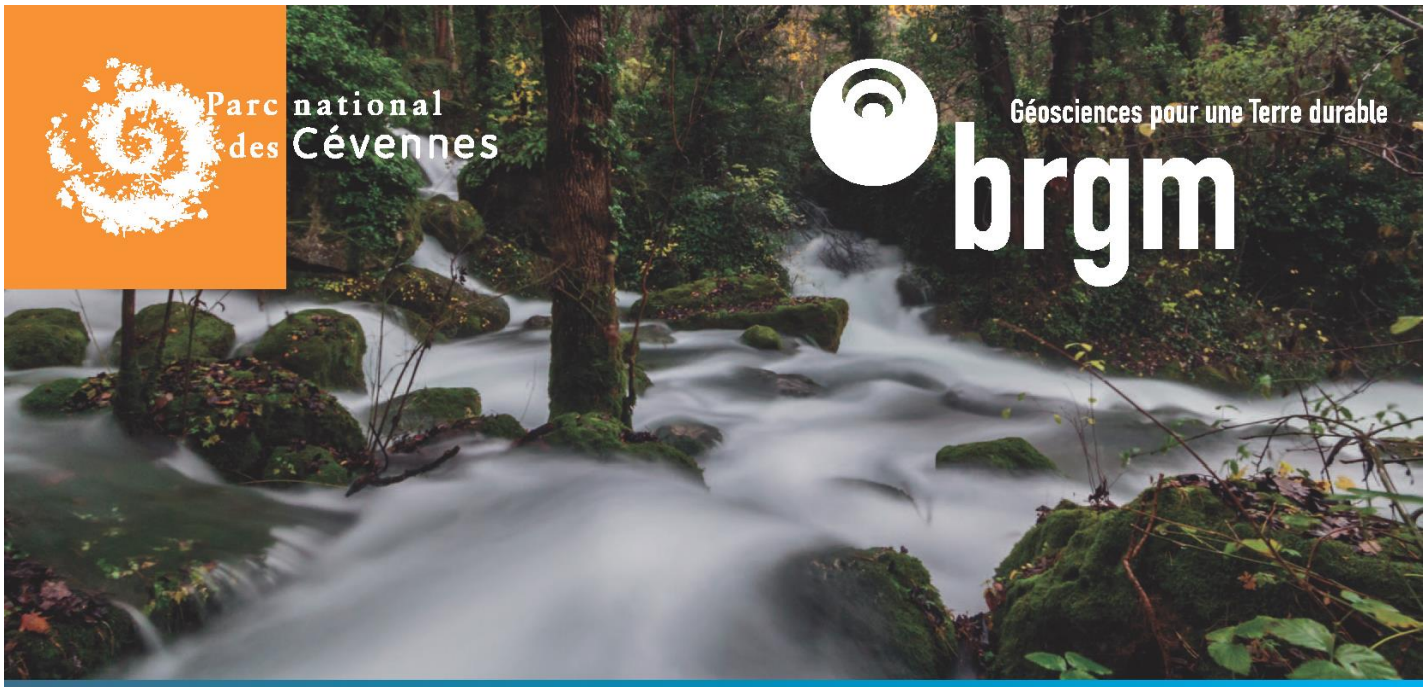
Parc national des Cévennes

Géosciences pour une Terre durable
brgm

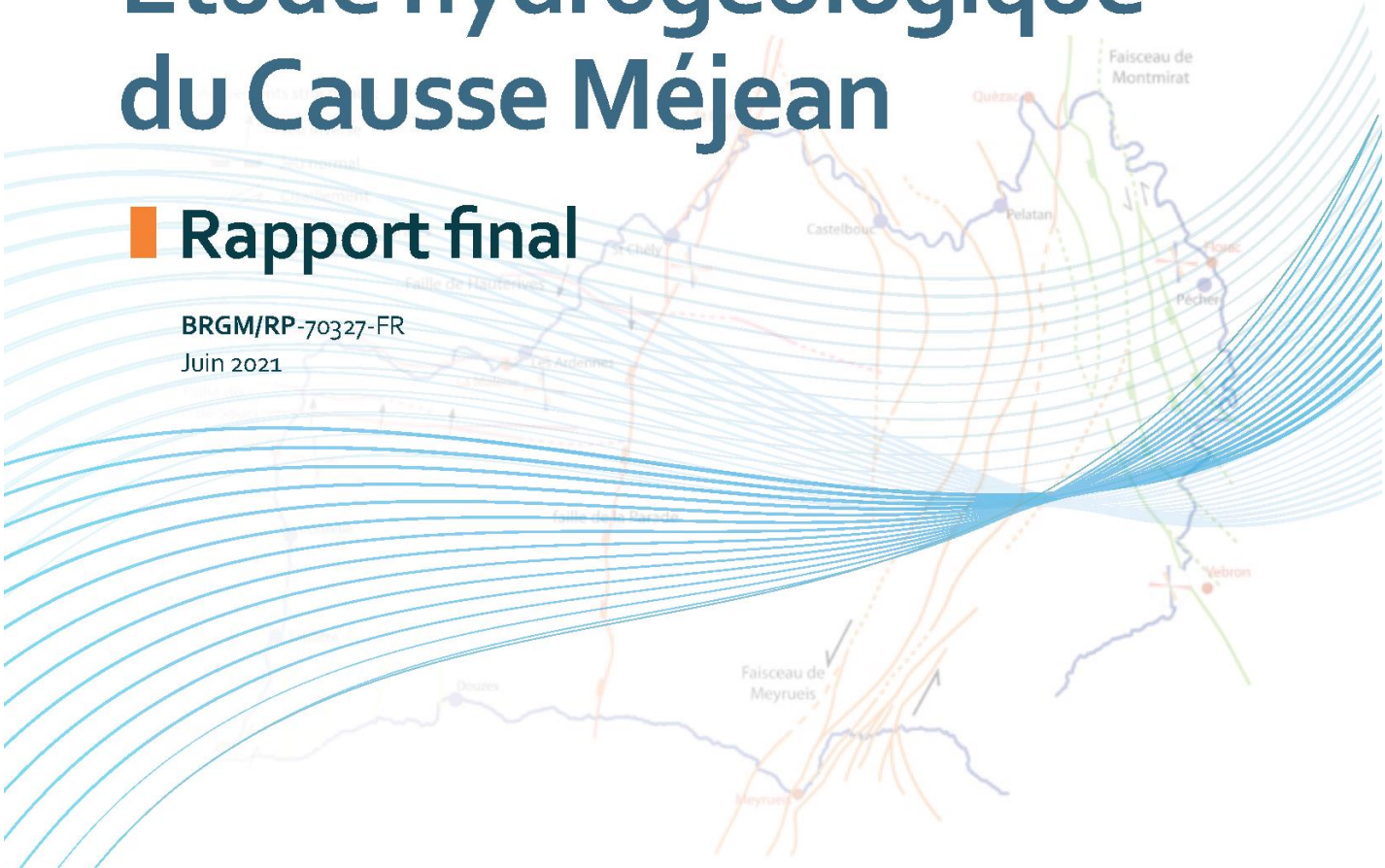


Document public

Étude hydrogéologique du Causse Méjean

Rapport final

BRGM/RP-70327-FR
Juin 2021



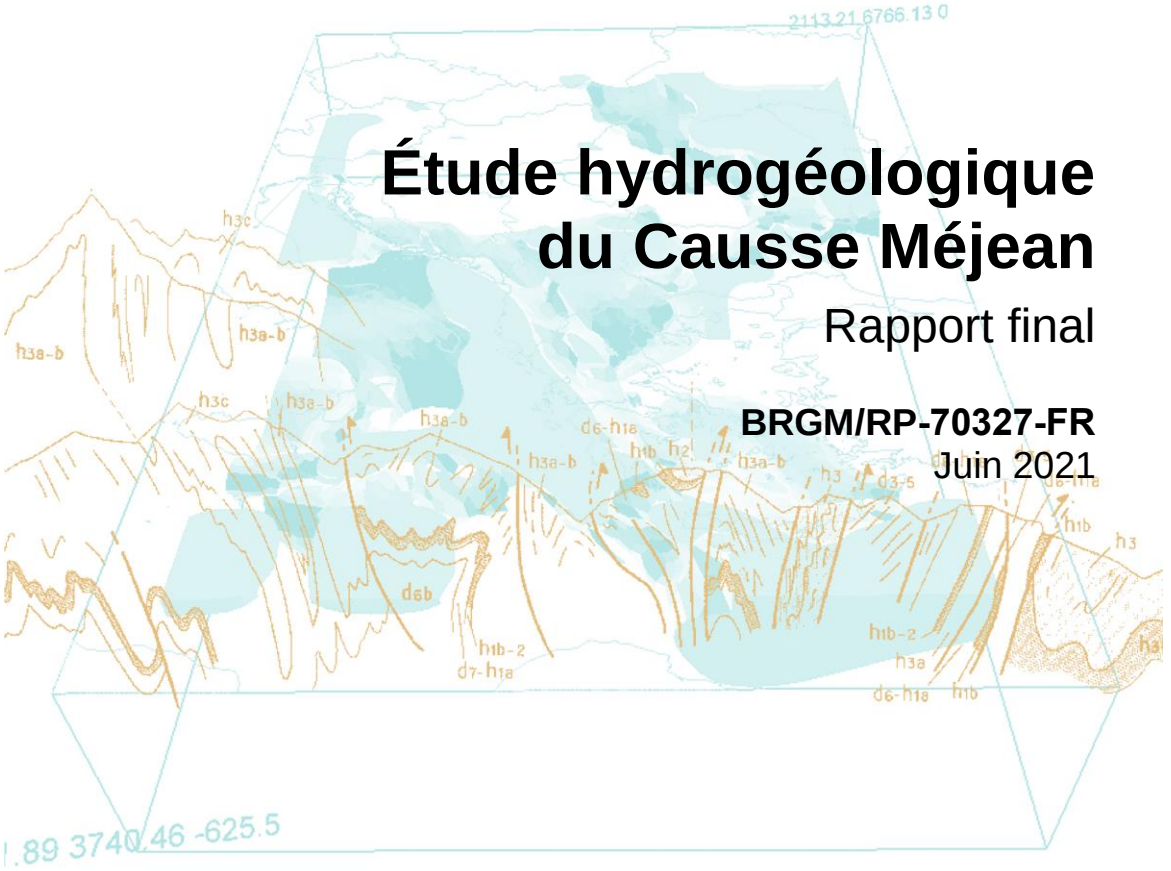
La Région Occitanie Pyrénées - Méditerranée

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

eau GRAND SUD-OUEST
AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE



Document public



Étude hydrogéologique du Causse Méjean

Rapport final

BRGM/RP-70327-FR
Juin 2021

Document public

Étude hydrogéologique du Causse Méjean

Rapport final

BRGM/RP-70327-FR
Juin 2021

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM AP15LRO009

V. Bailly Comte
Avec la collaboration de
C. Lamotte, Y. Manche, A. Soulignac et A. Jacquet

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : B. Ladouche	Nom : A. Blum
Fonction : Hydrogéochimiste	Fonction : Directrice régionale Occitanie
Date : 22/01/2021	Date : 26/01/2021
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : Eau souterraine, Hydrologie karst, Traçage, Géochimie, Isotope, Lozère, Causse Méjean.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

BAILLY COMTE V. (2021) - Étude hydrogéologique du Causse Méjean, rapport final. BRGM/RP-70327-FR, 214 p.,84 fig.,35 tab., 6 ann.

© BRGM, **2021**, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'étude hydrogéologique du Causse Méjean a été menée par le Parc national des Cévennes (PnC) et le BRGM durant quatre années (2016-2020). L'objectif de cette étude est d'améliorer les connaissances sur les eaux souterraines de ce plateau karstique, délimité du Causse de Sauveterre au nord par les gorges du Tarn, et du Causse Noir au sud par celles de la Jonte. Il s'agit au final d'acquérir les informations nécessaires pour assurer la protection de la ressource en eau à l'échelle du Causse Méjean, tant du point de vue quantité (quantification de la ressource) que qualité (vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis des activités humaines).

Pour mener à bien cette étude, un réseau de suivi quantitatif en continu (stations hydrométriques, station météorologique) et qualitatif (température, conductivité électrique, turbidité, fluorescence naturelle) a été mis en place sur les principaux exutoires, complété par des campagnes de traçages artificiels (22 injections, totalisant 60 kg de traceurs), des campagnes de prélèvements d'eau (trois en basses eaux, deux en hautes eaux) pour des analyses géochimiques et isotopiques. L'interprétation de l'ensemble de ces données a permis d'aboutir à la délimitation des bassins hydrogéologiques du Causse Méjean, ainsi qu'à une carte de synthèse de l'organisation spatiale des écoulements des eaux souterraines du territoire. Les principaux exutoires du Causse ont été caractérisés en fonction de leur comportement hydrodynamique et hydrochimique.

L'étude du bilan hydrologique sur l'ensemble des systèmes étudiés montre que la recharge à la surface du Causse Méjean par les précipitations est largement suffisante pour expliquer les volumes d'eau écoulés par les différents systèmes karstiques étudiés. Une part non négligeable de cette recharge (de l'ordre de 30 %) pourrait même s'écouler vers d'autres exutoires (sources dans le Tarn par exemple). Du point de vue hydrodynamique, on observe une évolution progressive du degré de karstification de l'est vers l'ouest, entre les systèmes les plus karstifiés à proximité du (paléo) contact cévenol (Pêcher, Pélatan) vers des systèmes peu fonctionnels comblés d'altérites qui ont un comportement plus inertiel de type « aquifère poreux » (Ironselle).

Le système des Ardennes présente des réserves importantes (Vd=6 Mm^3) associées au débit moyen le plus élevé des systèmes étudiés (1.0 m^3/s). Il constitue ainsi la plus grande ressource en eau karstique du Causse. Dans la vallée de la Jonte, les résurgences du Maynial et des Douzes sont alimentées par les pertes de la Jonte à hauteur de 60 % d'après les analyses isotopiques de l'eau et du strontium. Les 40 % restant proviennent de la recharge sur le Causse Méjean, notamment au niveau du bassin versant du ravin des Bastides, mais également de la recharge sur le Causse Noir, directement ou via les systèmes de perte/résurgence comme celui des Sourguettes.

Les résultats de l'étude hydrogéologique ainsi que de l'étude géologique et géomorphologique (BRGM RP-68189-FR) ont été utilisés pour obtenir grâce à la méthode PaPRIKa la carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique du Causse Méjean. Une analyse spatialisée des pressions anthropiques a également été menée pour interpréter ces informations en termes de risque de contamination de la ressource, notamment en ce qui concerne les pressions d'origine agricole. Ainsi, on montre que des activités agricoles pourraient être à l'origine des teneurs plus élevées en nitrates observées sur le système karstique du Moulin de Pélatan et du Pontet, ainsi que d'une plus grande présence de coliformes sur les suivis disponibles sur le portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines (ADES) pour le captage AEP du Moulin de Pélatan. De plus, on note que les deux lagunages de la STEP de Mas Saint-Chély au fonctionnement défectueux sont situés sur un secteur à forte vulnérabilité, drainé très probablement par le système karstique de Saint-Chély/Cénarette.

Tout au long de l'étude, le PnC et le BRGM se sont attachés à valoriser les résultats sous la forme de publications scientifiques et de différentes initiatives à destination du territoire concerné (réunions publiques, exposition, articles dans le journal du Parc, bulletins à large diffusion auprès de la population, communication auprès des scolaires, ...).

Sommaire

1. Introduction 13

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE 13

1.2. ORGANISATION DU PROJET 14

2. Réseau de mesure et données associées 17

2.1. RÉSEAU DE SUIVI QUANTITATIF : DESCRIPTION DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES ET CLIMATIQUES 17

2.1.1. Sélection et aménagements des stations hydrométriques 17

2.1.2. Données climatiques 29

2.2. RÉSEAU DE SUIVI QUALITÉ : SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE, FLUORESCENCE ET TURBIDITÉ 30

2.3. GESTION DES DONNÉES ET CARTOGRAPHIE DU RÉSEAU DE MESURE 30

3. Étude hydrodynamique 31

3.1. OBJECTIFS ET MÉTHODES MISES EN ŒUVRE 31

3.2. ANALYSE DES DONNÉES HYDROCLIMATIQUES AU PAS JOURNALIER 32

3.2.1. Analyse de l'hydrogramme 32

3.2.2. Analyses corrélatoires de la réponse pluie-débit 43

3.2.3. Bilan hydrologique et estimation de la surface du bassin d'alimentation 47

3.3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE 53

4. Étude hydrochimique et traçage naturel 55

4.1. OBJECTIFS ET MÉTHODES MISES EN ŒUVRE 55

4.1.1. Campagnes spatiales 55

4.1.2. Évolutions temporelles 57

4.2. ANALYSE DES IONS MAJEURS 58

4.2.1. Résultats des campagnes spatiales 58

4.2.2. Évolution pluri-annuelle à partir des suivis ADES 62

4.3. CHIMIE ISOTOPIQUE ET ÉLÉMENTS TRACES 64

4.3.1. Isotopes stables de l'eau 64

4.3.2. Isotopes du Strontium 67

4.4. PHYSICO-CHIMIE EN CONTINU 72
4.4.1. Fluorescence naturelle et turbidité 72
4.4.2. Conductivité et température 80

4.5. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE HYDROCHIMIQUE 89

5. Tracage artificiel 91

5.1. OBJECTIFS ET MÉTHODES MISES EN ŒUVRE 91

5.2. DIMENSIONNEMENT, RÉALISATION ET RÉSULTATS DES TRAÇAGES 92
5.2.1. Conditions d'injection 92
5.2.2. Traçage des exutoires 95
5.2.3. Suivis des exutoires et méthode de correction du bruit de fond 96
5.2.4. Résultats 101

5.3. INTERPRÉTATION 104
5.3.1. Courbe de restitution 104
5.3.2. Interprétation des échecs 106
5.3.3. Conséquences sur l'exploitation des données antérieures 106
5.3.4. Modélisation par un modèle d'advection/dispersion et caractérisation de la DTS 107

6. Synthèse des résultats pour la délimitation des bassins d'alimentation des sources du Causse Méjean et la définition des potentialités aquifères 113

6.1. DÉLIMITATION DES BASSINS D'ALIMENTATION 113
6.1.1. Méthode 113
6.1.2. Résultats 118

6.2. COMPARAISON AVEC LES SURFACES CALCULÉES PAR BILAN 120

6.3. CARTE DE SYNTHÈSE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS DU CAUSSE MÉJEAN 121

6.4. POTENTIALITÉS AQUIFÈRES DU CAUSSE MÉJEAN 122
6.4.1. Méthode 122
6.4.2. Résultat 122
6.4.3. Interprétation et discussion 123

7. Risque de pollution de la ressource en eau karstique 125

7.1. VULNÉRABILITÉ À LA POLLUTION 125
7.1.1. Présentation de la méthode PaPRIKa 125
7.1.2. Cartographie des critères 125
7.1.3. Carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource 134

7.2. PRESSIONS ANTHROPIQUES 138
7.2.1. Zone d'étude 138
7.2.2. Méthodologie 138
7.2.3. Résultat 140

7.3. CROISEMENT VULNÉRABILITÉ/PRESSION/ÉTAT QUALITATIF 150
7.3.1. Activités agricoles 150
7.3.2. Transport 152
7.3.3. Assainissement 153
7.3.4. Synthèse des risques de pollution de la ressource en eau par système karstique 153

8. Conclusion et perspectives 157

8.1. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR L'ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DU CAUSSE MÉJEAN 157

8.2. PERSPECTIVES 158

9. Bibliographie 161

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation des Grands-Causses, du territoire du PnC et du Causse Méjean sur le fond géologique du BRGM au 1/1 000 000. 13

Figure 2 : Points de suivis météorologiques, hydrodynamiques et physico-chimiques pour l'étude hydrogéologique du Causse Méjean reportés sur le fond OpenTopoMap. 17

Figure 3 : Source du Pêcher en crue – Y. Manche. 18

Figure 4 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source du Pêcher (BSS002BLGA). 18

Figure 5 : Relève des données à la source de Castelbouc n° 1 – la sonde de mesure de niveau, température et conductivité et le fluorimètre sont logées dans le tube PVC fixé à la paroi – Ph. Crochet. 19

Figure 6 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source de Castelbouc 1 (BSS002BLDX). 20

Figure 7 : Vue depuis le Tarn de la cascade de la source du Moulin de Pélatan – Y. Manche. 21

Figure 8 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source du Moulin de Pélatan (BSS002BLEU). 22

Figure 9 : Vue depuis le Tarn de la cascade de la source de Saint-Chély Centre – Y. Manche. 22

Figure 10 : Relations hauteur/débit pour les stations hydrologiques des sources de Saint Chély Centre (à gauche, BSS002BKZE) et du Moulin de Cénarette (à droite, BSS002BLBE). 23

Figure 11 : Source des Ardennes – Y. Manche. 24

Figure 12 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source des Ardennes. 25

Figure 13 : Tube contenant la sonde de mesure de pression absolue et conductivité/température dans le plan d'eau du siphon en amont de la source de l'Ironselle – Crochet Ph. 25

Figure 14 : Restitution de l'uranine lors du jaugeage par dilution du 21 septembre 2017 à la source de l'Ironselle depuis le siphon. 26

Figure 15 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source de l'Ironselle. 27

Figure 16 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique du Rozier. 28

Figure 17 : Source des Douzes – Ph. Crochet. 28

Figure 18 : Station météorologique du Villaret – Y. Manche. 29

Figure 19 : Analyse des débits classés (à gauche) utilisant la loi demi-normale sur les débits journaliers, et report (à droite) des ruptures de pente identifiées sur les hydrogrammes. 34

Figure 20 : Résultats des analyses de récessions reportées sur les hydrogrammes des sources. 38

Figure 21 : Résultats des analyses de récessions reportées dans le diagramme i=f(k) en coordonnées semi-logarithmiques, la taille des points est proportionnelle au débit moyen journalier donné dans le Tableau 13. 40

Figure 22 : Cercle de corrélation entre les chroniques de débit des systèmes karstiques et les facteurs. 42

Figure 23 : Corrélogrammes simples (à gauche – coube grise : débit ; courbe noire : précipitations) et croisés (à droite) de la pluie et des débits journaliers. 45

Figure 24 : Classification des systèmes étudiés selon la valeur maximale du corrélogramme croisé pluie/débit et le pouvoir régulateur issu de l'analyse des récessions. La taille du point est directement proportionnelle au débit moyen journalier sur les cycles hydrologiques 2017/2018 et 2018/2019. 47

Figure 25 : Moyennes mensuelles interannuelles (cycles 2017-2018 et 2018-2019) estimées par les méthodes de Thornthwait, Dingman et Edijatno et Michel à l'aide de l'outil ESPERE. 48

Figure 26 : Comparaison des hydrogrammes obtenus aux différentes stations hydrologiques. 49

Figure 27 : Comparaison des hydrogrammes observés dans la Jonte à l'amont (station O3154020) et à l'aval (station du Rozier mise en place dans le cadre du projet). 50

Figure 28 : Comparaison des débits moyens des systèmes karstiques étudiés, seuls les débits associés au drainage du Causse Méjean sont pris en compte pour les exutoires dela Jonte. 52

Figure 29 : Carte de synthèse des résultats de l'étude hydrodynamique. 54

Figure 30 : Carte de localisation des différents points de prélèvements selon le type d'analyse ou l'origine de la donnée, reportée sur le fond OpenTopoMap. 56

Figure 31 : Diagrammes ternaires et résultats des analyses ACP pour les campagnes spatiales – H1 et H2 correspondent aux deux campagnes de hautes eaux. 60

Figure 32 : Relation nitrates/chlorures (données du projet + moyennes ADES). 61

Figure 33 : Graphique des résultats des analyses stables de l'eau. 66

Figure 34 : Droite de mélange permettant de quantifier la contribution des eaux de la Jonte (Perte de la Jonte, Capelan) à l'alimentation du système des Douzes par mélange avec les eaux du Causse Méjean de type Castelbouc ou Ardennes – les droites sont graduées tous les 10 %. 66

Figure 35 : Évolution du rapport isotopique du Sr depuis le Cambrien (Burke et al. 1982). 68

Figure 36 : Diagramme 87Sr/86Sr = f(1/Sr) – les droites de mélange tracées depuis le pôle Jonte sont graduées tous les 10 %. 71

Figure 37 : Évolutions comparées du débit, des précipitations horaires, de la conductivité, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Pêcher en juin 2017. 73

Figure 38 : Évolutions comparées du débit, des précipitations horaires, de la conductivité électrique, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Pêcher en avril 2019. ..73

Figure 39 : A - Évolutions comparées du débit, de la conductivité électrique, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Pêcher en mars 2017. B - Ruisseau du Pêcher lors de la crue de Mars 2017, photo prise depuis le bâtiment du PnC le 23 mars 2017 – Y. Manche. 74

Figure 40 : Évolutions comparées du débit, de la conductivité électrique, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Moulin de Pélatan en mai 2018. 75

Figure 41 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source de Castelbouc n° 1 de janvier 2018 à mai 2018. 76

Figure 42 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Moulin de Cénarette du 15 octobre 2018 au 15 janvier 2020 – le débit total correspond au cumul du débit des sources de Saint Chély et du Moulin de Cénarette. 76

Figure 43 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Moulin de Cénarette du 1er avril 2018 au 1er juillet 2018 – le débit total correspond au cumul du débit des sources de Saint Chély et du Moulin de Cénarette. 77

Figure 44 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source des Ardennes du 14 octobre 2018 au 1er février 2019. 77

Figure 45 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité, de la température, de la conductivité électrique et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source de l'Ironselle du 1er janvier 2018 au 15 janvier 2018. 78

Figure 46 : Chroniques disponibles de conductivité électrique spécifique journalière. 83

Figure 47 : Distribution statistique de la conductivité électrique spécifique journalière, classes de 10µS/cm. 84

Figure 48 : Corrélogramme croisés Débit/Conductivité. 88

Figure 49 : Injection du traceur à -400m, aven de la Cheminée (T2a). 92

Figure 50 : Dispositif mis en place pour le traçage de l'aven Armand depuis la plateforme (T13) – Ph Crochet. 93

Figure 51 : mesure de débit à Castelbouc 3 – Y. Manche. 95

Figure 52 : Interface graphique développée sous MATLAB® présentant les résultats obtenus à la source de Castelbouc 1 suite au multi-traçage du 18 mars 2018 à l'aven des Loups (T1a, sulforhodamine, 4 kg) et à l'aven du Pic d'Usclats (T1b, uranine, 4 kg). 97

Figure 53 : Résultats de l'application de la méthode multi-optique de correction de bruit de fond comparés à l'évolution du débit à la source des Ardennes suite à l'injection de 3 kg d'uranine dans l'aven de la Fumade le 2 décembre 2019 (T16b). 98

Figure 54 : Analyse des résultats du fluorimètre comparés à l'évolution du débit à la source des Ardennes (A) et de Saint-Chély (B). 99

Figure 55 : Comparaison des résultats des fluorimètres obtenus aux exutoires du système Saint-Chély/Cénarette lors du traçage de l'aven de la Fumade de 2013 (Barbier, 2013, graphique du haut) et du traçage T15 de l'aven du Devès (graphique du bas). 100

Figure 56 : Courbes de restitution comparées à l'évolution du débit des exutoires. 103

Figure 57 : Carte des relations hydrauliques mises en évidence par traçage avec report des traçages antérieurs sélectionnés et des points d'injection n'ayant pas donné lieu à une restitution – coordonnées en Lambert 93. 104

Figure 58 : Distribution des temps de séjour mesurées (rouge) et modélisées (bleu) comparées à l'évolution du débit pour chaque traçage. La flèche verticale identifie la fine de la période de calage pour les restitutions perturbées par l'évolution du débit. 110

Figure 59 : Relations entre le pic (mode hmod) de la DTS et le temps d'apparition du pic (tmod) pour les différents traçages réalisés, comparées à l'évolution théorique pour Pe=40+/-20. 112

Figure 60 : Schéma structural du Causse Méjean. Cinq groupes structuraux se distinguent : la faille de la Parade (rouge), les failles majeures est-ouest (rose), le faisceau de Meyrueis (orange), le faisceau de Montmirat (vert), et des failles annexes du faisceau du Rozier (jaune). Les directions de mouvements ainsi que certaines structures importantes sont également représentées. 114

Figure 61 : Carte des bassins d'alimentation des systèmes karstiques drainant le Causse Méjean – coordonnées en Lambert 93. 119

Figure 62 : Comparaison des surfaces des bassins d'alimentation estimées par bilan hydrologique aux surfaces cartographiées. 120

Figure 63 : Carte de synthèse des écoulements souterrains du Causse Méjean sur le fond géologique harmonisé au 1/50 000 du BRGM – coordonnées en Lambert 93. 121

Figure 64 : Analyse cartographique des potentialités aquifères du Causse Méjean. 123

Figure 65 : Carte du sous-critère ES relatif à l'état de surface. 126

Figure 66 : Carte du sous-critère E relatif à l'existence d'un aquifère épikarstique, assimilé à la présence d'un aquifère perché dans le cadre de cette étude. 127

Figure 67 : Carte du sous-critère S relatif à l'existence d'une couverture pédologique et géologique protectrice. 128

Figure 68 : Carte du sous-critère ZNS relatif aux caractéristiques de la zone non saturée. 129

Figure 69 : Carte de vulnérabilité définie par le critère P de protection vis-à-vis de l'infiltration. 130

Figure 70 : Carte de vulnérabilité définie par le critère R relatif à la nature lithologique de la roche réservoir. 131

Figure 71 : Carte de vulnérabilité définie par le critère I relatif à l'infiltration. 133

Figure 72 : Carte de vulnérabilité définie par le critère Ka relatif au degré de karstification (fonctionnement karstique). 134

Figure 73 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque de la ressource karstique du Causse Méjean – résultats des six tests de pondération. 135
Figure 74 : Indice de vulnérabilité globale calculée pour chaque bassin d'alimentation des systèmes karstiques du Causse Méjean. 136
Figure 75 : Carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource karstique du Causse Méjean. 137
Figure 76 : Zone d'étude des pressions anthropiques. 138
Figure 77 : STEU de la zone d'étude et zones d'ANC. 141
Figure 78 : Analyse cartographique du Registre Parcellaire Graphique par type de cultures. 143
Figure 79 : Répartition des cheptels et localisation des bâtiments agricoles – la taille des diagrammes est proportionnelle au nombre total de têtes (Source : recensement-agricole.agriculture.gouv.fr). 145
Figure 80 : Localisation des principales activités industrielles et commerciales, liste des ICPE et données de la base BASIAS. 146
Figure 81 : Infrastructures de transport et parkings de la zone d'étude. 148
Figure 82 : Sites d'intérêt et d'accueil touristique. 150
Figure 83 : Cartographie du risque de pollution de la ressource en eau souterraine lié aux activités agricoles. 151
Figure 84 : Report des principales routes sur la carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique, zoom sur trois secteurs de la zone d'étude – A : Montbrun, B : Florac et C : Ravin des Bastides 152

Liste des tableaux

Tableau 1 : Jaugeages réalisés sur les différents exutoires du système de Castelbouc, en l/s. 20
Tableau 2 : Estimation du débit du système des Ardennes à partir des résultats d'essais de traçage. 24
Tableau 3 : Jaugeages et estimation du débit par interprétation du traçage MT2 pour le système karstique de l'Ironselle. 26
Tableau 4 : Détails du réseau de suivis physico-chimique et de fluorescence en continu sur les principaux exutoires. 30
Tableau 5 : Résultats du calage des récessions selon la méthode de Mangin (1975). 39
Tableau 6 : Résultats du calcul des paramètres k et i pour la classification des systèmes karstiques selon la méthode de Mangin (1975). 40
Tableau 7 : Matrice de corrélation de Pearson sur les données journalières des précipitations. 41
Tableau 8 : Matrice de corrélation (Pearson) entre les différentes chroniques de débit journalier. 42
Tableau 9 : Tableau de pondération des postes pluviométriques pour chaque système karstique au pas journalier. 43
Tableau 10 : Statistiques descriptives et résultats des analyses corrélatoires. 45
Tableau 11 : Données climatiques et estimation de la recharge annuelle pour les cycles 2017-2018 et 2018-2019. 48
Tableau 12 : Estimation du débit moyen annuel des apports karstiques à la Jonte liés à la recharge sur les Causses Noir et Méjean. 50
Tableau 13 : Résultats des calculs de bilan hydrologique sur les différents systèmes karstiques étudiés. 51
Tableau 14 : Analyse statistique des données de qualité disponibles sous ADES – concentrations en mg/l (μ : moyenne, σ : écart type), données microbiologiques en nombre pour 100 mL. 63

Tableau 15 : Résultats des analyses isotopiques des stables de l'eau. 65
Tableau 16 : Résultats des analyses isotopiques du Sr. 70
Tableau 17 : Tableau de synthèse des résultats relatifs aux suivis de turbidité et de fluorescence naturelle. 79
Tableau 18 : Analyse statistique des chroniques de températures. 81
Tableau 19 : Statistiques sur les moyennes journalières de conductivité électrique spécifique de l'eau, avec n le nombre de données, μ la moyenne et σ l'écart type. 84
Tableau 20 : Tableau de synthèse des résutats de l'analyse de corrélation croisée débit/conductivité. 88
Tableau 21 : Tableau de synthèse des principaux résultats apportés par chaque traceur naturel lors de l'étude hydrochimique. 90
Tableau 22 : Liste des traçages réalisés dans le cadre de l'étude. 94
Tableau 23 : Résultats des traçages, information relative à la restitution (R : % de restitution). 101
Tableau 24 : Caractéristiques des DTS modélisées pour chaque traçage. 111
Tableau 25 : STEU de la zone d'étude. 142
Tableau 26 : Répartition des surfaces agricoles recensées au RPG 2017. 143
Tableau 27 : Répartition des cheptels par nombre de têtes. 144
Tableau 28 : Définition du risque de pollution à l'échelle des systèmes karstiques par le croisement de la vulnérabilité intrinsèque et des pressions. 153
Tableau 29 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique du Pêcher. 154
Tableau 30 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique du Moulin de Pélatan. 154
Tableau 31 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de Castelbouc (captage des Estivants). 154
Tableau 32 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de Saint-Chély/Cénarette. 155
Tableau 33 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique des Ardennes. 155
Tableau 34 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de l'Ironselle. 156
Tableau 35 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique des Douzes/Maynial (captage des Douzes). 156

Liste des annexes

Annexe 1 : Relations hauteur-débit : Jaugeage et courbes de tarage 165
Annexe 2 : Résultats des analyses chimiques 169
Annexe 3 : Évolutions comparées du débit, de la fluorescence naturelle et de la turbidité 177
Annexe 4 : Pressions anthropiques : données complémentaires 183
Annexe 5 : Confirmation et impact des pertes de la Jonte sur le forage des Douzes 187
Annexe 6 : Bulletins d'information 191

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les ressources en eau sur le territoire du PnC constituent un enjeu majeur car leur accessibilité conditionne le développement de ce territoire. L'eau est en effet nécessaire à de multiples usages – eau potable et domestique, irrigation agricole, élevage, petite industrie – et le niveau des prélèvements doit rester compatible avec l'intégrité des écosystèmes aquatiques. Aujourd'hui, les besoins en eau augmentent en raison de l'accueil de nouvelles populations et de nouvelles activités à l'année. Parallèlement, le changement climatique tend à réduire la disponibilité des ressources en eau disponibles. Le problème est aggravé en été, lorsque la demande augmente, notamment en raison des activités touristiques, et que simultanément les débits d'étiage sont de plus en plus faibles (charte du PnC, 2013).

D'autre part, le projet de territoire du PNC définit la stratégie de gestion de l'eau avec « la volonté de répondre aux exigences de préservation des masses d'eau et des milieux aquatiques tout en répondant aux besoins d'un développement local durable, essentiel à la vitalité économique et sociale du territoire comme au maintien du caractère du Parc national des Cévennes ».

Les eaux souterraines, peu exploitées encore, sont relativement méconnues sur ce territoire, alors qu'elles pourraient constituer une alternative ou un complément aux eaux superficielles qui répondent principalement aujourd'hui aux usages. Par ailleurs, en alimentant significativement les cours d'eau associés, et notamment la Jonte et le Tarn, elles jouent un rôle déterminant de soutien et de préservation des écosystèmes naturels.

Ainsi, le PnC et le BRGM se sont associés pour améliorer les connaissances sur les eaux souterraines du Causse Méjean. Constitué par un plateau calcaire, le Causse Méjean renferme des aquifères karstiques, délimités du causse de Sauveterre au nord par les gorges du Tarn, et du Causse Noir au sud par celle de la Jonte (Figure 1).

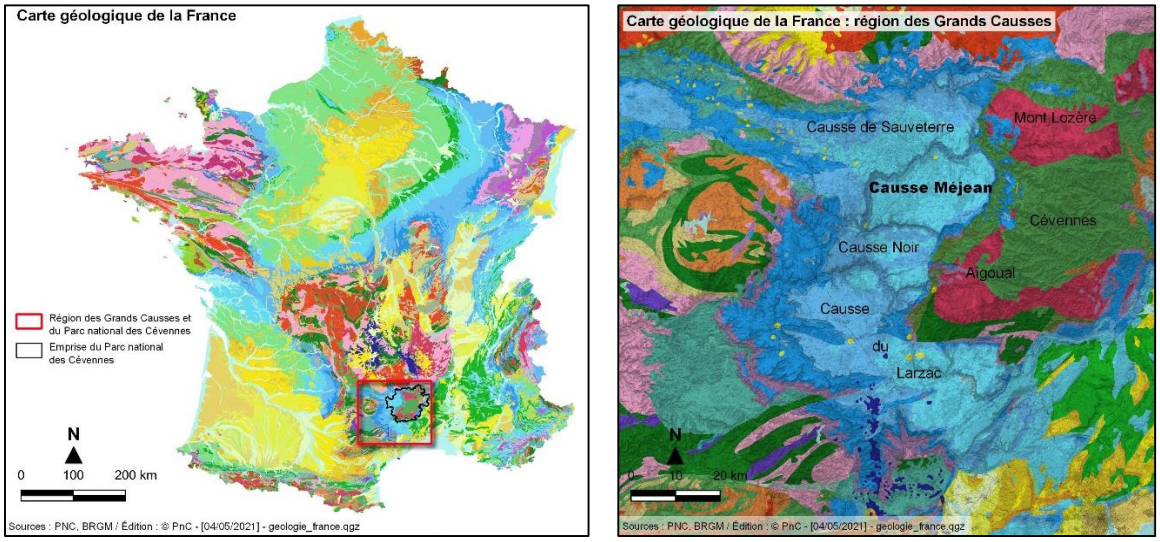


Figure 1 : Carte de localisation des Grands-Causses, du territoire du PnC et du Causse Méjean sur le fond géologique du BRGM au 1/1 000 000.

Une « Pré-étude hydrogéologique du Causse Méjean (Lozère) » financée par le PnC (L. Bechelen, stage M2 AgroParisTech, 2003) et co-encadrée par le Parc naturel Régional des Grands-Causses (PnRGC) et le PnC a permis de réaliser une synthèse partielle des connaissances hydrogéologiques sur le Causse Méjean et de proposer notamment de premières estimations de bilan hydrogéologique et de mise en place de monitoring de sources.

Les objectifs de cette étude ont été définis avec les partenaires, en tenant compte des éléments apportés par la pré-étude. Ils sont les suivants :

- améliorer les connaissances sur la genèse, la structure et le fonctionnement hydrogéologique des systèmes karstiques du Causse Méjean ;
- acquérir les informations nécessaires pour assurer la protection de la ressource en eau à l'échelle du Causse Méjean, tant du point de vue quantité (quantification de la ressource) que qualité (impact des activités humaines) ;
- comprendre le rôle du karst sur les écoulements de surface (perte/apports vis-à-vis de la Jonte et du Tarn) et mieux quantifier les apports allochtones alimentant les karsts binaires (recharge du karst par des écoulements de surface issus du ruissellement en amont hydraulique) ;
- valoriser les résultats sous la forme de publications scientifiques et à destination du territoire concerné (réunions publiques, exposition, article dans le journal du Parc, etc.).

1.2. ORGANISATION DU PROJET

L'organisation suivante est mise en place entre les différents partenaires :

- le BRGM s'est porté maitre d'ouvrage de l'étude ;
- une convention de partenariat associe le BRGM et le Parc national : les réunions, documents, tout élément de communication notamment sont co-construits afin que l'étude reste organisée localement ;
- une convention de partenariat associe le Parc national, le BRGM et le Comité Départemental de Spéléologie de la Lozère (CDS 48) afin que ces derniers soient également des acteurs impliqués dans l'étude et assistent le PnC et le BRGM dans la réalisation des traçages en souterrain.

Concrètement, cela s'est traduit par :

- l'ensemble des réunions (COPIL, COTECH, présentation aux élus, ...) ont été organisées conjointement par le BRGM et le PnC ;
- les suivis réguliers sur le terrain ont été réalisés par le PnC, et les campagnes de terrain plus importantes (installation des stations, prélèvements pour la chimie, …) ont été menées conjointement (PnC/BRGM) ;
- la majorité des traçages a été organisée et réalisée en collaboration avec les spéléologues connaissant le causse Méjean via le CDS 48.

Cette organisation du projet a permis de mener à bien l'ensemble de l'étude, en s'adaptant régulièrement au long des quatre années, en fonction de l'avancement des différentes actions. Cette organisation s'est également traduite par une grande réactivité pour les traçages et les suivis, puisque les spéléologues se sont révélés très disponibles et actifs, et le personnel du Parc présent et proche du lieu de l'étude.

Parallèlement, il a été décidé de communiquer largement auprès du territoire durant tout le long de l'étude afin de partager avec le plus de monde possible le contenu de cet important travail :

- des bulletins destinés à un large public ont été réalisés (en annexe du rapport). Ils ont été très bien reçus par le territoire et sont régulièrement demandés ;
- des animations dans le cadre des actions estivales du Parc ont été menées chaque année (sur différents sites, comme Nîmes le Vieux ou encore Saint Chély du Tarn), qui ont rencontré un franc succès avec jusqu'à 35 personnes ;
- un travail pédagogique a été mené durant 3 années scolaires avec les classes de 5^{e} du collège de Florac 3 Rivières, et la participation à la fête de la science ;
- l'avancement du travail a été régulièrement présenté à la Communauté de Communes Gorges Causses Cévennes.

En 2020, d'autres actions de communications ont été annulées par la crise sanitaire (réunion publique pour les 50 ans du Parc, visite de terrain pour les professionnels). D'autres actions seront donc reportées en 2021 après publication de ce rapport.

Ce rapport constitue le second rapport consacré aux résultats des études hydrodynamiques, hydrochimiques, de traçages artificiels et d'analyse du risque de contamination de la ressource. Il détaille l'ensemble des résultats obtenus et leur interprétation. Il fait suite au rapport BRGM RP-68189-FR dédié à l'étude géologique et la karstogenèse et intègre ses résultats. Il sera suivi d'un rapport court de synthèse à finalité opérationnelle pour le territoire (BRGM/RP-70405-FR).

2. Réseau de mesure et données associées

2.1. RÉSEAU DE SUIVI QUANTITATIF : DESCRIPTION DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES ET CLIMATIQUES

La première étape de l'étude hydrodynamique a consisté à sélectionner les sources devant être instrumentées pour un suivi quantitatif (débit) et qualitatif (conductivité, température, turbidité et fluorescence naturelle) à haute fréquence (<15min) des principaux systèmes karstiques drainant le Causse Méjean sur la durée du projet. Le paragraphe suivant précise pour chaque système karstique étudié les conditions de suivis hydrométriques et la méthode d'obtention des relations hauteur/débit pour calculer les hydrogrammes. La localisation des sources étudiées et des stations météorologiques est présentée sur la figure suivante (Figure 2).

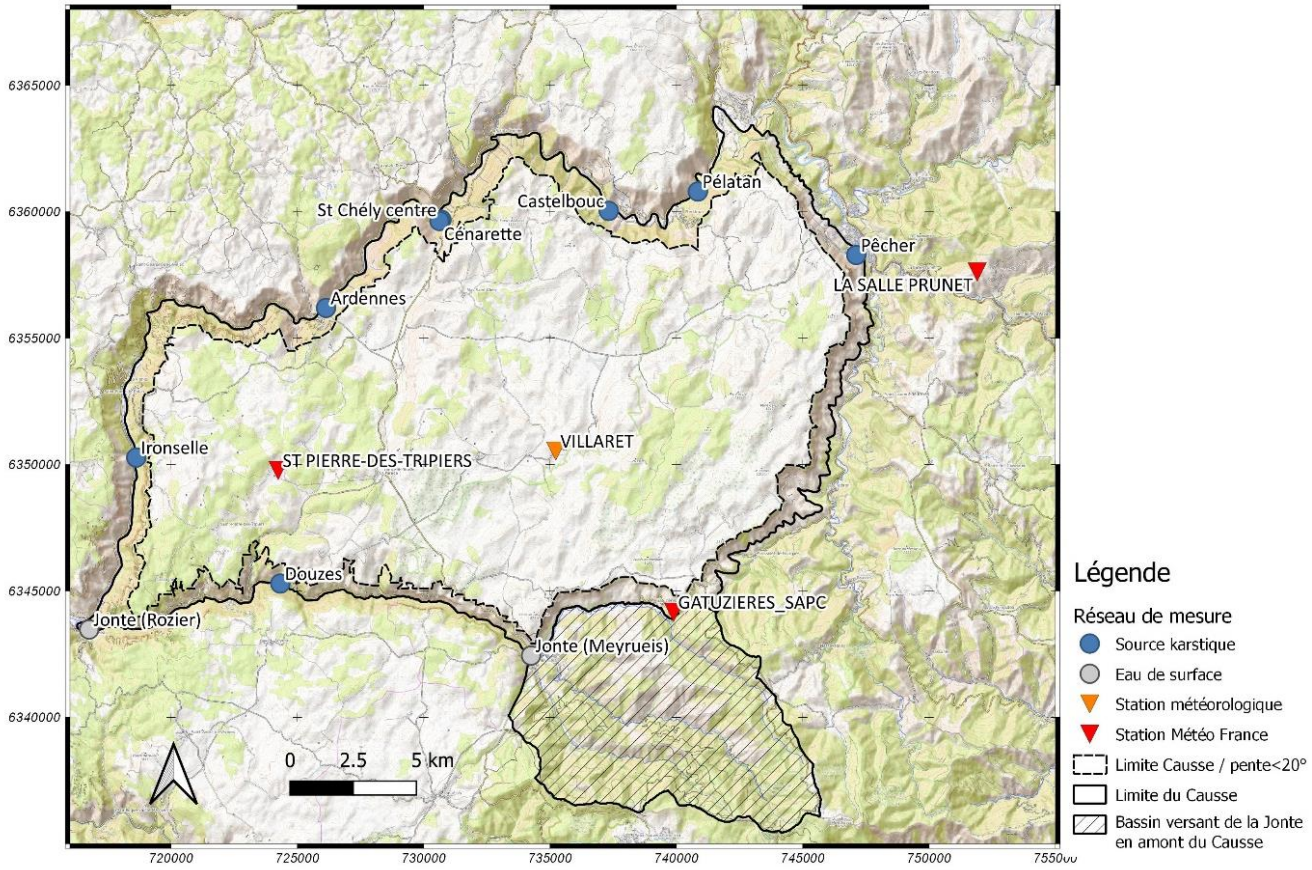


Figure 2 : Points de suivis météorologiques, hydrodynamiques et physico-chimiques pour l'étude hydrogéologique du Causse Méjean reportés sur le fond OpenTopoMap.

2.1.1. Sélection et aménagements des stations hydrométriques

Les études précédentes (Rouquet, 1976 ; Bérard, 1987) et la pré-étude hydrogéologique du Causse Méjean (Bechelen, 2013) ont permis de sélectionner les principaux systèmes karstiques devant faire l'objet d'un suivi quantitatif pour estimer les ressources en eau souterraine du Causse Méjean. Les exutoires associés sont localisés dans les vallées du Tarnon, du Tarn mais aussi de la Jonte. Aucun exutoire n'a été suivi du point de vue hydrodynamique à la surface du Causse.

a) Système karstique du Pêcher



Figure 3 : Source du Pêcher en crue – Y. Manche.

Une station de suivi hydrologique a été mise en place en amont d'un seuil préexistant sous le pont menant à la pisciculture de Florac. Ce suivi permet de prendre en compte les rejets de la pisciculture et du trop-plein de la source mais les débits extraits pour l'utilisation AEP ne sont pas pris en compte. Une échelle limnimétrique a été installée pour une lecture directe des niveaux d'eau et l'établissement d'un niveau repère pour la courbe de tarage. Les jaugeages réalisés dans le cadre du projet permettent d'établir une courbe de tarage tabulée reportée en annexe 1 et représentée sur la Figure 4. Le jaugeage réalisé le 18 janvier 2018 permet de proposer une relation hauteur débit fiable pour des débits atteignant 4 m^3/s.

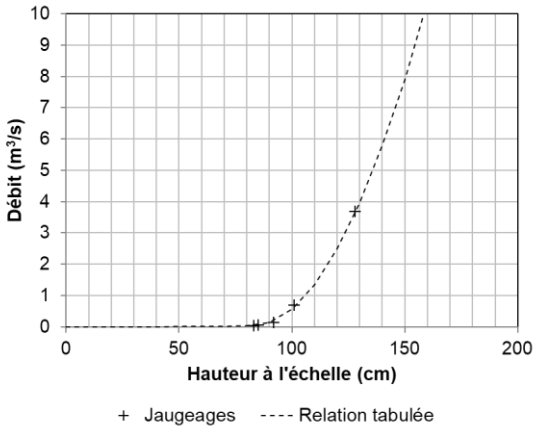


Figure 4 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source du Pêcher (BSS002BLGA).

b) Système karstique de Castelbouc

Seul l'exutoire principal de Castelbouc 1 a été équipé d'une sonde de mesure de type Ecolog® 800 OTT. La station a été mise en place en rive droite juste en amont d'un rétrécissement de la section d'écoulement contrôlée par deux parois rocheuses verticales. Une échelle limnimétrique a été positionnée en rive gauche en face de la sonde.

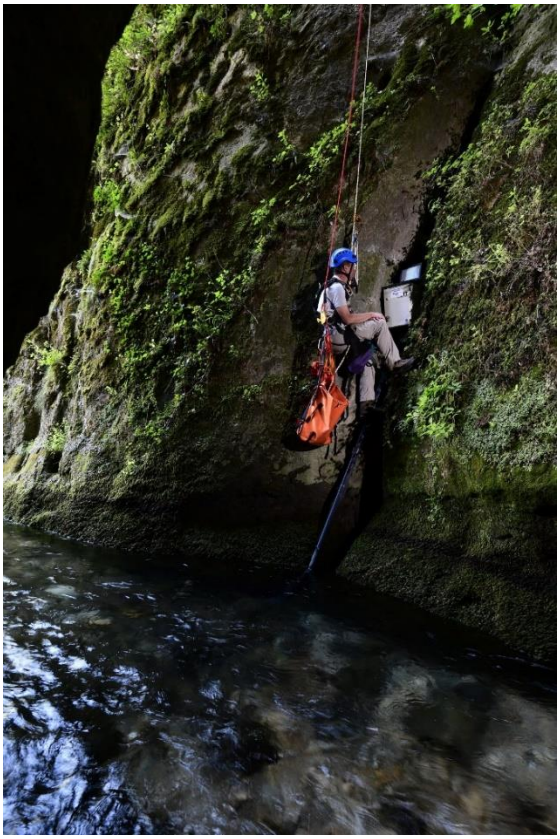


Figure 5 : Relève des données à la source de Castelbouc n° 1 – la sonde de mesure de niveau, température et conductivité et le fluorimètre sont logées dans le tube PVC fixé à la paroi – Ph. Crochet.

Sept jaugeages au courantomètre ou par dilution ont été réalisés sur cet exutoire. Les résultats sont reportés en annexe 1.

Une extrapolation de ces mesures est proposée en tenant compte de l'évolution des paramètres géométriques de la section d'écoulement avec la hauteur d'eau (section d'écoulement, périmètre mouillé et rayon hydraulique). Une régression linéaire a été recherchée entre ces paramètres et les mesures de débits disponibles pour proposer une courbe de tarage tabulée jusqu'à 180 cm (Q=8,60 m^3/s) reportée en annexe 1 et représentée sur la Figure 6.

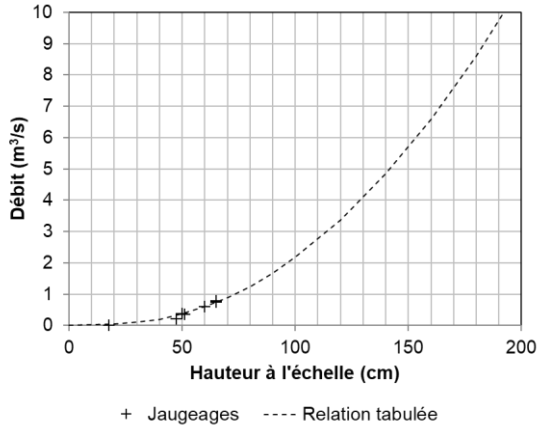


Figure 6 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source de Castelbouc 1 (BSS002BLDX).

Des jaugeages comparatifs ont également été menés aux sources de Castelbouc 2 (BSS002BLBL), 3 (BSS002BLDY), 4 (BSS004ABYF) et à la source des Estivants (BSS004ABYK) par dilution de traceur (uranine). Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau suivant (Tableau 1).

	Castelbouc 1	Castelbouc 2	Castelbouc 3	Castelbouc 4	Estivants
06/02/2019	604	228	<50	<5	262
27/02/2019	740	293	ND	ND	158
13/02/2020	834	333	ND	ND	123

Tableau 1 : Jaugeages réalisés sur les différents exutoires du système de Castelbouc, en l/s.

Ces jaugeages complémentaires permettent d'estimer à 70 % la part du volume annuel du système s'écoulant à Castelbouc 1, principalement par la source de Castelbouc 2, mais ils ne permettent pas de reconstituer l'hydrogramme total du système. Cette information sera utile pour mieux estimer les réserves (cf. 3.2.1.b)) et la surface du bassin d'alimentation par bilan hydrologique (cf. 3.2.3.b)). En très basses eaux, comme lors des étiages de 2017 et de 2019, l'eau s'écoule à travers les éboulis en aval de la station et il n'est plus possible de déterminer l'évolution du débit. Ceci explique deux périodes de lacunes dans les suivis qui ont été corrigées à partir de l'étude des récessions pour mieux estimer le volume annuel écoulé.

c) Système karstique du Moulin de Pélatan



Figure 7 : Vue depuis le Tarn de la cascade de la source du Moulin de Pélatan – Y. Manche.

Une station de suivi hydrologique a été mise en place dans la chambre de captage en amont d'un seuil qui contrôle l'évacuation des eaux, sachant qu'une partie des eaux s'évacue également par une conduite pour l'alimentation en eau du réseau AEP. Le niveau de référence correspond au niveau de débordement du seuil, soit 39 cm sous le haut du muret en rive gauche. Une estimation de la relation hauteur/débit basée sur des a priori hydrauliques (loi de seuils selon des géométries simples) a été réalisée à partir du logiciel BaRatinAGE proposé par l'INRIA. Six jaugeages par dilution de sel ont également été conduits pour contraindre la relation hauteur/débit proposée par la méthode BaRatin. Les résultats de ces jaugeages ainsi que la courbe de tarage tabulée sont reportés dans l'annexe 1 et représentés sur la Figure 8.

Pour les faibles débits, les jaugeages permettent de bien contraindre la relation hauteur/débit lorsque le seuil est dénoyé. Le jaugeage réalisé le 18 janvier 2018 permet de proposer une relation hauteur/débit fiable pour des débits atteignant 0,9 m^3/s. Au-delà, L'estimation par la méthode BaRatin permet d'exploiter les caractéristiques géométriques du site pour mieux extrapoler la relation.

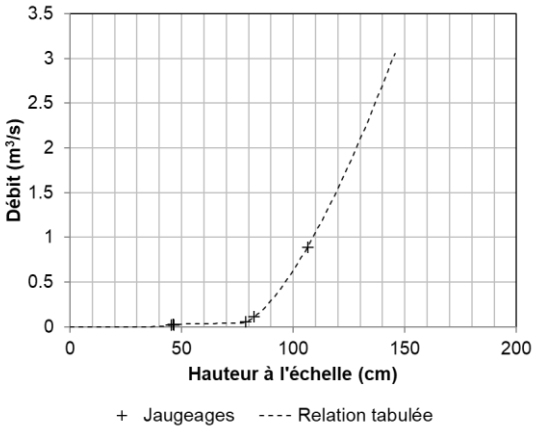


Figure 8 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source du Moulin de Pélatan (BSS002BLEU).

d) Système karstique de Saint-Chély/Cénarette

Ce système karstique présente deux exutoires permanents suivis dans le cadre du réseau patrimonial par le BRGM.

Treize jaugeages ont été réalisés sur ces deux sources pour des débits relativement faibles, et aucune information n'est disponible pour des débits supérieurs à 93 l/s au Moulin de Cénarette (BSS002BLBE) et 307 l/s à la station Saint-Chély Centre (BSS002BKZE).



Figure 9 : Vue depuis le Tarn de la cascade de la source de Saint-Chély Centre – Y. Manche.

Les caractéristiques géométriques de ces stations, et notamment les sections d'écoulement restent relativement simples, même lors des crues, ce qui permet de proposer une extrapolation des observations réalisées en basses eaux pour les hautes eaux. Il n'existe aucun contrôle aval par le Tarn puisque ces sources sont situées plus de 10 m au-dessus du lit du Tarn (Figure 9).

Les jaugeages réalisés à la station de Saint-Chély Centre sont cohérents entre eux et bien répartis sur la gamme de débit 0 - 307 l/s. Les valeurs obtenues sont reportées en annexe 1. Ces jaugeages ont été conservés comme tels pour définir la relation hauteur/débit à l'exception du jaugeage du 16 octobre 2018, en extrapolant la relation par les points H=0,3 cm / Q=1 000 l/s et H=0,4 cm / Q=2 000 l/s.

Pour la station du Moulin de Cénarette, une courbe de tarage passant par le nuage de points pour H proche de 30 cm est proposée, avec une extrapolation par les points H=50, 60 et 70 cm pour Q=500, 800 et 1 000 l/s respectivement. Les courbes de tarage tabulées correspondantes sont fournies dans l'annexe 1 et représentée sur la Figure 8.

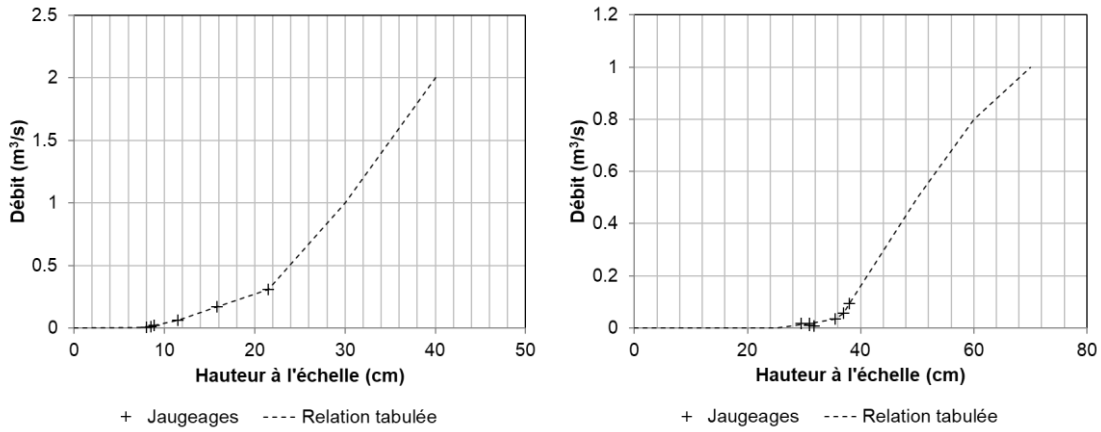


Figure 10 : Relations hauteur/débit pour les stations hydrologiques des sources de Saint Chély Centre (à gauche, BSS002BKZE) et du Moulin de Cénarette (à droite, BSS002BLBE).

Pour ces deux stations, **les débits de crue sont extrapolés sans aucune contrainte**, et sont donc très incertains. Il est proposé dans la suite de l'étude hydrodynamique de ne considérer que le cumul de ces deux exutoires pour caractériser le comportement hydrodynamique du système Saint-Chély/Cénarette.

e) Système karstique des Ardennes

L'exutoire principal de la source des Ardennes (BSS002BKZD) émerge dans le lit du Tarn, à travers les alluvions. Il n'a pas été possible de positionner une station hydrométrique à ce niveau qui ne serait pas directement influencée par le Tarn. Il a donc été décidé de suivre les variations du niveau du plan d'eau accessible dans la cavité des Ardennes n° 2 (BSS004ABYM). Une sonde CTD SWS® 0-10m a été installée dans un tube fixé par un collier métallique, ce dernier servant de repère limnimétrique pour la mesure de la profondeur du plan d'eau. Un baromètre a été installé à proximité immédiate de la cavité pour réaliser la compensation barométrique. Une coloration de l'eau de cette cavité a été réalisée et a permis d'identifier une sortie dans le prolongement du thalweg dans le lit du Tarn. La mesure du plan d'eau est donc probablement influencée par les variations du Tarn, qui restent relativement faibles sur ce tronçon contrôlé par le barrage de la Malène.



Figure 11 : Source des Ardennes – Y. Manche.

Un jaugeage différentiel dans le Tarn a été réalisé par ADCP avec l'aide du PnRGC le 25 avril 2018, permettant d'estimer le débit du système des Ardennes à 1.2 m^3/s pour h=78.4 cm.

Les résultats des traçages T6, T7 et T9 ont été utilisés pour mieux extrapoler la relation hauteur débit, en supposant différentes gammes de % de restitution (Tableau 2). La comparaison avec le jaugeage à 1,2 m^3/s montre que les débits proposés à partir de l'interprétation des courbes de restitution des traçages sont cohérents. Une courbe puissance permet de relier l'ensemble des points pour un % de restitution de 70 %.

	h (cm)	Q (m^3/s), R=50%	Q (m^3/s), R=70%	Q (m^3/s), R=90%
T6	2.4	4.07	5.70	7.33
T7	1.25	1.46	2.04	2.62
T9	1.1	1.17	1.64	2.11

Tableau 2 : Estimation du débit du système des Ardennes à partir des résultats d'essais de traçage.

Les résultats de traçages seront décrits plus en détails dans la section 5. La relation hauteur débit proposée s'appuie sur la loi puissance suivante, avec h exprimée en cm :

$$Q = 0.003485 \times (h + 3)^{4.3829}$$

Équation 1 : Relation hauteur débit pour le système karstique des Ardennes.

La courbe résultante est comparée aux estimations du débit du système sur la Figure 12.

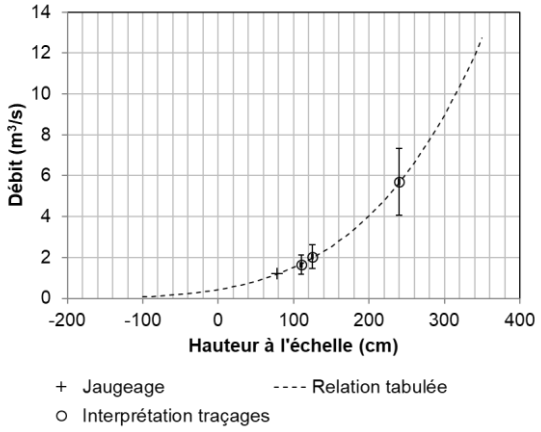


Figure 12 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source des Ardennes.

f) Système karstique de l'Ironselle

La source de l'Ironselle (BSS002CGFJ) présente une sortie permanente en bordure du Tarn qui, comme pour le système des Ardennes ne permet pas de mettre en place un suivi de la hauteur d'eau. Il a donc été décidé de suivre les variations du plan d'eau accessible depuis le siphon auquel on accède depuis la grotte supérieure (BAUMAS, 2016).



Figure 13 : Tube contenant la sonde de mesure de pression absolue et conductivité/température dans le plan d'eau du siphon en amont de la source de l'Ironselle – Crochet Ph.

La vasque se situe approximativement à -6 m par rapport à l'entrée inférieure (BAUMAS, 2016). Un écoulement temporaire lors des crues est observé à ce niveau, ce qui montre que les variations de charge du plan d'eau de la vasque atteignent plusieurs mètres.

Une sonde CTD SWS® 0-10m a été installée dans un tube fixé par un collier métallique. Un repère limnimétrique a été défini sur les parois du puits vertical menant au siphon, permettant ainsi de mesurer la hauteur d'eau à l'aide d'une sonde piézométrique, même lorsque la CTD reste inaccessible. Un baromètre a été installé à proximité immédiate de la cavité pour réaliser la compensation barométrique.

Deux jaugeages par dilution de traceur (uranine) ont été réalisés depuis le siphon, en suivant la restitution à l'exutoire principal au bord du Tarn. Le jaugeage réalisé en très basses eaux (h=-2,65, Q=67,5 l/s) a présenté une restitution bimodale liée à une faible composante d'écoulement intermittent du système.

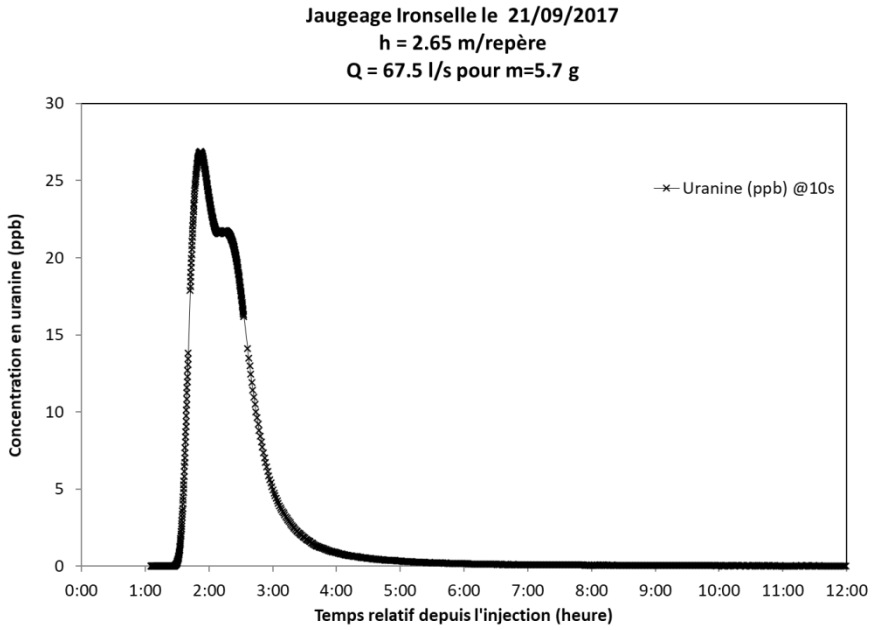


Figure 14 : Restitution de l'uranine lors du jaugeage par dilution du 21 septembre 2017 à la source de l'Ironselle depuis le siphon.

Comme pour le système des Ardennes, le résultat d'un traçage artificiel (MT2) a également été utilisé pour compléter les données disponibles. La restitution observée lors de ce traçage permet de supposer une très bonne restitution, supposée de l'ordre de 80 %, ce qui permet d'ajouter un point intermédiaire cohérent avec les jaugeages par dilution (Tableau 3).

Date	h (m)	Q (l/s)	Méthode
21/09/2017	-2.65	67.5	Dilution
17/01/2018	0.716	230	Dilution
03/05/2017	-1.83	128	Interprétation traçage MT2 (80 %)

Tableau 3 : Jaugeages et estimation du débit par interprétation du traçage MT2 pour le système karstique de l'Ironselle.

La relation hauteur débit proposée s'appuie sur la loi puissance suivante, avec h exprimée en cm et Q en l/s :

$$Q = 123.54 \times (h + 3)^{0.498}$$

Équation 2 : Relation hauteur débit pour le système karstique de l'Ironselle.

Le coefficient de la loi puissance est ici inférieur à 1, ce qui montre qu'il existe de très forte perte de charges entre le point de suivi de la charge hydraulique et la zone d'émergence. La courbe résultante est comparée aux estimations du débit du système sur la Figure 15.

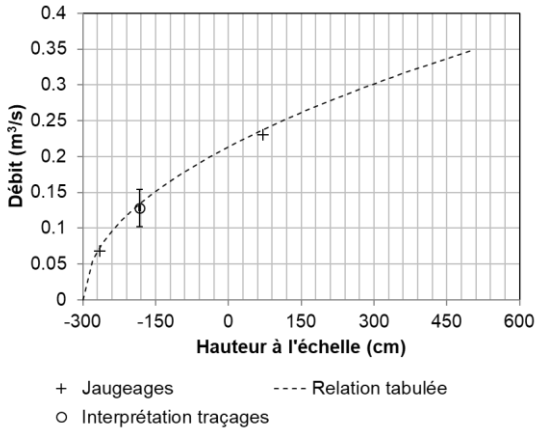


Figure 15 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique de la source de l'Ironselle.

g) Vallée de la Jonte

Les débits journaliers de la Jonte à la station de Meyrueis fournis par la Banque Hydro (station O3194010) ont été utilisés pour quantifier les apports non karstiques au débit de la Jonte.

Une station complémentaire a été mise en place au niveau du pont du Rozier dans le cadre de ce projet pour estimer le débit de la Jonte à l'aval de toutes les résurgences karstiques. Une échelle a été mise en place en rive droite. Quatre jaugeages réalisés au courantomètre OTT MF Pro permettent d'estimer une courbe de tarage pour des débits inférieurs à 5 m^3/s (cf. Annexe 1). Une loi puissance a été proposée pour convertir les hauteurs d'eau en débit (Équation 3), en tenant compte des débits observés à la station amont de Meyrueis pour des niveaux d'eau relativement stables observés au Rozier afin de mieux contraindre l'extrapolation (Figure 16), avec h en cm et Q en m^3/s.

$$Q = 0.0313 \times h^{1.35}$$

Équation 3 : Relation hauteur débit pour le système karstique de l'Ironselle.

La courbe résultante est comparée aux jaugeages du débit de la Jonte au Rozier sur la Figure 16 et aux débits mesurés à l'amont du karst (Meyrueis) sur des périodes relativement stables du niveau d'eau.

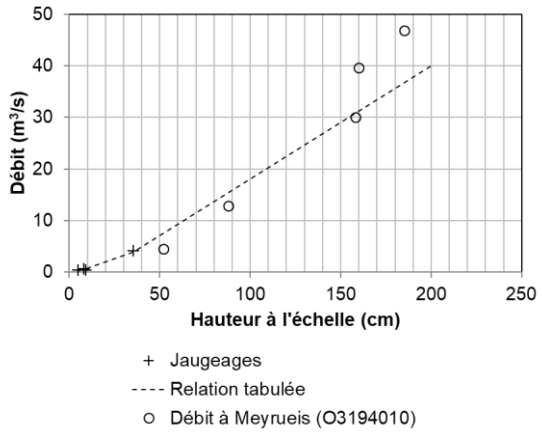


Figure 16 : Relation hauteur/débit pour la station hydrologique du Rozier.

Un suivi de hauteur d'eau a également été mis en place dans la Jonte au niveau d'une sortie d'eau permanente de la résurgence des Douzes (BSS002CGXY). Une échelle limnimétrique et une sonde CTD SWS® 0-10m y ont été installées, ainsi qu'un baromètre à proximité. Ce dispositif avait pour but d'estimer directement le débit de ce système karstique en s'appuyant sur des jaugeages différentiels en cas de pertes partielles de la Jonte. Ceci n'a pas été possible car trop complexe à mettre en œuvre, la donnée de hauteur issue de cette sonde n'a donc pas été exploitée.



Figure 17 : Source des Douzes – Ph. Crochet.

2.1.2. Données climatiques

a) Station météorologique du Villaret

Une station météorologique Campbell Scientific BWS200 a été mise en place au hameau du Villaret au point de coordonnées Lambert 93 X=735218, Y=6350534 (Figure 18).



Figure 18 : Station météorologique du Villaret – Y. Manche.

Cette station permet de suivre le cumul des précipitations, la température, la vitesse du vent et son orientation au pas de 15 min. Ces données ont été converties en données journalières observées à 8h du matin (heure d'hiver) afin de pouvoir être comparées aux données Météo France.

b) Données Météo France

Des données de précipitations journalières complémentaires ont été acquises auprès de Météo France du 1er janvier 2017 au 1er janvier 2020 pour les stations de Gatuzières (station # 48069001) et La Salle Prunet (station # 48186001), ainsi que des données de précipitations journalières et d'ETP (grille de 0.125°, soit environ 12 km autour du point) pour la station de Saint-Pierre des Tripiers (station # 48176002) du 1er septembre 2016 au 5 février 2020.

Ces données ont pour but de mieux décrire la recharge sur le Causse Méjean et l'influence éventuelle des précipitations cévenoles sur la réponse hydrodynamique des systèmes.

2.2. RÉSEAU DE SUIVI QUALITÉ : SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE, FLUORESCENCE ET TURBIDITÉ

À l'exception de la source de Saint-Chély Centre, tous les exutoires suivis d'un point de vue quantitatif ont fait l'objet d'un suivi physico-chimique et de fluorescence, incluant une mesure de la turbidité. Les chroniques utilisées proviennent de capteurs qui n'ont pas toujours été positionnés au niveau des stations hydrologiques, pour des raisons d'accessibilité ou pour éviter l'altération du signal lorsque la mesure est réalisée en aval de l'émergence (cas du Pêcher pour le suivi de la température, Tableau 4). Les sondes physico-chimiques utilisées sont les sondes CTD SWS (Ardennes, Ironselle, Douzes), AquaTroll200 In Situ (Moulin de Cénarette) et EcoLog800 OTT (Pêcher, Pélatan, Castelbouc 1). Les fluorimètres utilisés sont de type GGUN FL24 et FL30 (Albillia sarl). Les fluorimètres permettent de suivre la fluorescence naturelle de l'eau liée à la présence de matière organique naturellement fluorescente, ainsi que le contenu particulaire par une mesure de la turbidité (Bailly-Comte *et al*., 2018). Ils permettent également de surveiller la restitution des traceurs artificiels (cf. 5).

Exutoire	Conductivité	Température	Fluorescence/turbidité
Pêcher	À la station hydrologique, OTT EcoLog800	Au captage, GGUN FL30	
Pélatan	Au captage, OTT EcoLog800		Au captage, GGUN FL30
Castelbouc 1	À la station hydrologique, OTT EcoLog800		À la station hydrologique, GGUN FL24
Moulin de Cénarette	En amont du moulin, InSitu AquaTroll 200		En amont du moulin, GGUN FL30
Ardennes	À la station hydrologique, CTD SWS		À l'exutoire, en bordure du Tarn, GGUN FL24
Ironselle	À la station hydrologique, CTD SWS		À l'exutoire en bordure du Tarn, GGUN FL24
Les Douzes (Jonte)	Suivi au niveau de la résurgence permanente (échelle), CTD SWS		Suivi au niveau de la résurgence permanente (échelle), GGUN FL24

Tableau 4 : Détails du réseau de suivis physico-chimique et de fluorescence en continu sur les principaux exutoires.

2.3. GESTION DES DONNÉES ET CARTOGRAPHIE DU RÉSEAU DE MESURE

L'ensemble des données acquises dans le cadre de ce projet a été compilé dans une base de données OTT Hydras validée par le BRGM. Les données relatives aux résultats de traçages suivis par les fluorimètres ont été versées dans la BD Traçages (https://bdtracages.brgm.fr/).

La figure suivante (Figure 2) présente les différents points de suivis quantitatifs et qualité utilisés pour l'étude hydrogéologique du Causse Méjean. Sur cette figure apparaissent également le contour de la zone d'étude, incluant une partie du Causse Noir et le bassin versant de la Jonte en amont de Meyrueis pour la caractérisation des résurgences karstiques dans la vallée de la Jonte, ainsi que le contour du Causse Méjean en excluant les bords où la pente est supérieure à 20°. Ce contour sera utile pour les calculs de bilan hydrologique à l'échelle du Causse Méjean (cf. 3.2.3).

3. Étude hydrodynamique

3.1. OBJECTIFS ET MÉTHODES MISES EN ŒUVRE

L'ensemble des sources temporaires ou permanentes répertoriées à la surface du Causse ou dans les vallées qui l'encadrent n'ont jamais fait l'objet de suivi hydrométrique sur des durées suffisamment longues pour en estimer le fonctionnement hydrogéologique et caractériser les réserves, à l'exception des sources du système karstique de Saint-Chély/Cénarette suivies dans le cadre du réseau de suivi patrimonial par le BRGM depuis 2007.

Les données obtenues dans le cadre de ce projet (cf. 2.1.1) ont été analysées dans le but de caractériser le fonctionnement hydrodynamique de chaque système karstique, en lien avec les modalités de recharge, la structure géologique des réservoirs aquifères et l'organisation du drainage karstique. Elles sont également utilisées pour estimer les surfaces des bassins d'alimentation par une approche de bilan hydrologique.

Les méthodes mises en œuvre dans cette étude hydrodynamique sont principalement issues des travaux de Mangin (1975, 1984), à savoir :

- les analyses de récessions (Mangin, 1975) pour décrire la dynamique d'infiltration rapide et de mobilisation des réserves du système karstique, avec une estimation du volume de ces réserves ;
- les analyses de débits classés (Mangin, 1975) qui permettent de rechercher des anomalies dans la distribution statistique des débits journaliers, ce qui est particulièrement utile pour définir les gammes de débits correspondant à un fonctionnement différent, en particulier l'activation d'un trop plein du système ;
- les analyses corrélatoires (Mangin, 1984) selon la méthode de Jenkins et Watts (1968) pour décrire les relations de cause à effet entre la pluie et les débits, et ainsi caractériser la réponse impulsionnelle des systèmes étudiés

À cela s'ajoute l'utilisation de l'outil ESPERE pour les calculs de bilan (Lanini *et al*., 2016) permettant d'estimer les surfaces drainées par chaque système. Ces informations seront comparées aux résultats des études géologiques et de traçage naturel et artificiel pour mieux contraindre le tracé des bassins d'alimentation (cf. partie 5).

Le jeu de données relatif aux suivis quantitatifs est analysé au pas de temps journalier en moyennant ou cumulant (pluie) les données disponibles au pas horaire ou infra-horaire, ce qui permet de bien estimer les volumes écoulés. Ce pas de temps est cohérent avec la caractérisation spatiale et temporelle de la pluie et reste suffisant pour décrire la dynamique de décrue et de tarissement des systèmes. Ce pas de temps permet également de définir la pluie comme un processus aléatoire pour la caractérisation de la réponse pluie/débit par les analyses corrélatoires ce qui permet d'imager la forme de la fonction de transfert (cf. 3.2.2).

Chaque méthode permet d'apporter une information complémentaire sur le fonctionnement hydrodynamique des systèmes étudiés dans le but de caractériser la ressource du point de vue quantitatif, mais aussi de comparer entre eux les différents systèmes karstiques drainant le Causse Méjean, ce qui sera utile pour la caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque.

3.2. ANALYSE DES DONNÉES HYDROCLIMATIQUES AU PAS JOURNALIER

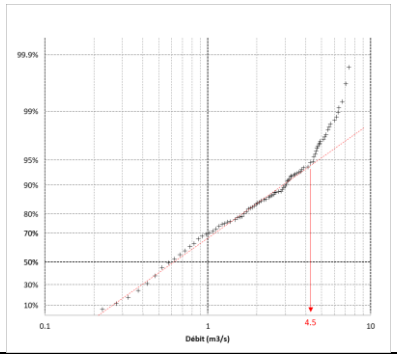
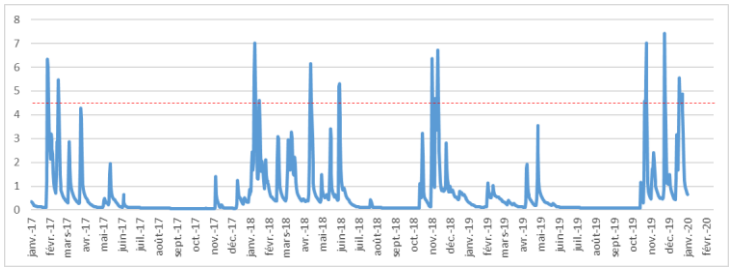
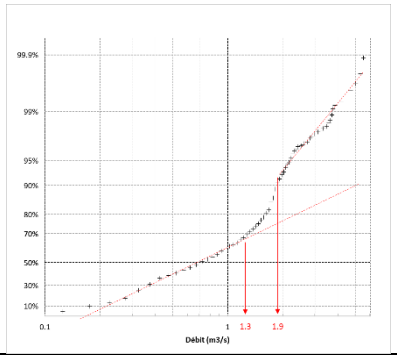
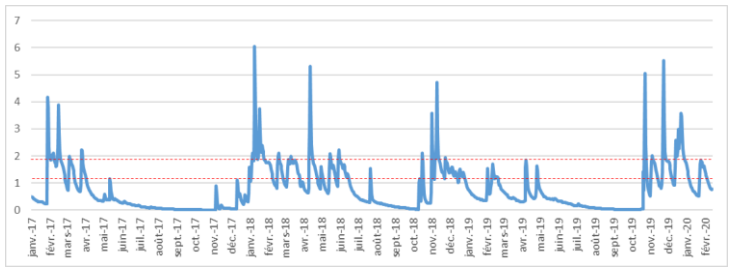
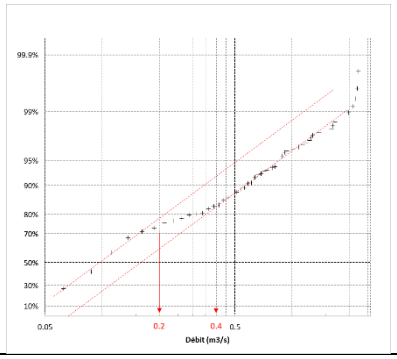
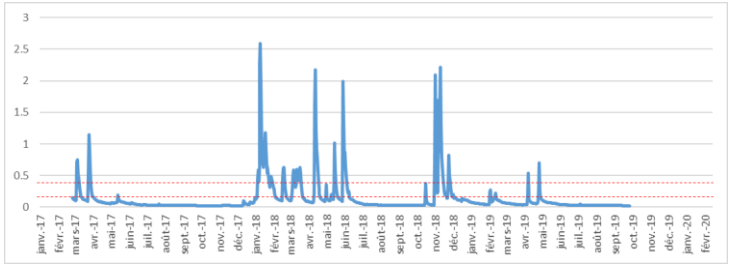
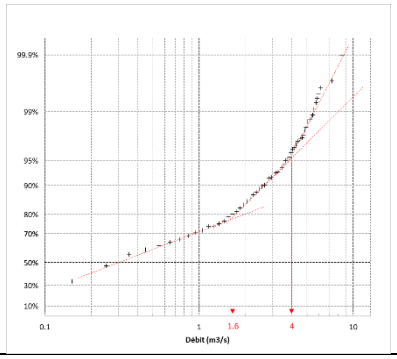
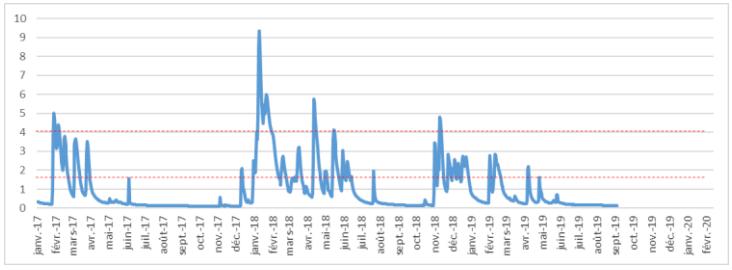
3.2.1. Analyse de l'hydrogramme

a) Analyse des débits classés

La Figure 21 présente les résultats de l'analyse des débits classés sur les six systèmes karstiques étudiés. La loi statistique utilisée pour la linéarisation de la distribution est la loi demi-normale afin de limiter l'analyse aux valeurs nécessairement positives du débit. L'ajustement est présenté selon une échelle logarithmique, ce qui revient à rechercher un ajustement du log des débits à la loi demi-normale. Cette approche permet de linéariser la plupart des hydrogrammes de sources karstiques, et ainsi de repérer par des points de ruptures des modifications systématiques de comportement hydrodynamique pour une gamme de débit donnée. Cette méthode nécessite donc de travailler sur un jeu de données couvrant plusieurs cycles hydrologiques, de sorte que les points de rupture identifiés correspondent à des débits ayant été dépassés à plusieurs reprises lors de cycles différents. Le report des résultats sur l'hydrogramme permet ainsi de vérifier que la gamme de débit identifié a été dépassée à plusieurs reprises.

Le jeu de données utilisé couvre la période commune la plus longue pour les différents systèmes, et débute avant la reprise tardive du cycle hydrologique de 2017-2018 à partir du 27 Janvier 2017, sauf pour les systèmes de Saint-Chély/Cénarette et du moulin de Pélatan où les chroniques commencent les 21 et 24 février 2017 respectivement. La date de fin correspond à la date de la dernière relève des données pour chaque système lors de la rédaction de ce rapport, certains sites n'étant accessibles qu'en basses eaux (Ardennes et Ironselle).

Analyse des débits classés

	Diagramme de probabilité	Hydrogramme correspondant (m^3/s)
Pêcher		
Castelbouc		
Pelatan		
Ardennes		

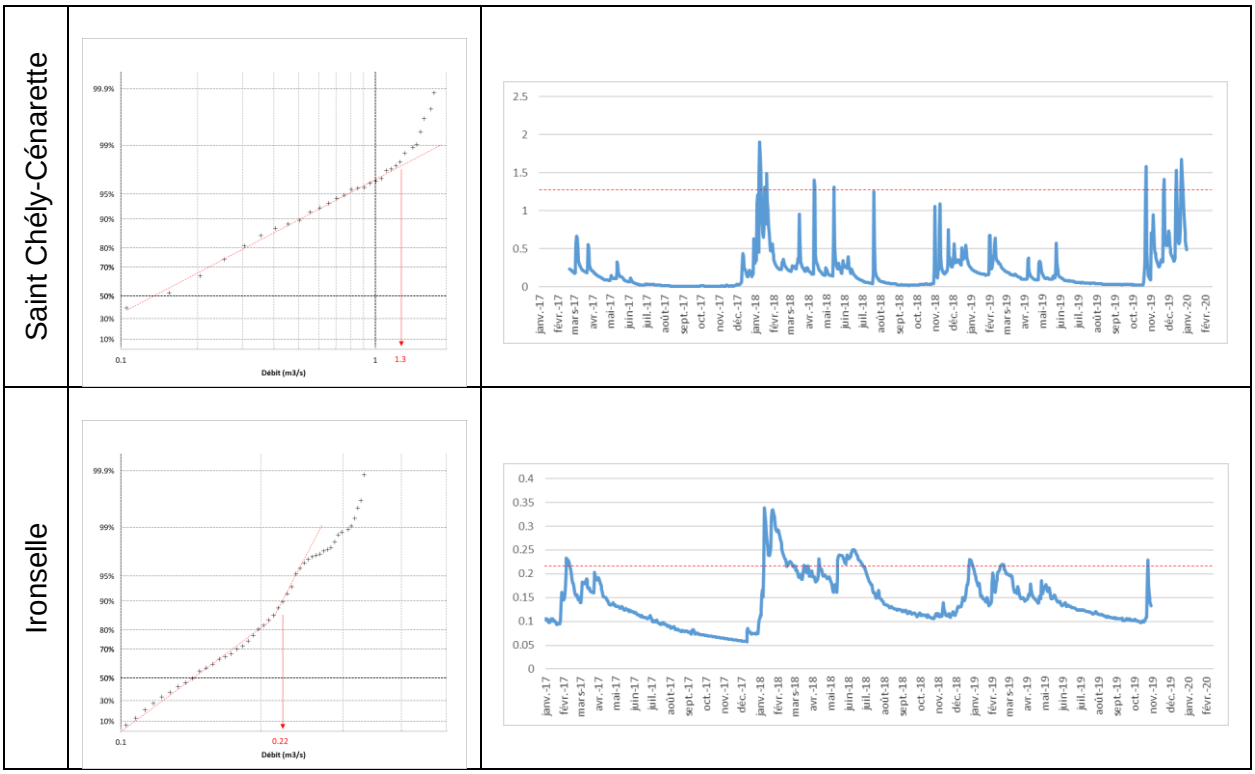


Figure 19 : Analyse des débits classés (à gauche) utilisant la loi demi-normale sur les débits journaliers, et report (à droite) des ruptures de pente identifiées sur les hydrogrammes.

