÉOLOGIQUES D'APRES LEUR PROPENSIO N A ACCUEILLIR DES AQUIFERES.	21
FIGURE 7 : CETTE ILLUSTRATION MONTRÉ LA SUCCESSION DES TRAITEMENTS RÉALISÉS POUR ABOUTIR A UNE DELIMITATION DES BASSINS-VERSANTS.	26
FIGURE 8 : A GAUCHE L'EMPRISE DES 20 BASSINS CALCULÉE GRACE A ARCGIS AVEC LEUR SUPERFICIE ÉCRITE EN NOIR. A DROITE LES 4 BASSINS POUR LESQUELS LE BILAN HYDROLOGIQUE EST ESTIMÉ.	26
FIGURE 9 : CARTE ISSUE DE LA BD_FORET_V2 DÉCOUPEE A L'ÉCHELLE DU BASSIN D'AMEN. LA SUPERFICIE DE CHAQUE CLASSE D'OCCUPATION DU SOL EST CONNUE.	31
FIGURE 10 : ÉTAPES VERS LE CALCUL DE LA SURFACE AFFLEURANTE DE CHAQUE FORMATION GÉOLOGIQUE POUR CHAQUE BASSIN. LE BASSIN D'AMEN SERT A ILLUSTRE LES ÉTAPES DE CETTE MÉTHODE.	33
FIGURE 11 : REPRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL DE LA SUPERFICIE TOTALE (AFFLEUREMENT + SOUS TERRAIN) D'UNE FORMATION GÉOLOGIQUE. ICI LE CALCUL DE LA SURFACE TOTALE CONCERNE LA FORMATION T1-2_GQ (CODE 205) DU BASSIN D'AMEN. LA SURFACE TOTALE DE LA FORMATION T1-2_GQ EST ÉGALE A LA SOMME DE LA SURFACE DES FORMATIONS PLUS RECENTE QUI ONT DONC UN « CODE » INFÉRIEUR ; A CELA IL FAUT SOUSTRAIRE LA PART DES EBOULIS QUI SE SITUENT SOUS LA COUCHE ÉTUDEE (CERCLE EN NOIR SUR L'ILLUSTRATION).	35
FIGURE 12 : CARTE GÉOLOGIQUE POUR LE BASSIN DE CHAUDAN. CETTE CARTE ILLUSTRE QUE LE BASSIN DE CHAUDAN EST RECOUVERT EN MAJORITY PAR DES EBOULIS QUI CACHENT LES AFFLEUREMENTS DES AUTRES FORMATIONS GÉOLOGIQUES CE QUI REND IMPOSSIBLE L'ESTIMATION DE LEUR SURFACE TOTALE.	37
FIGURE 13 : CAPTURE D'ÉCRAN DE LA CARTE GÉOLOGIQUE POUR LE BASSIN D'AMEN DEPUIS L'INTERFACE ARCGIS. LES RECTANGLES VERTS ENCADRENT LES TRANSECTS TRACES POUR ESTIMER L'ÉPAISSEUR DE LA FORMATION T1-2_SD. LE GRAPHIQUE A DROITE REPRÉSENTE LE PROFIL DE CHACUN DE CES TRANSECTS. L'ÉPAISSEUR MOYENNE POUR CETTE FORMATION SUR LE BASSIN D'AMEN EST DE 60 M AVEC UNE AMPLITUDE DE 25 A 100 SELON L'EMPLACEMENT DU TRANSECT.....	38
FIGURE 14 : SYNTHÈSE SCHÉMATIQUE DE LA MÉTHODE SUIVIE POUR ÉTUDIER LE SOL.	46
FIGURE 15 : CARTE MONTRANT LA SIMPLIFICATION EN 3 CLASSES DE L'OCCUPATION DU SOL AFIN D'ESTIMER LE COEFFICIENT DE RUISELLEMENT POUR CHACUNE DE CES 3 CLASSES. CETTE ILLUSTRATION MONTRÉ LE BASSIN D'AMEN MAIS CE TRAVAIL A ÉGALEMENT ETE FAIT SUR LES 3 AUTRES BASSINS.	52
FIGURE 16 : LES POINTS BLEUS SONT DES SOURCES, LE POLYGONE A FOND BLEU AU CENTRE DE LA CARTE CORRESPOND AU BASSIN D'ALIMENTATION ESTIMÉ DE LA SOURCE DE BONA AIGUA. LE DÉBIT DE LA SOURCE EST RAPPORTÉ A LA SUPERFICIE DE SON BASSIN D'ALIMENTATION POUR ESTIMER LE PART DES PRECIPITATIONS QUI RESSURGIT PAR CETTE	

SOURCE. CETTE METHODE A ETE APPLIQUEE POUR 8 AUTRES SOURCES POUR AVOIR UNE IDEE APPROXIMATIVE DE L'INFILTRATION.....	55
FIGURE 17 : SCHEMA MONTRANT LE PARCOURS SOUTERRAIN QUE PEUT SUIVRE L'EAU PRECIPITEE. UNE PARTIE DE L'EAU S'INFILTRE (CERTAINEMENT PLUS DE 3% DES PRECIPITATIONS S'INFILTRENT), UNE PARTIE DES INFILTRATIONS SE VIDANGE PAR LES SOURCES ET UNE PARTIE EST CAPTEE (LES CAPTAGES OFFICIELS PRELEVENT ENTRE 1 ET 3% DE L'EAU PRECIPITEE). L'EAU NE FAIT PAS QUE PASSER, UNE PARTIE EST STOCKEE DANS LES PORES ET FRACTURES DE LA ROCHE.	64

Table des Tableaux :

TABLEAU 1 : LE BILAN HYDROLOGIQUE EST INFLUENCE PAR PLUSIEURS FACTEURS, IL FAUT D'ABORD TROUVER ET TRAITER LES DONNEES SUR LES FACTEURS D'INFLUENCES, POUR POUVOIR ENSUITE ESTIMER LE BILAN HYDROLOGIQUE.	24
TABLEAU 2 : LA PARTIE SUPERIEURE DE CE TABLEAU DECRIIT LA GEOMETRIE DE CHAQUE BASSIN A PARTIR DE QUELQUES PARAMETRES MORPHOMETRIQUES. LA PARTIE BASSE DU TABLEAU PRESENTE LE TEMPS DE CONCENTRATION DE CHAQUE BASSIN POUR DIFFERENTES METHODES DE CALCUL.....	27
TABLEAU 3 : RECAPITULATIF DES PARAMETRES MORPHOMETRIQUES CALCULES ET DES DONNEES, FORMULES ET OUTILS UTILISES.	28
TABLEAU 4 : SURFACE OCCUPES PAR CHAQUE CLASSE D'OCCUPATION DU SOL PAR BASSIN.....	30
TABLEAU 5 : TABLEAU ASSOCIANT A CHAQUE FORMATION GEOLOGIQUE LA PART QU'ELLE OCCUPE PAR BASSIN VERSANT. DONNEES ISSUES DE LA CARTE GEOLOGIQUE DU BRGM.....	34
TABLEAU 6 : MARGE D'ERREUR VENANT DE L'ESTIMATION DE LA SUPERFICIE TOTALE DES FORMATIONS GEOLOGIQUES.	36
TABLEAU 7 : LES EPAISSEURS MOYENNES FIGURANT DANS LA DERNIERE COLONNE (LA METHODE 2), ONT ETE OBTENUES EN FAISANT LA MOYENNE DES EPAISSEURS OBTENUES SUR LES 3 BASSINS D'ETUDE.	39
TABLEAU 8 : RESULTATS OBTENUES POUR LE CALCUL DE LA SURFACE AFFLEURANTE, SURFACE TOTALE, EPAISSEUR, ET VOLUME DES FORMATIONS GEOLOGIQUES QUI COMPOSENT CHAQUE BASSIN-VERSANT.....	40
TABLEAU 9 : EXTRAIT DU TABLEAU ASSOCIANT DES VALEURS DE POROSITE ET PERMEABILITE A CHAQUE FORMATION GEOLOGIQUE. SOURCE : GELHAR ET AL, 1992.	42
TABLEAU 10 : ESTIMATION DU VOLUME DE SOL PRESENT SUR CHAQUE BASSIN.	44
TABLEAU 11 : MODELE CHOISI POUR CALCULER LE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (DDTM34, 2014).	50
TABLEAU 12 : MISE EN RELATION DES CLASSES DE LA BD_FORET_V2 AVEC LES 3 CLASSES IMPOSEES PAR LE MODELE DE CALCUL DU COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT.	51
TABLEAU 13 : VALEURS DE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT SELON LA PENTE, LA NATURE ET LA COUVERTURE DU SOL. (BUSSARD, 2005).....	52
TABLEAU 14 : COMPILATION DES SOURCES ET VALEURS UTILISEES POUR OBTENIR LES PRECIPITATIONS PLUVIEUSES ANNUELLES MOYENNES.....	58
TABLEAU 15 : COMPILATION DES SOURCES ET VALEURS UTILISEES POUR OBTENIR LES PRECIPITATIONS NEIGEUSES ANNUELLES MOYENNES.	58
TABLEAU 16 : RESULTATS DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT PAR BASSIN VERSANT.	59
TABLEAU 17 : RESULTATS DES VALEURS D'ETP SELON LES METHODES UTILISEES.	60
TABLEAU 18 : RESULTATS DES VALEURS D'ETR SELON LA METHODE UTILISEE.	60
TABLEAU 19 : PART DES PRECIPITATIONS QUI S'EVAPOTRANSPIRENT PAR BASSIN-VERSANT EN PRENANT EN COMPTE LA VEGETATION.....	60

TABLEAU 20 : NOMBRE D'ANNEES DE PRECIPITATIONS QUE LES ROCHES DES DIFFERENTS BASSINS PEUVENT STOCKER EN FONCTION DE LA POROSITE MOYENNE DES ROCHES.....	62
TABLEAU 21 : RESULTATS ISSUS DES PESEES DES ECHANTILLONS DE SOL.	63
TABLEAU 22 : ESTIMATION DE LA CAPACITE DE RETENTION DU SOL.....	63
TABLEAU 23 RESULTATS COMPILE DU BILAN HYDROLOGIQUE	65

Table des Equations :

ÉQUATION 1 : CETTE EQUATION REPOSE SUR LA TEXTURE DU SOL. W330 CORRESPOND A LA CAPACITE DE STOCKAGE EN EAU DU SOL.....	45
--	----

Table des Annexes

ANNEXES 1 : OBJECTIF 2.13 DU PLAN DE GESTION DE LA RNR	81
ANNEXES 2 : GRAPHIQUE MONTRANT LA REPARTITION DE LA SURFACE DE CHAQUE BASSIN PAR TRANCHE D'ALTITUDE	82
ANNEXES 3 : TABLEAU DE LA REPARTITION DE L'OCCUPATION DU SOL EN POURCENTAGE PAR BASSIN VERSANT.....	83
ANNEXES 4 : PRESENTATION DES DONNEES ISSUES DE LA CARTE SOL (IGCS).	84
ANNEXES 5 : PRESENTATION DE LA REPARTITION DES DIFFERENTS TYPES DE SOLS (UTS) AU SEIN DES 2 GRANDS GROUPES DE SOLS (UCS) PRESENTS SUR LE TERRITOIRE D'ETUDE.	85
ANNEXES 6 : CARTE DE LOCALISATION DES POINTS DE PRELEVEMENT DU SOL S'APPUYANT SUR LE FOND CARTOGRAPHIQUE COMPOSE DE LA COMBINAISON DE LA CARTE GEOLOGIQUE ET DE LA CARTE DE VEGETATION.....	87
ANNEXES 7 : TABLEAU REMPLI LORS DU PRELEVEMENT DE CHAQUE ECHANTILLON DE SOL POUR DECRIRE LE CONTEXTE.	88
ANNEXES 8 : CARTE D'INTERPOLATION DES PRECIPITATIONS POUR LE DEPARTEMENT DES ALPES-MARITIMES.....	89
ANNEXES 9 : DONNEES PONCTUELLES DE MESURE D'ENNEIGEMENT SUR LA COMMUNE DE BEUIL. SOURCES (IVALDI, 1998).	90
ANNEXES 10 : CARTES DE FRANCE DE L'EVAPOTRANSPIRATION CALCULEE PAR PLUSIEURS METHODES. (BRGM, 1971).	91
ANNEXES 11 : TABLEAU DES VOLUMES PRELEVES DEPUIS LES POINTS DE CAPTAGES SOUTERRAINS PRESENTS SUR LE MASSIF DE BARROT OU A PROXIMITE.....	92
ANNEXES 12 : CARTE DE LOCALISATION DES SOURCES DONT LE DEBIT EST CONNU.	93
ANNEXES 13 : TABLEAUX DES DONNEES DE PROJECTION CLIMATIQUE POUR LES PRECIPITATIONS SOLIDES SUR LA MAILLE CONTENANT LA RESERVE DES GORGES DE DALUIS.....	94