Un changement de pente s'observe au Pêcher au-delà de 4,5 m^3/s, ce qui reste une condition extrême atteinte moins de 10 % du temps. L'augmentation de la pente pour ce fort pourcentage traduit l'activation d'au moins une source de trop plein du système. Il existe plusieurs exutoires temporaires localisés sur le même niveau stratigraphique quelques centaines de mètres vers le nord : « l'exsurgence fossile » n° 2 du Pêcher (BSS002BLFE, z=625 m), l'exsurgence des rosiers (BSS002BLFW, z=650 m) et l'exsurgence fossile n° 1, ou grotte de Baume Brune (BSS002BLEH, z=630 m). L'altitude de la source du Pêcher est de 580 m NGF, il faut donc imaginer des mises en charge de l'ordre de 50 m à proximité de l'exutoire pour expliquer l'activation de ces trop-pleins, ce qui reste cohérent pour des conditions hydrologiques de crue. En dehors de ce point de rupture, la distribution statistique des débits est bien expliquée par la loi demi-normale.

Le système de Castelbouc présente une courbe complexe pour des débits journaliers supérieurs à 1,3 m^3/s. Cet exutoire est l'exutoire principal du système, et l'activation des sources temporaires de Castelbouc n° 2, 3 et 4 explique l'apparition de « plateaux » sur l'hydrogramme. L'activation successive de ces trop-pleins explique la forme complexe de la distribution des débits. Par ailleurs, la source des Estivants (BSS004ABYK) est également un exutoire permanent de ce système.

Le système du Moulin de Pélatan présente une baisse de la pente sur la distribution statistique des débits entre 200 l/s et 400 l/s. On retrouve de part et d'autre des points de rupture la même pente, mais il y a relativement peu de débits journaliers compris entre ces deux valeurs. Pour cette gamme de débit, la relation hauteur/débit reste bonne, l'écoulement étant toujours contrôlé par le seuil, ce qui permet de s'assurer que ce changement de pente traduit bien le comportement hydrodynamique du système.

Cette évolution pourrait traduire un apport d'eau issu d'un autre système, soit la capture au profit du système karstique du Moulin de Pélatan d'une partie du bassin d'alimentation drainé en basses eaux par un autre système (le Pêcher ou Castelbouc), une connexion hydraulique avec un système perché en basses eaux, ou encore l'alimentation par des pertes d'écoulements de surface temporaires. La position topographique de cette source, ainsi que l'évolution de la conductivité électrique permettent d'exclure toute contribution d'eau depuis des pertes du Tarn, comme observées dans le méandre de Chanongras (cf. 5.3.3). Cet apport d'eau est observé dès lors que le débit du système dépasse 200 l/s. Les forts pourcentages présentent également une augmentation de la pente. Il s'agit ici des débits de crue supérieur à 2 m^3/s, dépassés moins de 1 % du temps, et qui ne peuvent donc pas être interprétés compte tenu du nombre trop faible d'observations et de l'extrapolation de la courbe de tarage pour de tels niveaux d'eau. Il n'est pas observé de rupture de pente caractérisant le fonctionnement des trop-pleins telle que la source de Bissoudo (BSS002BLCT), qui est associée au système karstique de Pélatan par Rouquet (1976), conformément à une expérience de coloration reportée par Bérard (1987).

Le système des Ardennes présente une distribution statistique du log des débits sans ruptures de pentes nettes, interprétée sur la figure à l'aide de trois droites. Ce système présente une sortie permanente au contact du Tarn (BSS002BKZD), et une source de trop plein (Les Ardennes n° 2, BSS004ABYM) qui est utilisée pour le suivi de la charge hydraulique du système. Cette source de trop-plein peut présenter des débits instantanés de plusieurs m^3/s et ne s'active qu'en très hautes eaux, mais d'autres griffons apparaissent dans les thalwegs selon les conditions hydrologiques, avec une influence également du niveau du Tarn. Ainsi, le niveau du Tarn et les activations successives de ces différents exutoires modifient les pertes de charge du système en facilitant ou limitant l'évacuation des eaux, et modifient ainsi le comportement hydrodynamique de l'ensemble du système selon le débit, ce qui nécessiterait d'établir une relation hauteur/débit beaucoup plus complexe. Il est donc possible que le dispositif de mesure ne permette pas de bien estimer le débit et reste biaisé par l'activation de ces trop-pleins : ces phénomènes de débordements pourraient s'observer à partir d'un débit du système de 1,6 m^3/s, avec une activation exceptionnelle (de 5 à 10 % du temps) du trop-plein principal à partir de 4 m^3/s.

Le système de Saint-Chély/Cénarette (cumul des hydrogrammes des deux sources instrumentées) présente une rupture de pente nette pour des débits journaliers dépassant 1,3 m^3/s. Plusieurs trop-pleins sont connus pour ce système (Barbier, 2013), dont un exutoire en amont de la source de Saint-Chély Centre ainsi que la grotte du Grand-Duc (ou de Duganelle) (BSS002BKZL) située à une distance d'environ 300 m, et 30 m au-dessus des exutoires permanents.

Enfin, le système de l'Ironselle présente également une forme complexe au-delà de 220 l/s. Comme pour le système des Ardennes, il peut s'agir de l'activation successive de différents griffons dans le thalweg menant au porche inférieur de la grotte. Le jaugeage réalisé par dilution de traceur le 17 janvier 2018 a permis d'estimer le débit du système à 218 l/s, et pour ce débit il existait bien un griffon actif dans le thalweg où une restitution du traceur a été observée.

Si la plupart des systèmes présente des exutoires secondaires de type « trop-plein », seuls les systèmes karstiques du Pêcher, de Castelbouc et de Saint-Chély/Cénarette permettent d'identifier des exutoires secondaires relativement distants de l'exutoire principal. Le système du Moulin de Pélatan est le seul à montrer un possible apport d'eau depuis un autre système pour un débit supérieur à 200 l/s 20 à 30 % du temps.

L'analyse des débits classés permet aussi de mieux définir les gammes de débits relatives aux périodes de crue et de tarissement, ce qui est repris dans la section suivante.

b) Analyse des récessions

L'analyse des récessions des hydrogrammes de source karstique consiste à caractériser la dynamique d'infiltration et de mobilisation des réserves de la zone noyée des systèmes karstiques. La méthode de Mangin (1975) a été retenue afin d'obtenir des résultats comparables aux autres études hydrogéologiques réalisées sur les Grands Causses. Cette méthode consiste à sélectionner les récessions suffisamment longues qui permettent de distinguer la dynamique de décrue de la dynamique de tarissement.

Le tarissement est identifié par une dynamique de décroissance exponentielle selon la loi de Maillet, et est conceptuellement attribué à la période non influencée par l'infiltration pour $t>t_i$. t_i (j) définit donc la durée d'influence de l'infiltration sur l'hydrogramme. Le modèle de récession correspondant est :

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha(t-t_i)}$$

Équation 4 : Modèle de Maillet pour le tarissement.

Avec t_i (j) la date du point d'inflexion en coordonnées semi-log permettant d'identifier le début de la décroissance exponentielle, α (j^{-1}) le coefficient de récession et Q_0 (m^3/s) le débit correspondant au début du tarissement.

La décrue correspond à la portion de l'hydrogramme comprise entre le pic de crue (t=0) et le début de décroissance exponentielle (t_i). Elle est conceptuellement attribuée à la période influencée par l'infiltration.

Ce modèle est extrapolé entre le pic de crue (t=0) et t_i pour estimer, par différence avec l'observé, le débit d'infiltration :

$$q(t) = Q(t) - Q_0 e^{-\alpha(t-t_i)}$$

Équation 5 : Calcul de la dynamique d'infiltration.

En particulier, le débit d'infiltration initial q_0 (m^3/s) est donné par :

$$q_0 = Q(t) - Q_0 e^{\alpha t_i}$$

Équation 6 : Calcul du débit d'infiltration au pic de crue.

Mangin (1975) propose de représenter la dynamique d'infiltration q(t) par une fonction homographique qui nécessite de caler un paramètre de concavité ε (-). Il est possible de préciser ce modèle d'infiltration en distinguant plusieurs dynamiques d'infiltration (lente/retardée, cf. rapport Marechal *et al.,* 2006 – BRGM/RP-54723-FR). Une seule dynamique d'infiltration a été retenue dans cette étude. Le modèle de décrue utilisé est donc :

$$\frac{q(t)}{q_0} = \frac{1 - t/t_i}{1 + \varepsilon t}$$

Équation 7 : Modèle homographique pour décrire la dynamique d'infiltration.

Le volume dynamique Vd correspond au volume d'eau stockée dans la zone noyée qui va pouvoir s'écouler à l'exutoire. Mangin (1975) estime le volume dynamique Vd (m^3) du système karstique lorsque le tarissement est effectif, soit pour t=ti à partir de chaque analyse de récession. Il permet ainsi de quantifier la réserve en eau souterraine d'un système karstique participant aux écoulements. Ce volume correspond au calcul d'intégrale du modèle de Maillet, ce qui devient :

$$Vd = 86400\frac{Q_O}{\alpha}$$

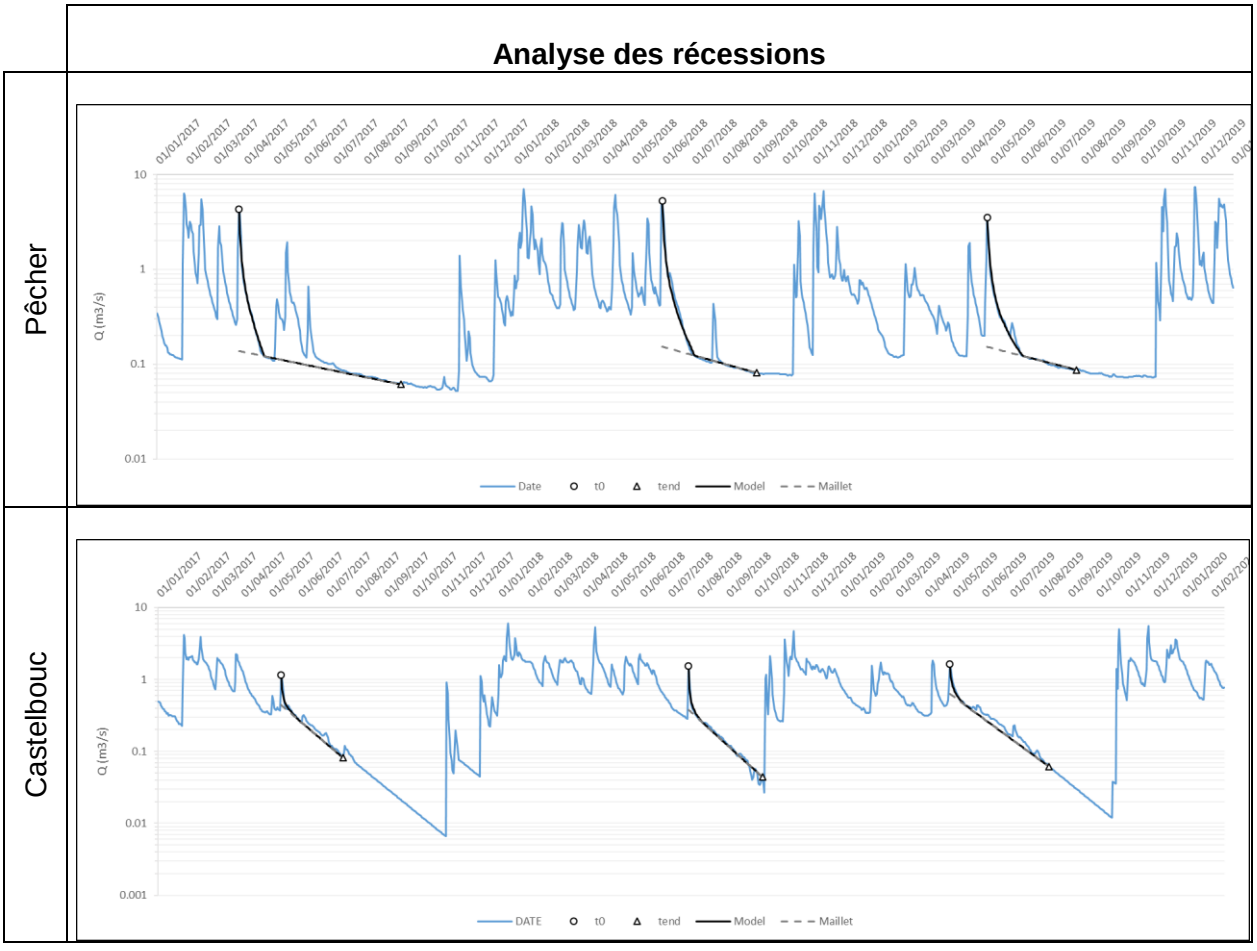
Équation 8 : Calcul du volume dynamique (m^3), avec Q_O en m^3/s et α en j^{-1}.

Chaque analyse de récession permet de calculer une estimation du volume dynamique. La valeur Vd retenue pour caractériser le système est la valeur maximale ayant été calculée pour toutes les récessions. Une estimation de l'incertitude peut donc être proposée à partir de la seconde valeur la plus élevée, notée Vd', en calculant la variation relative suivante :

$$\%(Vd) = \frac{Vd - Vd'}{Vd}$$

Équation 9 : Calcul d'incertitude pour le volume dynamique (m^3).

Les résultats obtenus sur les trois cycles hydrologiques étudiés sont reportés dans la figure suivante et le Tableau 5.



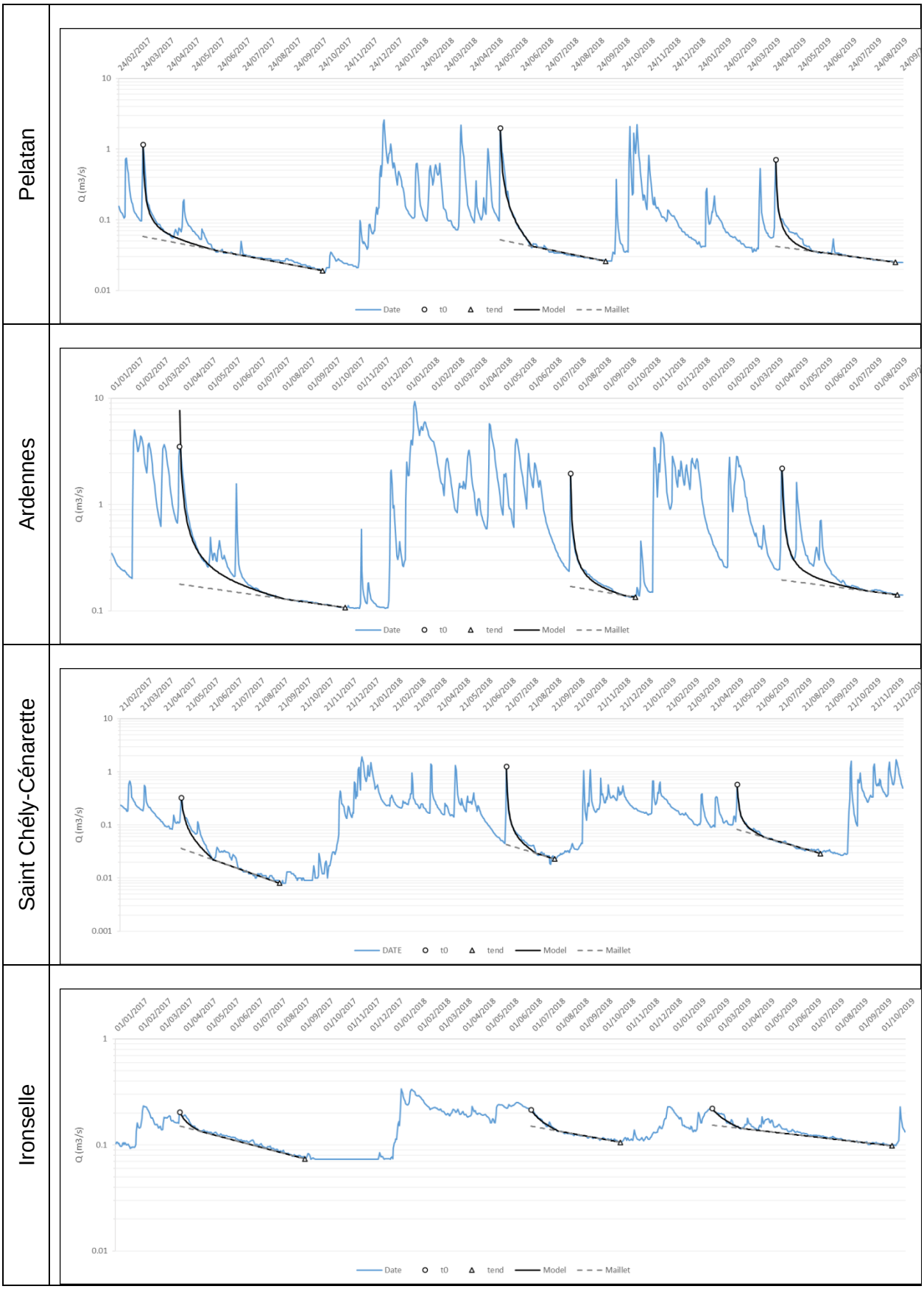


Figure 20 : Résultats des analyses de récessions reportées sur les hydrogrammes des sources.

SK	date pic	Qpic (m3/s)	q0 (m3/s)	ε	ti (d)	Q_0 (m3/s)	α (1/d)	Vd (m3)	NASH (%)	durée du tarissement (j)
Pêcher	25/03/2017	4.29	4.15	0.8	26	0.12	4.93E-03	2.12E+06	75%	139
	30/05/2018	5.31	5.16	0.8	33	0.12	6.63E-03	1.60E+06	96%	63
	26/04/2019	3.55	3.39	0.8	36	0.12	6.15E-03	1.71E+06	99%	55
Castelbouc	12/05/2017	1.16	0.72	1.3	20	0.27	2.55E-02	8.98E+05	93%	46
	21/07/2018	1.54	1.16	1.9	14	0.26	2.73E-02	8.21E+05	97%	65
	26/04/2019	1.64	1.01	0.9	16	0.45	2.20E-02	1.75E+06	95%	90
Pélatan	25/03/2017	1.15	1.09	1.7	87	0.04	5.17E-03	6.19E+05	86%	129
	29/05/2018	1.99	1.94	1.1	39	0.04	5.45E-03	6.66E+05	93%	88
	26/04/2019	0.70	0.66	1.6	43	0.04	3.61E-03	8.62E+05	98%	101
Ardennes	26/03/2017	3.51	7.51	1.4	129	0.13	2.49E-03	4.47E+06	87%	75
	21/07/2018	1.96	1.79	1.1	65	0.14	2.92E-03	4.14E+06	100%	15
	08/04/2019	2.19	1.99	1	106	0.15	2.27E-03	5.83E+06	58%	36
Saint Chély / Cénarette	13/05/2017	0.33	0.29	0.3	43	0.02	1.15E-02	1.65E+05	91%	88
	21/07/2018	1.25	1.21	2.1	40	0.03	9.66E-03	2.59E+05	99%	24
	25/05/2019	0.57	0.49	1	37	0.06	9.37E-03	5.35E+05	100%	74
Ironselle	26/03/2017	0.20	0.05	0.1	27	0.13	4.37E-03	2.65E+06	96%	136
	28/06/2018	0.21	0.06	0	36	0.14	2.99E-03	3.91E+06	98%	81
	20/02/2019	0.22	0.07	0	38	0.14	1.92E-03	6.44E+06	81%	197

Tableau 5 : Résultats du calage des récessions selon la méthode de Mangin (1975).

Le volume dynamique Vd peut être comparé au volume annuel de transit du système calculé à partir du débit moyen sur une année afin d'estimer le nombre d'années théoriquement nécessaires pour renouveler Vd, ou pour vidanger le volume d'eau de la zone noyée situé au-dessus de l'exutoire en l'absence (théorique) de recharge. Le paramètre obtenu est appelé le « pouvoir régulateur », noté **k** par Mangin (1975). Il permet de traduire **l'aptitude du système à restituer les réserves au cours du temps**. Plus k est élevé et plus le temps de renouvellement de la réserve sera long, ce qui caractérise un système inertiel qui restitue lentement les eaux stockées. Ce temps de renouvellement sera supérieur à une année si k>1, ce qui n'était pas proposé dans la première version de la classification de Mangin (1975).

Par ailleurs, le paramètre ε caractérise avec t_i la dynamique et la durée de l'infiltration. Ils sont utilisés pour caractériser les « retards » à l'infiltration par le biais d'un paramètre i égal au rapport $q(t=2)/q_0$, soit la valeur de la fonction homographique deux jours après la pointe de crue. Le paramètre i est donc sans dimension et varie entre 0 et 1. **Plus i est élevé et plus la dynamique d'infiltration sera inertielle. À l'inverse, une faible valeur de i traduit une dynamique d'infiltration très rapide**.

Les résultats obtenus pour l'estimation de k et i sont reportés dans le Tableau 6.

	Qmoy (m3/s)	αmoy (1/d)	i	di (%)	k	dk (%)
Pêcher	0.59	5.61E-03	0.36	2%	0.11	19%
Castelbouc	0.72	2.44E-02	0.25	25%	0.08	49%
Pélatan	0.15	4.75E-03	0.25	18%	0.18	23%
Ardennes	1.00	2.48E-03	0.30	12%	0.19	23%
Saint Chély / Cénarette	0.19	1.04E-02	0.36	54%	0.09	52%
Ironselle	0.15	2.93E-03	0.84	7%	1.36	39%

Tableau 6 : Résultats du calcul des paramètres k et i pour la classification des systèmes karstiques selon la méthode de Mangin (1975).

Le report des résultats dans un diagramme i=f(k) en coordonnées semi-log est proposé par Mangin (1975) pour la classification et la comparaison des systèmes karstiques du point de vue hydrodynamique. El-Hakim et Bakalowicz (2007) ont proposé d'étendre cette classification en ajoutant un groupe définit par k>1, initialement considéré comme non-karstique par Mangin (1975).

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 21, où la taille des points est proportionnelle au débit moyen journalier du système (cf. Qmoy, Tableau 6).

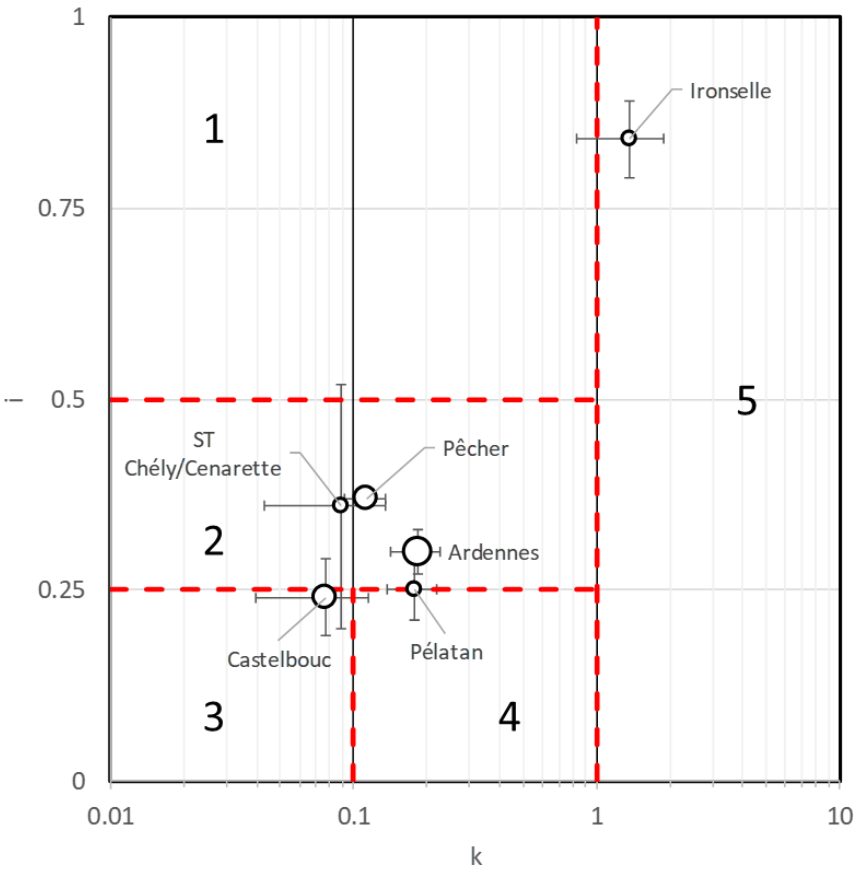


Figure 21 : Résultats des analyses de récessions reportées dans le diagramme i=f(k) en coordonnées semi-logarithmiques, la taille des points est proportionnelle au débit moyen journalier donné dans le Tableau 13.

Le système karstique de l'Ironselle se démarque nettement, et se positionne dans le domaine définit par k>1. Ce pouvoir régulateur élevé traduit une restitution très lente des réserves sur ce système, puisqu'il faudrait plus d'une année pour écouler le volume stocké dans la zone noyée. Ce comportement est probablement lié à la nature dolomitique du réservoir, et notamment à la présence de grands vides comblés de sables issus de l'altération in-situ de la roche réservoir (fantôme de roche).

Compte tenu des incertitudes, tous les autres systèmes étudiés se classent dans le domaine 2 définit par Mangin (1975), avec Castelbouc et Pélatan à la limite avec les domaines 3 et 4 respectivement. Dans le contexte du Causse Méjean, compte tenu de la très grande épaisseur de la zone d'infiltration, ces résultats peuvent s'interpréter comme caractéristiques de systèmes possédant un réseau de drainage karstique bien développé et des retards à l'infiltration dus à l'épaisseur de la zone d'infiltration. Un karst noyé important est mis en évidence pour les systèmes des Ardennes, de Pélatan et, dans une moindre mesure, du Pêcher**. Le système des Ardennes présente des réserves importantes (Vd=6 Mm^3) associées à un débit moyen élevé (1,0 m^3/s). Il constitue ainsi le système karstique du Causse Méjean qui présente la ressource la plus importante**.

c) Analyse en composante principale

Les systèmes karstiques du Causse Méjean, en dehors de la résurgence des Douzes, sont alimentés par les précipitations sur le Causse Méjean. Ils constituent ainsi des systèmes « unaires [1]». La variabilité spatiale des précipitations au pas de temps journalier sera abordée dans la section suivante. Il est supposé dans un premier temps que la dynamique de recharge sur la Causse est suffisamment homogène dans l'espace et dans le temps pour que la comparaison directe des hydrogrammes des sources permette de comparer les comportements hydrodynamiques de chaque système. Cette hypothèse s'appuie sur les valeurs significativement élevées (r^2=0.81, Tableau 7) des coefficients de corrélation de Pearson obtenus sur les données de précipitations journalières des postes pluviométriques de Saint-Pierre-des-Tripiers et du Villaret situés respectivement à l'ouest et en position centrale sur le Causse Méjean (Figure 2).

	Gatuzière	La Salle Prunet	Saint-Pierre-des-Tripiers	Villaret
Gatuzière	1	0,84	0,78	0,84
La Salle Prunet	0,84	1	0,67	0,75
Saint-Pierre-des-Tripiers	0,78	0,67	1	0,81
Villaret	0,84	0,75	0,81	1

Tableau 7 : Matrice de corrélation de Pearson sur les données journalières des précipitations.

Selon cette hypothèse de recharge homogène à l'échelle du Causse, une Analyse en Composante Principale a été menée sur l'ensemble des six systèmes karstiques étudiés dans le but de mettre en évidence des comportements hydrodynamiques similaires entre les systèmes. L'analyse a été menée sur les deux cycles hydrologiques communs à tous ces systèmes, entre le 1er septembre 2017 et le 31 août 2019 (n=730 jours). Le Tableau 8 présente la matrice de corrélation de Pearson obtenue entre les chroniques de débit journalier.

[1] Lorsque des écoulements de surface contribuent à l'alimentation de la zone noyée à partir de pertes, le système karstique comprend d'une part la partie aquifère proprement dite et le bassin de surface drainé par les pertes. On distingue ainsi les systèmes karstiques unaires, où l'extension du système karstique correspond à l'affleurement des formations géologiques constituant l'aquifère karstique, des systèmes karstiques binaires où s'ajoutent les bassins versants de surface drainés par des pertes. Le lecteur pourra se référer au rapport BRGM 58237-FR (https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-58237-FR.pdf), et aux références associées pour plus de détails sur ces notions.

Variables	Ardennes	Pélatan	Pêcher	Ironselle	Castel.	Saint-Chély
Ardennes		0.742	0.737	0.649	0.881	0.862
Pélatan	0.742		0.951	0.380	0.824	0.739
Pêcher	0.737	0.951		0.380	0.867	0.708
Ironselle	0.649	0.380	0.380		0.651	0.578
Castel.	0.881	0.824	0.867	0.651		0.829
SAINT Chély	0.862	0.739	0.708	0.578	0.829	

Tableau 8 : Matrice de corrélation (Pearson) entre les différentes chroniques de débit journalier.

La figure suivante présente la position de chaque variable (correspondant au débit de chaque système karstique) dans la nouvelle projection.

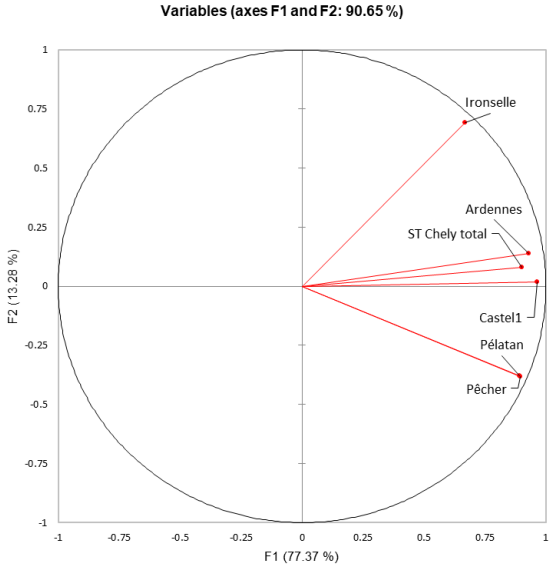


Figure 22 : Cercle de corrélation entre les chroniques de débit des systèmes karstiques et les facteurs.

Les résultats obtenus montrent la grande similitude des hydrogrammes du Pêcher et de Pélatan, à la fois à partir de la corrélation (r^2=0.951, Tableau 8) et de leur position identique dans la nouvelle projection (Figure 22). Les axes principaux sont expliqués par le comportement hydrodynamique de Castelbouc, Ardennes et Saint-Chély pour F1, et par les sources de l'Ironselle, et dans une moindre mesure les sources du Pêcher et de Pélatan pour F2. Ainsi, trois groupes de systèmes karstiques se distinguent :

- Pélatan, Pêcher ;
- Ardennes, Saint-Chély/Cénarette, Castelbouc ;
- Ironselle.

Ces résultats soulignent le comportement particulier du système karstique de l'Ironselle et permettent de distinguer les systèmes de Pélatan et du Pêcher des autres systèmes sur la base du comportement hydrodynamique.

3.2.2. Analyses corrélatoires de la réponse pluie-débit

a) Pondération des postes pluviométriques

Une approche globale à l'échelle du système karstique est choisie pour caractériser la réponse pluie/débit. Ainsi, il est nécessaire de disposer pour chaque système d'une chronique de pluie journalière, issue d'une pondération des quatre chroniques de pluie disponibles sur le territoire : Gatuzières, La Salle-Prunet, Saint-Pierre-des-Tripiers et Villaret (cf. 2.1.2).

La méthode retenue pour la pondération des postes pluviométriques est basée sur le calcul de la fonction de corrélation croisée entre la pluie pondérée et le débit à l'exutoire du système. Le principe revient à rechercher la combinaison linéaire des postes pluviométriques qui permette d'obtenir la corrélation maximale la plus élevée. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 9).

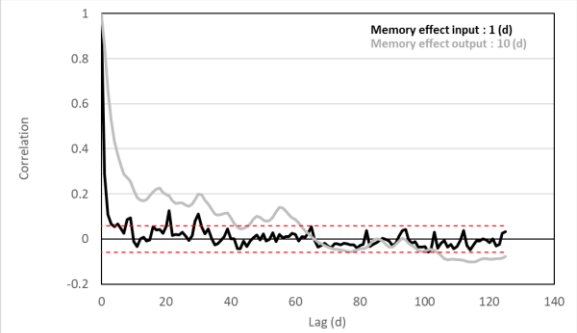
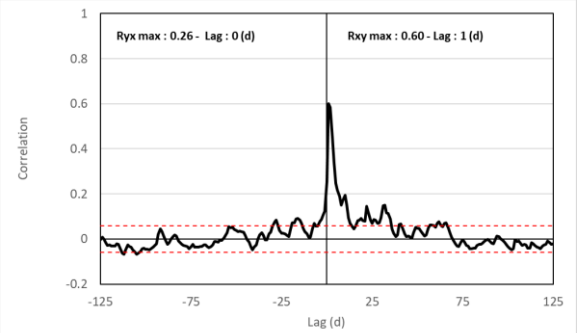
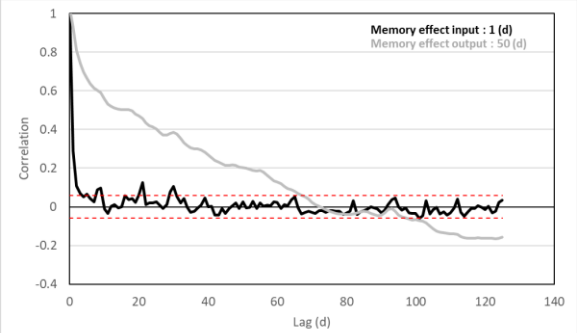
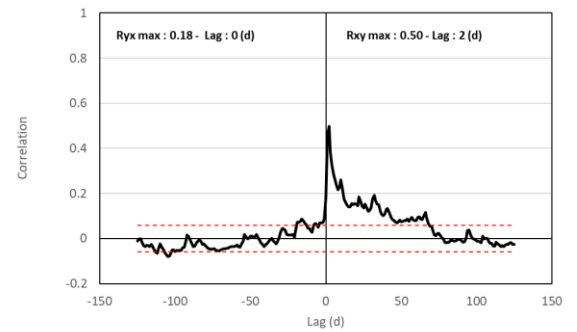
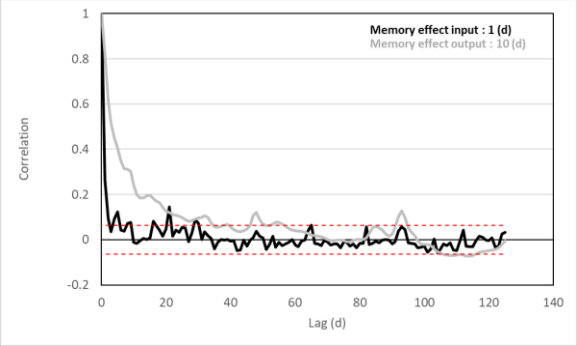
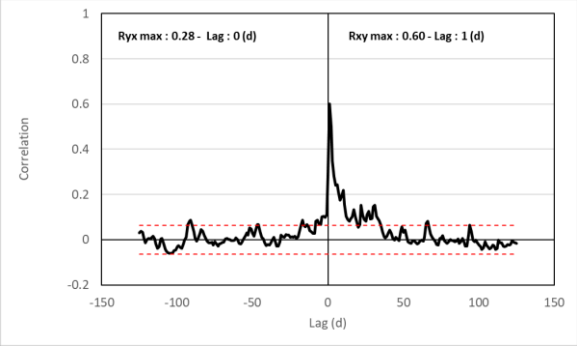
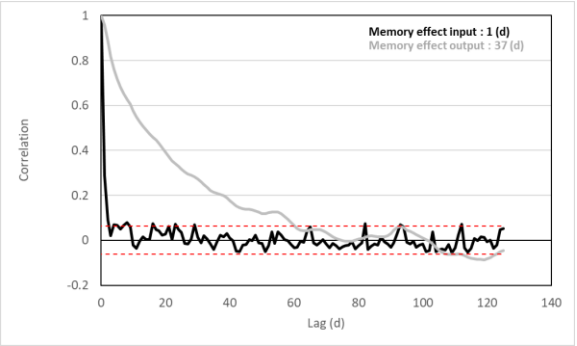
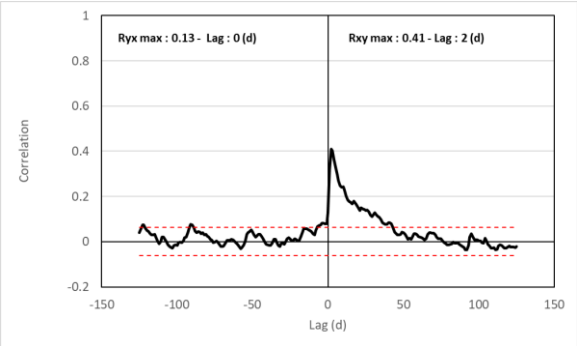
	Ardennes	Pélatan	Pêcher	Castelbouc	Saint-Chély / Cénarette	Ironselle
Gatuzière	0 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %
La Salle Prunet	14 %	56 %	38 %	34 %	0 %	0 %
Saint-Pierre-des-Tripiers	28 %	0 %	8 %	0 %	41 %	83 %
Villaret	58 %	43 %	54 %	66 %	59 %	17 %

Tableau 9 : Tableau de pondération des postes pluviométriques pour chaque système karstique au pas journalier.

Les résultats montrent que la pluie journalière mesurée à Gatuzière n'apporte pas d'information utile pour la caractérisation de la recharge des systèmes karstiques du Causse Méjean. Les pondérations obtenues pour les trois autres stations sont cohérentes avec la position géographique des exutoires. Une pluie journalière pondérée a donc été calculée à partir du Tableau 9 pour chaque système, dans le but de caractériser la relation pluie/débit et réaliser des bilans hydrologiques.

b) Analyse corrélatoire

Les fonctions de corrélation de la pluie, du débit et les fonctions de corrélations croisées entre la pluie et le débit ont été calculées pour chaque système afin de reproduire les corrélogrammes simples de la pluie et du débit d'une part, et le corrélogramme croisé de la relation pluie débit d'autre part. Les résultats obtenus sont reportés dans la figure suivante (Figure 23).

	Analyse de corrélation	
	Corrélogrammes simples	Corrélogrammes croisés
Pêcher		
Castelbouc		
Pelatan		
Ardennes		

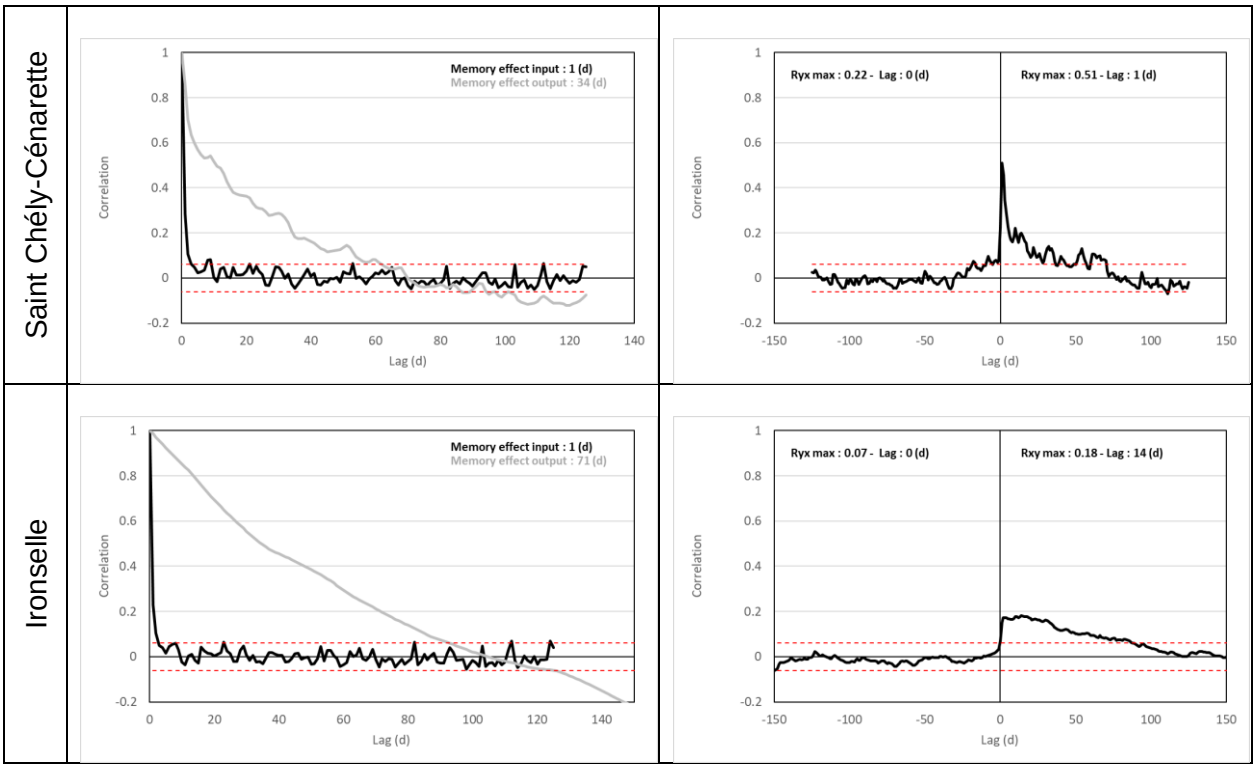


Figure 23 : Corrélogrammes simples (à gauche – coube grise : débit ; courbe noire : précipitations) et croisés (à droite) de la pluie et des débits journaliers.

Le Tableau 10 synthétise les résultats obtenus en apportant des données statistiques descriptives complémentaires. Il précise également les périodes retenues pour chaque système et la longueur des chroniques correspondantes.

	Ardennes	Pélatan	Pêcher	Castelbouc	Saint Chély/ Cénarette	Ironselle
Date début	01/01/2017	24/02/2017	01/01/2017	01/01/2017	21/02/2017	01/01/2017
Date fin	04/09/2019	26/09/2019	01/01/2020	01/01/2020	01/01/2020	30/10/2019
nombre de valeurs	977	945	1 096	1 096	1 045	1 033
Statistiques sur l'hydrogramme seul						
Moyenne	0.95	0.14	0.66	0.75	0.20	0.14
Médiane	0.32	0.05	0.23	0.42	0.12	0.13
Ecart type	1.27	0.27	1.10	0.82	0.26	0.05
Min	0.11	0.02	0.05	0.01	0.01	0.06
Max	9.35	2.59	7.42	6.05	1.91	0.34
20 %/80 %	0.09	0.22	0.10	0.05	0.11	0.53
effet mémoire (j)	37	10	10	49	34	71
Statistiques sur la relation pluie/débit						
rxy max	0.41	0.60	0.60	0.49	0.51	0.18
lag rxy max (j)	2	1	1	2	1	14
Lag rxy 95 % (j)	42	19	13	68	36	177

Tableau 10 : Statistiques descriptives et résultats des analyses corrélatoires.

Le corrélogramme simple des débits permet de caractériser la dépendance des débits journaliers pour des intervalles de temps croissants. Ils sont classiquement utilisés en hydrogéologie karstique pour calculer l'effet mémoire du système (Mangin, 1984), ce qui correspond au décalage de temps nécessaire pour atteindre une corrélation des débits journaliers de 0.2. Ce paramètre, reporté dans le Tableau 10, permet de caractériser l'inertie des systèmes du point de vue de l'évolution des débits.

Les corrélogrammes simples de la pluie journalière obtenus pour tous les systèmes présentent une décroissance très rapide, et l'absence significative de corrélation au seuil de 95 % pour un décalage supérieur ou égal à deux jours. Ceci permet de décrire la pluie journalière comme un processus aléatoire au pas journalier.

La structure aléatoire du signal de pluie permet d'interpréter le corrélogramme croisé comme l'évolution du débit pour une pluie unitaire, ce qui donne ainsi une image de la réponse impulsionnelle du système karstique (la réponse en débit pour une impulsion de pluie). Ainsi, les paramètres relatifs au pic (décalage temporel (lag) et valeur de corrélation) et au décalage à partir duquel il n'existe plus de corrélation permettent de décrire le pic de la réponse impulsionnelle, le temps d'arrivée de ce pic et la durée de la réponse impulsionnelle respectivement. Pour ce dernier paramètre, il a été choisi dans le Tableau 10 de retenir l'absence de corrélation avec un intervalle confiance de 95 %. Cet intervalle de confiance à 95 % est reporté sur les graphiques et correspond aux deux droites horizontales en tirets rouges. Le décalage à partir duquel le corrélogramme recoupe les droites horizontales définissant l'absence de corrélation est utilisé dans cette étude pour définir la longueur de la réponse impulsionnelle.

Les résultats obtenus peuvent être décrits selon trois groupes de systèmes :

1. on observe une grande similitude de résultats pour les systèmes du Pêcher et de Pélatan, avec une réponse impulsionnelle très courte (10 à 20 jours) qui présente un pic dès le jour suivant, un effet mémoire faible (10 jours) et un faible filtrage de la dynamique de la pluie (rxy max = 0.6). **Ces systèmes présentent les caractéristiques de systèmes très bien karstifiés capables de restituer rapidement les volumes d'eau infiltrés** ;

2. les systèmes des Ardennes, de Castelbouc et de Saint-Chély/Cénarette présentent également une réponse impulsionnelle pointue mais légèrement plus faible (rxy max de l'ordre de 0.4 à 0.5, lag correspondant de deux jours pour les Ardennes et Castelbouc), et une longueur de la réponse impulsionnelle plus longue (de 36 à 68 jours) ;

3. enfin, le système de l'Ironselle se démarque très nettement avec une forme de réponse impulsionnelle beaucoup plus amortie (rxy max = 0.14, effet mémoire de 71 jours et longueur de la réponse impulsionnelle de l'ordre de 6 mois). **Ce système présente donc un comportement hydrodynamique très différent et non caractéristique d'un comportement karstique.**

Ce regroupement basé sur la réponse hydrodynamique des systèmes à partir des analyses corrélatoires rejoint parfaitement celui obtenu par l'ACP. Or, cette classification de systèmes n'apparaît pas clairement sur le diagramme i=f(k) issu de l'analyse des récessions (Figure 21). La dynamique de décrue peut également être décrite à partir de la forme de la réponse impulsionnelle obtenue par l'analyse corrélatoire. La Figure 24 représente la relation max(rxy) = f(k) pour positionner les systèmes selon un axe des ordonnées relatif à la qualité du transfert du signal de pluie journalière. Plus cette valeur se rapproche de 1 et plus le signal de débit correspond au signal de pluie, ce qui traduit une dynamique de décrue très rapide représentant l'essentiel des volumes d'eau écoulé à l'exutoire. Ce diagramme permet ainsi de distinguer le système des Ardennes, qui présente un pouvoir régulateur élevé, associé au débit moyen le plus élevé de tous les systèmes étudiés.

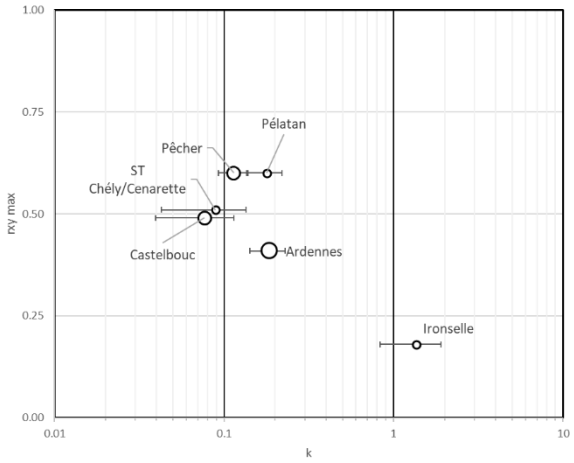


Figure 24 : Classification des systèmes étudiés selon la valeur maximale du corrélogramme croisé pluie/débit et le pouvoir régulateur issu de l'analyse des récessions. La taille du point est directement proportionnelle au débit moyen journalier sur les cycles hydrologiques 2017/2018 et 2018/2019.

3.2.3. Bilan hydrologique et estimation de la surface du bassin d'alimentation

Les données hydroclimatiques permettent de calculer la recharge et les volumes annuels de transit des systèmes karstiques sur les cycles hydrologiques 2017/2018 et 2018/2019. Ces informations vont permettre, à l'échelle du Causse Méjean, de calculer par la méthode du bilan les surfaces drainées par chaque système karstique.

a) Estimation de la recharge

La recharge est supposée égale à la pluie efficace à l'échelle du Causse Méjean, ce qui signifie que tout ruissellement localisé à la surface du Causse est supposé contribuer à la recharge du karst par infiltration plus en aval. Cette hypothèse est parfaitement cohérente avec les observations réalisées sur ce site : il n'existe pas de réels écoulements de surface, même temporaires, drainant le Causse en rejoignant le Tarn ou la Jonte. Le vallon perché des Bastides peut présenter des écoulements importants après des épisodes de recharge exceptionnels, mais aucun écoulement n'a été observé durant cette étude.

La méthode la plus simple de calcul de la recharge à l'échelle annuelle est la méthode de Turc. Elle nécessite de connaître le cumul annuel des précipitations et la température moyenne annuelle. La méthode de Turc a été utilisée à partir des observations réalisées à la station du Villaret mise en place dans le cadre de ce projet.

Les données Météo-France acquises dans le cadre de ce projet, et notamment les données d'ETP journalières et de précipitations pour la station de Saint-Pierre-des-Tripiers permettent de calculer la recharge par d'autres méthodes utilisant le concept de Réserve Utile (RU). Ainsi, d'autres estimations de la recharge par les méthodes de Thornthwaite, Dingman et Edijatno et Michel ont ainsi été calculées à l'aide de l'outil ESPERE du BRGM. Ces méthodes nécessitent de définir la valeur maximale de la RU du sol. Une estimation de ce paramètre est proposée par l'INRA à l'échelle de la France. Une valeur de 30 mm a été retenue pour la zone d'étude, ce qui traduit la très faible disponibilité en eau des sols pour la végétation. Le lecteur pourra se référer au manuel utilisateur d'ESPERE pour connaitre les détails de calcul relatif à chaque méthode (Lanini et Caballero, 2015 ; Lanini *et al.*, 2016 ; Lanini, 2020). Ces méthodes basées sur des modèles réservoirs permettent de décrire la dynamique mensuelle interannuelle de la recharge (Figure 25). Les résultats montrent que l'essentiel (~70 %) de la recharge a lieu durant les quatre mois d'Octobre à Janvier, avec un maximum en décembre et janvier.

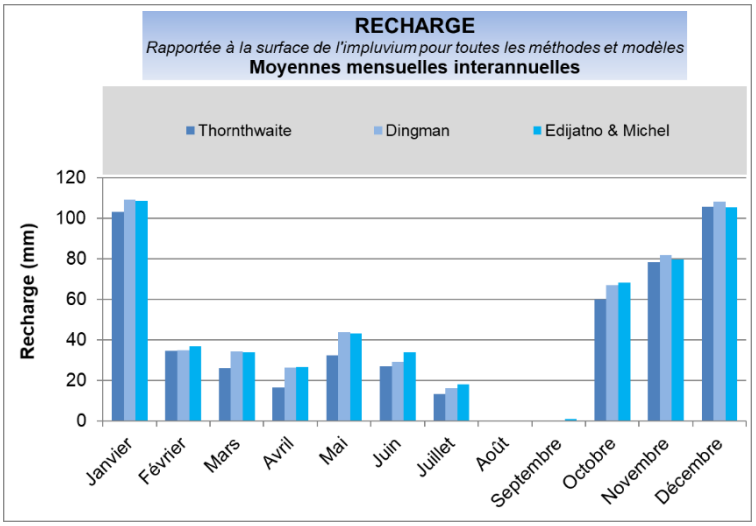


Figure 25 : Moyennes mensuelles interannuelles (cycles 2017-2018 et 2018-2019) estimées par les méthodes de Thornthwait, Dingman et Edijatno et Michel à l'aide de l'outil ESPERE.

Les résultats obtenus par la méthode de Turc utilisant les données du pluviomètre du Villaret, et ceux relatifs aux autres méthodes exploitant les données Météo-France sont reportés dans le tableau suivant. Tous les résultats sont très cohérents les uns par rapport aux autres. Ils mettent en avant la situation hydrologique contrastée des cycles étudiés : par rapport au cycle 2018-2019, le cycle 2017-2018 permet de recharger deux fois plus les systèmes karstiques.

	Ptot Saint-Pierre-des-Tripiers (mm)	Ptot Villaret (mm)	Temp. Villaret (°C)	Thornthwaite Saint-Pierre-des-Tripiers	Dingman Saint-Pierre-des-Tripiers	Edijatno & Michel Saint-Pierre-des-Tripiers	Turc Villaret	Recharge (mm)
2017 - 2018	1 159	1 109	8.5	621	679	670	636	646
2018 - 2019	856	753	8.1	321	377	389	326	344

Tableau 11 : Données climatiques et estimation de la recharge annuelle pour les cycles 2017-2018 et 2018-2019.

La valeur moyenne obtenue entre la méthode de Turc d'une part et les autres méthodes d'autre part a finalement été retenue pour chaque cycle (cf. colonne Recharge, Tableau 11). Cette valeur permet d'estimer la recharge des formations aquifères qui affleurent à la surface du Causse. Les formations géologiques du Jurassique supérieur à l'affleurement peuvent localement constituer des aquifères perchés, alimentant de faibles sources dont l'écoulement se perd totalement quelques mètres en aval au contact d'autres formations perméables. La source de la fontaine de Mielgues (BSS004ABYP) illustre bien ce phénomène ; d'autres sources de ce type ont été échantillonnées lors des campagnes d'analyse hydrochimiques (cf. 4.2.1). Cet écoulement participe donc une seconde fois à l'alimentation de la zone d'infiltration du karst, avec des pertes évaporatoires associées, ce qui n'est pas pris en compte dans l'estimation de la recharge par les différents modèles. De ce point de vue, la recharge réelle des systèmes karstiques étudiés est donc légèrement surestimée puisque ce second processus de pertes évaporatoires n'est pas pris en compte.

Une estimation réalisée par Rouquet (1976) sur la période 1967-1972 avait permis de conclure à une infiltration moyenne annuelle de 456 mm, représentant 46 % de la pluviométrie, ce qui est proche de la valeur de 50 % obtenue en moyenne pour la période 2017-2019 avec la même méthode de Turc.

b) Estimation des volumes annuels de transit pour chaque système

Les hydrogrammes des exutoires karstiques étudiés sont reportés sur la Figure 26 pour les cycles 2017-2018 et 2018-2019.

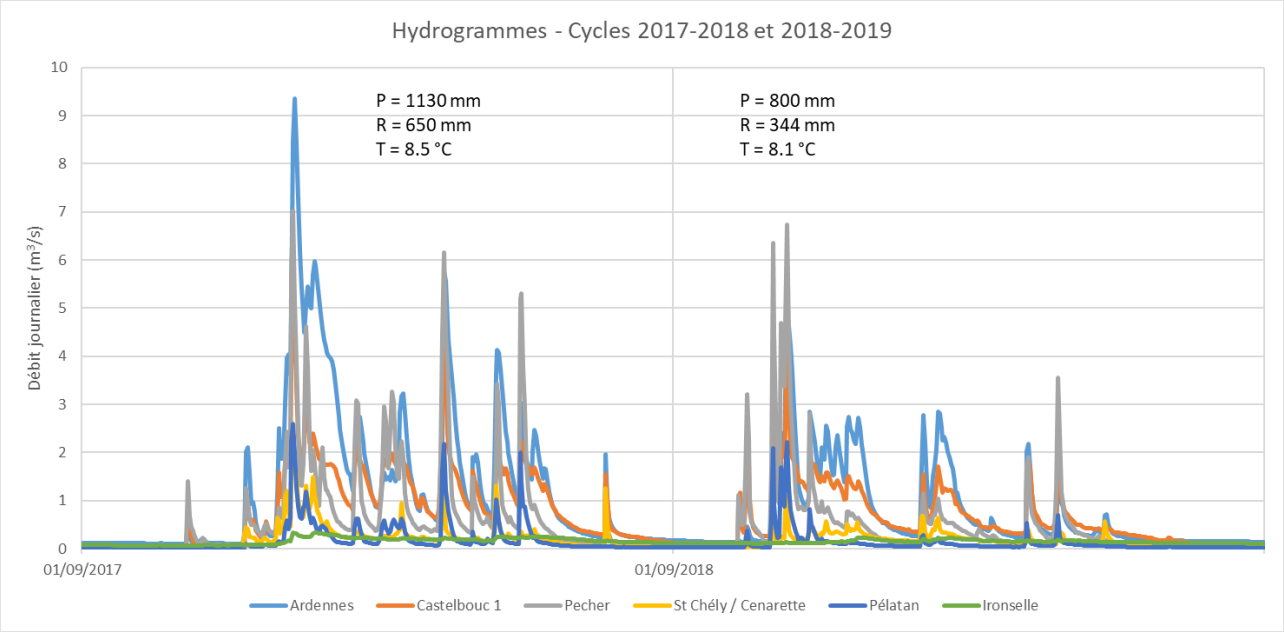


Figure 26 : Comparaison des hydrogrammes obtenus aux différentes stations hydrologiques.

Les systèmes karstiques étudiés sont suivis par des stations hydrologiques qui ne permettent pas de quantifier l'ensemble des sorties des systèmes, soit parce qu'il existe d'autres exutoires secondaires connus non suivis à proximité de l'exutoire suivi (ex. des Estivants pour le système de Castelbouc), soit parce qu'il existe des sources temporaires de trop plein qui ne sont pas ou mal prises en compte par les stations, celles-ci pouvant être positionnées dans le lit du Tarn. L'analyse des débits classés a montré que tous les systèmes étaient concernés par ce phénomène, ce qui signifie qu'il serait nécessaire de corriger (augmenter) les volumes de transit annuels observés aux stations pour estimer le volume réellement écoulé par chaque système.

Un ordre de grandeur peut être proposé en estimant à 70 % la part du volume annuel du système s'écoulant à Castelbouc 1 (cf. 2.1.1.b)). Pour les autres systèmes, la non prise en compte des volumes écoulés par les trop-pleins entraîne probablement une sous-estimation du volume total qui reste inconnue. De plus, le dispositif de suivi hydrologique de la station des Ardennes ne permet pas de bien décrire les forts débits dès lors que le trop plein servant à la mesure de pression hydrostatique devient actif.

Il n'existe pas de données de débits sur les exutoires karstiques dans la vallée de la Jonte, dont les exutoires des Douzes (BSS002CGXY) et du Maynial (haute, BSS002CGYH, et basse, BSS002CGYJ) qui drainent en partie le Causse Méjean (cf. partie 5 relative aux traçages artificiels). Une estimation du débit des exutoires karstiques à l'échelle annuelle peut être proposée en comparant les hydrogrammes obtenus aux stations de Meyrueis (station O3154020) à l'amont et du Rozier à l'aval. La station de Meyrueis est idéalement placée pour connaître les écoulements de la Jonte en amont du karst (cf. Figure 2).

Au pas journalier, ces chroniques montrent que le temps de transfert de l'onde de crue entre les deux stations est négligeable, si bien qu'une estimation du débit des résurgences karstiques est apportée par le calcul de la différence de débit entre les deux stations (dQ, Figure 27).

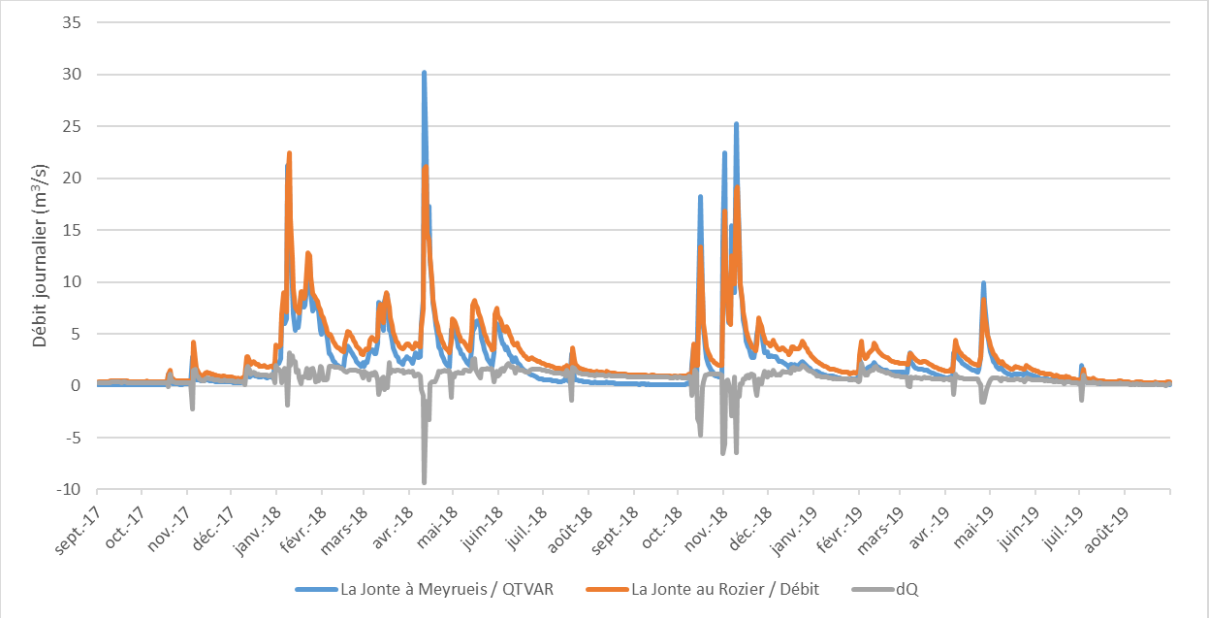


Figure 27 : Comparaison des hydrogrammes observés dans la Jonte à l'amont (station O3154020) et à l'aval (station du Rozier mise en place dans le cadre du projet).

On peut noter que le débit au Rozier est le plus souvent au moins égal au débit à Meyrueis dans la Jonte, mais pas tout le temps. Lors des crues cévenoles en particulier, le karst va jouer un rôle écrêteur de crue, et donc, temporairement, le débit à l'aval sera plus faible qu'à l'amont.

Le calcul de la différence de débit dQ entre les deux stations permet d'estimer à 930 l/s et 560 l/s le débit moyen annuel correspondant aux apports par le karst pour les cycles 2017-2018 et 2018-2019 respectivement. Ces apports d'eau correspondent à la restitution des eaux infiltrées à la surface du Causse, en cumulant les apports du Causse Noir et du Causse Méjean entre les stations de Meyrueis et du Rozier.

	Q moy. amont (m^3/s)	Q moy. aval (m^3/s)	Q moy. karst (m^3/s)
2017-2018	2.54	3.47	0.93
2018-2019	1.87	2.43	0.56

Tableau 12 : Estimation du débit moyen annuel des apports karstiques à la Jonte liés à la recharge sur les Causses Noir et Méjean.

Les volumes d'eau écoulés par les principaux systèmes karstiques drainant le Causse Méjean, en incluant les écoulements d'origine karstique des exutoires de la Jonte (Karst Jonte) sont reportés dans le Tableau 13, totalisant 150 à 100 Mm^3 pour les deux cycles étudiés. L'estimation pour le système de Castelbouc est obtenue en pondérant la valeur obtenue à Castelbouc 1 par 100/70=143 %.

c) Estimation des surfaces drainées par chaque système

L'étude géologique relative à la structure des formations aquifères du Causse Méjean (rapport BRGM RP-68189-FR) permet de supposer qu'il n'existe pas de flux d'eau souterraine significatif vers ou depuis d'autres systèmes aquifères plus profonds. L'essentiel du volume d'eau souterraine issue de la recharge par le Causse Méjean peut ainsi être quantifié par les volumes écoulés aux sources karstiques étudiés. En complément de l'estimation de la recharge (Tableau 11), les volumes de transit calculés dans la section précédente permettent ainsi de calculer la surface drainée théorique relative à chaque cycle hydrologique pour chaque système étudié. Les résultats sont reportés dans le Tableau 13.

Nom	Ardennes	Castelbouc total (Castelbouc 1)	Pêcher	Saint-Chély / Cénarette	Pélatan	Ironselle	Karst Jonte
Débit (m^3/s)							
2017-2018	1.28	1.20 (0.84)	0.70	0.22	0.19	0.16	0.93
2018-2019	0.72	0.86 (0.60)	0.48	0.16	0.11	0.14	0.56
Moyenne	1.00	1.03 (0.72)	0.59	0.19	0.15	0.15	0.74
Volume (Mm^3)							
2017-2018	40.3	37.7 (26.4)	22.2	7.0	6.1	5.0	29.3
2018-2019	22.6	27.1 (19.0)	15.1	5.1	3.6	4.5	17.6
Moyenne	31.5	32.4 (22.7)	18.6	6.0	4.8	4.8	23.4
Surface drainée (km^2)							
2017-2018	62	58 (41)	34	11	9	8	45
2018-2019	66	79 (55)	44	15	10	13	51

Tableau 13 : Résultats des calculs de bilan hydrologique sur les différents systèmes karstiques étudiés.

Une surface de l'ordre de 50 km^2 est proposée pour le bassin d'alimentation karstique des exutoires de la Jonte (Tableau 13). L'étude hydrogéologique du Causse Noir (rapport en cours d'édition) attribue une surface de l'ordre de 25 km^2 sur le Causse Noir pour l'ensemble de ces exutoires, ce qui laisse environs 25 km^2 pour le Causse Méjean. En tenant compte de cette valeur, le cumul des surfaces théoriques des bassins d'alimentation karstique de chaque système atteint 210 à 250 km^2 pour les cycles 2017-2018 et 2018-2019.

La surface du Causse qui reçoit les précipitations est estimée en excluant la bordure du Causse où la pente est supérieure à 20 % (cf. Figure 2). Cette délimitation permet de calculer une surface de 340 km^2. Malgré cette correction, les systèmes karstiques étudiés ne drainent que 60 % à 75 % de la surface du Causse Méjean.

Ces résultats permettent de conclure que la surface du Causse Méjean est largement suffisante pour expliquer les volumes d'eau écoulés par les différents systèmes karstiques étudiés. Il est probable que les volumes écoulés par les différents systèmes karstiques soient sous-estimés, notamment en raison de l'absence de suivi des sources de trop plein puisque l'écart est plus élevé lors du cycle présentant de nombreuses crues importantes (Tableau 13). L'estimation de 75 % de la surface du Causse Méjean obtenue à partir du cycle 2018-2019 est probablement plus proche de la valeur réelle, ce qui laisse environ 25 % de la surface du Causse Méjean (85 km^2) pour alimenter d'autres systèmes non instrumentés.

Il est difficile d'estimer rigoureusement l'incertitude associée à ces estimations, mais un ordre de grandeur des volumes écoulés par ces systèmes (ou des débits annuels) permet, à partir de la Figure 28 de proposer un classement des différents systèmes karstiques drainant le Causse Méjean.

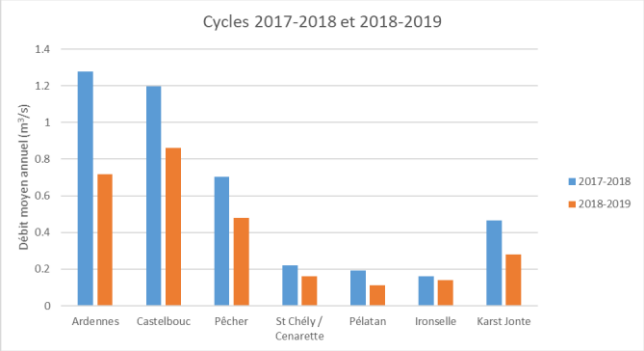


Figure 28 : Comparaison des débits moyens des systèmes karstiques étudiés, seuls les débits associés au drainage du Causse Méjean sont pris en compte pour les exutoires dela Jonte.

Les systèmes des Ardennes et de Castelbouc apparaissent comme les systèmes karstiques majeurs du Causse Méjean, avec des débits moyens annuels de l'ordre de 1 m^3/s. Le système du Pêcher présente un débit moyen annuel de l'ordre de 600 l/s, et constitue le troisième exutoire karstique majeur du Causse. Les autres exutoires étudiés apparaissent nettement plus faibles, avec un débit moyen annuel inférieur à 200 l/s.

Les venues d'eau karstique dans la vallée de la Jonte issues de la recharge par infiltration sur les Causses Noir et Méjean présentent en cumul un débit moyen annuel intermédiaire (~300 l/s), la moitié de ce débit, soit 100 à 200 l/s pouvant être attribué à une recharge sur le Causse Méjean. Il n'est pas possible par calcul de bilan entre les stations de Meyrueis et du Rozier de connaître le débit total des résurgences dans la Jonte, les volumes d'eau perdus et restitués des systèmes perte/résurgence ne sont pas pris en compte. Une estimation de la contribution des pertes de la Jonte au débit total du système des Douzes sera proposée par l'utilisation des isotopes du strontium (cf. 4.3.2).

3.3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE

Les principaux exutoires karstiques suivis permettent de décrire le fonctionnement des systèmes karstiques du Causse Méjean. Environ 75 % des précipitations efficaces qui rechargent le Causse sont restitués par ces systèmes.

Du point de vue du débit moyen interannuel, les systèmes karstiques des Ardennes et de Castelbouc se démarquent nettement, avec un débit moyen de l'ordre de 1 m^3/s. Vient ensuite la source du Pêcher, puis les autres systèmes de Saint-Chély/Cénarette, Pélatan et Ironselle pour les systèmes unaires (impluvium uniquement karstique).

Les volumes dynamiques estimés à partir des courbes de récession attribuent au système des Ardennes un pouvoir régulateur relativement élevé (k= 0.19 pour Vd~6.10^6 m^3), notamment par rapport à Castelbouc (k= 0.08 pour Vd~2.10^6 m^3). Le système des Ardennes présente donc des réserves bien plus importantes, et constitue ainsi **la ressource en eau karstique majeure du Causse Méjean**.

Le système karstique du Pêcher présente un comportement karstique très marqué (peu de filtrage de la dynamique de pluie), identique au système de Pélatan. Ce dernier est le seul système qui semble profiter d'apports depuis un autre système à partir de l'interprétation des débits classés. Cet apport qui survient en hautes eaux peut être la conséquence d'une réorganisation du drainage karstique au profit de ce système, par exemple avec le système limitrophe de Castelbouc, mais il peut également être le signe d'une alimentation par le biais d'une perte d'écoulement de surface ne fonctionnant qu'en hautes eaux (cf. perte du Pont-de-Marie, cf. 5.3.3).

Enfin, le système karstique de l'Ironselle se démarque nettement par un comportement de type « milieux poreux » identifiable sur la réponse pluie/débit. Ceci s'explique probablement par la présence de sable dolomitique et d'altérites dans le réservoir, comme en témoigne le nom « Sablière » attribuée à une autre émergence karstique (BSS004ABYT) drainant la même formation dolomitique du Bajocien inférieur dans ce secteur.

Ces résultats traduisent une logique géographique et géologique d'est en ouest représentée sur la carte de la Figure 29, avec un passage progressif des systèmes les plus karstifiés à proximité du contact Cévenol (Pêcher, Pélatan) vers des systèmes peu fonctionnels comblés d'altérites à l'ouest (Ironselle).

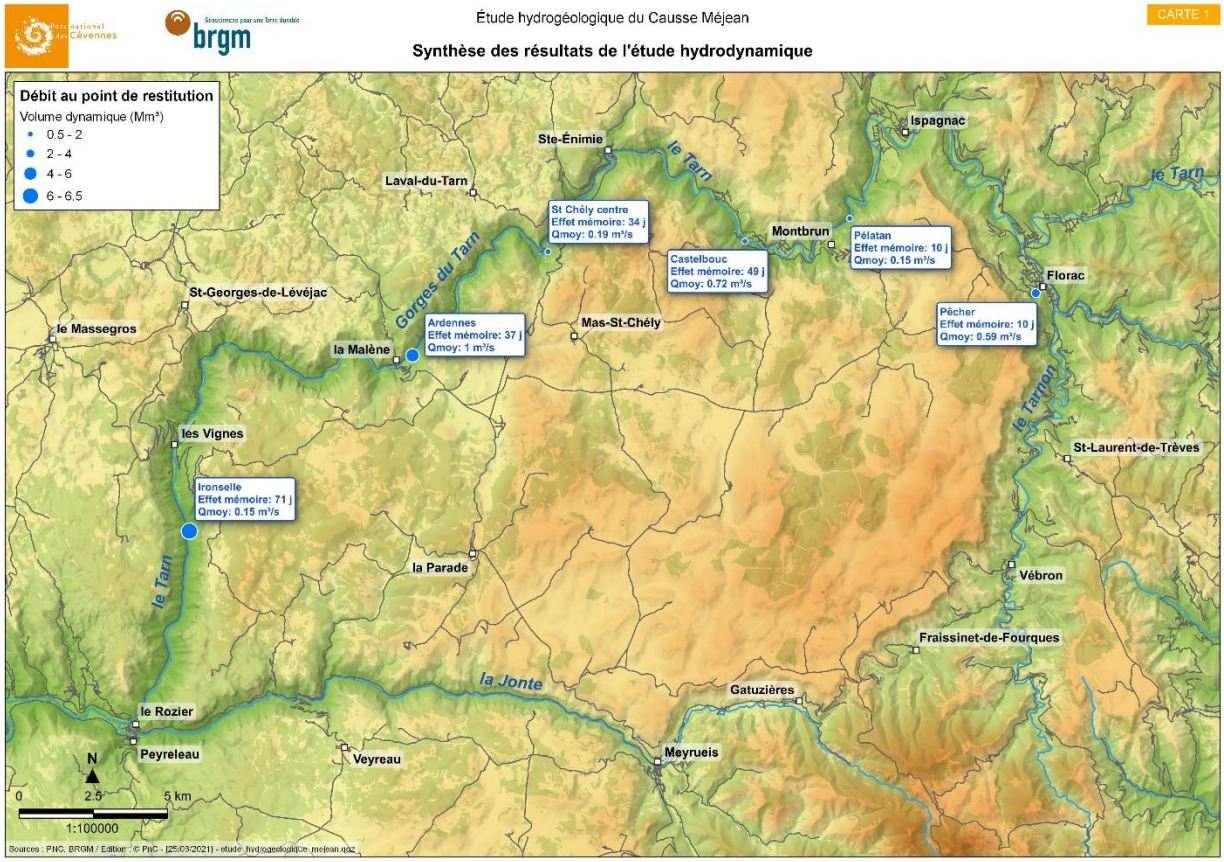


Figure 29 : Carte de synthèse des résultats de l'étude hydrodynamique.

4. Étude hydrochimique et traçage naturel

4.1. OBJECTIFS ET MÉTHODES MISES EN ŒUVRE

4.1.1. Campagnes spatiales

L'objectif des campagnes spatiales est de caractériser d'un point de vue géochimique et isotopique les faciès chimiques des eaux pour décrire l'origine et les modalités de transfert de l'eau depuis la surface du bassin d'alimentation jusqu'aux exutoires. Les ions ou isotopes qui sont quantifiés sont donc naturellement présents dans le système karstique, à la différence du traçage artificiel. La comparaison des faciès, ou signatures géochimiques des eaux, permet également de proposer des regroupements entre les différents exutoires, et ainsi mieux décrire l'extension des systèmes karstiques qui présentent plusieurs exutoires ou de comprendre les relations entre les différents systèmes.

Dans ce but, les sources de faible débit drainant une formation géologique bien identifiée ont été sélectionnées pour mieux caractériser les pôles géochimiques des eaux karstiques du Causse Méjean. Le bassin-versant de la Jonte et la résurgence des Douzes sont traités à part dans le but d'identifier la signature chimique de l'eau des Douzes résultant d'un mélange entre l'eau de la Jonte infiltrée en aval de Meyrueis et l'eau d'origine karstique issue des Causses Méjean et Noir. Par ailleurs, une zone potentielle de paléo-perte de la Jonte au contact des calcaires hettangiens, et donc pouvant contribuer à l'alimentation de la source du Pêcher avait été suggérée lors de l'étude géologique (cf. Husson *et al.*, rapport BRGM/RP-68189-FR, Figure 116, p149). Les outils géochimiques et isotopiques mis en œuvre ont donc également pour but de mettre en évidence cette éventuelle relation.

Du point de vue des ions majeurs, le contexte hydrogéologique du Causse Méjean tel que décrit dans l'étude géologique (rapport BRGM RP-68189-FR) permet de supposer que toutes les eaux présenteront un facies bicarbonaté-calcique et/ou magnésien, selon le degré d'interaction avec les formations calcaires et dolomitiques. Pour les exutoires localisés dans les formations de l'Hettangien, dont la source du Pêcher, une influence du socle pourra être recherchée pour identifier d'éventuelles interactions avec le mur de l'aquifère, ou quantifier la contribution éventuelle des eaux de la Jonte en amont de Meyrueis. Sur le Causse, des exutoires perchés ont été prélevés dans le but de caractériser la signature du Jurassique supérieur, mais également mieux quantifier les interactions possibles avec les formations superficielles d'origine cévenole.

Une campagne de caractérisation des faciès chimiques de l'eau en basses eaux a donc été réalisée en Juillet 2017, complétée par deux autres campagnes en Septembre 2018 et Octobre 2019 pour caractériser les signatures des exutoires karstiques principaux et celles des différents pôles associés.

Ces analyses des ions majeurs en basses eaux ont été complétées, pour certains points, par des analyses des éléments traces, des isotopes de la molécule d'eau et des isotopes du strontium dans le but de mieux caractériser les éventuels échanges entre les eaux de la Jonte et l'eau des résurgences des Douzes ou des sources drainant les calcaires hettangiens (dont le Pêcher), mais également la signature issue des interactions eau/roche avec les formations superficielles d'origine cévenole.

Ces trois campagnes d'analyses réalisées en basses eaux ont été complétées en Mars 2018 par deux campagnes sur un nombre plus réduit de sources afin de préciser le fonctionnement en hautes eaux de certains systèmes. L'évolution géochimique commune des basses eaux aux hautes eaux de plusieurs exutoires permet notamment d'en proposer un regroupement. Par ailleurs, les prélèvements en hautes eaux ont aussi pour but de mieux caractériser la variabilité des teneurs en nitrates sur les principales sources, en vue d'identifier une éventuelle influence des usages agricoles sur la ressource en eau. Enfin, une dernière campagne a été réalisée pour le système de l'Ironselle dans le cadre du travail de thèse de Laïna Perotin (univ. Montpellier), incluant des prélèvements à la source de la Volpilière et dans des actifs du réseau de la Cheminée par des spéléologues.

Les résultats obtenus sur ces trois années de suivis sont également comparés aux suivis disponibles sur la base de données ADES afin d'identifier d'éventuelles évolutions et de mieux définir la variabilité naturelle des faciès chimiques des eaux du Causse Méjean. La carte présentée sur la Figure 30 positionne l'ensemble des points échantillonnés. La base de données relative au projet totalise 63 échantillons répartis sur 33 points de prélèvements.

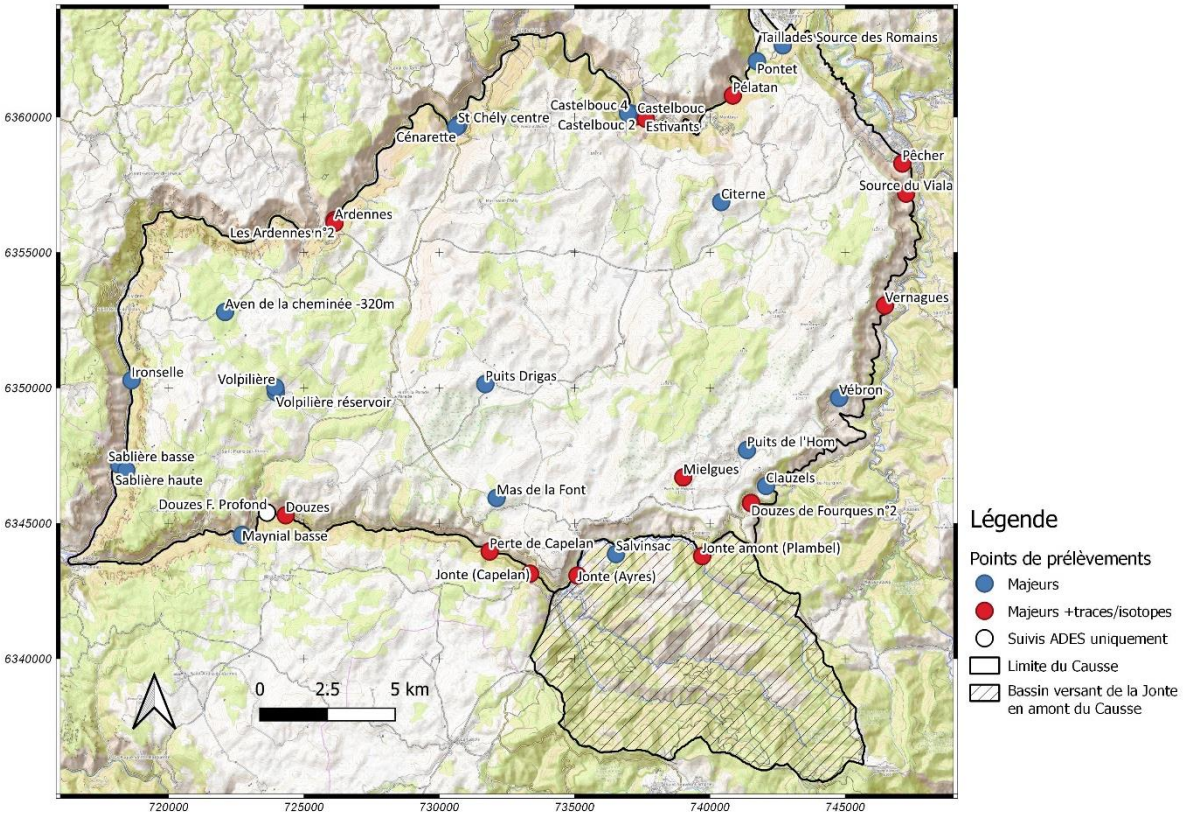


Figure 30 : Carte de localisation des différents points de prélèvements selon le type d'analyse ou l'origine de la donnée, reportée sur le fond OpenTopoMap.

Ainsi l'étude hydrochimique doit permettre de répondre aux questions suivantes à partir des différentes campagnes spatiales :

- Quels sont les exutoires qui présentent des signatures géochimiques identiques et qui peuvent, sur la base d'arguments géologique et hydrodynamiques complémentaires être regroupés dans le même système karstique ?
- Les eaux de la Jonte peuvent-elles contribuer à la recharge des exutoires karstiques de l'Hettangien, dont le Pêcher ?
- La source du Pêcher est-elle alimentée par de l'eau provenant du socle ? Existe-t-il des interactions avec les formations de socle ?
- Les systèmes étudiés, et notamment les captages (Pêcher, Pélatan, Douzes) présentent-ils une évolution chimique en lien avec les activités humaines sur leur bassin ?

4.1.2. Évolutions temporelles

Les suivis mensuels ou trimestriels de la variabilité des paramètres chimiques des eaux ne permettent pas de capturer la dynamique d'évolution de ces paramètres lors des crues. De plus, sur quelques années de projet de tels suivis ne permettent pas non plus d'identifier une éventuelle tendance sur les marqueurs des pressions anthropiques. Aussi, il a été choisi de se limiter à un nombre restreint de campagnes spatiales, complété par la valorisation des suivis disponibles sous ADES, et de s'appuyer sur des suivis physico-chimiques à haute fréquence (15 min) de la température, de la conductivité électrique, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau des exutoires principaux pour caractériser la contribution d'eau récente aux exutoires. Ainsi, l'objectif principal d'étude des variations temporelles est de **quantifier la contribution des flux rapides au débit de l'exutoire du système**, ce qui revient à déterminer la dynamique de mobilisation de l'eau issue de l'évènement, et de la comparer à la mobilisation des réserves du système.

L'interprétation des chroniques sera réalisée à partir d'observations graphiques et de calcul de corrélogrammes croisés entre le débit et la conductivité électrique de l'eau. Les principes d'interprétation sont les suivants : l'arrivée d'eau récente à l'exutoire se marque par une chute de la conductivité, une évolution de la température qui va dépendre de la température extérieure lors de la pluie, la mobilisation de composés humiques fluorescents issus de la dégradation de la matière organique dans les horizons pédologiques. Si cette arrivée d'eau s'accompagne d'une augmentation de la turbidité, alors les matières en suspension (MES) apportées par la crue proviennent de la zone d'infiltration. L'arrivée d'eau pré-évènementielle se marque principalement par une augmentation de la conductivité électrique de l'eau. Si une augmentation synchrone de la turbidité et de la conductivité est observée, alors les MES qui arrivent à l'exutoire ont probablement été remobilisées suite à la crue et proviennent de la zone noyée ou de niveaux saturés perchés.

En complément, une analyse des distributions statistiques de minéralisation à partir de la conductivité électrique sera réalisée pour caractériser le degré de karstification et la contribution de différents types d'eau à l'exutoire (Bakalowicz, 1979 ; Bakalowicz et Mangin, 1980) : une distribution uni-modale très resserrée va caractériser un système karstique peu fonctionnel montrant peu de variabilité physico-chimique. Une distribution bi-modale traduit l'existence de deux types d'eau à l'exutoire, et une distribution très étalée traduira un système karstique développé capable de drainer rapidement les eaux lors des crues.

4.2. ANALYSE DES IONS MAJEURS

4.2.1. Résultats des campagnes spatiales

a) Analyse du faciès chimique

Les résultats obtenus pour les différentes campagnes sont reportés dans le tableau en annexe 2. Les analyses réalisées dans le cadre du projet ont été effectuées par le laboratoire HydroSciences Montpellier. La figure suivante synthétise les résultats obtenus, en incluant les échantillons moyens des points disponibles sous ADES (cf. Tableau 14). Un regroupement des points par couleur a été réalisé pour identifier facilement les principaux systèmes karstiques, leurs exutoires secondaires (par ex. Castelbouc 2, 3, 4 et Estivants pour Castelbouc 1), ainsi que toutes les eaux directement influencées par les eaux de la Jonte (dont le point relatif au forage profond des Douzes issu des analyses ADES, identifiant BSS BSS002CGYQ). La taille des points est proportionnelle à la conductivité électrique spécifique de l'eau afin d'intégrer une information relative à la minéralisation totale des eaux.

Le diagramme ternaire des cations montre qu'à l'exception des eaux de la Jonte, tous les systèmes étudiés ont comme cations majoritaires le calcium et le magnésium, le sodium et le potassium restant relativement négligeables. Le diagramme ternaire des anions montre que les eaux des systèmes karstiques étudiés se confondent et sont toutes marquées par un faciès bicarbonaté. On retrouve les eaux peu minéralisées de la Jonte qui contiennent, relativement, plus de sulfates et de chlorures. Les eaux relativement minéralisées de la source de la Douze de Fourques n° 2 (BSS004ABYJ, 457 µS/cm) lors de la campagne de hautes eaux se distinguent également par leur enrichissement en sulfates (22 mg/l) et chlorures (16 mg/l). Cette source sort au niveau de la base de l'Hettangien au contact des schistes. Une analyse en lame mince de l'Hettangien a été réalisée dans le cadre d'une étude des eaux carbo-gazeuses du site de Quézac (rapport BRGM confidentiel BRGM/RC-57030-FR). L'Hettangien à dominante dolomitique révèle la présence de gypse et surtout de pyrite qui suggère une origine interne des sulfates, ce qui est confirmée par l'analyse isotopique du souffre et de l'oxygène des sulfates. Une origine interne des sulfates par dissolution de niveaux évaporitiques présents dans le réservoir aquifère permet ainsi d'expliquer par exemple la faible augmentation des teneurs observées en basses eaux à la source du Pêcher. Par contre, cette hypothèse ne permet pas d'expliquer la forte teneur à la source de la Douze de Fourques en hautes eaux. Lors du prélèvement, notamment en hautes eaux, le thalweg collecte également le ruissellement sur les niveaux marneux qui surmontent les formations de l'Hettangien. Cet échantillon permet ainsi de caractériser la signature des eaux influencés par des formations marneuses, qu'il s'agisse des intercalations marneuses du Sinémurien ou des marnes du Toarcien.

Une première analyse en composante principale (ACP1, Figure 31) a été réalisée à partir des ions majeurs, en excluant les nitrates dont l'évolution ne traduit pas les interactions avec le réservoir. Cet ACP permet d'expliquer 67 % de la variance des sept variables retenues. Elle distingue clairement les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes à gauche des eaux de la Jonte et du système karstique des Douzes à droite. Le point relatif à la source de la Douze de Fourques n° 2 se positionne dans le coin supérieur droit, et caractérise ici le pôle relativement riche en sulfates et chlorures. Une seconde ACP (ACP 2, Figure 31) a été réalisée en retirant le point de la source de la Douze de Fourques (H2) afin de mieux distinguer les autres points.

L'analyse de ces graphiques permet de proposer les interprétations suivantes :

- le système karstique des Ardennes montre peu de variations d'une campagne à l'autre et se positionne au centre de l'ensemble des points du Causse. On retrouve juste au- dessus les eaux des systèmes de l'Ironselle, de la Sablière (basse, BSS004ABYT) et de Saint Chély-Cénarette, qui présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, le magnésium étant avec les sulfates la principale variable contribuant à la seconde composante (F2) pour les deux ACP ;

- les eaux des principaux systèmes karstiques du Causse Méjean évoluent selon une direction définie par la minéralisation (HCO_3^-), à l'exception du système des Douzes, mais aussi du Pêcher. Ce système montre un enrichissement relatif en chlorures et sulfates en basses eaux, mais retrouve un faciès parfaitement identique aux systèmes karstiques de Castelbouc ou Pélatan en hautes eaux (cf. point H2 pour le Pêcher). Le système des Douzes se distingue clairement des autres systèmes karstiques dans les deux ACP, ce qui s'explique par la forte contribution des eaux de la Jonte à son alimentation. Les eaux prélevées au forage profond sont très proches de celles de la source des Douzes en basses eaux, tandis que la source Maynial (basse) présente une plus faible influence des eaux de la Jonte ;
- les analyses de hautes eaux réalisées sur les différents exutoires secondaires du système de Castelbouc (Castelbouc 2, 3, 4 et Estivants, cf. H1 sur l'ACP1 et la position des points sur l'ACP2) sont très proches ;
- les eaux des aquifères perchés du Jurassique sup. prélevées en basses eaux apparaissent souvent plus minéralisées, avec des faciès bicarbonatés calciques (ex. source de la Volpilière) ou magnésiens (prélèvements dans les conduits actifs du réseau de la Cheminée).

Ces résultats apportent un nouvel élément permettant de proposer que les exutoires de Castelbouc 1 à 4 et surtout des Estivants appartiennent au même système karstique. De même**, les eaux des exutoires des Douzes, du Maynial et les eaux prélevées au forage profond sont influencées par les pertes de la Jonte**. Un traçage a été réalisée par le BRGM dans le cadre d'un Appui aux Administrations (ARS DD48) pour valider cette interprétation, suite aux recommandations de l'hydrogéologue agréé (Subias, 2019). Les résultats mettent en évidence la relation entre les eaux de la Jonte, la source des Douzes et les eaux captées de ce forage profond (Bailly-Comte, 2021). La figure présentant les résultats obtenus lors de ce traçage est reportée en Annexe 5.

La source du Pêcher est le seul exutoire majeur du Causse Méjean qui montre un (faible) enrichissement en chlorures et sulfates en basses eaux, se rapprochant ainsi du pôle défini par les eaux de la source des Douzes de Fourques. Des valeurs relativement élevées en sulfates sont également observées sur les exutoires au contact des marnes du Toarcien (Vébron à 28 mg/l) ou situés à la base de la série liasique (Clauzels et Vernagues vers 6 mg/l, Viala à 24 mg/l, cf. Annexe 2). Les teneurs en sulfates les plus élevées sont observées en basses eaux aux sources du Pêcher et de Vernagues, ce qui est cohérent avec une origine interne des sulfates dans les dolomies hettangiennes (présence d'évaporites), mais peut également traduire des interactions eau/roche avec les marnes séparant le réservoir hettangien du réservoir du Jurassique moyen à supérieur pour la source du Pêcher. Une analyse isotopique du souffre et de l'oxygène des sulfates pour différentes conditions hydrologiques permettrait de lever cette incertitude. En hautes eaux, l'analyse des ions majeurs seuls ne permet plus de bien distinguer les eaux des différents systèmes karstiques du Causse, et notamment les eaux du Pêcher qui se rapprochent de celles de Castelbouc et de Pélatan.

Aucune anomalie permettant de supposer une origine cévenole des eaux du Pêcher via des remontées d'eau à travers le socle ou via des infiltrations d'eau de la Jonte dans les calcaires hettangiens n'est mise en évidence. La température de la source du Pêcher (10,6 °C en moyenne) ne se distingue pas non plus de celle des autres sources drainant le Causse Méjean (cf. Annexe 2 pour les suivis ponctuels et le paragraphe 4.4.2.a)). Au contraire, en hautes eaux, l'eau du Pêcher est identique à celle des autres systèmes karstiques, ce qui signifie que **la recharge de ce système s'effectue bien à la surface du Causse** à travers les mêmes formations du Jurassique à l'affleurement sur le Causse Méjean. Pour ce système, seuls les prélèvements en basses eaux permettent de déceler à partir des ions majeurs une influence du réservoir liasique.

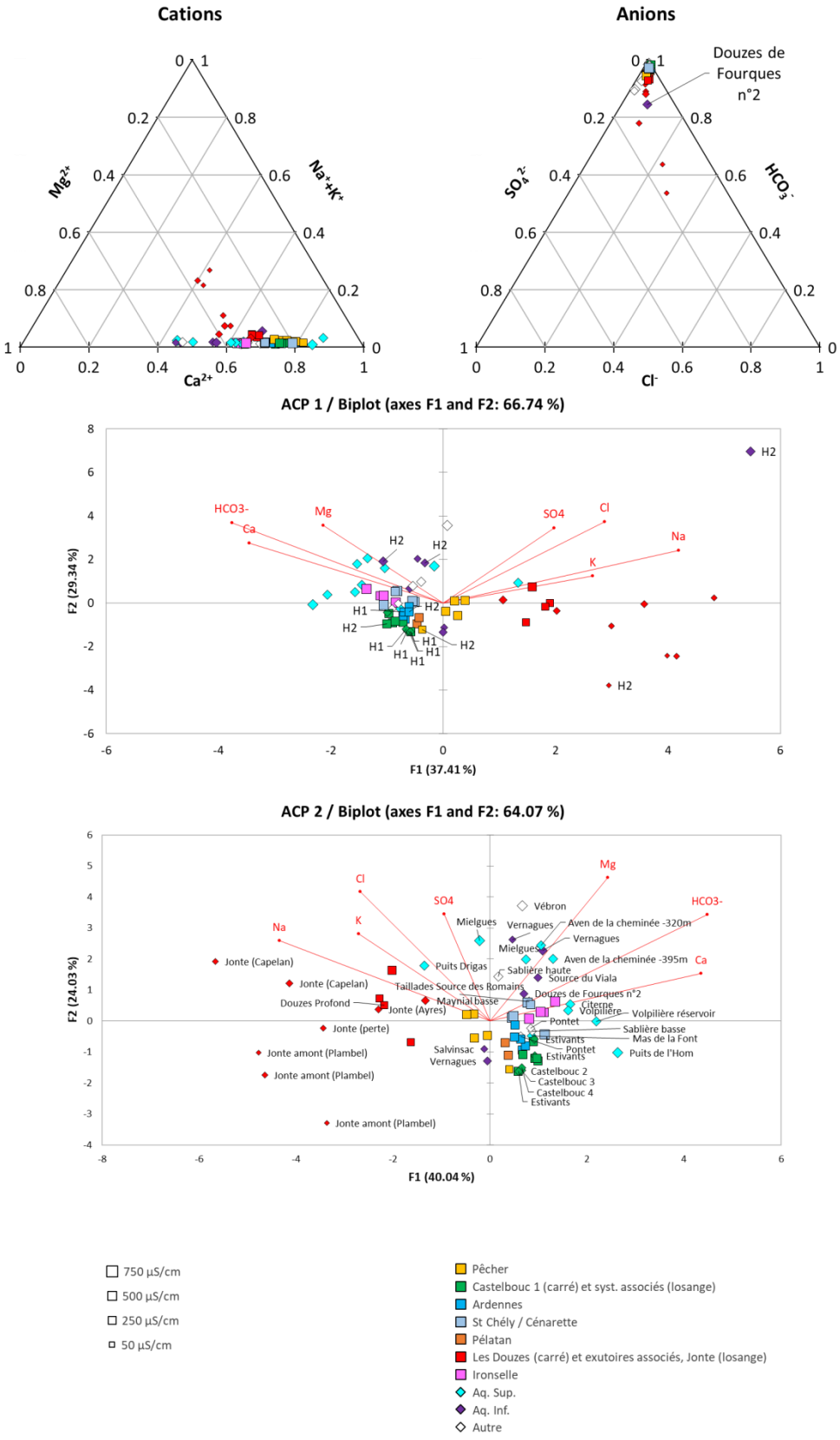


Figure 31 : Diagrammes ternaires et résultats des analyses ACP pour les campagnes spatiales – H1 et H2 correspondent aux deux campagnes de hautes eaux.

b) Signatures anthropiques

L'origine des nitrates est interprétée à partir de la relation NO_3^-=f(Cl^-) reportée sur la Figure 32 en utilisant le même jeu de données. La plupart des points échantillonnés présentent des valeurs cohérentes avec le « bruit de fond » naturel pour ces ions. Les eaux de l'aquifère supérieur prélevé en basses eaux présentent très peu de nitrates, mais ceux-ci ont pu être en partie consommés compte tenu des valeurs parfois faibles de l'oxygène dissous mesuré par exemple à la source de la Volpilière (6,7 mg/l en juillet 2019, valeur la plus basse de tout le jeu de données étudié).

Les eaux de surface de la Jonte présentent également très peu de nitrates, ce qui traduit le peu d'impact anthropique sur cette zone d'étude. Les fortes valeurs en chlorure observées à la source de la Douze de Fourques n° 2 ne s'accompagnent pas d'une anomalie en nitrates. **Trois systèmes karstiques présentent des valeurs en nitrates légèrement plus élevées, sans lien avec une augmentation de chlorure, ce qui peut traduire une origine anthropique probablement agricole des nitrates : Pontet (BSS002BLGT), Saint-Chély/Cénarette et Moulin de Pélatan**. Une valeur à plus de 15 mg/l a notamment été mesurée à la source du Moulin de Pélatan, ce qui reste inférieur à la norme de potabilité mais traduit clairement un impact anthropique d'origine agricole qui devra être identifié sur son bassin (cf. §6). On peut également y inclure la source des Clauzels (Tableau 14) qui présente des concentrations en nitrates pouvant atteindre 7 mg/l. Ceci sera discuté dans la section 7.3.

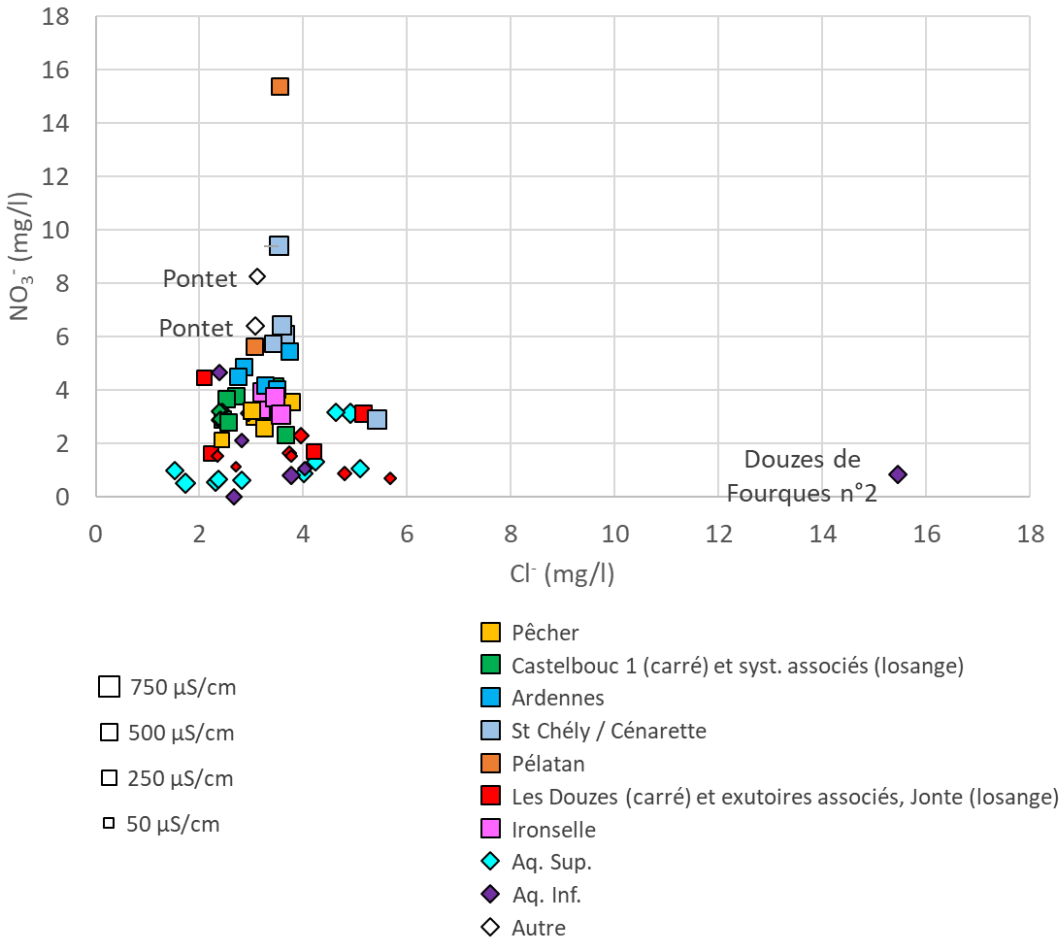


Figure 32 : Relation nitrates/chlorures (données du projet + moyennes ADES).

4.2.2. Évolution pluri-annuelle à partir des suivis ADES

L'annexe 2 présente l'ensemble des analyses disponibles sur la base de donnée ADES pour les exutoires de Castelbouc 1 (BSS002BLDX), le Pêcher (BSS002BLGA), le Moulin de Pélatan (BSS002BLEU), la source de l'Ironselle (BSS002CGFJ), le Moulin de Cénarette (BSS002BLBE), la source des Clauzels (BSS002CHCG) et les eaux du forage profond des Douzes (BSS002CGYQ).

Le Tableau 14 synthétise ces informations en ne représentant que les valeurs moyennes, l'écart type, le minimum et le maximum observé. Une donnée aberrante du 26 janvier 2017 à Castelbouc 1 a été exclue de l'analyse. Les valeurs moyennes ont été utilisées dans l'analyse précédente (Figure 31). Ces valeurs sont cohérentes avec celles obtenues dans le cadre du projet et ne permettent pas d'identifier des tendances, notamment sur les nitrates ou les chlorures susceptibles d'être apportés par les activités anthropiques.

Les valeurs les plus élevées de nitrates sont obtenues au Moulin de Cénarette (9 mg/l) et à Castelbouc 1 (7,8 mg/l). Pour Castelbouc 1, elles apparaissent de manière erratique, et s'accompagnent de valeurs de température aberrante (cf. Annexe 2, T>20 °C). Il est donc possible que les prélèvements associés ne soient pas représentatifs. Pour le Moulin de Cénarette, toutes les valeurs sont significativement plus élevées (moyenne à plus de 5 mg/l, contre des valeurs autour de 3 à 4 mg/l pour les autres exutoires du Causse Méjean). Les analyses de nitrates comprises entre 6 et 9 mg/l réalisées lors du projet au Moulin de Cénarette et à Saint-Chély Centre confirment cette observation (cf. Figure 32). On constate une concentration légèrement plus élevée au Moulin de Cénarette qu'à la source de Saint-Chély Centre.

Les cinq valeurs de nitrates mesurées à la source du Moulin de Pélatan entre 1993 et 1998 n'identifient pas d'anomalies en nitrates sur ce point. Les valeurs élevées observées dans le cadre de ce projet pour cette source (15 mg/l pour la campagne BE2) peuvent donc traduire une évolution des usages agricoles sur son bassin d'alimentation depuis les années 2000. La valeur obtenue pour la première campagne BE1 est nettement plus faible (5,6 mg/l), mais reste supérieure aux cinq données historiques disponibles pour ce point.

	Nom	C.E. (µS/cm)	T (°C)	O2 (mg/l)	Coliformes	E. Coli	HCO3-	Cl-	NO3-	SO4--	Na+	K+	Mg++	Ca++
µ	Castelbouc 1	405.1	11.2	10.4	5.0	0.5	255.4	2.3	3.7	2.5	1.2	0.3	12.8	66.1
σ		81.3	1.8	2.6	4.0	0.5	50.7	0.7	1.1	0.6	0.3	0.1	2.7	11.2
max		719.2	20.5	21.5	9.0	1.0	506.0	5.4	7.8	4.0	2.8	0.4	22.6	121.0
min		334.0	10.3	4.9	1.0	0.0	211.0	1.8	2.5	1.6	0.8	0.2	8.4	57.1
µ	Pêcher	360.0	10.7	10.3	6.3	10.0	231.3	3.2	3.0	6.2	1.5	0.3	9.6	66.8
σ		24.3	0.7	0.7	8.4	31.8	16.1	0.8	1.2	1.7	0.3	0.0	2.2	14.9
max		402.0	12.8	11.7	29.0	175.0	259.0	5.4	5.0	11.0	2.2	0.4	13.0	110.5
min		315.0	9.6	9.0	0.0	0.0	195.0	2.0	0.4	4.0	1.1	0.2	4.8	52.0
µ	Pélatan	383.4	11.3		19.4	2.1			3.6	3.5				
σ		58.0	0.9		16.1	1.7			0.9	0.5				
max		487.0	12.9		48.0	6.0			4.6	4.0				
min		310.0	9.3		1.0	0.0			2.1	3.0				
µ	Ironselle	450.6	10.8	10.1			295.1	3.1	3.6	2.9	1.4	0.4	21.0	67.1
σ		14.0	0.9	1.1			12.4	0.4	0.6	0.4	0.2	0.4	0.6	4.6
max		476.0	12.0	13.6			320.0	5.0	4.0	3.0	1.7	2.8	22.0	76.0
min		411.0	7.0	5.5			244.0	2.0	2.0	1.0	1.0	0.2	20.0	52.0
µ	Moulin de Cenarette	448.1	10.9	10.2	7.7	1.0	288.2	2.9	5.4	3.1	1.4	0.4	12.4	79.7
σ		12.7	0.3	1.0	4.5	0.8	22.3	0.4	1.6	0.7	0.1	0.1	3.8	4.6
max		475.0	12.0	10.8	14.0	2.0	309.0	4.0	9.0	4.0	1.7	0.7	18.0	90.0
min		423.0	10.0	5.0	4.0	0.0	176.0	2.0	3.0	2.0	1.0	0.2	5.9	73.0
µ	Source des Clauzels	373.5	10.3		18.4	50.5			5.1	6.0				
σ		24.2	1.2		13.3	90.6			1.1	0.0				
max		419.0	12.6		50.0	300.0			7.0	6.0				
min		340.0	8.3		0.0	0.0			4.0	6.0				
µ	Douzes F. Profond	304.7	12.1	8.0			187.7	4.4	2.1	5.6	2.8	0.7	11.7	45.8
σ		44.9	1.3	1.1			30.4	1.0	0.6	1.0	0.3	0.2	2.2	6.8
max		391.5	16.0	9.2			248.0	8.0	3.0	8.0	3.7	1.3	16.0	59.0
min		201.0	8.0	4.3			120.0	3.0	1.0	4.0	2.2	0.5	7.0	30.0

Tableau 14 : Analyse statistique des données de qualité disponibles sous ADES – concentrations en mg/l (µ : moyenne, σ : écart type), données microbiologiques en nombre pour 100 mL.

4.3. CHIMIE ISOTOPIQUE ET ÉLÉMENTS TRACES

4.3.1. Isotopes stables de l'eau

Les isotopes de la molécule d'eau (^{2}H et ^{18}O) ont été mesurés sur une sélection de points de la campagne de basses eaux de 2017 pour tenter d'identifier par un appauvrissement isotopique (effet d'altitude et précipitations neigeuses) les eaux issues du ruissellement sur les Cévennes, et notamment les versants de l'Aigoual qui alimentent la Jonte à plus de 1 500 mNGF. Par comparaison, le relief de la surface du Causse Méjean varie relativement peu spatialement, entre +/- 900 m NGF à l'ouest jusqu'à 1247 m NGF au Mont Cargo, avec une altitude moyenne de 990 mNGF.

Ainsi, les eaux de la Jonte devraient être marquées par un appauvrissement en isotopes lourds (^{18}O et ^{2}H). Cette signature isotopique appauvrie peut donc servir de traceur des interactions des systèmes karstiques étudiés avec les eaux de la Jonte.

Les eaux de la perte de la Jonte ont été échantillonnées lors de la campagne BE1 directement au niveau de la perte, tandis qu'un prélèvement au lieu-dit « Capelan » permet de caractériser les eaux de la Jonte environ 1,6 km en amont, sachant qu'il n'existe aucun affluent entre ces deux points. Le point « Capelan » de la campagne BE2 est donc considéré comme représentatif de l'eau de la perte de la Jonte.

Les résultats obtenus, exprimés en unité δ(‰), sont présentés sur la Figure 33 et reportés dans le Tableau 15. La première campagne (BE1) a été analysée par les laboratoires du BRGM, les deux suivantes ont été analysées par la plateforme du LAboratoire Mutualisé d'Analyse des isotopes stables de l'eau (LAMA) d'HydroSciences Montpellier.

La Figure 33 présente en rouge le nom des échantillons pour lesquels un appauvrissement en isotopes lourds était attendu. On s'aperçoit qu'il s'agit finalement des points les plus enrichis du jeu de données, juste après les échantillons de la source de Vernagues (BSS002CHCM), qui reste enrichie également en hautes eaux.

Un effet continental permet d'expliquer ce résultat : les masses d'air qui apportent les précipitations sur l'Aigoual proviendraient de la Méditerranée relativement proche, et resteraient donc relativement enrichies par rapport aux masses d'air d'origine atlantique qui apportent les précipitations sur le Causse Méjean. Ainsi, malgré les différences d'altitude entre le haut bassin de la Jonte et le Causse Méjean, les caractéristiques climatiques de la zone d'étude ne permettraient pas d'interpréter directement les signatures des isotopes stables de l'eau. Il n'est donc pas possible d'identifier la contribution d'une eau issue des précipitations sur les versants cévenols par cet outil isotopique.

Les campagnes réalisées en basses eaux montrent des valeurs relativement distinctes entre les principaux exutoires du Causse Méjean. En hautes eaux, les valeurs observées à Castelbouc 1 et Pêcher sont les plus appauvries et sont très proches. On en déduit que les eaux mobilisées par le Pêcher en hautes eaux sont les eaux rechargées à la surface du Causse Méjean, ce qui est cohérent avec les interprétations obtenues par l'analyse des ions majeurs. Les valeurs plus enrichies au Pêcher en basses eaux semblent être influencées par la variabilité spatiale de la pluie, à l'origine de valeurs de plus en plus appauvrie en allant vers l'ouest du Causse Méjean (Pêcher>Pélatan>Castelbouc>Ardennes) lors de la campagne BE3. Seul le Pêcher présente une grande variabilité de la signature isotopique entre les basses eaux et les hautes eaux, mais il est probable que la source du Moulin de Pélatan aurait présenté le même appauvrissement en hautes eaux. On note également une très faible différence entre les valeurs observées à la source des Estivants et de Castelbouc pour la campagne BE3. Cette différence peut s'expliquer par les incertitudes analytiques (Tableau 15) et ne permet pas de conclure sur une origine de l'eau différente.

Campagne	Date	Nom	BSS	δ18O	+/-	δ2H	+/-
BE1	06/07/2017	Pêcher	BSS002BLGA	-7.8	0.1‰	-48.1	0.8‰
	06/07/2017	Vernagues	BSS002CHCM	-7.5	0.1‰	-45.3	0.8‰
	06/07/2017	Douzes	BSS002CGXY	-7.8	0.1‰	-50	0.8‰
	06/07/2017	Castelbouc 1	BSS002BLDX	-8.2	0.1‰	-53.3	0.8‰
	06/07/2017	Jonte (Ayres)	ND	-7.6	0.1‰	-48.5	0.8‰
	07/07/2017	Perte de la Jonte	ND	-7.5	0.1‰	-47.4	0.8‰
	07/07/2017	Douzes de Fourques	BSS004ABYJ	-7.5	0.1‰	-48.2	0.8‰
	06/07/2017	Salvinsac	BSS002CHBD	-8	0.1‰	-52.3	0.8‰
	07/07/2017	Jonte (Plambel)	ND	-7.7	0.1‰	-47.7	0.8‰
HE2	16/03/2018	Castelbouc 1	BSS002BLDX	-8.39	0.05‰	-51.5	0.9‰
	16/03/2018	Douzes de Fourques	BSS004ABYJ	-8.47	0.05‰	-52.3	0.9‰
	16/03/2018	Jonte (Plambel)	ND	-7.95	0.05‰	-47.7	0.9‰
	16/03/2018	Pêcher	BSS002BLGA	-8.48	0.05‰	-53.2	0.9‰
	16/03/2018	Source du Viala	BSS002BLGB	-7.56	0.05‰	-48.2	0.9‰
	16/03/2018	Vernagues	BSS002CHCM	-7.14	0.05‰	-43.3	0.9‰
BE2	11/09/2018	Douzes	BSS002CGXY	-7.52	0.09‰	-48.5	0.9‰
	11/09/2018	Capelan	ND	-7.28	0.09‰	-45.5	0.9‰
	11/09/2018	Jonte Plambel	ND	-7.62	0.09‰	-45.2	0.9‰
	11/09/2018	Vernagues	BSS002CHCM	-6.92	0.09‰	-42.9	0.9‰
	11/09/2018	Fne de Mielgues	BSS004ABYP	-3.01	0.09‰	-23.8	0.9‰
	11/09/2018	Pêcher	BSS002BLGA	-7.41	0.09‰	-47.6	0.9‰
	12/09/2018	Pélatan	BSS002BLEU	-7.63	0.09‰	-50.3	0.9‰
	12/09/2018	Ardennes	BSS002BKZD	-8.19	0.09‰	-54.6	0.9‰
	12/09/2018	Castelbouc 1	BSS002BLDX	-8.00	0.09‰	-52.2	0.9‰
	12/09/2018	Estivans	BSS004ABYK	-7.87	0.09‰	-52.3	0.9‰

Tableau 15 : Résultats des analyses isotopiques des stables de l'eau.

La donnée obtenue à la Fontaine de Mielgues (BSS004ABYP) lors de la campagne BE2 présente un enrichissement important lié à un processus d'évaporation au point de prélèvement et ne peut être reportée sur ce diagramme. La signature isotopique de cette eau avant évaporation s'obtient en appliquant une correction selon une pente de l'ordre de 4.5 à 5.5 (Clark et Fritz, 1997, pour une humidité de l'air entre 50 % et 80 %) jusqu'à recouper la droite locale des eaux météoriques (LMWL), ce qui donne les deux points « Fne de Mielgues recalculé » sur la Figure 33. Il est donc possible de replacer le prélèvement de la Fontaine de Mielgues dans le groupe de points qui caractérisent les eaux rechargées sur le Causse Méjean.

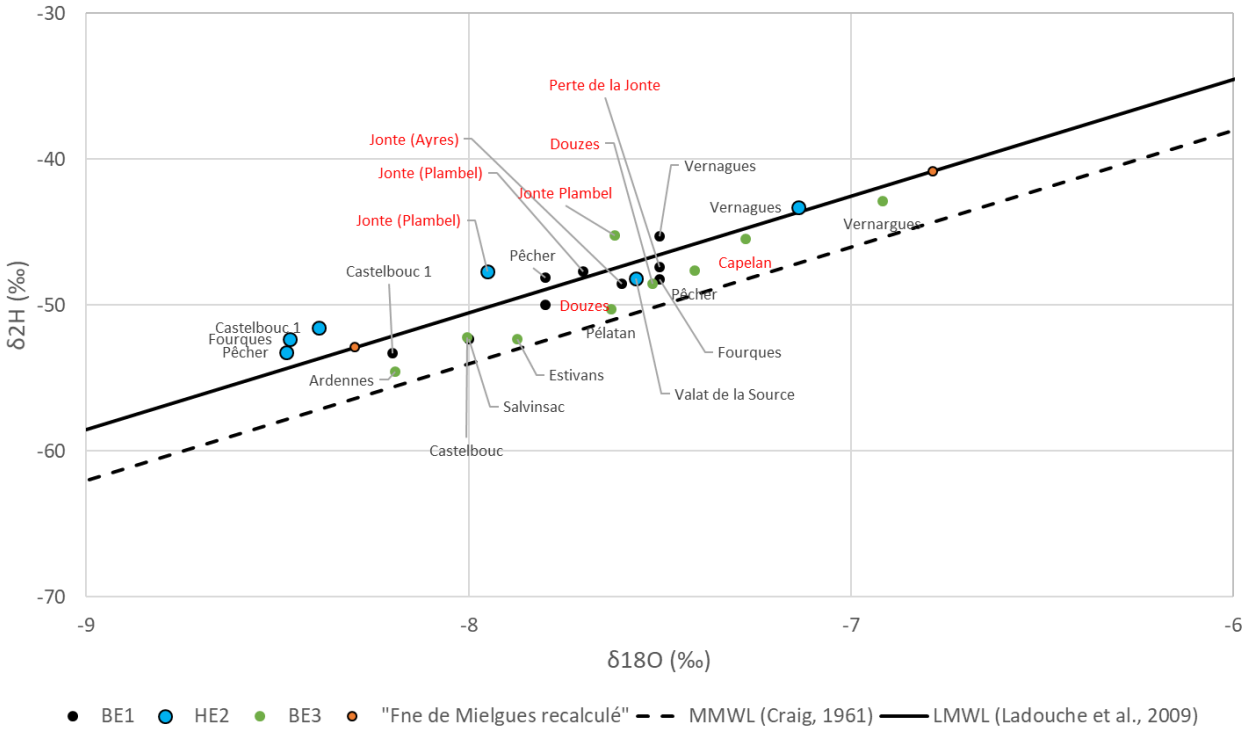


Figure 33 : Graphique des résultats des analyses stables de l'eau.

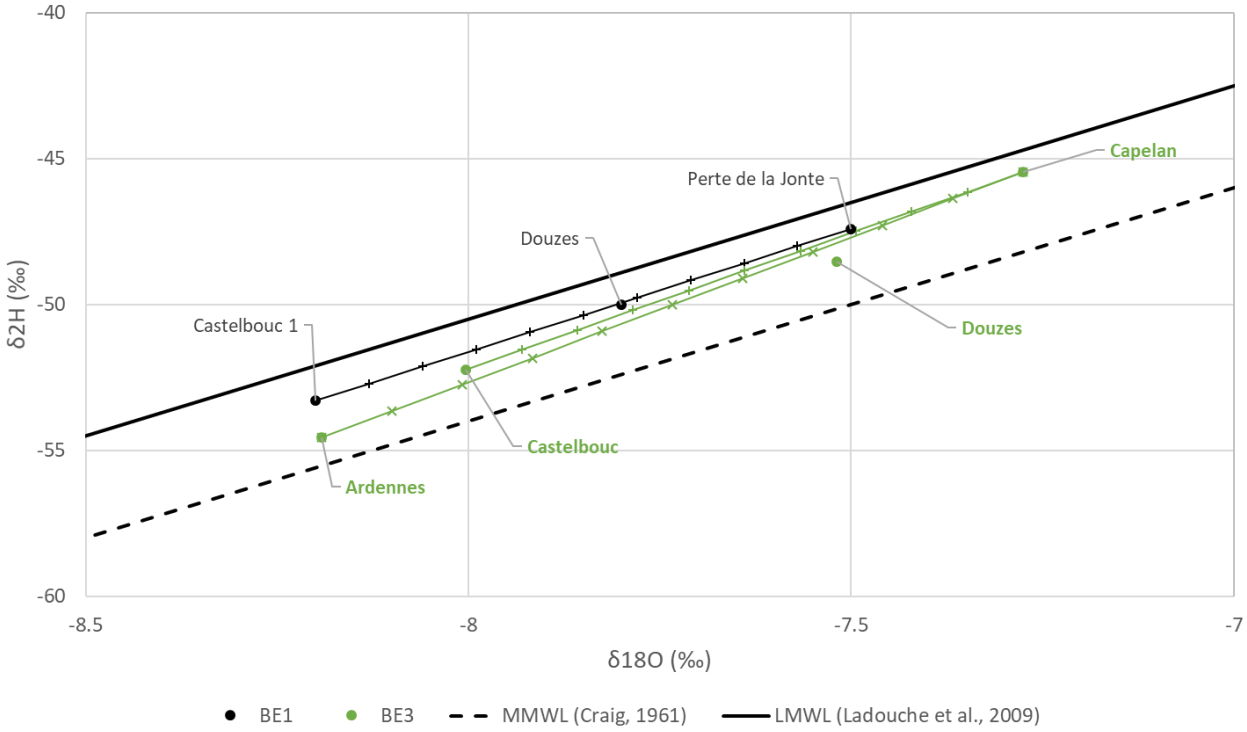


Figure 34 : Droite de mélange permettant de quantifier la contribution des eaux de la Jonte (Perte de la Jonte, Capelan) à l'alimentation du système des Douzes par mélange avec les eaux du Causse Méjean de type Castelbouc ou Ardennes – les droites sont graduées tous les 10 %.

Si la position des différents points d'eau reste complexe à interpréter du fait d'une origine météorique probablement différente des précipitations, ce type de diagramme permet de quantifier la contribution de la Jonte à l'alimentation du système des Douzes. La Figure 34 positionne l'échantillon des Douzes entre les points représentatifs des eaux de la perte de la Jonte et des apports karstiques. La donnée obtenue à Castelbouc 1 ou aux Ardennes a été utilisée pour représenter la signature des eaux d'origine karstique, qu'elles proviennent du Causse Méjean ou du Causse Noir.

Les droites de mélanges permettent ainsi d'expliquer la signature isotopique de la source des Douzes en supposant une contribution de la Jonte de l'ordre de 55 à 60 % pour la campagne BE1, et de 60 à 70 % pour la campagne BE3.

4.3.2. Isotopes du Strontium

a) Principe

Le strontium en solution est un cation qui se substitue au calcium lors de la précipitation de carbonates. Il existe deux principaux isotopes stables : le ^{87}Sr et le ^{86}Sr. Le ^{87}Sr est produit par la désintégration du ^{87}Rb, ce qui explique sa plus grande abondance dans les eaux qui drainent des roches silicatées telles que les granites et les schistes. Dans ce contexte, le rapport isotopique $^{87}Sr/^{86}Sr$ du Sr en solution sera très élevé, et marquera une origine « radiogénique ».

Lors du dépôt d'une formation carbonatée, le rapport isotopique $^{87}Sr/^{86}Sr$ des carbonates va suivre le rapport de l'eau à l'origine de ce dépôt (Faure, 1986). Ce rapport concerne deux isotopes lourds ayant une faible différence de masse atomique. Ce rapport n'est donc pas sensible aux changements de phase et n'est pas modifié au cours des différents processus qui affectent le cycle de l'eau et les équilibres chimiques. Ainsi, la connaissance de la signature isotopique en Sr de l'eau de mer au cours du temps permet de connaître la signature isotopique du dépôt, et cette signature va à son tour marquer les eaux contenues dans la porosité de la roche sédimentaire issue de ce dépôt. Les travaux de Burke *et al.* (1982) permettent de reconstituer l'évolution du rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$ au cours du temps (Figure 35), et ainsi de connaître la signature isotopique théorique du Strontium selon l'âge d'un réservoir carbonaté d'origine marine. Faure (1986) a également montré que l'absence de fractionnement isotopique permettait d'identifier par des droites des mélanges entre deux types d'eau (mélange binaire) sur un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr=f(1/Sr)$.

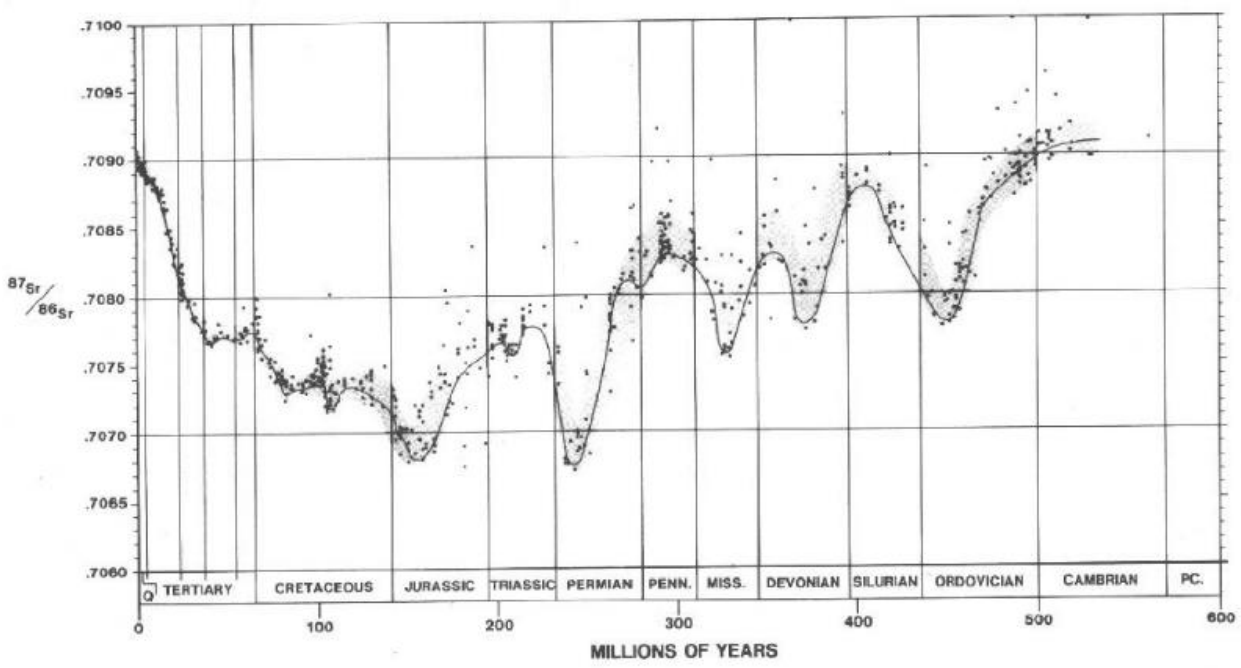


Figure 35 : Évolution du rapport isotopique du Sr depuis le Cambrien (Burke et al. *1982).*

b) Application au contexte hydrogéologique du Causse Méjean

La mer liasique et jurassique à l'origine des dépôts carbonatés du Causse Méjean présentait une signature variant entre 0.7075 et 0.7068 respectivement. Ces valeurs sont donc attendues pour des eaux en interaction avec les calcaires et dolomies du Causse Méjean. Dans cette étude, la valeur de 0.7075 sera retenue pour les formations de l'Hettangien, tandis que le Jurassique moyen sera caractérisé par une valeur de 0.7070. Ces valeurs caractérisent la signature isotopique du réservoir carbonaté, sans considérer d'anomalies radiogéniques induites par des interactions eau-roche avec des formations de socle.

L'histoire géomorphologique décrite dans le rapport relatif à l'étude géologique, géomorphologique et karstologique du Causse Méjean (BRGM/RP-68189-FR) permet également de mentionner la présence de formations superficielles à la surface du Causse, à la fois en surface dans les vallons fluvio-karstiques et les paléo-poljés de contact mais aussi dans l'endokarst. Ces formations allochtones d'origine cévenole sont constituées d'alluvions et de galets fluviatiles. Elles se retrouvent en surface au pied des bordures de corrosion et notamment le long de la bordure est du Causse jusqu'au droit de Florac. Des galets piégés dans des paléokarsts ou retrouvés sous forme de remplissages dans les cavités sont également identifiés sur toute la hauteur de l'incision du Causse Méjean. Ainsi, les systèmes karstiques du Causse Méjean sont susceptibles de présenter une anomalie radiogénique sur le rapport isotopique du Sr en lien avec des interactions eaux-roche avec ce matériel allochtone sédimentaire.

Enfin, des valeurs plus élevées (radiogéniques) sont également attendues pour les eaux de la Jonte issues de ruissellement sur des formations de socle.

Des prélèvements ont été réalisés lors de deux campagnes de basses-eaux (BE1 et BE3) sur les eaux de la Jonte, notamment au niveau de la perte en aval de Meyrueis, et sur une sélection des systèmes karstiques du Causse Méjean.

c) Résultats

Les résultats obtenus sur les deux campagnes de basses eaux sont présentés dans le Tableau 16 et la Figure 36. Comme pour l'analyse des stables de l'eau, le point de prélèvement de la Jonte à Capelan sera considéré comme représentatif des eaux des pertes de la Jonte.

- **Caractérisation des pôles radiogéniques**

Les valeurs obtenues pour les eaux de la Jonte apparaissent bien radiogéniques, avec des rapports qui dépassent 0.714 dans la Jonte à Plambel. Cette signature diminue petit à petit vers l'aval en raison des apports par des eaux souterraines (ex. Salvinsac), mais reste nettement radiogénique. Une zone potentielle de paléo-perte au contact des calcaires hettangiens pouvant contribuer à l'alimentation de la source du Pêcher avait été suggérée lors de l'étude géologique (cf. rapport BRGM/RP-68189-FR, Figure 116, p149). Les eaux potentiellement infiltrées dans ce secteur sont donc bien marquées par une signature radiogénique du Sr. La signature de la Jonte à Capelan (BE2) ou à la perte de la Jonte (BE1), soit à l'aval de la confluence de la Jonte avec le Béthuzon est encore plus radiogénique. Ceci est dû aux apports par le Béthuzon issus d'un bassin versant constitué de granite et de roches métamorphiques. Ainsi, l'eau de la Jonte présente une nette signature radiogénique (>0.711) avant d'alimenter le karst jurassique.

- **Système karstique du Causse Méjean**

La signature radiogénique de la Jonte se retrouve très bien à la résurgence des Douzes, qui présente une valeur de l'ordre de 0.710. Cependant, les autres exutoires, et notamment ceux drainant le Causse Méjean apparaissent également radiogéniques, puisqu'ils présentent tous une valeur bien supérieure à celle reportée pour la mer jurassique (0.7070) et liasique (0.7075).

Un prélèvement a été réalisé sur l'exutoire perché de la Fontaine de Mielgues dans le secteur de Nîmes-le-Vieux pour mettre en évidence le rôle des formations superficielles d'origine cévenole sur la signature isotopique des exutoires du Causse Méjean. Cet exutoire draine les eaux du Bathonien au niveau du Puech de Mielgues et devrait donc présenter une valeur de l'ordre de 0.7075. La valeur de 0.7889 obtenue lors de la campagne BE3 s'interprète ainsi comme l'influence des formations superficielles d'origine cévenole.

Ainsi, il est possible d'expliquer des anomalies radiogéniques sur le Causse Méjean sans faire intervenir de phénomène de mélange par les eaux de la Jonte. Il ne peut s'agir que du résultat des interactions eau-roche avec les dépôts et remplissages karstiques fluviatiles d'origine cévenole. Cette anomalie explique les signatures radiogéniques des exutoires qui drainent essentiellement la bordure est du Causse, telles que la source de Vernagues. Les fortes anomalies radiogéniques observées aux Douzes de Fourques n° 2 et à Salvinsac peuvent également s'expliquer par des circulations au contact de formations de socle ou le long de filons de quartz (schistes affleurant dans le vallon à l'est de l'exutoire de Salvinsac, schistes affleurant identifiés lors du prélèvement à la source des Douzes de Fourques).

La source du Pêcher ne se distingue pas des autres exutoires du Causse Méjean échantillonnés (Castelbouc BE1 et BE2, Ardennes, Pélatan et Estivants BE2). Tous ces exutoires présentent une valeur proche de 0.7082 (Figure 36). Cette valeur signe donc les eaux des principaux exutoires du Causse Méjean non influencées par les pertes de la Jonte, de la source du Pêcher jusqu'aux Ardennes.

Ainsi, aucune anomalie spécifique à la source du Pêcher n'est identifiée, celle-ci présente des valeurs comparables à celles observées sur les autres systèmes karstiques drainant le Causse. À l'exception des Douzes, les différents systèmes karstiques du Causse Méjean se distinguent par leur concentration en Sr, mais pas par la signature isotopique du Sr qui témoigne d'interactions eau-roche avec les dépôts fluviatiles d'origine cévenole présent dans l'endokarst. Seul le système des Douzes est alimenté par les pertes de la Jonte, et **aucune contribution d'eau ayant été au contact des formations schisteuses ou granitiques n'est identifiée pour les autres systèmes majeurs drainant le Causse Méjean.**

Campagne	Date	Nom	BSS	Sr (ppb)	LD	$^{87}Sr/^{86}Sr$	2σ
BE1	06/07/2017	Pêcher	BSS002BLGA	46.340	0.003	0.708281	0.000010
	06/07/2017	Vernagues	BSS002CHCM	22.899	0.003	0.709586	0.000012
	06/07/2017	Douzes	BSS002CGXY	45.495	0.003	0.710355	0.000012
	06/07/2017	Castelbouc 1	BSS002BLDX	23.172	0.003	0.708227	0.000010
	06/07/2017	Salvinsac	BSS002CHBD	35.817	0.003	0.709929	0.000010
	07/07/2017	Jonte (Plambel)	ND	23.303	0.003	0.711016	0.000008
	06/07/2017	Jonte (Ayres)	ND	55.001	0.003	0.710699	0.000016
	07/07/2017	Perte de la Jonte	ND	44.801	0.003	0.711661	0.000012
	07/07/2017	Douzes de Fourques	BSS004ABYJ	38.547	0.003	0.709913	0.000012
BE2	11/09/2018	Douzes	BSS002CGXY	51.299		0.709898	0.000006
	11/09/2018	Jonte (Capelan)	ND	49.914		0.711194	0.000006
	11/09/2018	Jonte (Plambel)	ND	26.428		0.714227	0.000008
	11/09/2018	Vernagues	BSS002CHCM	40.553		0.710575	0.000008
	11/09/2018	Fne de Mielgues	BSS004ABYP	22.417		0.708892	0.000006
	11/09/2018	Pêcher	BSS002BLGA	47.131		0.708337	0.000006
	12/09/2018	Pélatan	BSS002BLEU	26.971		0.708221	0.000006
	12/09/2018	Ardennes	BSS002BKZD	35.254		0.708131	0.000006
	12/09/2018	Castelbouc 1	BSS002BLDX	24.557		0.708283	0.000008
	12/09/2018	Estivans	BSS004ABYK	24.137		0.708301	0.000008

Tableau 16 : Résultats des analyses isotopiques du Sr.

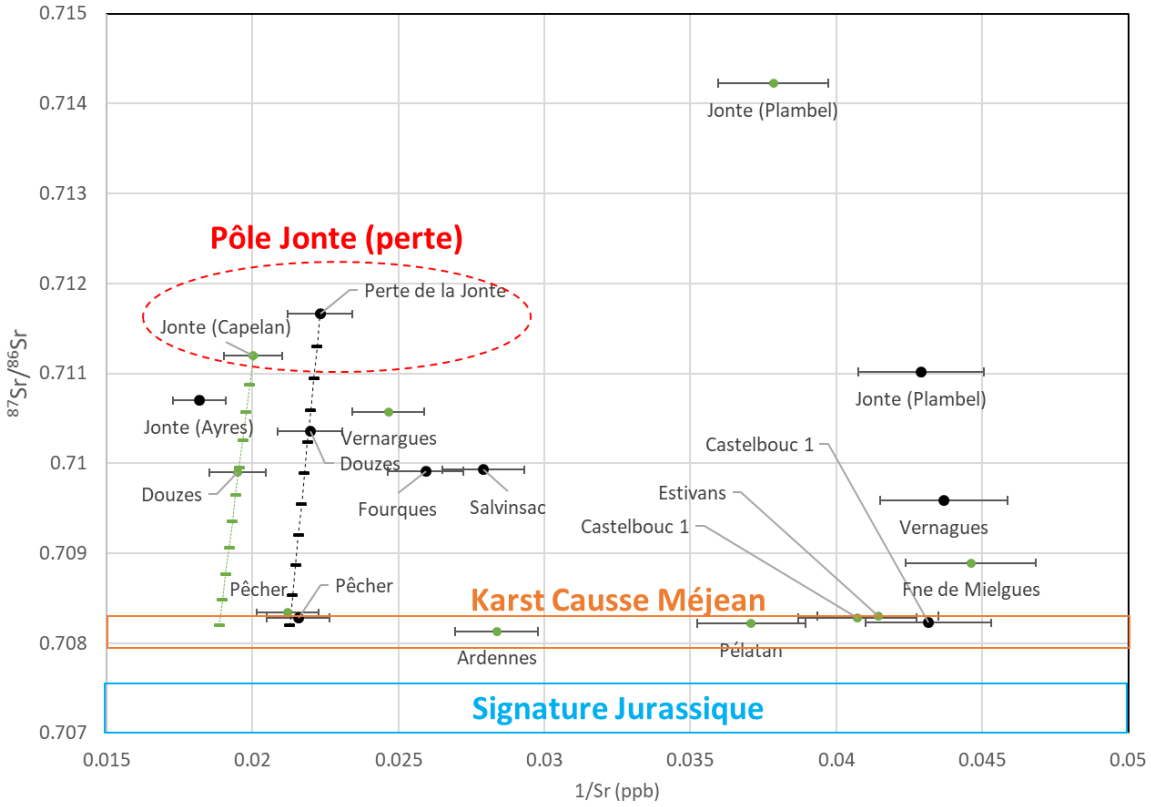


Figure 36 : Diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr = f(1/Sr)$ – les droites de mélange tracées depuis le pôle Jonte sont graduées tous les 10 %.

Cette interprétation permet de quantifier la contribution des eaux de la Jonte à l'alimentation du système karstique des Douzes (Figure 36) : La position des eaux de la perte de la Jonte et de la source des Douzes permet de recalculer la position du pôle de mélange théorique qui caractérise les eaux karstiques du Méjean et du Causse Noir, en supposant une signature isotopique de l'ordre de 0.7082. La concentration en Sr est obtenue par prolongement de droite passant par le point relatif à la perte (Jonte « Capelan » pour la seconde campagne) et le point à la source des Douzes pour la campagne correspondante. On obtient une concentration en Sr pour le pôle théorique de mélange de l'ordre de 50 ppb, avec une signature isotopique fixée à 0.7082. La détermination de ce pôle permet alors de **quantifier la contribution de la Jonte à l'alimentation du système karstique des Douzes, qui est de l'ordre de 60 % pour les deux campagnes**, ce qui confirme l'estimation donnée par l'analyse des isotopes stables de l'eau.

4.4. PHYSICO-CHIMIE EN CONTINU

4.4.1. Fluorescence naturelle et turbidité

a) Principe de mesure et d'interprétation

La fluorescence de l'eau et la turbidité ont été suivies en continu aux principaux exutoires karstiques par des fluorimètres multispectraux de type GGUN. Ces appareils mesurent simultanément la fluorescence de l'eau dans quatre plages de longueur d'ondes, dont l'une est dédiée à une mesure de diffusion de la lumière par les particules sur le spectre de Rayleigh à 650 nm (bande spectrale où la longueur d'onde d'excitation est égale à la longueur d'onde d'émission pour se focaliser sur la diffusion de la lumière par les particules). Les trois autres optiques sont dédiées à la mesure de la fluorescence dans des gammes proches des trois familles de traceurs artificiels pouvant être séparés selon leurs caractéristiques spectrales : l'uranine, les rhodamines et les azurants optiques. Ces derniers présentent des plages de détection les plus proches de celles de la matière organique fluorescente naturellement présente dans le milieu, et notamment les acides humiques provenant de la dégradation de la matière organique végétale dans le sol et la zone d'infiltration. Cette optique est donc très sensible aux variations de la fluorescence naturelle de l'eau.

La matière organique dissoute va rapidement évoluer et se dégrader dans l'eau. Les composés organiques fluorescents sont ceux qui se dégradent en premier, leur présence en grande quantité traduit donc l'arrivée à l'exutoire d'une matière organique « fraîche », soit un temps de séjour de l'eau récent (quelques jours à dizaine de jours). **La fluorescence naturelle de la matière organique est donc un outil de l'hydrogéologie karstique permettant de tracer la dynamique de contribution des eaux à faible temps de séjour à l'exutoire.** Par ailleurs, des anomalies de fluorescences naturelles sur un exutoire peuvent également être un indicateur d'une charge organique importante sur l'impluvium en lien avec les pratiques agricoles ou les systèmes d'assainissements. Selon le contexte, la fluorescence naturelle des eaux peut donc également traduire la réponse du système aux pressions anthropiques qui s'exercent sur son bassin.

Plus de détails sur le principe de fonctionnement de ces fluorimètres multispectraux et l'utilisation de la fluorescence naturelle de l'eau comme traceur de l'infiltration rapide dans les aquifères karstiques peuvent être trouvés dans les publications de Mudarra *et al.* (2011), Quiers *et al*. (2013) et Bailly-Comte *et al*. (2018).

b) Interprétation des résultats

Les graphiques suivants présentent les évolutions de la turbidité, exprimée en unité NTU, et de la fluorescence naturelle, exprimée en concentration (ppb) équivalente d'AminoG Acid afin de comparer les intensités mesurées par les fluorimètres aux différentes sources. Ces données sont comparées aux évolutions du débit et de la conductivité électrique de l'eau afin de guider l'interprétation. Seules les données relatives à certains épisodes de crue sont représentées, l'ensemble des chroniques disponibles est reporté en Annexe 3 en complément d'un tableau de synthèse (Tableau 17). Ces suivis ont été réalisés sur des sources souvent non aménagées (cf. 2.2) dans un souci de ne pas modifier durablement l'environnement et les conditions d'émergence des sources. Cette contrainte rend cependant les installations de matériel plus vulnérables aux aléas climatiques (lors des crues dans les cavités suivies pour le matériel installé en bordure du lit du Tarn), ce qui nécessite plus d'opérations de maintenance. De plus, les suivis optiques de fluorescence et de turbidité nécessitent un nettoyage manuel fréquent des cellules de mesures (brosse) difficile à réaliser sur une grande zone d'étude, ce qui explique les dérives observables, notamment sur l'optique dédiée à la turbidité (Annexe 3).

Les Figure 37 et Figure 38 présentent le type de réponse observé à la source du Pêcher, sachant que la sonde multi-spectrale est placée dans la chambre de captage. La sonde de conductivité est placée en aval de la pisciculture dans le ruisseau du Pêcher, et présente des anomalies (sous-estimation ponctuelle) liées à la présence de bulles d'air (dégazage) qui se logent sur la cellule de mesure. L'évolution de la température est influencée par la température de l'air et n'est donc pas représentée sur cette figure.

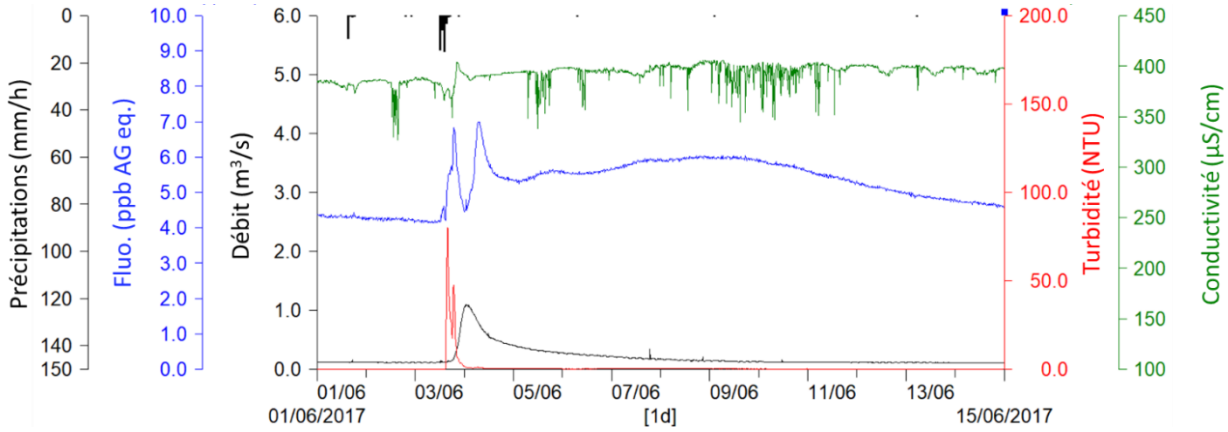


Figure 37 : Évolutions comparées du débit, des précipitations horaires, de la conductivité, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Pêcher en juin 2017.

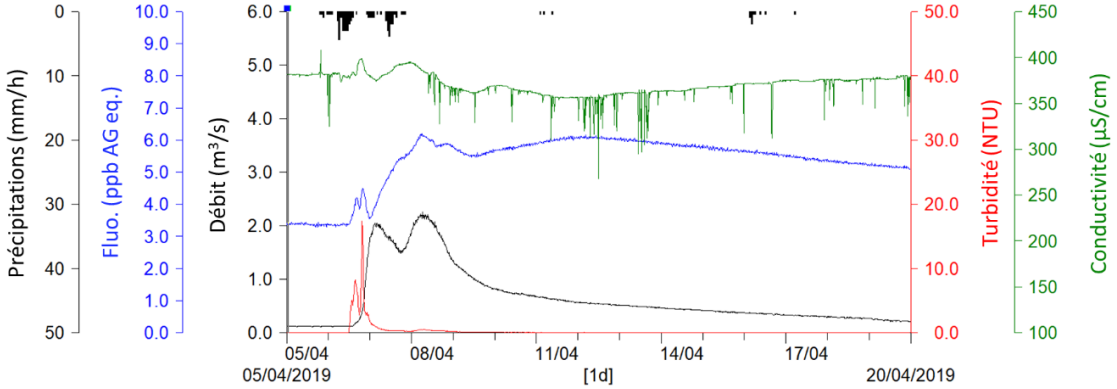


Figure 38 : Évolutions comparées du débit, des précipitations horaires, de la conductivité électrique, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Pêcher en avril 2019.

Une première réponse forte en turbidité, pouvant approcher 80 NTU s'observe en réponse aux précipitations, avant même que le débit n'augmente (Figure 37). Il ne s'agit pas d'un décolmatage du réseau karstique puisque ce pic de turbidité intervient avant la phase de montée rapide du débit. Ce faible flux très turbide s'accompagne d'une réponse en fluorescence. Ce signal chute dès que le débit à la source augmente, provoquant une baisse de conductivité, puis une nouvelle mobilisation d'eau fluorescente et minéralisée est identifiée quelques heures après le pic de crue, tandis que la turbidité reste faible. Une dernière augmentation de fluorescence est ensuite observée plusieurs jours après le pic de crue, associée à une faible baisse de la conductivité lors de l'épisode d'avril 2019 (Figure 38).

On observe donc trois types de réponses fluorescentes successives à la source, l'une correspond à un flux très faible mais très rapide d'eau turbide et riche en matière organique fluorescente, la seconde correspond au déplacement de l'eau issue de la recharge par les précipitations qui transite par la zone d'infiltration du système, et la dernière réponse traduit également l'arrivée d'eau issues de l'épisode de recharge, mais avec une dynamique plus lente et plus inertielle.

La première réponse correspond probablement à une contribution locale issue de l'infiltration au contact des calcaires hettangiens des eaux ruisselées le long de la bordure du Causse sur les marnes du Toarcien. Ce type de réponse ne s'observe que lors de fortes intensités de pluie au droit de la source, ce qui est mal caractérisé par le suivi des précipitations au Villaret. Ces pluies ne donneront pas nécessairement lieu à de forts cumuls et à une forte crue ensuite, comme dans l'exemple de Juin 2017 (Figure 37). La dernière réponse plus amortie s'observe plusieurs jours après le pic de crue (6 à 7 jours sur l'exemple de la Figure 38). Le traçage réalisé depuis l'aven des Bastides (BSS002BLEJ, cf. partie 5) montre que le temps de trajet de l'eau depuis la surface du Causse Méjean à proximité de la bordure est plus rapide. Cette réponse amortie qui s'observe plusieurs jours après le pic de crue pourrait donc traduire l'arrivée d'eau rechargée sur une partie plus distante de l'impluvium, ou sur un sous-bassin bien individualisé. Cette interprétation permet d'imaginer deux systèmes de drainage relativement indépendants alimentant le Pêcher, ce qui sera discuté dans la partie 6 (cf. Figure 63).

La photo suivante (Figure 39B) a été prise lors de l'arrivée du premier pic de turbidité le 23 mars 2017 (Figure 39A) et montre la turbidité de l'eau du Pêcher pour un débit faible (<0.5 m^3/s), qui collecte également à cette date de faibles ruissellements très turbides en amont du thalweg. Le débit atteindra ensuite plus de 4 m^3/s. Une partie de cette eau turbide alimente donc également la source et le captage.

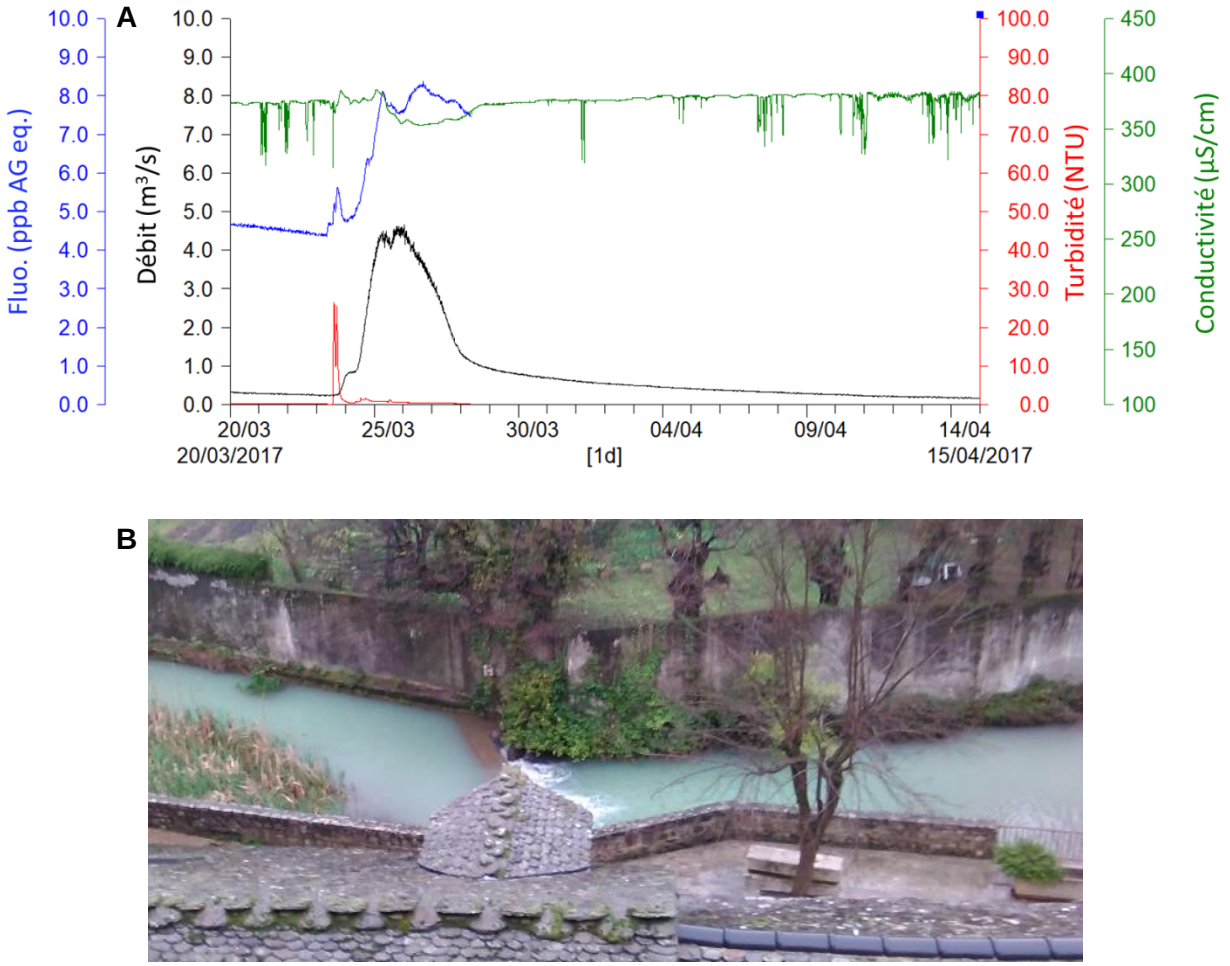


Figure 39 : A - Évolutions comparées du débit, de la conductivité électrique, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Pêcher en mars 2017. B - Ruisseau du Pêcher lors de la crue de Mars 2017, photo prise depuis le bâtiment du PnC le 23 mars 2017 – Y. Manche.

La source du Moulin de Pélatan présente une réponse classique en turbidité qui suit bien la dynamique du débit (Figure 40) avec un décalage de quelques heures pour des valeurs qui restent inférieures à 5 NTU mais qui reste relativement élevé tout au long de la décrue. Le début de crue est marqué par un très faible effet piston suivi d'un faible effet de dilution, puis la conductivité augmente et suit la dynamique de la fluorescence naturelle et de la turbidité. Ainsi, l'eau évacuée lors du pic de crue est une eau ayant séjourné dans la zone d'infiltration du système, qui se caractérise par des valeurs relativement plus fortes de conductivité, de fluorescence naturelle et de turbidité. L'analyse des débits classés (Figure 19) suggère une alimentation du système plus importante dès lors que le débit atteint 0,2 m^3/s, limitant l'observation de débits entre 0,2 et 0,4 m^3/s à l'exutoire. Les débits plus élevés correspondent au débit de crue et de décrue, tandis que les débits relatifs au tarissement sont nettement plus faibles et pourraient être associés à une zone de recharge plus réduite, ou l'arrêt du fonctionnement de pertes d'écoulements de surface (le tarissement est observé pour des débits de 40 l/s sur la Figure 20).

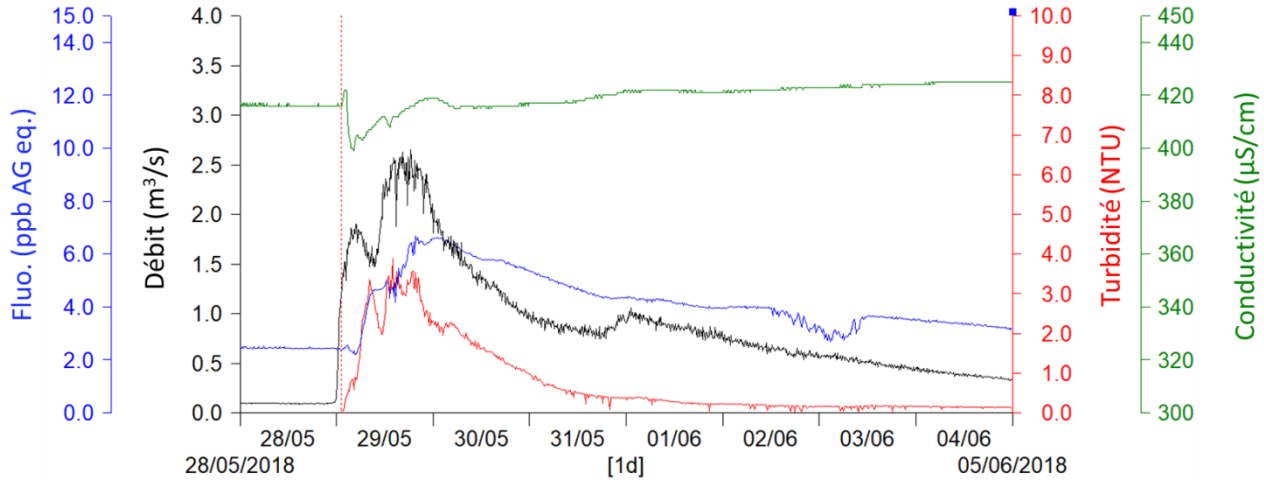


Figure 40 : Évolutions comparées du débit, de la conductivité électrique, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Moulin de Pélatan en mai 2018.

La Figure 41 présente les résultats obtenus à la source de Castelbouc 1. L'évolution de la conductivité montre un phénomène de dilution très important en début de crue de plusieurs dizaines de µS/cm, qui est inversement corrélé à la fluorescence naturelle. Les transferts de matière organique sont cette fois associés au transfert d'eau peu minéralisée qui marque l'arrivée de l'eau issue de la recharge. Le signal de fluorescence reste très bien corrélé à l'évolution du débit, même pour les faibles crues, mais avec un décalage variable selon le débit pouvant atteindre plusieurs jours. Ce temps correspond au temps de transfert de l'eau issue de la recharge qui atteint l'exutoire lors des crues, il est d'autant plus court que la crue est importante. Ce système permet donc de transférer rapidement l'eau issue de l'épisode pluvieux, sans stockage dans la zone d'infiltration.

On observe une dynamique de turbidité qui n'accompagne que les plus fortes crues avec un très faible décalage des pics par rapport au débit (de l'ordre de l'heure), dès lors que le débit dépasse un niveau de stabilisation de l'hydrogramme à plus ou moins 2 m^3/s. Cette valeur seuil avait été identifiée lors de l'analyse des débits classés et interprétée comme le débit au-delà duquel les autres exutoires de trop pleins se mettent en charge. Ce système présente en effet de nombreux siphons (lacs souterrains) et réseaux spéléologiques bien développés en amont de Castelbouc 1. La mise en eau de ce réseau développé à une cote légèrement supérieure au réseau d'écoulement permanent entraîne la mise en suspension de particules et la mobilisation de l'eau piégée dans les siphons à proximité de l'exutoire (cf. interprétations des traçages artificiels, T10).

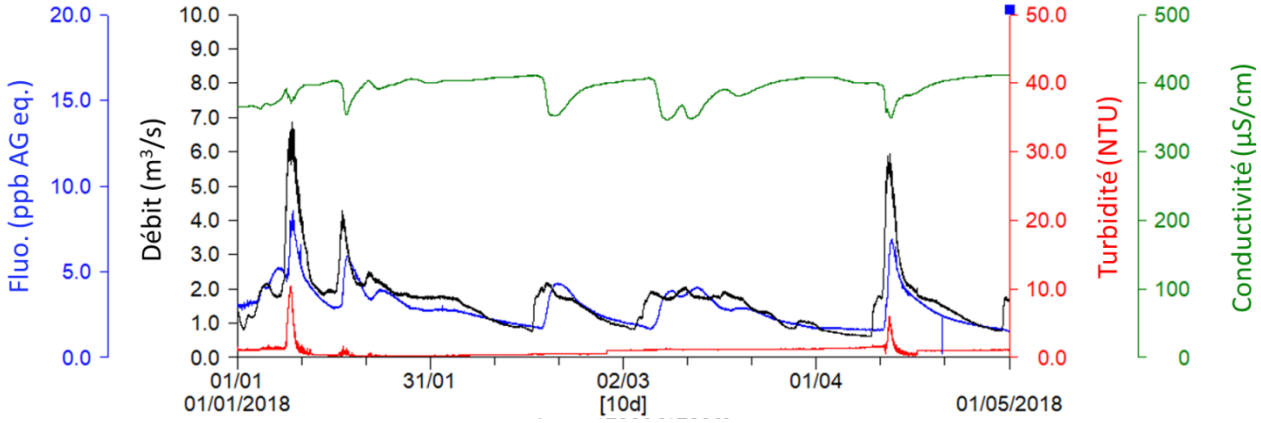


Figure 41 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source de Castelbouc n° 1 de janvier 2018 à mai 2018.

Le système karstique de Saint-Chély/Cénarette n'a été suivi qu'à l'exutoire du Moulin de Cénarette pour la turbidité et la fluorescence. La Figure 42 présente les mesures obtenues comparées au débit de l'ensemble du système.

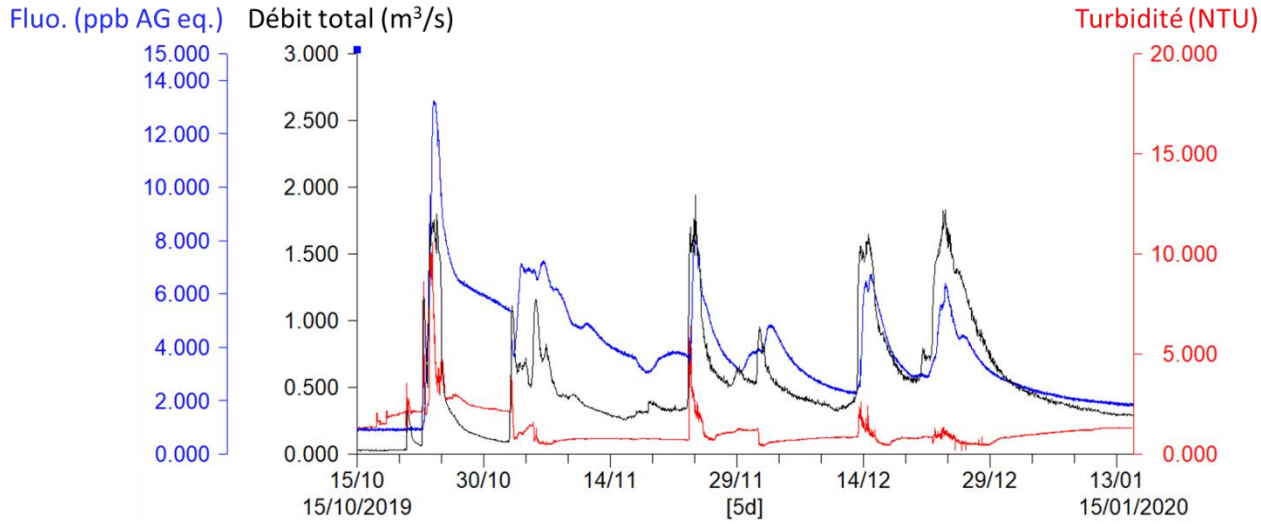


Figure 42 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Moulin de Cénarette du 15 octobre 2018 au 15 janvier 2020 – le débit total correspond au cumul du débit des sources de Saint Chély et du Moulin de Cénarette.

La Figure 43 présente une autre période où des suivis de conductivité électrique sont disponibles afin de compléter l'interprétation des données.

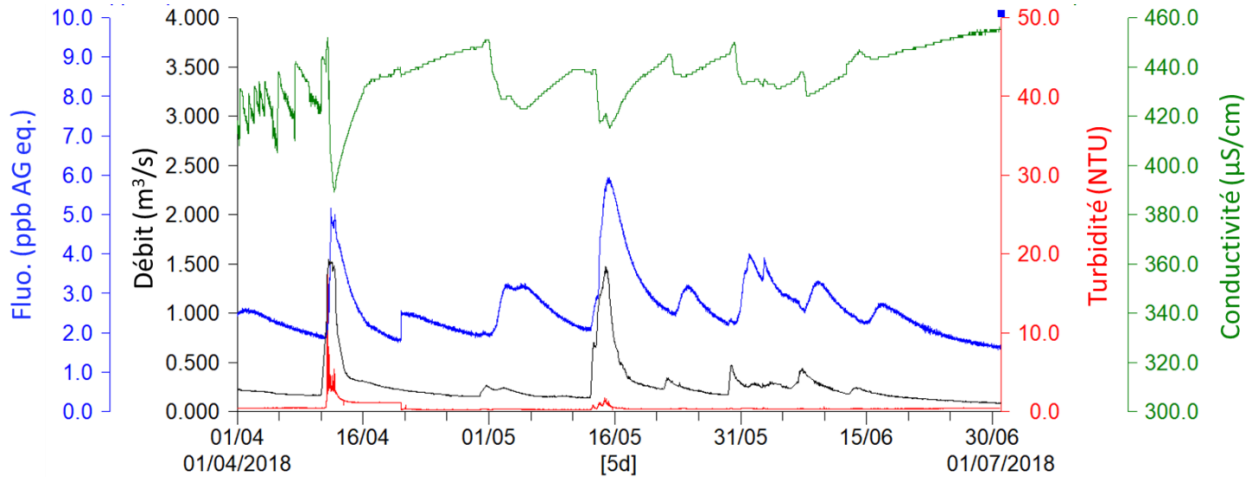


Figure 43 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source du Moulin de Cénarette du 1er avril 2018 au 1er juillet 2018 – le débit total correspond au cumul du débit des sources de Saint Chély et du Moulin de Cénarette.

On observe un signal de fluorescence naturelle relativement élevé, pouvant atteindre 13 ppb lors de la crue de reprise d'octobre 2019 (Figure 42). Ces évolutions suivent les variations du débit, avec un décalage très faible lors des fortes crues, mais pouvant atteindre deux jours pour de faibles crues. Comme pour le système de Castelbouc, des baisses de conductivité de plusieurs dizaines de µS/cm accompagnent les augmentations de fluorescence naturelle. L'intensité du signal fluorescent ne faiblit pas lorsque plusieurs crues se succèdent. La dynamique de transfert des MES est également proche de celle observée à Castelbouc n° 1, avec des pics de turbidité lors des plus fortes crues lorsque le seuil identifié à 1,3 m³/s sur les débits classés est dépassé (cf. 3.2.1.a)). La succession des crues présentées sur la Figure 42 permet d'évacuer l'essentiel des particules présentes dans les réseaux supérieurs, ce qui explique la plus faible réponse en turbidité sur les dernières crues. Ce comportement proche de celui observé à Castelbouc s'explique là aussi par la présence de nombreuses cavités bien développées et de siphons en amont.

La source des Ardennes (Figure 44) présente des pics de turbidité qui suivent les pics des très fortes crues, en lien avec le seuil identifié par les débits classés vers 4 m³/s. La fluorescence naturelle évolue en réponse au débit et peut dépasser 10 ppb (13 ppb le 24 octobre 2019), sans diminution du signal lors de crues successives, ce qui traduit le transfert de matière organique dissoute depuis le sol et la zone d'infiltration à chaque crue. Le temps de transfert de ce signal dépend là encore du débit de la source, et varie entre quelques heures pour les fortes crues à plus de quatre jours. Cependant, les variations de conductivité associées sont cette fois beaucoup plus faibles.

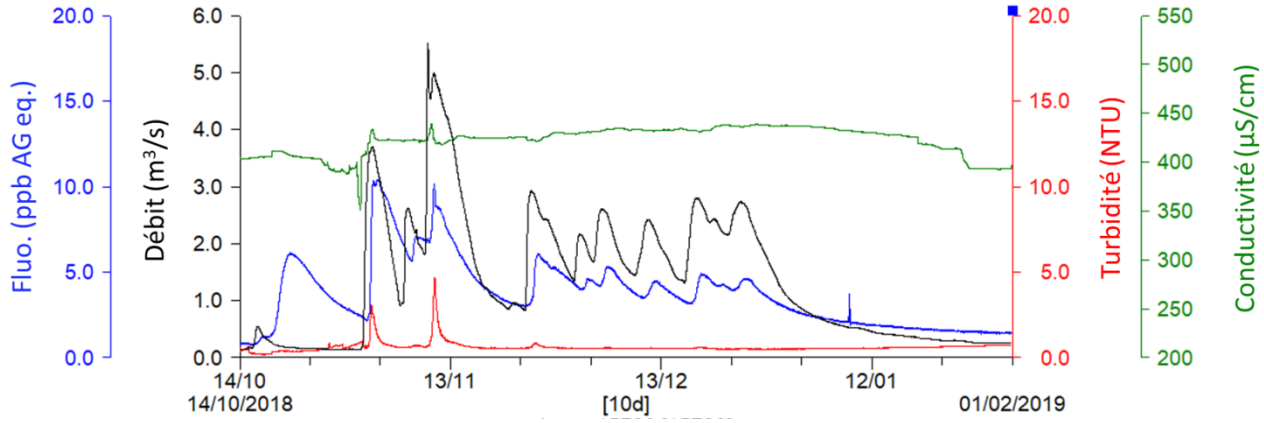


Figure 44 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source des Ardennes du 14 octobre 2018 au 1er février 2019.

Les évolutions observées à la source de l'Ironselle suivent également bien l'évolution du débit, qui présente beaucoup moins de variation sur ce système (cf. paragraphe 0). On observe des pics de turbidité lors des plus fortes crues, soit uniquement pour les crues qui permettent de faire évoluer plus rapidement le débit au-delà d'un débit de 0,22 m^3/s identifié sur la courbe des débits classés (cf. 3.2.1.a). Le signal de turbidité présente trois pics cycliques qui peuvent être associés à un phénomène de faible intermittence identifié sur cette source, et à peine perceptible sur l'évolution des débits (cf. Figure 14, p.26). Ces pics de turbidité traduisent le transfert rapide des éléments piégés dans des cavités karstiques qui se mettent en charge seulement en hautes eaux.

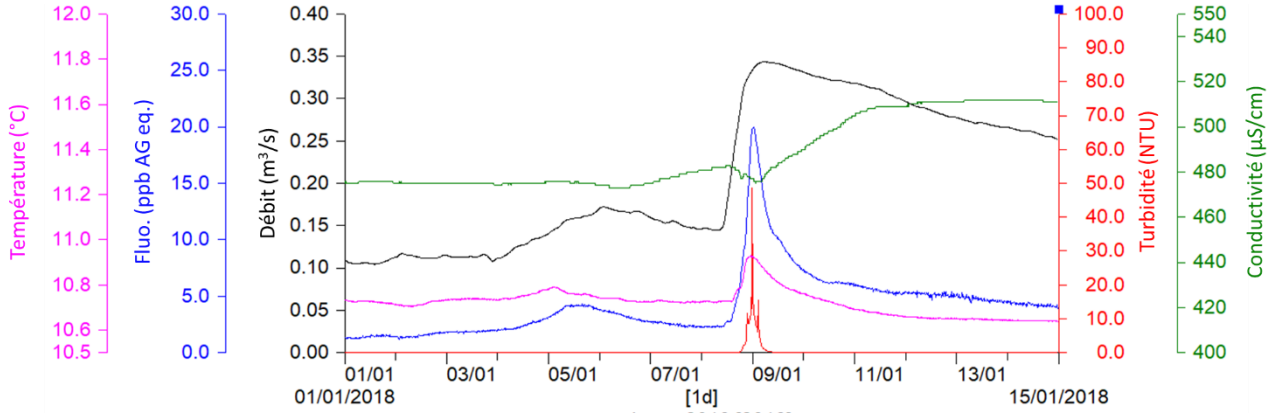


Figure 45 : Évolutions comparées du débit, de la turbidité, de la température, de la conductivité électrique et de la fluorescence naturelle de l'eau de la source de l'Ironselle du 1er janvier 2018 au 15 janvier 2018.

Le signal de fluorescence peut atteindre 20 ppb lors de ces fortes crues, associé à une baisse de la conductivité, mais reste inférieur à 5 ppb pour des crues plus faibles. Le signal est également bien corrélé au débit avec un décalage de l'ordre de quelques heures. Certains épisodes, comme celui présenté sur la Figure 45 montrent que le pic de fluorescence est atteint avant le pic de débit. La fluorescence naturelle trace ici les écoulements rapides de l'eau issue de la recharge à travers la zone d'infiltration dans les secteurs où les vides karstiques sont bien organisés et bien connectés jusqu'à l'exutoire, à l'image du système traçage de l'aven de la Cheminée (cf. chapitre 5). La dilution observée par la baisse de conductivité sur la Figure 45 s'accompagne d'une hausse de la température, ce qui permet de conclure qu'il ne s'agit pas d'un effet local lié à une ré-infiltration des eaux à proximité de l'exutoire mais bien du transfert de l'eau depuis la zone d'infiltration. Cette vidange rapide de la zone d'infiltration ne s'observe que lors de très fortes mises en charge, ce qui caractérise ici un effet de « chasse ». Une composante plus inertielle de ce système, probablement contrôlée du point de vue hydrodynamique par la présence de vides karstiques comblés de formations sableuses issues de l'altération des couvertures sédimentaires (cf. étude de la karstogenèse, rapport BRGM/RP-68189-FR) ne contribue pas ou peu au signal de fluorescence, et apporte une eau plus minéralisée.

Ainsi, même si ce système présente un comportement hydrodynamique très inertiel, les suivis de fluorescence naturelle mettent en évidence une composante d'infiltration rapide qui contribue en quelques heures à l'alimentation de l'exutoire lors des crues. Il existe donc localement des secteurs du bassin d'alimentation très bien drainés par le système karstique, même si le comportement moyen de ce système n'est pas représentatif d'un système karstique très développé.

c) Comparaison entre les systèmes et synthèse

Le tableau suivant récapitule ces informations pour l'ensemble des systèmes karstiques ayant fait l'objet d'un suivi de fluorescence, en reportant les valeurs maximales observées de fluorescence et de turbidité ainsi que la valeur la plus basse observée en basses eaux pour caractériser le bruit de fond. Pour la source du Pêcher, les deux lignes du tableau correspondent aux deux dynamiques successives identifiées. La turbidité élevée observée sur cette source est liée aux écoulements à travers et le long des marnes qui rejoignent l'aquifère hettangien.

	Turbidité max (NTU)	Fluo. max (ppb eq.)	Bruit de fond (ppb eq.)
Pêcher	80 5	5 12	1.4
Moulin de Pélatan	4	8	0.4
Castelbouc	10	12	0.8
Moulin de Cénarette	10	13	0.9
Ardennes	5	13	0.5
Ironselle	50	20	0.6

Tableau 17 : Tableau de synthèse des résultats relatifs aux suivis de turbidité et de fluorescence naturelle.