Annexes par parties

[Retour au texte](#)

Annexes 1 : Objectif 2.13 du plan de gestion de la RNR

FICHE OPÉRATION - RNR DES GORGES DE DALUIS

OLT 2 : MAINTENIR, EN BON ÉTAT DE CONSERVATION, LA BIODIVERSITÉ ET LES PATRIMOINES EMBLÉMATIQUES DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ENTRE PROVENCE ET ALPES

Objectif du plan : Prendre en compte le fonctionnement écosystémique du site et les enjeux périphériques

2.13 Etude sur le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du massif du Dôme de Barrot

Contexte et patrimoine de la réserve concerné

Le dôme du Barrot est une identité géologique particulière au sein de la couverture sédimentaire du bassin péri-alpin. La roche constituant cet ensemble est une pélite d'âge Permien (280 ma) de faible porosité si l'on considère la porosité à l'échelle de l'échantillon. Par contre, la porosité du milieu devient élevée à l'échelle du massif, et cela en raison d'une intense fracturation. Les caractéristiques rhéologiques, tectoniques et hydrogéologiques tranchent nettement avec la couverture sédimentaire sus-jacente et donnent à ce pseudo-socle le nom de téguement. Cet ensemble, au couvert végétal peu dense, constitue donc un réseau drainant alimentant ainsi divers aquifères et en particulier l'aquifère du Var ainsi que diverses sources.

Description de l'opération

L'étude hydro-géomorphologique consistera à connaître les caractéristiques « drainantes » de ce massif :

- connaître la porosité à l'échelle de l'échantillon,
- établir une cartographie et une caractérisation des fractures du massif,
- évaluer la porosité à l'échelle du massif,
- établir les connexions entre ce réseau drainant et les aquifères,
- enfin estimer les caractéristiques hydrogéologiques globales de ce massif afin d'établir son rôle dans la préservation et dans la recharge de la ressource en eau.

Partenaires techniques

Laurent CAMERA, université.

Partenaires et programmes financiers potentiels

POIA, programmes universitaires, Agence de l'Eau.

TYPE D'OPÉRATION

PO	SE	RE	TU	TE	PI	AD
----	----	----	----	----	----	----

PRIORITÉ

1 2 3



Cascade d'Amen un jour de crue © Stéphanie LARBOURET

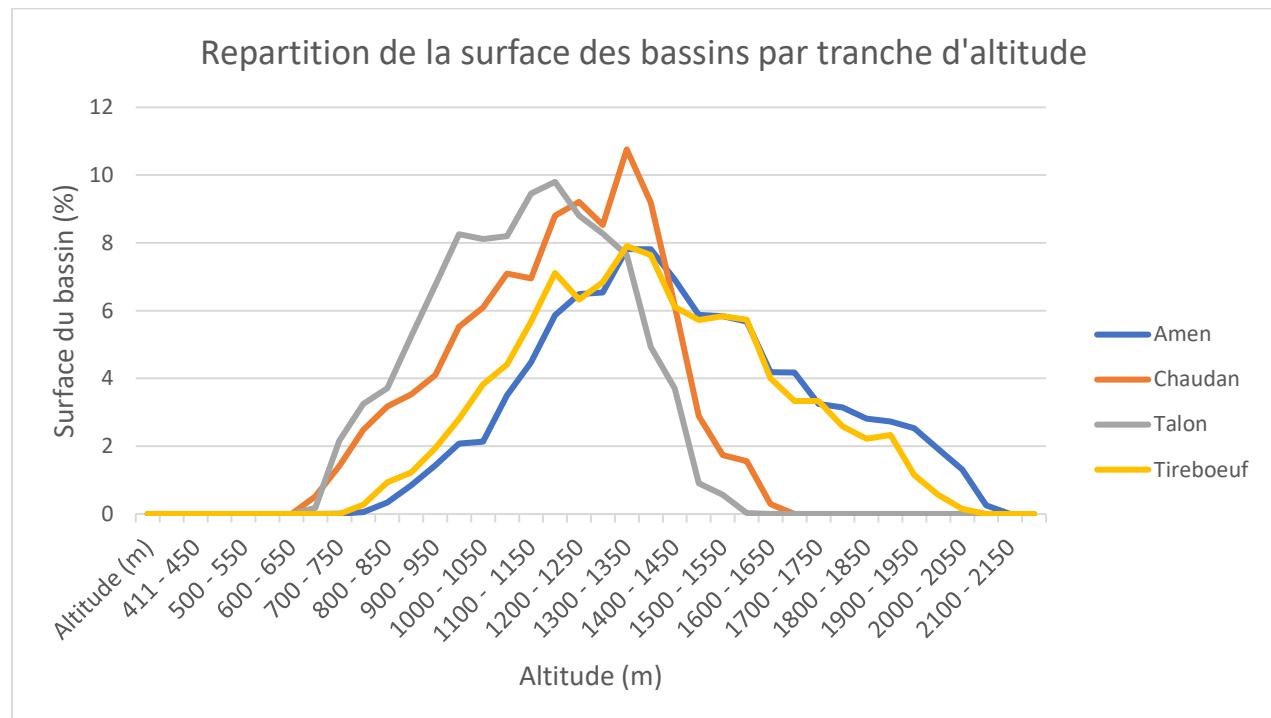


Méandres en amont des gorges © Tangi CORVELER

Annexe partie : Morphométrie

[Retour au texte](#)

Annexes 2 : Graphique montrant la répartition de la surface de chaque bassin par tranche d'altitude.



Ce graphique montre la répartition de la surface des bassins-versants par tranche d'altitude. Autrement dit, il permet de connaître l'altitude minimale et maximale de chaque bassin, il permet aussi de repérer dans quelle tranche d'altitude est comprise la plus grande partie des bassins-versants. Ces données peuvent être mises en relation avec un gradient de précipitation ou d'autres paramètres.

Ce graphique montre que la partie la plus basse en altitude du bassin **d'Amen** est comprise entre 700-750m d'altitude. La partie la plus haute du bassin versant s'étend entre 2050-2150 mètres. Il semble que pour le bassin d'Amen la plus grande partie de sa surface (71%) s'étende dans une tranche altitudinale comprise entre 1100 et 1700m d'altitude.

Le bassin du **Talon** débute entre 650 et 700m, il atteint au maximum la tranche altitudinale allant de 1550 à 1600 mètres. La plus grande partie de sa surface (75%) est comprise entre 900 et 1350 m. Il s'agit du bassin avec l'altitude moyenne la plus faible. Cela se voit sur le graphique car la courbe atteint ses valeurs hautes pour des altitudes plus faibles que les autres bassins.

Annexe partie Occupation du sol

[Retour au texte](#)

Annexes 3 : Tableau de la répartition de l'occupation du sol en pourcentage par bassin versant.

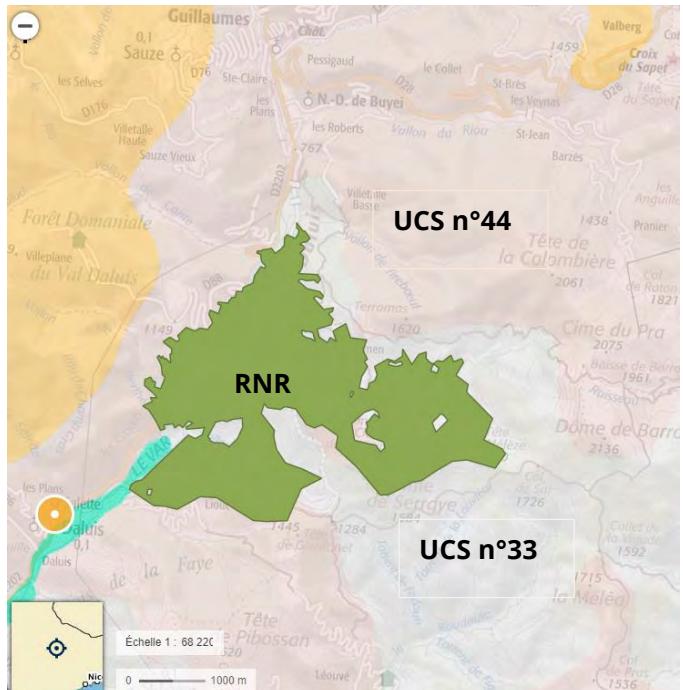
Types de végétation		Surface (%)			
TFV	ESSENCE	Amen	Talon	Tirebeouf	Chaudan
Forêt fermée de feuillus purs en îlots	Feuillus	0,1			
Forêt fermée à mélange de feuillus	Feuillus	0,5			
Forêt fermée de chênes décidus purs	Chêne décidus	0,5		9,3	
Forêt fermée à mélange de conifères	Conifères	6,4			
Forêt fermée de pins sylvestre purs	Pin sylvestre	11,2	33,8	36,2	54,9
Forêt fermée de mélèzes purs	Mélèze	11,5		14,9	
Forêt fermée à mélange de pins purs	Pins mélanges	3,8			
Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants et conifères	Mixte		0,6	3,1	8,7
Forêt fermée à mélange de conifères prépondérants et feuillus	Mixte	0,8	8,4	1,5	17,8
Forêt ouverte de feuillus purs	Feuillus	14,1	17,6	12,8	2,3
Forêt ouverte de conifères purs	Conifères	6,3	0,9	4,7	4,6
Forêt ouverte à mélange de feuillus et conifères	Mixte	9,4	7,1		
Lande	NC	25,0	29,8	2,0	4,6
Formation herbacée	NC	10,3	1,9	3,4	2,1
Indifférencié	Indifférencié			12,2	5,0

Annexe partie sol

[Retour au texte](#)

Les données spatialisées se rapportant au sol sont très peu nombreuses. L'unique donnée spatialisée trouvée est le Référentiel Régional Pédologique (RRP) (1/250 000) réalisé par département dans le cadre du programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) coordonné par le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol). Cette carte est visible sur Géoportail. Seules 2 Unité Cartographique de Sol (UCS n°33 et n°44) sont présentes sur le territoire d'étude. Ainsi ces données sont géographiquement très imprécises. Bien que la résolution spatiale des données soit médiocre, la description des différents types de sols est assez précise. Ainsi, chaque UCS est composé de plusieurs UTS (Unités Typologiques de Sols) qui décrivent assez précisément le type de sols et surtout leur part dans la superficie de l'unité de couverture totale. Par exemple, l'emprise de l'UCS n°33 se partage en 4 sous-classes (UTS) et l'UCS n°44 compte 8 UTS.

Annexes 4 : Présentation des données issues de la carte sol (IGCS).



Annexes 5 : Présentation de la répartition des différents types de sols (UTS) au sein des 2 grands groupes de sols (UCS) présents sur le territoire d'étude.