La comparaison des bruits de fond de fluorescence montre que le Pêcher présente une fluorescence naturelle légèrement plus élevée, suivie par la source du Moulin de Cénarette et Castelbouc n° 1. Ces valeurs restent très faibles et ne permettent pas d'identifier une anomalie relative au contenu organique des eaux. À titre de comparaison, des suivis à la Fontaine de Nîmes, système karstique très urbanisé et anthropisé, présentent des valeurs à 30 ppb en étiage, et jusqu'à 400 ppb en crue (Bailly-Comte *et al*., 2018).

L'interprétation des suivis de la fluorescence naturelle et de la turbidité permettent ainsi de faire les observations suivantes :

- les valeurs de bruit de fond restent faibles, ce qui traduit le peu d'impact anthropique sur les transferts de matière organique en dehors des crues ;
- des flux d'infiltration rapides sont bien identifiés à partir des suivis de fluorescence sur tous les systèmes lors des crues, avec des pics de fluorescence de l'ordre de 13 ppb au maximum, pouvant atteindre 20 ppb à la source de l'Ironselle. Ces pics s'observent quelques heures à quelques jours après le pic de débit selon l'intensité de la crue ;
- à l'exception du système de l'Ironselle, la contribution des écoulements rapides au débit total des systèmes s'observe tout au long du cycle hydrologique, la fluorescence naturelle suit ainsi la dynamique des débits avec peu de décalage. L'eau à l'exutoire de ces systèmes présente donc toujours une part importante d'eau très récente issue de la zone d'infiltration ;
- la source de l'Ironselle présente un fonctionnement plus complexe qui fait intervenir des flux rapides en début de crue, rapidement dilués par des eaux à plus long temps de séjour dépourvues de matière organique fluorescente. Sur ce système, il existe donc à la fois des structures de drainage karstique très développées et des transferts typiques d'un milieu poreux. Cette interprétation est cohérente avec la karstogenèse proposée pour ce système où les fantômes de roche sont en cours d'évacuation par le système karstique. Certains réseaux tels que le réseau de la Cheminée sont d'ailleurs déjà parfaitement connectés à l'exutoire (cf. traçage T2a, paragraphe 5) ;

- les sources étudiées présentent assez peu de turbidité, même lors des pics de crue, à l'exception de la source du Pêcher où une contribution d'eau issue du ruissellement sur les versants marneux est identifiée. Ce flux est rapidement dilué dès que la source se met en charge. Seule la source du Moulin de Pélatan présente une faible turbidité relativement persistante, bien corrélée au débit et à la fluorescence naturelle, qui pourrait s'expliquer par une plus forte pression agricole sur son bassin (cf. analyse des teneurs en nitrates, 4.2.1.b)). Les autres systèmes montrent des pics de turbidité très court et parfois intense (50 NTU) associés au décolmatage de réseau ou à la mise en charge de réseaux perchés lors des forts débits, et notamment lors des dépassements des seuils de débits identifiés sur les courbes de débits classés.

4.4.2. Conductivité et température

a) Transfert de température dans les systèmes karstiques

L'évolution de la température des sources du Méjean présente des variations saisonnières plus ou moins marquées, ainsi que des variations à court terme liées à l'arrivée d'une eau récemment infiltrée et ayant échangé thermiquement avec l'aquifère. La profondeur des zones noyées des différents systèmes karstiques étudiés par rapport à l'altitude moyenne du Causse permet d'exclure tout transfert de chaleur entre la surface du sol et l'eau des sources qui ne serait pas lié au déplacement de l'eau dans la zone d'infiltration. Il s'agit donc d'un transfert de chaleur par convection forcée, auquel s'ajoutent des échanges thermiques par conduction avec l'encaissant tout au long du parcours de l'eau jusqu'à la source (Luhman *et al.*, 2011) selon le temps de transfert et l'organisation du drainage.

La température peut donc être vue comme un traceur non conservatif de la recharge d'un aquifère karstique. Pour des conditions hydroclimatiques comparables, ce qui est le cas pour l'ensemble des exutoires étudiés autour du Causse Méjean, **la variabilité de la température d'une source peut donc permettre de caractériser l'importance relative des transferts rapides d'eaux depuis la surface**. **Ainsi, plus une source présentera des variations de température et plus les eaux qui atteignent l'exutoire auront transité rapidement** dans le système grâce à des structures de drainage et de collecte des eaux bien organisées dans la zone d'infiltration. Les systèmes alimentés par des pertes d'écoulements de surface montreront de plus fortes variations de températures en lien avec les variations de la température des eaux de surface et le développement de la karstification des systèmes perte/résurgence.

Une analyse statistique des chroniques de température a été menée en comparant les chroniques de température journalière des sources à la chronique de la température journalière de l'air mesurée à la station du Villaret. Les outils utilisés ont pour but de caractériser le transfert de température dans le système par l'analyse de la corrélation croisée entre la température extérieure et la température de chaque source. Le tableau suivant (Tableau 18) présente le pic du corrélogramme croisé (Rxy max) et le décalage temporel associé (lag) entre la chronique de température de l'air (signal d'entrée) et celle de l'eau (signal de sortie). Une analyse dans le domaine fréquentiel a également été menée pour caractériser le transfert de la température de la composante annuelle : la fonction de gain exprime le rapport d'amplitude des chroniques de température pour la composante annuelle, le déphasage permet de caractériser le temps de transfert de cette composante, et la cohérence permet de quantifier la corrélation entre la composante annuelle de la température extérieure et celle de la source. Seules les valeurs de ces fonctions pour la période annuelle sont reportées dans le Tableau 18. La fonction de gain reste inférieure à 1 et est exprimé en % pour traduire un amortissement du cycle annuel de température d'autant plus fort que le gain sera faible. Enfin, un rapport d'amplitude global est également calculé à partir du rapport des écart-types des chroniques de température journalière.

Ce rapport permet d'estimer le gain de la composante annuelle lorsque le calcul direct est impossible (Pêcher, Moulin de Cénarette), puisque l'essentiel de la variabilité de la température journalière s'explique par un effet saisonnier.

La source du Pêcher ne se prête pas à ce type d'analyse car la position de la station de mesure de température ne permet pas une mesure non influencée par la température extérieure. Pour ce point, comme pour la source du Moulin de Cénarette, les données de température mesurées par le fluorimètre ne permettent pas d'avoir une chronique suffisamment longue sans lacunes pour réaliser une analyse corrélatoire et spectrale, mais il est tout de même possible d'estimer la température moyenne et de calculer un rapport d'écart-type (Tableau 18).

	Jonte	Douzes	Ardennes	Pélatan	Pêcher	Castelbouc	Moulin de Cénarette	Ironselle
T_{moy}	11.7	9.7	11.6	11.2	10.6	10.7	10.8	10.7
Rxy max	0.94	0.86	0.74	0.6		0.45	0.69	0.34
Lag (j)	1	6	39	46		49	23	81
Gain T=1 an	53 %	34 %	7 %	5 %		2 %		0.2 %
Cohérence T=1 an	0.99	0.98	0.88	0.70		0.52		0.38
Déphasage (j) T=1 an	7	22	36	51		59		99
$\sigma_{eau}/\sigma_{ext}$	51 %	32 %	8 %	6 %	3 %	3 %	3 %	0.5 %

Tableau 18 : Analyse statistique des chroniques de températures.

Les données relatives à la Jonte (Tableau 18) correspondent à la mesure de température de l'eau de la Jonte au Rozier, soit la température d'une eau de surface en partie alimentée par des résurgences karstiques. Ce jeu de données présente la température moyenne la plus élevée (11,7 °C). À l'inverse, l'eau de la source des Douzes présente la température moyenne la plus faible (9,7 °C) et se démarque des autres systèmes, qui varient de 10,6 °C (Pêcher) à 11,6 °C (Ardennes). Ces différences de valeurs absolues de 1 °C restent faibles compte tenu de la précision absolue des capteurs de température utilisés. Ces températures sont cependant toutes significativement supérieures aux températures moyennes annuelles mesurées à la station du Villaret, de l'ordre de 8,3 °C (Tableau 11).

Les données relatives à la source des Douzes montrent un décalage moyen de 6 jours par rapport à la température extérieure sur l'ensemble des composantes (lag), le déphasage de la composante annuelle étant de 22 jours. Cette composante annuelle est très bien expliquée par la température extérieure (cohérence de 0.98), qui explique également très bien la composante annuelle de la Jonte au Rozier (cohérence de 0.99). L'amplitude annuelle de la source des Douzes est égale à 34 % de celle mesurée sur la température extérieure, ce qui se retrouve avec le rapport des écart-types des deux chroniques (32 %). Il s'agit du plus faible amortissement observé pour les différents sources étudiées (Tableau 18). La comparaison avec les autres sources étudiées montre ainsi que la source des Douzes est fortement influencée par les apports de la Jonte, ce qui est cohérent avec l'estimation de 60 % proposée par les analyses isotopiques. En supposant que la température des pertes de la Jonte est en phase avec la température extérieure, le temps de transfert de la température dans le système perte/résurgence est estimé à moins de 22 jours pour un parcours souterrain d'environ 8 km, ce qui représente un déplacement moyen d'au moins 15 m/h. Cette vitesse peut s'interpréter comme la vitesse de déplacement de l'eau en condition d'étiage.

Les données obtenues sur les autres systèmes sont caractéristiques de systèmes unaires, c'est-à-dire non influencés par les pertes d'un cours d'eau. Le rapport d'amplitude calculé à partir des écart-types de la température de l'eau et de la température extérieure permet d'estimer le gain de la composante annuelle aux sources du Pêcher et du Moulin de Cénarette. Les résultats du Tableau 18 montrent ainsi que les systèmes de Pélatan et des Ardennes transmettent relativement mieux et plus rapidement le signal de température que les systèmes de Castelbouc, du Pêcher et du Moulin de Cénarette, et surtout de l'Ironselle. Ce dernier système montre très peu de corrélation avec le signal de température extérieure, notamment pour la composante annuelle (cohérence de 0.38).

En conclusion, les transferts de température sont contrôlés par les flux d'eau qui traversent la zone d'infiltration. L'influence de ces flux sur la température de l'eau de l'exutoire permet de qualifier la contribution relative des écoulements rapides. Toutes les sources étudiées présentent des fluctuations de températures qui signent l'arrivée de flux rapides. Ces écoulements rapides correspondent essentiellement aux pertes de la Jonte pour le système des Douzes. Pour les autres systèmes, à l'échelle d'un cycle hydrologique, les résultats sont relativement proches et mettent en évidence une plus grande variabilité de la composante annuelle aux sources des Ardennes et du Moulin de Pélatan. Les sources de Castelbouc 1, Pêcher et Moulin de Cénarette ne se distinguent pas, mais des données complémentaires non influencées par la température extérieure seraient utiles pour ces deux dernières sources.

Une analyse à l'échelle évènementielle sur des données horaires pourrait également être menée pour caractériser la dynamique d'infiltration rapide lors des crues. Les résultats obtenus sont cependant plus complexes à interpréter puisque la température de l'air varie d'un épisode pluvieux à l'autre et au cours d'un épisode pluvieux. Il est donc proposé de se limiter à l'interprétation des données de conductivité électrique de l'eau pour caractériser les transferts à plus court terme.

b) Évolution de la conductivité électrique de l'eau

- **Principe et méthodes mises en œuvre**

La conductivité électrique de l'eau a été suivie sur les sept sources principales du Causse Méjean (paragraphe 2.1.1). La conductivité électrique spécifique de l'eau à 25 °C permet de connaitre la capacité d'une eau à transmettre le courant, en corrigeant cette information de l'effet de la température. Cette donnée facilement mesurable avec peu de dérive des capteurs permet ainsi de caractériser le contenu en ions d'une solution. Les évolutions moyennes journalières calculées à partir des suivis à 15 min sont présentées dans le graphique suivant (Figure 46).

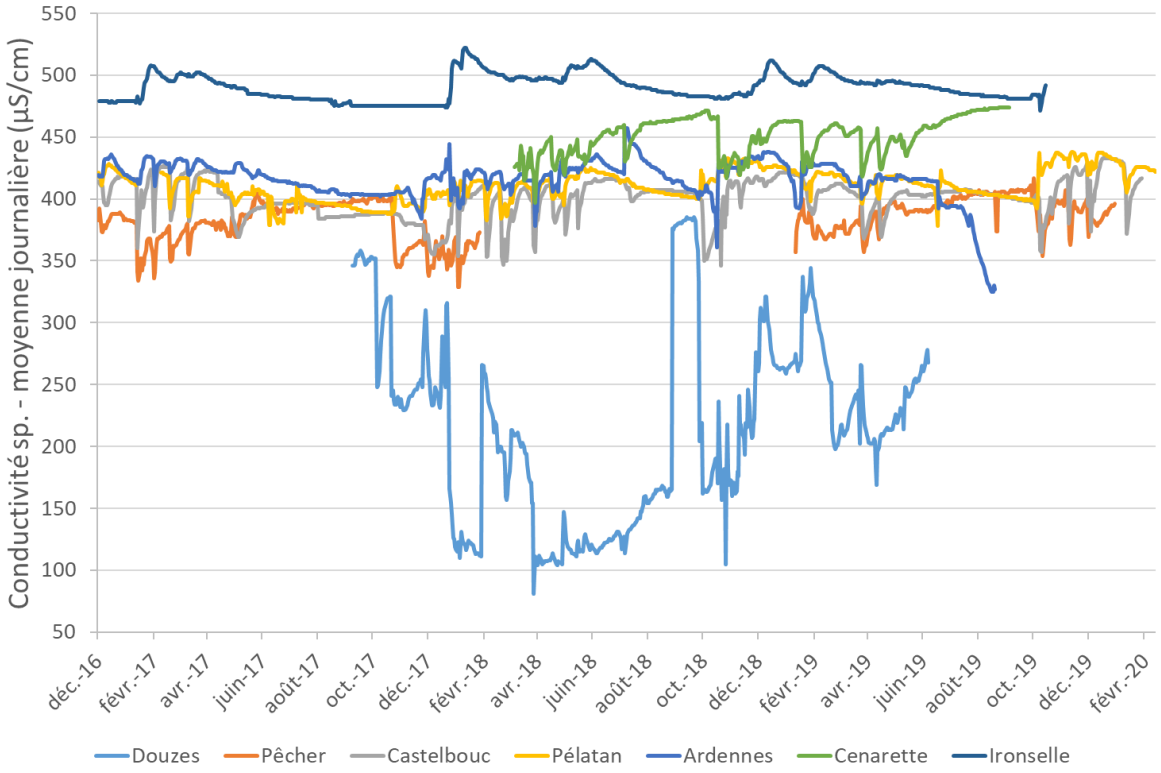


Figure 46 : Chroniques disponibles de conductivité électrique spécifique journalière.

Pour des eaux bicarbonatées, la conductivité spécifique de l'eau renseigne sur la minéralisation de l'eau en équilibre avec l'encaissant carbonaté. **Une baisse de conductivité de l'eau à la source lors des crues traduit l'arrivée de l'eau issue de l'épisode de recharge**. Cette baisse peut intervenir dès la montée de crue, ou arriver dans un second temps si les premières eaux qui alimentent l'exutoire se retrouvent « poussées » par les eaux d'infiltration. Si ces eaux préalablement stockées dans le système ont un temps de séjour suffisamment long dans la zone d'infiltration (quelques mois), celles-ci pourront être identifiées à l'exutoire par la présence d'un pic de minéralisation, et donc de conductivité, qui précède l'effet de dilution. L'évolution temporelle de la conductivité peut donc permettre d'identifier un processus de transfert d'eau préalablement stockée dans la zone d'infiltration par une hausse de la conductivité (effet « piston »), puis un processus de dilution liée à l'arrivée d'eau nouvelle qui se caractérise par une baisse de la conductivité et un retour plus ou moins lent à la valeur initiale. Pour des épisodes de recharge importants, la zone d'infiltration d'un système karstique peut être localement saturée Cette saturation, au-delà d'un seuil critique (Plagnes, 1997), oblige l'eau à emprunter des structures de drainage différentes qui court-circuitent les écoulements. Cet effet de « chasse » décrit par Plagnes (1997) mobilise rapidement de l'eau jusqu'à la zone noyée puis l'exutoire, ce qui se traduit par une baisse de la conductivité sur une courte période.

Les fluctuations de conductivité par effet « piston », effet de « chasse » ou par dilution seront d'autant plus visibles sur un système bien karstifié capable de restituer rapidement les eaux infiltrées avec peu de modification de leur minéralisation.

En première approche, l'analyse de la distribution statistique de la conductivité est un outil permettant d'identifier différents types d'eau qui contribuent à l'alimentation de l'exutoire. Une homogénéisation de l'eau se traduira par une distribution uni-modale avec peu de dispersion des données par rapport à leur valeur moyenne. Ce type de distribution est attendu pour un système karstique peu fonctionnel se rapprochant du fonctionnement d'un milieu poreux. Au contraire, un système karstique bien développé pourra présenter une large gamme de variation. Enfin, des distributions bimodales sont attendues dans le cas d'un système binaire où deux types d'eau alimentent le système dans des proportions variables en fonction du temps.

Cette analyse de la distribution statistique est ensuite complétée par une analyse de la corrélation débit/conductivité au pas journalier pour décrire les types de réponses observées sur les systèmes karstiques étudiés.

- **Distributions statistiques**

Le tableau suivant présente les statistiques principales des chroniques journalières de conductivité, classées selon leur valeur moyenne (µ). Ce tableau est complété par la représentation des distributions de fréquence par classe de 10 µS/cm sur la Figure 47.

	Douzes	Pêcher	Castelbouc	Pélatan	Ardennes	Cénarette	Ironselle
n	637	777	1154	1143	992	547	1047
µ	216	384	401	411	415	451	490
σ	76	16	16	12	17	15	11
Coeff. Var.	35 %	4 %	4 %	3 %	4 %	3 %	2 %
min	81	329	346	378	325	397	471
max	385	417	433	438	457	474	522

Tableau 19 : Statistiques sur les moyennes journalières de conductivité électrique spécifique de l'eau, avec n le nombre de données, µ la moyenne et σ l'écart type.

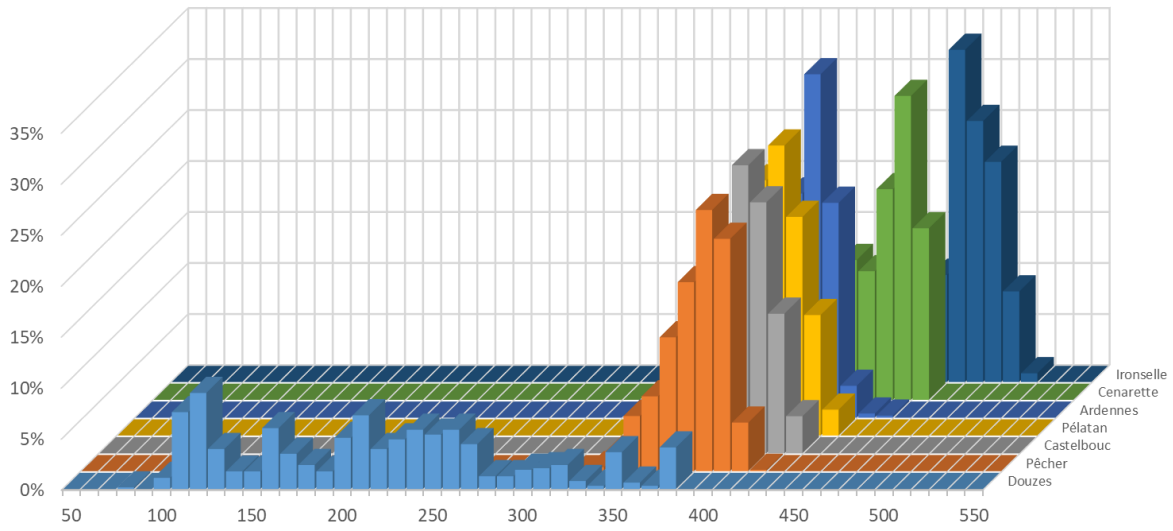


Figure 47 : Distribution statistique de la conductivité électrique spécifique journalière, classes de 10µS/cm.

Le système des Douzes présente la minéralisation la plus faible, avec de fortes variations qui marquent les variations de proportions de mélange entre l'eau de la Jonte peu minéralisée majoritaire en crue et l'eau karstique. Les autres systèmes présentent des distributions de fréquence relativement proches, avec une valeur moyenne et un écart type du même ordre de grandeur.

Dans le détail, les valeurs sont légèrement plus élevées à l'exutoire du Moulin de Cénarette et à l'Ironselle (451 et 490 µS/cm respectivement), soit aux deux exutoires suivis qui présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien (cf. 4.2.1.a)). Les autres exutoires varient entre 384 µS/cm (Pêcher) et 415 µS/cm (Ardennes). À l'exception des Douzes, toutes les distributions sont uni-modales, avec un écart type légèrement plus faible à l'Ironselle, en lien avec un fonctionnement plus inertiel du point de vue hydrodynamique.

- **Analyse de corrélation**

Les corrélogrammes croisés débit/conductivité calculés sur le plus grand jeu de chroniques journalières continues depuis le 1er janvier 2017 sont reportés sur les figures suivantes, à la fois sur les données brutes et les données filtrées par différenciation d'ordre 1, qui correspond à l'accroissement ponctuel d'une chronique par le calcul de la variation entre deux pas de temps successifs. Ce type de filtre conserve la structure et l'amplitude des phénomènes tout en éliminant la tendance, ce qui permet à l'échelle d'une crue de se focaliser sur les transferts rapides. Ce filtre est appliqué à la fois aux chroniques de débit et à celles de conductivité au pas journalier.

La forme des corrélogrammes débit/conductivité obtenus à partir des chroniques brutes au pas journalier permet de caractériser le comportement de dilution et de retour à l'équilibre lors de la décrue et du tarissement, tandis que l'utilisation des chroniques filtrées par différenciation d'ordre 1 permet de se focaliser sur les variations de conductivité à très court terme (quelques jours) lors du passage du pic de crue. L'utilisation de la chronique filtrée de débit en entrée permet également d'avoir un signal d'entrée aléatoire au pas journalier, ce qui facilite l'interprétation du corrélogramme croisé en tant qu'image de la réponse à une variation de débit (réponse impulsionnelle).

Les résultats obtenus sont reportés dans la Figure 48, et synthétisés dans le Tableau 20, qui précise la nature des données utilisées.

L'analyse de corrélation permet d'identifier par une valeur positive l'arrivée d'une eau plus minéralisée en réponse à une augmentation du débit, et inversement lors de l'arrivée de l'eau évènementielle.

À court terme (colonne « Différenciation d'ordre 1 », Figure 48), les résultats obtenus aux sources du Pêcher, de Castelbouc, du Moulin de Pélatan et du Moulin de Cénarette sont relativement proches, et caractérisent un phénomène de dilution 1 à 2 jours après le pic de crue. À l'inverse, la source de l'Ironselle se distingue par l'arrivée d'eau plus minéralisée au passage du pic de crue. La source des Ardennes ne montre pas de comportement corrélé au débit à court terme, ce qui s'explique par une réponse mixte, pouvant mobiliser des eaux plus ou moins minéralisées selon les crues, avec peu de variations de conductivité.

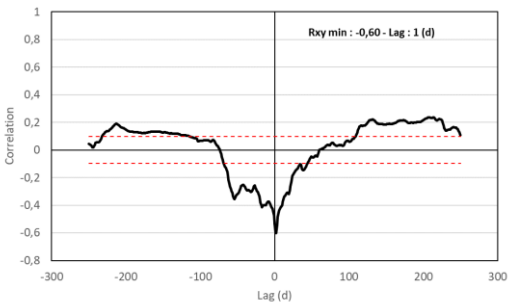
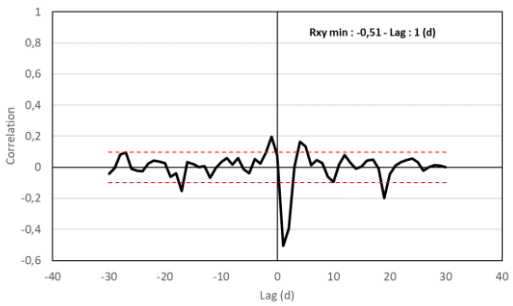
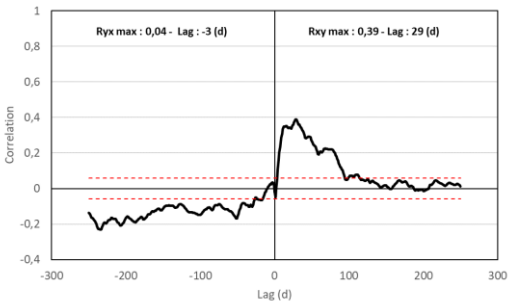
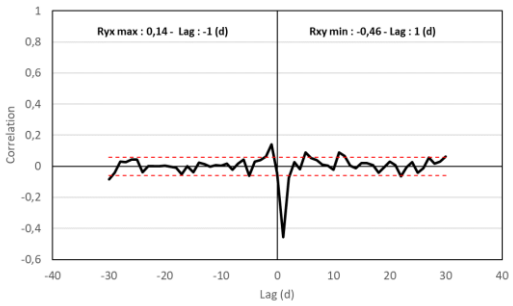
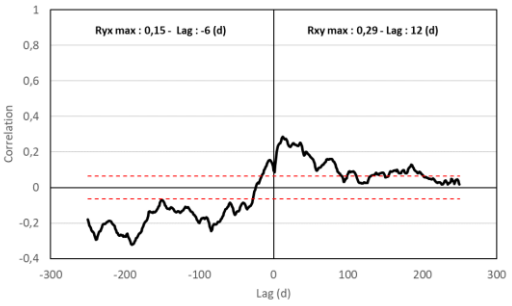
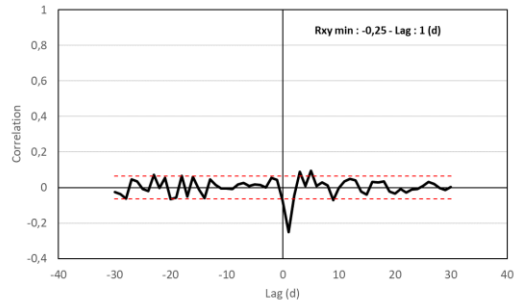
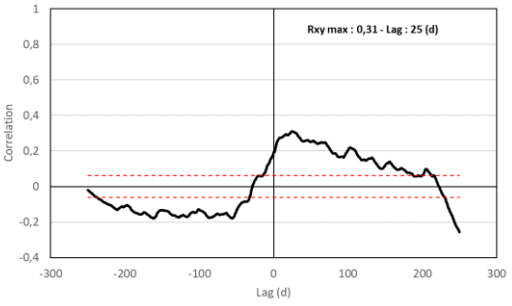
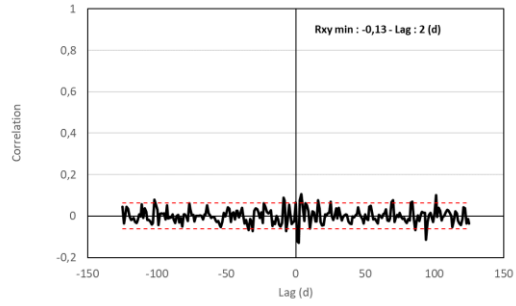
Ces résultats traduisent un développement de la karstification plus faible des systèmes de l'est vers l'ouest de la zone d'étude, ce qui confirme les conclusions de l'étude hydrodynamique.

À plus long terme, (colonne « Données brutes », Figure 48), seules les sources du Pêcher et du Moulin de Cénarette présentent une anti-corrélation nette entre le débit et la conductivité, qui traduit une dilution qui accompagne la crue sur plusieurs jours. La dynamique de dilution observée à Castelbouc ou au Moulin de Pélatan est trop rapide pour être bien décrite au pas journalier, et est tout de suite suivie d'une reminéralisation de l'eau. Ceci explique la corrélation positive entre le débit et la conductivité, seule la valeur à 0 montre une baisse de la corrélation. La corrélation positive entre le débit et la conductivité est très élevée à l'Ironselle (0.95) pour un décalage de 5 jours. Une hausse du débit produit ici une hausse de la conductivité, ce qui caractérise un transfert « piston », où seuls les épisodes extrêmes peuvent provoquer une arrivée d'eau d'infiltration rapide par effet de « chasse » (cf. Figure 45). Enfin, on retrouve la situation intermédiaire des Ardennes qui ne présente ici qu'une réponse de type « piston », mais moins marquée qu'à l'Ironselle.

Les résultats obtenus permettent de distinguer quatre typologies de réponse :

- dilution prépondérante lors des crues, suivie d'une augmentation progressive de la minéralisation pour un retour à la valeur initiale en fin d'épisode : Pêcher, Moulin de Cénarette ;
- dilution prépondérante lors des crues, rapidement suivie d'une hausse de minéralisation en décrue et tarissement : Castelbouc, Moulin de Pélatan ;
- comportement variable (dilution ou minéralisation) lors des crues selon les conditions hydrologiques, suivi d'une hausse de minéralisation lors du tarissement : Ardennes ;
- minéralisation très bien corrélée (positivement) au débit en crue, décrue et lors du tarissement, pas de dilution sauf lors de phénomène de « chasse » pour les fortes crues : Ironselle.

Les décalages temporels (Lag) qui correspondent au maximum de corrélation (Rmax) montrent que les pics de minéralisation observés après la crue interviennent dès la décrue pour la source de l'Ironselle, tandis qu'il faut attendre le début du tarissement pour Castelbouc et les Ardennes (20 à 30 jours).

	Corrélogramme croisé débit/conductivité	
	Donnée brutes	Différenciation d'ordre 1
Pêcher		
Castelbouc		
Pelatan		
Ardennes		

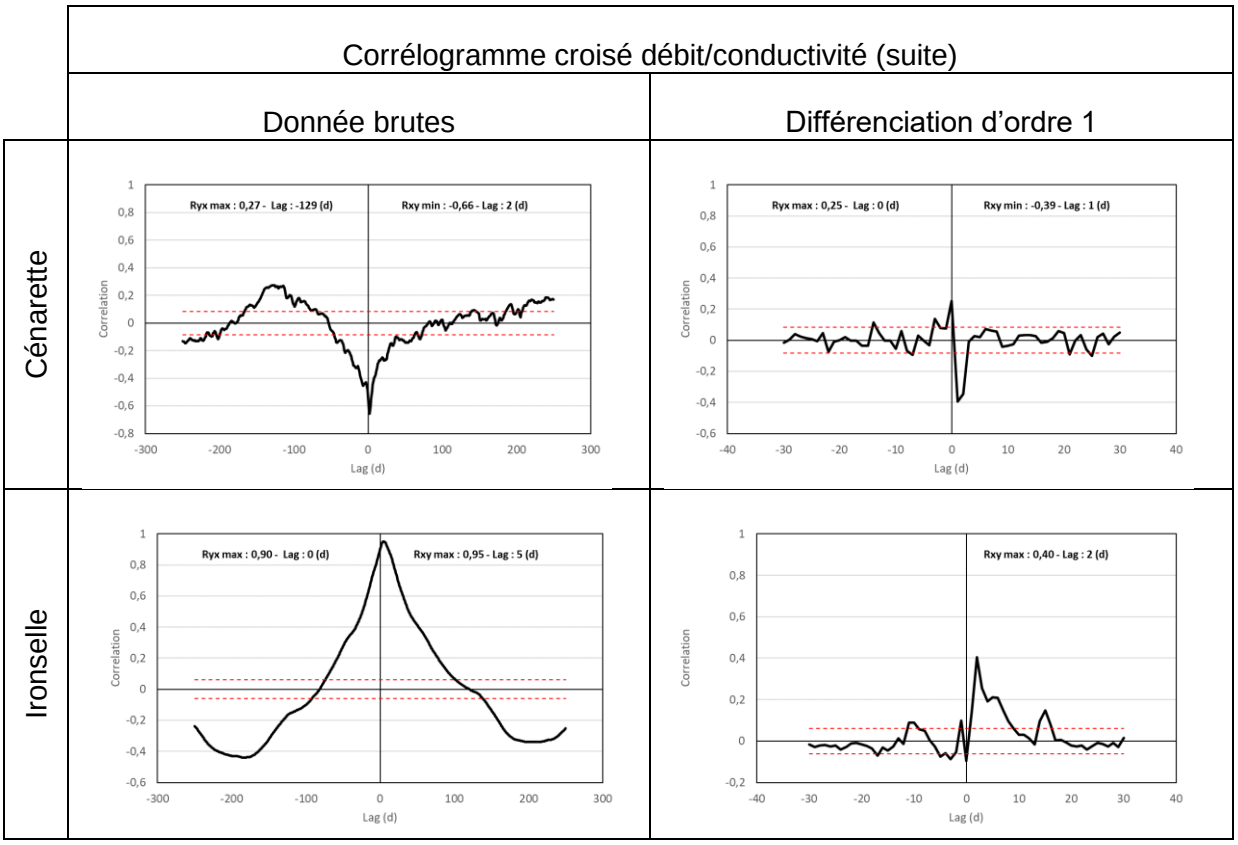


Figure 48 : Corrélogramme croisés Débit/Conductivité.

Source	Période	n	Rmax Q	Lag Q (j)	Rmax dQ	lag dQ (j)
Pêcher	01/01/2017 11/02/2018	406	-0.6	1	-0.51	1
Castelbouc	01/01/2017 12/02/2020	1 138	0.39	29	-0.46	1
Moulin de Pélatan	24/02/2017 26/09/2019	945	0.29	12	-0.25	1
Ardennes	01/01/2017 04/09/2019	977	0.31	25	-0.13	2
Moulin de Cénarette	22/03/2018 19/09/2019	547	-0.66	2	-0.39	1
Ironselle	01/01/2017 30/10/2019	1 033	0.95	5	0.4	2

Tableau 20 : Tableau de synthèse des résutats de l'analyse de corrélation croisée débit/conductivité.

4.5. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE HYDROCHIMIQUE

La réalisation et l'interprétation de campagnes spatiales pour l'analyse des ions majeurs ont permis de proposer des regroupements des principales sources sur la base de leur faciès chimique :

- les sources bicarbonatées calciques rechargées sur le Causse Méjean : Pêcher, Moulin de Pélatan, Castelbouc, Ardennes ;
- les sources bicarbonatées calciques et magnésiennes rechargées sur le Causse Méjean : Moulin de Cénarette, Saint Chély, Ironselle, Sablière basse ;
- les sources et le forage des Douzes influencés par les eaux de la Jonte : Les Douzes, le Maynial, le forage (profond) des Douzes.

Le système du Pêcher se distingue légèrement des autres systèmes du Causse Méjean par un faciès chimique plus riche en sulfates et chlorures en basses eaux uniquement, en lien avec des interactions eau/roche au sein du réservoir hettangien ou au contact des marnes du Toarcien.

Les outils isotopiques ont permis d'une part de mieux quantifier la contribution des eaux de la Jonte à l'alimentation du système karstique des Douzes, qui est estimée à 60 % à partir de l'analyse des isotopes stables de l'eau et des isotopes du Sr. D'autre part, l'analyse isotopique du Sr permet de mettre en évidence les conséquences des remplissages des dépressions et des cavités karstiques par du matériel d'origine cévenol, et des soutirages de ce matériel dans l'ensemble du système karstique. Ainsi, des signatures isotopiques caractéristiques de ce matériel cévenol sont retrouvées sur tous les exutoires du Causse Méjean, y compris sur les systèmes perchés dans le secteur de Nîmes-le-Vieux. **Ce résultat est cohérent avec le modèle d'évolution de la karstogenèse et permet d'exclure toute contribution d'eau de la Jonte à l'alimentation des systèmes karstiques du Causse Méjean, à l'exception des résurgences des Douzes et du Maynial**. Ainsi, aucune alimentation actuelle du système karstique du Pêcher par la Jonte n'est identifiée, et aucune signature isotopique d'eau provenant du socle n'est identifiée sur les sources étudiées.

L'analyse des suivis en continu de température, conductivité électrique, fluorescence naturelle et turbidité a permis de compléter ce diagnostic en décrivant la dynamique des circulations rapides qui atteignent les exutoires en réponse aux épisodes de recharge.

Tous les exutoires présentent des écoulements rapides qui contribuent à leur alimentation lors des crues. Le signal de fluorescence naturelle permet de quantifier ce temps de transfert. Celui-ci dépend du débit et peut être inférieur à la journée, ce qui montre la **grande vulnérabilité de ces systèmes à une contamination accidentelle à la surface de leur bassin**, **mais aussi une résilience élevée compte tenu de l'évacuation rapide d'éventuels contaminants**. Le bruit de fond de fluorescence des différents exutoires suivis caractérise une eau naturelle sans influence anthropique. Le système de l'Ironselle est le seul à montrer un comportement plus inertiel, avec une contribution relativement faible de ces écoulements rapides lors des crues, limités aux épisodes de crue majeurs. La turbidité observée au Moulin de Pélatan traduit un transfert de MES depuis la zone d'infiltration et suit la dynamique de transfert de la matière organique dissoute, avec un lien possible avec les activités agricoles sur ce bassin. Pour les autres systèmes karstiques, une turbidité des eaux n'apparaît que lors d'épisode de crue permettant de remettre en eau des réseaux exondés. Les informations obtenues par les différents outils mis en œuvre dans l'étude hydrochimique sont reportées pour chaque système karstique dans le tableau suivant (Tableau 21). L'ensemble de ces résultats est également synthétisé à travers une estimation du degré (relatif) de karstification de chaque système (+ = faible / ++ = moyen / +++ = fort), en tenant compte de l'ensemble des résultats apportés par l'étude hydrochimique.

Outil/Système	Douzes	Pêcher	Pélatan	Castelbouc	Moulin de Cénarette	Ardennes	Ironselle
Géochimie et isotopes	Influence de la Jonte = 60% de la recharge	Bicarbonaté calcique Enrichissement en sulfates et chlorures en basses eaux Aucune influence d'eau du socle ou de la Jonte	Bicarbonaté calcique	Bicarbonaté calcique, regroupé avec Estivants	Bicarbonaté calcique et magnésien	Bicarbonaté calcique	Bicarbonaté calcique et magnésien
Nitrates	Bruit de fond naturel	Bruit de fond naturel	Impact anthropique récent ?	Bruit de fond naturel	Faible impact anthropique	Bruit de fond naturel	Bruit de fond naturel
Turbidité	ND	Recirculation du ruissellement sur les marnes lors de fortes pluies	Transfert rapide de MES depuis la zone d'infiltration	Lors de la mise en charge des réseaux temporaires			
Fluorescence	ND	Bruit de fond plus élevé mais qui reste faible Réponses multiples associées à un éventuel sous-bassin	Transfert très rapide (quelques jours) qui dépend du débit				Fux d'infiltration rapide depuis la ZNS uniquement lors des fortes crues
Température	Influence des pertes / transfert d'environ 20 jours	Contribution de flux rapides Absence d'anomalie (pas de flux profonds)	Contribution de flux rapides qui explique une plus forte variabilité de T	Contribution de flux rapides		Contribution de flux rapides qui explique une plus forte variabilité de T	Très faible contribution de flux rapides
Conductivité	Forte influence de la Jonte	Dilution prépondérante lors des crues, suivie d'une augmentation progressive de la minéralisation. Forte contribution d'eau issue de l'épisode de recharge	Dilution prépondérante lors des crues, rapidement suivie d'une hausse de minéralisation en décrue et tarissement. Contribution de l'eau issue de l'épisode de recharge et drainage d'eau stockée dans la zone d'infiltration		Dilution prépondérante lors des crues, suivie d'une augmentation progressive de la minéralisation. Forte contribution d'eau issue de l'épisode de recharge	Comportement variable (dilution ou minéralisation) lors des crues selon les conditions hydrologiques, suivi d'une hausse de minéralisation lors du tarissement	Transfert type « piston » majoritaire dans la zone d'infiltration, absence de dilution sauf pour les fortes crues. Très faible contribution d'eau d'infiltration rapide
Degré de karstification	+++	+++	+++	+++	+++	++	+

Tableau 21 : Tableau de synthèse des principaux résultats apportés par chaque traceur naturel lors de l'étude hydrochimique.

5. Tracage artificiel

5.1. OBJECTIFS ET MÉTHODES MISES EN ŒUVRE

Le traçage artificiel est une technique couramment utilisée en hydrogéologie karstique pour mettre en relation un point d'infiltration en surface ou dans un réseau spéléologique avec une source ou un forage. Ces opérations sont réalisées selon deux objectifs :

- un objectif « qualitatif » (traçages de reconnaissance) pour mettre en évidence une relation hydraulique entre le lieu d'injection et l'exutoire ;
- un objectif « quantitatif » pour décrire par une courbe de restitution du traceur (concentration en fonction du temps) les modalités de transit du traceur pour les conditions hydrogéologiques de l'essai, incluant le bilan de restitution qui permet de discuter de la présence éventuelle d'exutoires secondaires.

Toute substance permettant de suivre le déplacement de l'eau peut théoriquement être utilisée comme traceur. En pratique, les traceurs fluorescents permettent de colorer l'eau pour de très faibles concentrations (~1ppb), et permettent des suivis fluorimétriques sur le terrain ou spectrofluorimètriques au laboratoire pour une quantification précise à des concentrations pouvant être inférieures à 0.01 ppb en l'absence de bruit de fond naturel élevé, limitant ainsi l'impact visuel de l'essai sur le terrain et dans les réseaux d'eau potable éventuellement concernés.

Il existe plusieurs traceurs fluorescents dont l'innocuité est reconnue pour une utilisation en hydrogéologie (OFEG, 2002). Chaque traceur est défini par un couple de longueur d'onde d'excitation/émission spécifique. L'utilisation simultanée de plusieurs traceurs ayant des caractéristiques spectrales distinctes est donc possible si la technique de détection permet de séparer les signaux émis par chaque traceur. La réalisation de multi-traçages permet alors de minimiser les déplacements lors du suivi tout en apportant des résultats relatifs à d'éventuelles restitutions obtenues pour des conditions hydrogéologiques identiques, ce qui permet de comparer plus facilement les résultats obtenus.

Les fluorimètres multi-spectraux de type GGUN commercialisés par la société Albillia permettent de séparer la réponse de l'uranine (ou l'éosine) de celle de la sulforhodamine (ou tout autre traceur de la famille des rhodamines), tandis que les optiques dédiées à la turbidité et aux azurants optiques permettent de voir si le bruit de fond naturel a évolué lors de l'essai (Meus *et al*., 2006, Bailly-Comte *et al.*, 2018). En effet, une augmentation de la fluorescence enregistrée par un fluorimètre peut traduire le passage d'une eau plus turbide ou plus riche en matière organique (cf. 4.4.1). En cas de doute, il convient de réaliser une analyse spectrale sur échantillon à l'aide d'un spectrofluorimètre pour rechercher un pic de réponse pour le couple de longueur d'onde d'excitation/émission qui caractérise le traceur recherché. Une méthode a récemment été développée pour permettre de mieux corriger le bruit de fond naturel qui perturbe l'interprétation des données issues de fluorimètres, et ainsi valider la présence du traceur (Bailly-Comte *et al.*, 2018). Cette méthode est particulièrement adaptée au cas de suivi fluorimétrique à long terme sur une grande zone d'étude, comme dans le cadre de cette étude. Le principe de cette méthode est présenté sur la base d'exemples issus de cette étude dans la section suivante (0).

5.2. DIMENSIONNEMENT, RÉALISATION ET RÉSULTATS DES TRAÇAGES

5.2.1. Conditions d'injection

Le dimensionnement des traçages correspond, dans le cadre de cette étude, au choix :

- du point d'injection ;
- du traceur et de sa quantité ;
- des exutoires à suivre et du type de surveillance.

Par défaut, l'utilisation de l'uranine a été privilégiée. La sulforhodamine B a également été utilisée en complément, notamment lors de multi-traçages ou en cas de résultat négatif sur un exutoire potentiel identique. **22 injections de traceurs ont été réalisées de 2017 à 2020**, totalisant 60,5 kg de traceurs, dont 20 kg de sulforhodamine B et 40.5 kg d'uranine. Ces 22 injections ont donné lieu à 6 échecs, dont 3 depuis le même point d'injection (aven de la Sompe à Riesse).

Pour chaque traçage, les quantités à injecter ont été estimées selon la méthode proposée par Bailly-Comte et Pistre (2011) à partir d'une estimation du débit de l'exutoire pour une vitesse de 40 m/h.

À l'exception des deux premières injections (T1a et T1b) et du traçage T6 pour lesquels la dilution du traceur a été réalisée sur le lieu d'injection, toutes les injections ont été réalisées à partir de traceur préalablement dilué dans de l'eau. À l'exception du traçage de l'aven Armand, tous les traçages ont été réalisés en diluant le traceur dans un conduit actif (Figure 49), ce qui permet de faciliter le transfert jusqu'à la zone noyée.



Figure 49 : Injection du traceur à -400m, aven de la Cheminée (T2a).

Le traçage de l'Aven Armand (T13) a nécessité un apport d'eau pour que le traceur injecté par un tuyau au fond du puits terminal depuis la plateforme puisse être bien entraîné vers la zone noyée. 22 m^3 ont été déversés par les pompiers, dont une partie a été stockée puis écoulée lentement après l'injection.

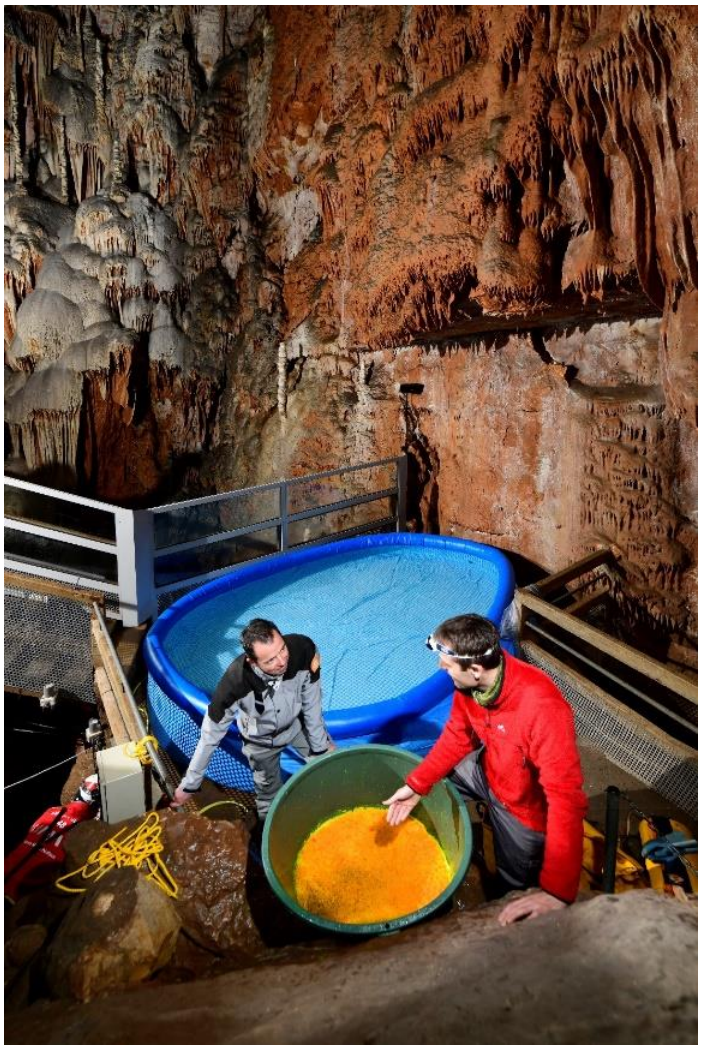


Figure 50 : Dispositif mis en place pour le traçage de l'aven Armand depuis la plateforme (T13) – Ph Crochet.

Les 22 injections se répartissent en 5 multi-traçages de 2 injections et 12 traçages uniques. À l'exception des traçages de la perte de la Fontaine de Mielgues (T6) et de l'Aven Armand (T13), les spéléologues locaux, très motivés et disponibles nous ont permis de réaliser des injections en profondeur, missions encadrées par une convention avec le Comité Départemental de Spéléologie de Lozère.

Le tableau suivant présente les caractéristiques de chaque traçage réalisé dans le cadre de cette étude (Tableau 22).

#	Id	Injection	Date	BSS	Conditions	Traceur	m (g)	Exutoires suivis
1	T1a	Aven des Loups	18/03/2017	BSS004ABXP	Au fond de la salle de l'écho à – 160 m	SulfoB	4 000	Pêcher, Pelatan, Castelbouc
2	T1b	Aven du Pic d'Usclats n°2	18/03/2017	BSS002CHBT	Actif à – 200m, en bas du P57	Uranine	4 000	Pêcher, Pelatan, Castelbouc
3	T2a	Cheminée	29/04/2017	BSS002CGWC	Siphon à -400m	Uranine	1 000	Ironselle
4	T2b	Montbuisson n°6	06/05/2017	BSS004ABXQ	Actif à – 144 m, débit faible	SulfoB	1 500	Ironselle, Sablière basse
5	T3a	Saut du Loup n°2	04/06/2017	BSS004ABXR	À – 140 m, à la base du P15 terminal	Uranine	3 000	Pêcher, Pelatan, Castelbouc
6	T3b	Mativet n°2	17/06/2017	BSS004ABXT	Injection effectuée à -130 (avant le dernier ressaut)	SulfoB	1 000	Pêcher, Pelatan, Castelbouc, Pontet
7	T4a	Sompe à Rieisse	02/07/2017	BSS004ABXU	Au fond du « puits de la douche », dans l'actif à - 78m	Uranine	500	Ardennes, Ironselle
8	T4b	Baume Fromagère	08/07/2017	BSS004ABXW	Injection à -190 m	SulfoB	500	Ironselle, Sablière
9	T5	Bastide	23/12/2017	BSS002BLEJ		Uranine	500	Pêcher, Pélatan, Castelbouc
10	T6	Perte de la Fontaine de Mielgues	17/01/2018	BSS004ABXX		Uranine	4 000	Ardennes, Castelbouc, Pêcher, Douzes
11	T7	Aven de la Barelle	14/02/2018	BSS002CGZA	Injection à -90 m	SulfoB	5 000	Ardennes, Douzes, Saint-Chély, Ironselle
12	T8	Sompe à Rieisse	22/04/2018	BSS004ABXU		SulfoB	3 000	Ardennes, Douzes, Saint-Chély, Ironselle
13	T9	Hures	26/05/2018	BSS002CHAC	Injection à -205m	Uranine	4 000	Ardennes, Douzes, Saint-Chély, Ironselle, Castelbouc
14	T10	Crapaud	15/07/2018	BSS004ABXZ	Injection à -110m	Uranine	6 000	Ardennes, Douzes, Saint-Chély, Ironselle, Castelbouc, Pêcher
15	T11	Aven des Loups	01/12/2018	BSS004ABXP		Uranine	4 000	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants
16	T12	La Caze	02/12/2018	BSS004ABYA	Au terminus à – 177m, dans le gour en bas du dernier ressaut de 5m.	Uranine	400	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants
17	T13	Aven Armand	08/01/2018	BSS002GGZT	Injection poussée avec 11m3 avant et suivant l'injection	Uranine	4 000	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants
18	T14	Sompe à Rieisse	02/03/2019	BSS004ABXU	Au fond du « puits de la douche », dans l'actif à - 78m	SulfoB	2 000	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants, Galène
19	T15	Aven du Deves	10/03/2019	BSS002BKZM	Injection à -44m dans un actif	Uranine	2 000	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants
20	T16a	Aven Bancou	02/12/2019	BSS004ABYB	Injection dans un actif, +/- 6L/min	SulfoB	3 000	Maynial basse, Douzes
21	T16b	Fumade	02/12/2019	BSS004ABYD	Injection dans un actif, +/- 1L/min	Uranine	3 000	Maynial basse, Douzes, Hérans
22	T17	Aven du Veygalier	11/01/2020	BSS002CHBW	Injection poussée avec 13m3 en deux étapes	Uranine	4 000	Maynial basse, Douzes, Hérans

Tableau 22 : Liste des traçages réalisés dans le cadre de l'étude.

5.2.2. Traçage des exutoires

Deux sites ont été retenus pour la réalisation de traçages à proximité immédiate des exutoires. Ces traçages, non reportés dans le Tableau 22, ont eu lieu dans le but d'estimer le débit des exutoires par dilution et d'identifier d'éventuelles sorties dans le Tarn.



Figure 51 : mesure de débit à Castelbouc 3 – Y. Manche.

Pour la source de l'Ironselle, un exemple de courbe est reporté en Figure 14 p.26. Ce traçage a été conduit à deux reprises (cf. Tableau 3, p.26), et la forme de la restitution observée en basses eaux met en évidence un faible mécanisme d'intermittence sur ce système, également identifiable sur l'évolution du débit en basses eaux (cf. résultat du traçage T2a, Figure 56).

Un autre test a été réalisé depuis le point de suivi hydrologique et physico-chimique mis en place pour le système karstique des Ardennes (cavité des Ardennes n°2, BSS004ABYM). Ce test avait pour but d'identifier le devenir des eaux circulant à ce niveau et identifier ainsi d'éventuelles sorties dans le lit du Tarn, en espérant également pouvoir observer une restitution à l'exutoire principal des Ardennes pour réaliser des jaugeages par dilution. En situation d'étiage, une faible masse de traceur (+/- 2 g) n'a permis d'observer une coloration de l'eau qu'au bord du Tarn au droit du thalweg qui part de la cavité. Il n'est donc pas possible d'utiliser ce point d'injection pour estimer le débit total du système des Ardennes.

5.2.3. Suivis des exutoires et méthode de correction du bruit de fond

Le dispositif de suivi par fluorimètre (cf. 2.2) permet de limiter les contraintes liées aux relevés de préleveurs automatiques sur cette vaste zone d'étude (~400 km2), tout en apportant des informations relatives à la réponse fluorescente naturelle des différents systèmes karstiques (cf. 4.4.1). Ainsi, tous les traçages réalisés dans le cadre de cette étude et ayant donné lieu à une restitution ont pu être décrits par une courbe de restitution mesurée par un fluorimètre GGUN, à l'exception du dernier traçage de l'aven du Veygalier (T16) qui a donné lieu à une restitution visible à la source des Clauzels (BSS002CHCG).

Parmi les différentes techniques de suivis de la fluorescence, les fluorimètres de terrain réalisent une mesure sur une bande de fréquence trop large pour identifier avec certitude la présence du traceur. Ainsi, la mesure brute est fortement influencée par l'évolution du bruit de fond (fluorescence naturelle et diffusion de la lumière par les particules). Leur facilité d'utilisation explique leur utilisation de plus en plus fréquente par les hydrogéologues et les spéléologues, mais les signaux mesurés peuvent conduire à de fausses interprétations. Pour y remédier, une méthode de correction multi-optique du bruit de fond est proposée (Bailly-Comte *et al*., 2018). Cette méthode correspond à une généralisation de l'approche proposée par Schnegg et Ledoucen (2006) à l'ensemble des optiques d'un fluorimètre multi-spectral de type GGUN (Albillia Sàrl). L'application de cette méthode permet ainsi de mieux exploiter les données enregistrées par un fluorimètre, et peut donc servir de guide à l'interprétation du résultat d'un traçage.

La méthode de correction du bruit de fond naturel consiste à recalculer le signal de l'optique dédié au traceur recherché par combinaison linéaire des mesures sur les autres optiques d'un fluorimètre multi-spectral, sachant que le fluorimètre GGUN utilise quatre optiques. Le calcul est réalisé sur une période où le traceur est absent, si possible avant l'introduction du traceur dans le milieu pour éviter toute ambiguïté. Le signal recalculé correspond au signal naturel qui peut ensuite être retiré du signal brut avant conversion en concentration.

Cette méthode peut nécessiter au préalable une correction d'interférence selon la méthode proposée par Schnegg et Thueler (2012) si la restitution du traceur influence les mesures sur les autres optiques, ou si deux traceurs différents ont été introduits.

Une interface graphique développée par le BRGM sous MATLAB® permet de réaliser facilement l'ensemble de ces étapes et de tester la sensibilité du résultat au choix de la période de calage. Les résultats sont directement exploitables pour répondre aux questions suivantes :

- La variation de fluorescence mesurée traduit elle l'arrivée du traceur injecté ?
- Comment s'affranchir des variations naturelles du bruit de fond sur le calcul de la concentration en traceur ?

Trois exemples de résultat sont détaillés pour illustrer la méthode suivie pour l'identification du traceur et le calcul de la courbe de restitution.

a) Multi-traçage T1a/T1b

La Figure 52 présente une capture d'écran de l'outil de visualisation et d'interprétation des suivis fluorimétriques dans le cas du premier multi-traçage à l'uranine et à la sulforhodamine. Le graphique du haut (baseline) permet de visualiser la mesure de fluorescence en l'absence d'excitation, afin de s'assurer de l'absence de lumière parasite. Il permet également de positionner la période de calage. Les quatre fenêtres graphiques sous-jacentes présentent les mesures réalisées sur chaque optique. L'option de « correction d'interférence » est activée pour corriger l'influence des traceurs sur chaque optique. L'interférence avec l'uranine explique une grande part du signal mesuré par les optiques L2 et L3. Le signal L3 corrigé des interférences et le signal L4 relatif à la turbidité sont utilisés pour recalculer par un modèle linéaire les signaux L1 et L2 sur la période de calage. Les mêmes paramètres sont utilisés pour calculer le bruit de fond lors de la restitution.

L'utilisation de cette méthode permet de bien interpréter la restitution très faible de sulforhodamine, qui est rapidement masquée par la restitution de l'uranine et la faible augmentation du bruit de fond.

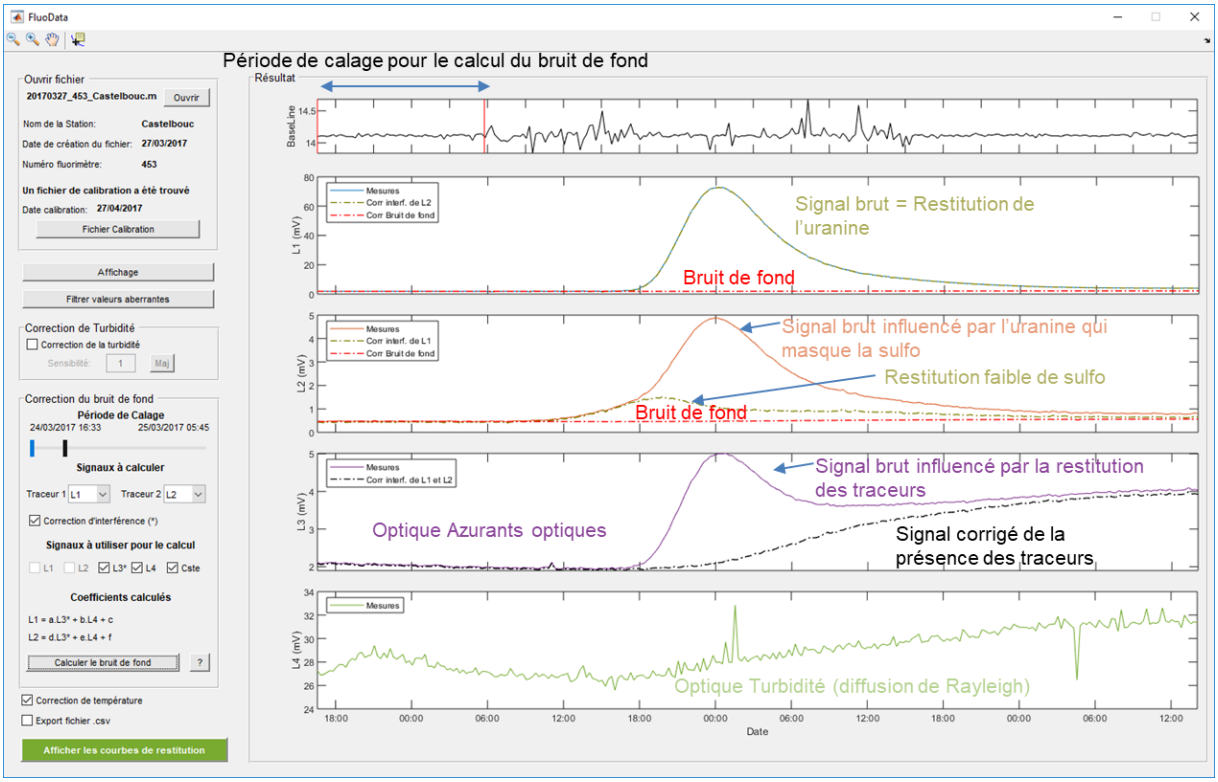


Figure 52 : Interface graphique développée sous MATLAB® présentant les résultats obtenus à la source de Castelbouc 1 suite au multi-traçage du 18 mars 2018 à l'aven des Loups (T1a, sulforhodamine, 4 kg) et à l'aven du Pic d'Usclats (T1b, uranine, 4 kg).

b) Traçage T16b

La Figure 53 présente le résultat obtenu lors du traçage de l'aven de la Fumade (T16b). Cet aven avait déjà fait l'objet d'un traçage en 2013 (1 kg d'uranine), avec suivi par fluocapteurs et par un fluorimètre à la source de Saint-Chély. La restitution avait été attribuée à la source de Saint-Chély, mais, face au manque d'information disponible pour valider ce résultat, il a été convenu de renouveler l'opération. La Figure 2 présente le résultat du traitement des données du fluorimètre placé à la source des Ardennes, sachant qu'un traitement identique aux sources de Castelbouc et de Saint-Chély a permis de s'assurer de l'absence de restitution. La Figure 53 montre que la fluorescence naturelle observée en octobre/novembre, soit avant l'injection, est très bien reproduite par le modèle pendant la période de calage. Le signal recalculé diffère ensuite du signal mesuré à partir du 6 décembre 2019, soit quatre jours après l'injection, ce qui traduit le passage du traceur avec une très faible intensité de fluorescence comparable au signal naturel observé pendant la période de calage. Ce signal corrigé est converti en concentration qui reste inférieure à 0.4 ppb. La dynamique de crue complexe explique qu'une partie du traceur soit piégée/remobilisée à trois reprises.

Ce résultat obtenu avec 3 kg d'uranine n'est mis en évidence que par l'application de la méthode multi-optique de correction du bruit de fond. Cette méthode permet une interprétation rigoureuse des signaux avant leur conversion en concentration. L'opération de 2013, avec 1 kg d'uranine injecté suivi par un épisode de crue a probablement donné lieu à une restitution qui a échappé au suivi par fluocapteurs à la source des Ardennes, tandis que les variations de fluorescence naturelle observée à la source de Saint-Chély par un fluorimètre identique ont donné l'illusion d'une restitution de traceur.

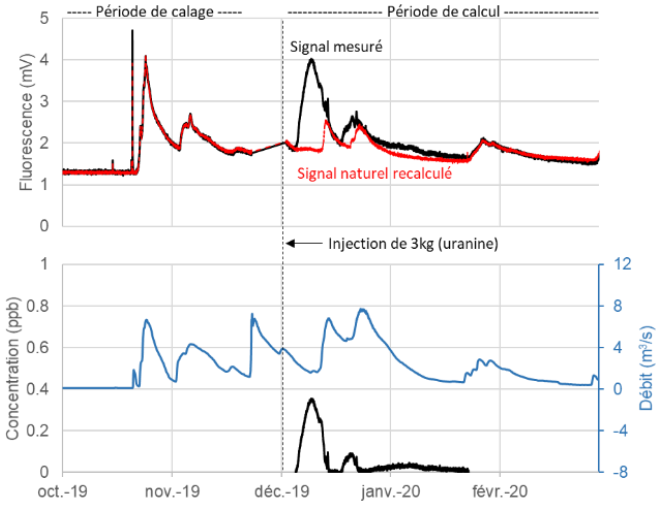


Figure 53 : Résultats de l'application de la méthode multi-optique de correction de bruit de fond comparés à l'évolution du débit à la source des Ardennes suite à l'injection de 3 kg d'uranine dans l'aven de la Fumade le 2 décembre 2019 (T16b).

c) *Traçage T15*

Un dernier exemple d'application de cette méthode est présenté dans le cas du suivi obtenu lors du traçage de l'aven du Deves (T15) le 10 mars 2019. Un traçage ancien reporté par Bérard (1987) indiquait une restitution à la source de Saint-Chély. Cette opération réalisée par le SpéléoClub de Lozère en 1980 avait été suivie par fluocapteurs, relevés après un temps de séjour dans l'eau relativement long (Janvier 1981, d'après Barbier, 2013), ce qui a justifié la réalisation d'un nouvel essai pour mieux déterminer la limite des bassins d'alimentation des systèmes des Ardennes et de Saint-Chély.

La Figure 54A présente les résultats obtenus à la source des Ardennes, qui était l'un des exutoires visés par ce traçage. Les résultats obtenus montrent que toutes les variations de fluorescence observées à partir de la date d'injection du traceur s'expliquent par les variations de fluorescence naturelle. Le traceur n'est donc pas détecté.

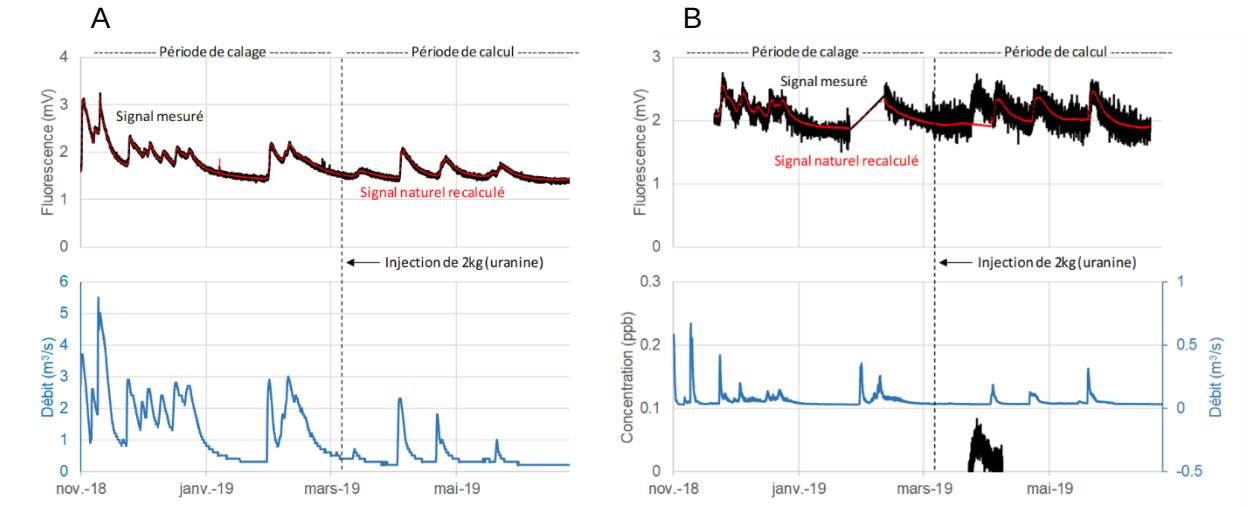


Figure 54 : Analyse des résultats du fluorimètre comparés à l'évolution du débit à la source des Ardennes (A) et de Saint-Chély (B).

Au contraire, à la source de Saint-Chély (suivi de fluorescence au moulin de Cénarette), la Figure 54B montre que la fluorescence observée suite à l'injection n'est pas parfaitement expliquée par l'évolution attendue du signal naturel. On observe un premier pic en Avril (15 jours après l'injection) qui n'est pas expliqué, puis d'autres pics du même ordre de grandeur qui s'expliquent par la réponse naturelle de la source. Ce premier pic correspond très probablement à une arrivée de traceur en concentration très faible (de l'ordre de 0.1 ppb), confirmant ainsi le résultat de 1980. Ce résultat suppose néanmoins une restitution très faible discutée par la suite.

d) *Aide au diagnostic par le suivi d'autres paramètres*

En cas de doute, et en l'absence d'échantillons, les suivis réalisés par les fluorimètres peuvent également être comparés aux évolutions physico-chimiques, et notamment à la conductivité électrique de l'eau. Une augmentation de la fluorescence qui accompagne une baisse de la conductivité après une crue permet de supposer qu'il s'agit d'une réponse de fluorescence naturelle liée à l'arrivée d'eau d'infiltration rapide. La Figure 55 permet de comparer les résultats observés sur le système de Saint-Chély/Cénarette lors des traçages de 2013 (aven de la Fumade, Barbier, 2013) et du traçage T15 (aven du Devès présenté sur la Figure 54B)

Pour le traçage de 2013 (graphique du haut), les variations de fluorescence suivent les variations de débit et sont bien inversement corrélées à la conductivité électrique de l'eau mesurées à cette époque par le fluorimètre. Ces évolutions confirment qu'il s'agit d'un signal de fluorescence naturel. Pour le traçage T15 (graphique du bas), l'évolution calculée de la concentration en uranine par la méthode multi-optique, bien que très faible, est indépendante des évolutions de débit et de conductivité électrique. Ceci confirme que la faible évolution de signal de fluorescence ne s'explique pas par une augmentation de la fluorescence naturelle accompagnant l'eau d'infiltration rapide. Il s'agit donc bien du traceur recherché. En l'absence d'échantillons, il n'est pas possible de valider à 100 % ce résultat, qui est tout de même considéré comme fiable dans cette étude, et confirme le traçage de 1980 réalisé par le spéléo-club de Lozère et reporté par Bérard (1987).

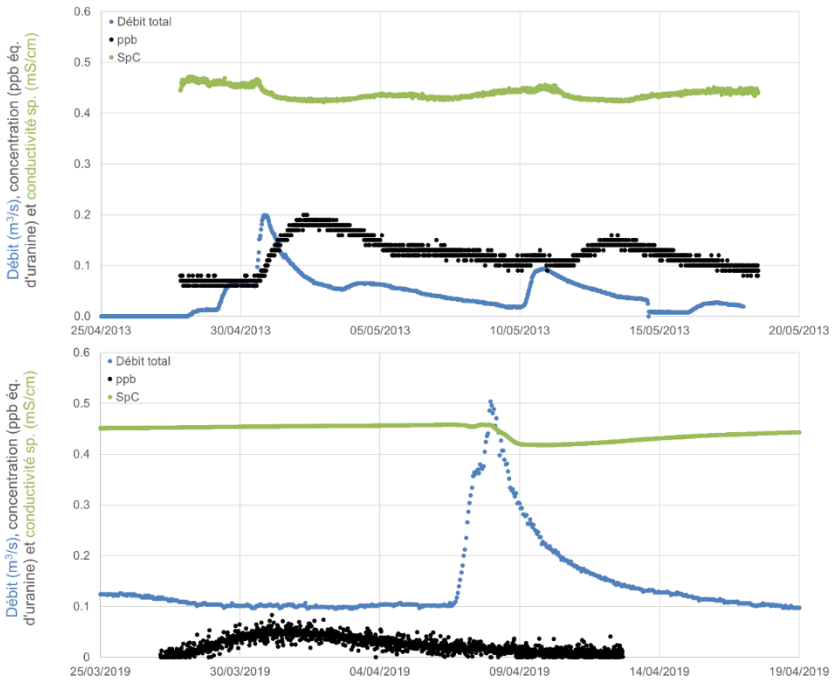


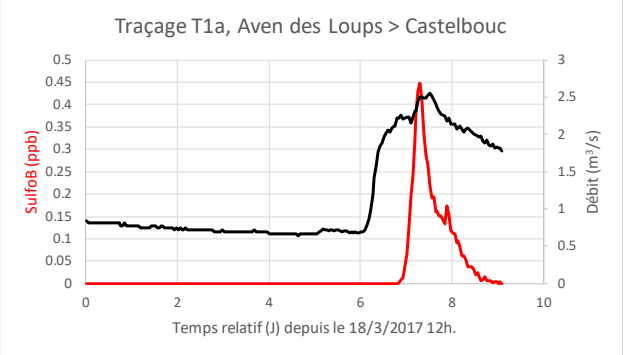
Figure 55 : Comparaison des résultats des fluorimètres obtenus aux exutoires du système Saint-Chély/Cénarette lors du traçage de l'aven de la Fumade de 2013 (Barbier, 2013, graphique du haut) et du traçage T15 de l'aven du Devès (graphique du bas).

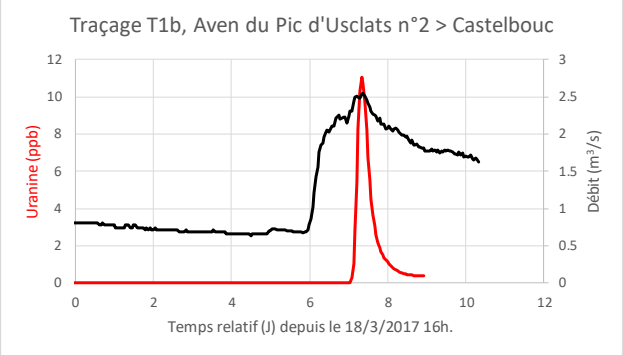
5.2.4. Résultats

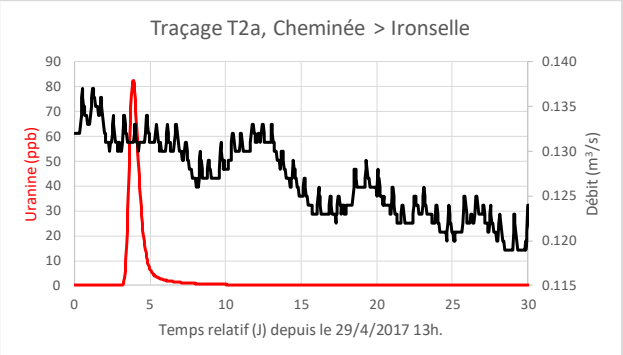
Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 23, et présentés sous forme graphique sur la Figure 56 et cartographique sur la Figure 57. Ces résultats ont également été bancarisés dans la BD Traçages (https://bdtracages.brgm.fr/).

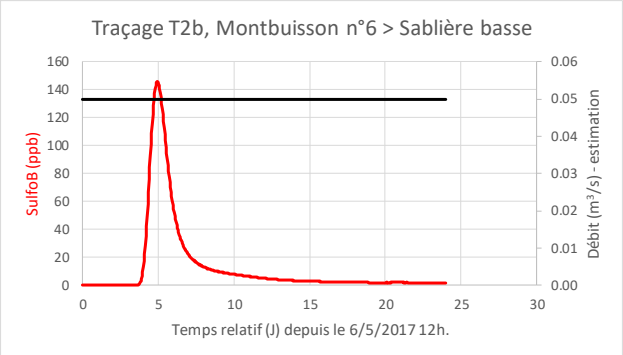
#	Id	Injection	Restitution	BSS	R	C max (ppb)	Temps modal (j)	V pic (m/h)
1	T1a	Aven des Loups	Castelbouc	BSS002BLDX	1 %	0.5	7.3	35
2	T1b	Aven du Pic d'Usclats n°2	Castelbouc	BSS002BLDX	26 %	11	12.3	29
3	T2a	Cheminée	Ironselle	BSS002CGFJ	83 %	83	3.9	46
4	T2b	Montbuisson n°6	Sablière basse	BSS004ABYT	87 %	146	4.9	23
5	T3a	Saut du Loup n°2	Castelbouc	BSS002BLDX	11 %	2.0	25.7	12
6	T3b	Mativet n°2	Pelatan	BSS002BLEU	34 %	11	23.0	8
7	T4a	Sompe à Rieisse	Non détecté	BSS004ABXY				
8	T4b	Baume Fromagère	Non détecté	BSS004ABXW				
9	T5	Bastide	Pêcher	BSS002BLGA	53 %	5.5	1.6	44
10	T6	Perte de la Font. de Mielgues	Ardennes	BSS002BKZD	63 %	1.8	4.4	152
11	T7	Aven de la Barelle	Ardennes	BSS002BKZD	67 %	18.3	3.6	123
12	T8	Sompe à Rieisse	Non détecté	BSS004ABXY				
13	T9	Hures	Ardennes	BSS002BKZD	79 %	4.9	4.6	91
14	T10	Crapaud	Castelbouc	BSS002BLDX	*18 %*	4.5	20.9	19
15	T11	Aven des Loups	Castelbouc 1	BSS002BLDX	*16 %*	0.4	8.2	31
			Castelbouc 2	BSS002BLBL		0.6	8.2	31
			Castelbouc 3	BSS002BLDY		ND		
			Castelbouc 4	BSS004ABYF		0.1	15.0	18
			Estivants	BSS004ABYK		0.3		
16	T12	La Caze	Maynial basse	BSS002CGYJ	41 %	3.8	4.2	9
17	T13	Aven Armand	Douzes	BSS002CGXY	80 %	2.1	10.3	18
			Maynial basse	BSS002CGYJ	4 %	0.9	10.8	24
			F. Profond	BSS002CGYQ		ND		
18	T14	Sompe à Rieisse	Non detecté	BSS004ABXY		ND		
19	T15	Aven du Deves	Saint-Chély	BSS002BLBE	<1 %	<0.1	29.3	8
20	T16a	Aven Bancou	Non détecté	BSS004ABYB		ND		
21	T16b	Fumade	Ardennes	BSS002BKZD	20 %	0.4	7.9	36
22	T17	Aven du Veygalier	Source des Clauzels	BSS002CHCG		>100		

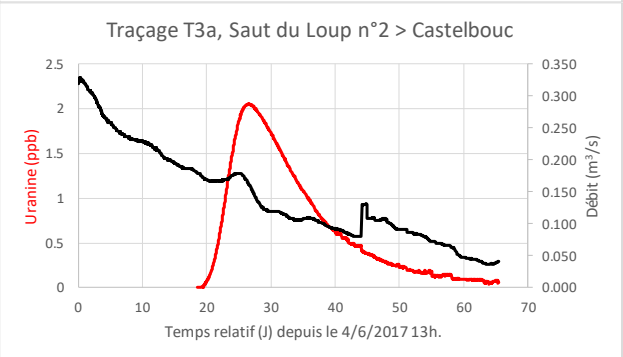
Tableau 23 : Résultats des traçages, information relative à la restitution (R : % de restitution).

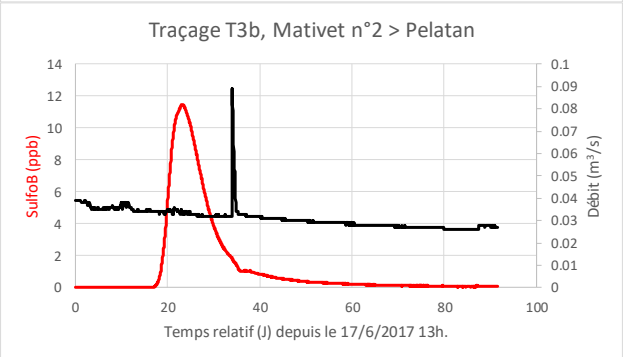

Traçage T1a, Aven des Loups > Castelbouc
SulfoB (ppb)
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) depuis le 18/3/2017 12h.

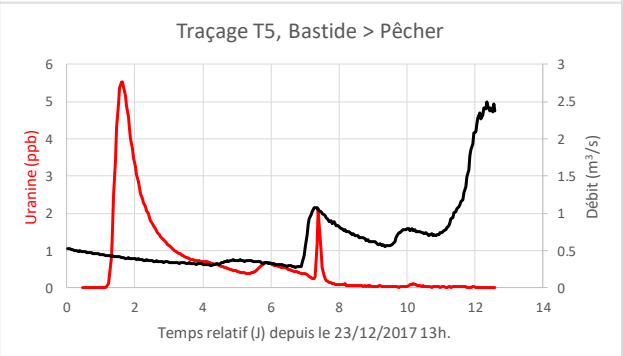

Traçage T1b, Aven du Pic d'Usclats n°2 > Castelbouc
Uranine (ppb)
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) depuis le 18/3/2017 16h.

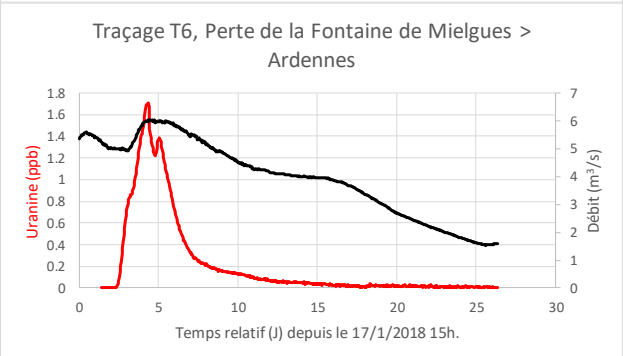

Traçage T2a, Cheminée > Ironselle
Uranine (ppb)
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) depuis le 29/4/2017 13h.


Traçage T2b, Montbuisson n°6 > Sablière basse
SulfoB (ppb)
Débit (m³/s) - estimation
Temps relatif (J) depuis le 6/5/2017 12h.


Traçage T3a, Saut du Loup n°2 > Castelbouc
Uranine (ppb)
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) depuis le 4/6/2017 13h.


Traçage T3b, Mativet n°2 > Pelatan
SulfoB (ppb)
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) depuis le 17/6/2017 13h.


Traçage T5, Bastide > Pêcher
Uranine (ppb)
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) depuis le 23/12/2017 13h.


Traçage T6, Perte de la Fontaine de Mielgues > Ardennes
Uranine (ppb)
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) depuis le 17/1/2018 15h.

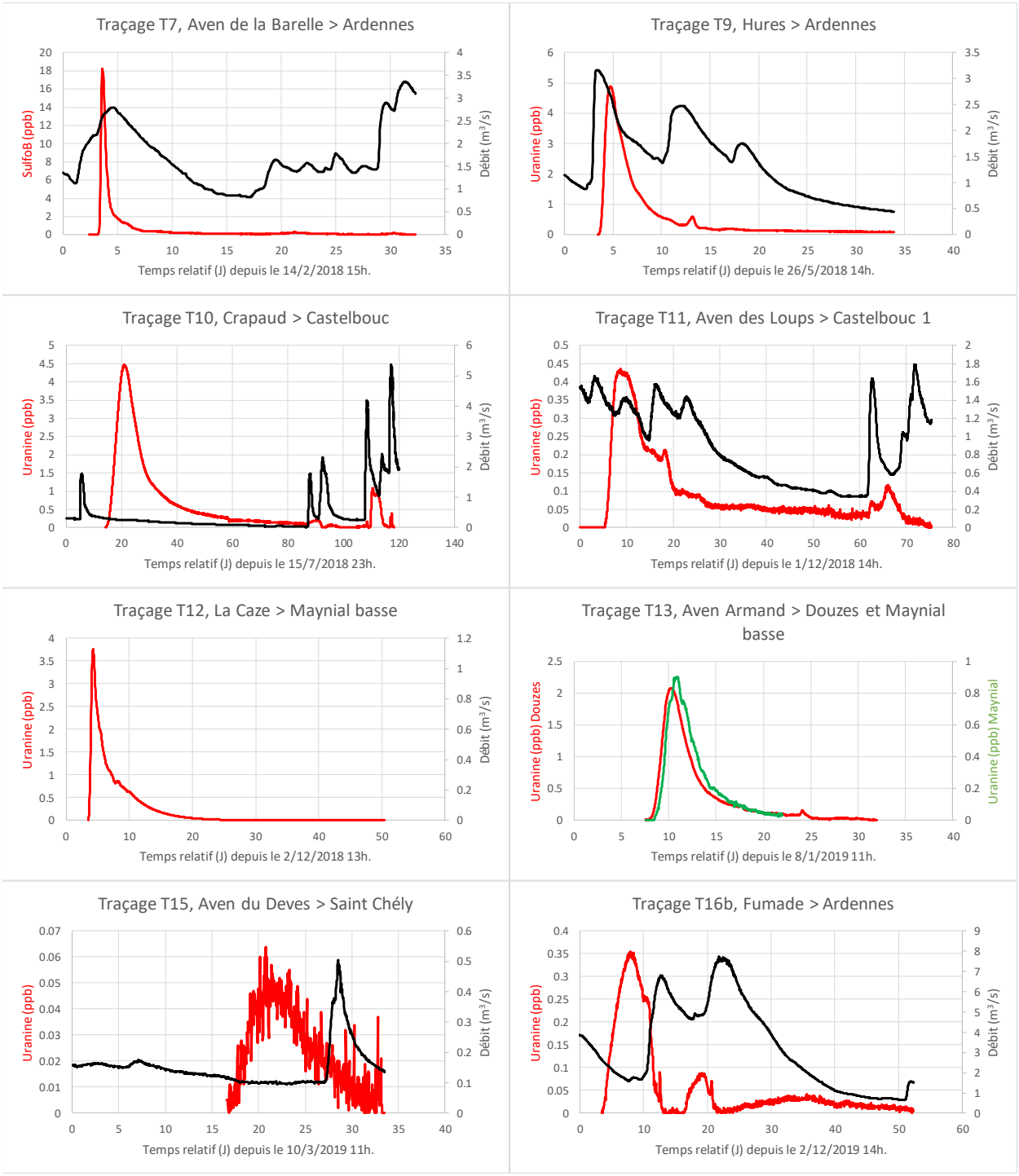


Figure 56 : Courbes de restitution comparées à l'évolution du débit des exutoires.

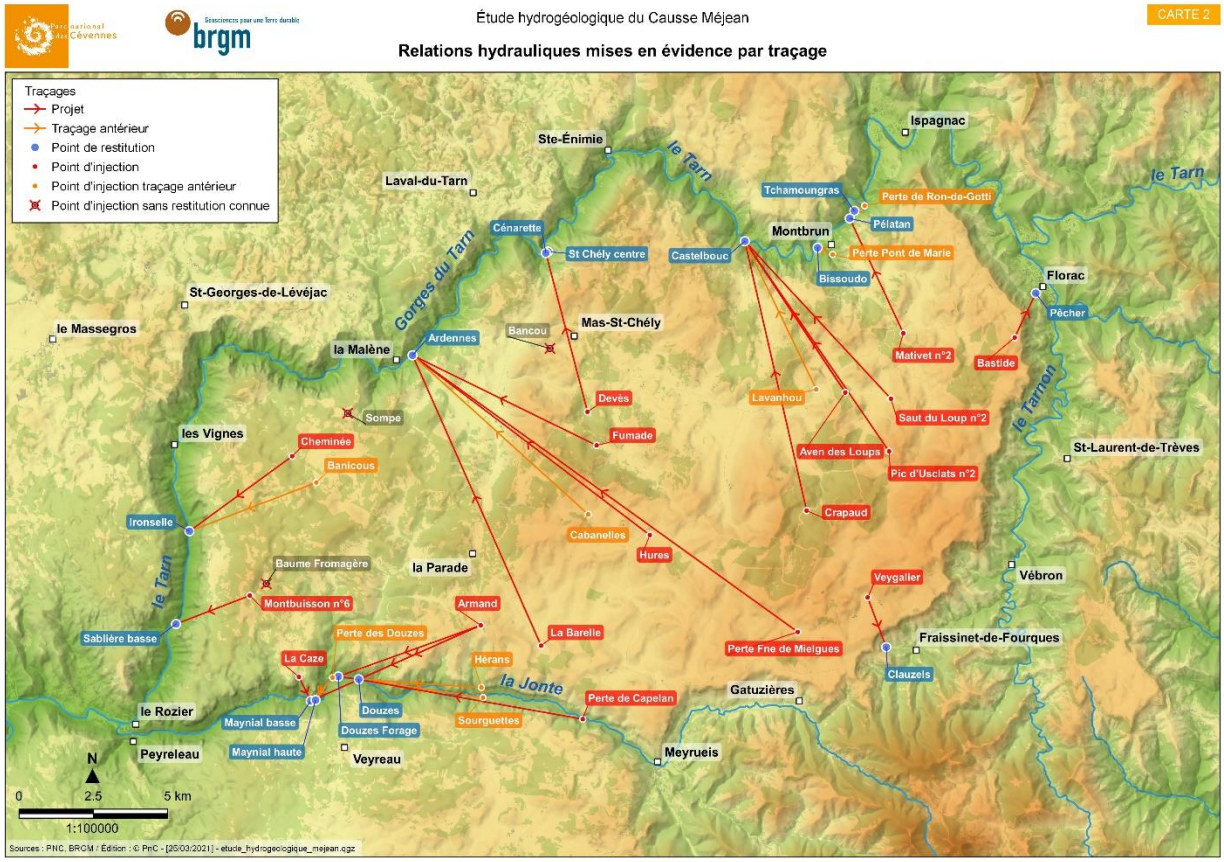


Figure 57 : Carte des relations hydrauliques mises en évidence par traçage avec report des traçages antérieurs sélectionnés et des points d'injection n'ayant pas donné lieu à une restitution – coordonnées en Lambert 93.