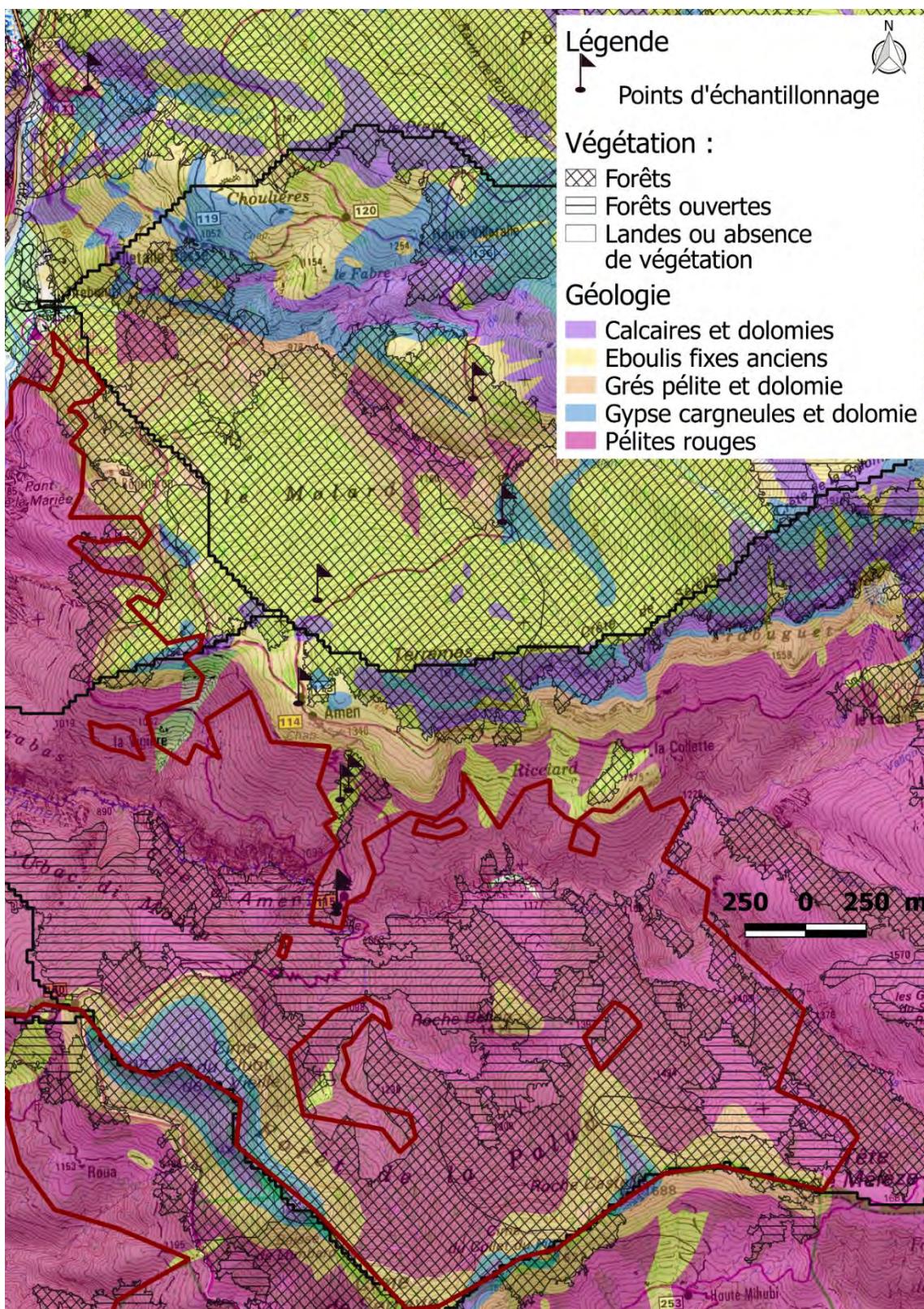
Unités	Description	Type de sol	Matériaux parentaux	Pourcentage	Epaisseur (cm)
UCS N°33a					
UTS n° 77	Sol superficiel très peu évolué sur roche dure, à pierrosité moyenne de cailloux et pierres de grès, issu de grès permien	LITHOSOL acide issu de grès permien	GRES	60%	10
UCS N°44					
UTS n° 9	Sol peu évolué, peu épais, humifère, avec un horizon différencié, de texture grossière, à charge très importante de graviers et cailloux de pélite, issu de l'altération de pélites du Permien	RENDISOL gravelo-caillouteux issu de l'altération des pélites du Permien	PÉLITES	20%	35
UTS n° 4	Sol pierrique, de texture très grossière, à pierrosité importante à très importante (10 cm) de cailloux et pierres d'arkose au dessus d'un éboulis vide d'arkose	PEYROSOL pierrique issu d'un éboulis d'arkoses	EBOULIS D'ARKOSE	15%	
UTS n° 8	Sol peu évolué, peu épais, avec un horizon différencié, humifère, à terre fine décarbonatée, de texture sablo limoneuse, à charge importante de cailloux et graviers calcaires et gréseux, issu d'un éboulis de grès et calcaires	RENDISOL humifère issu d'un éboulis de grès et calcaires	COLLUVION	5%	
UCS N°44					
UTS n° 67	Sol superficiel très peu évolué sur roche tendre, argileux, à pierrosité nulle à très faible, issu de marnes du Plaisancien	RÉGOSOL calcaire issu de marne	MARNE	30%	10
UTS n° 62	Sol superficiel très peu évolué sur roche dure, calcaire, à pierrosité très importante de cailloux et pierres calcaires, issu de calcaire	LITHOSOL calcaire strict à couche R fissurée issu de calcaire	CALCAIRE	20%	10
UTS n° 50	Sol calcaire évolué avec deux horizons différenciés, colluvial, décarbonaté en surface, de texture de limon argileux à équilibrée, à pierrosité moyenne de cailloux et pierres calcaires sur calcaire du Lias	CALCOSOL colluvial, décarbonaté en surface, sur calcaire	COLLUVION SUR CALCAIRE	15%	
UTS n° 45	Sol peu évolué avec un horizon différencié, à terre fine décarbonatée, de texture	RENDISOL colluvial, issu d'éboulis à	EBOULIS CALCAIRE	15%	35

	argileuse, à pierrosité moyenne de graviers et cailloux calcaires, issu d'éboulis à pierraille et blocaille	pierraille et blocaille			
UTS n° 49	Sol calcaire peu évolué avec un horizon différencié, colluvial, peu épais, de texture équilibrée, à pierrosité moyenne à importante de graviers, cailloux et pierres de calcaire et de marne gypseuse, sur marne bariolée gypseuse	RENDOSOL colluvial, peu épais, sur marne bariolée gypseuse	COLLUVION SUR MARNE BARIOLEE GYPSEUSE	5%	
UTS n° 34	Sol calcaire peu évolué avec un horizon différencié, de texture variable, à pierrosité importante de graviers et cailloux de dolomie et de calcaire, issu de dolomie	RENDOSOL gravelo-caillouteux, de pente, issu de dolomie	: DOLOMIE	5%	
UTS n° 40	Sol colluvial non calcaire, de texture fine à équilibrée, à pierrosité moyenne à importante (40 cm) de graviers et cailloux de grès non calcaires parfois calcaires (entre 40 et 60 cm), issu de grès du Lias	COLLUVIOSOL gravelo-caillouteux issu de grès, sous pelouse	EBOULIS CALCAIRE DU LIAS	5%	
UTS n° 51	Sol pierrique calcaire, entassé, colluvial, de texture fine, à pierrosité très importante de graviers, cailloux et pierres calcaires, issu de colluvions, sur pente forte	PEYROSOL pierrique, calcaire, issu de colluvions, sur pente forte	COLLUVIONS CALCAIRES	5%	

Ces données sont intéressantes, mais compte tenu de la résolution spatiale médiocre, il est impossible de connaître la répartition des différents types de sol à l'échelle du bassin versant. En effet, les UCS sont à l'échelle du département ainsi les données de répartition en pourcentage des UTS sont également à l'échelle du 06. Il est fort peu probable que la répartition des UTS dans le 06 soit la même que dans les bassins versant d'étude.

Malgré cette limite évidente, ces données ont été mobilisées avec prudence pour estimer le volume de sol de chaque bassin. Le sol, tout comme la roche, peut contenir de l'eau. C'est pourquoi il a été jugé intéressant d'estimer le volume d'eau que le sol peut contenir. Pour cela, la première étape a été d'estimer le volume du sol.

Annexes 6 : Carte de localisation des points de prélèvement du sol s'appuyant sur le fond cartographique composé de la combinaison de la carte géologique et de la carte de végétation.



Annexes 7 : Tableau rempli lors du prélèvement de chaque échantillon de sol pour décrire le contexte.

Description du milieu de prélèvement du sol				
Echantillons	Epaisseur Sol (cm)	Végétation	Roche mère	Remarque
P1	0 a 2 cm	Absente	Pélite, bloc de grès	Présence sol fin intermittent. Autant d'affleurement nu que de sol
P1bis		Absente	Pélite, bloc de grés	Présence sol fin intermittent. Autant d'affleurement nu que de sol
P2		Landes. Buis, prunus, genet, chêne, mousse, lichen	Pélite et grès	Lande sur pélite
P2bis	2 a 3 cm	Lande sèche buis, prunus, genet, mousse, lichen	Pélite et grès	Sol facilement altérable, fragment se détaché, schistosité importante
P3		Petite forêt, chêne, buis, genet,	bloc de grés	tapis feuille chêne important
P3bis		Petite forêt, chêne, buis, genet,	bloc de grés	bcp de racine
P4	sup 10cm	Vegetation rase. Gratte cul, thym, herbe, chardon	éboulis ancien ?	Cailloutis dur à creuser
P4bis		Vegetation rase. Gratte cul, thym, herbe, chardon	éboulis ancien ?	
P5	sup 10cm	Forêt pins sylvestres et buis, couverture herbeuse	NOMBREUSES pierres, éboulis peut être	roche mère non atteinte mais nombreux cailloux complique le prélèvement
P5bis		Forêt pins sylvestre et buis, couverture herbeuse	nombreuse pierre, eboulis peut-être	
P6		Vegetation pins	surplomb calcaire dolomitique ou grés	Cailloutis dur à creuser
P6bis		Vegetation pins	surplomb calcaire dolomitique ou grés	
P7	sup 10cm	Lande arbustive	Cailloutis , cargneule ?	Sol semble épais mais cailloux empêchent de creuser
P7bis		Lande arbustive	Cailloutis , cargneule ?	
P8	sup 20cm	Clairsemé, petits pins	Cargneule	Sol épais mais localisé, pente forte. Zone d'erosion aménagement forestier
P9		Forêt de chêne	grès	présence de pierre éboulées compliquée creuser
P9bis		Forêt de chêne	sous barre de grès	sol sableux et profond plus de 20cm

Annexe partie précipitation

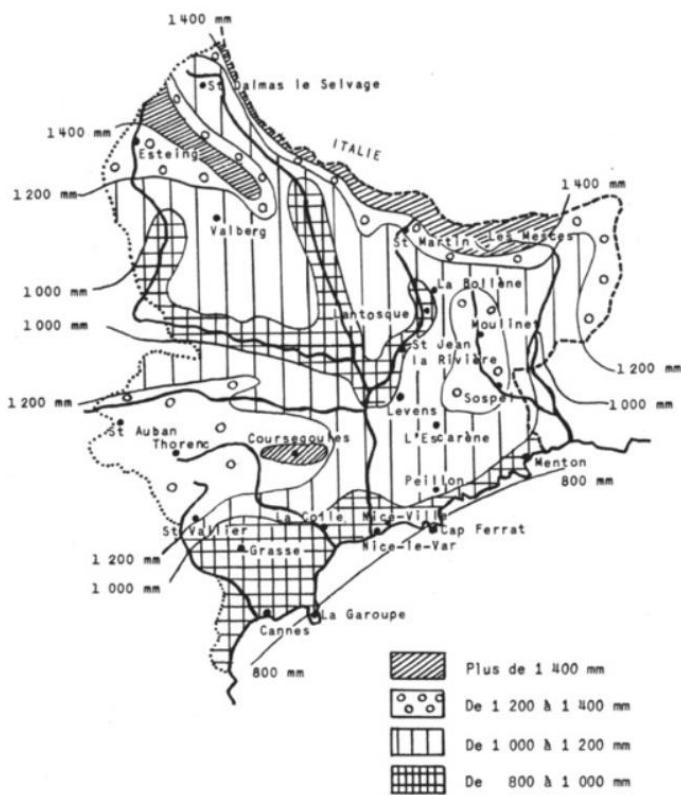
[Retour au texte](#)

Annexes 8 : Carte d'interpolation des précipitations pour le département des Alpes-Maritimes.