5.3. INTERPRÉTATION

5.3.1. Courbe de restitution

Les restitutions obtenues sur les premiers traçages réalisés aux sources de l'Ironselle et de la Sablière présentent des concentrations très élevées du fait d'une méconnaissance du débit des exutoires, qui était largement surestimé avant la réalisation de cette étude pour ces deux exutoires. Les masses de traceur ont donc été largement surévaluées.

Les restitutions obtenues présentent des taux de restitution très variables, de moins de 1 % à plus de 80 %. Les restitutions les plus faibles (<20 %) peuvent parfois s'expliquer par la présence d'autres exutoires non suivis restituant également le traceur, comme par exemple lors du traçage T1b où le traceur a pu sortir aux autres exutoires du système de Castelbouc. La très faible restitution observée lors du traçage de l'aven du Devès est plus difficile à expliquer. Il est possible que les concentrations aient été plus élevées à la source de Saint-Chély Centre, conduisant à une sous-estimation du flux de traceur, mais il est également probable que le système tracé soit mal drainé et que seule une partie du traceur ait pu rejoindre rapidement le réseau de drainage vers la source.

Pour le système de Castelbouc, les courbes obtenues pour les traçages T10 et T11 montrent que le traceur peut rester piégé à proximité de l'exutoire, et remobilisé lors des mises en charge suivantes. Ce résultat s'explique bien par la présence de réseaux temporaires à une altitude supérieure (cf. 3.2.1.a) p.32), de lacs et de siphons à proximité de l'exutoire.

Dans la plupart des cas, une augmentation du débit s'accompagne d'une faible variation (le plus souvent une augmentation) de la concentration, conduisant à une augmentation du flux de traceur à l'exutoire. Le résultat obtenu lors du traçage T16 (aven des Fumades) est le seul à présenter une relation clairement inversée entre le débit et la concentration, conduisant à un arrêt de la restitution lors des crues. La mise en charge du drain principal dilue fortement la concentration du traceur, et semble l'empêcher de circuler. Ce résultat s'explique probablement par un contrôle hydraulique aval imposé par la mise en charge du drain principal, provoquant une baisse du gradient hydraulique dans le système tracé, et donc une diminution du flux. Le système tracé à partir de l'aven des Fumades constituerait alors un système de drainage annexe au drain principal. Les autres restitutions observées à la source des Ardennes ne montrent pas ce type de relation avec le débit, notamment T6 et T9. Le traceur emprunterait ici un réseau karstique majeur. Cette hiérarchisation du drainage est cohérente avec la position des points d'injection, l'aven des Fumades (T16) étant en limite de bassin de bassin d'alimentation, tandis que les avens de Hures et la perte de la Fontaine de Mielgues sont au centre du bassin et doivent se connecter rapidement à un collecteur principal.

Sur le système des Douzes, le traçage de l'aven Armand (T13) montre une restitution simple à la source des Douzes, ainsi qu'une restitution à la source du Maynial, moins concentrée et montrant de petits pics secondaires. Un suivi fluorimétrique a également été mis en place par les spéléologues dans le réseau des Hérans (vallée de la Jonte, Figure 57), montrant l'absence de restitution jusqu'au 18 janvier 2019, date à laquelle le traceur ressortait déjà à 1.5 ppb à la source des Douzes. La restitution légèrement décalée au Maynial s'explique surtout par une distance à parcourir plus longue, la vitesse moyenne (cf. section suivante) observée au Maynial (23 m/h) étant supérieure à celle observée aux Douzes (17 m/h). L'accélération du transit du traceur vers le Maynial et la forme de la restitution plus complexe traduisent l'existence de plusieurs systèmes de drainage possibles pour atteindre la source du Maynial, incluant une partie aérienne pour les eaux écoulées à la source des Douzes rejoignant le système de perte résurgence des Douzes/Maynial. Ce traçage permet donc de positionner les sources des Douzes et du Maynial comme les exutoires d'un même réseau de drainage visité par le traceur injecté à l'aven Armand. En aval des Douzes, l'organisation du drainage plus complexe permet au traceur d'emprunter plusieurs chemins, ce qui explique la forme plus complexe de la restitution au Maynial. Ce résultat permet de proposer la dénomination Douzes/Maynial pour caractériser le fonctionnement du système karstique dans son ensemble. L'exutoire de Maynial aval (BSS002CGYJ), également nommée Barthabela, apparaît ainsi comme l'exutoire principal de l'ensemble du système, les sorties des Douzes constituant un exutoire de trop plein au fonctionnement permanent du fait d'une alimentation continue par les pertes de la Jonte.

Les résultats obtenus sont souvent fortement influencés par les conditions hydrologiques, avec une possible remobilisation du traceur. Dans ces conditions, le calcul de la Distribution des Temps de Séjour (DTS) à partir des observations apporte une information biaisée par les variations de débits. Par exemple, le calcul du temps moyen de séjour d'une restitution plurimodale en raison d'une crue survenant pendant la restitution n'apporte pas d'information précise permettant de caractériser le temps de séjour moyen du traceur. Ces calculs et leur interprétation sont menés lors de la modélisation par modèle d'advection/dispersion 1D (cf. 5.3.4) afin de mieux s'affranchir des variations de débit sur l'estimation de ces paramètres en isolant si besoin la partie de courbe non influencée par une remobilisation du traceur.

5.3.2. Interprétation des échecs

L'échec du traçage de l'aven Bancou (T16a), ainsi que celui d'un essai (non reporté) de traçage du lagunage situé entre Anilhac et Caussignac à l'ouest de Mas Saint-Chély le 9 septembre 2019 (2 kg d'uranine) restent inexpliqués. Ces traçages n'ont pas été réalisés à des périodes permettant d'imaginer une évacuation du traceur par un exutoire de trop-plein. Il n'existe pas d'autres exutoires karstiques importants qui auraient échappés à la stratégie de surveillance par fluorimètre. Il est possible pour le traçage du lagunage qu'une partie du traceur soit restée piégée par adsorption sur les boues.

L'échec du traçage de la Baume Fromagère (T4b) s'explique très probablement par le défaut du suivi à la source de la Sablière basse, le fluorimètre ayant été malheureusement retiré de l'eau pendant le suivi par un visiteur.

Les échecs des traçages réalisés depuis l'aven de la Sompe à Riesse (T4a, T8 et T14) ne s'expliquent pas par un défaut de surveillance des exutoires connus, sachant que l'exutoire de la Galène BSS004BMCE a également été suivi lors du T14 (reportée par Rouquet (1976) selon les coordonnées XL3=678550 et YL3=222650, réseau accessible pour l'installation d'un fluorimètre). Il est donc probable que la restitution se soit réalisée sur un autre exutoire, qui pourrait être l'un des exutoires du Pas-de-Soucy dans la vallée du Tarn.

5.3.3. Conséquences sur l'exploitation des données antérieures

Les résultats récents ont permis de vérifier ou d'invalider certains résultats de traçages ou de colorations réalisés sur le Causse Méjean depuis les années 60, reportés par Rouquet (1976), Bérard (1987), André (1992) puis Baumas (2016).

Les plus anciens sont relativement peu documentés, et ont fait l'objet d'un suivi le plus souvent par fluocapteurs, sans analyses postérieures au laboratoire. Ainsi, seuls les résultats suivants sont retenus en complément des résultats acquis dans le cadre du projet, les autres relations historiques sont soit considérées comme fausses compte tenu des nouveaux résultats (par ex. le traçage de l'aven de Hures de 1971 ou le traçage de l'aven de la Fumade de 2013), soit écartées car insuffisamment documentées pour être conservées :

- **résurgences de la Jonte** : Tous les traçages réalisés dans le lit de la Jonte (perte de Capelan, réseau des Hérans, des Sourguettes), donnant lieu à des restitutions à tous les exutoires des Douzes, mais aussi à la source du Maynial depuis la perte des Douzes sont conservés. Un traçage a également été réalisé dans le cadre de l'étude hydrogéologique du Causse Noir (rapport non finalisé à la date de rédaction de ce rapport) confirmant ces résultats ;
- traçage de l'**aven Banicous** (1974, BSS002CGVK), coloration visible à la source de l'Ironselle, vitesse de 36 m/h en conditions d'étiage ;
- traçage de l'aven du Lavanhou n° 1 (1992, André (1992)), BSS004BMCY (XL3 692660, YL3 222130), coloration visible à Castelbouc n° 1 et aux Estivants ;
- traçage de l'**aven Cabanel** (2007, BSS002CGYW) par le PnRGC, restitution fiable à la source des Ardennes, absence de restitution aux sources de Castelbouc 1 et de Saint Chély ;
- traçage de la **perte du Pont de Marie** (1981, reporté par Bérard (1987)), située à proximité immédiate de la résurgence temporaire de la Rullette (BSS002BLCN), restitution à la source de Bissoudo (BSS002BLCT), également nommée exsurgence de Montbrun n° 1. La source de Bissoudo est associée au système karstique de Pélatan ;

- traçage de la **grotte-perte du Ron-de-Gotti** en amont du méandre de Chanongras dans le Tarn en 1974, cité par Bérard (1987), BSS004BMDB (XL93 741347, YL93 6361227), restitution aux résurgences de Tchamoungras (BSS002BLFT). La perte était totale en septembre 2017 (Sp. cond. =239 µS/cm et T=19,9 °C à la perte contre 262 µS/cm et 20,3 °C respectivement à la résurgence le 1er septembre 2017). Ces observations récentes montrent que l'eau à la résurgence conserve des caractéristiques de température et de conductivité liées à celles du Tarn, ce qui signifie que la recharge directe par infiltration des précipitations est négligeable devant les apports provenant de la perte du Tarn. Ce résultat est cohérent avec les informations spéléologiques sur l'organisation du drainage (André, 1992). Il s'agit de la seule perte du Tarn connue. La résurgence associée, contrairement au système des Douzes/Maynial dans la Jonte, ne sera pas considérée comme un exutoire karstique majeur du Causse Méjean.

5.3.4. Modélisation par un modèle d'advection/dispersion et caractérisation de la DTS

a) Solutions analytiques utilisées

Le suivi quantitatif de la restitution des traceurs permet de discuter des propriétés hydro-dispersives de chaque système traçage afin de comparer les caractéristiques de transfert.

Les conditions d'injection et de suivi aux exutoires permettent de considérer les courbes de restitution comme des réponses impulsionnelles (réponse à un Dirac de concentration) en exprimant la concentration du traceur en concentration de flux (Kreft et Zuber, 1978 ; Maloszewski et Zuber, 1982). La solution analytique C_{FF} (g/l) correspondante est donnée par Kreft et Zuber (1978), avec M (g) la masse de traceur restituée, Q (m^3/s) le débit supposé constant à l'exutoire, x (m) la distance parcourue, V (m/s) la vitesse moyenne de transit et D (m/s) la dispersion cinématique :

$$C_{FF} = \frac{M}{Q} \times \frac{x}{t\sqrt{4\pi Dt}} e^{\left[\frac{-(x-Vt)^2}{4Dt}\right]}$$

Équation 10

La Distribution des Temps de Séjour (DTS) associée est donnée par l'équation suivante :

$$h_{FF} = \frac{x}{t\sqrt{4\pi Dt}} e^{\left[\frac{-(x-Vt)^2}{4Dt}\right]}$$

Équation 11

Elle peut s'exprimer en fonction du nombre de Péclet macroscopique $Pe = {Vx}/{D}$, qui correspond à l'inverse du paramètre de dispersion :

$$h_{FF} = \frac{x}{t\sqrt{4\pi xVt/Pe}} e^{\left[\frac{-Pe(x-Vt)^2}{4xVt}\right]}$$

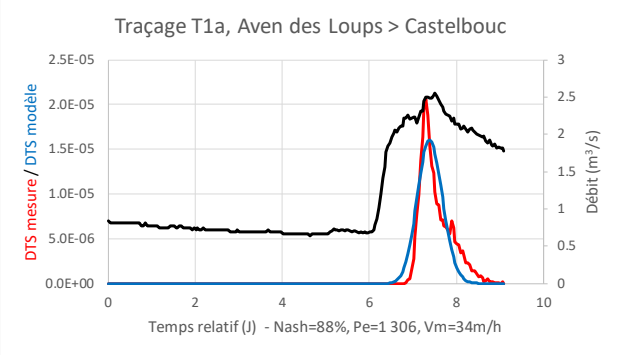
Équation 12

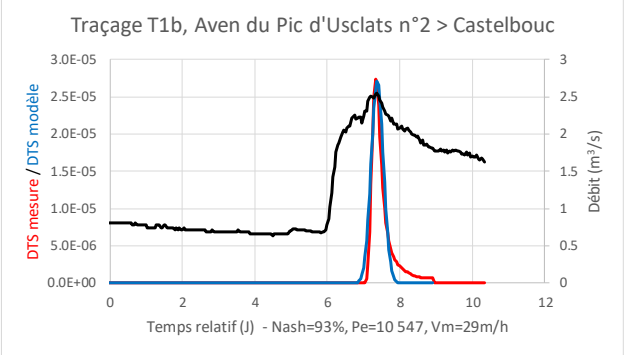
b) Méthode de calage et résultats

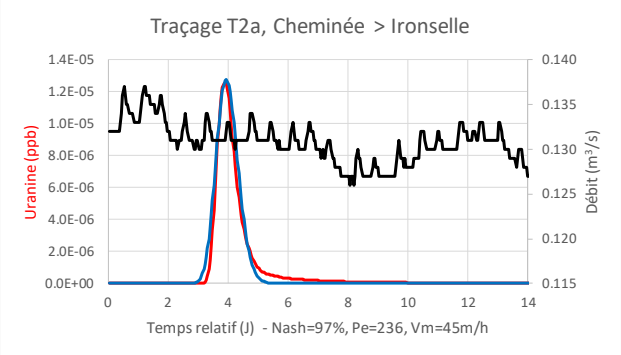
Le calage de la solution analytique est réalisé en ajustant automatiquement *Pe* et *V* à partir de l'Équation 12, en minimisant le critère de Nash-Sutcliffe. La distance *x* est fixée et égale à la distance la plus courte (ligne droite) entre le point d'injection et le point de restitution.

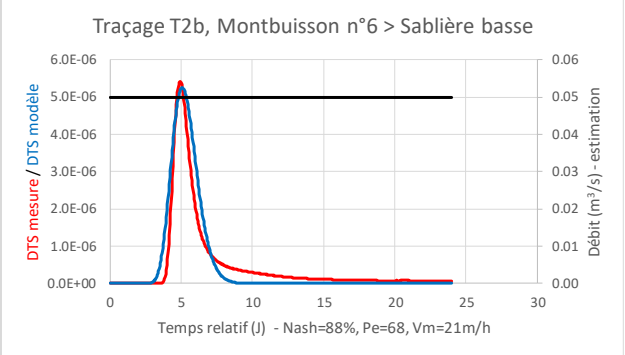
Ce modèle à deux paramètres est calé le plus souvent sur l'ensemble de la courbe de DTS, sauf pour les traçages T5, T11 et T16 où seule la première partie de la courbe est considérée pour ne pas tenir compte d'une remobilisation du traceur liée à l'évolution du débit. Dans ce cas, la fin de la période de calage est reportée par une flèche verticale sur la Figure 58. Enfin, seule la première restitution observée lors du T10 a été considérée.

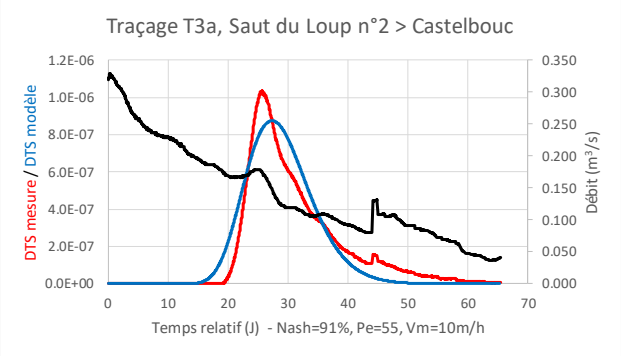
Cette méthode a pour objectif d'isoler la partie de la courbe peu ou non-influencée par une variation de débit, et ainsi obtenir un temps moyen de séjour plus représentatif des conditions hydrologiques lors de l'injection.

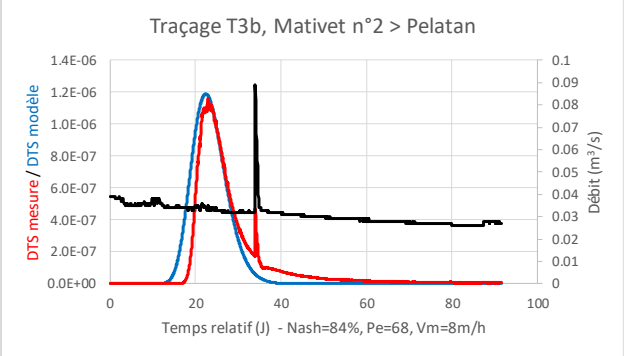

Traçage T1a, Aven des Loups > Castelbouc
DTS mesure / DTS modèle
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) - Nash=88%, Pe=1 306, Vm=34m/h

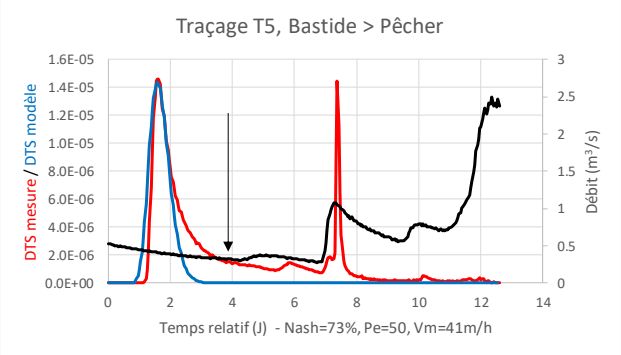

Traçage T1b, Aven du Pic d'Usclats n°2 > Castelbouc
DTS mesure / DTS modèle
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) - Nash=93%, Pe=10 547, Vm=29m/h

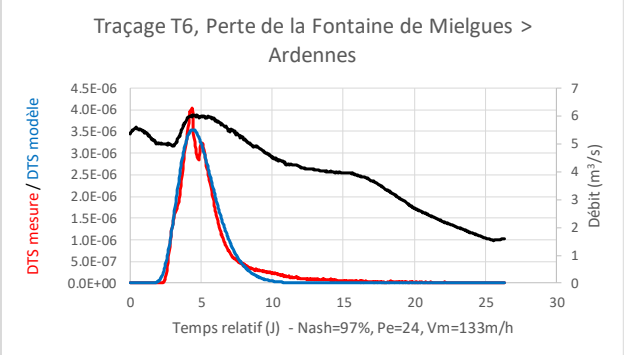

Traçage T2a, Cheminée > Ironselle
Uranine (ppb)
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) - Nash=97%, Pe=236, Vm=45m/h

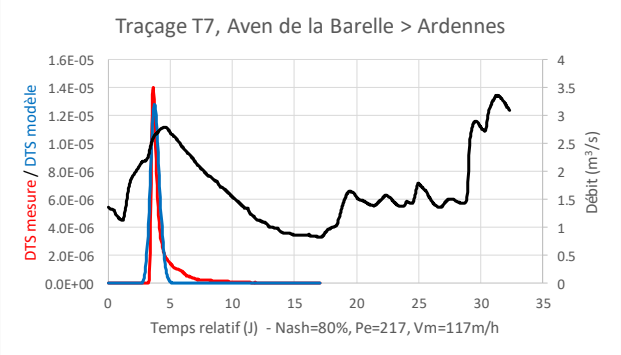

Traçage T2b, Montbuisson n°6 > Sablière basse
DTS mesure / DTS modèle
Débit (m³/s) - estimation
Temps relatif (J) - Nash=88%, Pe=68, Vm=21m/h


Traçage T3a, Saut du Loup n°2 > Castelbouc
DTS mesure / DTS modèle
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) - Nash=91%, Pe=55, Vm=10m/h


Traçage T3b, Mativet n°2 > Pelatan
DTS mesure / DTS modèle
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) - Nash=84%, Pe=68, Vm=8m/h


Traçage T5, Bastide > Pêcher
DTS mesure / DTS modèle
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) - Nash=73%, Pe=50, Vm=41m/h


Traçage T6, Perte de la Fontaine de Mielgues > Ardennes
DTS mesure / DTS modèle
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) - Nash=97%, Pe=24, Vm=133m/h


Traçage T7, Aven de la Barelle > Ardennes
DTS mesure / DTS modèle
Débit (m³/s)
Temps relatif (J) - Nash=80%, Pe=217, Vm=117m/h

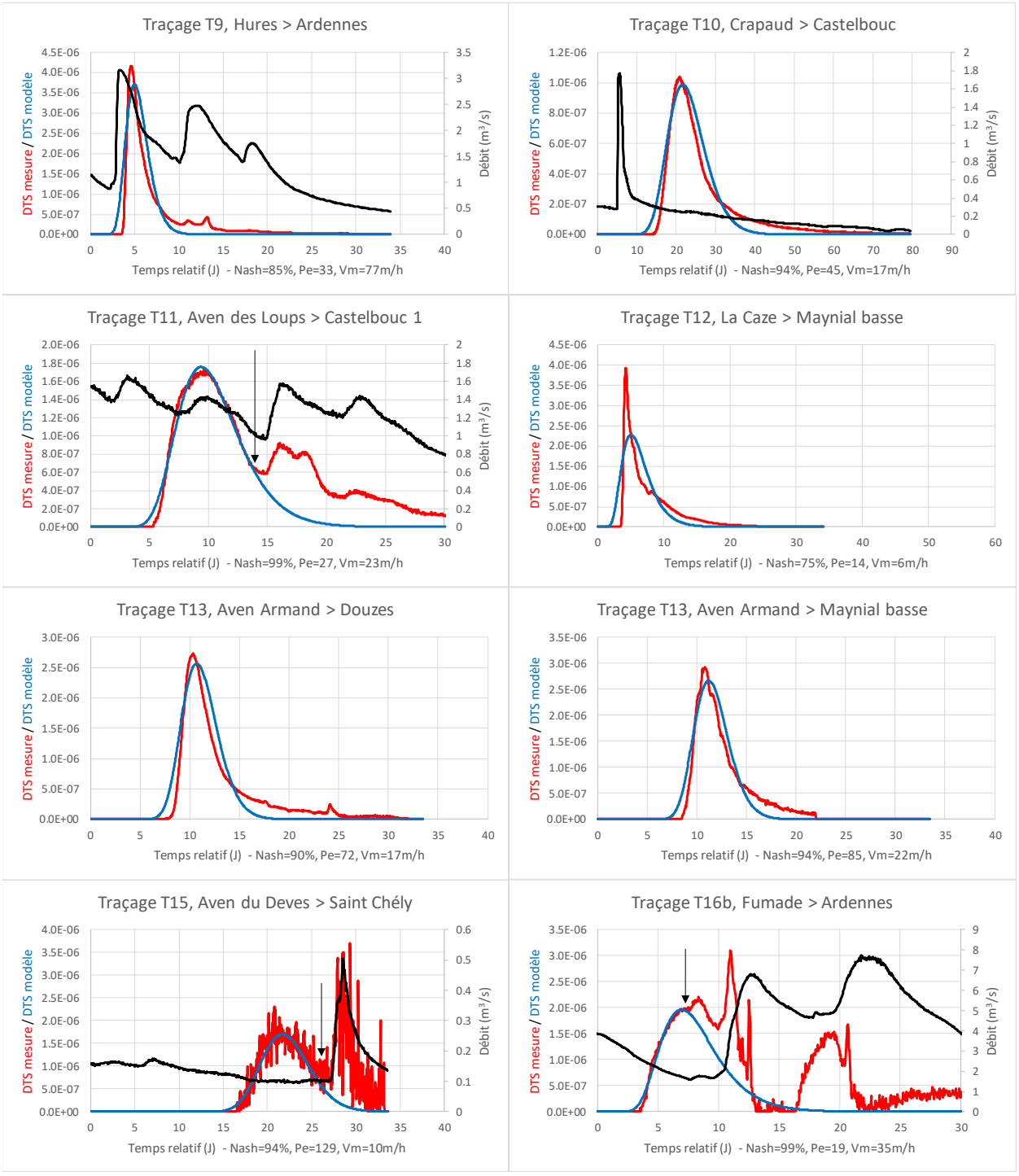


Figure 58 : Distribution des temps de séjour mesurées (rouge) et modélisées (bleu) comparées à l'évolution du débit pour chaque traçage. La flèche verticale identifie la fine de la période de calage pour les restitutions perturbées par l'évolution du débit.

Les résultats du calage et les caractéristiques des DTS modélisées sont reportés dans le Tableau 24, qui présente également le pourcentage du flux de traceur modélisé lorsque seule une partie de la DTS est isolée (T5, T10, T11, T15 et T16), la suite de la courbe étant manifestement influencée par une évolution du débit. Le temps moyen de séjour (t_{moy}) correspondant est également reporté, avec les caractéristiques du pic (mode) de la DTS (h_{mod} et t_{mod}).

	% modélisé	Nash	Pe	V (m/h)	t_{moy} (j)	h_{mod} ($10^{-6}.s^{-1}$)	t_{mod} (j)
T1a		88 %	1 306	34.4	7.5	20.6	7.3
T1b		93 %	10 547	28.8	12.5	27.3	12.3
T2a		97 %	236	45.0	4.6	12.6	3.9
T2b		88 %	68	20.9	7.1	5.4	4.9
T3a		91 %	55	10.4	31.2	1.0	25.7
T3b		84 %	68	7.6	29.1	1.2	23.0
T5	54 %	73 %	50	41.1	1.7	14.6	1.6
T6		97 %	24	133.1	5.7	4.0	4.4
T7		80 %	217	117.2	4.7	14.0	3.6
T9		85 %	33	76.7	7.4	4.2	4.6
T10	63 %	94 %	45	16.6	26.6	1.0	20.9
T11	56 %	99 %	27	23.3	10.4	1.7	9.6
T12		75 %	14	6.0	7.6	3.9	4.2
T13		90 %	72	16.8	12.9	2.7	10.3
T13		94 %	85	22.5	12.4	2.9	10.8
T15	62 %	94 %	129	10.4	22.1	1.7	21.6
T16b	46 %	99 %	19	35.2	8.1	2.0	7.5

Tableau 24 : Caractéristiques des DTS modélisées pour chaque traçage.

c) Interprétation

L'objectif de cette modélisation 1D n'est pas de reproduire parfaitement chaque courbe, mais d'obtenir un nombre minimal de paramètres (2, à savoir Pe et V) pour décrire et discuter les formes de DTS obtenues sur le Causse Méjean pour les différents systèmes karstiques.

Les nombres de Péclet (*Pe*) obtenus sont le plus souvent inférieurs à 100, mais présentent dans certains cas des valeurs très élevées (>1 000). Ces valeurs aberrantes traduisent le fait que le traceur a séjourné dans l'aquifère en se déplaçant faiblement avec peu de dispersion, avant d'avoir été évacué très rapidement lors d'une crue. Il y a donc une incohérence entre le très faible étalement du signal et le temps de séjour du traceur élevé, ce qui ne peut être reproduit qu'avec une valeur anormalement élevée du nombre de Péclet. En dehors de ces valeurs aberrantes, les nombres de Péclet obtenus restent relativement faibles et typiques des systèmes traçages karstiques, traduisant l'effet d'échelle linéaire observé sur la dispersivité macroscopique (Bailly-Comte et Pistre, 2011).

- Les vitesses moyennes de transit (V, Tableau 24) varient entre 7.6 m/h (T3a) et 133 m/h (T6). Les traçages qui présentent de très faibles vitesses d'écoulements (T10, T3a et T3b) présentent des valeurs de Pe cohérentes avec les autres résultats, ce qui signifie que ce sont avant tout les conditions hydrologiques, et donc les très faibles débits, qui expliquent ces faibles vitesses, et non une mauvaise qualité de drainage des systèmes tracés. En d'autres termes, le calage du modèle permet d'imaginer une réponse beaucoup plus rapide en hautes eaux. Par exemple, à Pélatan pour le T3b, le traceur a circulé à moins de 10 m/h pour un débit de l'ordre de 35 l/s. Pour le débit moyen de cet exutoire, soit 150 l/s, la vitesse serait théoriquement de 43 m/h. On retrouve alors une vitesse moyenne de transit cohérente avec les autres résultats obtenus. Ainsi, **les faibles vitesses de traceur observées ne permettent pas de conclure sur la qualité du drainage karstique ; elles ne sont que la conséquence des faibles débits dans le système tracé lors de l'essai.**

L'importance des phénomènes dispersifs décrits par le nombre de Péclet peut également être identifiée sur le diagramme reliant le pic de la DTS (h_{mod}, en s^{-1}) au temps d'arrivée de ce pic (t_{mod}). La Figure 59 positionne les différents résultats obtenus par rapport aux courbes théoriques décrites pour un nombre de Péclet de 40+/-20 (Bailly-Comte et Pistre, 2021). Sur cette figure, la position des traçages T1a, T1b et T7 est liée aux fortes variations de débits, et donc de vitesse qui perturbent le déplacement du traceur. La position du traçage T2a reste singulière, traduisant un nombre de Péclet élevé (Pe=236, cf. Tableau 24) et donc très peu de dispersion par rapport aux autres résultats, sans que l'on puisse évoquer une variation du débit lors de l'essai. Il faut ici également considérer qu'avec une injection à -400 m, ce traçage permet de limiter l'influence de la zone d'infiltration sur l'étalement du signal, ce qui n'est pas (ou moins) le cas pour les autres traçages. Néanmoins ce traçage, ainsi que le T2b, a été réalisé dans la partie ouest du Causse, plus dolomitique, qui présente un comportement hydrodynamique et physico-chimique beaucoup plus inertiel. Ainsi, le comportement hydrodynamique et physico-chimique très inertiel de l'Ironselle n'exclut pas des circulations très rapides dans des réseaux très bien organisés, tel que celui de la Cheminée. Ceci conforte les conclusions de l'étude de karstogenèse, qui caractérise ce secteur par un développement localisé et rapide de la karstification par évidement de zones fantômisées.

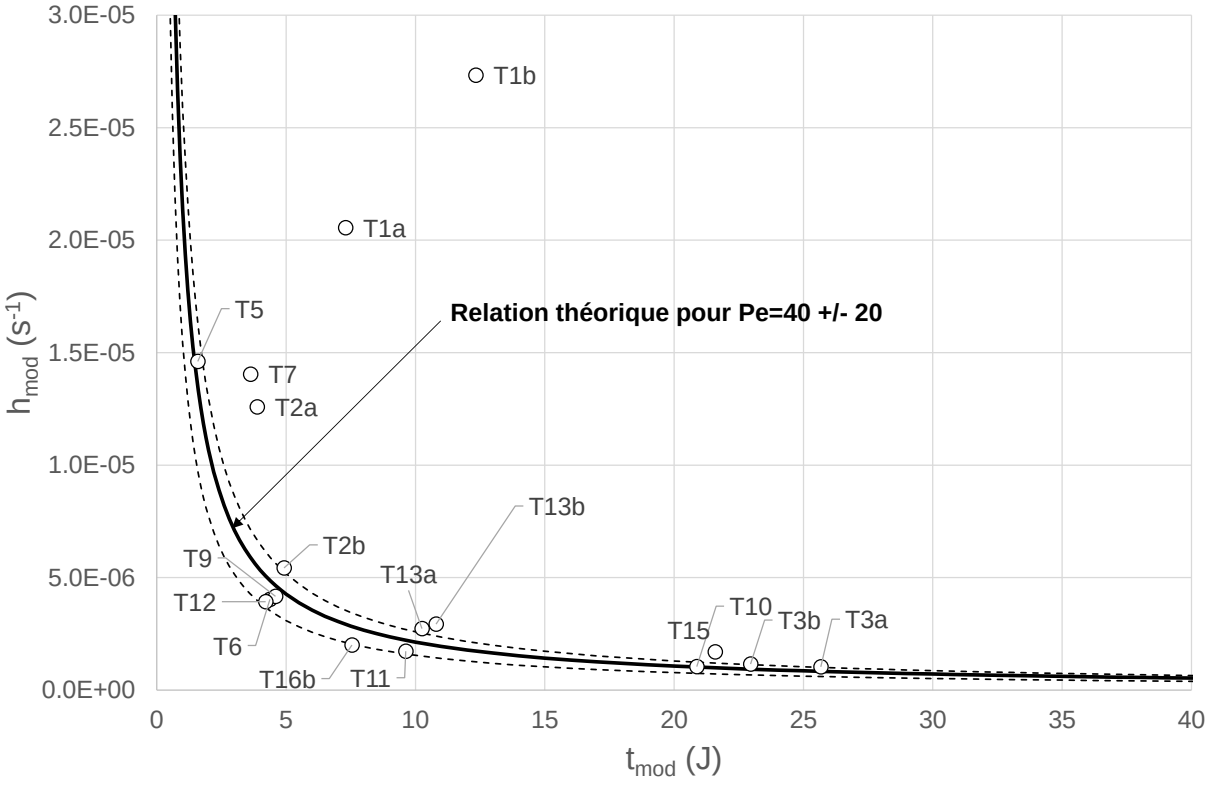


Figure 59 : Relations entre le pic (mode h_{mod}) de la DTS et le temps d'apparition du pic (t_{mod}) pour les différents traçages réalisés, comparées à l'évolution théorique pour Pe=40+/-20.

6. Synthèse des résultats pour la délimitation des bassins d'alimentation des sources du Causse Méjean et la définition des potentialités aquifères

6.1. DÉLIMITATION DES BASSINS D'ALIMENTATION

6.1.1. Méthode

La délimitation des bassins d'alimentation des sources étudiées s'appuie sur différents types d'informations issues :

- des résultats des traçages artificiels ;
- des analyses géochimiques (traçage naturel) ;
- de l'analyse structurale des réservoirs aquifères et de la mise en place de la karstification, en exploitant les résultats donnés dans l'étude géologique (rapport RP-68189-FR) ;
- d'une étude hydrodynamique théorique de la zone noyée permettant de calculer une ligne de crête piézométrique ;
- des contours géologiques au 1/50 000 ;
- du calcul des lignes de crêtes topographiques.

Les informations apportées par chaque type d'analyse sont détaillées ci-dessous. Les contours des bassins d'alimentation proposés permettent de calculer des surfaces qui seront comparées aux surfaces équilibrant les bilans hydrologiques dans la section suivante.

a) Informations apportées par les traçages artificiels

Les relations mises en évidence par les traçages (traçages T6, T7, T9 et T16) permettent déjà de mettre en évidence l'importance du drainage sud-est – nord-ouest vers l'exutoire des Ardennes, qui traverse la faille de la Parade. Ce résultat majeur, notamment par le traçage de la perte de la Fontaine de Mielgues (T6), s'explique bien par le modèle d'évolution de la karstification héritée du fonctionnement en poljé de contact avec le massif cristallin des Cévennes.

On identifie également la réorganisation du drainage par capture vers le nord (traçages T1a, T1b, T3a, T10, T11, T15a), selon le processus d'érosion régressive des altérites contenues dans les couloirs de fantômisation décrit dans l'étude géologique (Husson *et al.*, rapport RP-68189-FR). Ce processus est contrôlé par le creusement de la vallée du Tarn.

Sur la bordure est, le traçage T5 permet de confirmer qu'il existe une relation hydraulique entre les systèmes aquifères du Jurassique moyen et du Lias à travers les marnes de l'Aalénien et du Lias. La traversée du Lias marneux est également mise en évidence sur la bordure sud-est par le traçage T17. Plusieurs explications ont pu être avancées pour expliquer ce résultat, qui seront reprises dans la section suivante relative aux limites structurales.

Au sud, le drainage vers la Jonte apparaît limité compte tenu du résultat du traçage T7 (aven de la Barelle), mais le bassin d'alimentation du système des Douzes/Maynial s'étend tout de même jusqu'à l'aven Armand (traçage T13) et inclut le bassin d'alimentation du ravin perché des Bastides (traçage T12).

À l'ouest, on observe un compartiment qui présente un drainage karstique nord-est – sud-ouest, en lien avec le changement de direction du Tarn vers le sud en amont du Pas-de-Soucy. Il s'agit d'un compartiment au comportement hydraulique particulier, très inertiel, en lien avec la présence d'altérites dans les couloirs fantômisés. La karstification permet localement de dégager de grands couloirs qui organisent l'écoulement jusqu'à l'exutoire dans la vallée du Tarn, comme dans le cas du réseau de la Cheminée (traçage T2a, Figure 49 p.92).

b) Informations apportées par le traçage naturel

Les outils géochimiques et isotopiques, et notamment l'analyse isotopique du Sr permettent d'exclure toute alimentation du système karstique du Pêcher par la Jonte ou tout autre type d'eau en interaction avec le socle. À l'exception du système des Douzes/Maynial, les systèmes karstiques étudiés sont tous rechargés par infiltration à la surface du Causse Méjean.

Les signatures géochimiques permettent également d'associer la source des Estivants au système karstique de Castelbouc. Les résurgences des Douzes et du Maynial, ainsi que l'eau prélevée au forage profond des Douzes présentent une signature géochimique influencée par les eaux de la Jonte, qui alimente ce système à hauteur de 60 % en complément de la recharge sur le Causse Méjean et le Causse Noir.

c) Limites structurales

L'utilisation de limites structurales pour délimiter les bassins d'alimentation (en surface) ou mieux comprendre l'extension des zones noyées (en profondeur) des différents systèmes karstiques s'appuie sur une description de la structure issue du rapport RP-68189-FR, dont une figure synthétique est reportée ci-dessous :

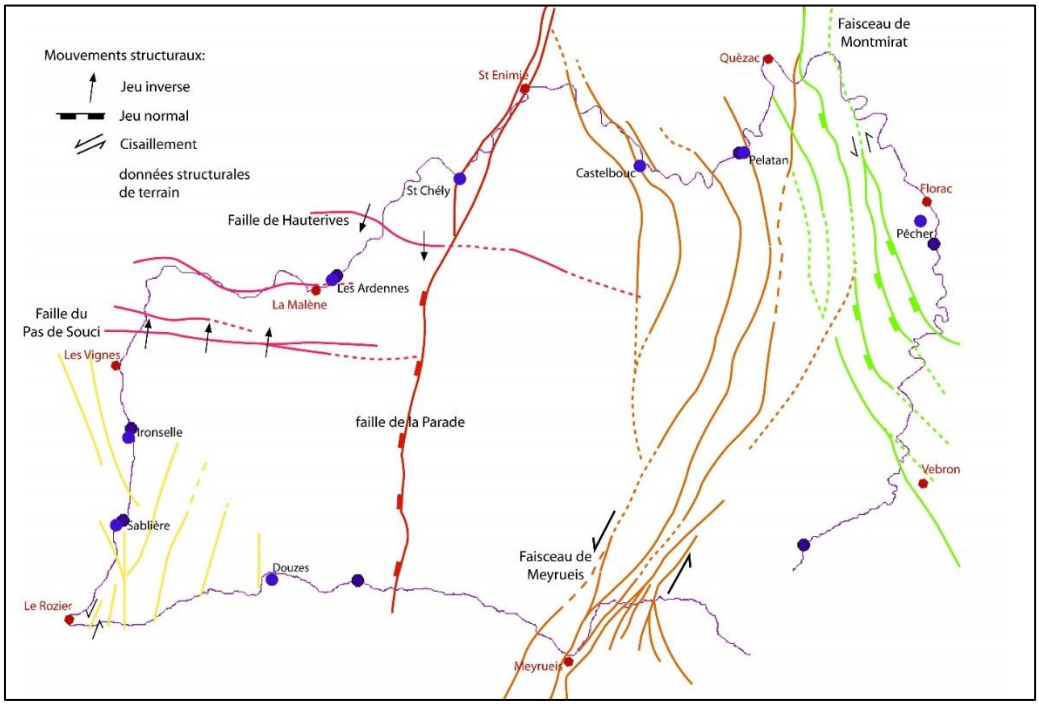


Figure 60 : Schéma structural du Causse Méjean. Cinq groupes structuraux se distinguent : la faille de la Parade (rouge), les failles majeures est-ouest (rose), le faisceau de Meyrueis (orange), le faisceau de Montmirat (vert), et des failles annexes du faisceau du Rozier (jaune). Les directions de mouvements ainsi que certaines structures importantes sont également représentées.

Les résultats des traçages montrent que les accidents majeurs orientés sud-nord comme la faille de la Parade ne constituent ni des obstacles aux écoulements, ni des drains majeurs pour les eaux karstiques. De manière générale et notamment dans la partie centrale, les décalages verticaux produits par ces failles n'ont pas de rôle hydrogéologique majeur compte tenu de l'épaisseur totale et relativement continue des formations karstifiées.

Seuls les niveaux marneux du Jurassique supérieur peuvent jouer un rôle sur la répartition des écoulements dans la zone d'infiltration, sauf sur la partie est de la zone d'étude où il faut également tenir compte des niveaux marneux du Lias. Ce sont donc les déplacements et les déformations de ces niveaux via le jeu vertical des accidents ou au cœur des structures anticlinales qui peuvent orienter l'infiltration des eaux avant d'atteindre la zone noyée dans le Jurassique moyen, ou dans le Lias pour la partie est. Dans la zone noyée, la répartition des écoulements est contrôlée par la géométrie du réservoir qui présente des approfondissements (points bas, cf. rapport RP-68189-FR) qui déterminent la position des sources lorsque ces points bas rencontrent le niveau de base.

Des structures anticlinales ont été repérées lors de l'étude géologique, l'une orienté ouest/nord-ouest – est/sud-est à proximité de la Jonte, et l'autre orienté nord/nord-ouest – sud/sud-est à l'ouest de la Malène et de Hures la Parade (cf. étude géologique, Husson *et al.*, rapport RP-68189-FR). Les limites structurales associées à ces plissements sont reportées sur la Figure 61. L'axe anticlinal identifié lors de l'étude de la karstogenèse, longeant la rive droite de la Jonte ne semble pas jouer un rôle important, du moins à l'ouest de la faille de la Parade compte tenu du résultat obtenu pour le traçage de l'aven Armand (T13), mais il peut expliquer le résultat obtenu depuis l'aven de la Barelle (T7), malgré la proximité de la Jonte.

Pour le système de l'Ironselle, la limite avec le système des Ardennes pourrait s'expliquer par le jeu des failles normales est-ouest du Pas-de-Soucy et de Hauterives, qui abaissent tout le compartiment nord en délimitant un graben compris entre le cirque de Pougnadoires et la Malène (cf. étude géologique, Husson *et al.*, rapport RP-68189-FR). Le devenir des eaux infiltrées dans ce graben n'est pas bien compris. Le volcanisme des Vignes, attribué au Jurassique moyen, pourrait également avoir une incidence sur la répartition des écoulements. Au centre de ce graben le traçage de l'aven de la Sompe, réalisé à trois reprises, n'a jamais permis d'identifier un exutoire. Ce graben pourrait ainsi être drainé par l'une des nombreuses sources présentes dans le lit du Tarn dans le secteur du Pas-de-Soucy. L'extrémité est de ce graben, et plus précisément le secteur de la plaine de Carnac pourrait constituer, dans la zone noyée, un point de connexion avec le compartiment situé à l'est de la faille de la Parade. Il s'agit donc du point de convergence de l'ensemble des eaux infiltrées sur la partie sud et sud-est du Causse vers la source des Ardennes.

Dans la vallée du Tarnon, le niveau de base est cette fois défini par le toit du socle, avec des débordements possibles au niveau de systèmes karstiques perchés contrôlés par la position des marnes de l'Aalénien/Toarcien. En effet, ce niveau marneux bien identifié à l'affleurement ne constitue pas une limite de débordement, notamment pour le système du Pêcher, qui le traverse pour atteindre le réservoir liasique, comme l'atteste le résultat du traçage T5. Pourtant, les observations de terrain ainsi que la forme du profil de la vallée du Tarnon mettent bien en évidence l'existence d'un horizon marneux dans le paysage, d'environ 40 m d'épaisseur au droit de la source du Pêcher. Cette épaisseur est de l'ordre de grandeur des mouvements verticaux observés sur certaines failles du faisceau de Montmirat. Dans le secteur du col de la Pierre Plate, soit à proximité immédiate de Florac, est identifiée une faille sur la carte géologique au 1/50 000 qui abaisse le compartiment ouest de plus de 80 m, pouvant donc mettre en contact le Jurassique moyen du compartiment ouest avec l'Hettangien du compartiment est.

Ainsi, sans que cet accident puisse être parfaitement identifié, il est possible d'imaginer une continuité hydraulique dans la zone d'infiltration entre les formations karstifiées du Jurassique moyen et du Lias à la faveur du jeu d'une ou de plusieurs failles du faisceau de Montmirat. Un raisonnement identique peut-être proposé vers le sud-ouest avec le faisceau de failles de Meyrueis. Ces faisceaux de failles constituent dès lors la limite ouest d'extension du bassin d'alimentation du Pêcher. Les eaux infiltrées à l'est de ces faisceaux de failles rejoignent le réservoir hettangien, tandis que plus à l'ouest l'épaississement des marnes et l'absence d'accidents permettent aux eaux infiltrées de circuler au toit de l'Aalénien qui redirige les écoulements vers le nord-ouest. Un modèle géologique 3D représentant les horizons marneux du Jurassique supérieur et du Lias permettrait de vérifier ces hypothèses et de mieux comprendre l'extension des zones noyées des différents réservoirs aquifères en trois dimensions.

Dans l'état actuel des connaissances, cette limite de partage des eaux entre le système du Pêcher et les autres systèmes karstiques du Causse Méjean (Moulin de Pélatan, Castelbouc, Ardennes) s'effectue donc dans la zone d'infiltration, comme le suggéraient déjà C. et C. Thomas (1981). Ces auteurs supposaient que la zone noyée de ce système s'étendait sous le Causse Méjean en devenant captive. Une extension sous les marnes liasiques du réservoir hettangien est en effet théoriquement possible vers l'ouest en suivant le pendage des couches, mais l'absence de paléo-exutoire, et donc de gradient hydraulique vers l'ouest pour le réservoir hettangien au cours de toute son histoire géologique ne permet pas de proposer un développement de la karstification à ce niveau. Par ailleurs, s'il existait une contribution de flux profonds, ceux-ci auraient été identifiés par des anomalies de température aux exutoires, notamment en basses eaux. De plus, la source du Pêcher ne présente aucune fluctuation de débit liée aux marées terrestres, ni de caractéristiques géochimiques caractéristiques d'une contribution plus profonde en condition d'étiage, ce qui confirme l'absence de contribution d'une nappe captive plus profonde à cet exutoire, qui constitue le principal regard sur le fonctionnement du réservoir hettangien. Les sources karstiques positionnées à proximité d'accidents majeurs, telles que la source des Ardennes le long d'un axe majeur est-ouest passant à la Malène, ou les sources de Saint-Chély et du Moulin de Cénarette positionnées sur des accidents sud-nord associés à la faille de la Parade ne permettent pas non plus d'identifier de contribution d'un réservoir profond. Enfin, aucun indice de karstification hypogène n'a été observé dans le réservoir hettangien, si ce n'est très localement au niveau de Quézac en lien avec des remontées carbo-gazeuses. L'hypothèse d'un réservoir aquifère karstique de développant vers l'ouest sous le Causse Méjean dans l'aquifère du Lias inférieur n'est donc pas retenue.

Sur la bordure est, le contact avec le socle définit donc la position des exutoires, au niveau d'un point bas de la topographie du toit du socle bien identifié pour le Pêcher (cf. Husson *et al.*, rapport RP-68189-FR), comme pour de nombreux exutoires secondaires drainant le Lias sur la bordure est du Causse, les principaux étant la source du Viala (BSS002BLGB), la source de Vernagues (BSS002CHCM), la source de Labrède (BSS002CHCH) et la source des Clauzels (BSS002CHCG, cf. traçage T17) en remontant la vallée du Tarnon. Cette hypothèse permet d'imaginer également une extension du bassin vers le nord en incluant l'ensemble des compartiments délimités par les failles, en limite avec le système de Pélatan. Des données complémentaires permettant d'alimenter un modèle géologique 3D de ces blocs permettraient là encore de mieux comprendre la compartimentation hydrogéologique contrôlée par les déplacements des horizons marneux et leur amincissement vers l'est. En l'état actuel des connaissances, la limite du bassin d'alimentation du Pêcher exploite les failles présentant le plus fort jeu vertical à l'ouest du faisceau de Monmirat, avec un prolongement exploitant les failles du faisceau de Meyrueis (cf. Figure 61). Elle passe notamment entre le Mont Cargo et le Pic d'Usclats.

d) Limites hydrodynamiques

En complément des informations apportées par la structure des réservoirs aquifères, une analyse des limites hydrodynamiques théoriques a été menée pour tenter de mieux comprendre la répartition des eaux souterraines dans la zone noyée entre tous les exutoires drainant le Causse Méjean.

Les systèmes karstiques développés dans des formations calcaires et dolomitiques présentent en situation de basses eaux très peu de gradient hydraulique, de l'ordre de 1 ‰. Cette valeur peut ainsi être utilisée en première approximation pour calculer de proche en proche des lignes de crêtes théoriques de la piézométrie entre différents exutoires :

- si une telle ligne de crête existe, alors la limite de partage des eaux entre les deux systèmes peut être expliquée par un équilibre hydrodynamique compte tenu de la différence d'altitude des exutoires et de leur distance respective ;
- si cette ligne de crête ne peut être calculée, alors l'un des exutoires ne devrait pas exister, ce qui signifie qu'il existe nécessairement une limite structurale au sein du réservoir qui permet de répartir les eaux entre les deux systèmes.

Ce calcul de ligne de crête piézométrique théorique entre les principaux exutoires du Causse Méjean a été réalisé en prenant en compte les positions et altitudes renseignées en BSS pour chaque exutoire principal. L'altitude de l'exutoire le plus bas du système des Douzes, soit la source basse du Maynial (BSS002CGYJ, 474 mNGF) a été prise en compte.

Le calcul a été réalisé sous QGIS 3.10. Il consiste à calculer pour chaque exutoire la distance qui sépare tout point du Causse de cet exutoire, puis d'y appliquer une pente théorique de 1 ‰ pour calculer l'altitude théorique de la zone noyée en supposant que tout le Causse soit drainé par l'exutoire considéré. Ce calcul est réalisé pour chaque exutoire, et l'ensemble des rasters calculés est combiné en un seul raster qui ne retient que la valeur d'altitude de la zone noyée la plus faible. Un calcul de ligne de crête est ensuite réalisé sur ce raster pour identifier des lignes de partage des eaux théoriques entre les différents exutoires. Les résultats permettent de définir trois lignes de crêtes piézométriques potentielles entre :

- les systèmes karstiques des Douzes/Maynial et des Ardennes, soit une limite potentielle entre les gorges du Tarn et de la Jonte ;
- les systèmes karstiques de Saint-Chély/Cénarette et de Castelbouc ;
- les systèmes karstiques de Castelbouc et de Pélatan.

Ces limites sont reportées sur la Figure 61. L'absence de lignes de crêtes piézométriques séparant les systèmes karstiques de l'Ironselle de celui des Ardennes et les systèmes de Pélatan de celui du Pêcher confirme l'existence d'une limite structurale délimitant ces bassins. Comme vu précédemment, ces limites sont probablement liées à la présence du système de failles du Pas-de-Soucy et de Hauterives d'une part, et des faisceaux de Montmirat et de Meyrueis d'autre part.

e) Contours géologiques

Les contours géologiques des cartes géologiques au 1/50 000 ont été utilisés pour tracer les limites des bassins : en l'absence de toute autre information telle qu'une limite structurale ou hydrodynamique discutée ci-dessus, l'ensemble d'une formation à l'affleurement est attribué à un bassin unique.

f) Limites topographiques

Un calcul de sous-bassins topographiques a été réalisé sous QGIS à partir du MNT 25m de l'IGN pour proposer un tracé qui permette de bien délimiter les versants des zones endoréiques (zone de dépression sur la carte). Ces secteurs endoréiques définissent des unités de drainage en surface qui sont associées à un système karstique unique. Les lignes de crêtes topographiques sont également calculées pour délimiter le bassin versant des pertes de la Jonte.

6.1.2. Résultats

La combinaison de l'ensemble des sources d'information définies ci-dessus permet de proposer les tracés des bassins d'alimentation des principales sources drainant le Causse Méjean sur la Figure 61. Les surfaces drainées par ces systèmes karstiques sont directement reportées sur la carte. L'utilisation des contours géologiques ou du résultat des calculs des lignes de crêtes topographiques explique que les contours des bassins d'alimentation présentent localement une grande résolution spatiale. Il a été décidé de conserver cette résolution pour mieux identifier l'origine de l'information utilisée par comparaison avec les courbes de niveaux ou les contours géologiques, bien que ce degré de précision soit illusoire.

Ces limites de bassins s'organisent probablement au niveau de la zone d'infiltration au toit de l'Aalénien marneux dans la zone amont des systèmes qui se rapprochent de la bordure est du Causse.

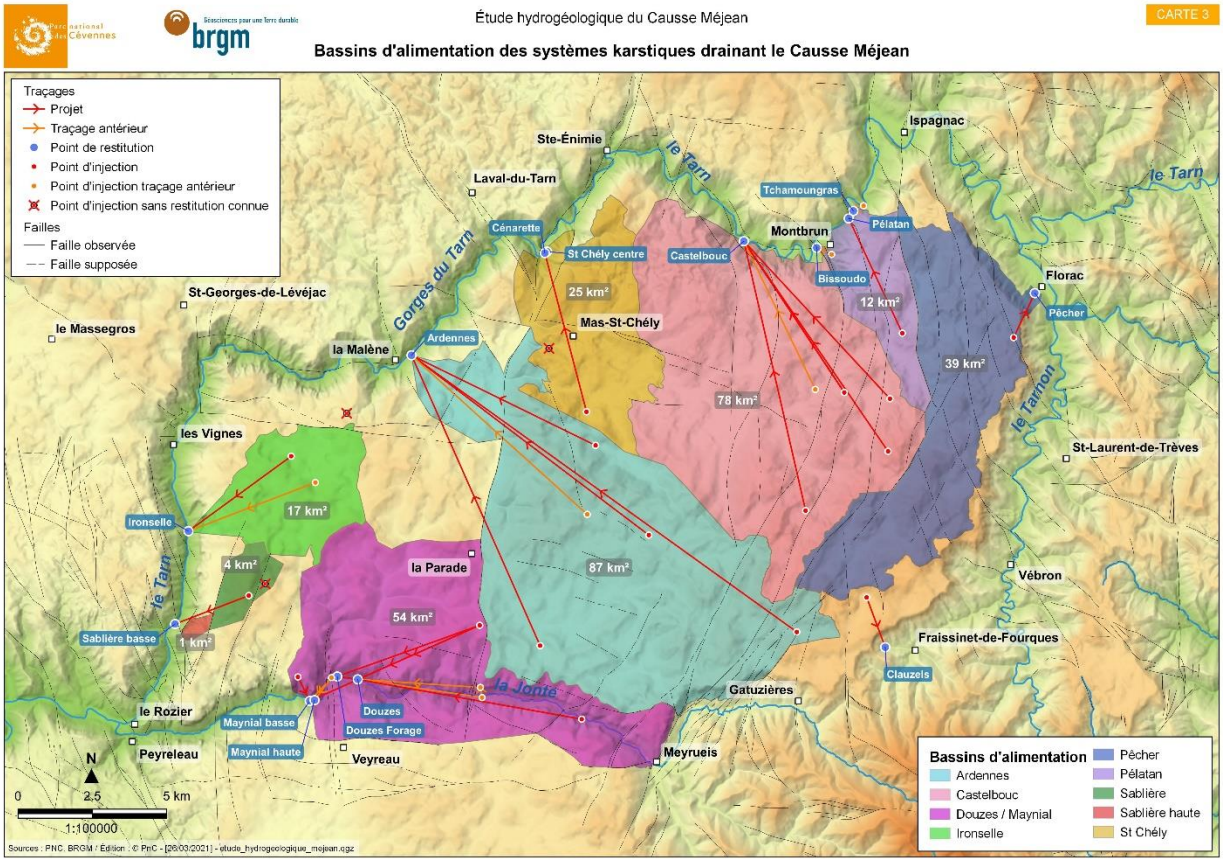


Figure 61 : Carte des bassins d'alimentation des systèmes karstiques drainant le Causse Méjean – coordonnées en Lambert 93.

Les limites hydrodynamiques proposées de part et d'autre du système de Castelbouc ont été exploitées pour tracer les limites de ce système avec celui du Moulin de Pélatan et de Saint-Chély/Cénarette. Pour le système des Douzes/Maynial, l'axe du pli anticlinal qui affecte les formations marneuses du Jurassique supérieur à l'est de la faille de la Parade a également été utilisé, compte tenu du résultat du traçage de l'aven de la Barelle, tandis qu'à l'ouest de la faille de la Parade tout le bassin versant du ravin des Bastides a été intégré au système des Douzes/Maynial. Cette limite au nord reste relativement proche de la limite théorique calculée pour un gradient hydraulique de 1 ‰ avec le Tarn. La dynamique actuelle d'enfoncement de la Jonte a donc probablement comme conséquence de prolonger vers le nord la limite de partage des eaux entre le Tarn et la Jonte. Le rôle des formations imperméables de l'Oxfordien, qui expliquent la position perchée de ce vallon fluvio-karstique a probablement également un rôle sur l'organisation des écoulements et la limite nord du système. Ce système draine également le nord-est du Causse Noir, ainsi que les écoulements issus du ruissellement sur tout le bassin versant de la Jonte en amont de Meyrueis par le biais des pertes de la Jonte.

L'axe anticlinal qui passe à l'ouest de la source des Ardennes n'a pas été retenu pour guider la délimitation des bassins. Le devenir des eaux infiltrées dans ce secteur reste incertain et n'a pas été attribué. Au nord-ouest, les eaux infiltrées dans le graben délimité par les failles de Hauterives et du Pas-de-Soucy sont supposées rejoindre un ou plusieurs exutoires dans le Tarn à proximité du Pas-de-Soucy.

6.2. COMPARAISON AVEC LES SURFACES CALCULÉES PAR BILAN

L'étude hydrodynamique a permis d'estimer les surfaces drainées par chaque système à la surface du Causse Méjean ou du Causse Noir pour le système des Douzes/Maynial. Pour ce système, la surface « Karst Jonte » calculée par bilan est utilisée. Cette dernière est calculée en considérant l'ensemble des apports karstiques dans la Jonte, et devrait donc être supérieure à celle cartographiée pour le système des Douzes/Maynial. La Figure 62 permet de comparer les surfaces obtenues selon ces deux approches.

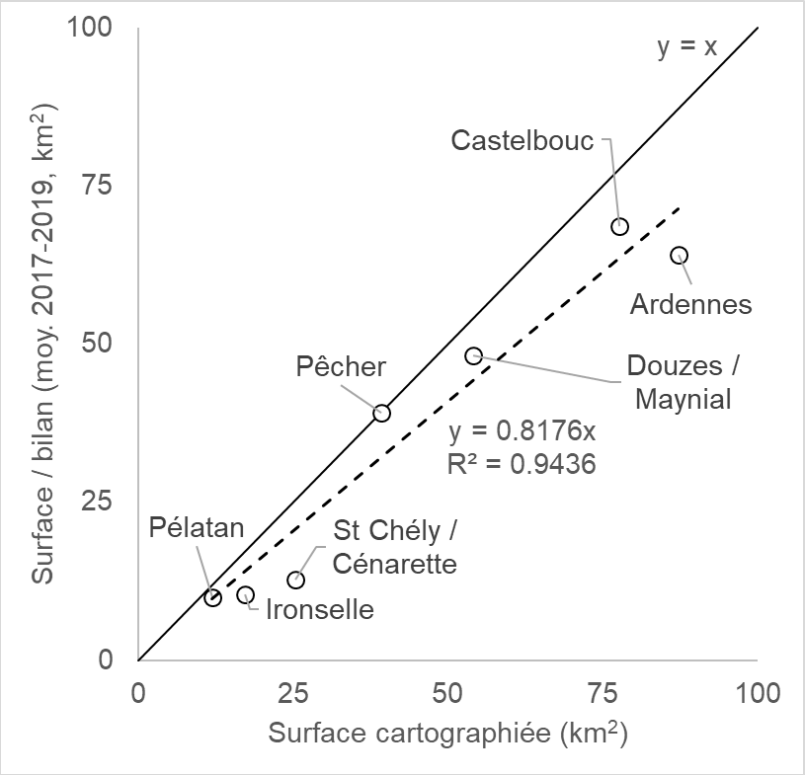


Figure 62 : Comparaison des surfaces des bassins d'alimentation estimées par bilan hydrologique aux surfaces cartographiées.

On observe une bonne relation linéaire entre les surfaces obtenues par ces deux approches (R^2=0.94). À l'exception du système du Pêcher, l'ensemble des systèmes étudiés ont un bassin d'alimentation calculé par bilan qui présente une superficie relativement faible, avec un déficit de l'ordre de 20 % par rapport aux surfaces cartographiées sur la Figure 61. Cette différence est importante et peut s'expliquer par la combinaison de plusieurs facteurs jouant sur l'estimation des flux entrants ou sortants des termes du bilan :

- une sous-estimation générale des débits des exutoires et/ou la méconnaissance des flux secondaires (sorties diffuses dans le Tarn, exutoires de trop-plein), à corréler avec le peu de contraintes des courbes de tarage lors des extrapolations des débits (cf. système de Saint-Chély/Cénarette en particulier, Figure 10 p., 23) ;
- une sous-estimation des pertes évapotranspiratoires et de l'interception (couvert forestier) ;
- la non-prise en compte de la reprise évaporatoire des eaux qui transitent par les aquifères perchés avant de se ré-infiltrer à la surface du Causse (cf. 3.2.3.a) ;
- concernant le système du Pêcher, la Figure 62 permet également de conclure que la surface délimité sur la Figure 61 pour son bassin d'alimentation est tout à fait compatible avec les débits observés.

6.3. CARTE DE SYNTHÈSE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS DU CAUSSE MÉJEAN

L'essentiel de la surface du Causse Méjean a pu être associé à l'un des systèmes karstiques étudiés. Il reste néanmoins 3 secteurs repérés par des « ? » sur la carte de la Figure 63 dont le devenir des eaux infiltrées n'a pas pu être déterminé, en plus du graben au nord-ouest du Causse Méjean qui est associé à un exutoire du Pas-de-Soucy, sans que celui-ci ait pu être identifié.

La forme des bassins, complétée par les informations issues de l'interprétation des traçages permet de schématiser l'organisation spatiale des principaux axes de drainage karstique. Ainsi, deux axes de drainage sont proposés pour le système du Pêcher, l'un drainant le nord-ouest du bassin et l'autre toute la bordure sud-est du Causse en direction de Nîmes-le-vieux, ce qui peut expliquer les deux réponses successives observées sur les paramètres physico-chimiques. La convergence des écoulements souterrains au niveau de la plaine de Carnac en amont de la source des Ardennes est également bien identifiée.

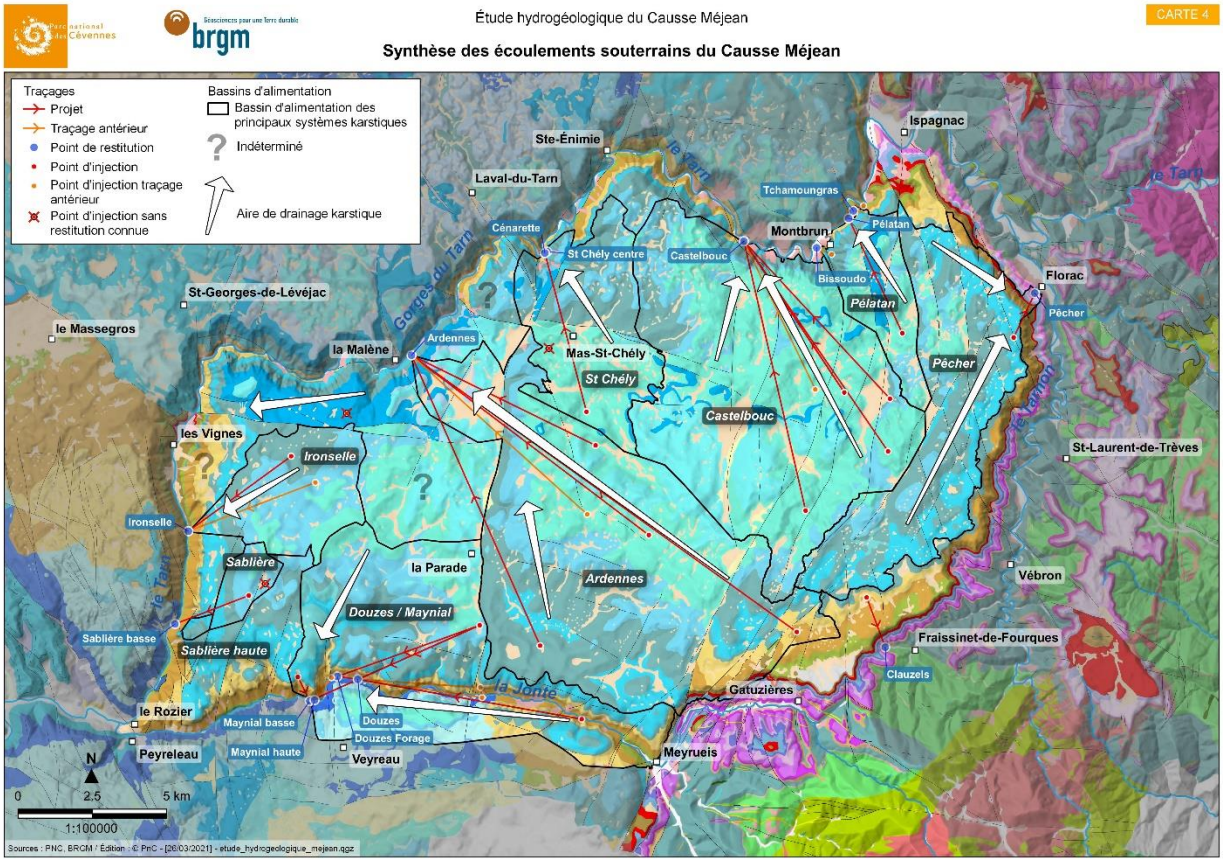


Figure 63 : Carte de synthèse des écoulements souterrains du Causse Méjean sur le fond géologique harmonisé au 1/50 000 du BRGM – coordonnées en Lambert 93.

6.4. POTENTIALITÉS AQUIFÈRES DU CAUSSE MÉJEAN

6.4.1. Méthode

La méthode proposée reprend celle mise en œuvre dans le rapport BRGM/RP-67528-FR relatif à l'étude hydrogéologique du plateau de Sault (Bailly-Comte *et al*., 2018). Sur la zone d'étude, la délimitation des bassins d'alimentation des principaux systèmes karstiques permet d'estimer l'altitude du toit de la nappe à l'échelle de chaque bassin d'alimentation. L'altitude de l'exutoire est retenue pour chaque bassin en négligeant l'effet du gradient hydraulique de l'ordre du ‰ pour un karst unaire bien drainé. Un calcul de différence avec la topographie permet alors d'estimer la profondeur de la zone noyée des principaux systèmes karstiques étudiés.

Ce calcul ne prend donc pas en compte le gradient hydraulique beaucoup plus fort (de l'ordre du pourcentage) le long de la vallée de la Jonte du fait des relations avec le cours d'eau. Ainsi, les profondeurs estimées pour la zone noyée dans la vallée de la Jonte seront d'autant plus surestimées que l'on se dirige vers l'amont.

Ce calcul ne prend pas non plus en compte les caractéristiques géométriques complexes du réservoir hettangien alimenté par l'aquifère du Jurassique moyen à supérieur et drainé par la source du Pêcher. Il n'est donc pas possible de proposer un résultat pour ce système sans réaliser une modélisation géologique permettant de bien reproduire l'extension latérale de la zone noyée dans ces différents compartiments. En effet, si la géométrie n'est pas bien connue, le réservoir hettangien se trouve dans tous les cas à des profondeurs bien trop importantes pour envisager une exploitation par forage de ce système karstique en amont de la source du Pêcher. Il peut néanmoins exister des structures permettant de piéger l'eau dans l'aquifère supérieur, compte tenu des déplacements relatifs des niveaux plus marneux du Jurassique supérieur recoupés et déplacés verticalement par les faisceaux de failles de Meyrueis et de Montmirat. Les connaissances actuelles ne permettent pas de localiser de petits aquifères perchés, mais cette hypothèse pourrait être étudiée si une modélisation géologique 3D de ces formations était disponible.

Sur les autres secteurs, ce calcul permet de proposer un ordre de grandeur des profondeurs à atteindre pour un éventuel captage de la ressource.

Quatre classes ont été distinguées pour décrire une ressource en eau très facilement accessible (<100 m), facilement accessible (100 à 150 m), peu accessible (150 à 300 m) et difficilement accessible (300 à 350 m). Les limites de ces classes et la limite à 350 m ont été fixées arbitrairement en cohérence avec un usage AEP de la ressource.

6.4.2. Résultat

La carte suivante (Figure 64) représente le résultat obtenu selon les quatre classes définies précédemment pour les principaux systèmes karstiques drainant le Causse Méjean. Les limites d'affleurement du Causse et des bassins d'alimentation des principaux systèmes karstiques y sont également reportées pour mieux localiser les différents secteurs.

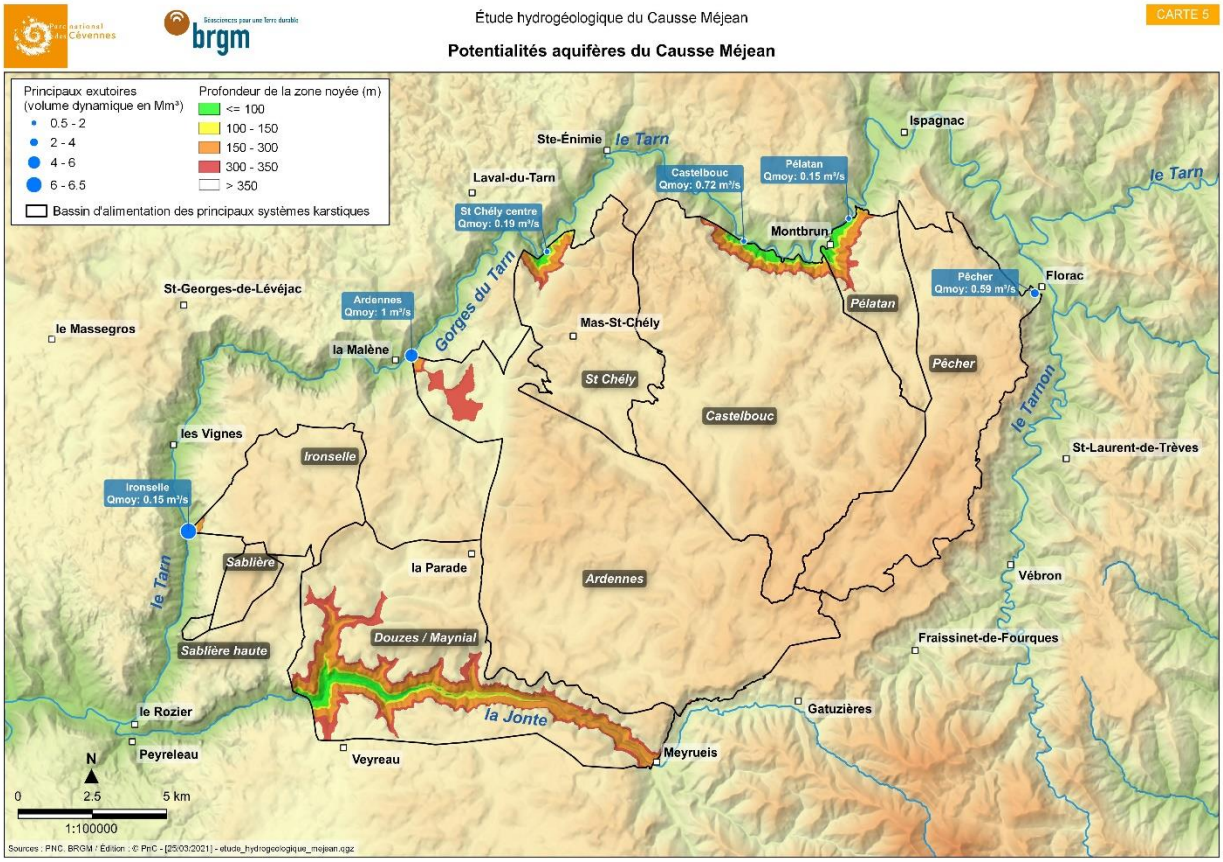


Figure 64 : Analyse cartographique des potentialités aquifères du Causse Méjean.

6.4.3. Interprétation et discussion

Les secteurs où la ressource en eau karstique reste accessible se localisent en bordure du Causse à proximité des exutoires. À la surface du Causse, seuls deux secteurs relativement bas du point de vue topographique permettent d'envisager une exploitation par forage de la ressource en eau :

- le système des Ardennes, qui se caractérise par des réserves (Vd = 6 Mm^3) et un débit moyen élevé (1 m^3/s) présente au niveau du vallon qui remonte vers Carnac et la plaine de Carnac un secteur favorable à la réalisation d'un forage de l'ordre de 300 m de profondeur ;
- le système des Douzes/Maynial présente un secteur favorable en remontant le vallon des Bastides, avec une profondeur de la ressource plus faible. Cette partie du système karstique ne draine que le Causse Méjean et n'est donc pas influencée par les eaux de la Jonte, contrairement au forage profond des Douzes.

  Ces profondeurs élevées sont cohérentes avec les observations des spéléologues qui n'ont jamais pu atteindre la zone noyée depuis la surface du Causse, y compris dans le réseau de la Cheminée à plus de 400 m de profondeur. Ce résultat met en évidence l'intérêt de capter directement les sources ou de se positionner à proximité de celles-ci, même si leur position ne permet pas d'alimenter facilement les habitants du Causse.

  La stratégie de captage des petits exutoires de l'aquifère perché, comme au hameau de la Volpilière, reste ainsi une alternative locale intéressante tant que les besoins restent limités.

7. Risque de pollution de la ressource en eau karstique

7.1. VULNÉRABILITÉ À LA POLLUTION

7.1.1. Présentation de la méthode PaPRIKa

La méthode PaPRIKa est décrite dans le rapport BRGM/RP-57527-FR, Dörfliger et Plagnes (2009). Cet acronyme signifie « Protection des aquifères karstiques basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification ». Il s'agit d'une méthode de cartographie multicritère à index avec système de pondération, dont les critères sont définis selon les caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques. Elle est utilisée dans le cadre de l'étude hydrogéologique du Causse Méjean pour cartographier la **vulnérabilité de la ressource en eau karstique** de l'ensemble des systèmes karstiques drainant le Causse Méjean, ce qui nécessite d'inclure la partie du Causse Noir qui contribue à l'alimentation du système des Douzes/Maynial, ainsi que le bassin versant amont de la Jonte.

Cette méthode est appliquée avec une résolution spatiale de 25 m (taille des mailles), en exploitant des données spatialisées principalement renseignées à l'échelle 1/50 000 (échelle de la carte géologique harmonisée du BRGM).

7.1.2. Cartographie des critères

a) Critère P

Le critère P est un critère qui qualifie **la protection vis-à-vis de l'infiltration**. Ce critère est issu du croisement spatial de quatre sous-critères définis ci-après.

- **Sous-critère ES - État de surface**

L'état de surface est calculé dans les bassins versants des pertes qui alimentent les systèmes karstiques. Il caractérise l'aptitude de ce bassin à générer un ruissellement. Ainsi, plus la formation est imperméable et plus ce critère aura une valeur élevée pour traduire la plus grande vulnérabilité d'un secteur drainé par une perte. Le bassin caractérisé par ce sous-critère peut être karstique ou non karstique.

À la surface du Causse et dans le bassin versant de la Jonte en amont de Meyrueis, la perméabilité des terrains a été déduite de la géologie à l'affleurement selon la jointure suivante :

- ES=4 : Marnes, formations de socle (schistes, granites, gneiss) ;
- ES=3 : Marno-calcaire et calcaires argileux ;
- ES=2 : Calcaires et dolomies, formations résiduelles (terre des Causses) ;
- ES=1 : Alluvions, graviers, éboulis.

Les pertes identifiées sur la zone d'étude sont en tout premier lieu les pertes dans le lit de la Jonte. Tout le lit a été considéré comme une zone de perte potentielle jusqu'aux exutoires du Maynial afin de tenir compte des pertes des Douzes situées entre les résurgences de Douzes et les sources du Maynial. Le bassin versant de cette zone de perte inclut le bassin versant de la Jonte en amont de Meyrueis, les versants des Causses Noirs et Méjean dans la vallée de la Jonte et le ravin des Bastides. Ce ravin présente également des pertes temporaires, notamment à proximité du lieu-dit « le Matas ».

Les autres pertes considérées sont situées en bordure du Causse Méjean :

- en amont immédiat de la source du Pêcher, sur le versant au contact avec les marnes de l'Aalénien selon l'interprétation du signal de turbidité qui précède les crues (cf. 4.4.1.b) ;
- en amont de la source temporaire de Bissoudo, associée au système du Moulin de Pélatan au niveau de la perte du Pont de Marie (cf. 5.3.3).

Les cours d'eau situés en amont de ces pertes sont également pris en compte avec un indice de 4 (vulnérabilité très forte) pour les pertes de la Jonte, et 3 (vulnérabilité forte) pour la perte du Pont de Marie et les thalwegs le long des versants sur la bordure des Causses, ainsi qu'une zone tampon de 50 m de part et d'autre du lit du cours d'eau. Le tracé de ces cours d'eau est issu de la BD Topo® de l'IGN.

Le résultat obtenu est reporté sur la Figure 65.

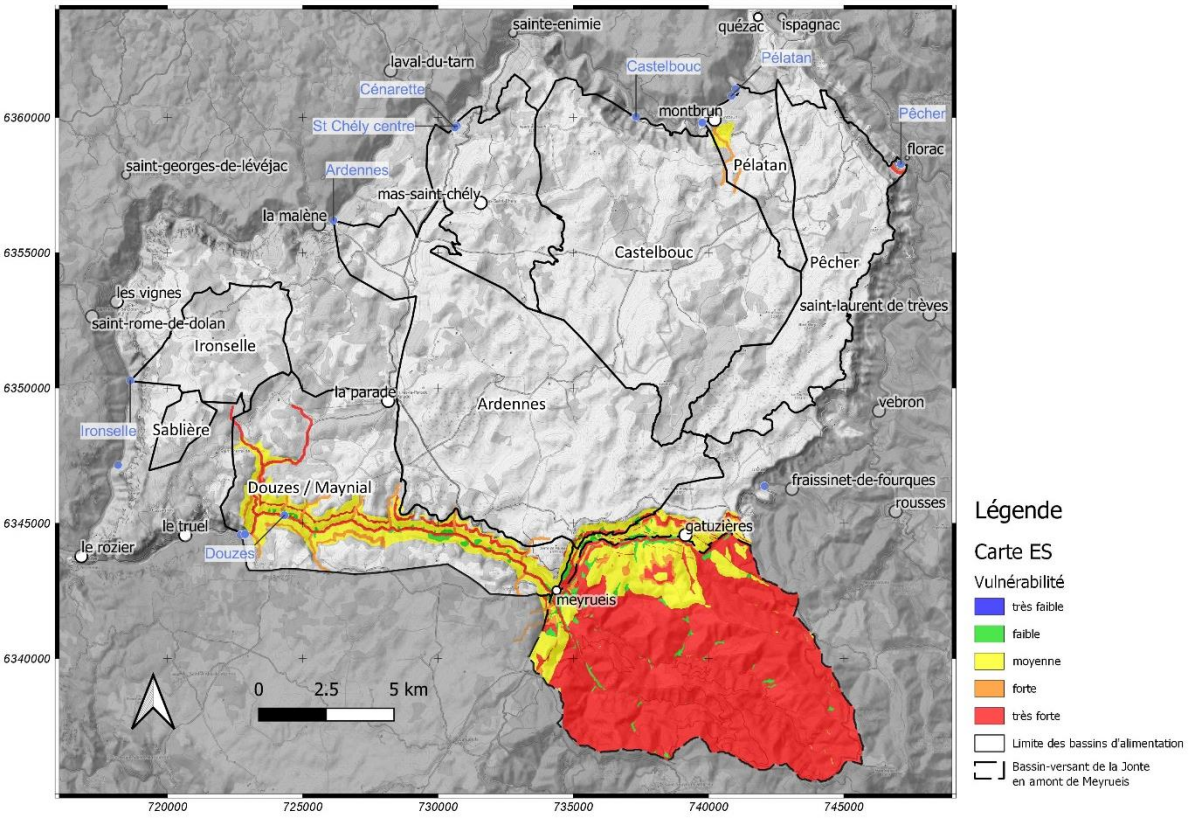


Figure 65 : Carte du sous-critère ES relatif à l'état de surface.

- **Sous-critère E – Aquifère épikarstique**

Le terme « épikarst » employé dans la méthode PaPRIKa permet de décrire en tout point du bassin s'il existe un aquifère épikarstique capable de différer l'infiltration à la surface du Causse. Dans le cas du Causse Méjean, il existe plusieurs sources présentant des très faibles débits drainant les formations du Jurassique supérieur, comme les sources de la Volpilière ou de la Fontaine de Mielgues, qui ont fait l'objet de prélèvements pour analyses physico-chimiques.

Ces sources ne constituent pas des exutoires de trop pleins des systèmes karstiques étudiés. Elles sont les exutoires de petits systèmes aquifères perchés développés dans le Jurassique supérieur qui émergent au contact des niveaux plus marneux Callovo-Oxfordien. Le fonctionnement hydrologique de cet aquifère est donc comparable, du point de vue de la vulnérabilité de la ressource en eau karstique, à celui d'un aquifère épikarstique.

La méthode PaPRIKa recommande d'attribuer la valeur 2 (vulnérabilité moyenne) lorsqu'un aquifère épikarstique continu latéralement est identifié, avec des sources d'un débit de l'ordre du l/s et l'existence de puits collectant les eaux. Cette valeur est attribuée à toutes les formations calcaires du Jurassique supérieur à l'affleurement, ce qui s'observe plutôt au centre et à l'est de la zone d'étude.

Une valeur de 3 (vulnérabilité forte) est également attribuée aux formations dolomitiques comblées d'altérites que l'on retrouve dans la partie ouest, afin de tenir compte de leur effet de stockage sur l'infiltration des eaux, sans que des sources importantes puissent y être identifiées.

Les autres secteurs ne sont pas concernés par l'existence d'un aquifère perché pouvant différer l'infiltration. Ils sont donc caractérisés par une vulnérabilité très forte (4) pour ce critère.

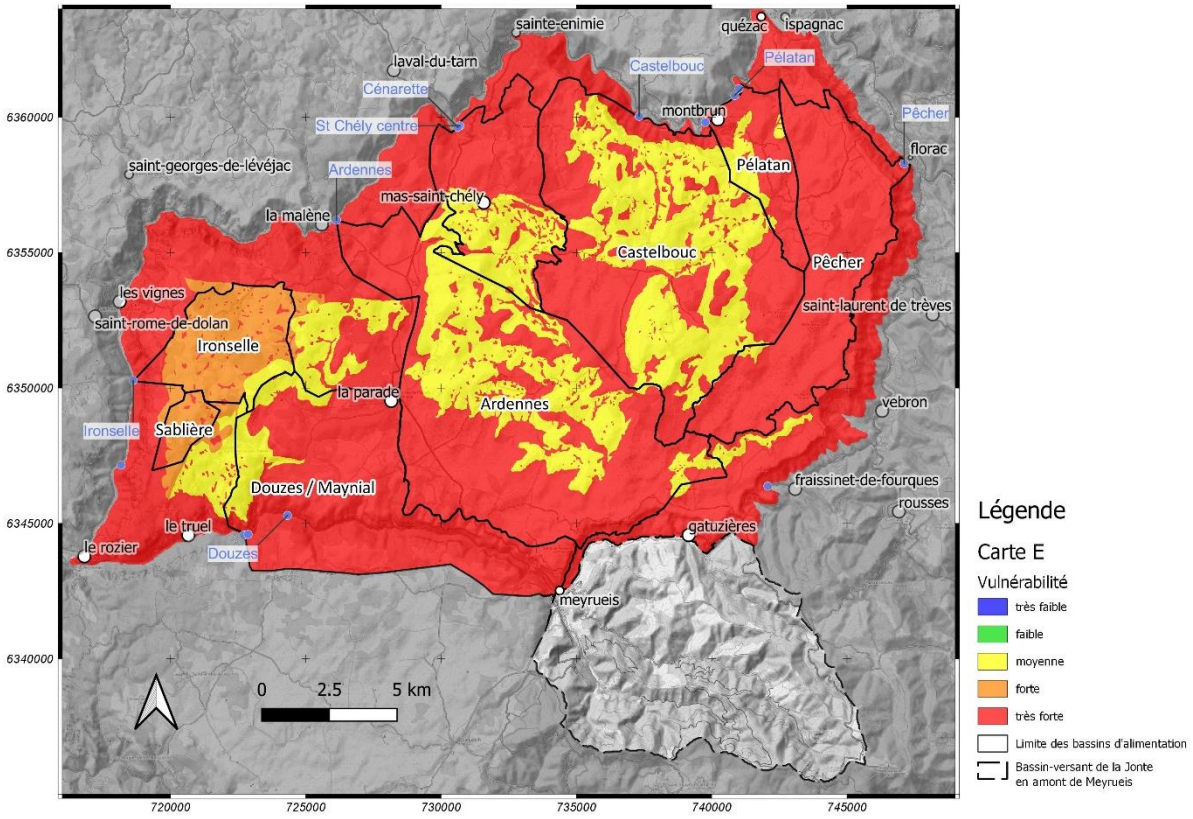


Figure 66 : Carte du sous-critère E relatif à l'existence d'un aquifère épikarstique, assimilé à la présence d'un aquifère perché dans le cadre de cette étude.

- **Sous-critère S – Couverture pédologique et géologique**

La cartographie du critère S s'appuie à la fois sur des données issues de la carte géologique, des données issues de la cartographie des formations superficielles (grésou et alluvions allochtones à partir des cartes produites dans le rapport BRGM/RP-68189-FR, Husson *et al*. 2020), ainsi qu'une analyse du MNT dans le but de localiser les dépressions pouvant abriter des sols plus épais.