LA PLUVIOMÉTRIE DANS LES ALPES-MARITIMES

99

CARTE PLUVIOMÉTRIQUE DU DEPARTEMENT (MOYENNES 1950-59)



La pluviométrie à Nice depuis 1870. Présentation, évolution et conséquences

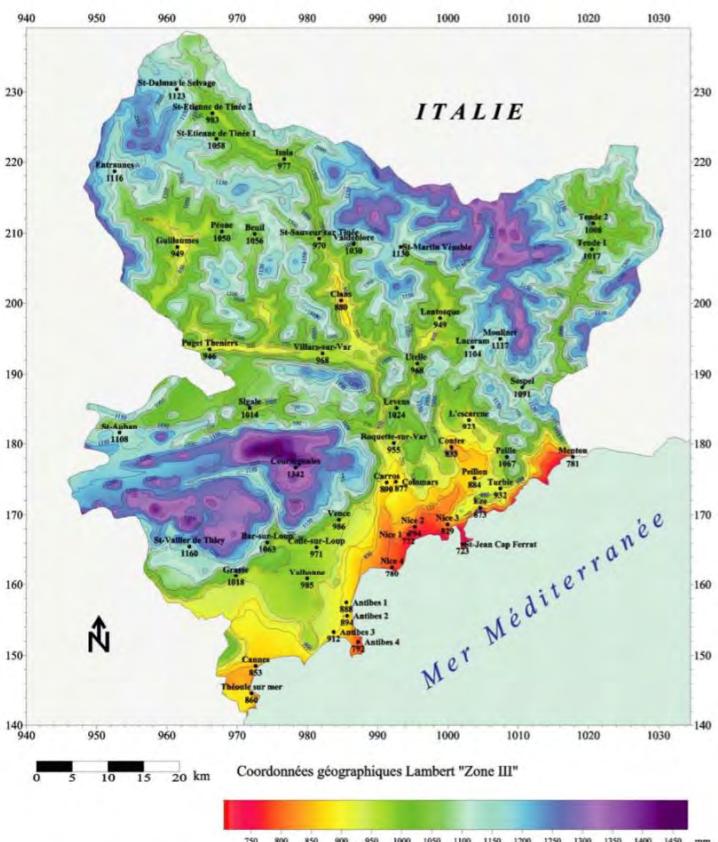


Figure 4 : Carte des précipitations moyennes annuelles de la période 1967-1996 dans les Alpes-Maritimes (d'après Chamoux 1998)

[Retour au texte](#)

Annexes 9 : Données ponctuelles de mesure d'enneigement sur la commune de Beuil. Sources ([Ivaldi, 1998](#)).

Relevés effectués à 1600 m d'altitude du 15/12/97 au 25 Janv 98			
ANNEXE 7			
SEMAINES	ht Neige Fraîche en centimètres	Équivalent en eau en mm	Epaisseur de Neige au Soleil
DU 15 au 21 Déc 97	112	116	90
DU 22 au 28 Déc 97	000	000	75
DU 29 Déc 97 au 4 Janv. 98	11	12,7	74
DU 5 au 11 Janv 98	000	000	73
DU 12 au 18 Janv 98	26	13,5	86
DU 19 au 25 Janv 98	26	16	100
DU 26 Janv au 1 Fév 98	000	000	94
DU 2 au 8 Fév 98	000	000	90
DU 9 au 16 Fév ..	000	000	82
DU 17 au 23 Fév ..	11	2,5	80
DU 24 Fév au 1 Mars	7	7,5	66
DU 2 au 8 Mars	000	5	50
DU 9 au 15 Mars	1	1	43
DU 16 au 22 Mars	000	000	23
DU 23 au 29 Mars	000	000	13
DU quinzaine Avril	130		Épaisseur Moyenne Semaine par Semaine
Total des Précipitations	194 cm	169,7 mm	

Annexe partie : évapotranspiration

[Retour au texte](#)

Annexes 10 : Cartes de France de l'évapotranspiration calculée par plusieurs méthodes. (BRGM, 1971).

ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE MOYENNE EN FRANCE CALCULÉE PAR LA FORMULE
ANNUELLE DE TURC (Période 1891 – 1950)
S.COTTEZ - Rapport B.R.G.M. 69 SCL 170 HYD. (Utilisation en hydrogéologie
de la formule annuelle de TURC).



■ de 400 à 550 ■ de 550 à 700 ■ de 700 à 850



■ de 100 à 350 ■ de 350 à 550

Annexe partie : Variation stock eau souterrain

[Retour au texte](#)