Par défaut, les secteurs cartographiés comme recouverts par des formations à alluvions allochtones ou du grésou sont classés en vulnérabilité forte (3), en supposant une faible épaisseur de sol, ce qui sera localement corrigé par la suite.

Sur le reste de la zone d'étude, les éboulis, les brèches de pente et les formations résiduelles associées reportés par la carte géologique sont également reportés en vulnérabilité forte (3) pour traduire la perméabilité de ces formations, tandis que les formations résiduelles des surfaces calcaires sont classées en vulnérabilité moyenne (2) pour tenir compte d'une perméabilité plus faible liée à l'accumulation d'argile.

Cette première carte de sous-critère S est ensuite croisée avec la carte des dépressions calculées à partir du MNT pour tenir compte de l'épaississement des sols dans les dépressions. Le principe est d'attribuer une vulnérabilité plus faible aux secteurs qui présentent des sols plus épais. Par défaut, les dépressions sont ainsi classées en vulnérabilité faible (1) vis-à-vis du sous-critère S. Mais si la valeur de ce sous-critère a déjà été attribuée précédemment, alors celle-ci est diminuée de 1 pour tenir compte du rôle de l'épaississement des sols sur le retard à l'infiltration. Par exemple, un secteur recouvert de grésou sera initialement classé en vulnérabilité forte. Si ce secteur est situé dans une dépression, il sera finalement modifié en vulnérabilité moyenne (2). Enfin, les secteurs qui n'ont pas été classés correspondent à des secteurs où le sol est absent ou pas assez développé pour jouer un rôle protecteur vis-à-vis de l'infiltration. Ces secteurs sont donc caractérisés en vulnérabilité très forte (4).

La carte obtenue pour le sous-critère S est présentée sur la Figure 67.

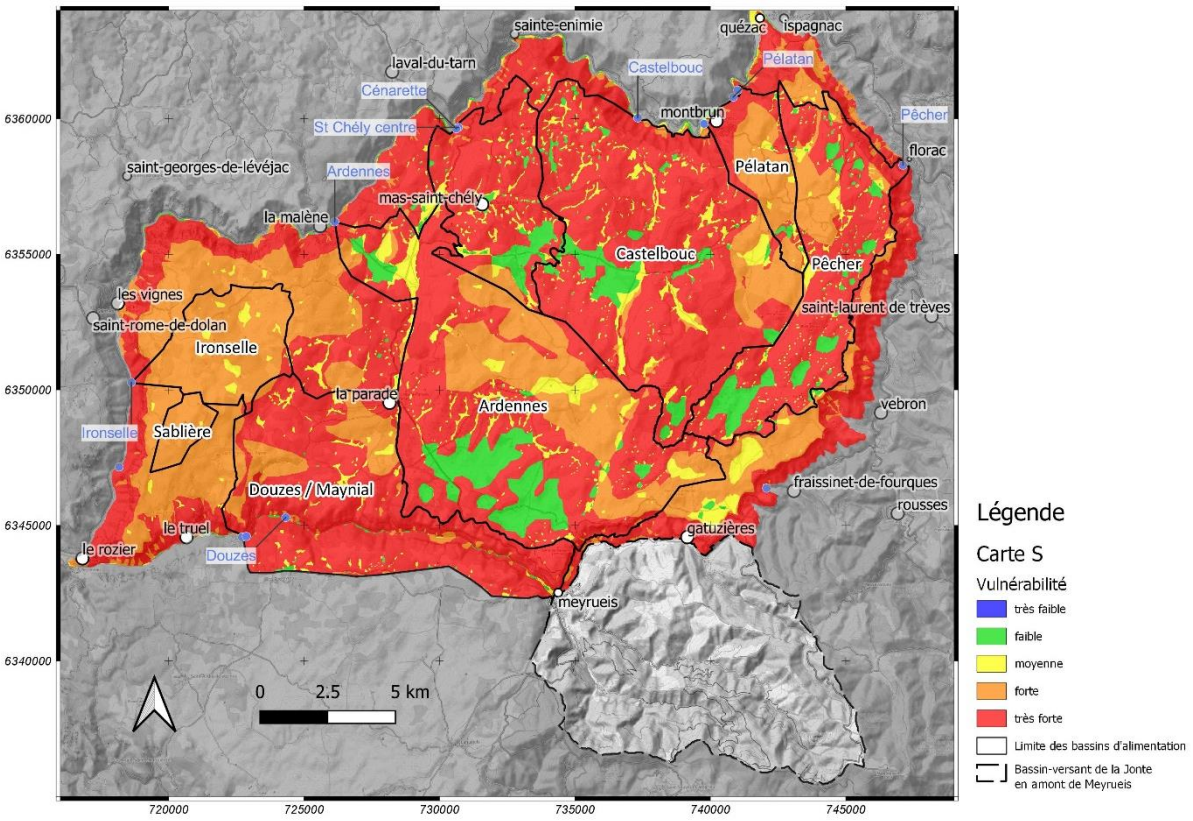


Figure 67 : Carte du sous-critère S relatif à l'existence d'une couverture pédologique et géologique protectrice.

- **Sous-critère ZNS – Caractéristique de la Zone Non Saturée**

La cartographie de ce sous-critère tient compte de la lithologie, de l'épaisseur et de la fracturation qui affecte la zone non saturée.

L'épaisseur de la ZNS est très élevée sur le Causse Méjean, et dépasse en tout point la valeur seuil de 50 m proposée par la méthode PaPRIKa. Il n'y a donc pas lieu de modifier le critère lié à la lithologie de la ZNS pour tenir compte de l'épaisseur. Seul le degré de fracturation est à prendre en compte. Une valeur de très forte vulnérabilité (4) a été attribué de part et d'autre de chaque accident identifié sur la carte géologique au 1/50 000 avec une zone tampon de 50 m.

En dehors des zones de failles, les affleurements calcaires et dolomitiques ont été classés en vulnérabilité forte (3), tandis que les affleurements présentant des intercalations d'argiles ont été classés en vulnérabilité moyenne (2). Les formations contenant des niveaux marno-calcaires ont été classées en vulnérabilité faible (1), comme par exemple dans les formations du Callovo-Oxfordien. Enfin, les niveaux marneux de l'Aalénien et du Toarcien ont été classés en vulnérabilité très faible (0) sur la bordure est du Causse Méjean.

La carte obtenue pour le sous-critère ZNS est présentée sur la Figure 68.

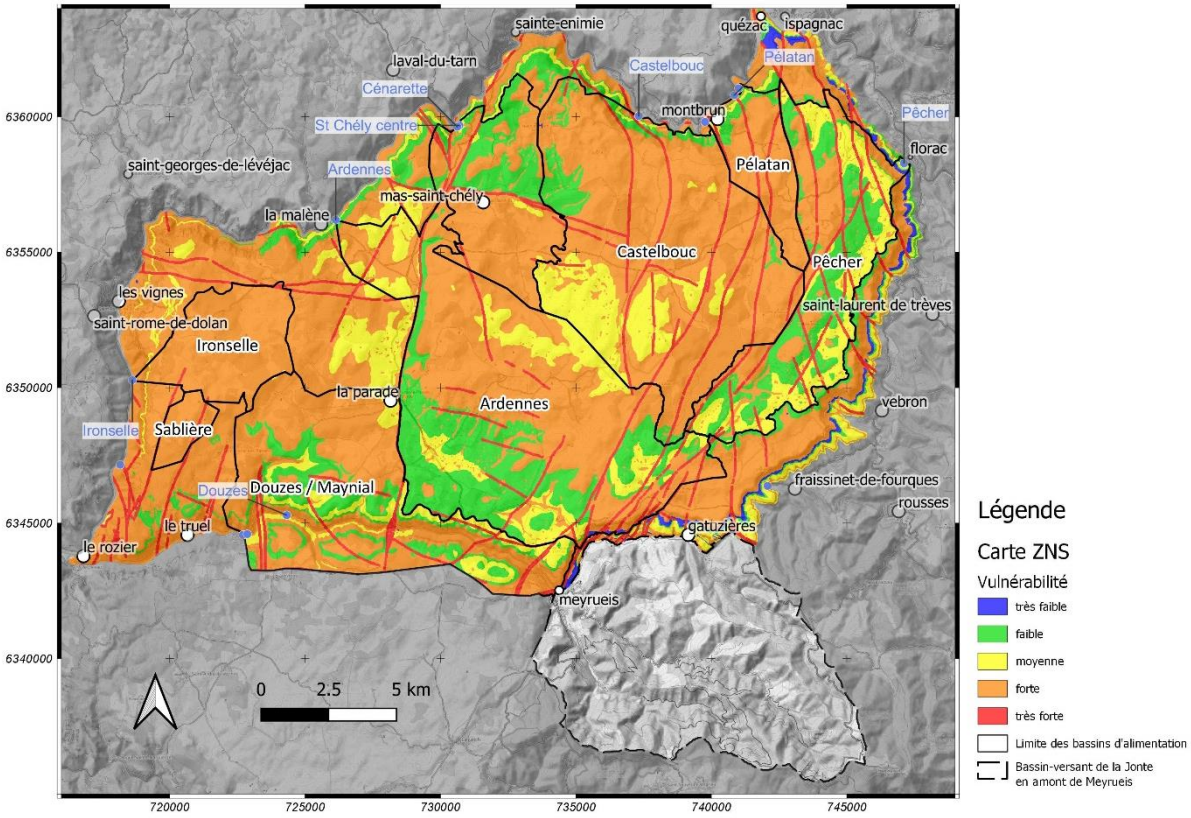


Figure 68 : Carte du sous-critère ZNS relatif aux caractéristiques de la zone non saturée.

- **Critère P**

L'indice le plus protecteur obtenu pour chaque sous-critère ES, P, S et ZNS est conservé pour obtenir la carte P sur la zone de recharge directe.

Pour le bassin versant de la Jonte en amont de Meyrueis, soit le **bassin versant connexe** du système karstique des Douzes/Maynial, le critère ES est le seul critère à renseigner pour obtenir la carte P. Ce bassin est considéré uniquement du point de vue de la genèse d'un ruissellement alimentant les pertes de la Jonte. La carte produite par la méthode PaPRIKa ne concerne donc pas la ressource en eau souterraine de ce bassin versant. Une étude spécifique pourrait être menée sur les systèmes karstiques également présents dans ce bassin versant, comme par exemple celui de la source de Salvinsac (BSS002CHBD, cf. partie 4 relative à l'étude hydrochimique).

La carte de vulnérabilité obtenue pour le critère P pour la ressource en eau karstique du Causse-Méjean est présentée sur la Figure 69.

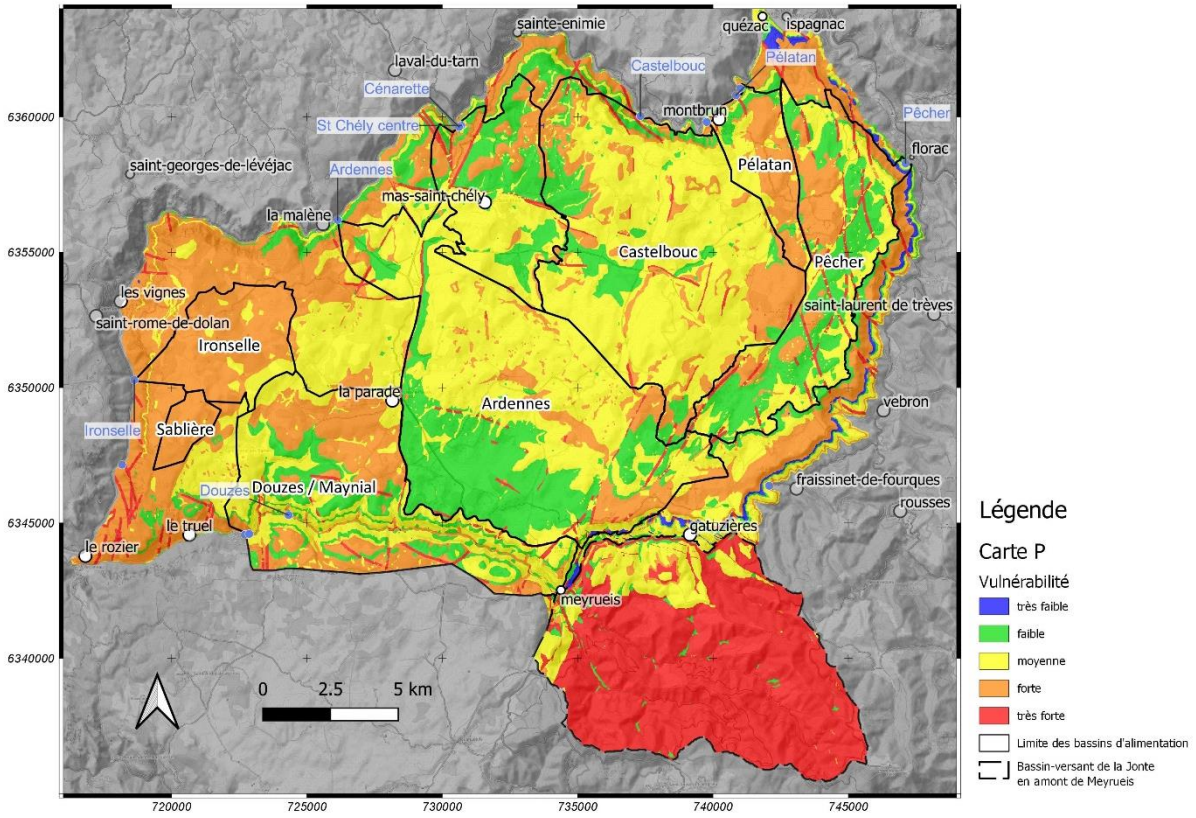


Figure 69 : Carte de vulnérabilité définie par le critère P de protection vis-à-vis de l'infiltration.

b) Critère R

Le critère R caractérise **la lithologie de la roche réservoir au niveau de la zone noyée**, en tenant compte de la fracturation lorsque celle-ci joue un rôle sur les écoulements souterrains.

Deux lithologies différentes ont été distinguées :

- les formations calcaires et dolomitiques karstifiées sont les faciès lithologiques retrouvés à la fois pour l'aquifère inférieur (Hettangien) alimentant le Pêcher et l'aquifère supérieur alimentant les autres systèmes étudiés – les secteurs correspondants ont été classés en vulnérabilité forte (3) ;
- les formations plus dolomitiques à l'ouest, comblées d'altérites ont été classées en vulnérabilité moyenne (2).

La limite entre ces deux domaines est définie par la faille de la Parade et les failles du Pas-de-Soucy. Le ravin des Bastides a été considéré à part puisqu'il réorganise localement le drainage karstique des formations du Jurassique supérieur au contact avec les niveaux moins perméables de l'Oxfordien. Ce fonctionnement lui confère une vulnérabilité plus élevée (3).

Les failles jouant un rôle dans la compartimentation des systèmes ont été sélectionnées, à savoir les failles des systèmes de Hauterives/Pas-de-Soucy et les failles des faisceaux de Montmirat et de Meyrueis, ainsi que les accidents d'orientation sud-ouest – nord-est qui constitue la direction principale du drainage karstique à l'est de la faille de la Parade. La carte obtenue est présentée sur la Figure 70.

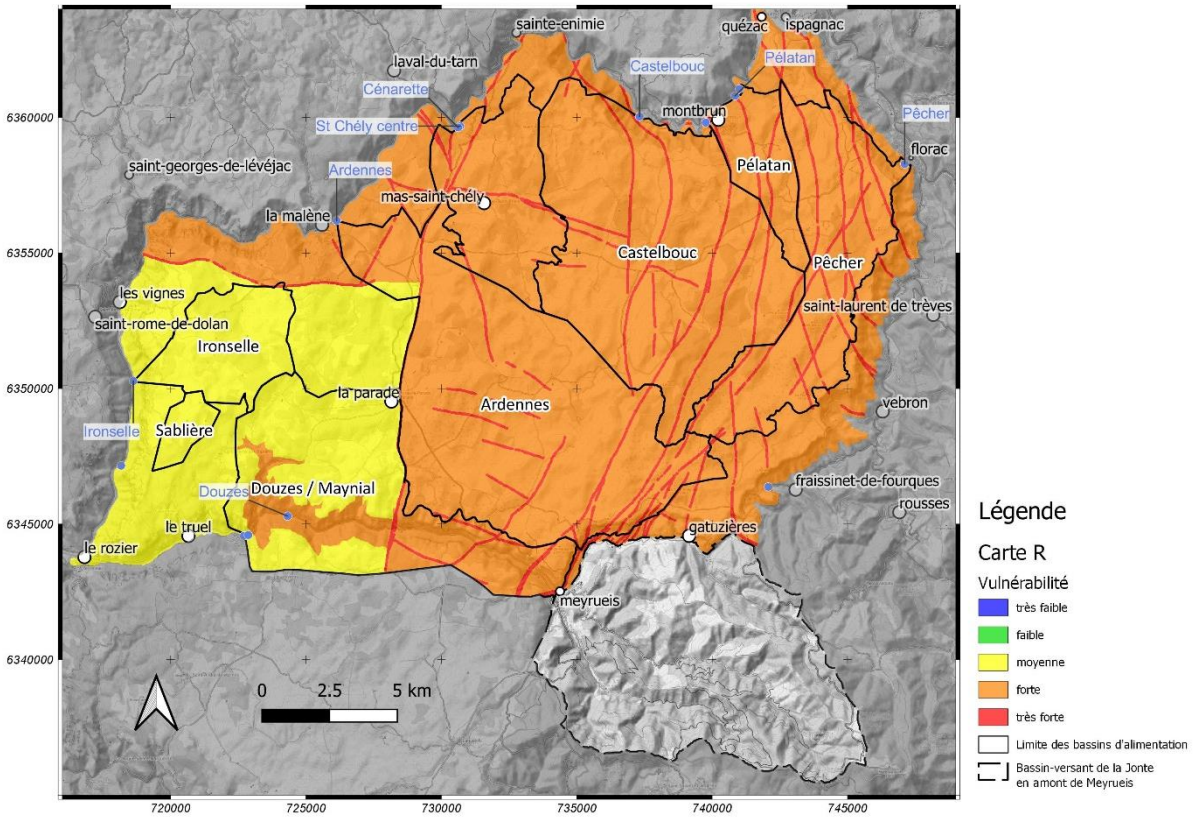


Figure 70 : Carte de vulnérabilité définie par le critère R relatif à la nature lithologique de la roche réservoir.

c) Critère I

Le critère I caractérise les **conditions d'infiltration**, en distinguant l'infiltration diffuse de l'infiltration concentrée depuis une perte.

L'infiltration concentrée est considérée en attribuant une valeur de très forte vulnérabilité (4) aux bassins d'alimentation des pertes, délimités à partir du MNT, qu'il s'agisse du bassin versant connexe de la Jonte en amont de Meyrueis ou des petits bassins de pertes identifiés à la surface du Causse Méjean lors de la cartographie de P. L'aptitude au ruissellement des formations n'est pas considérée pour la caractérisation du critère I afin de ne pas apporter une information redondante avec la détermination du sous-critère ES. Avec le critère P, le critère I constitue le second et dernier critère permettant de qualifier la vulnérabilité du bassin versant connexe de la Jonte en amont de Meyrueis. À cela s'ajoutent les bassins versants des pertes identifiées à la surface du Causse lors de la cartographie du critère P.

Les zones endoréiques supposées concentrer les écoulements vers un point d'infiltration sont également prises en compte à partir des dépressions calculées à l'aide du MNT (cf. Figure 61). Ces secteurs se voient attribuer une vulnérabilité forte (3).

En dehors de tous ces secteurs, le critère I est calculé à partir d'une analyse de la pente selon la classification proposée par le guide méthodologique (Dörfliger et Plagnes 2009, rapport RP-57527-FR, illustration 21, p.41). La carte obtenue pour le critère I est présentée sur la Figure 71.

Le BRGM met également à disposition un indicateur spatial valable au 1/50 000 permettant de traduire l'aptitude des formations du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface, appelé Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR). À ce titre, l'IDPR peut se substituer ou venir compléter l'estimation d'un critère relatif à l'infiltration, soit le critère I dans le cas de la méthode PaPRIKa. Dans sa version actuelle (2017), cet indicateur est calculé à partir d'une base de données des cours d'eau permanent et temporaire (BD Topo® de l'IGN) qui correspond à la couche de cours d'eau des cartes topographiques. Cet indicateur est donc très sensible à la caractérisation du fonctionnement hydrologique des thalwegs. Ainsi, plusieurs secteurs du Causse Méjean se voient attribuer selon ce critère des caractéristiques de ruissellement majoritaire, alors qu'aucun ruissellement n'est identifié dans ces vallons fluviokarstiques, même lors des plus forts évènements pluvieux couvrant la période étudiée. Il conviendrait alors de recalculer cet indice en retirant certains tronçons de cours d'eau pour exploiter cette information dans la méthode PaPRIKa. Cette donnée n'a donc pas été intégrée dans l'analyse des conditions d'infiltration.

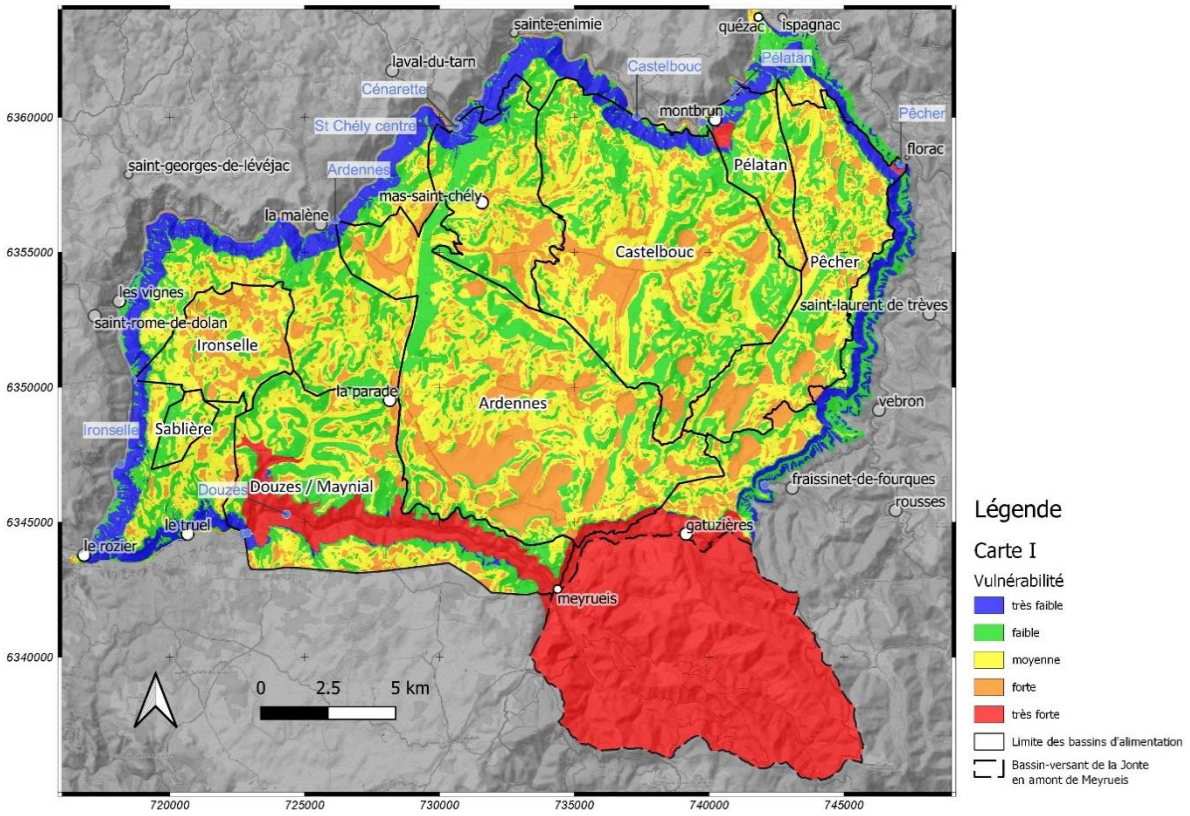


Figure 71 : Carte de vulnérabilité définie par le critère I relatif à l'infiltration.

d) Critère Ka

Le critère Ka caractérise le **fonctionnement des systèmes karstiques**, c'est-à-dire leur capacité à drainer l'ensemble du réservoir plus ou moins poreux et fissuré via un réseau de drainage karstique hiérarchisé jusqu'à l'exutoire.

Dans le cadre de cette étude, le fonctionnement karstique de chaque système est caractérisé à partir de l'interprétation des suivis hydrodynamiques, physico-chimiques du traçage naturel et artificiel. Il n'est donc pas possible de spatialiser ce critère au sein du bassin d'alimentation d'un même système karstique, sachant que la position des axes de drainage karstique n'est pas précisément connue. Ainsi, plutôt que de chercher à spatialiser cette information au sein du bassin d'alimentation de chaque système karstique en reportant les accidents tectoniques et la position des drains majeurs, il est proposé d'utiliser ce critère de manière homogène pour distinguer chaque système. Enfin, la valeur proposée pour le bassin d'alimentation du système le plus proche est attribuée aux secteurs du Causse Méjean dont l'exutoire n'est pas suivi.

Les résultats acquis permettent de proposer la classification suivante à partir des paragraphes 3.3 et 4.5, avec une augmentation du degré de karstification vers l'est pour les systèmes rechargés uniquement à la surface du Causse :

- un degré de karstification modéré (2) est attribué à la partie ouest non drainée par le système des Douzes/Maynial et des Ardennes du fait du comportement hydrodynamique inertiel de la source de l'Ironselle, qui s'explique par la présence d'altérites comblant les vides karstiques ;
- un degré de karstification fort (3) est attribué à la partie centrale drainée par les systèmes des Ardennes et de Saint-Chély/Cénarette ;
- un degré de karstification très fort (4) est attribué aux systèmes de Castelbouc, de Pélatan et du Pêcher, ainsi qu'au système karstique binaire des Douzes, y compris sur sa zone de recharge directe drainant le ravin des Bastides.

Le système de Saint-Chély/Cénarette aurait pu être classé en 4 compte tenu des résultats des études hydrochimiques et hydrodynamiques, mais le très faible taux de restitution observé lors de l'essai de traçage de l'aven du Devès, ainsi que la difficulté de réaliser un essai de traçage sur ce système (échec depuis l'aven Bancou, échec du traçage du lagunage, absence de cavité présentant un écoulement actif) permet de proposer une vulnérabilité forte (3) et non très forte (4) vis-à-vis du critère Ka pour ce système.

La carte obtenue pour le critère Ka est présentée sur la Figure 72.

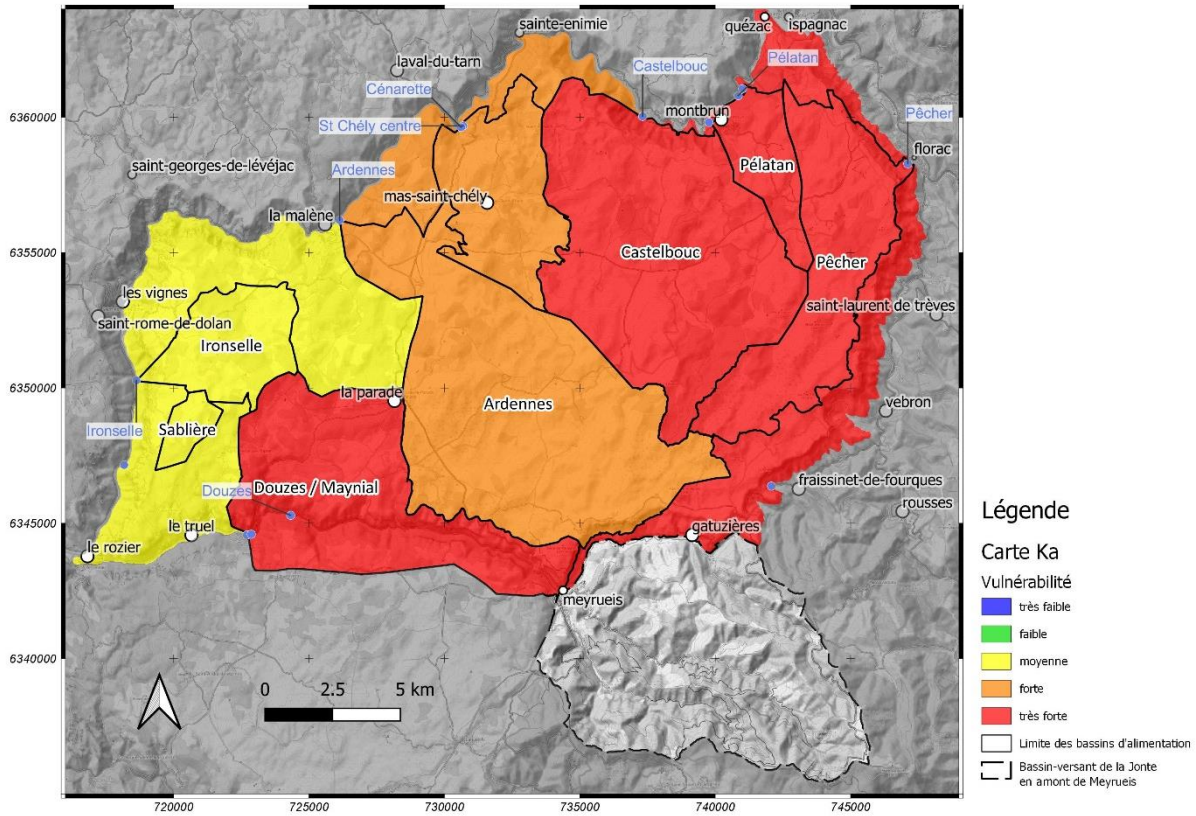


Figure 72 : Carte de vulnérabilité définie par le critère Ka relatif au degré de karstification (fonctionnement karstique).

7.1.3. Carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource

Six tests de pondération ont été effectués comme proposé par le guide méthodologique présentant la méthode PaPRIKa. Les cartes obtenues représentant l'indice de vulnérabilité globale sont présentées sur la Figure 73. L'échelle de vulnérabilité est issue d'une reclassification du résultat de la pondération selon le tableau proposé par le guide méthodologique (Illustration 29, p. 50 du rapport BRGM/RP-57527-FR).

Pour le bassin versant connexe alimentant le système des Douzes/Maynial, le résultat de cette pondération a été modifié pour tenir compte de la distance que doit parcourir l'eau en ruisselant à la surface du bassin, ce qui constitue une adaptation de la méthode PaPRIKa. Sans cette correction, l'essentiel du bassin amont de la Jonte présenterait une vulnérabilité très forte jusqu'à la ligne de crête topographique et le sommet de l'Aigoual, ce qui n'apparaît pas pertinent pour un bassin versant de cette taille. Un calcul de longueur d'écoulement a été réalisé à partir du MNT depuis l'exutoire défini à Meyrueis. La vulnérabilité globale calculée sur ce bassin est diminuée de 1 pour les longueurs d'écoulement supérieures à 10 km, puis de 2 pour les longueurs d'écoulement supérieures à 15 km. Cette modification permet pour ce cas d'étude de mieux prendre en compte l'effet de distance sur la dispersion et la dilution d'un éventuel contaminant, et ainsi de mieux hiérarchiser l'indice de vulnérabilité globale proposé sur le bassin amont de la Jonte.

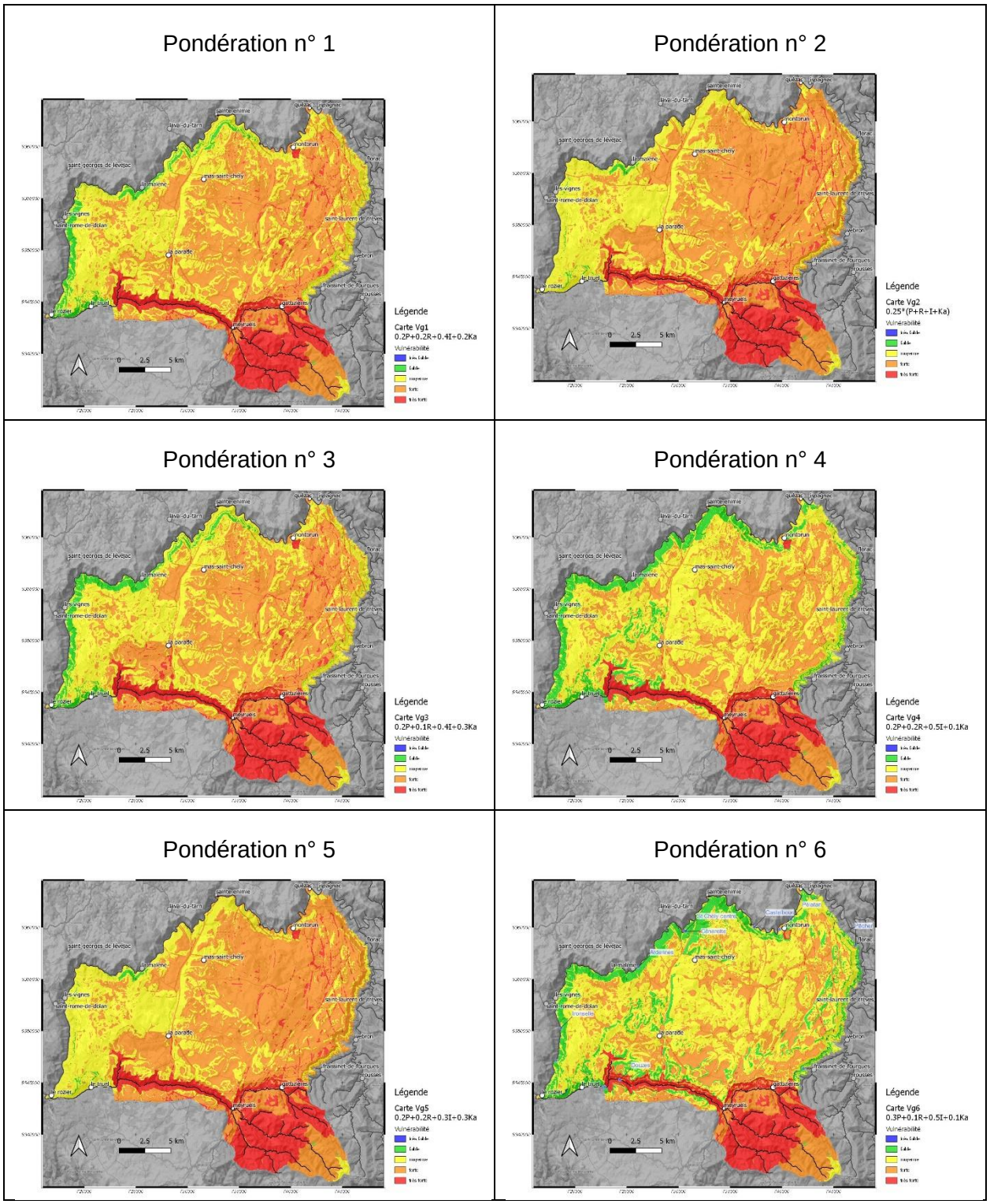


Figure 73 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque de la ressource karstique du Causse Méjean - résultats des six tests de pondération.

Toutes les pondérations utilisées mettent en avant la plus grande vulnérabilité, qualifiée ici de forte à très forte, des secteurs drainés par le système karstique des Douzes/Maynial, que ce soit par les pertes de la Jonte mais aussi par les apports sur le Causse dans le secteur du ravin des Bastides.

Les cartes obtenues par la pondération 2 et 5 sont relativement similaires, les poids respectifs pour chaque critère étant relativement proches. Ces deux cartes permettent d'exploiter toute l'échelle de valeurs de l'indice de vulnérabilité et présentent des résultats plus homogènes à la surface du Causse. Les cartes issues des pondérations 4 et 6 ne mettent pas ou peu en avant les secteurs de très forte vulnérabilité sur le Causse. Enfin, les cartes des pondérations 1 et 3 permettent de mieux identifier les secteurs les plus vulnérables sur le Causse. La pondération 1 a finalement été choisie pour cartographier la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique du Causse Méjean. Elle est représentée sur la Figure 75.

Cette carte permet également de discuter de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique calculée pour chaque bassin d'alimentation des systèmes karstiques étudiés. Il apparaît une plus forte vulnérabilité du système des Douzes/Maynial en lien avec le fonctionnement binaire de ce système, mais également sur les systèmes drainant l'est de la zone d'étude. Des statistiques zonales ont été calculées à l'échelle de chaque bassin pour mieux comparer la vulnérabilité de chaque système karstique. La Figure 74 présente les résultats obtenus pour la valeur moyenne de l'indice de vulnérabilité représenté sur la Figure 73. Le graphique obtenu met clairement en avant la plus forte vulnérabilité du système des Douzes/Maynial, y compris sur les secteurs karstiques (cf. Douzes/Maynial sans BV Jonte).

Les systèmes les plus vulnérables présentant un mode de recharge directe à la surface du karst (système unaire) sont les systèmes du Moulin de Pélatan, du Pêcher et de Castelbouc.

Les systèmes drainant la partie ouest apparaissent les moins vulnérables, mais présentent tout de même une vulnérabilité moyenne qualifiée de modérée (Vg>1.6).

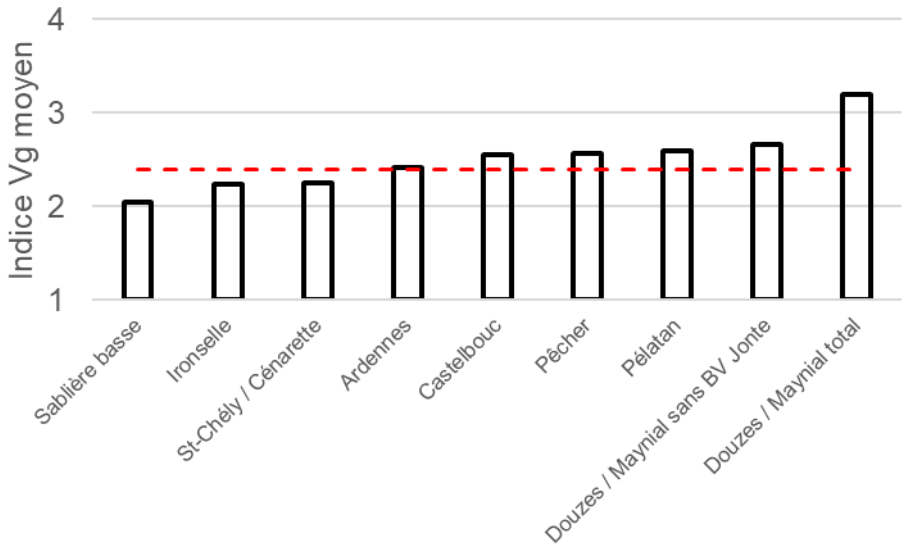


Figure 74 : Indice de vulnérabilité globale calculée pour chaque bassin d'alimentation des systèmes karstiques du Causse Méjean.

Ainsi, en tenant compte de la localisation du forage profond des Douzes pour lequel les résultats de l'étude hydrochimique montrent clairement qu'il s'agit d'un forage captant la ressource karstique du système Douzes/Maynial (cf. Annexe 5 également), et en y ajoutant les captages des Estivants (système de Castelbouc), du Moulin de Pélatan et du Pêcher, la ressource en eau karstique du Causse Méjean sollicitée pour l'AEP présente une vulnérabilité à la pollution élevée, et localement très élevée.

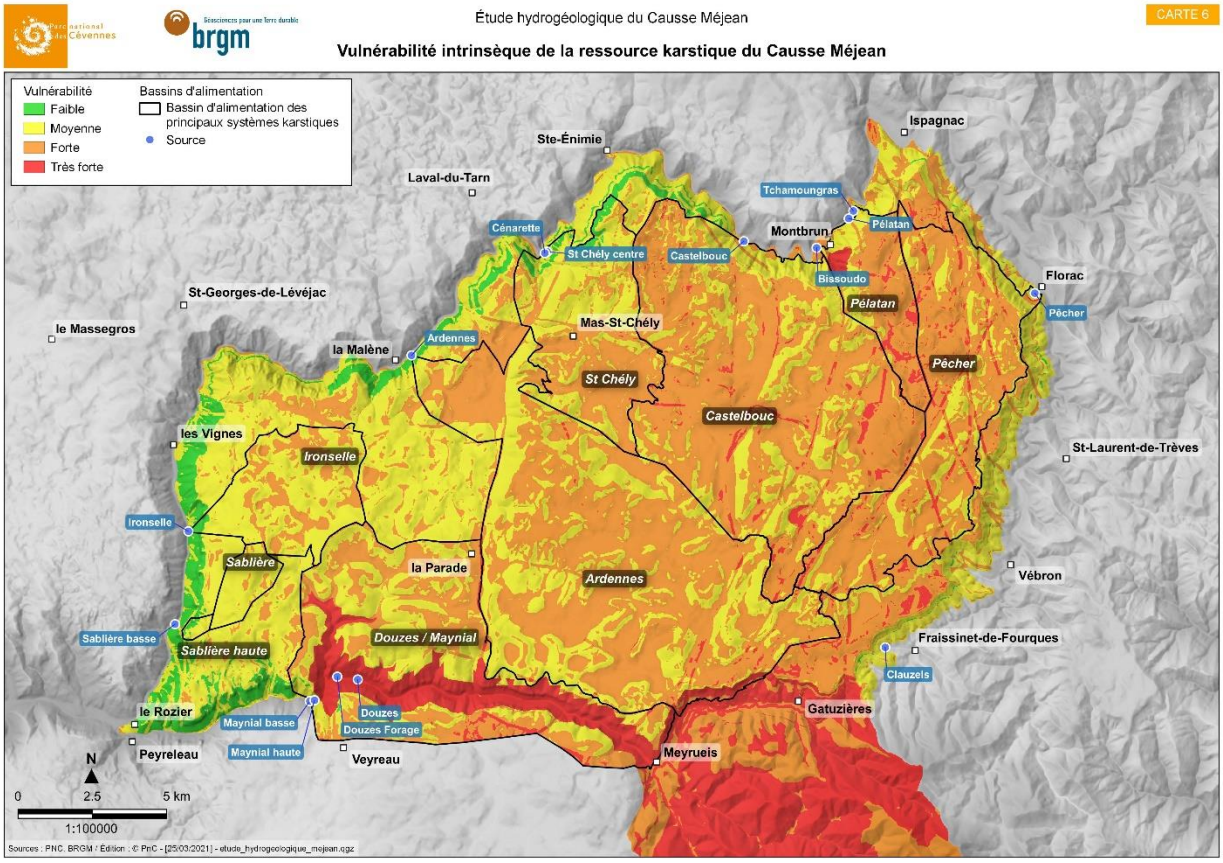


Figure 75 : Carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource karstique du Causse Méjean.

7.2. PRESSIONS ANTHROPIQUES

7.2.1. Zone d'étude

L'étude des pressions anthropiques a été réalisée sur une zone d'étude restreinte à l'ensemble des bassins d'alimentation des eaux souterraines faisant l'objet de la présente étude. La Figure 76 présente le périmètre de la zone d'étude rapprochée ainsi que les limites communales des communes concernées.

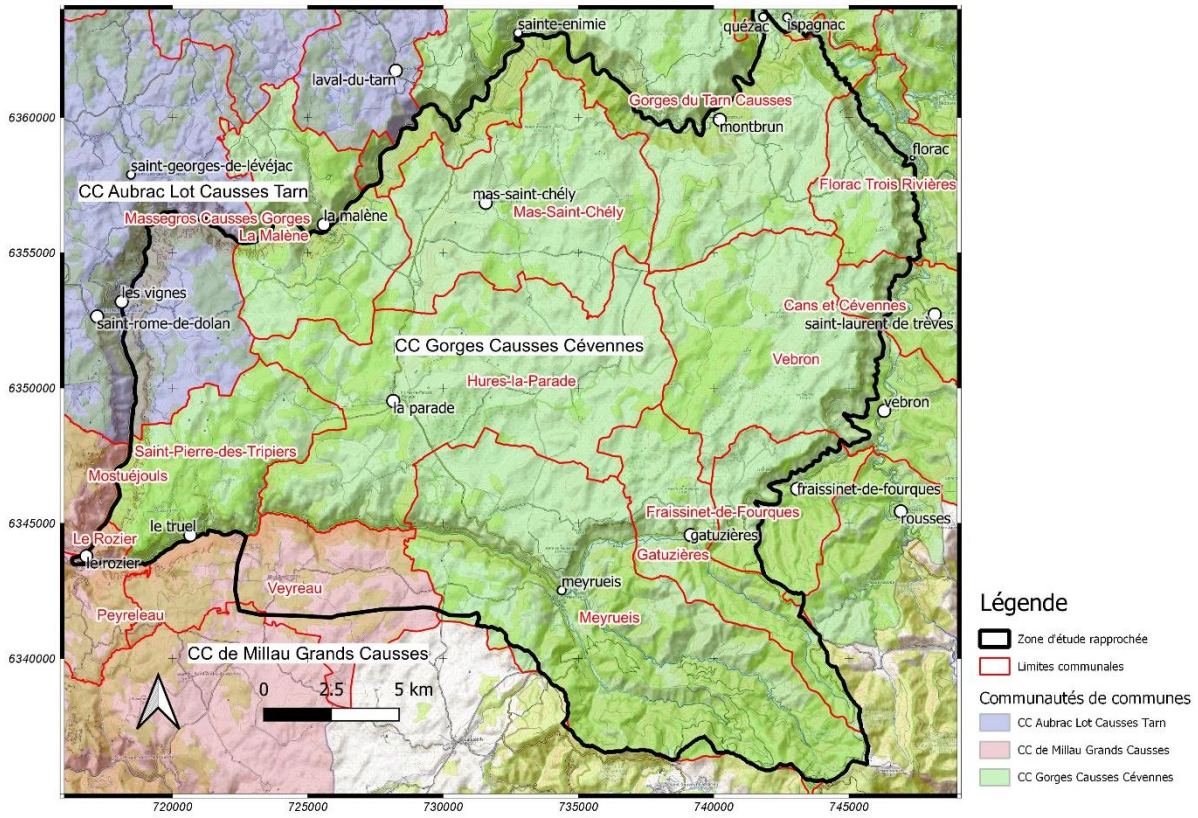


Figure 76 : Zone d'étude des pressions anthropiques.

7.2.2. Méthodologie

Les informations concernant les différentes pressions anthropiques s'exerçant sur le causse Méjean ou à proximité immédiate ont été récoltées via plusieurs banques de données en ligne et complétées par des échanges directs avec différentes institutions sources de données. L'avis hydrogéologique relatif à la définition des périmètres de protection du captage du forage profond des Douzes a également été exploité (Subias, 2019).

- **Basias** : base de données issues de la réalisation d'un inventaire historique régional des sites industriels et activités de services, en activité ou non ;
- **Basol** : base de données sur les sites et sols pollués, ou potentiellement pollués, appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif ;
- **ICPE** : base de données recensant les principaux projets et transfert de polluants, dans l'eau, l'air, ainsi que les déchets déclarés par certains établissements ;
- **Assainissement :** base de données mettant à disposition les dernières données collectées dans le cadre du suivi des mises en conformité des ouvrages d'assainissement.

Les données collectées ici sont géo-référencées pour la plupart, mais dans le cas où les coordonnées ne sont pas renseignées, celles-ci sont localisées en utilisant d'autres indices disponibles dans la description, ou placées au centroïde de la commune concernée. Les données ont été croisées de manière à supprimer tout doublon ou à compléter les informations recensées via différentes sources.

Concernant les pratiques agricoles et leur étendue, le registre parcellaire graphique (RPG) a été utilisé. Il s'agit d'informations surfaciques, permettant l'identification des parcelles agricoles regroupées en îlots. Pour chaque ilot ont été conservées les informations relatives au type d'activité agricole le plus représenté au sein de cet îlot. Ces données permettent de cibler de manière générale les secteurs où des ajouts d'intrants chimiques ou biologiques peuvent être réalisés.

La BDTopo (IGN) a également été utilisée pour recenser des informations ponctuelles, linéaires et surfaciques telles que :

- les zones de bâtis, bâtiments indifférenciés, remarquables, industrielles, installations sportives, cimetière, réservoir, aérodrome ;
- les zones d'activités, industrielles ou commerciales, de culture, de loisirs, de sport, de transport ;
- les infrastructures de transports, chemin, route secondaire, route primaire, parking.

Des recherches complémentaires concernant de possibles pollutions accidentelles ont été effectuées via la base de données Aria (retour d'expérience sur les accidents technologiques).

En parallèle de ce travail de collecte sur internet, différents acteurs de la gestion de l'eau et des différentes sources de pollution potentielles du causse Méjean ont été contactés dans le but de compléter les informations acquises par les bases de données citées précédemment. Voici une liste des institutions contactées et des données fournies :

- **DDCSPP Lozère (Direction Départementale de la Cohésion Sociale et de la Protection des Populations) :** ICPE agricoles ou agro-alimentaires ;
- **Conseil départemental de la Lozère :** Plan de Prévention et de Gestion des Déchets Non Dangereux (PPGDND) ;
- **Direction Départementale des Territoires (DDT) Lozère :** Orientation sur les différentes sources de pressions anthropiques et les sources de données associées ;
- **Office National des Forêts (ONF) Lozère :** Localisation des forêts gérées par l'ONF, et informations concernant les enjeux de gestion et l'évolution de la couverture boisée ;
- **Communauté de communes Gorges Causses Cévennes (CCGCC) :** Données concernant les stations d'épuration des eaux usées (STEU), l'assainissement non collectif, et l'épandage des boues ;
- **DREAL, unité interdépartementale Gard Lozère :** Base de données ICPE et informations complémentaires ;
- **SICTOM des bassins du Haut Tarn :** Données concernant les sites de stockage temporaire des déchets ;
- **Comité Départemental du Tourisme de la Lozère :** Localisation des principaux sites touristiques, et des prestataires (logement, restauration, loisirs, services…) et données sur la fréquentation ;
- **Mairies des différentes communes :** Données diverses concernant les possibles sources de pollution présentes sur le territoire communal.

L'ensemble des données récoltées ont été regroupées sous SIG de manière à réaliser les cartes de pression suivantes :

- **Domestique urbaine** : assainissement collectif et individuel, réservoir, bâtiments et cimetière ;
- **Agricole** : ensemble des sites liés à l'agriculture, bâtiment agricole, serre et silo, types d'activités agricoles par îlot (RPG), parcelle concernée par les plans d'épandage d'effluents de station d'épuration des eaux usées ;
- **Industrielles et commerciales** : ensemble de sites industriels significatifs tel que les ICPE ;
- **Gestion des déchets** : ensemble des sites de transfert, de dépôt légaux ou illégaux de déchets ;
- **Transport et assimilé** : ensemble des sites liés au transport terrestre ;
- **Activité sportive et touristique** : ensemble des sites liés aux activités sportives et touristiques.

7.2.3. Résultat

Le causse Méjean est un territoire rural, la densité de population y est faible et les villages sont petits bien que les territoires communaux puissent être assez étendus. Au sein de la zone d'étude, les deux communes les plus importantes et dont le périmètre communal est presque entièrement inclus dans la zone d'étude sont Meyrueis (838 habitants, INSEE, 2018) et Hures-la Parade (274 habitant, INSEE, 2015). Les communes de Florac (2 088 habitant, INSEE, 2015), Gorges-du-Tarn-Causses (975 habitants, INSEE, 2014), et Massegros-Causses-Gorges (948 habitants, INSEE, 2015), ont une population communale relativement importante pour la zone mais seule une fraction de leur territoire est incluse dans la zone d'étude et leur pôles d'habitation en sont exclus (Figure 76).

a) Assainissement

Les eaux usées transportent des quantités importantes de matières organiques et des micro-organismes potentiellement pathogènes, ainsi que des graisses et des détergents (savon, lessive, produits d'entretien, etc.), et dans une moindre mesure des substances dissoutes telles que des résidus de médicaments. Le rejet direct des eaux usées dans le milieu naturel est interdit.

- **Assainissement collectif**

Huit Stations d'Épuration des Eaux Usées (STEU) sont incluses dans la zone d'étude. Les STEU de Saint-Chély-du-Tarn, Sainte-Énimie, Quézac Bourg, Veyreau (Maynial), et Veyreau (Bourg) sont en bordure de la zone d'étude. Les STEU de Meyrueis, de Mas Saint Chely et de Caussignac ont des positions plus centrales dans la zone d'étude.

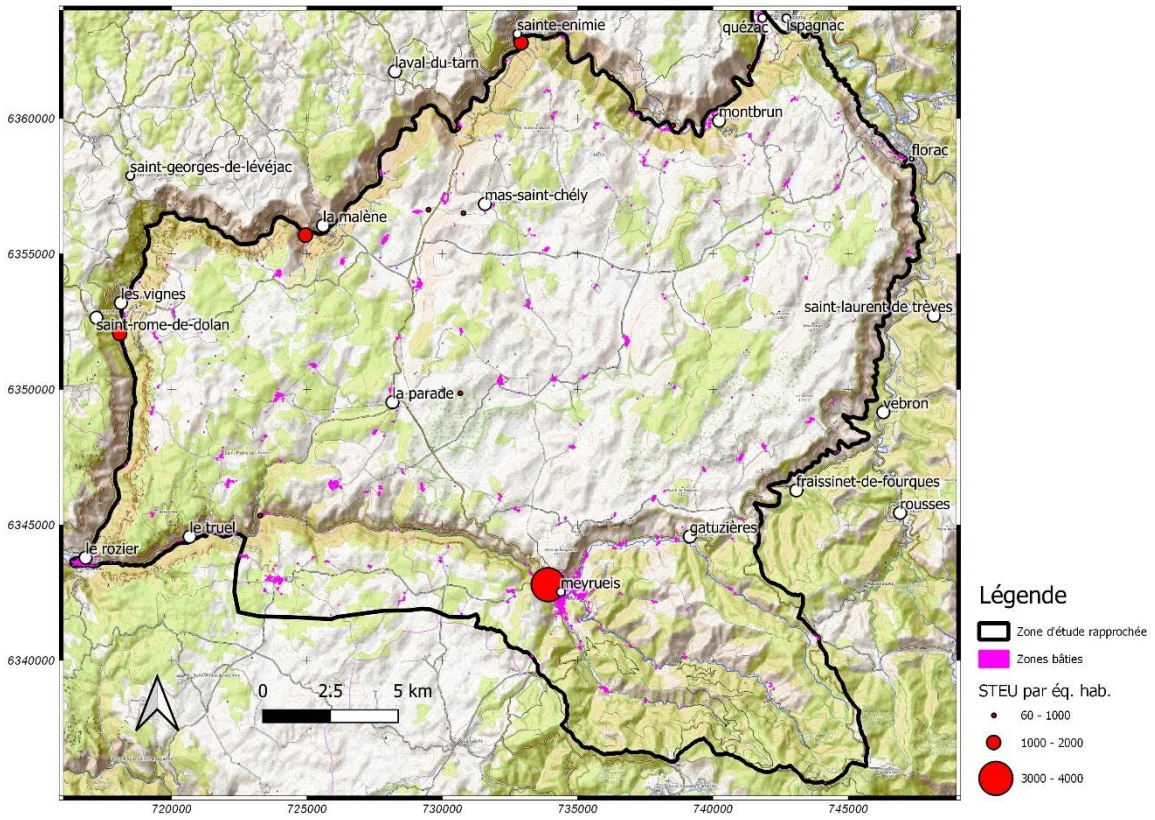


Figure 77 : STEU de la zone d'étude et zones d'ANC.

Selon la Communauté de Commune de Gorges Causses Cévennes, les deux lagunages de Mas Saint-Chély et de Caussignac sont surdimensionnés. Cette situation cause des dysfonctionnements. Du fait du manque de volume d'eau par rapport à la taille des bassins, les bâches sont exposées aux gelées et en mauvais état. Il n'y a pas de débit de rejet ce qui signifie que la totalité du débit d'entrée – hors évaporation – s'infiltre dans le sous-sol, sans que le mécanisme d'infiltration soit bien compris (bâches percées ? Poreuses ?). Les bassins de ces deux lagunages ne sont pas curés car ils n'ont jamais été saturés par les boues d'épuration. Ces STEU sont donc des sources de pollutions chroniques avérées. Les essais de traçage réalisés dans le cadre de l'étude depuis le lagunage de Caussignac ou à proximité (aven Bancou) n'ont pas permis d'identifier avec certitude le devenir des eaux infiltrées. Les résultats apportés par cette étude permettent, compte tenu de l'état des connaissances géologique et hydrogéologique, d'inclure ces points d'infiltration dans le bassin d'alimentation du système karstique de Saint-Chély/Cénarette. À l'exception des deux lagunages cités précédemment, toutes les STEU recensées sont bien dimensionnées pour traiter les effluents des petites communes, et leurs derniers contrôles de conformité sont positifs. Ces STEU présentent donc un risque de pollution chronique assez faible, mais l'apparition d'une fuite, d'un disfonctionnement ou d'un déversement accidentel lors d'un dépotage de sous-produits d'épuration n'est pas à exclure.

Seule la STEU de Sainte-Énimie est concernée par un plan d'épandage de ses boues. La production annuelle de boues est d'environ 5,3 tonnes de matières sèches qui sont épandues sur diverses parcelles de Hure-la-Parade.

Nom du STEU	Capacité nominale en EH	Filière eau principale	Filière boues
SAINT-CHELY-DU-TARN	80	Prétraitements	Stockage boues liquides
SAINTE ENIMIE	1 600	Boue activée aération prolongée (très faible charge)	Stockage boues liquides
CAUSSIGNAC	130	Lagunage naturel	Stockage boues liquides
MAS-SAINT-CHELY-VILLAGE	190	Lagunage naturel	Stockage boues liquides
MEYRUEIS BOURG	4 000	Boue activée faible charge	Table d'égouttage
QUEZAC BOURG	510	Disques biologiques	Filtres plantés (autres)
VEYREAU (MAYNIAL)	50	Lagunage naturel	Stockage boues liquides
VEYREAU (Bourg)	260	Lagunage naturel	Stockage boues liquides

Tableau 25 : STEU de la zone d'étude.

Les réseaux de collecte des eaux usés de Caussignac, Mas Saint-Chély, Meyrueis et Veyreau sont inclus en totalité dans la zone d'étude. Selon les informations fournies par la CCGCC et par la mairie de Veyreau (hors CCGCC), les réseaux d'assainissement sont vérifiés régulièrement et sont en bon état. Néanmoins, les réseaux étant soumis au risque de fuite, ils doivent être considérés comme une source potentielle de pollution chronique.

- **Assainissement non-collectif**

En dehors des habitations connectées aux STEU listées précédemment, toutes les autres sont en assainissement non collectif (ANC). La localisation de ces points peut être approximée par la localisation des bâtiments.

Selon la CCGCC, les ANC sont dans 80 % des cas non conformes car la fosse est connectée à un puisard. Il est admis que le rythme de contrôle et les demandes de réhabilitations sont assez faibles. L'ANC peut donc être considéré comme étant une source de pollution diffuse et chronique avérée sur tout le Causse.

b) Activités agricoles et forestières

Les données du Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2017 ont permis de localiser les pratiques culturales de la zone d'étude.

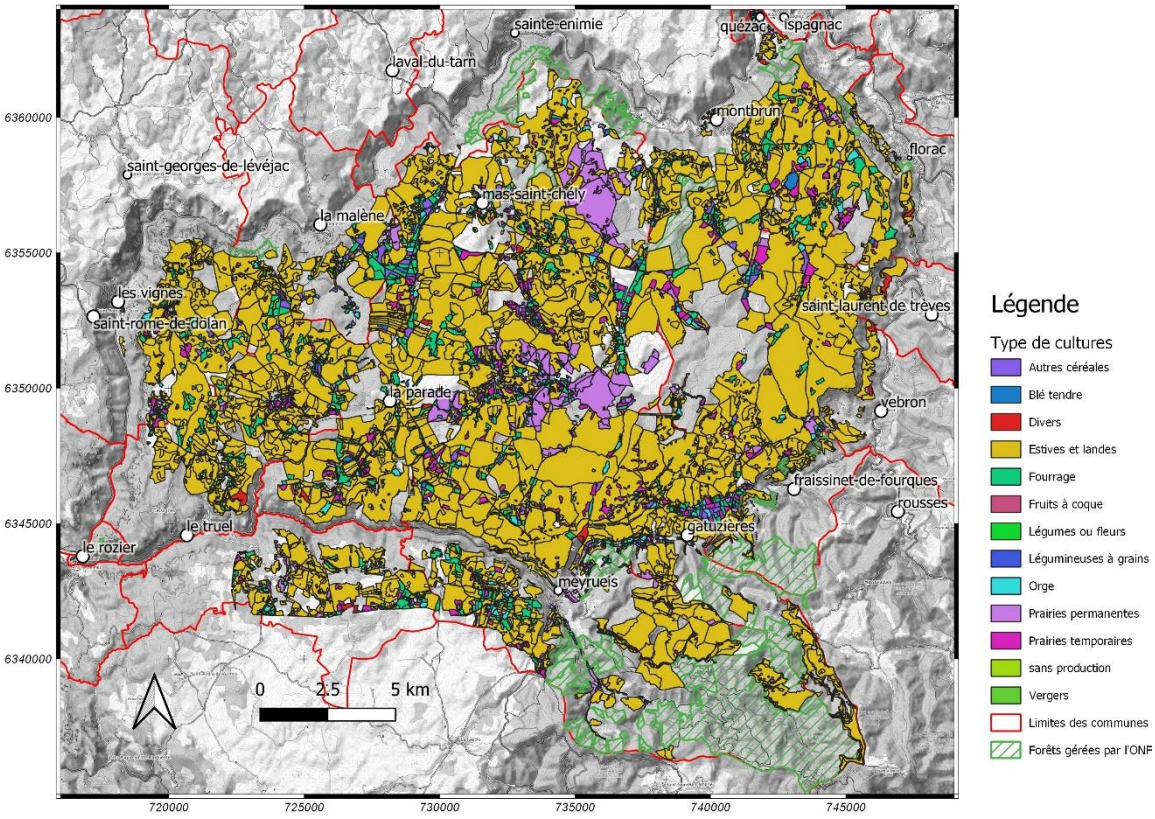


Figure 78 : Analyse cartographique du Registre Parcellaire Graphique par type de cultures.

D'après le RPG, le Causse Méjean est principalement concerné par une agriculture d'élevage avec presque 82 % des surfaces en estives et landes et 15 % de parcelles de fourrage, et de prairies permanentes et temporaires. Les productions céréalières représentent à peine 3 % des surfaces, et les autres productions sont anecdotiques. L'élevage ovin extensif est l'activité agricole largement dominante du Causse Méjean. L'élevage bovin est également présent mais reste plus marginal.

Type de culture	Surfaces en Ha	Proportions
Estives et landes	27 437,54	81,72 %
Fourrage	2 032,80	6,05 %
Prairies permanentes	1 741,38	5,19 %
Prairies temporaires	1 110,89	3,31 %
Autres céréales	494,09	1,47 %
Orge	468,08	1,39 %
Divers	149,24	0,44 %
Blé tendre	124,27	0,37 %
sans production	6,64	0,02 %
Légumes ou fleurs	4,44	0,01 %
Légumineuses à grains	3,40	0,01 %
Vergers	0,57	0,00 %
Fruits à coque	0,41	0,00 %
TOTAL	**33 573,75**	**100 %**

Tableau 26 : Répartition des surfaces agricoles recensées au RPG 2017.

Concernant l'épandage, selon la CCGCC, seule la commune de Hures la Parade (p. 138) est concernée par l'épandage des boues. La surface totale épandage s'élève à 32,34 ha répartis sur 37 parcelles. Au moment de la finalisation du présent rapport, nous n'avons pas réussi à obtenir de confirmation de la chambre d'agriculture qu'il s'agit bien de la seule zone concernée par un épandage officiel sur le causse Méjean. Les futurs plans d'épandage des boues devront prendre en compte les résultats de cette étude relatifs à la vulnérabilité intrinsèque de la ressource et à la délimitation des bassins d'alimentation des systèmes karstiques captés (Castelbouc/Estivants, Moulin de Pélatan, Douzes).

Le dernier recensement agricole date de 2010 mais selon la chambre d'agriculture, ce territoire n'a pas connu de transformation marquée de ses pratiques de culture et d'élevage. Contrairement au nord du département qui a connu un basculement de la production de lait au profit de la production de viande, le causse est resté très laitier. Le tableau suivant présente les chiffres de 2010 du recensement agricole concernant l'élevage pour les principales communes de la zone d'étude.

Communes	Anciennes communes	Brebis laitières	Brebis nourrices	Vaches nourrices	Chèvres	Poulets et coqs
Meyrueis		2 109	20 108	96	262	36
Massegros Causses Gorges	Saint-Georges-de Levejac	7 207	s	s	s	s
Hures La Parade		2 090	2 086	s	s	s
Gorges du Tarn Causses	Sainte Énimie	3 498	s			
Mas Saint-Chély		1 236	2 236			25
Vebron			3 114	47	217	47
La Malène		1 616	s	s		
Gorges du Tarn Causses	Montbrun	s	1 551	s	s	s
Fraissinet de Fourques			1 302			
Cans et Cévennes	Saint-Laurent-de Trèves		1 073	95		31
Veyreau		992	s			
Massegros Causses Gorges	Les vignes	857				
Florac			485	93		
Gatuzières			s		s	
Gorges du Tarn Causses	Quézac		s		s	s
Le Rozier						
Saint-Pierre-les-Tripiers		s	s	s		s

s : donnée non diffusée par respect du secret statistique
Source : recensement-agricole.agriculture.gouv.fr

Tableau 27 : Répartition des cheptels par nombre de têtes.

La Figure 79 permet de visualiser la répartition du cheptel de la zone d'étude entre les différentes communes. Il s'agit d'une représentation géographique du Tableau 27. La donnée est disponible à l'échelle de la commune seulement. Les diagrammes présentés sur la figure sont donc localisés sur le centroïde du territoire communal, et il n'est pas possible de préciser la localisation des fermes auxquelles sont rattachées les bêtes recensées.

Sur cette même figure sont reportés les bâtiments agricoles. L'identification des bâtiments agricole est intéressante car il s'agit de points où sont réunies les bêtes lorsqu'elles ne sont pas en pâture. Néanmoins, la classification « bâtiment agricole » de la base de données BD topo de l'IGN ne précise pas si le bâtiment abrite ou non des animaux d'élevage. L'équipe d'étude n'a pas trouvé de source de données permettant d'identifier le cheptel associé à chaque bâtiment.

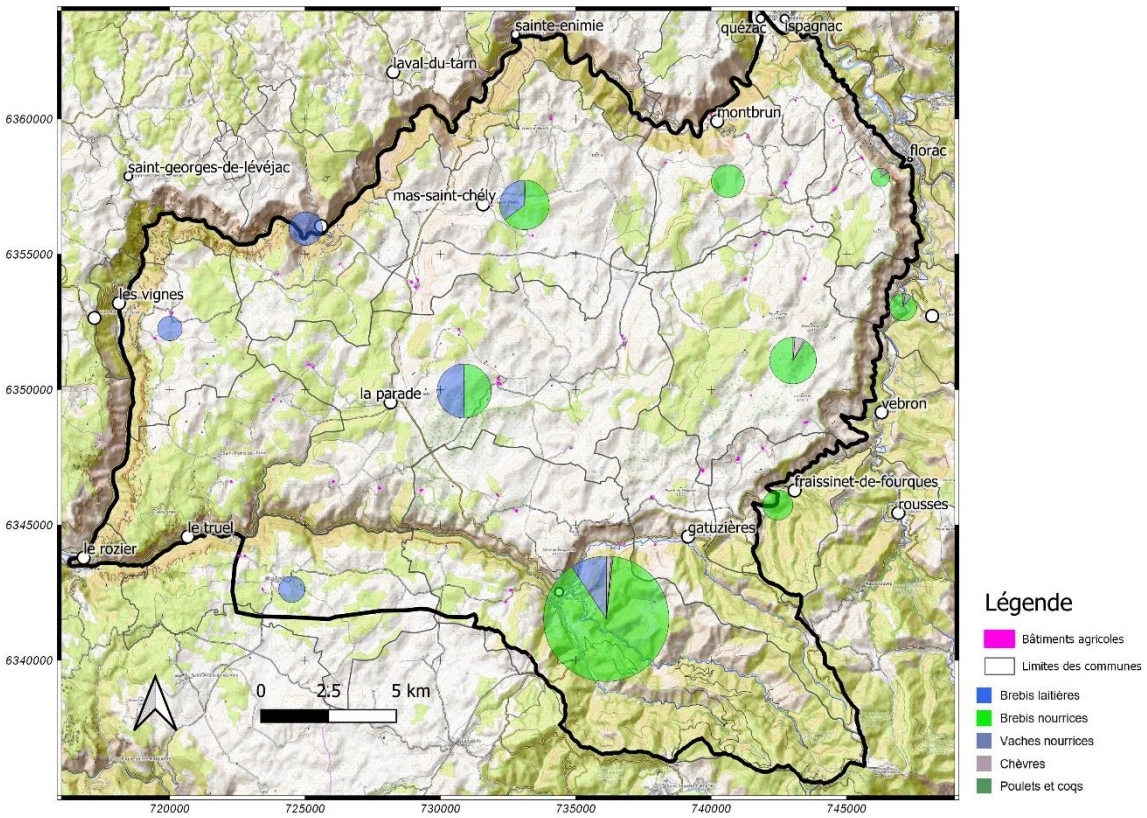


Figure 79 : Répartition des cheptels et localisation des bâtiments agricoles – la taille des diagrammes est proportionnelle au nombre total de têtes (Source : recensement-agricole.agriculture.gouv.fr).

Une analyse détaillée des pratiques agricoles de la zone a été réalisée dans le cadre de la production du document d'objectifs (DOCOB) du site Natura 2000 « Causse Méjean » FR 9101379 (Volume 1, Inventaire et analyse de l'existant, Enjeux et objectifs, Décembre 2011). Selon le DOCOB, « 50 % des éleveurs enquêtés expliquent l'importance grandissante de l'élevage par la diminution de la main d'œuvre et l'agrandissement des surfaces des exploitations. Certains reconnaissent l'abandon des parcelles les moins productives à cause d'une colonisation rapide par le Pin sylvestre et/ou le Pin noir d'Autriche issu des plantations forestières. »

Depuis 1993, un élevage de chevaux de Przewalski est également présent sur le territoire grâce à l'association Takh, dont l'objectif est la réintroduction d'individus de cette race de chevaux sauvages en voie de disparition dans leur pays d'origine : la Mongolie.

Il existe plusieurs forêts sur le causse. Les forêts du causse Méjean sont majoritairement détenues par des propriétaires privés et le reste est détenu et géré par l'État via l'ONF. La gestion des forêts est un enjeu important pour la préservation ou la restauration de leurs fonctionnalités. La réalisation de futaie irrégulière permet de maximiser les services écosystémiques fournis par la forêt (biodiversité, paysage, protection des sols et des ressources en eaux souterraines, stockage de carbone, production de bois…). La forêt domaniale de l'Aigoual est différente des forêts du Causse car elle est gérée en libre évolution, ce qui limite l'aléa de contamination des sols et du sous-sol lié aux déplacements d'engins forestiers.

Durant les 10 dernières années les surfaces de pins sylvestres des forêts privées ont été exploitées sans replantation. La localisation des forêts gérées par l'ONF (source : ONF, Agence de Lozère) est reportée sur la Figure 79.

Il y a sur le causse un enjeu relatif à la gestion des forêts sectionnelles (boisements spontanés). Selon les textes en vigueur, ces nouveaux boisements devraient être remis en gestion à l'ONF mais dans cette situation, les terres ne peuvent plus revenir à l'agriculture. Les habitants des sections de commune veulent garder le contrôle sur leurs sections, y compris sur les forêts. N'ayant pas été entretenus, ces boisements n'ont cependant que peu de valeur pour la sylviculture.

c) Activités industrielles et commerciales

L'annexe 4 présente un tableau détaillé des principales activités recensées et la Figure 80 présente leur localisation.

L'exploitation de la base de l'inventaire historique des sites industriels et activités de service (BASIAS) fait apparaitre 47 sites sur la zone d'étude. Lorsque les coordonnées géographiques d'un site n'étaient pas précisées, la localisation a été approximée par l'utilisation des autres informations disponibles dans la base (nom de lieu-dit, nom d'établissement, nom de rue…).

Meyrueis comporte à la fois le plus grand nombre et la plus grande diversité d'activités recensées sous la base BASIAS. Sur cette commune, les activités recensées sont au centre-ville ou relativement proche du centre-ville. Hors situation accidentelle, ces sites ne devraient pas être des sources de pollution.

Aucun site de la base de donnée BASOL des sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif, n'a été identifié sur la zone d'étude.

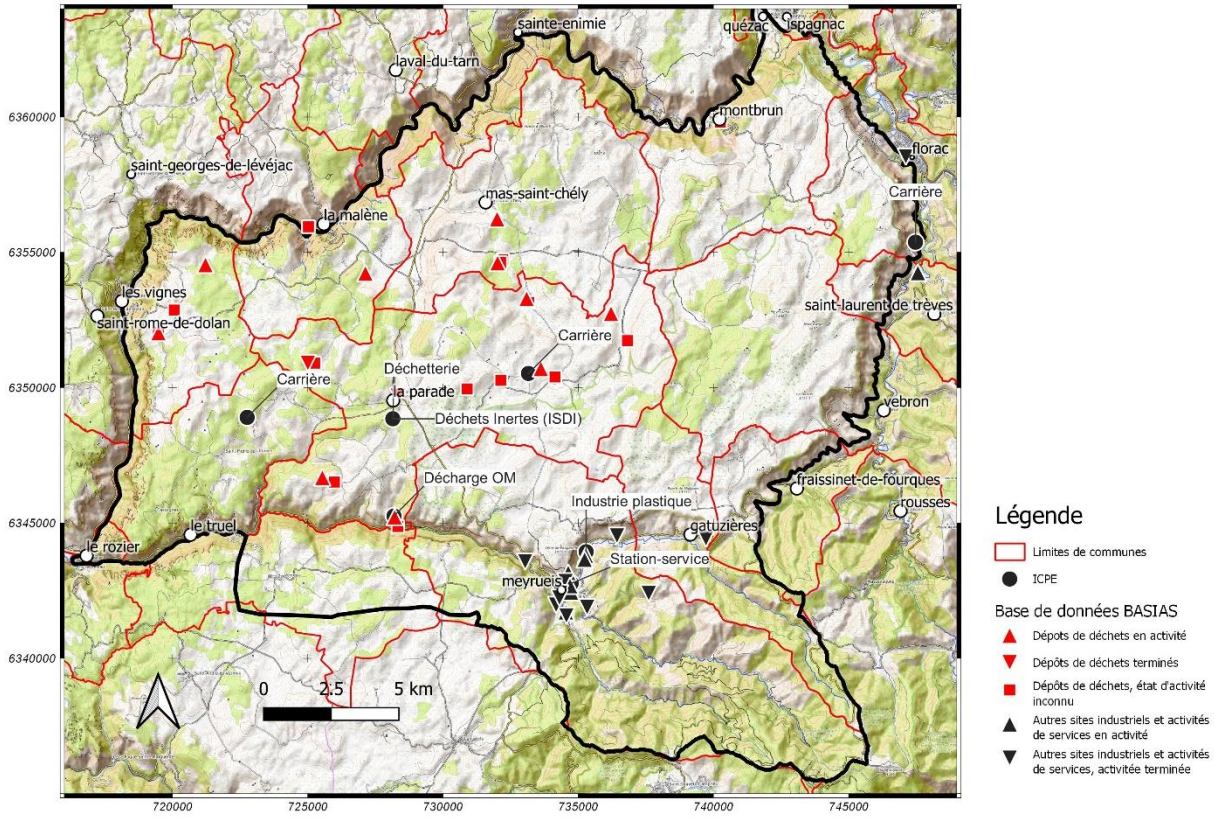


Figure 80 : Localisation des principales activités industrielles et commerciales, liste des ICPE et données de la base BASIAS.

Les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) de la zone d'étude ont été recensées via la base de données accessible en ligne et complété par des échanges directs avec la DDCSPP Lozère et la DREAL. L'annexe 4 contient un tableau qui présente l'ensemble des ICPE recensées. Parmi les huit sites recensés, trois concernent la gestion des déchets et sont donc abordés dans le sous-chapitre suivant.

Il existe une carrière à l'arrêt et deux carrières en fonctionnement sur la zone d'étude ; l'une, sur le territoire de Hure-la-Parade, est sous le régime d'autorisation, alors que l'autre, sur le territoire de Saint-Pierre-des-Tripiers, exerce sous le régime déclaratif. Les deux autres ICPE sont situées à Meyrueis ; il s'agit d'une station-service et d'une entreprise industrielle de transformation de plastique. Dans le cadre d'un fonctionnement normal, les ICPE ne sont pas des sources de pollution pour l'environnement. Néanmoins, en cas d'accident, le risque de pollution est souvent plus important pour ces activités.

d) Déchets

L'institution responsable de la gestion des déchets sur le territoire d'étude est le SICTOM des bassins du Haut-Tarn. Malgré les prises de contact répétées, il n'a pas été possible de collecter des données précises concernant les modalités de gestion des déchets (collecte, transfert et traitement). Il n'existe pas de site internet ou de documents en ligne offrant des informations relatives à la gestion des déchets sur le territoire.

La commune de Veyreau est située en dehors du territoire de gestion du SICTOM. Elle ne dispose pas de centre de stockage temporaire ou de traitement des déchets. Les déchets recyclables et les ordures ménagères produits sur la commune sont collectés et transférés à Millau.

Trois sites de gestion des déchets sont recensés parmi les ICPE et 28 dépôts de déchets apparaissent dans la base de données BASIAS (Cf. Annexe 4). Ces sites sont reportés sur la Figure 80. Tous les sites de déchets sont reportés, qu'ils soient reconnus en activité ou non.

Il existe un nombre relativement important de dépôts de déchets sur le causse (28 sites, dont 20 sites sont qualifiés comme étant « terminés », Figure 80). Ces dépôts incontrôlés constituent une source de pollution potentiellement chronique, et, concernant les dépôts historiques, des résidus peuvent encore être à l'origine de pollution dans l'aquifère. Hures-la-Parade, dont le territoire communal constitue 17 % de la surface de la zone d'étude rapprochée (cf. Figure 76), abrite la moitié des sites de dépôts de déchets recensés.

Aucun site n'a été identifié sur la base de donnée BASOL sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif.

e) Transport et assimilé

Sur les voies de circulation et les parkings, la pollution peut être accidentelle (fuite ou accident de la route) mais elle est principalement chronique. Lorsque l'eau de pluie lessive les surfaces, elle dissout les contaminants déposés sur le sol (pneumatiques (Zn), système de freinages (Cu), gaz d'échappement (HAP), corrosion de la carrosserie, fuites d'huile…) et les entraine vers le milieu récepteur.

La Figure 81 représente le réseau de transport et les parkings de la zone d'étude. Il s'agit des infrastructures identifiées sur la BD topo de l'IGN.

Sur le causse, la circulation routière est relativement faible, bien qu'il soit traversé par plusieurs routes départementales. Aucune donnée concernant le trafic moyen journalier n'a pu être récupérée pour illustrer cette affirmation. Les routes départementales qui encadrent le causse par les gorges sont principalement hors de la zone d'étude, sauf au niveau de Veyreau, Meyrueis, et Gatuzières.

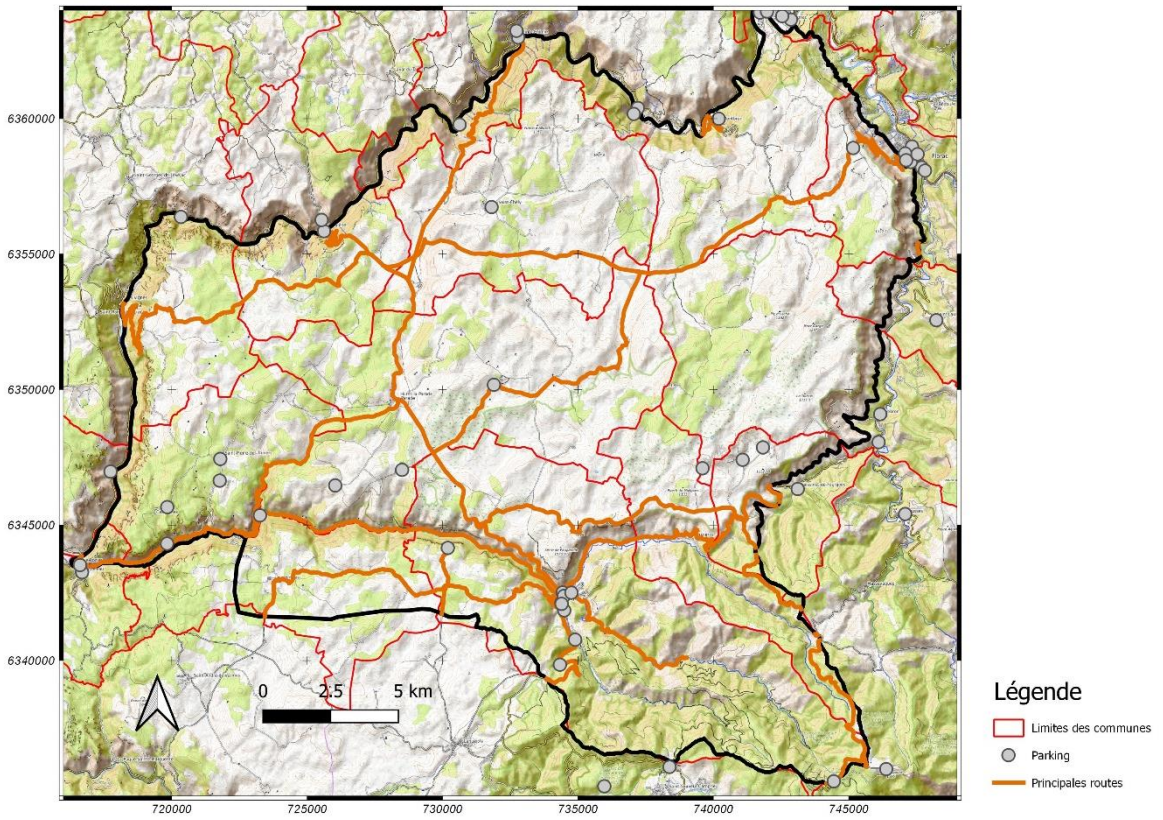


Figure 81 : Infrastructures de transport et parkings de la zone d'étude.

Trente parkings sont recensés par l'IGN sur la zone d'étude et dix-sept sont qualifiés de parkings touristiques. Le risque de pollution chronique associé à ces parkings dépend de leurs caractéristiques à savoir, leur fréquentation, leur surface, la nature des matériaux, et les modalités de rejet.

f) Tourisme et activités de loisir

Le Causse Méjean, les gorges qui l'encerclent et ses territoires voisins bénéficient, de par leur capital naturel principalement, d'une bonne attractivité touristique. La zone d'étude fait partie du parc national des Cévennes, elle est concernée par plusieurs sites Natura 2000 et plusieurs ZNIEFF[2]. Elle est également dans le site « Causses et Cévennes, paysage culturel de l'agro-pastoralisme méditerranéen » inscrits sur la liste du Patrimoine Mondial de l'UNESCO.

Selon les sources, on trouve sur la zone d'étude entre 8 et 13 campings, environ 25 logements touristiques de type hôtels, gîtes, et auberges, ainsi qu'un grand nombre de chambres d'hôtes et d'appartements meublés à louer.

Au moment de la finalisation de la présente étude, nous n'avons pas réussi à obtenir de données de fréquentation par le Comité départemental du tourisme de la Lozère.

Il existe sur le causse de nombreux sentiers de randonnée pédestre et VTT. Ces sentiers passent par les différents points de vue remarquables, ou par certains des nombreux points d'intérêts tels que des curiosités géologiques, des fermes touristiques, le site des chevaux de Przewalski ou des sites religieux.

[2] Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique

Globalement, la fréquentation touristique peut être la cause de pollution ponctuelle du fait de la hausse du nombre de véhicules motorisés en circulation et stationnés sur des parkings, ou du fait de la possible dissémination de déchets (emballages principalement) lors des visites ou activités.

Les nombreux avens et grottes font du causse un haut lieu de la pratique de la spéléologie. Lorsque les spéléologues circulent dans les cavités en eau, ils sont susceptibles de remettre en suspension des sédiments, et ainsi induire des modifications des paramètres physico chimiques de l'eau. Selon la nature des sédiments, les volumes en jeu, les débits et les usages de l'eau, cet impact de la pratique peut être problématique si un ou plusieurs captages d'alimentation en eau potable existent à l'aval ou dans les cavités connectées. La fédération française de spéléologie a sollicité le laboratoire EDYTEM de l'Université de Savoie pour développer un outil méthodologique d'évaluation des impacts de la spéléologie dans ces contextes particuliers. Ce Protocole d'Étude d'Impact de la Pratique Spéléologique sur les Eaux Karstiques, baptisé PEIPSEK, permet de réaliser des études objectives au cas par cas, basée sur des protocoles de terrain. Cette méthode n'a pas été mise en œuvre sur le Causse Méjean, sachant que la pratique de la spéléologie n'a jamais été mise en cause dans la contamination d'une source captée dans cette zone. Les réseaux les plus explorés et qui présentent un actif sont ceux du système karstique de Castelbouc, avec un accès depuis l'aval par l'un des exutoires. Ces explorations ne concernent pas la partie du réseau qui alimente les Estivants où se trouve le captage AEP. Il n'y a pas non plus d'avens régulièrement fréquentés sur les bassins d'alimentation de la source du Moulin de Pélatan ou du Pêcher, qui sont les deux autres captages AEP du Causse. Enfin, les résultats de cette étude montrent que les explorations de la Jonte souterraine en amont de la source des Douzes peuvent avoir un impact sur la qualité de l'eau captée au forage profond des Douzes. Le risque de contamination de la ressource par ce type d'activité reste néanmoins négligeable par rapport au risque lié à un dysfonctionnement de la STEP de Meyrueis, ou aux autres activités anthropiques sur le bassin amont de la Jonte. À cela s'ajoute la fréquentation de l'aven Armand, et les déplacements de véhicules associés sur le parking, puisque les eaux drainées par cet aven rejoignent également le forage profond des Douzes (cf. résultat du traçage T13 en complément du traçage décrit dans l'Annexe 5).

Il existe plus de 300 voies d'escalade dans les Gorges de la Jonte et plus de 350 dans les gorges du Tarn. Le risque de pollution associé à la pratique de l'escalade est comparable à celui de la randonnée (abandon de déchets, déjections humaines) mais s'y ajoute le dépôt sur la roche de poudre de magnésie (carbonate de magnésium), utilisée par les grimpeurs pour réduire l'humidité des mains causée par la transpiration et ainsi augmenter l'adhérence sur les prises. La composition chimique de la magnésie n'est pas de nature à perturber la qualité des eaux.

Il existe sur le causse, plus précisément sur la plaine de Chanet, un aérodrome à usage restreint, qui accueille donc peu de trafic de l'extérieur, et qui est principalement utilisé pour le vol en planeur. L'aérodrome de Florac/Sainte-Énimie (Chanet) présente un risque de pollution accidentel assez faible compte tenu de son très faible trafic. Une cuve enterrée pouvant contenir 5 000 litres d'essence pour avion y est recensée.

Au sud-est de la zone d'étude, sur le territoire de la commune de Meyrueis se trouve la station Alti-Aigoual, qui propose des activités d'été (VTT, équitation, accrobranche…) et d'hiver (sports de glisse, luge, randonnée en raquette…). Il s'agit d'une petite station dont la fréquentation hivernale est très dépendante des conditions d'enneigement. Les meilleures journées de weekend, environ 2 000 forfaits sont vendus. La fréquentation annuelle est très variable avec un record de fréquentation l'année 2008/2009 où 67 000 forfaits ont été commercialisés.

En conclusion, bien que la fréquentation touristique de la zone d'étude soit importante, le risque de pollution se limite à des pollutions ponctuelles d'origine accidentelle, ou induites par le lessivage de surfaces imperméabilisées souillées par des pics de fréquentation (parkings associés à des points très fréquentés).

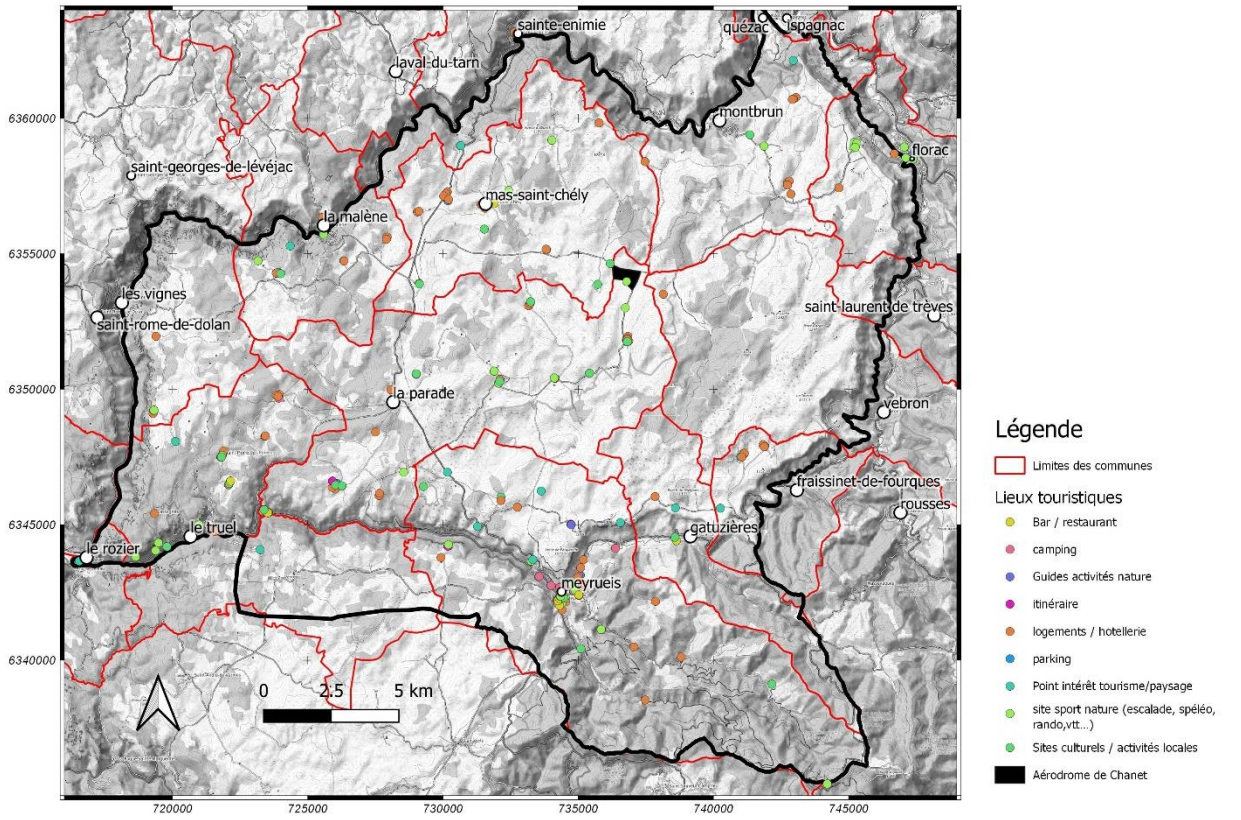


Figure 82 : Sites d'intérêt et d'accueil touristique.

7.3. CROISEMENT VULNÉRABILITÉ/PRESSION/ÉTAT QUALITATIF

Les pressions anthropiques restent relativement faibles et marginales sur la zone d'étude et concernent pour l'essentiel les activités agricoles (pollution diffuse essentiellement), les transports le long des axes routiers (pollution accidentelle ponctuelle ou chronique sur un linéaire), et les contaminations microbiologiques liées aux rejets de STEU (pollution chronique), notamment pour le système des Douzes/Maynial en aval de la STEU de Meyrueis. Plus localement, concernant les risques de contamination accidentelle et ponctuelle, il convient évidemment de mieux contrôler les dépôts de déchets de toute nature dans les avens, notamment sur le territoire de la commune de Hures-la-Parade (Figure 80), ainsi que le stockage d'intrants agricoles à proximité.

Les paragraphes suivants localisent plus précisément les secteurs concernés, en comparant les informations relatives aux pressions, à la vulnérabilité et à l'état qualitatif de la ressource en eau.

7.3.1. Activités agricoles

Concernant les risques de contamination liée aux activités agricoles, les cultures céréalières ou pour le fourrage sont demandeuses d'intrants azotés, et peuvent donc être à l'origine d'une contamination en nitrates des sols, puis des eaux souterraines. Il s'agit de petites parcelles réparties à la surface du Causse, ce qui rend ce type de pression anthropique relativement marginal (Figure 78). On note cependant une parcelle de plus grande superficie (23 ha) dans la dépression de Mativet (blé tendre), complétée par les parcelles cultivées pour d'autres céréales dans la dépression du paléo-poljé de la Fajole. On dénombre également une densité d'exploitation agricole un peu plus importante dans ce secteur (La Fajole, Mativet, Mercoire, Les Champs, Cros-Garnon, Valbelle, etc.) relativement au reste du Causse Méjean.

Il est donc possible que ces activités agricoles soient à l'origine des teneurs plus élevées en nitrates observées sur le système karstique du Moulin de Pélatan et du Pontet (Figure 32 p.61), ainsi qu'une plus grande présence de coliformes sur les suivis ADES au captage AEP du Moulin de Pélatan (Tableau 14 p.63). La carte suivante permet de superposer les informations relatives aux pressions agricoles, en ciblant les cultures céréalières et le fourrage, à la carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique dans ce secteur. Seuls les pixels de la carte de vulnérabilité concernés par ce type d'usage du sol, avec une zone tampon de 50 m, sont conservés, afin d'identifier les secteurs présentant un risque vis-à-vis de la pollution de la ressource en eau. Les bâtiments agricoles y sont également reportés.

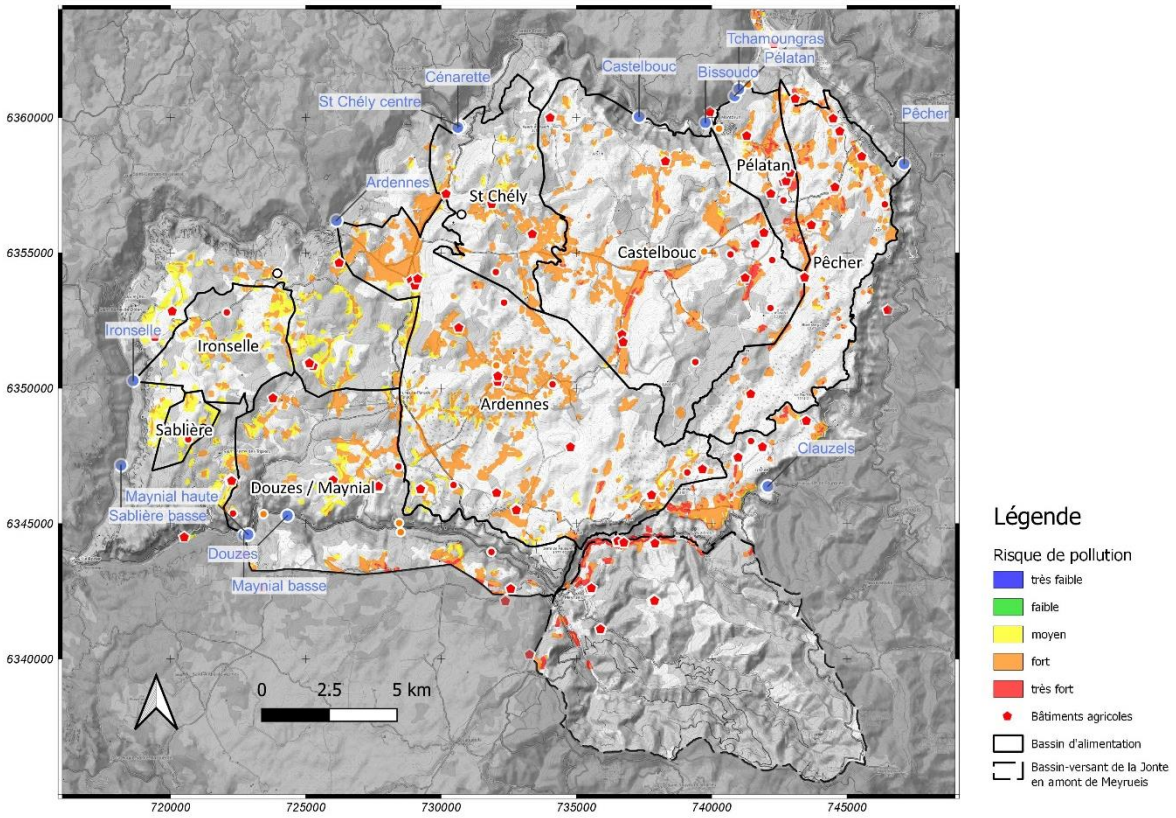


Figure 83 : Cartographie du risque de pollution de la ressource en eau souterraine lié aux activités agricoles.

Cette carte de risque de pollution de la ressource par les activités agricoles met bien évidence des secteurs de risque fort à très fort constituant une part importante du bassin d'alimentation du système karstique du Moulin de Pélatan. Une analyse identique peut-être menée au sud de Gally et de l'Hom dans le secteur de Nîmes le Vieux, avec un drainage des eaux probable vers la source des Clauzels.

Cette source présente également une teneur en nitrates légèrement supérieure au bruit de fond naturel, et une mauvaise qualité microbiologique des eaux par rapport aux autres exutoires du Causse, ce qui peut être la conséquence de l'utilisation d'un amendement organique des sols (cf Tableau 14, p.63). Enfin, la Figure 32 (p.61) met également en évidence une légère anomalie en nitrates aux sources de Saint-Chély/Cénarette et des Ardennes, ce qui peut être attribuée aux activités agricoles dans le secteur de Mas Saint-Chély-Mas de Val et de la plaine de Carnac.

L'élevage peut également être source de nitrates dans les eaux souterraines, mais les informations relatives à cette activité restent à l'échelle communale (Figure 79), ce qui ne permet pas de bien croiser cette information avec la carte de vulnérabilité. La localisation plus précise des bergeries permettrait de mieux estimer l'impact de cette activité sur la qualité des eaux souterraines. La commune le plus concernée reste Meyrueis, en amont des pertes de la Jonte, et donc en lien avec le système des Douzes/Maynial.

7.3.2. Transport

Pour les **risques de contamination associés au transport routier**, le report des principales routes (Figure 81) sur la carte de vulnérabilité de la Figure 75 permet de mettre en avant trois secteurs représentés sur les cartes A, B et C de la Figure 84. L'interprétation en termes de risque revient à décrire la vulnérabilité à proximité immédiate de ces tronçons de route sélectionnés selon l'importance du trafic (sélection proposée par la BD Topo® de l'IGN).

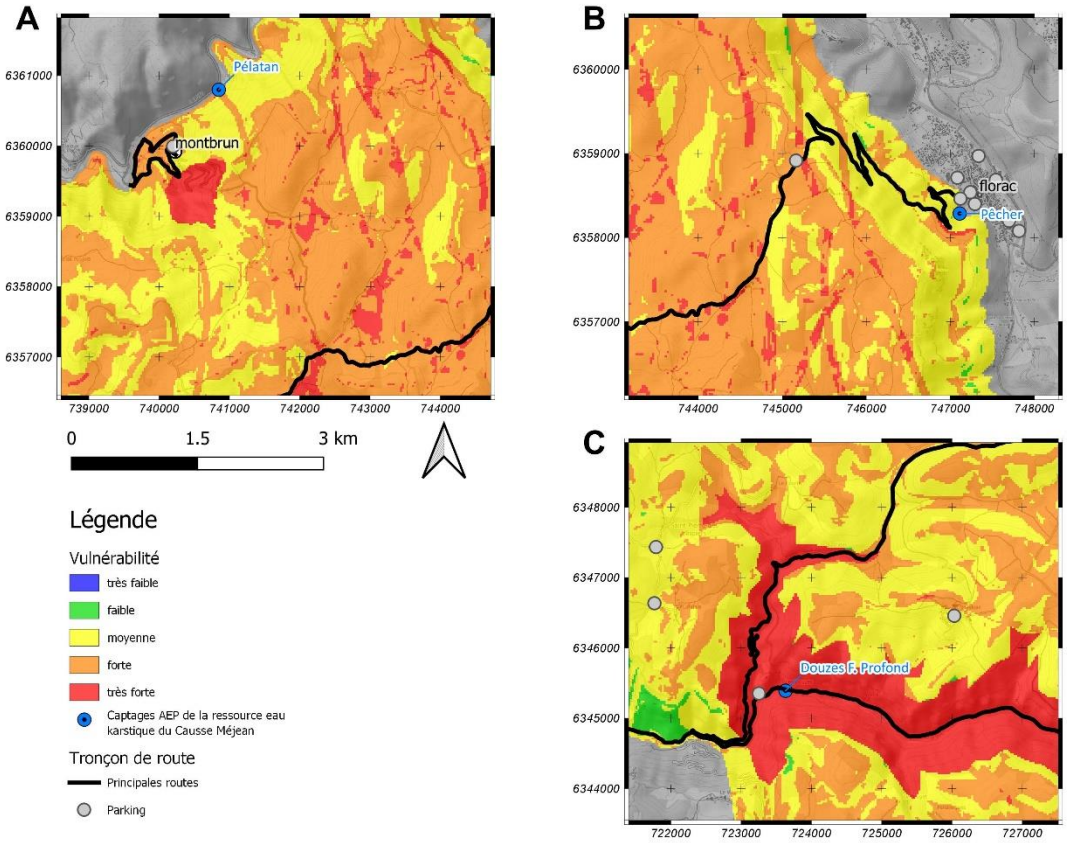


Figure 84 : Report des principales routes sur la carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique, zoom sur trois secteurs de la zone d'étude – A : Montbrun, B : Florac et C : Ravin des Bastides

La carte B de cette figure met en évidence un risque plus élevé au droit de la source du Pêcher le long de la route qui mène au col de Pierre Plate (D16). Bien que la zone de très forte vulnérabilité soit localisée en amont de la route à proximité immédiate du Pêcher, un travail complémentaire permettant de mieux localiser les modalités d'infiltration des eaux de ruissellement vers la source lors de forte pluies serait nécessaire pour préciser la spatialisation de la vulnérabilité à ce niveau. La carte A met en avant un risque plus élevé au droit de la source Bissoudo à Montbrun au sein du système karstique du Moulin de Pélatan. Bien que moins fréquentée et donc non identifiée comme axe principal sur la Figure 81 et la Figure 84-B, la route D68 qui rejoint le Causse depuis Montbrun traverse une zone de très forte vulnérabilité. À cela s'ajoute pour la partie karstique la route qui remonte la Jonte (D996) à partir du Hameau du Maynial, ainsi que celle qui remonte le ravin des Bastides depuis le Maynial jusqu'au hameau des Bastides (D63), représentée sur la carte C de la Figure 84. Dans le bassin versant connexe de la Jonte les routes qui longent la Jonte et ses affluents à l'amont de Meyrueis (Figure 81) confèrent également un risque de contamination plus élevé de la ressource en eau au système des Douzes/Maynial.

7.3.3. Assainissement

Concernant les **risques associés à la gestion des eaux usées** (qualité microbiologique), on notera sur le Causse Méjean la présence de deux lagunages de très faible capacité (cf. Figure 77) dans un secteur de forte vulnérabilité, et surtout les rejets de la station d'épuration de Meyrueis localisés sur une zone de très forte vulnérabilité du système karstique des Douzes/Maynial, en amont hydraulique du captage profond des Douzes. Une recherche de marqueurs de l'origine de l'eau issue de rejets de STEU pourrait être proposée aux exutoires de ces systèmes, ainsi qu'au captage profond des Douzes, notamment à partir d'anomalies Gadolinium sur les profils de terre rare (Rabiet, 2006), ou d'anomalies sur les teneurs en nutriments (ammonium, phosphore).

7.3.4. Synthèse des risques de pollution de la ressource en eau par système karstique

Une analyse du risque de pollution de la ressource est proposée ci-dessous sous la forme de tableaux de synthèse pour chaque système karstique étudié. La méthode consiste à décrire de manière globale la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau pour chaque système, puis d'identifier et de caractériser les pressions anthropiques qui s'exercent sur son bassin d'alimentation. Une note relative à chaque type de pression est attribuée selon trois classes à l'échelle du système karstique en interprétant à l'échelle du système karstique les résultats décrits précédemment :

- 0 : Pression anthropique Faible ou non identifiée ;
- + : Pression anthropique Moyenne ;
- ++ : Pression anthropique Élevée.

L'évaluation du risque de pollution pour chaque type de pression est réalisée selon le tableau suivant, afin de maintenir a minima un niveau de risque moyen dès lors que la vulnérabilité est forte :

		Vulnérabilité				
		Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Pression	Faible (0)	Faible (0)	Faible (0)	Faible (0)	Moyen (+)	Moyen (+)
	Moyenne (+)	Faible (0)	Faible (0)	Moyen (+)	Élevé (++)	Élevé (++)
	Élevée (++)	Moyen (+)	Moyen (+)	Élevé (++)	Élevé (++)	Très élevé (+++)

Tableau 28 : Définition du risque de pollution à l'échelle des systèmes karstiques par le croisement de la vulnérabilité intrinsèque et des pressions.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

SYSTÈME KARSTIQUE DU PÊCHER

RESSOURCE CAPTEE	Oui – captage AEP de la source du Pêcher					
VULNÉRABILITÉ	Forte, localement très forte le long des accidents associés au faisceaux de Montmirat et de Meyrueis					
TYPE PRESSION	Assainissement	Agricole	Industrielle et commerciale	Déchet	Transport	Tourisme
DESCR. PRESSION	**-**	Cultures céréalières / fourrage	**-**	**-**	**-**	**-**
NOTE PRESSION	**0**	**+**	**0**	**0**	**0**	**0**
RISQUE	**+**	**++**	**+**	**+**	**+**	**+**

Tableau 29 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique du Pêcher.

SYSTÈME KARSTIQUE DU MOULIN DE PÉLATAN

RESSOURCE CAPTEE	Oui – captage AEP du Moulin de Pélatan					
VULNÉRABILITÉ	Forte, localement très forte dans les dépressions en tête de bassin (paléo-poljes) et sur le versant alimentant les pertes d'écoulement de surface en amont de Monbrun (Bassin versant des pertes du Pont-de-Marie)					
TYPE PRESSION	Assainissement	Agricole	Industrielle et commerciale	Déchet	Transport	Tourisme
DESCR. PRESSION	**-**	Cultures céréalières / fourrage	**-**	**-**	Route d'accès au Causse depuis Montbrun	**-**
NOTE PRESSION	**0**	**+**	**0**	**0**	+	**0**
RISQUE	**+**	**++**	**+**	**+**	**++**	**+**

Tableau 30 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique du Moulin de Pélatan.

SYSTÈME KARSTIQUE DE CASTELBOUC (+ ESTIVANTS)

RESSOURCE CAPTÉE	Oui – captage AEP des Estivants					
VULNÉRABILITÉ	Forte, localement très forte dans les dépressions et à proximité des failles majeures					
TYPE PRESSION	Assainissement	Agricole	Industrielle et commerciale	Déchet	Transport	Tourisme
DESCR. PRESSION	**-**	Cultures céréalières / fourrage	**-**	**-**	-	Aérodrome du Chanet
NOTE PRESSION	**0**	**+**	**0**	**0**	**0**	**+**
RISQUE	**+**	**++**	**+**	**+**	**+**	**++**

Tableau 31 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de Castelbouc (captage des Estivants).

SYSTÈME KARSTIQUE DE SAINT CHÉLY-CÉNARETTE						
RESSOURCE CAPTÉE	Non					
VULNÉRABILITÉ	Moyenne, localement forte dans la partie amont du bassin (Mas-Saint-Chély, Mas de Val, Le Buffre)					
TYPE PRESSION	Assainissement	Agricole	Industrielle et commerciale	Déchet	Transport	Tourisme
DESCR. PRESSION	2 lagunages	Elevage brebis et cultures céréalières / fourrage	-	-	Route d'accès au Causse depuis Saint Enimie	-
NOTE PRESSION	**+**	**+**	**0**	**0**	+	**0**
RISQUE	**+**	**+**	**0**	**0**	**+**	**0**

Tableau 32 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de Saint-Chély/Cénarette.

SYSTÈME KARSTIQUE DES ARDENNES						
RESSOURCE CAPTÉE	Non					
VULNÉRABILITÉ	Moyenne, à forte dans la plaine de Carnac et dans la partie amont du bassin (Hures, Drigas)					
TYPE PRESSION	Assainissement	Agricole	Industrielle et commerciale	Déchet	Transport	Tourisme
DESCR. PRESSION	Epandage des boues de la STEU de Saint Enimie	Elevage brebis et cultures céréalières / fourrage	-	Dépôts de déchets	Route d'accès au Causse	-
NOTE PRESSION	**+**	**+**	**0**	**+**	**+**	**0**
RISQUE	**+**	**+**	**0**	**+**	**+**	**0**

Tableau 33 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique des Ardennes.

SYSTÈME KARSTIQUE DE L'IRONSELLE						
RESSOURCE CAPTÉE	Non					
VULNÉRABILITÉ	Moyenne, localement forte dans les dépressions					
TYPE PRESSION	Assainissement	Agricole	Industrielle et commerciale	Déchet	Transport	Tourisme
DESCR. PRESSION	**-**	Cultures céréalières / fourrage	**-**	**-**	**-**	**-**
NOTE PRESSION	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
RISQUE	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Tableau 34 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de l'Ironselle.

SYSTÈME KARSTIQUE DES DOUZES / MAYNIAL						
RESSOURCE CAPTÉE	Oui, captage AEP du forage profond des Douzes					
VULNÉRABILITÉ	Forte, localement très forte le long de la faille de la Parade, du ravin de la Bastide, de la vallée de la Jonte, et dans le bassin-versant de la Jonte en amont des pertes (Meyrueis)					
TYPE PRESSION	Assainissement	Agricole	Industrielle et commerciale	Déchet	Transport	Tourisme
DESCR. PRESSION	STEU MEYRUEIS	Elevage brebis	Sites industriels en amont de Meyrueis	Dépôts de déchets dont ICPE	Réseau routier le long de la Jonte et autour de Meyrueis	Accès Aven Armand, hébergements à Meyrueis
NOTE PRESSION	**++**	**+**	**+**	+	**+**	**+**
RISQUE	**+++**	**++**	**++**	**++**	**++**	**++**

Tableau 35 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique des Douzes/Maynial (captage des Douzes).

Cette analyse fait ressortir les risques suivants, identifiés par le symbole +++ dans les tableaux précédents :

- un risque élevé d'une pollution des eaux d'origine agricole qui reflète essentiellement la très forte vulnérabilité intrinsèque de la ressource pour les systèmes karstiques du Pêcher, du Moulin de Pélatan et de Castelbouc ;
- un risque élevé pour tous les types de pression, et très élevé pour le risque de pollution associé aux rejets d'eaux traitées par la STEU de Meyrueis pour le système karstique des Douzes/Maynial. Le captage profond des Douzes ne permet pas de s'affranchir de ce risque compte tenu des résultats de l'analyse hydrochimique (cf. Paragraphe 4) et du résultat de l'essai de traçage présenté dans l'annexe 5.

Il ressort également que le système karstique de l'Ironselle ne présente qu'un risque faible de pollution, quel que soit le type de pression anthropique considéré. Les autres systèmes karstiques présentent essentiellement un risque qualifié de moyen en ce qui concerne les pollutions d'origine agricole.

8. Conclusion et perspectives

8.1. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR L'ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DU CAUSSE MÉJEAN

Ce rapport présente en détail les résultats de l'étude hydrogéologique du Causse Méjean menée entre 2017 et 2020, en complément du rapport RP-68189-FR (Husson *et al.*, 2020) dédié à l'étude géologique et de karstogenèse. Cette étude s'appuie sur le croisement de méthodes hydrodynamiques, hydrochimiques et de traçages artificiels pour comprendre et décrire le fonctionnement hydrogéologique des principaux systèmes karstiques du Causse Méjean. L'ensemble des résultats acquis permet de décrire les modalités de transfert de l'eau depuis la zone d'infiltration jusqu'aux exutoires principaux ou secondaires de chaque système, et de proposer une délimitation des bassins d'alimentation. L'analyse de la structure et du fonctionnement hydrogéologique des systèmes karstiques du Causse Méjean permet de proposer une cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la ressource en eau karstique, qui est croisée avec les informations relatives aux pressions anthropiques pour cibler les secteurs qui présentent un risque de pollution de la ressource. Une carte hydrogéologique de synthèse présentant les axes de drainage majeurs a également été produite ; cette carte permet de revoir l'organisation des écoulements souterrains du Causse Méjean.

L'étude de bilan hydrologique sur l'ensemble des systèmes étudiés montre que la recharge à la surface du Causse par les précipitations est largement suffisante pour expliquer les volumes d'eau écoulés par les différents systèmes karstiques étudiés. Une part non négligeable de cette recharge (de l'ordre de 30 %) pourrait même s'écouler vers d'autres exutoires, sur des exutoires non suivis pouvant être dans le lit du Tarn. Du point de vue hydrodynamique, on observe une évolution progressive du degré de karstification entre les systèmes les plus karstifiés à proximité du (paléo)contact cévenol (Pêcher, Pélatan) vers des systèmes peu fonctionnels comblés d'altérites (Ironselle).

Les informations relatives au traçage naturel complètent ce diagnostic. Toutes les sources drainant la partie est du Causse présentent un facies bicarbonaté calcique, avec une légère augmentation des sulfates en étiage à la source du Pêcher attribuée aux interactions eau/roche dans le réservoir (présence d'évaporites) ou lors du transfert à travers les marnes liasiques séparant l'aquifère jurassique supérieur de l'aquifère liasique inférieur. La dynamique physico-chimique, et notamment la dynamique de dilution qui accompagne les pics de crue, permet d'identifier un comportement très karstifié pour les systèmes du Pêcher, du Moulin de Pélatan, de Castelbouc et de Saint-Chély/Cénarette. Des faciès bicarbonatés calcique et magnésien s'observent vers l'ouest, en lien avec une lithologie plus dolomitique du réservoir, et de la zone d'infiltration. La perméabilité et la porosité des résidus d'altération qui comblent les vides karstiques expliquent le comportement très inertiel de la source de l'Ironselle, avec un effet « piston » très marqué lors des crues mobilisant des eaux plus minéralisées contenues dans le réservoir. Le système des Ardennes, en position centrale sur le Causse présente des caractéristiques mixtes. Les signatures isotopiques du Sr montrent l'importance des interactions eau-roche avec les remplissages d'origine Cévenol dans l'endokarst pour les systèmes drainant la bordure est du Causse (Pêcher, Castelbouc, Ardennes), sans distinction entre le système du Pêcher drainant l'aquifère inférieur et les autres systèmes.

Les 22 opérations de traçages réalisées ont permis de revoir complètement l'organisation du drainage karstique depuis la surface du Causse Méjean, et ainsi valider et compléter du point de vue hydraulique la mise en place de la karstification proposée par l'étude de la karstogenèse.L'interprétation des courbes de restitution des traceurs et des Distribution des Temps de Séjour associées permet d'attribuer un nombre de Péclet relativement constant et proche de 40 pour l'ensemble des systèmes étudiés.

Cette valeur est caractéristique des phénomènes dispersifs observés sur les systèmes karstiques et traduit l'effet d'échelle linéaire qui relie la dispersivité macroscopique à la taille du système traçage (Bailly-Comte et Pistre, 2020). Les résultats des traçages ne mettent pas en évidence de circulations karstiques mieux organisées vers l'est du Causse. Au contraire, les traçages de l'aven de la Cheminée (T2a) ou de l'aven de Monbuisson n° 6 (T2b) mettent en évidence l'existence d'un réseau karstique très fonctionnel permettant de transporter le traceur avec peu de dispersion. Ces systèmes traçages sollicitent ici des réseaux karstiques très développés localement, issus de la vidange des altérites (fantôme de roche). Ces drains de grande taille permettent ainsi de drainer les compartiments du réservoir où les fantômes de roche sont toujours en place. Ces systèmes présentent ainsi un fonctionnement de type « double porosité » très marqué entre les systèmes de drains très transmissifs et les masses rocheuses comblés d'altérites plus capacitives.

Enfin, le résultat du traçage depuis l'aven Armand (T13) permet d'interpréter les résurgences du Maynial et des Douzes comme les exutoires d'un système karstique unique, alimenté par les pertes de la Jonte à hauteur de 60 % d'après les analyses isotopiques des stables de l'eau et du Sr. Les 40 % restant proviennent de la recharge sur le Causse Méjean, et notamment au niveau du bassin versant du ravin des Bastides, mais également de la recharge sur le Causse Noir, directement ou via les systèmes de perte/résurgence comme celui des Sourguettes. Les eaux prélevées au forage profond montrent que celui-ci capte la même ressource influencée par les pertes de la Jonte. Ce captage présente donc également une forte vulnérabilité vis-à-vis d'une contamination de l'eau de la Jonte, ce qui devrait faire l'objet d'un test de traçage ultérieur.

8.2. PERSPECTIVES

a) Réseau de mesure

Le réseau de mesure mis en place n'avait pas vocation à être pérennisé. Il semble cependant pertinent de maintenir des observations sur le système de Castelbouc puisque ce point appartient au réseau de suivi qualitatif des eaux souterraines. Par ailleurs, compte tenu des enjeux AEP pour la ville de Florac et de la facilité d'accès, il est proposé de maintenir le suivi hydrologique de la source du Pêcher. Il convient alors de réaliser des jaugeages complémentaires, notamment en hautes eaux pour le système de Castelbouc, afin d'améliorer l'estimation des débits de ses différents exutoires. Enfin, le suivi de la Jonte au Rozier sera maintenu, et pourra également servir à mieux comprendre la propagation des crues dans la Jonte et le rôle du karst sur l'amortissement ou l'amplification de celles-ci. Des jaugeages complémentaires, notamment en hautes eaux, seront également nécessaires.

b) Analyses hydrochimiques

La recherche de marqueur d'eau provenant de rejet de station d'épuration permettrait de mieux qualifier la vulnérabilité du captage profond des Douzes, en lien avec les rejets de la station de Meyrueis. Une recherche identique aux exutoires de Saint-Chély/Cénarette, et éventuellement en cas d'échecs aux exutoires de trop plein (grotte Grand-Duc (ou de Duganelle, BSS002BKZL) par exemple) et à la source des Ardennes permettrait de préciser les limites d'extension des bassins d'alimentation des sources, en complément d'essais de traçage. À la source du Pêcher, mais également sur les autres exutoires drainant le réservoir hettangien, une analyse isotopique du souffre et de l'oxygène des sulfates pour différentes conditions hydrologiques permettrait de mieux comprendre l'origine des sulfates, et ainsi mieux définir la contribution d'eau ayant ruisselé au contact des marnes liasiques.

c) Traçages

Si les 22 traçages réalisés permettent de mieux comprendre l'organisation spatiale du drainage karstique et de valider certaines hypothèses structurales et de karstogenèse, il reste des secteurs qui mériteraient d'approfondir les connaissances pour mieux définir les limites des bassins d'alimentation :

- **Secteur Est** : hormis le traçage T5, il n'a pas été possible de valider l'extension du bassin d'alimentation du Pêcher par traçage. Il n'existe cependant pas de points d'injection connus dans ce secteur. Il conviendrait par exemple d'identifier le devenir des eaux dans les dépressions telles que celle de Combebelle lors de fortes pluies, et de profiter d'un flux d'infiltration pour tenter une opération de traçage, ce qui nécessite une très grande disponibilité pour la réalisation d'une telle opération ;
- **Secteur Nord-Est** : une recherche de diffluence pourrait être tentée entre les systèmes de Pélatan et de Castelbouc en renouvelant le traçage T3a (Saut du Loup n° 2) en hautes eaux, pour identifier un éventuel drainage vers la source de Pélatan et/ou ses exutoires de trop-pleins (Bissoudo, BSS002BLCT). En cas de diffluence avérée, la même expérience pourrait être reconduite depuis l'aven des Aouglanets (BSS002BLBM), dont un traçage réalisé en 1978 par Maurin et reporté par Bérard (1987) aurait donné lieu à une restitution aux exutoires de Pélatan et de Bissoudo ;
- **Secteur Nord** : Mas Saint-Chély : À titre exploratoire, 2 kg d'uranine ont été versés le 9 septembre 2019 dans le lagunage situé entre Anilhac et Caussignac à l'ouest de Mas Saint-Chély, en attendant la possibilité de tracer l'aven Bancou. Les suivis aux sources de Saint-Chély et des Ardennes n'ont pas permis d'identifier le passage du traceur. Le devenir des eaux des lagunages reste ainsi relativement incertain, sachant que ce secteur est probablement très proche de la limite entres les bassins des Ardennes et de Saint-Chély ;
- **Secteur Nord-Ouest** : à l'ouest de Riesse, le devenir des eaux infiltrées reste incertain, et un drainage vers le Tarn selon une direction est-ouest est possible jusqu'aux différents exutoires du Pas-de-Soucy reste envisageable. Une campagne de recherche de sources par analyse de la conductivité de l'eau n'a pas permis de mettre en évidence de sources drainant le Causse Méjean entre la source de Galène en aval de la Malène et l'Ironselle. Il pourrait être intéressant de reconduire le traçage de l'aven de la Sompe à Rieisse en surveillant, en plus des Ardennes, de la Galène et de l'Ironselle, également les exutoires connus sous le Tarn ou en bordure du Tarn vers le Pas-de-Soucy ;
- **Secteur Sud, Jonte et forage des Douzes** : l'analyse hydrochimique permet d'identifier une grande similitude de facies chimique entre les eaux de la Jonte, de la résurgence des Douzes et du forage profond des Douzes. Quelques prélèvements réalisés sur le forage profond des Douzes lors du traçage T13 présentent des résultats positifs à l'uranine par analyse spectrale au laboratoire, mais l'évolution des intensités est assez incohérente et la possibilité d'une pollution ne peut être écartée. Un traçage des pertes des Douzes avec un suivi fluorimétrique sur les eaux pompées au forage profond des Douzes est prévu dans la continuité de cette étude.

d) Modélisation géologique 3D

Les interprétations structurales permettant de délimiter les systèmes karstiques, et notamment le système du Pêcher, pourraient être confrontées à l'interprétation d'un modèle hydrogéologique 3D en s'appuyant sur la méthode KARSYS (Malard *et al*., 2015), comme cela a pu être fait lors de l'étude hydrogéologique du Plateau de Sault (Bailly-Comte *et al*., 2018). Il deviendrait alors possible de mieux comprendre le rôle joué par les failles sur les déplacements verticaux des niveaux marneux (aquicludes), et ainsi de valider les hypothèses relatives à l'organisation du drainage karstique, notamment dans la zone d'infiltration de la zone amont des systèmes des Ardennes, Castelbouc, Moulin de Pélatan et du Pêcher.

9. Bibliographie

André, D. (1992) - Lozère des Ténèbres, Spéléo-Club de Lozère, 258p.

Bailly-Comte, V. et Pistre, S. (2011) - A physical explanation of the empirical relationship between modal time, mean residence time and peak concentration derived from tracer breakthrough curves. 9th Conference on Limestone Hydrogeology, 1 – 3 septembre 2011, Besançon.

Bailly-Comte, V., Ladouche, B., Allanic, C. *et al.* (2018) - Évaluation des ressources en eaux souterraines du Plateau de Sault - Amélioration des connaissances sur les potentialités de la ressource et cartographie de la vulnérabilité. Rapport final. BRGM/RP-67528-FR, 304 p., 196 fig., 76 tabl., ann. https://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-67528-FR.pdf

Bailly-Comte, V., Durepaire, X., Batiot-Guilhe, C. *et al.* (2018). In situ monitoring of tracer tests: how to distinguish tracer recovery from natural background. Hydrogeol J 26, 2057–2069. https://doi.org/10.1007/s10040-018-1748-8

Bailly-Comte, V. et Pistre, S., (2021). A parsimonious approach for large-scale tracer test interpretation. Hydrogeol J 29, 1539–1550. https://doi.org/10.1007/s10040-021-02327-x

Bailly-Comte, **V.** (2021) - Confirmation et impact des pertes de la Jonte sur le forage des Douzes, Rapport final BRGM/RP-70546-FR.

Bakalowicz M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doct. Sci. nat., Univ. P. et M. Curie, Paris-6, Géol. dyn. et Lab. souterrain CNRS, 269 p.

Bakalowicz, M., Mangin, A., (1980). L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques son identification. Mém. h. sér. Soc. géol. Fr. 11, 71–79.

Barbier,T. (2013). Réseau du Grand-Duc ou Duganelle, mémoire de cavité, brevet d'état d'éducateur sportif 1er degré de spéléologie, CREPS de Vallon Pont d'Arc, 59p.

BAUMAS (collectif), (2016). Explorations sous les causses 2000-2015, Publication du Comité Départemental de Spéléologie de l'Aveyron, 440p.

Bechelen, L. (2013). Pré-étude hydrogéologique du causse Méjean (Lozère), rapport de stage de AgroParisTech, Montpellier, 79p.

Bérard, P., (1987). Protection des captages AEP situés en terrains calcaires - Causses majeurs de la lozère . BRGM/87-SGN-163-LRO, 73 p.

Burke, W.H., Denison, R.E., Hetherington, E.A., Koepnick, R.B., Nelson, H. F. et Otto J.B. 1982. Variation of seawater $^{87}Sr/^{86}Sr$ throughout Phanerozoic time. Geology ; 10 (10): 516-519. https://doi.org/10.1016/0016-7037(74)90099-4

Craig, H. (1961) - Isotopic variations in meteoric waters. Science 133 p. 1702-1793.

Clark, I. et Fritz, P., (1997). Environmental Isotopes in Hydrogeology, Lewis, 328p.

Dörfliger, N. et Plagnes, P. (2009) - Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques – Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa, BRGM-ONEMA, rapport BRGM/RP-57527-FR, 105 pp., 55 ill., 4 ann.

Faure, G. (1986) - Principles of isotope geology : 2nd edition, 589 pp., John Wiley & Sons, Inc.

Hakim, M. et Bakalowicz, M. (2007). Significance and origin of very large regulating power of some karst aquifers in the Middle East. Implication on karst aquifer classification. Journal of Hydrology - J HYDROL. 333. 329-339. 10.1016/j.jhydrol.2006.09.003.

Husson, E., Le Goff, E., Camus, H. ***et al.*** (2018) - Étude géologique, géomorphologique et karstologique du Causse Méjean. Rapport final, BRGM/RP-68189-FR, 187 p., 121 fig., 3 ann.

Kreft, A. et Zuber, A., (1978). On the physical meaning of the dispersion equation and its solutions for different initial and boundary conditions. Chemical Engineering Science, 33(11): 1471-1480.

Ladouche B., Aquilina L., Doerfliger N. (2009) - Chemical and isotopic investigation of rainwater in southem France (1996-2002): potential use as input signal for karst functioning investigation, Journal of Hydrology, Vol. 367, Issues 1-2, p.150-164.

Lanini, S., Caballero, Y., Seguin, J.-J. *et al.* (2016). ESPERE—A Multiple-Method Microsoft Excel Application for Estimating Aquifer Recharge. Groundwater, 54: 155–156. doi:10.1111/gwat.12390.

Lanini S. et Caballero Y. (2015). Manuel utilisateur ESPERE version 1.5. Rapport BRGM/RP-65164-FR, 31 p.

Lanini S. (2020). Manuel utilisateur ESPERE version 2. Rapport BRGM/RP-69538-FR, 27 p.

Luhmann AJ, Covington MD, Peters AJ, *et al*. Classification of thermal patterns at karst springs and cave streams. *Ground Water*. 2011; 49(3):324-335. doi:10.1111/j.1745-6584.2010.00737.x.

Malard, A., Jeannin, P., Vouillamoz, J. *et al.* *(*2015). An integrated approach for catchment delineation and conduit-network modeling in karst aquifers: application to a site in the Swiss tabular Jura. *Hydrogeol J* **23,** 1341–1357 https://doi.org/10.1007/s10040-015-1287-5

Maloszewski, P., Zuber, A., (1982). Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers: 1. Models and their applicability. Journal of Hydrology, 57(3-4): 207-231.

Mangin, A., (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse Doct. ès. Sci., Université de Dijon, Dijon (1975).

Mangin, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. Journal of Hydrology, 67, p.25-43. https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90230-0.

Maréchal J.C., Ladouche B. (2006) : Fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la Fontaine de Nîmes en crue, Rapport final, BRGM/RP-54723-FR, 111 p., 77 illustrations, 1 annexe. https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54723-FR.pdf

Merlivat, L., et Jouzel, J., (1979). Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation, *J. Geophys. Res.*, 84(C8), 5029–5033, doi: 10.1029/JC084iC08p05029.

Meus, Ph., Käss, W. et Schnegg, P.-A., (2006). Background and detection of fluorescent tracers in karst groundwater. In: Duran JJ, Andreo B, Carrasco F (eds) Karst, climate change and groundwater, vol 18. Hidrogeologia y Aguas subterraneas, pp 65–75.

Mudarra M, Andreo B et Baker A., (2011). Characterisation of dissolved organic matter in karst spring waters using intrinsic fluorescence: relationship with infiltration processes. Sci Total Environ 409:3448–3462.

OFEG, (2002). Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie - Guide pratique - Groupe de travail Traçage de la Société Suisse d'hydrogéologie SSH - Rapports de l'OFEG, Série Géologie No 3 – Berne.

Plagnes V., (1997). Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II, Editions BRGM n°294, 376 p.

Quiers M, Batiot-Guilhe C, Bicalho C *et al.* (2013) Characterisation of rapid infiltration flows and vulnerability in karst aquifer using a decomposed fluorescence signal of dissolved organic matter. Environ Earth Sci 71:553–561. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2731-2

Rabiet, M. (2006) Contamination de la ressource en eau par les eaux usées dans un bassin versant Méditerranéen - Apport des éléments majeurs, traces et terres rares. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2006. Français. ⟨tel-00126551⟩

Rouquet L. (1976) Contribution à l'étude hydrogéologique de la région médiane des Grands Causses : gorges du Tarn et de la Jonte, causse Méjean, causse de Massegros. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, CERGA, Montpellier.

Schnegg P.-A et Le Doucen O., (2006). Multispectral Field Fluorometer for tracer tests in waters of high natural fluorescence. Conference: 3rd International Symposium on Karst, At Málaga (Spain).

Schnegg, P.A. et Thueler, L., (2012). Application of a multi-LED field fluorometer for simultaneous detection of hard to separate dye tracers and fluocapteurs. XI Congreso Latino-americano de Hidrogeologia, Catagena de Indias, August 19-24, 2012.

Subias, C. (2019). Avis hydrogéologique relatif à la définition des périmètres de protection du captage des Douzes, Captage des Douzes, 40p.

Thomas, C. et Thomas, C. (1981). Aperçu sur la spéléogénèse du Causse Méjean, in "Grands Causses", Annales des 6e et 7e congrès, pp. 29-57.

Annexe 1

Relations hauteur-débit : Jaugeage et courbes de tarage

Source du Pêcher

Date	H (cm)	Méthode	Q (l/s)
14/12/2016	92	Courantomètre	132
23/02/2017	101	Courantomètre	700
09/08/2017	85	Courantomètre	64
12/10/2017	83	Courantomètre	26
18/01/2018	128	Dilution uranine	3680

Jaugeages réalisés à la source du Pêcher

H (cm)	Q (m^3/s)	H (cm)	Q (m^3/s)	H (cm)	Q (m^3/s)
40	0.00	**90**	0.13	**140**	5.77
50	0.005	**100**	0.57	**150**	7.92
60	0.01	**110**	1.36	**160**	10.41
70	0.02	**120**	2.49		
80	0.035	**130**	3.96		

Courbe de tarage tabulée pour la station hydrologique du Pêcher

Source de Castelbouc

Date	H (cm)	Q	Méthode
15/12/2016	51	362	Courantomètre OTT Nautilus
12/01/2017	47.5	219	Courantomètre OTT Nautilus
27/04/2017	50	381	Courantomètre OTT Nautilus
08/08/2017	17.5	17.2	Courantomètre OTT Nautilus
06/02/2019	60	604	Dilution
27/02/2019	65	740	Dilution
13/02/2020	65	834	Dilution

Jaugeages réalisés à la source de Castelbouc 1

h (cm)	Q (m^3/s)	h (cm)	Q (m^3/s)	h (cm)	Q (m^3/s))
0	0.01	**50**	0.37	**100**	2.18
10	0.02	**60**	0.59	**120**	3.38
20	0.05	**70**	0.88	**140**	4.85
30	0.11	**80**	1.24	**160**	6.59
40	0.20	**90**	1.68	**180**	8.60

Courbe de tarage tabulée pour la source de Castelbouc 1

Source du Moulin de Pélatan

Date	H (cm)	Méthode	Q (l/s)
11/01/2017	0.8	Dilution de sel	55
03/03/2017	4.9	Dilution de sel	110
12/09/2017	-31.7	Dilution de sel	16
21/09/2017	-31.3	Dilution de sel	27
18/01/2018	29.1	Dilution de sel	890
26/09/2019	-32	Dilution de sel	20

Jaugeages réalisés à la source de Pélatan

H (cm)	Q (l/s	H (cm)	Q (l/s	H (cm)	Q (l/s	H (cm)	Q (l/s
-45.5	0	**-15.5**	0.0359	**14.5**	0.34	**44.5**	1.63
-44	5E-05	**-14**	0.0365	**16**	0.38	**46**	1.71
-42.5	1E-03	**-12.5**	0.0370	**17.5**	0.43	**47.5**	1.79
-41	2E-03	**-11**	0.0376	**19**	0.48	**49**	1.87
-39.5	2E-03	**-9.5**	0.0381	**20.5**	0.54	**50.5**	1.96
-38	3E-03	**-8**	0.0386	**22**	0.59	**52**	2.04
-36.5	4E-03	**-6.5**	0.0391	**23.5**	0.65	**53.5**	2.13
-35	5E-03	**-5**	0.0396	**25**	0.71	**55**	2.22
-33.5	1E-02	**-3.5**	0.0401	**26.5**	0.77	**56.5**	2.30
-32	2E-02	**-2**	0.0406	**28**	0.83	**58**	2.40
-30.5	0.025	**-0.5**	0.0411	**29.5**	0.90	**59.5**	2.49
-29	0.028	**1**	0.0449	**31**	0.96	**61**	2.58
-27.5	0.030	**2.5**	0.0602	**32.5**	1.03	**62.5**	2.67
-26	0.031	**4**	0.0817	**34**	1.10	**64**	2.77
-24.5	0.032	**5.5**	0.1080	**35.5**	1.17	**65.5**	2.86
-23	0.033	**7**	0.1383	**37**	1.24	**67**	2.96
-21.5	0.034	**8.5**	0.1720	**38.5**	1.32	**68.5**	3.06
-20	0.034	**10**	0.2088	**40**	1.39	**70**	3.16
-18.5	0.035	**11.5**	0.2485	**41.5**	1.47	**71.5**	3.26
-17	0.035	**13**	0.2909	**43**	1.55	**73**	3.36

Courbe de tarage tabulée pour la station hydrologique de Pélatan

Sources de Saint-Chély et du Moulin de Cénarette

Date	H (cm)	Méthode	Q (l/s)
12/06/2018	15.8	MF Pro	172
20/07/2017	8.9	Micro-moulinet	20
16/10/2018	11	MF Pro	5
05/12/2018	21.5	MF Pro	307
06/06/2019	11.5	MF Pro	61
19/09/2019	8.5	MF Pro	13

Jaugeages réalisés à la station de Saint-Chély Centre

Date	H (cm)	Méthode	Q (l/s)
12/06/2018	35	MF Pro	56
20/07/2017	29.5	Micro-moulinet	16.5
16/10/2018	31.8	MF Pro	8
06/06/2019	35.5	MF Pro	34
13/02/2019	38	Dilution uranine	93
10/09/2019	31	MF PRO	16
19/09/2019	31	MF Pro	10

Jaugeages réalisés à la station du Moulin de Cénarette

H Cénarette (cm)	Q Cénarette (l/s)	H Saint-Chély (cm)	Q-Saint Chély (cm)
20	0	0	0
25	0.1	8	5
31	16	8.5	13
35.5	34	8.9	20
37	56	11.5	61
38	93	15.8	172
50	500	21.5	307
60	800	30	1000
70	1000	40	2000

Courbe de tarage tabulée pour les stations du Moulin de Cénarette et de Saint-Chély Centre

Station du Rozier (Jonte)

Date	h (cm)	Q (m^3/s)
25/10/2017	9	0.428
06/12/2018	35.5	4.127
05/09/2019	*5*	0.431
19/09/2019	8	0.687

Jaugeages réalisés à la station du Rozier

Annexe 2

Résultats des analyses chimiques

Données issues des campagnes géochimiques et isotopiques du projet, complétées par les extractions des données de la base ADES.

Campagne	BSS	BSS	Nom	type	date de prélèvement	C.E.	pH terrain	température	Oxygène dissous	Coliformes	E. Coli	HCO3-	F-	Cl-	NO3-	SO4--	Na+	K+	Mg++	Ca++
BE1	08866X0003/ARDENN	BSS002BKZD	Ardennes	source	07/07/2017	413		11.1	9.17			249.53	0.50	2.86	4.84	2.40	1.22	0.24	13.13	62.95
BE1	08867X0064/CASBC1	BSS002BLDX	Castelbouc 1	source	07/07/2017	405		10.4	9.91			253.51		2.71	3.78	2.02	1.23	0.15	13.85	57.06
BE1			Citerne	source	06/07/2017	527	7.91	11.5				373.30	0.51	1.54	0.98	0.84	1.93	1.01	23.65	73.37
BE1			Douzes de Fourques n°2	source	06/07/2017	408	8.04	15.2	7.4			297.72	0.55	2.62		6.78	1.35	0.61	29.58	42.47
BE1	09101X0263/DOUZES	BSS002CGXY	Douzes	source	07/07/2017	292	7.74	12.8	8.82			188.60	0.52	2.23	1.61	4.54	2.81	0.79	11.63	41.16
BE1			Estivants	source	07/07/2017	405		10.1	9.45			258.45	0.51	2.51	3.65	2.15	1.10	0.12	14.10	58.27
BE1			Puits de l'Hom	puits	07/07/2017	617	7.7	12.7				356.51	0.50	1.74	0.48	1.96	1.13	0.18	9.98	96.23
BE1	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFJ	Ironselle	source	07/07/2017	470		9.8	9.8			289.81	0.49	3.22	3.90	2.82	1.26	0.38	20.19	57.73
BE1			Jonte (Ayres)	eau de surface	06/07/2017	273	9.48	18.4	8.31			174.67	0.52	3.73	1.61	7.37	2.51	0.90	14.29	32.95
BE1			Jonte (perte)	eau de surface	07/07/2017	204	8.5	21.4	10.6			121.49	0.50	3.78	1.52	6.61	3.10	0.84	8.89	23.96
BE1			Jonte amont (Plambel)	eau de surface	06/07/2017	54.4	7.33	15.2	8.42			18.35	0.56	5.68		4.77	2.15	0.71	2.26	4.42
BE1			Mas de la Font	puits	06/07/2017	443	7.55	12.1				292.21	0.55	2.31	0.54	1.46	1.43	0.85	13.32	72.35
BE1			Milegues	source	06/07/2017	566	7.42	10.6				326.63		4.92	3.11	2.87	2.33	0.62	33.19	45.99
BE1	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	07/07/2017	394	7.8	10.6	10.37			232.28	0.50	3.06	3.00	5.27	1.77	0.41	10.79	56.53
BE1	08868X0015/PELATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	07/07/2017	395	7.69	11.9	9.53			239.77	0.49	3.07	5.62	2.33	1.27	0.14	11.18	58.62
BE1	08868X0067/PONTET	BSS002BLGT	Pontet	source	07/07/2017	458		10.4	9.53			263.35	0.49	3.08	6.39	3.66	1.24	0.43	12.25	69.07
BE1			Puits Drigas	puits	06/07/2017	478	7.67	15.9				305.22	0.61	4.02	0.85	2.20	1.80	2.99	5.94	82.88
BE1			Sablière haute	source	07/07/2017	442	8.13	15.3	9.11			284.23	0.53	4.16		6.24	1.95		29.88	44.06
BE1			Sablière basse	source	07/07/2017	406	7.66	12	9.22			273.48	0.49	2.96	3.11	2.69	1.28	0.15	20.30	55.24
BE1	09103X0028/SLVNSC	BSS002CHBD	Salvinsac	source	06/07/2017	292	7.86	10.6	9.45			198.55	0.54	2.83	2.10	3.45	1.04	0.22	21.60	29.39
BE1	08866X0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	07/07/2017	472		10.1	9.81			276.49		3.53	9.40	3.01	1.43	0.59	14.65	69.34
BE1	08866X0004/RESURG	BSS002BKZE	St Chély centre	source	07/07/2017	471		10.4	10.02			284.72	0.50	3.65	6.05	3.14	1.42	0.54	14.41	68.80
BE1	08868X0051/QUEZAC	BSS002BLGD	Taillades Source des Romains	source	07/07/2017	480	7.53	14.2				279.62	0.51	3.00		13.18	1.28	0.24	17.55	67.66
BE1			Vébron	source	06/07/2017	565	7.59	16.2	7.44			351.63	0.52	3.09		27.54	1.53	1.21	24.57	79.96
BE1	09104X0021/VERNAG	BSS002CHCM	Vernagues	source	06/07/2017	325	8.19	17.1	9.32			199.09	0.51	2.39	4.64	2.41	1.18	0.33	17.66	37.21
BE1			Volpilière réservoir	source	07/07/2017	500	8.14	16	8.05			351.95		2.37	0.62	1.44	1.18	0.16	23.42	70.23
BE2	08866X0003/ARDENN	BSS002BKZD	Ardennes	source	12/09/2018	415	7.44	12	10.07			266.78		3.74	5.42	2.81	1.25	0.41	13.51	69.08
BE2	08867X0064/CASBC1	BSS002BLDX	Castelbouc 1	source	12/09/2018	406	7.65	10.9	10.66			262.30		3.45	4.13	2.54	1.13	0.27	13.87	66.63
BE2	09101X0263/DOUZES	BSS002CGXY	Douzes	source	11/09/2018	376		12.9	9.74			230.48		5.16	3.10	5.85	2.85	0.92	14.50	55.18
BE2			Estivants	source	12/09/2018	406	7.65	11	10.36			264.80		3.52	3.99	2.47	1.12	0.33	14.24	66.81
BE2			Jonte (Capelan)	eau de surface	11/09/2018	235	9.1	18.6	11.57			135.27		4.80	0.87	7.95	3.59	1.27	11.32	28.29
BE2			Jonte amont (Plambel)	eau de surface	11/09/2018	176	10.15	13.3	8.99			37.80		2.36	1.50	5.18	3.83	0.90	3.65	6.58
BE2			Milegues	source	11/09/2018	480	8.52	6.8	9.27			335.98		4.24	1.28	2.56	2.42	0.22	33.85	56.28
BE2	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	11/09/2018	394	8.5	10.8	10.67			251.40		3.78	3.54	5.60	2.03	0.45	11.34	67.48
BE2	08868X0015/PELATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	12/09/2018	367		13.2	9.27			236.66		3.54	15.36	2.43	1.25	0.28	11.33	65.80
BE2	09104X0021/VERNAG	BSS002CHCM	Vernagues	source	11/09/2018	216.7	9.09	13.3	9.94			338.68		4.03	1.04	6.68	1.72	1.20	29.81	65.36
BE3	08866X0003/ARDENN	BSS002BKZD	Ardennes	source	14/10/2019	381		12.8	8.9			256.65	<LD	2.75	4.48	2.46	1.23	0.34	14.13	63.55
BE3	09101X0263/DOUZES	BSS002CGXY	Douzes	source	11/10/2019	303		13.4	9.02			190.30	0.07	4.21	1.70	5.91	2.91	0.87	12.92	45.71
BE3			Estivants	source	14/10/2019	375		11.5	9.31			248.96	<LD	2.44	3.19	2.23	1.10	0.22	14.88	61.41
BE3	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFJ	Ironselle	source	14/10/2019	432		11.9	9.53			296.60	<LD	3.19	3.27	2.99	1.38	0.28	21.89	65.35
BE3			Jonte (Capelan)	eau de surface	11/10/2019	191.2		13.4	9.46			108.50	<LD	5.68	0.67	7.89	4.78	1.39	9.47	23.61
BE3	09101X0273/S-MAYN	BSS002GGYJ	Maynial basse	source	11/10/2019	347		13	8.16			221.01	0.04	3.97	2.26	5.20	2.49	0.73	15.23	52.59
BE3	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	11/10/2019	371		11.3	9.26			248.20	0.06	3.25	2.58	6.57	2.38	0.42	12.91	62.50
BE3	08868X0067/PONTET	BSS002BLGT	Pontet	source	14/10/2019	420		12.6	8.94			277.60	<LD	3.13	8.23	3.82	1.37	0.42	13.04	75.73
BE3	08866X0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	14/10/2019	451		12.6	9.85			309.10	<LD	3.59	6.41	3.28	1.56	0.55	17.54	72.53
BE3	08866X0004/RESURG	BSS002BKZE	St Chély centre	source	14/10/2019	441		12.6	9.97	0.04	0.04	308.60		3.43	5.74	3.34	1.56	0.55	17.59	72.94
HE1	08866X0003/ARDENN	BSS002BKZD	Ardennes	source	09/03/2018	377						277.67		3.28	4.18	1.83	1.45	0.34	10.35	71.74
HE1	08867X0064/CASBC1	BSS002BLDX	Castelbouc 1	source	09/03/2018	334						228.18		2.44	2.91	1.36	1.09	0.26	10.32	60.14
HE1	08867X0001/RESURG	BSS002BLBL	Castelbouc 2	source	09/03/2018	332						230.39		2.39	2.85	1.43	1.11	0.25	10.36	60.91
HE1	08867X0065/CASBC3	BSS002BLDY	Castelbouc 3	source	09/03/2018	334						235.55		2.40	3.17	1.36	1.10	0.25	10.53	60.07
HE1			Castelbouc 4	source	09/03/2018	331						241.56		2.50	2.88	1.48	1.12	0.23	10.45	60.26
HE1			Estivants	source	09/03/2018	335						227.07		2.41	2.89	1.38	1.11	0.26	10.40	60.80
HE1			Les Ardennes n°2	source	09/03/2018	386						267.38		3.50	4.03	1.80	1.45	0.33	10.52	71.78
HE2	08867X0064/CASBC1	BSS002BLDX	Castelbouc 1	source	16/03/2018	365		10.4	10.03			259.74		2.57	2.77	0.00	1.16	0.25	12.40	66.42
HE2			Douzes de Fourques n°2	source	16/03/2018	457		9.1	9.78			296.70		15.47	0.81	21.73	6.61	0.79	17.81	74.39
HE2			Jonte amont (Plambel)	eau de surface	16/03/2018	31.7		6.2	10.72			13.34		2.71	1.10	2.31	1.74	0.44	1.24	2.71
HE2	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	16/03/2018	323		10.4	9.84			226.95		2.43	2.13	3.01	1.30	0.25	7.85	63.44
HE2	08868X0049/VIALA	BSS002BLGB	Source du Viala	source	14/03/2018	432		12.5	7.44			292.53		2.68	0.00	24.16	1.33	0.28	13.21	85.52
HE2	09104X0021/VERNAG	BSS002CHCM	Vernagues	source	16/03/2018	474		8	9.93			354.42		3.77	0.79	5.56	1.71	0.79	30.86	68.06
GD	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFJ	Ironselle	source	06/07/2019	460	7.44	11.3	9.3			342.00	0.04	3.46	3.74	2.89	1.38	0.28	21.43	66.79
GD			Volpilière	source	06/07/2019	468	7.3	11.7	6.71			351.70	0.14	2.83	0.61	1.48	1.38	0.39	22.06	66.98
GD	09101X0219/CHEMIN	BSS002CGWC	Aven de la cheminée -395m	actif	06/07/2019	499	7.16	9.8	9.43			393.40	0.05	4.64	3.14	2.44	2.07	0.10	26.07	73.17
GD	09101X0219/CHEMIN	BSS002CGWC	Aven de la cheminée -320m	actif	06/07/2019	539	7.34	9.5	9.42			386.80	0.05	5.11	1.05	3.02	2.21	0.10	27.71	72.89

Campagne	BSS	Nom	type	date de prélèvement	C.E.	pH terrain	température	Oxygène dissous	Coliformes	E. Coli	HCO3-	F-	Cl-	NO3-	SO4--	Na+	K+	Mg++	Ca++
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	29/03/2004	374		10.3		1	0	244.00			3.00	2.00	0.90		10.27	59.80
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	19/07/2004	369		10.7		9	1	256.00			3.00	3.00	1.10		12.85	63.40
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	21/09/2005	334		11.3	10.6			211.00			7.00	3.00	0.80		9.50	57.10
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	21/11/2005	383		10.4	10.5			245.00			4.00	3.00	1.10		9.70	63.60
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	22/08/2007	391		11.1	10.5			251.00		1.91	3.48	2.65	1.13	0.29	14.90	65.30
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	30/11/2007	348		11.2	8.8			217.00		3.47	3.17	2.56	1.10	0.38	8.44	61.50
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	24/09/2008	382		10.8	10			250.00		2.21	3.34	2.75	1.12	0.26	14.10	63.00
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	26/11/2008			10.5	10.1			249.00		2.31	3.87	2.56	1.22	0.34	13.80	66.40
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	02/09/2009			11.2	4.94			242.00		2.49	4.17	2.70	1.05	0.22	13.20	58.90
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	27/01/2010			10.6	9.38			234.00		2.22	3.16	2.33	1.08	0.24	11.20	65.40
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	31/08/2010			11.1	8.5			241.00		2.04	3.29	2.54	1.10	0.21	14.40	63.10
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	14/12/2010			10.4	10.53			237.00		2.30	2.95	2.13	1.12	0.19	11.50	64.30
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	30/08/2011			11.1	11.33			235.00		2.25	3.81	2.70	1.21	0.27	14.70	62.30
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	14/12/2011			11	9.79			240.00		2.33	3.34	2.37	1.15	0.22	12.20	61.70
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	23/08/2012			10.9	10.58			237.00		2.07	3.59	2.54	1.09	0.24	14.40	63.50
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	23/01/2013			11.4	8.93			242.00		2.44	3.75	2.25	1.13	0.22	13.00	63.80
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	28/08/2013	386		10.7	10.22			248.00		2.10	3.20	2.60	1.00	0.30	15.07	66.80
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	10/12/2013	398		10.5	10.37			257.00		1.80	2.90	1.80	1.00	0.40	10.60	66.10
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	28/08/2014	418		10.8	10.28			266.00		1.90	2.90	2.20	1.20	0.30	10.98	66.70
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	26/11/2014	416		10.77	10.39			271.00		1.80	2.50	1.60	1.00	0.30	9.97	70.20
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	09/09/2015	396		10.6	9.95			247.00		2.10	3.20	2.30	1.10	0.23	13.20	63.20
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	27/01/2016		10.65	10.98	10.46			256.00		2.10	3.70	1.90	1.15	0.22	11.00	70.00
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	01/09/2016	414.7		10.98	10.01			253.00		1.90	2.80	4.00	1.00		13.60	61.00
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	26/01/2017	1257.9		31.95	30.99			520.00		4.00	7.00	5.00	2.20		27.00	126.00
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	31/08/2017	384.3		11.63				253.00		2.30	3.50	2.60	1.20	0.30	13.17	60.40
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	25/01/2018	719.2		20.46	21.52			506.00		5.40	7.80	4.00	2.80	0.40	22.60	121.00
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	30/08/2018	389.5		10.75	10.4			256.00		2.00	3.76	1.90	1.10		14.00	68.00
ADES	08867X0064/CASBC1	Castelbouc 1	source	21/02/2019	384.7		10.53	10.8			253.00		1.90	3.98	1.60	1.10		12.00	68.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	17/03/1997	315	7.64		10.6			219.00		5.40	0.40	11.00	1.50	0.30	10.10	58.40
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	17/06/1997	334	7.8			1				3.70	2.90	7.30			27.00	126.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	29/07/1997	366	7.8			1				4.00	3.00	7.00			13.17	60.40
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	15/10/1997	364	7.7			1				3.00	2.00	7.00			22.60	121.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	03/02/1998	351	7.8			7									14.00	68.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	29/04/1998	324	7.5			26									12.00	68.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	12/08/1998	367	7.9			1									10.10	58.40
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	04/11/1998	331	7.6			3										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	24/02/1999	330	7.6			4										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	09/06/1999	331	7.4			7										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	25/08/1999	378	7.8					238.00		3.00		7.00	1.90	0.40	11.50	60.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	08/11/1999					29										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	09/02/2000			10		0										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	18/09/2000			11.5		5					2.00		1.20		13.00	110.50
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	26/06/2001	385	7.8	11				259.00				5.00				
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	10/09/2001			11		3										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	19/03/2002			10		7										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	04/09/2002			10		5					5.00	4.00	1.10		4.80	66.30
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	04/11/2003	367	7.7	9.6				225.00								
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	07/04/2004			9.8		0										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	11/05/2004	348.5	7.9	10	9			195.00		2.00	2.00	5.00	1.30	0.30	9.50	52.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	27/10/2004	380.5	7.825	11	11.7			235.00		3.00	5.00	5.00	1.30	0.30	7.50	69.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	03/11/2004			10.7			47									
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	18/01/2005			10.4			1									
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	19/04/2005			10			0									
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	30/05/2005	368	8	11	10.3			221.00		3.00	3.00	7.00	1.40	0.30	8.50	57.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	07/11/2005	379	7.8	10	10.5			240.00		3.00	4.00	5.00	1.30	0.30	8.40	69.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	30/05/2006	357	8.2	11	10.3			230.00		3.00	3.00	6.00	1.40	0.20	9.80	59.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	31/07/2006			12		0										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	24/10/2006	394	7.9	10	10.1			250.00		3.00	3.00	4.00	1.50	0.30	9.50	70.00
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	22/11/2006			10.4		6										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	08/03/2007			10.2		0										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	03/12/2007			10.2		4										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	23/01/2008			10		0										
ADES	08868X0045/PECHER	Pêcher	source	15/07/2008			10.9		2										

Campagne	BSS	BSS	Nom	type	date de prélèvement	C.E.	pH terrain	température	Oxygène dissous	Coliformes	E. Coli	HCO3-	F-	Cl-	NO3-	SO4--	Na+	K+	Mg++	Ca++
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	15/04/2009			10.5			3									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	19/08/2009			11.2			0									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	22/03/2010			11.4			0									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	05/05/2010			10.7			0									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	28/07/2010			11.4			10									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	14/03/2011			10			4									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	07/06/2011			10.7			0									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	06/12/2011			10.6			1									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	20/03/2012			11.5			0									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	21/05/2012			10.8			37									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	01/10/2012			11.4			1									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	04/03/2013			10.5			1									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	03/09/2013			12.8			4									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	27/11/2013			10			1									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	29/01/2014			9.9			0									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	02/06/2014			11.9			1									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	06/10/2014			10.6			11									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	13/01/2015			10.2			1									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	24/03/2015			10.3			0									
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	14/09/2015	402	8	11.4		0	175			3.00	4.20					
ADES	08868X0045/PECHER	BSS002BLGA	Pêcher	source	05/09/2017	387	7.9		9.8		0	232.00		2.80	2.70	6.50	2.20		12.47	63.20
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	15/06/1998	367	7.6			17					4.00	4.00				
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	08/07/2004			12.9			1									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	06/12/2006			10.8			2									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	27/08/2008			12.2			2									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	30/03/2010			10.8			1									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	16/11/2010			10			5									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	18/04/2012			9.3			0									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	12/09/2012			12.6			2									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	26/02/2014			10.6			1									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	02/09/2014			12			1									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	10/03/1993	389	7.55			40					4.60					
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	06/12/1994	487	7.25			18					3.30					
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	13/02/1996	310	7.25			48					2.10					
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	10/09/1997	364	7.6			5					4.00	3.00				
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	25/06/2001					23										
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	28/03/2002			11												
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	10/06/2003			11.5		3										
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	13/10/2005			12		1										
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	01/02/2007			10			2									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	18/03/2009			10.7			0									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	22/10/2009			11.6			3									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	24/05/2011			11.5			1									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	06/12/2011			11			6									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	15/01/2013			11			5									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	07/11/2013			11.8			1									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	15/01/2015			11			0									
ADES	08868X0015/PEIATA	BSS002BLEU	Pélatan	source	07/10/2015			12.7			4									
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	11/05/2004	391.5	7.75	12	7.2			248.00		4.00	1.00	5.00	2.20	0.60	16.00	56.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	28/10/2004	339.5	7.85	11	7			204.00		4.00	3.00	7.00	2.80	0.90	13.00	49.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	30/05/2005	279	7.7	12	7.3			166.00		4.00	2.00	6.00	2.20	0.60	10.00	40.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	07/11/2005	235	7.9	11	6			137.00		4.00	2.00	5.00	2.50	0.70	7.90	35.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	01/06/2006	312	7.5	12	7.3			185.00		4.00	2.00	6.00	2.50	0.70	12.00	47.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	24/10/2006	249	7.8	12	7.6			139.00		3.00	2.00	5.00	2.60	0.60	7.90	34.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	11/06/2007	237	7.7	13.5	7.3			182.00		5.00	2.00	5.00	2.70	0.80	11.00	45.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	05/11/2007	290	7.8	11	7.2			168.00		4.00	2.00	7.00	2.60	0.80	11.00	42.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	10/06/2008	342	7.6	16	7.8			209.00		5.00	2.00	4.00	2.80	0.60	14.00	52.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	08/12/2008	360	7.8	10	7.9			224.00		7.00	2.00	5.00	3.60	0.70	14.00	57.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	30/06/2009	348	7.4	12.9	4.3			218.00		5.00	2.00	5.00	2.40	1.30	14.00	53.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	08/12/2009	248	7.9	12	7.9			145.00		4.00	2.00	6.00	2.40	0.60	9.00	36.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	25/10/2010	201	7.4	11	9			120.00		3.00	2.00	5.00	2.30	0.60	7.00	30.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	06/12/2010	296	7.8	8	8.6			182.00		5.00		5.00	3.00	0.60	11.00	44.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ	Douzes F. Profond	forage	24/05/2011	253	7.8	12	9.2			148.00		4.00	2.00	6.00	2.60	1.00	9.60	37.00

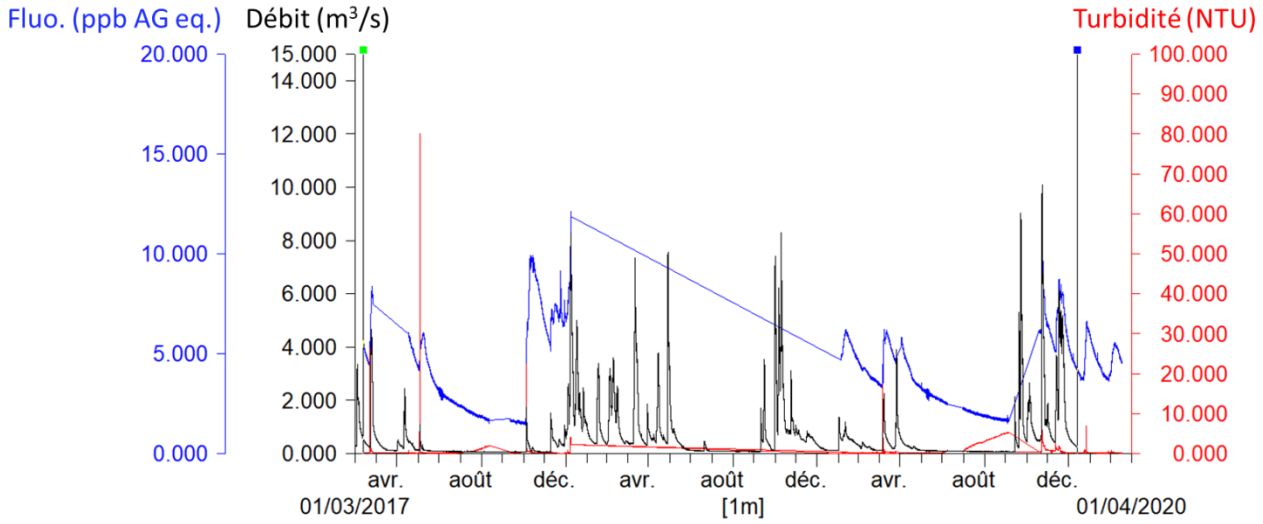
Campagne	BSS	Nom	type	date de prélèvement	C.E.	pH terrain	température	Oxygène dissous	Coliformes	E. Coli	HCO3-	F-	Cl-	NO3-	SO4--	Na+	K+	Mg++	Ca++
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	10/10/2011	305	7.8	12	6.6			200.00		4.00	3.00	8.00	2.90	0.90	13.00	48.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	12/06/2012	338	7.6	11	7.3			206.00		5.00	2.00	5.00	2.80	0.70	13.00	49.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	09/10/2012	310	7.8	13	7			185.00		5.00	3.00	7.00	2.80	1.00	11.00	44.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	21/05/2013	363	7.9	12	8.9			221.00		8.00	1.00	3.00	3.70	0.70	14.00	54.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	08/10/2013	283	7.7	12	7.9			192.00	0.07	4.00	3.00	7.00	3.10	0.80	12.00	47.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	03/06/2014	279	7.5	12	9.1			179.00		4.00	1.00	5.00	2.60	0.60	11.00	44.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	28/10/2014	272	7.9	12	9.1			162.00		3.00	2.00	4.00	2.40	0.70	9.00	40.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	26/05/2015	311	7.7	12	9.2			190.00	0.06	5.00	2.00	5.00	3.00	0.60	11.00	45.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	06/10/2015	314	7.7	12	8.9			187.00	0.06	4.00	3.00	7.00	3.00	0.90	11.00	46.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	23/05/2017	290	7.8	13	9.2			171.00	0.06	4.00	1.00	5.00	2.70	0.60	11.00	43.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	26/09/2017	325	7.8	12	9			206.00	0.06	4.00	3.00	7.00	3.10	1.10	14.00	52.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	17/05/2016	284	7.8	12	7.6			171.00	0.07	5.00	2.00	5.00	3.10	0.70	10.00	42.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	10/10/2016	304	7.7	12	8.2			181.00	0.07	4.00	3.00	6.00	3.00	0.80	11.00	45.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	05/06/2018	389	7.6	13	9.1			248.00	0.06	5.00	1.00	4.00	2.40	0.50	16.00	59.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	04/09/2018	367	7.7	14	8.9			232.00	0.06	5.00	2.00	6.00	2.80	0.80	14.00	54.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	17/06/2019	310	7.8	13	8.9			201.00	0.06	4.00	2.00	5.00	2.70	0.60	12.00	48.00
ADES	09101X0281/FPROFO	BSS002CGVQ. Douzes F. Profond	forage	30/09/2019	326	7.8	13	8.8			198.00	0.06	4.00	3.00	6.00	2.90	0.80	13.00	47.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	11/05/2004	471.5	7.7	11	8.8			244.00		3.00	3.00	3.00	1.70	0.50	20.00	52.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	27/10/2004	444.5	7.65	12	13.6			290.00		3.00	3.00	3.00	1.10	0.30	21.00	65.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	30/05/2005	440	7.6	11	10.4			285.00		3.00	3.00	3.00	1.10	0.20	20.00	55.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	07/11/2005	431	7.5	11	10.1			284.00		3.00	3.00	3.00	1.30	0.20	21.00	65.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	01/06/2006	444	7.5	11	10.3			293.00		3.00	4.00	3.00	1.20	0.20	21.00	67.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	23/10/2006	440	7.4	11	9.4			289.00		3.00	3.00	3.00	1.30	0.30	21.00	65.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	11/06/2007	455	7.5	10	10.6			294.00		3.00	3.00	3.00	1.40	0.30	22.00	67.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	06/11/2007	444	10.4	7	10.1			288.00		3.00	3.00	3.00	1.10	0.20	21.00	65.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	09/06/2008	471	7.5	11	10.3			307.00		3.00	4.00	3.00	1.50	0.40	21.00	76.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	08/12/2008	448	7.6	11	9.7			300.00		3.00	4.00	3.00	1.60	0.70	20.00	74.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	30/06/2009	453	7.4	11.1	5.5			295.00		5.00	4.00	2.00	1.30	2.80	21.00	70.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	08/12/2009	441	7.5	12	9.5			293.00		3.00	3.00	3.00	1.20	0.30	21.00	65.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	25/10/2010	448	7.8	9	8.9			298.00		2.00	2.00	1.00	1.30	0.30	21.00	65.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	06/12/2010	445	7.5	11	9.3			304.00		3.00	4.00	3.00	1.50	0.40	21.00	70.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	24/05/2011	444	7.5	11	10.6			283.00		3.00	3.00	3.00	1.30	0.40	21.00	66.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	10/10/2011	411	7.4	11	10.6			285.00		3.00	3.00	3.00	1.20	0.20	21.00	64.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	12/06/2012	469	7.6	11	10			289.00		3.00	4.00	3.00	1.40	0.30	21.00	70.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	09/10/2012	452	7.2	10	10.3			296.00		3.00	3.00	3.00	1.00	0.40	21.00	66.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	21/05/2013	463	7.5	11	10.3			306.00		3.00	4.00	3.00	1.40	0.40	20.00	71.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	08/10/2013	424	7.4	11	10.6			305.00		3.00	4.00	3.00	1.40	0.30	21.00	67.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	03/06/2014	456	7.5	11	10.1			299.00		3.00	4.00	3.00	1.40	0.30	22.00	67.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	28/10/2014	449	7.5	11	10.4			295.00		3.00	4.00	3.00	1.30	0.30	21.00	67.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	26/05/2015	459	7.3	11	10.8			299.00		3.00	4.00	3.00	1.60	0.30	21.00	68.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	06/10/2015	458	7.4	11	11			295.00		3.00	4.00	3.00	1.40	0.40	20.00	63.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	23/05/2017	452	7.5	11	10.4			298.00		3.00	4.00	3.00	1.40	0.30	21.00	69.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	26/09/2017	432	7.5	11	10.6			296.00		3.00	4.00	3.00	1.40	0.30	22.00	68.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	17/05/2016	459	7.4	11	10.2			298.00	0.05	3.00	4.00	3.00	1.50	0.30	21.00	70.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	10/10/2016	450	7.4	11	10.2			293.00		3.00	4.00	3.00	1.50	0.30	22.00	68.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	05/06/2018	476	7.5	11	10.4			320.00		4.00	4.00	3.00	1.40	0.30	21.00	73.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	04/09/2018	463	7.4	10	10.5			311.00		3.00	4.00	3.00	1.40	0.30	20.00	67.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	17/06/2019	468	7.4	11	10.4			309.00		3.00	4.00	3.00	1.40	0.30	22.00	73.00
ADES	09094X0215/IRONSE	BSS002CGFI Ironselle	source	30/09/2019	459	7.4	11	10.7			303.00		3.00	3.00	2.00	1.30	0.30	22.00	69.00
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	12/06/1997	362	7.6			10					6.10					
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	15/04/1998	340	7.5								5.00	6.00				
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	17/02/1999	384	7.8			26				0.00	4.00					
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	28/03/2000			9.2		23										
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	12/02/2001			9.4		14										
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	08/01/2002			10		11										
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	08/04/2002			10		6										
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	24/09/2003			12.6		26										
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	05/05/2004			9.3			3									
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	15/09/2005			10.8			300									
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	06/03/2006			8.3			3									
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	10/09/2007			10.4			6									
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	27/03/2008			9.9			23									
ADES	09104X0016/CLAUZE	BSS002CHCG Source des Clauzels	source	22/04/2010			10.8			2									

Campagne	BSS	BSS	Nom	type	date de prélèvement	C.E.	pH terrain	température	Oxygène dissous	Coliformes	E. Coli	HCO3-	F-	Cl-	NO3-	SO4--	Na+	K+	Mg++	Ca++
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	01/12/2011			10			6									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	03/10/2012			12.2			46									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	08/04/2013			9			6									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	04/11/2014			11.2			160									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	01/06/2015			12.1			0				4.20					
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	23/03/1993	419	7.4			0										
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	13/06/1994	366	7.45			18					7.00					
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	22/11/1995	370	7.45			50					4.10					
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	12/06/1997	362	7.6			10					6.10					
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	15/04/1998	340	7.5							0.00	5.00	6.00				
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	17/02/1999	384	7.8			26				0.00	4.00					
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	28/03/2000			9.2		23										
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	12/02/2001			9.4		14										
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	08/01/2002			10		11										
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	08/04/2002			10		6										
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	24/09/2003			12.6		26										
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	05/05/2004			9.3			3									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	15/09/2005			10.8			300									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	06/03/2006			8.3			3									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	10/09/2007			10.4			6									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	27/03/2008			9.9			23									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	22/04/2010			10.8			2									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	01/12/2011			10			6									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	03/10/2012			12.2			46									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	08/04/2013			9			6									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	04/11/2014			11.2			160									
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	01/06/2015			12.1			0				4.20					
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	23/03/1993	419	7.4			0					4.20					
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	13/06/1994	366	7.45			18					7.00					
ADES	0910AX0016/CLAUZE	BSS002CHCG	Source des Clauzels	source	22/11/1995	370	7.45			50					4.10					
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	10/09/2003	456	7.8	10.7		4	2	306.00			5.00	4.00	1.00	0.50	15.00	85.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	29/03/2004	444	7.6	10.6		14	0	290.00			4.00	4.00	1.20		11.15	74.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	19/07/2004	456	7.9	11		5	1	309.00			5.00	4.00	1.20		14.35	80.80
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	21/09/2005	440	8.2	10.9	10.8			270.00			9.00	4.00	1.20		6.60	84.80
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	21/11/2005	459	8	10.6	10.6			288.00			9.00	4.00	1.30		8.90	83.50
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	11/06/2007	460	7.3	10	10.5			281.00		2.00	4.00	3.00	1.20	0.20	6.30	87.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	06/11/2007	464	8.1	10.5	10.1			296.00		3.00	6.00	4.00	1.30	0.50	17.00	77.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	10/06/2008	456	7.8	11	10.2			295.00		3.00	6.00	3.00	1.30	0.30	12.00	78.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	08/12/2008	426	7.7	11	10.7			279.00		3.00	4.00	3.00	1.30	0.20	6.20	90.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	30/06/2009	445	7.7	11	5			292.00		3.00	7.00	3.00	1.40	0.50	17.00	77.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	08/12/2009	441	8	11	10.3			290.00		3.00	6.00	3.00	1.30	0.40	12.00	79.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	25/10/2010	442	7.5	11	10.6			289.00		2.00	3.00	2.00	1.40	0.40	11.00	78.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	06/12/2010	443	7.7	11	9.8			290.00		3.00	6.00	3.00	1.40	0.30	11.00	81.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	24/05/2011	448	7.9	11	10.3			285.00		3.00	7.00	3.00	1.40	0.50	16.00	75.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	10/10/2011	427	7.9	11	9.6			290.00		3.00	6.00	4.00	1.30	0.50	15.00	75.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	12/06/2012	445	7.8	11	9.7			289.00		3.00	6.00	3.00	1.40	0.30	14.00	78.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	09/10/2012	475	7.8	11	10.3			299.00		3.00	7.00	4.00	1.40	0.50	17.00	73.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	21/05/2013	423	7.8	11	10.5			278.00		2.00	3.00	2.00	1.30	0.20	5.90	83.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	08/10/2013	443	7.6	11	10.7			299.00		4.00	7.00	4.00	1.60	0.70	16.00	78.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	03/06/2014	451	7.8	12	10.3			285.00		3.00	6.00	3.00	1.50	0.50	16.00	74.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	28/10/2014	453	7.8	11	10.1			295.00		3.00	3.00	2.00	1.40	0.30	7.90	89.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	26/05/2015	451	7.7	11	10.7			296.00		3.00	5.00	3.00	1.70	0.40	13.00	78.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	06/10/2015	455	7.9	11	10.4			289.00		3.00	5.00	3.00	1.30	0.40	11.00	76.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	23/05/2017	434	7.9	11	10.6			282.00		3.00	3.00	2.00	1.40	0.30	9.70	82.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	26/09/2017	446	7.7	11	10.7			306.00		3.00	6.00	4.00	1.60	0.70	18.00	77.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	17/05/2016	431	7.8	11	10.2			176.00	0.05	2.00	3.00	2.00	1.40	0.30	6.40	86.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	10/10/2016	459	7.9	11	9.8			293.00		3.00	6.00	3.00	1.50	0.50	16.00	79.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	05/06/2018	430	7.8	11	10.4			288.00		3.00	4.00	2.00	1.30	0.30	9.50	78.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	04/09/2018	461	7.8	11	10.6			305.00		3.00	6.00	3.00	1.60	0.50	15.00	73.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	17/06/2019	455	7.9	11	10.6			298.00		3.00	5.00	3.00	1.50	0.40	11.00	84.00
ADES	0886GX0055/S	BSS002BLBE	Moulin de Cenarette	source	30/09/2019	471	7.9	11	10.6			305.00		3.00	6.00	3.00	1.50	0.50	18.00	78.00