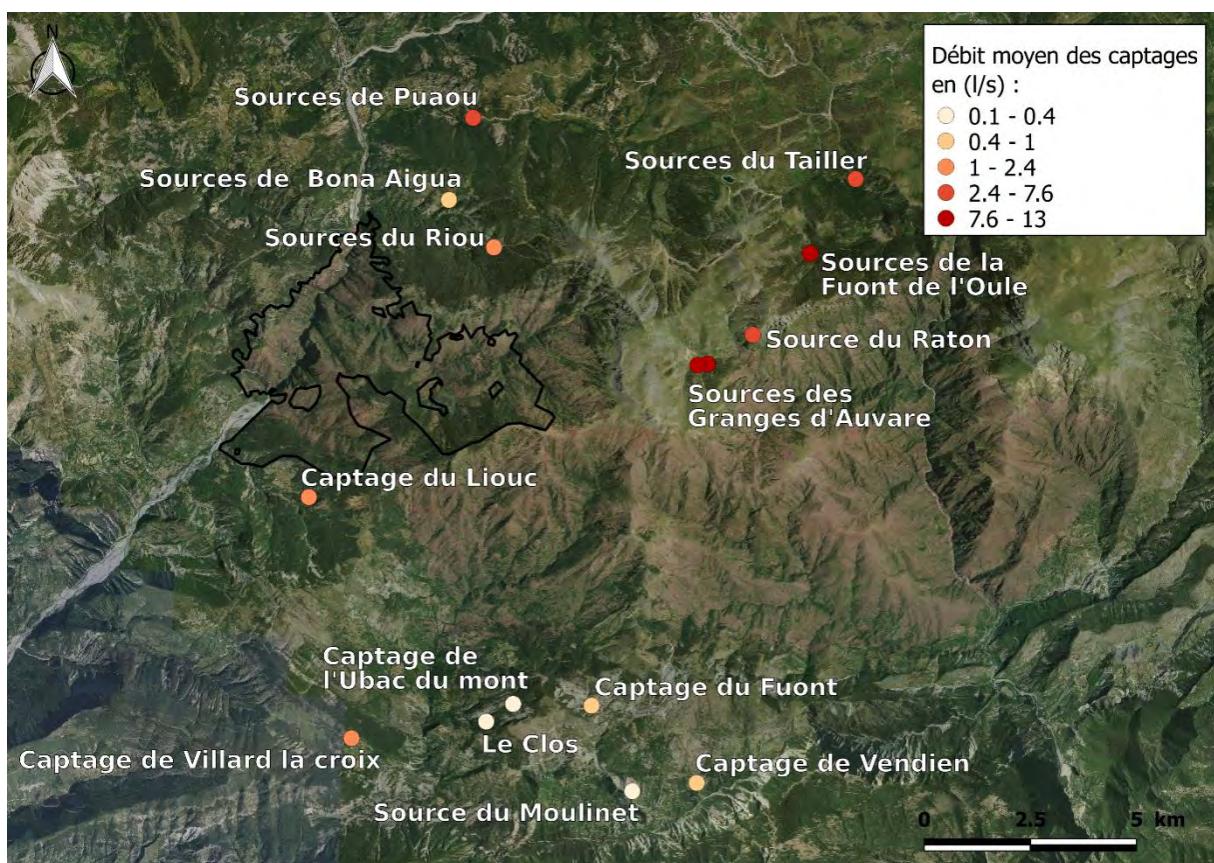
Annexes 11 : Tableau des volumes prélevés depuis les points de captages souterrains présents sur le massif de Barrot ou à proximité.

Année	Nom	Commune	Volume (m3)	Usage	Origine	Sources
2018	SOURCE DE FUONT DE L'OULE	BEUIL	10 449	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE FUONT DE L'OULE	BEUIL	6 371	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE FUONT DE L'OULE	BEUIL	6 371	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE FUONT DE L'OULE	BEUIL	88 577	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE UBAC DU MONT	CROIX-SUR-ROUDOULE	7 080	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE LA BARMA	CROIX-SUR-ROUDOULE	1 647	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE VALLON DE VILLARS	CROIX-SUR-ROUDOULE	609	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE RIOU (UDI ...)	GUILLAUMES	473	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE L'AREY (UDI ...)	GUILLAUMES	2 321	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE PUAOU (UDI ...)	GUILLAUMES	201 624	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE PUAOU (UDI ...)	GUILLAUMES	22 403	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE PUAOU (UDI ...)	GUILLAUMES	13 295	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE PUAOU (UDI ...)	GUILLAUMES	11 045	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE CHAUDAN (UDI ...)	GUILLAUMES	82 219	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SCE DU PRA DE FERRON-AIGUETTE (UDI ...)	GUILLAUMES	13 103	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SCE DU PRA DE FERRON-AIGUETTE (UDI ...)	GUILLAUMES	3 290	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCES DE VEYMIANES	GUILLAUMES	936	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE LES COULIERES (UDI MENUYERS ET JUSBERT)	GUILLAUMES	15 465	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE LE MOULINET	PUGET-ROSTANG	4 474	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCES VENDIEN	PUGET-ROSTANG	12 723	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DERoubet	PUGET-THENIERS	210 487	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DU RIOU	RIGAUD	52 612	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE NOTRE DAME	RIGAUD	2 688	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DU RATON	PEONE	176 800	INDUSTRIE et ACTIVITES ECO	SOUT	BNPE
2018	SOURCES DE DEMANT	BEUIL	217 757	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE PIERRE DE DEMANT	BEUIL	150	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCES DE CONTENT	BEUIL	61 118	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE LA CLAPE	DALUIS	12 303	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DU LIOUC	DALUIS	447	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	FORAGES DU GOUJON	SAUSSES	1 366	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE L'ADOUX	SAUSSES	9 991	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE CLAMOUSSET	SAUSSES	1 474	EAU POTABLE	SOUT	BNPE
2018	SOURCE DE LA COMBE	SAUSSES	1 341	EAU POTABLE	SOUT	BNPE

na	LIOUC	DALUIS	5 250	EAU POTABLE		Guy Maunier
na	LIOUC	DALUIS	52 500	ARROSAGE	CAPTAGE	Guy Maunier
	Bona Aigua		31 536	EAU POTABLE (AEP)		Tennevin
	Granges d'auavare		126000- 400000	EAU POTABLE (AEP)		Ivaldi 1998

[Retour au texte](#)

Annexes 12 : Carte de localisation des sources dont le débit est connu.



La BNPE recueille des mesures de débit pour 38 points de captage sur le massif du Dôme de Barrot. Mais la localisation de la plupart de ces points de captage est inconnue. Néanmoins, grâce à 8 rapports de « Délimitation des périmètres de protection des captages » nous disposons de la localisation précise de ces points de captage ainsi que de leur débit moyen. La localisation et le débit de certains points de captage sont connus. Ces données aident à appréhender la part des précipitations qui s'infiltrent.

[Retour au texte](#)

Annexes 13 : Tableaux des données de projection climatique pour les précipitations solides sur la maille contenant la Réserve des gorges de Daluis.

Précipitation solide annuelle moyenne (mm)			
	Années de référence (1951-2006)	Future proche (2020 -2060)	Future lointain (2060-2100)
Référence	149		
RCP 2.6	149	86	93
RCP 4.5	149	103	59
RCP 8.5	149	98	30

Taux de variation des précipitations solide annuelle moyenne (%)			
	Années de référence (1951-2006)	Future proche (2020 -2060)	Future lointain (2060-2100)
Référence	100%		
RCP 2.6	100%	-42%	-38%
RCP 4.5	100%	-31%	-60%
RCP 8.5	100%	-34%	-80%