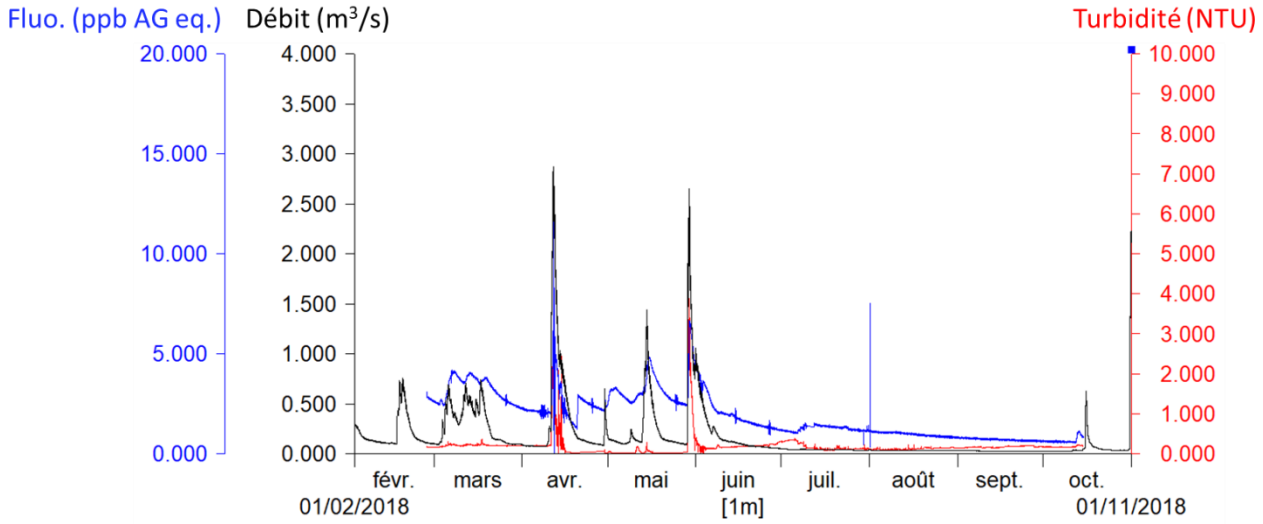
Annexe 3

Évolutions comparées du débit, de la fluorescence naturelle et de la turbidité

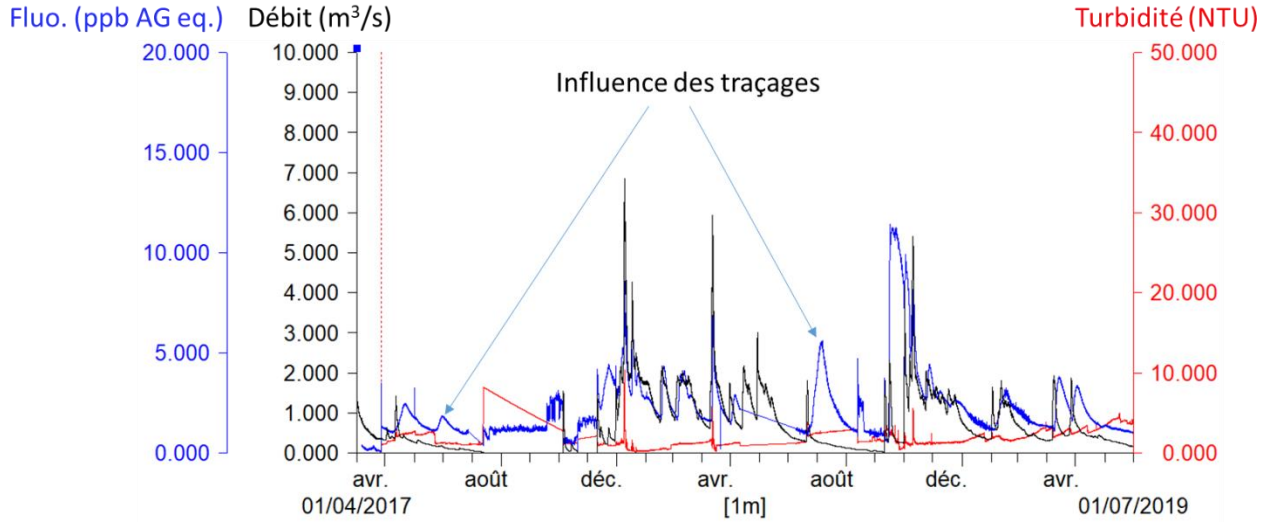
Source du Pêcher



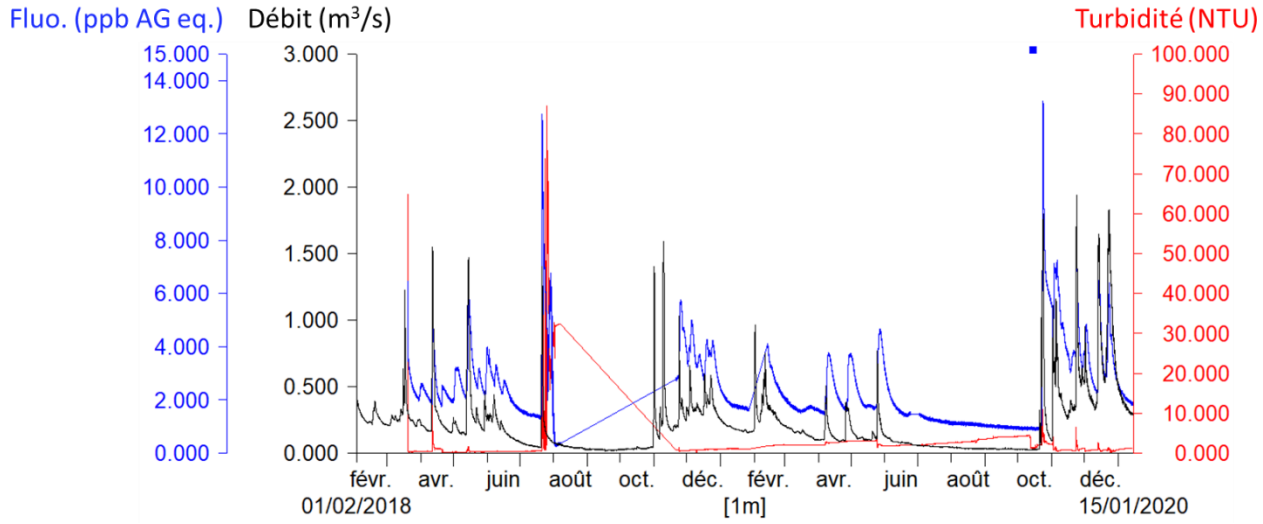
Source du Moulin de Pélatan



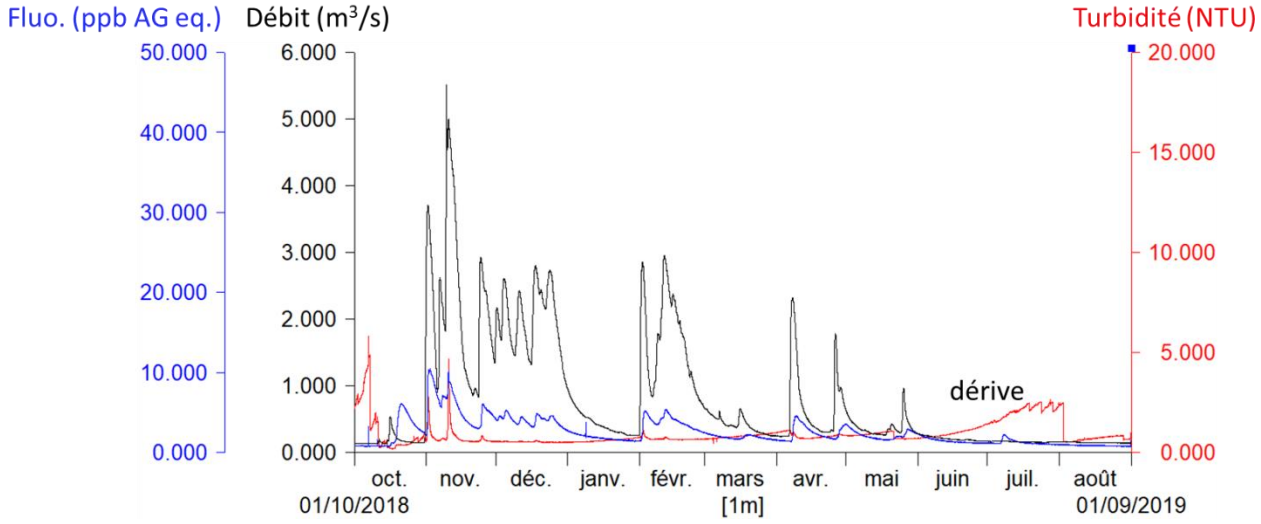
Source de Castelbouc 1



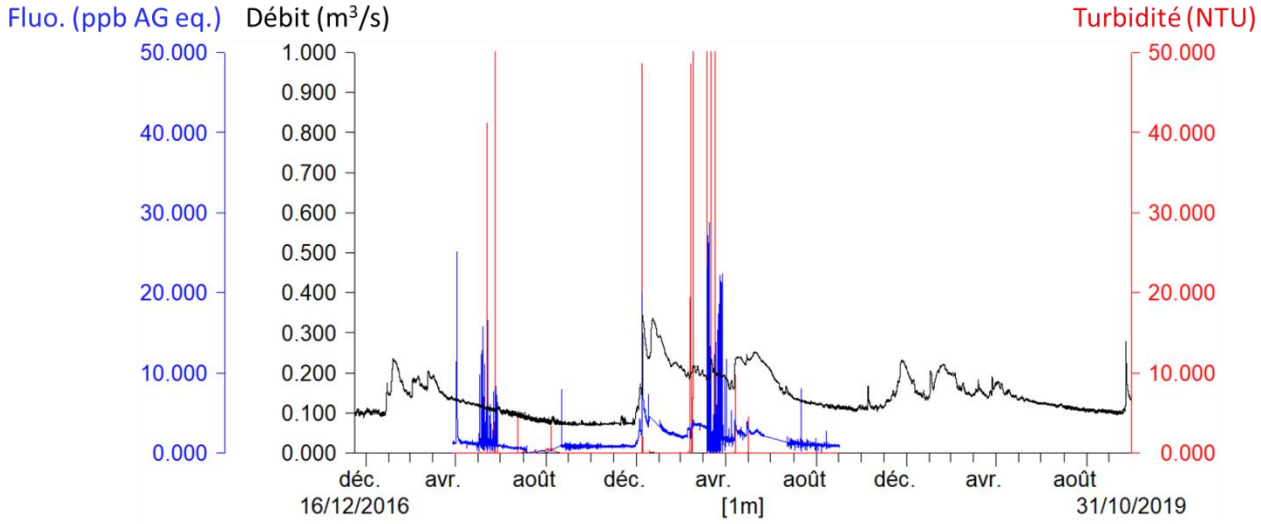
Source du Moulin de Cénarette (débit cumulé avec la source de Saint Chély)



Source des Ardennes



Source de l'Ironselle



Annexe 4

Pressions anthropiques : données complémentaires

Activités	FLORAC	GATUZIERES	HURES-LA-PARADE	LA MALENE	LES VIGNES	MAS-SAINT-CHELY	MEYRUEIS	MONTBRUN	TOTAL
Atelier de laquage de meubles							1		**1**
Carrière							1		**1**
Carrière							1		**1**
Centrale enrobage							1		**1**
coutellerie							1		**1**
Dépôt de déchets		1	15	2	4	4	5		**31**
Dépôts explosifs				1				1	**2**
Exploitation forestière							1		**1**
Fabrication machines agricoles	1								**1**
fabrication pièces en plastique							1		**1**
Scierie							1		**1**
Station-service							2		**2**
Station-service et garage							1		**1**
Tannerie							1		**1**
Transports Publics							1		**1**
Total général	**1**	**1**	**15**	**3**	**4**	**4**	**18**	**1**	**47**

Tableau 1 de l'annexe 4 - Sites de la base de donnée BASIAS concernant la zone d'étude

Code établissement	Nom Usuel	Etat d'activité	Commune d'exploitation
0066.02008	CARRIERE AB Travaux Services FLORAC	A l'arrêt	FLORAC TROIS RIVIERES
0066.02126	CARRIERE GERMAIN HURES LA PARADE	En fonctionnement	HURES LA PARADE
0037.02181	Dechetterie Hures La Parade	En fonctionnement	HURES LA PARADE
0066.03939	ISDI Hures La Parade	En fonctionnement	HURES LA PARADE
0066.03829	DECHARGE OM MEYRUEIS	A l'arrêt	MEYRUEIS
0037.02999	STATION SERVICE GRAVIL MEYRUEIS	En fonctionnement	MEYRUEIS
0066.05801	LOZERIENNE PLASTIQUE SARL MEYRUEIS	En fonctionnement	MEYRUEIS
0181.00095	CARRIERE VERHNET Jean SAINT PIERRE TRIPIERS	En fonctionnement	SAINT-PIERRE-DES-TRIPIERS

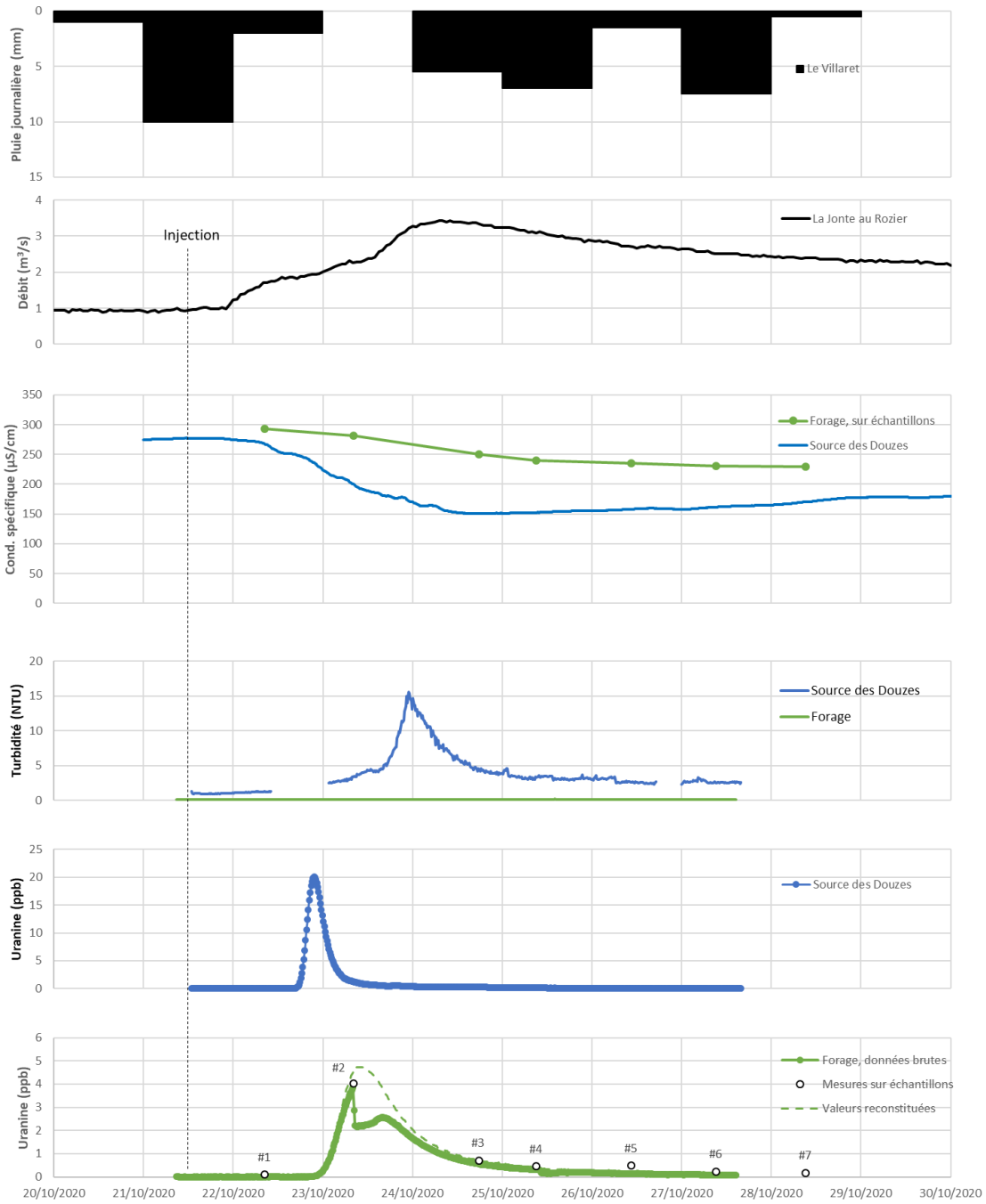
Tableau 2 de l'annexe 4 – ICPE de la zone d'étude

Annexe 5

Confirmation et impact des pertes de la Jonte sur le forage des Douzes

Figure extraite du rapport d'Appui aux Administrations, ARS DD 48

Rapport BRGM/RP-70546-FR



Pluie journalière au Villaret et débit de la Jonte au Rozier comparés aux données physico-chimiques, de turbidité et de concentration en traceur (uranine) mesurées à la résurgence des Douzes et au forage profond des Douzes / Figure extraite du rapport BRGM/RP-70546-FR.

Annexe 6

Bulletins d’information

Bulletin 1



Les besoins en eau, nécessaire à de multiples usages, sont en augmentation sur le territoire. La mise en place d'une gestion équilibrée des ressources en eau et de leur qualité est un enjeu fort ces prochaines années qui suppose une meilleure connaissance des eaux souterraines. C'est pourquoi l'établissement public du Parc national des Cévennes (EPPNC) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) se sont associés pour étudier le fonctionnement hydrogéologique du Causse Méjean.

Objectif du projet : Mieux connaître, c'est mieux gérer !

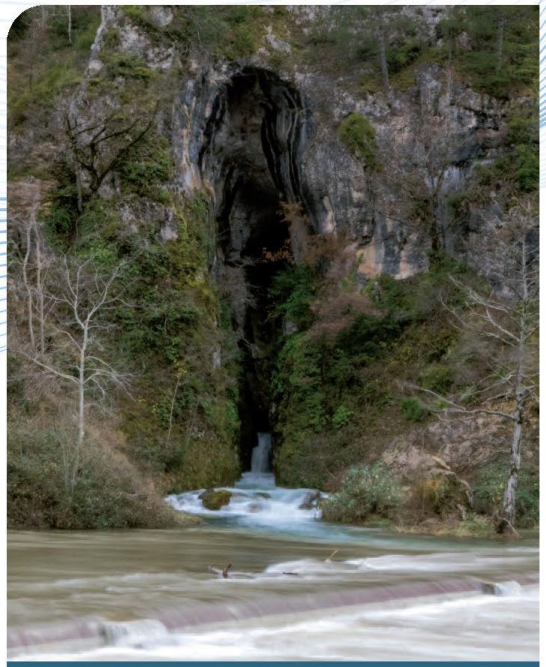
L'objectif est d'acquérir de nouvelles connaissances concernant le fonctionnement, la structure et la localisation des réserves en eaux souterraines des systèmes karstiques du Causse Méjean et ainsi pouvoir les protéger.

Les études géologiques et géomorphologiques viseront à mieux préciser la génèse, la géométrie du sous-sol à partir notamment de campagnes de levers de terrain. Un suivi des sources (instrumentations, traçages) permettra de mieux comprendre les écoulements souterrains et d'identifier les principales réserves en eaux souterraines ainsi que leurs relations avec les eaux de surface (Jonte, Tarn).

Enfin, la cartographie de la vulnérabilité de la ressource en eau sur le territoire permettra de mieux la protéger à l'échelle du Causse.

Pour réaliser cette étude, l'EPPNC et le BRGM ont établi un partenariat technique, scientifique et financier. D'autres partenaires financiers ont aussi apporté leur soutien : l'Agence de l'Eau Adour Garonne et la région Occitanie.

Les comités départementaux de spéléologie de la Lozère et de l'Aveyron seront quant à eux associés sur le plan technique.



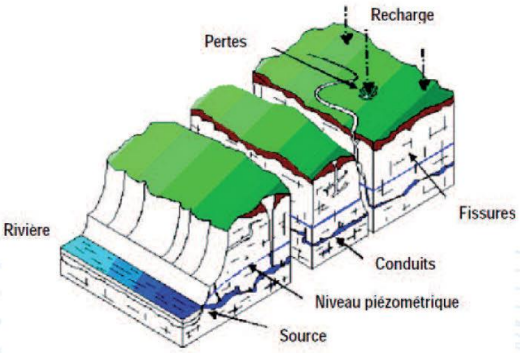
© PnC - Résurgence de Castelbouc

Quelques points clés

- Démarrage du projet : **novembre 2016**
- Durée : **48 mois**
- Gouvernance : **un comité technique, un comité de pilotage et des communications publiques**

Définition d'un aquifère karstique

Un aquifère est une formation géologique qui peut stocker de l'eau et la faire circuler. Les aquifères karstiques sont des aquifères particuliers qui se développent dans des formations solubles, le plus souvent calcaires ou dolomitiques. Les écoulements souterrains ont élargi certains vides par dissolution à l'origine de réseaux karstiques pouvant être pénétrables (réseaux spéléologiques).



Les actions qui seront menées les 6 premiers mois (nov 16 - Avril 17)

- Mise en place du matériel de suivi des sources : mesures des débits en continu, analyse de la qualité de l'eau...
- Observations de terrain pour affiner la connaissance de la géologie et de la géomorphologie
- Planification des opérations de traçage qui seront réalisées à partir du printemps 2017 (injection de colorants pour connaître le cheminement de l'eau souterraine vers les sources)

La zone d'étude

La zone d'étude est constituée par le Causse Méjean, séparé du Causse de Sauveterre au nord par les gorges du Tarn, et du causse Noir au sud par celles de la Jonte. Les 7 systèmes karstiques étudiés sont les plus importants. Leurs exutoires sont les sources du Moulin de Pélatan, Castelbouc, les Ardennes, l'Ironselle, les Douzes, le Pêcher, Saint Chély (déjà suivie par le BRGM).



L'EPPNC en bref :

L'établissement public du Parc national apporte son aide au territoire avec cette étude hydrogéologique : mise à disposition du personnel et ingénierie, afin de répondre aux questions de connaissances et de développement futur.

Le BRGM en bref :

Service géologique national, le BRGM est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la terre. Les spécialistes de sa direction régionale apportent ainsi son expertise et met en place les actions nécessaires pour mener à bien l'étude.

© Conception : Parc national des Cévennes • Crédit photo : Yannick Manche

Pour de plus amples informations et recevoir ce bulletin, contactez :
- Yannick Manche PNC - SDD• 04 66 49 53 11 • yannick.manche@cevennes-parcnational.fr
- Claudine Lamotte BRGM - Direction régionale Occitanie • 04 67 15 79 87 • c.lamotte@brgm.fr

Bulletin 2



Etude des ressources en eaux souterraines du causse Méjean

Multi-traçage n°1 : traçages des avens des Loups et du pic d'Usclat

Cette première campagne de multi-traçage a pour but de mieux délimiter les bassins d'alimentation des sources Nord-Est du causse Méjean, et notamment les limites des systèmes de Castelbouc, du moulin de Pélatan et du Pêcher. Elle doit également permettre de décrire le transit entre le point d'injection et le ou les exutoire(s) du système tracé, ce qui nécessite de suivre en parallèle les débits au(x) point(s) de restitution.
Les produits injectés sont sans danger pour l'environnement et la qualité des eaux.

Un multi-traçage permet de comparer les dynamiques de restitution des traceurs dans les mêmes conditions hydrologiques s'ils s'écoulent vers le même exutoire.



Spéléologues accédant à la cavité du pic d'Usclat (8 spéléologues mobilisés pour amener le traceur à – 200 m sous la surface) © PnC

Aucune opération de traçage n'avait jusqu'alors été réalisée depuis l'aven des Loups ou à proximité . Les connaissances antérieures permettaient de supposer que le traceur ressortait probablement à la source du moulin de Pelatan, même s'il n'était pas exclu que la restitution puisse être aux sources de Castelbouc ou du Pêcher.

Une opération de traçage datée du 7 avril 1979 est reportée par Bérard (1984) pour l'aven du pic d'Usclat. Aucune information n'est disponible sur les conditions d'injection et de suivi de la restitution de ce traçage, qui aurait donné un résultat positif aux sources de Castelbouc et du Pêcher. Bérard (1984) attribue cependant ce secteur du causse Méjean à la source du Pêcher sur la base d'arguments géologiques et tectoniques.

1- Injections

Les injections ont été réalisées dans les avens des Loups et du pic d'Usclat le même jour (le 18 mars 2017, avec des traceurs différents, par deux équipes différentes de spéléologues, intervenant dans le cadre d'une convention entre le BRGM, le Parc national des Cévennes et le Comité départemental de spéléologie de la Lozère.

2- Observation des restitutions

3 sources sont observées :
- Castelbouc n°1 ;
- Source du Pêcher dans la chambre de captage ;
- Moulin de Pélatan

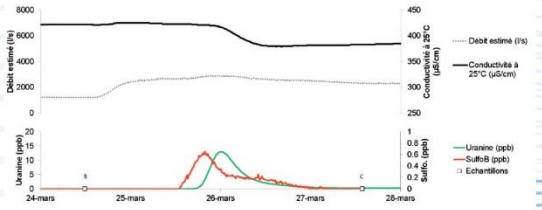
Elles sont équipées de matériel afin de suivre les débits et le traçage (avec des fluorimètres), en complément de suivis de hauteur, température et conductivité électrique de l'eau.

Les fluorimètres permettent de mesurer en continu la concentration de l'eau en traceur (uranine, rhodamine, etc.) grâce à une analyse de la fluorescence de l'eau sur différentes plages de longueur d'ondes. La hauteur d'eau permet, par conversion à l'aide d'une courbe de tarage, de connaître le débit de l'exutoire, tandis que la température et la conductivité électrique de l'eau renseignent sur le type d'eau qui atteint cet exutoire. En effet, l'eau infiltrée rapidement après une pluie apparaît moins minéralisée et plus froide à la source.

Des tournées régulières de prélèvements manuels complètent ce dispositif afin de valider par des analyses en laboratoire la présence de traceur(s) aux différentes sources.

3- Premières interprétations de l'essai et conclusion

Comme premier résultat, nous constatons que les 2 traceurs se retrouvent à la source de Castelbouc.
La courbe de restitution du traçage de l'aven du pic d'Usclat est confirmée par les analyses sur les échantillons prélevés manuellement. Pour le traçage de l'aven des Loups, les résultats sont un peu moins fiables du fait des faibles concentrations mais il y a suffisamment de données pour être sûr du résultat positif :



Courbes de restitution obtenues à Castelbouc n°1 des 2 traçages

Le traceur injecté à l'aven des Loups (Sulforhodamine B) ayant une concentration très faible laisse penser qu'un exutoire important n'a pas été suivi. Il pourrait s'agir par exemple de la source des Estivants, ce qui reste à vérifier.
Le temps moyen de séjour de l'eau calculé pour les deux traçages est de l'ordre de 7.5 (aven des Loups) à 7.7 (pic d'Usclat) jours, ce qui donne des vitesses apparentes de 34 à 48 m/h respectivement. La mobilisation du traceur a été facilitée par la pluie à partir du 24 mars.



Carte de localisation des deux opérations de traçage à l'échelle du causse Méjean

Récit de l'injection dans l'aven des Loups par Ange NAREZO, jeune spéléologue (14 ans) de l'Ecole départementale de spéléologie et du Spéléo club caussenard de Chanac, encadrés par David BRILLOT

L'aven des Loups est un beau trou mais le p60 est un peu « craignos » avec ses grosses pierres en équilibre...

La salle (je parle de celle où nous avons mangé et non de Jean Lasalle ;)) où nous nous sommes installés pour le traçage était propice à cette opération car, comme on le voit sur la vidéo, ces deux petits lacs nous ont bien servi pour dissoudre la poudre dans les bidons et ensuite rincer les parois de la grotte (en vain !). Chaque contact avec n'importe quel objet le rendait rose fluo. Arthur et Tanguy, nos deux volontaires, ont enfilé les combinaisons, les gants et les lunettes de protection mais tout cet équipement ne leur a pas été de grande utilité car, à la sortie, eux deux et moi-même étions rose fluo de la tête aux pieds. Quant à David, il s'occupait de nous coacher, de faire la chaîne pour transvaser de l'eau avec un petit récipient (une tâche compliquée lorsqu'on essaie de ne pas se rendre rose !). Ces allers-retours entre les mains de nos scientifiques amateurs ont rendu l'eau du petit lac d'une couleur étrange : un mélange de vase et de rose fluo qui donnait un rose opaque.

Pour ma part, cette petite aventure m'a bien plu et je recommencerai sans hésiter.

Merci aux deux équipes de spéléologues :

- *Jean-Louis Rocher et Jean-Yves Bigot, assistés de Domeyne, Prisca Santucci, François Ollivier, Léna Rocher, Christophe Ricard et Philippe Thérondel pour l'aven du pic d'Usclat ;*
- *David Brillot, Leslie Cardot et les jeunes de l'EDSC : Arthur Ausset, Corentin Ausset, Ange Narezo, Tanguy Rocher à l'aven des Loups pour l'injection et Arthur Ausset, Théo Calmels, Florent Hittinger, Ange Narezo, Florent Nore pour l'équipement.*

© Conception : Parc national des Cévennes - Juillet 2017 • Crédit photo : Yannick Manche

Pour de plus amples informations et recevoir ce bulletin, contactez :
• Yannick Manche PNC - SDD• 04 66 49 53 11 • yannick.manche@cevennes-parcnational.fr
• Claudine Lamotte BRGM - Direction régionale Occitanie • 04 67 15 79 87 • c.lamotte@brgm.fr

La Région Occitanie Pyrénées - Méditerranée
AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Bulletin 3



Une étude géologique de terrain pour une meilleure compréhension de l'hydrogéologie du causse Méjean

L'été dernier, une reconnaissance de la géologie du Causse Méjean a été menée par le BRGM et le Parc national des Cévennes. L'objectif de ce travail était d'apporter des éléments de réponse sur le cheminement des eaux souterraines à l'intérieur du massif calcaire. Il a été conduit par les géologues du BRGM et a fait l'objet d'un travail de stage approfondi réalisé par Coline Ariagno, étudiante en 5ème année de géologie à l'ENSEGID à Bordeaux.

Comment l'eau circule-t-elle en sous-sol ?

Les ressources en eau souterraine du causse Méjean sont contenues dans les formations perméables (calcaires et dolomies), observables le long des gorges du Tarn et de la Jonte.
L'eau stockée dans la roche y circule, en élargissant par dissolution certaines fissures. Ce lent travail souterrain de l'eau crée, en profondeur, un réseau complexe de galeries, dit « réseau de drainage karstique », que les écoulements empruntent pour ressortir sous la forme de sources au fond des gorges.

Pourquoi mieux comprendre ces circulations d'eau ?

L'étude de l'organisation de ce réseau permet de mettre en évidence plusieurs bassins versants souterrains indépendants les uns des autres. Il s'agit ensuite de les reporter en surface de manière à délimiter l'étendue des bassins d'alimentation correspondant à chacune des sources. Cette cartographie des systèmes karstiques peut alors servir de base à la proposition de stratégies adaptées, visant à protéger la ressource en eau.

Il est donc essentiel de comprendre quelles sont les structures géologiques qui contrôlent l'organisation de ces réseaux, thème de la recherche de Coline.

Comment un géologue s'y prend-t-il ?

Pour cela, les outils utilisés par les géologues sont multiples. L'un d'eux consiste à identifier dans le paysage des accidents (plis, failles, brèches) qui modifient la géométrie presque horizontale des épaisses séries géologiques du causse Méjean, et qui peuvent

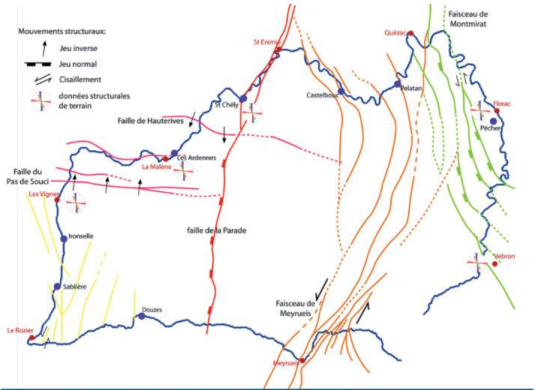


Illustration 1 : cinq familles d'accidents ont été repérés sur le causse Méjean

avoir un impact sur l'écoulement des eaux souterraines. Barrière, drain, mise en contact d'aquifères, le rôle de certaines de ces structures dans l'écoulement des eaux souterraines reste encore à préciser. Les résultats des observations ainsi que d'autres travaux réalisés cet été ont montré que de nombreux accidents géologiques recoupent le causse Méjean. Cinq familles d'accidents ont pu être mises en évidence (illustration 1) : la faille de la Parade (rouge), les failles majeures EW (rose), le faisceau de Meyrueis (orange), le faisceau de Montmirat (vert), et des failles annexes du faisceau du Rozier (jaune).

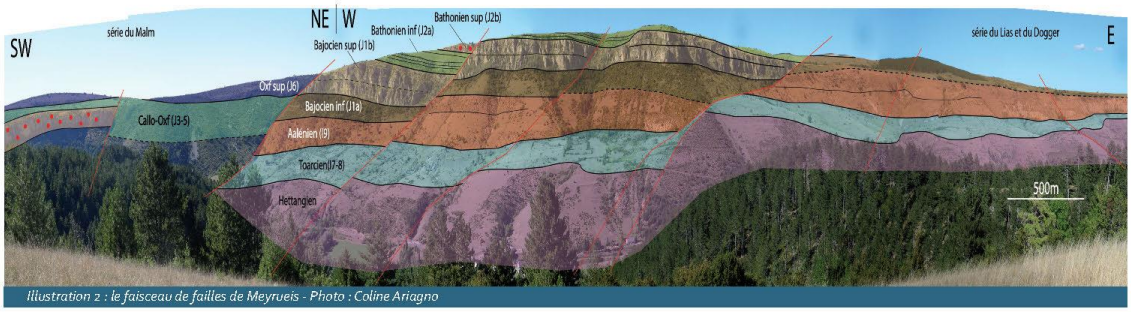


Illustration 2 : le faisceau de failles de Meyrueis - Photo : Coline Ariagno

« La mégabrèche de Montbrun », illustration réalisée à partir d'une photographie prise depuis la route des gorges du Tarn, en amont de Montbrun. La mégabrèche interrompt brutalement les séries du Jurassique supérieur, matérialisées de part et d'autre de cet accident. Son rôle n'est pas encore précisément connu dans la mise en place des réseaux de drainage et donc sur l'écoulement des eaux souterraines.

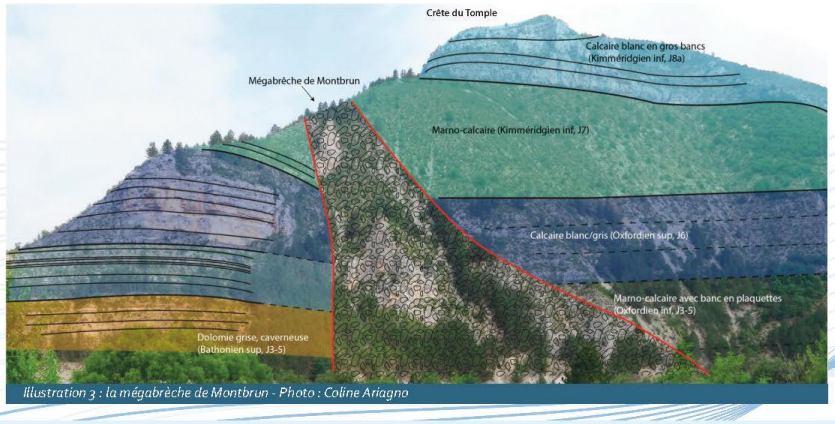


Illustration 3 : la mégabrèche de Montbrun - Photo : Coline Ariagno

Ce travail sera complété par d'autres outils (étude de la nature des roches notamment, qui peut aussi contrôler la mise en place de ces réseaux de drainage). Les résultats de l'étude géologique seront ensuite confrontés aux résultats des différentes campagnes d'analyses des eaux et de traçages (injection d'un colorant en un point du bassin – voir bulletin semestriel n°2 de Juillet 2017).
Le repérage de ces circulations permet de mettre en évidence l'organisation du réseau qu'elles forment en plusieurs bassins versants souterrains indépendants les uns des autres. Il s'agit ensuite de les reporter en surface de manière à délimiter l'étendue des bassins d'alimentation correspondant à chacune des sources.


Parallèlement les traçages continuent : injection réalisée dans l'aven de La Barelle en février 2018 © Philippe Crochet

© Conception : Parc national des Cévennes - Avril 2018 • Crédit photo : Yannick Manche - Coline Ariagno - Philippe Crochet

Pour de plus amples informations et recevoir ce bulletin, contactez :
- Yannick Manche PNC - SDD• 04 66 49 53 11 • yannick.manche@cevennes-parcnational.fr
- Claudine Lamotte BRGM - Direction régionale Occitanie • 04 67 15 79 87 • c.lamotte@brgm.fr

La Région Occitanie Pyrénées - Méditerranée
AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTERE DU DEVELOPPEMENT DURABLE

Bulletin 4

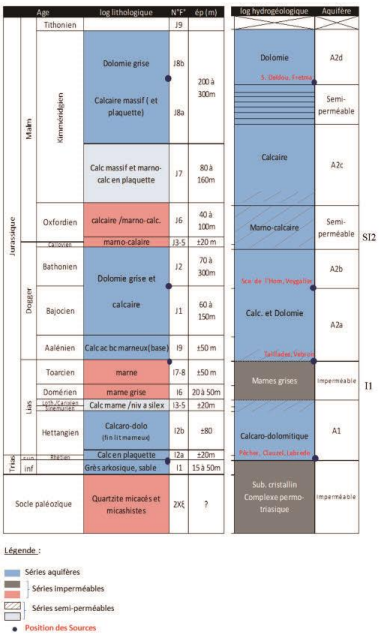


Une étude géologique de terrain pour une meilleure compréhension de l'hydrogéologie du causse Méjean… la suite !

Le bulletin précédant évoquait le travail entrepris l'été dernier sur la reconnaissance de la géologie du causse Méjean menée par le BRGM et le Parc national des Cévennes. L'objectif de ce travail est d'apporter des éléments de réponse sur le cheminement des eaux souterraines à l'intérieur du massif calcaire jusqu'à leur sortie sous la forme de sources dans les gorges. Dans ce bulletin, il est question des apports de la géologie à l'hydrogéologie.

Définir des unités hydrogéologiques

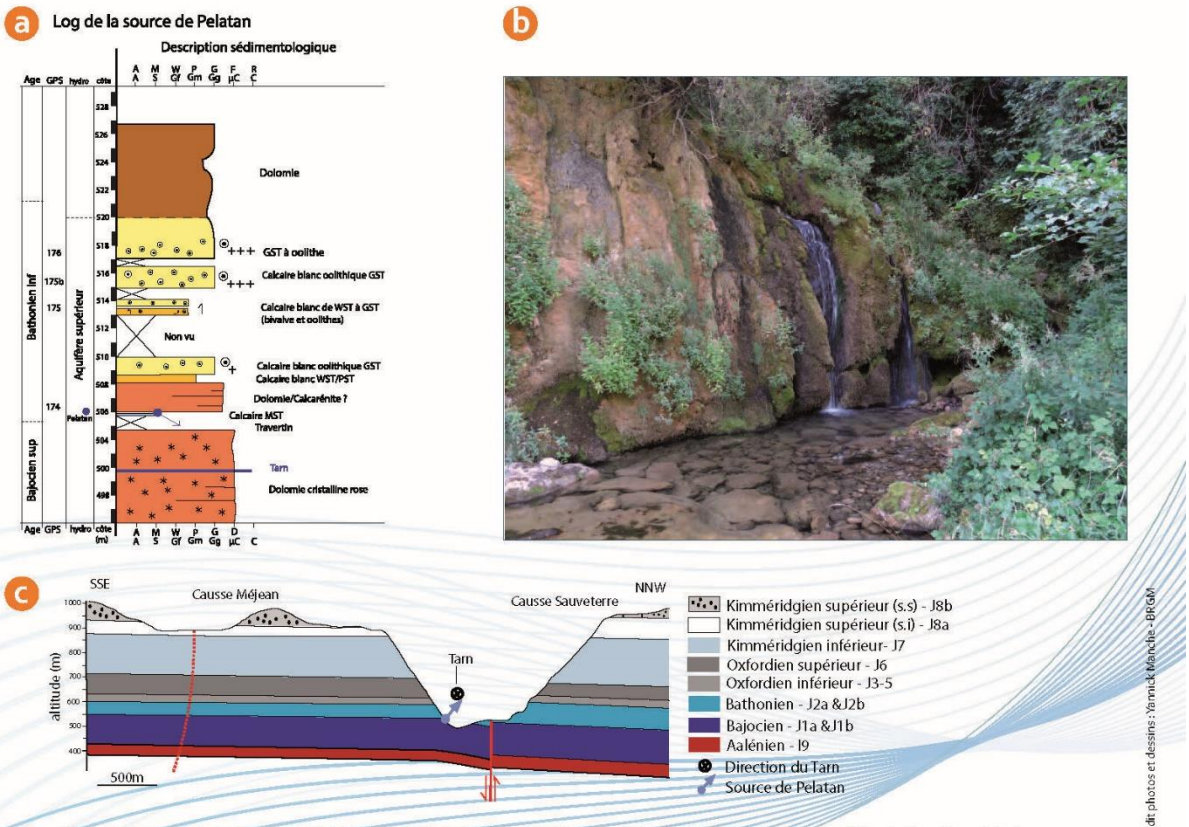
Il s'agit d'identifier, à partir de la nature des roches, des observations de terrain et de la carte géologique, les couches géologiques imperméables (marnes, argiles – représentées en gris ou hachurées dans le tableau) délimitant des niveaux où l'eau circule (calcaires et dolomies karstifiés – figurés en bleu). Ainsi, les marnes grises du Toarcien marquent la limite entre les deux aquifères principaux du causse Méjean : l'aquifère du Jurassique inférieur (Hettangien, noté A1) qui alimente par exemple la source du Pêcher à Florac, et celui du Jurassique supérieur, qui approvisionne par exemple les sources de Castelbouc.



Dans la figure ci-contre, on voit que cet aquifère, d'une épaisseur d'au moins 400 mètres, peut être subdivisé en 4 niveaux (notés A2 a-b-c-d) déterminés par la position des sources et des niveaux semi-perméables.
La colonne de gauche présente la succession des différentes couches qui composent le sous-sol au-dessus de Florac : du bas vers le haut, on voit les couches des plus anciennes aux plus récentes (log lithologique). La nature perméable ou imperméable de ces différentes couches est indiquée dans la colonne de droite (log hydrogéologique). Des unités hydrogéologiques ont été distinguées au sein des séries aquifères. La position des sources y a été reportée et permet une réflexion sur les niveaux semi-imperméables de ce côté du Causse.

Comprendre l'organisation des unités hydrogéologiques à partir des couches géologiques

A partir des unités hydrogéologiques, des coupes, des panoramas (voir le bulletin précédent) et des profils géologiques ont été réalisés pour expliquer la géométrie des couches géologiques. Les connexions entre aquifères, initiées grâce à des plis ou des failles, sont ainsi montrées. Il est alors plus facile de comprendre le parcours des eaux souterraines jusqu'aux sources. Une caractérisation des roches (étude sédimentologique) plus précise a aussi été menée pour décrire le contexte d'émergence des principales sources le long du Tarn et de la Jonte. L'exemple suivant présente les résultats obtenus pour la source du Moulin de Pélatan à proximité du village de Montbrun :



Analyse sédimentologique du contexte d'émergence (a) de la source du Moulin de Pélatan (b) et coupe en 2D du système karstique présentant les différentes formations géologiques et le schéma de circulation de l'eau (c)

On voit ainsi sur ce secteur que la source émerge à la base du Bathonien inférieur, sûrement à la faveur d'une couche moins perméable au sommet du Bajocien supérieur. On distingue ainsi deux unités hydrogéologiques : celle du Bathonien inférieur, et celle du Bajocien supérieur.

Cette phase d'étude de la géologie, conduite en association avec d'autres recherches (chimie des eaux, traçages, mesure des débits,...) est indispensable pour comprendre la circulation de l'eau. La synthèse de l'ensemble de ces travaux nous permettra d'acquérir les connaissances et de connaître le fonctionnement, la structure et la localisation des réserves en eaux souterraines présentes au niveau du causse Méjean.

© Conception : Parc national des Cévennes - Juin 2018 • Crédit photos et dessins : Yannick Manche - BRGM

Pour de plus amples informations et recevoir ce bulletin, contactez :
- Yannick Manche PNC - SDD• 04 66 49 53 11 • yannick.manche@cevennes-parcnational.fr
- Claudine Lamotte BRGM - Direction régionale Occitanie • 04 67 15 79 87 • c.lamotte@brgm.fr

Bulletin 5



Bulletin semestriel N°5 • Mai 2019

Bilan intermédiaire des opérations de traçage sur le Causse Méjean (Janv. 2019)

Les traçages – pourquoi ? comment ?

Les opérations de traçages menées sur le causse Méjean consistent à injecter un colorant fluorescent (vert ou rouge selon le traceur utilisé) depuis un point d'infiltration à la surface du Causse ou au fond d'un aven par des spéléologues.

La mobilisation d'une quarantaine de spéléologues a permis de réaliser 16 traçages sur (ou plutôt sous) le causse Méjean. Grâce au Comité départemental de Spéléologie de la Lozère, à la connaissance du terrain et à la motivation des spéléologues amateurs, ces opérations ont pu être réalisées en 16 mois. En injectant les colorants au plus profond des réseaux (jusqu'à -400 m de profondeur à l'aven de la cheminée par exemple), là où est observé un écoulement naturel de l'eau, ils ont optimisé les chances de sortie des traceurs vers les différents exutoires.

En complément des autres investigations menées dans le cadre du projet, les traçages permettent de préciser l'extension des bassins d'alimentation des sources et de décrire les modalités de déplacement de l'eau jusqu'à la source (vitesse de déplacement et durée de la restitution) pour caractériser la vulnérabilité d'un site à une pollution. Ces résultats seront notamment précisés en étudiant pour la première fois sur cette zone l'évolution des débits des différentes sources au cours des 3 années de suivi du projet.

Le bulletin semestriel n°2 relatait les premiers traçages réalisés depuis les avens des Loups et du Pic d'Usclat n°4. Ce bulletin fait le point sur les traçages réalisés depuis, et sur les nouvelles connaissances qu'ils ont permis d'acquérir concernant les circulations des eaux souterraines du Causse. Il reste encore quelques opérations de traçages à mener dans le cadre du projet, mais les résultats acquis après 16 injections permettent de mettre à jour l'état des connaissances sur le partage des eaux souterraines à la surface du Causse.

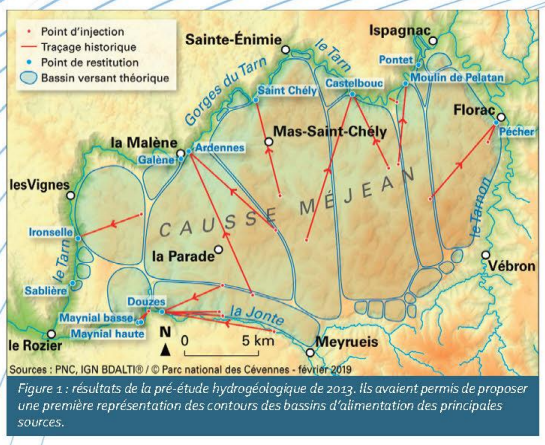


Figure 1 : résultats de la pré-étude hydrogéologique de 2013. Ils avaient permis de proposer une première représentation des contours des bassins d'alimentation des principales sources.

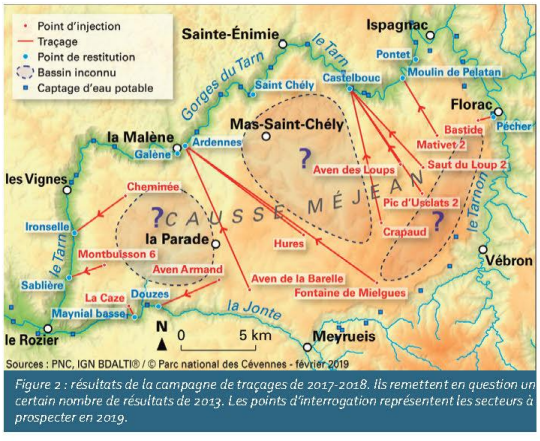


Figure 2 : résultats de la campagne de traçages de 2017-2018. Ils remettent en question un certain nombre de résultats de 2013. Les points d'interrogation représentent les secteurs à prospecter en 2019.

Ces résultats contribuent significativement à la connaissance, la protection et la gestion durable de la ressource en eau du causse Méjean.

Nouveaux résultats vs. connaissances historiques

Avant le démarrage du projet, la synthèse des connaissances réalisée en 2013 (figure 1) avait permis de proposer une première représentation des contours des bassins d'alimentation des principales sources du Méjean. Cette délimitation s'appuyait sur des résultats de traçages anciens et sur une hypothèse d'un drainage souterrain calé sur les structures (failles) orientées principalement Nord-Sud.

Pourquoi les traçages historiques peuvent-ils être faux ? Les techniques de surveillance de la restitution des traceurs ont énormément évolué depuis leur réalisation : les fluorimètres utilisés dans le projet permettent d'éviter toute erreur d'interprétation sur la restitution du traceur. Les nouveaux résultats (figure 2) sont beaucoup plus fiables et permettent de revoir complètement la délimitation des bassins d'alimentation des principales sources, avec un drainage organisé Sud-Est / Nord-Ouest en cohérence avec les conclusions de l'étude géologique (bulletin n°3 et 4) et géomorphologique. Ces profondes modifications concernent notamment des sources à enjeux comme celle du Pêcher captée par la commune de Florac ou celle du Moulin de Pélatan captée pour le village de Montbrun. Ce premier bilan des résultats acquis montre ainsi que certaines hypothèses ou connaissances historiques étaient fausses et doivent être mises à jour.



Injection à l'aven de la Barelle, Causse Méjan © Philippe CROCHET

Le palmarès des sources du Méjean

Ces nouveaux résultats permettent de revoir l'importance relative de chaque source. Par exemple, le bassin d'alimentation de la source des Ardennes (La Malène) était largement sous-estimé, et cette découverte rappelle combien les apparences peuvent être trompeuses : contrairement à Castelbouc, exsurgence des gorges particulièrement visible, la source des Ardennes ressort en toute discrétion de manière diffuse sur une largeur de 50 mètres en amont du pont du village de la Malène. Pourtant celle-ci est la principale source du causse Méjean.

Et la suite ?

Le dernier traçage en date a eu lieu début janvier 2019 depuis l'aven Armand avec pour objectif de préciser la ligne de partage des eaux souterraines entre la Jonte et le Tarn. Il restera encore également à clarifier les limites des bassins d'alimentation de la source du Pêcher et de Saint-Chély-du-Tarn ainsi que le devenir des eaux infiltrées entre La Malène et Les Vignes.

Et c'est bien là ce que l'on attend de ce projet : pouvoir délimiter de manière fiable les bassins d'alimentation des sources qui drainent le causse Méjean à partir des résultats de traçages, en cohérence avec les conclusions des études géologiques, géomorphologiques et les prochaines conclusions issues de l'interprétation des débits et de la chimie de l'eau.

Les 1ère S du lycée Peytavin de Mende s'initient à la recherche

« Dans le cadre de notre Travail Personnel Encadré de la classe de 1S du lycée Emile Peytavin sur la conductimétrie, nous cherchons à voir à travers notre problématique où se dirige l'eau observée au fond de l'aven de la Sompe à Riesse car les précédents traçages réalisés n'ont rien donné aux sources des Ardennes et de l'Ironselle. Nous sommes parties de la Malène en canoë pour mesurer automatiquement la conductivité au fil de l'eau, jusqu'au Pas de Soucis. Grâce à cette mesure au fil de l'eau, nous avons pu constater qu'entre le pont de la Malène et le Pas de Soucis, il n'y a pas de saut de conductivité donc de sources. Mais cette mesure nous a permis de mettre en évidence des sources sous le pont de la Malène et la grotte de la Galène. On va pouvoir installer un fluorimètre dans cette grotte qui pourrait être l'exutoire de l'aven de Riesse. »

Coline LABEAUME et **Marion LAURENT**, élèves de Première Scientifique au Lycée Peytavin de Mende.

© Conception : Parc national des Cévennes - Mai 2019 • Crédit photos et dessins : Yannick Manche - BRGM

Pour de plus amples informations et recevoir ce bulletin, contactez :
- Yannick Manche PNC • 04 66 49 53 11 • yannick.manche@cevennes-parcnational.fr
- Claudine Lamotte BRGM - Direction régionale Occitanie • 04 67 15 79 87 • c.lamotte@brgm.fr

Bulletin 6



A la recherche des paysages disparus

Dans cette nouvelle phase de l'étude pluridisciplinaire menée par le BRGM et le Parc national des Cévennes, deux géologues spécialisés en géomorphologie et karstologie - Hubert Camus de l'entreprise CENOTE et Eglantine Husson du BRGM - ont fait équipe pour réaliser la cartographie des formations superficielles et des morphologies karstiques, visibles en surface comme en profondeur qui donnent sa physionomie actuelle au Causse. De là, ils ont reconstitué depuis leur origine l'histoire de paysages disparus dont ces formes sont les témoins.

Pourquoi cette étude ?

On appelle « formations superficielles » (ou résiduelles), les restes érodés des couches sédimentaires majoritairement issues du Jurassique qui ont traversé les ères géologiques pour arriver jusqu'à nous.

L'érosion que ces formations ont subie est liée à la faculté des calcaires de se dissoudre (sous l'action chimique de l'eau) pour former des creux en surface et des vides en profondeur. On retrouve ainsi ces résidus calcaires sous deux formes : piégés dans des dépressions à la surface du Causse (formations superficielles) ou préservés de l'érosion chimique dans les cavités souterraines car moins solubles.

Leurs formes nous donnent de précieux renseignements sur les anciens paysages et leur évolution, sur les conditions climatiques au cours des ères géologiques (par ex, les périodes de climat humide ont favorisé l'érosion chimique), sur la formation du karst et d'éléments caractéristiques des systèmes karstiques comme les anciennes sources ou zones de recharge (réservoirs d'eau souterrains).

Comprendre d'où viennent ces formes est donc très important pour expliquer les paysages caussenards actuels et le fonctionnement souterrain des circulations d'eau tel qu'il se présente à nous aujourd'hui.

Quelle histoire racontent les paysages ?

Partant de leurs observations, nos spécialistes ont retracé depuis son début une histoire vieille de 200 Ma qui, sur une période de plus 100 Ma, a pour théâtre la région des Grands Causses : s'y jouent la mise en place et l'évolution des paysages, étape par étape, au cours des ères géologiques successives. Pour se faire une idée de tels âges représentant des millions d'années, on pourrait ramener l'histoire de la planète à 24h00 : la vie sur Terre arriverait à 23h00, l'homme à 23h59… et le début de l'histoire des paysages du Causse démarrerait à 04h00 !

Tout commence au Jurassique (-200 Ma à -140 Ma) alors que des couches de sédiments marins, à l'origine du calcaire des causses, se déposent au fond de la mer (bulletin n°4). Dans ce premier acte de notre histoire, les couches qui, tour à tour, recouvrent la région, dessinent un paysage sous-marin plat fait de strates carbonatées ; le causse avant qu'il ne devienne un causse.

Le dernier acte de cette histoire débute il y a 13 Ma, dans une vallée où le Tarn s'enfonce suivant une ligne de faiblesse entre granite et calcaire (la faille de Montmirat), creuse les gorges et découpe la forme actuelle du Méjean (suivront « peu après » les entailles de la Jonte et du Tarnon).

Que s'est-il passé entre ces deux épisodes clé ? Pourquoi et comment les paysages les plus anciens ont-ils cédé la place à de nouveaux paysages, en laissant derrière eux un peu d'eux-mêmes ? C'est ce que nous apprenons, scène après scène, en suivant chronologiquement la longue histoire de la formation du Causse.

Chronique de la genèse des paysages caussenards

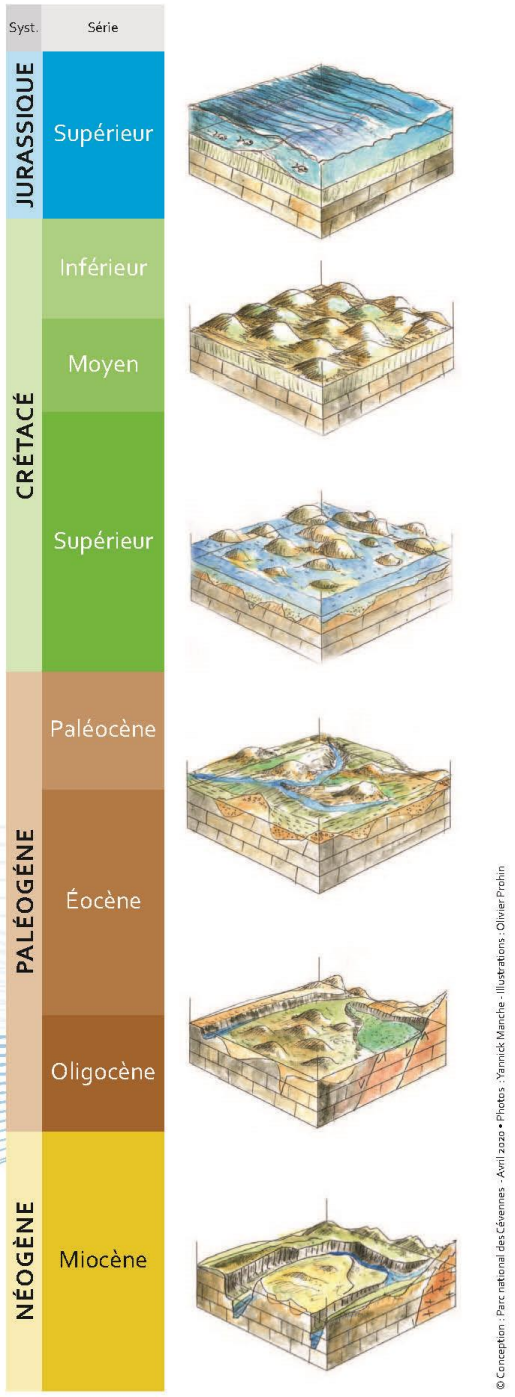
Au Crétacé inférieur (-140 Ma), la région sort des mers sous l'effet d'un soulèvement général qui provoque l'érosion et l'altération des terrains se retrouvant hors d'eau. Sur le calcaire jurassique se dépose une formation issue de cette altération, la bauxite, sous laquelle les carbonates sont altérés et karstifiés. Cette première phase d'érosion souterraine marque le début du façonnage des formes que nous connaissons aujourd'hui (voir bulletin 7). En surface, avec l'altération, s'installent des « karst à butte », un paysage typique de petits dômes séparés par des dépressions fermées. On retrouve actuellement sur plusieurs causses des résidus de bauxite au fond de ces anciennes dépressions.

Au Crétacé supérieur et au Paléocène (-80 à -60 Ma), la mer revient et se retire plusieurs fois. A chaque retrait, l'érosion et la karstification reprennent, puis lorsque la mer revient, elle fige les formes, dépose des sédiments dans les cavités karstiques et les dépressions du paysage, et finalement une épaisse couverture de sédiments dont de nombreux témoins nous sont parvenus comme des formations superficielles.

La mer quitte définitivement la région au début du Tertiaire (-60 Ma). Des dynamiques continentales prennent alors le dessus avec l'altération des couvertures sédimentaires précédemment déposées. L'altération et l'érosion de ces couches donnent un cortège « sidérolithique » (riche en fer) de formations superficielles. Ce cortège est progressivement érodé et transporté par les cours d'eau qui s'écoulent à la surface des causses, formant des petits vallons aujourd'hui complétement secs comme par exemple au-dessus du ravin des Bastides. D'autre part, la formation de la chaîne pyrénéenne dont les contraintes tectoniques se font ressentir jusque dans la région provoque des déformations et des ondulations à la surface des Grands Causses. Les cours d'eau se concentrent alors dans les creux et les bosses sont décapées par l'érosion, mettant à nu les calcaires du Jurassique.

Autour de -25 Ma, la région est bouleversée par l'ouverture de la Méditerranée. Le massif des Cévennes constitue désormais un point haut et est peu à peu érodé jusqu'à son socle composé de granite et de schiste. Les écoulements se mettent en place de part et d'autre de cette nouvelle limite de partage des eaux entre Atlantique et Méditerranée. Côté Atlantique, le causse Méjean se retrouve alors en position de piémont vis-à-vis de ce qui deviendra le massif du mont Aigoual. De grandes plaines à fond plat se déploient au contact des Cévennes qui réceptionnent les cours d'eau et leurs sédiments en provenance de ce relief.

Puis, vers -13 Ma, sous l'effet de la poussée alpine, le Massif central et les Cévennes sont soulevés. Les grandes plaines à fond plat sont découpées par de nouvelles vallées qui correspondent aux futurs canyons encadrant le causse Méjean (Tarn et Jonte). En se creusant en dernier, le Tarnon finit de séparer le causse Méjean du massif des Cévennes.



© Conception : Parc national des Cévennes - Avril 2020 • Photos : Yannick Manche - Illustrations : Olivier Prohin

Pour de plus amples informations et recevoir ce bulletin, contactez :
- Yannick Manche PNC • 04 66 49 53 11 • yannick.manche@cevennes-parcnational.fr
- Claudine Lamotte BRGM - Direction régionale Occitanie • 04 67 15 79 87 • c.lamotte@brgm.fr

La Région Occitanie Pyrénées - Méditerranée
AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE

Bulletin 7



La karstification sous couverture

Ce nouveau bulletin propose de s'arrêter sur un point particulier de ce que nous apprend l'étude conduite pour la réalisation de « la cartographie des formations superficielles et des morphologies karstiques », présentée dans le bulletin précédent.

L'histoire géologique, expliquée dans le bulletin n°6, est très importante pour comprendre l'origine du fonctionnement des systèmes karstiques actuels du causse Méjean. Bien qu'aujourd'hui les carbonates affleurent en grande majorité à la surface des causses, ils ont longtemps été recouverts par des dépôts sédimentaires. Lors de l'altération et de l'érosion de ces anciennes couvertures sédimentaires, les carbonates situés en-dessous ont eux aussi été affectés. Ce phénomène particulier qu'on appelle « karstification sous couverture » est à l'origine d'un type de formation superficielle caractéristique du karst dont les paysages recèlent de nombreux sites emblématiques comme par exemple les corniches du Rochefort, les vases de Chine et de Sèvres, les arcs St-Pierre et Nîmes-le-Vieux.

Qu'est-ce que la karstification sous couverture ?

La karstification est un processus de dissolution d'une roche - comme les carbonates (calcaire, dolomie...) - sous l'action d'une eau légèrement acide, comme l'eau de pluie. Cette eau circule par les fissures de la roche et les agrandit par dissolution. A cette étape, lorsqu'il existe un gradient hydraulique, c'est-à-dire, lorsque l'eau s'écoule d'un point haut vers un point bas, la gravité s'ajoute à l'action de dissolution provoquant le creusement de réseaux karstiques « classiques », avec la formation de galeries, cavités, grottes...

A l'inverse des systèmes karstiques « classiques », la karstification sous couverture (appelée aussi crypto-karstification) est le résultat d'une altération (dissolution) dans un contexte de très faible gradient hydraulique. Pour ce faire, la couverture sédimentaire doit être perméable de façon à faire percoler l'eau, de la surface jusqu'à la première couche carbonatée (le substratum).

Cette couverture qui fonctionne comme une éponge humide favorise la dissolution au sommet du substratum, générant des surfaces d'aplanissement pouvant atteindre de très grandes tailles (Illustration 1). Dans le cas où l'altération est très intense, des racines d'altération se forment, localisant une dissolution plus forte et provoquant l'approfondissement du toit du substratum. Il se crée dans ces secteurs de grands entonnoirs par lesquels la couverture sous-jacente est entraînée. Lors de l'érosion de cette couverture, des reliefs résiduels (buttes, pinacles) plus ou moins arrondis apparaissent, séparés par des dépressions en entonnoir (crypto-dolines).

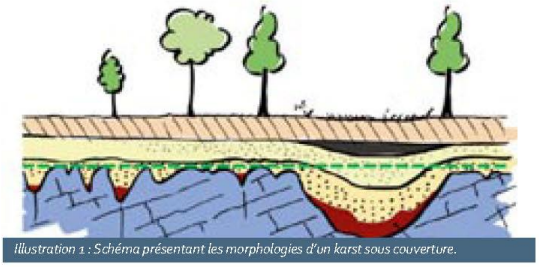


Illustration 1 : Schéma présentant les morphologies d'un karst sous couverture.

La karstification sous couverture du causse Méjean : quand et comment s'exprime-t-elle ?

Comme présenté dans le bulletin précédent, la région des Grands Causses a subi une longue évolution sous couverture, depuis l'émergence des couches carbonatées jurassiques (-140 millions d'années) jusqu'au creusement des vallées du Tarn, de la Jonte et du Tarnon qui a débuté il y a 13 millions d'années.

La karstification sous couverture débute au Crétacé inférieur (-140 Ma) lorsque de la bauxite recouvre l'ensemble de la région émergée. Le climat d'alors est chaud et humide, offrant des conditions favorables pour l'altération de la couverture bauxitique et la karstification des carbonates sous-jacents. L'altération est si intense qu'elle pénètre très profondément au sein du massif, le long des fractures et dissout un très grand volume de roche, permettant la création de véritables couloirs d'altération en profondeur.

Si le plateau paraît dans son ensemble plutôt plat, c'est qu'une surface d'aplanissement généralisée s'est formée au début du Tertiaire (-60 à -40 Ma). Durant cette nouvelle période hors d'eau, l'altération attaque une nouvelle fois le Causse alors que celui-ci venait d'être recouvert par des sédiments marins au Crétacé supérieur (déposés entre -85 et -65 Ma). La karstification sous couverture reprend alors, réutilisant en partie les couloirs d'altération précédemment formés, et en en formant de nouveaux.

Lors de ces deux périodes majeures de karstification sous couverture, les canyons du Tarn, de la Jonte et du Tarnon, n'existent pas encore. Le gradient hydraulique est donc très faible. Les résidus insolubles issus de la dissolution des carbonates et de la couverture altérée entraînée au sein du massif carbonaté ne peuvent donc pas être évacués. En revanche, les couloirs d'altération constituent un maillage de zones altérées ayant perdu leur consistance et leur cohésion (altérites).

Il y a -13 Ma débute l'incision de la vallée du Tarn. En s'encaissant au sein du massif, le canyon va progressivement constituer le point bas du Causse et créer les conditions nécessaires à la mise en place d'un gradient hydraulique. Le gradient hydraulique ainsi généré va produire l'évacuation des altérites contenus dans les couloirs d'altération puis permettre d'entraîner la couverture sédimentaire encore présente en surface. Ainsi, sur les bords des canyons apparaissent les couloirs d'altération qui affectent toute la hauteur du massif (Illustration 2).



Illustration 2 : le massif présente sur toute sa hauteur de grands couloirs d'altération verticale © Philippe Crochet

En surface, le dégagement de la couverture met peu à peu à nu certaines parties du Causse où le toit des carbonates affleure, révélant les morphologies résiduelles qui ont résisté à l'altération. Ces morphologies qu'on appelle des « ruiniformes » correspondent aux pinacles formés par la karstification sous couverture (Illustration 1). On en retrouve à plusieurs endroits sur les Grands Causses. Sur le causse Méjean, les morphologies de plusieurs sites emblématiques sont directement issues de ce processus : le chaos de Nîmes du Vieux, le Vase de Sèvres...



Nîmes le Vieux : ruiniformes acquis par karstification sous couverture au cours du Crétacé inférieur et du Tertiaire © Olivier Prohin

© Conception : Parc national des Cévennes - Mai 2020 • Crédit photos et dessins : Yannick Manche - BRGM

Pour de plus amples informations et recevoir ce bulletin, contactez :
- Yannick Manche PNC • 04 66 49 53 11 • yannick.manche@cevennes-parcnational.fr
- Claudine Lamotte BRGM - Direction régionale Occitanie • 04 67 15 79 87 • c.lamotte@brgm.fr

Bulletin 8



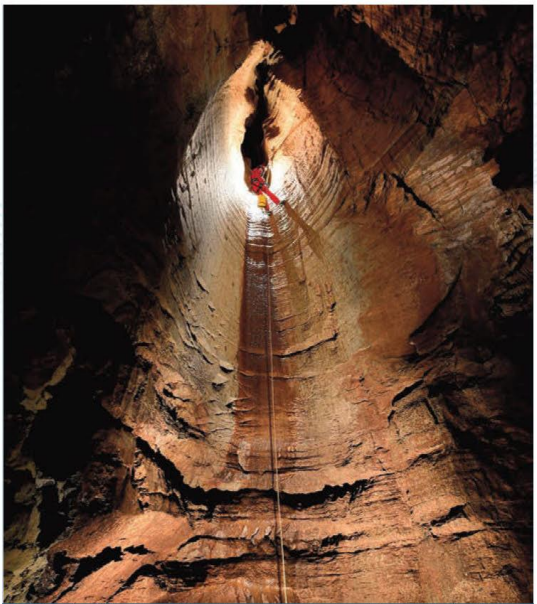
Connaître la ressource en eau pour la gérer : synthèse des résultats de l'étude

L'étude hydrogéologique du causse Méjean s'est achevée après quatre années d'investigations et sa restitution, scientifique et publique, en septembre prochain, se prépare (voir encadrés).

Cette étude présente une avancée décisive des connaissances concernant le fonctionnement, la structure et la localisation des réserves en eaux souterraines du causse Méjean. Elle délivre des éléments clés pour mettre en place une gestion durable des ressources en eau. L'objectif est de taille, à l'heure où les besoins en eau sont en augmentation tandis que de nouveaux enjeux, liés au réchauffement climatique, apparaissent.

Ce dernier bulletin vous propose la synthèse des principaux résultats de l'étude : la délimitation des bassins d'alimentation des sources, les circulations souterraines, les risques de pollution de la ressource en eau et les réserves aquifères.

Ils sont illustrés par une série de nouvelles cartes qui offrent la représentation la plus à jour des systèmes de drainage karstique du causse Méjean. Nous vous les donnons à découvrir dans ces pages.



L'étude a donné lieu à une collaboration enrichissante entre géologues et hydrogéologues professionnels, habitants du causse et spéléologues bénévoles © CROCHET Philippe

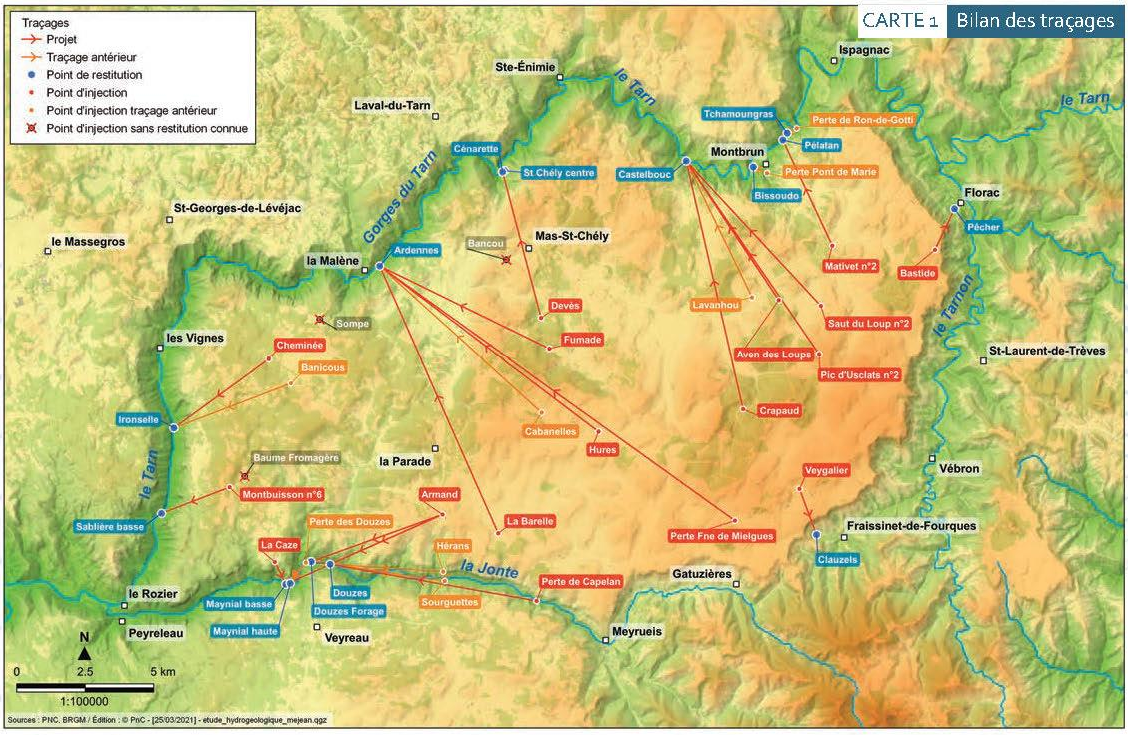
Le point de départ : les traçages

Etape clé pour l'étude, la réalisation des traçages par injection d'un colorant artificiel a été déterminante pour la qualité de l'ensemble des résultats obtenus.

La campagne de traçages a d'abord permis de suivre le transit de l'eau entre le point d'injection et le ou les exutoire(s) des systèmes tracés : certaines circulations qui semblaient bien identifiées ont été remises en question, d'autres ont été précisées, et surtout, de nouvelles circulations ont pu être déterminées. Le nombre de traçages a été doublé par rapport aux campagnes menées par le passé (carte 1).

Les traçages ont également amené des informations essentielles aux investigations complémentaires menées en parallèle dans l'étude, et c'est là leur apport majeur. Les points d'injection ont été adaptés au fur et à mesure, tout au long de l'étude, afin de croiser les résultats des traçages avec d'autres travaux, basés par exemple sur l'interprétation de données hydrologiques ou sur des observations de terrain (géologie ou géomorphologie), pour en vérifier les hypothèses. Cette méthodologie a ainsi permis de confirmer ou d'affiner les résultats des autres parties de l'étude, notamment ceux concernant l'extension des bassins d'alimentation, tout en apportant des informations sur les dynamiques de restitution (vitesse de transit, durée de la restitution). Les traçages ont également contribué à la caractérisation de la vulnérabilité à la pollution de la ressource en eau karstique sur le territoire.

CARTE 1 Bilan des traçages

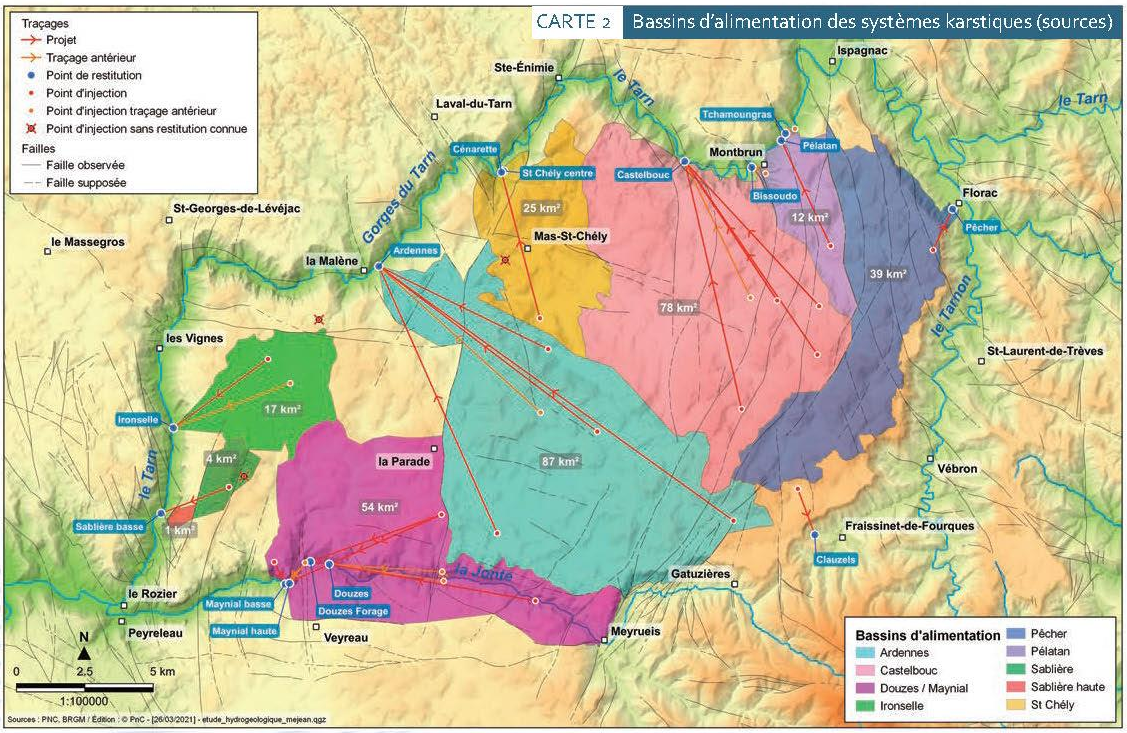


Durant trois ans, de 2017 à 2020, 22 injections de traceurs ont été réalisées par les spéléologues bénévoles, utilisant 60 kg de traceurs. Seules six injections se sont soldées par un échec pour trois points d'injection différents. La forte implication des habitants et des spéléologues bénévoles a contribué à l'obtention de résultats plus nombreux, mieux ciblés et plus affinés que lors des campagnes de traçages précédentes. Elle a ainsi été déterminante dans la réussite de l'étude.

Les bassins d'alimentation des sources

L'essentiel de la surface du causse Méjean a pu être associé à quelques systèmes karstiques étudiés, notamment grâce aux résultats des traçages artificiels, aux analyses géochimiques (traçage naturel) et aux résultats de l'étude géomorphologique. Le plus grand système karstique est celui des Ardennes qui représente un bassin d'alimentation de près de 90 km², suivi de Castelbouc, proche de 80 km² (carte 2). Le devenir des eaux infiltrées n'a pas pu être déterminé pour trois secteurs, repérés par des points d'interrogation sur la carte (carte n°3). Cela est dû à l'impossibilité d'y réaliser des traçages ou à la présence de sources, situées au niveau du Pas de Soucy, qui ne sont pas connues ou qu'il n'est pas possible d'équiper.

CARTE 2 Bassins d'alimentation des systèmes karstiques (sources)



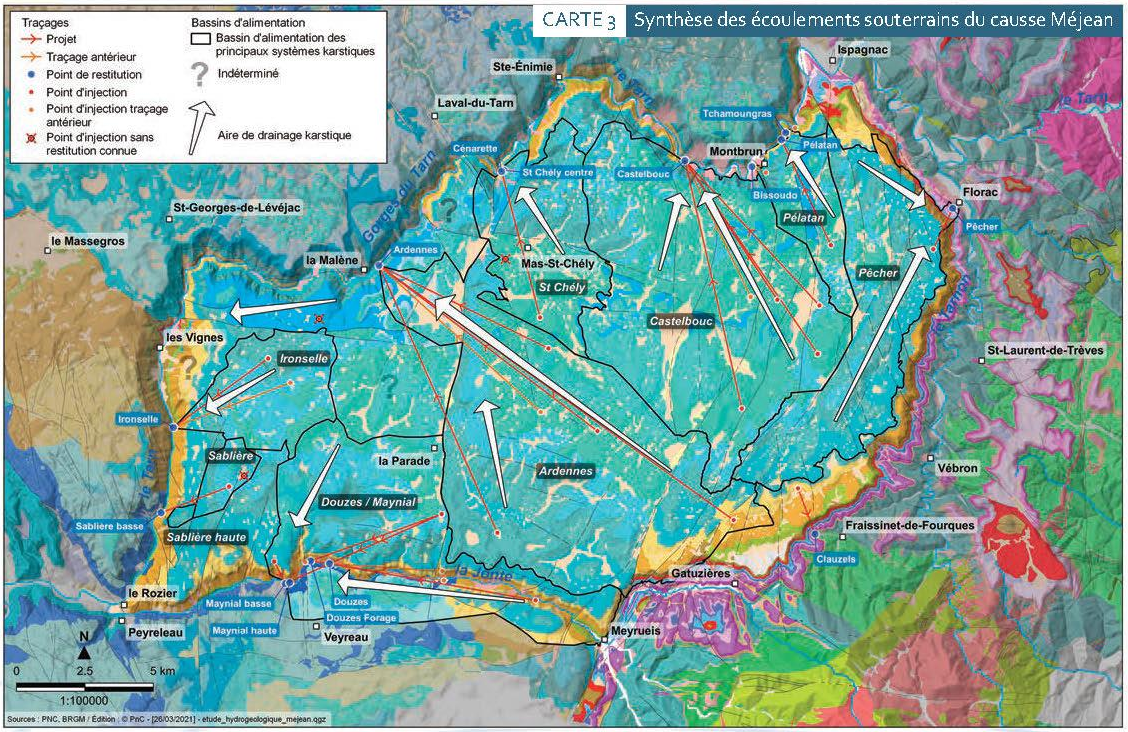
La nouvelle cartographie des bassins d'alimentation (carte 2) prend également en compte de nombreux autres éléments comme la nature et la structure des couches géologiques et les calculs de bilan hydrogéologique. Par exemple, pour le système des Douzes/Maynial, il a pu être établi qu'un pli anticlinal (une formation géologique souterraine qui affecte les formations marneuses du Jurassique supérieur) et la faille de La Parade forment une limite de bassin d'alimentation. A l'est de cette limite, le résultat de son traçage rattache l'aven de La Barelle au système des Ardennes qui se déverse dans le Tarn, à La Malène, tandis qu'à l'ouest, tout le bassin d'alimentation du ravin des Bastides est intégré au système des Douzes/Maynial et aboutit donc dans la Jonte.



Vue du causse Méjean © MANCHE Yannick

Les circulations souterraines

La forme des bassins (carte 2), complétée par les informations issues de l'interprétation des traçages (carte 1), permet de schématiser l'organisation spatiale des principaux axes d'écoulement, dits « de drainage karstique » (carte 3). Globalement, l'axe sud-est/ nord-ouest est fortement marqué. Tous les systèmes aquifères du causse Méjean rejoignent le Tarn à l'exception de celui des Douzes/ Maynial.

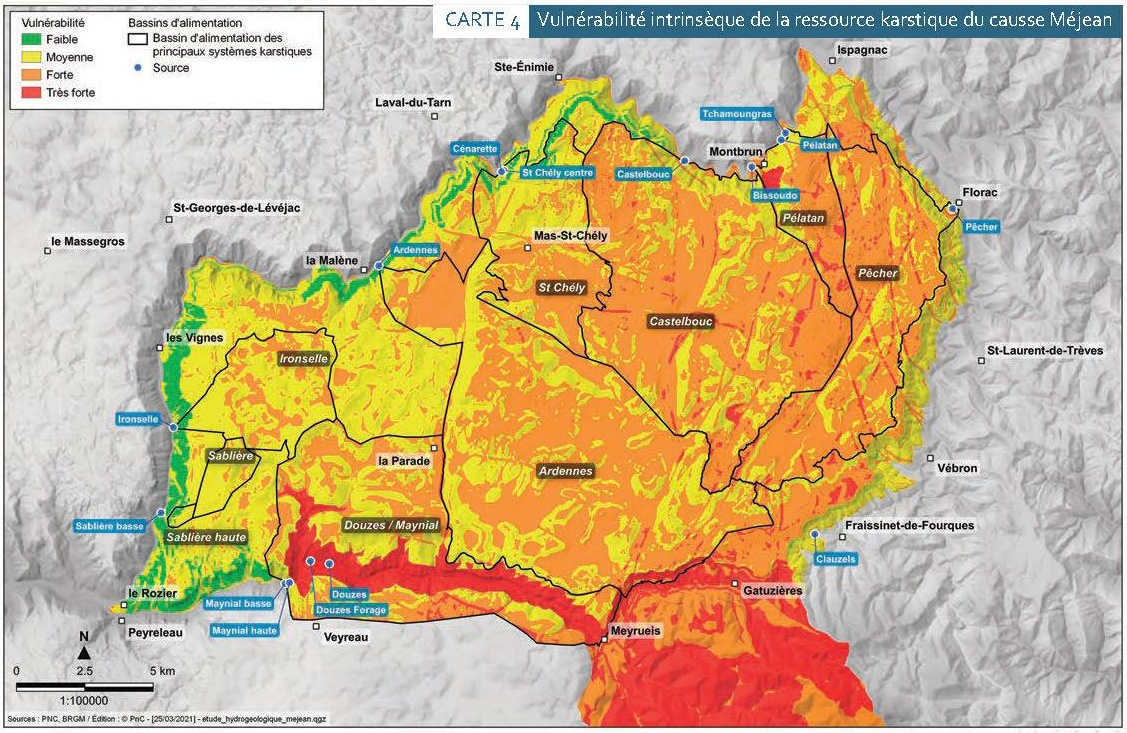


Pour le système du Pêcher, deux axes de drainage se distinguent, l'un s'écoulant depuis le nord-ouest et l'autre, sur toute la bordure sud-est du Causse depuis Nîmes-le-Vieux. La convergence des écoulements souterrains au niveau de la plaine de Carnac, en amont de la source des Ardennes, est également bien identifiée.

Risque de pollution de la ressource en eau

Deux éléments sont indispensables pour appréhender les risques de pollution : la vulnérabilité propre de l'aquifère (dite intrinsèque), c'est-à-dire la sensibilité du milieu naturel à réagir à une pression polluante (carte 4) et la caractérisation des pressions qui s'exercent dans son bassin d'alimentation.

La vulnérabilité intrinsèque est évaluée par une méthode développée par le BRGM, appelée PaPRIKa : « Protection des aquifères karstiques basée sur la protection, le réservoir, l'infiltration et le degré de karstification des aquifères ». Il s'agit d'une méthode de cartographie multicritère dont les critères sont définis selon les caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères.



Là où l'infiltration d'eau est rapide et sous une forme concentrée comme dans le cas d'un écoulement qui rejoint un aven, la vulnérabilité est maximale. Au contraire, elle est plus réduite dans les secteurs où l'aquifère karstique est plus protégé (couverture du sol moins perméable ou profondeur plus importante de l'aquifère par exemple).

Les systèmes les plus vulnérables sont situés sur la bordure est du Causse. La vulnérabilité du système des Douzes/Maynial, très forte, est à relier avec le fonctionnement de ce système qui est alimenté en partie par l'infiltration au niveau des pertes notamment le long de la vallée de la Jonte, ainsi que dans son bassin versant en amont de Meyrueis jusqu'à l'Aigoual. Viennent ensuite à l'est et au nord, les systèmes du Pêcher, du Moulin de Pélatan et de Castelbouc avec une vulnérabilité variant de forte à très forte.

Les systèmes drainant la partie ouest apparaissent comme les moins vulnérables mais révèlent tout de même une vulnérabilité pouvant être localement forte à très forte.

Les captages d'eau potable qui sollicitent la ressource en eau souterraine karstique du causse Méjean présentent tous une vulnérabilité à la pollution élevée, et localement, très élevée.

Par ailleurs, un recensement des différentes pressions d'origine humaine s'exerçant sur le causse Méjean ou à proximité immédiate a été conduit via plusieurs banques de données. Il a été complété par des échanges directs avec différentes institutions sources de données. Ainsi, pour chaque système karstique, une synthèse des risques de pollution a pu être proposée en fonction des pressions identifiées, comme pour celui du Pêcher, ci-dessous :

Systeme karstique du Pêcher						
Ressource captée	Oui – Captage AEP de la source du Pêcher					
Vulnérabilité	Forte, localement très forte le long des accidents associés aux faisceaux de Montmirat et de Meyrueis					
Type Pression	Assainissement	Agricole	Industrielle et commerciale	Déchet	Transport	Tourisme
Descr. pression	-	Cultures céréalières/ fourrage	-	-	-	-
Note pression	0	+	0	0	0	0
Risque	+	++	+	+	+	+

Dans cet exemple, le risque de pollution potentiel le plus déterminant vis-à-vis de la vulnérabilité du bassin d'alimentation est lié à la pression de l'activité agricole : protéger la ressource en eau et donc la qualité de l'eau potable de ce bassin d'alimentation est ainsi lié à l'activité agricole.

Pour le bassin d'alimentation du moulin de Pélatan (Montbrun), le risque est lié à la voirie : une pollution par hydrocarbure par exemple impacterait directement et très rapidement le captage.

Si l'enjeu prioritaire est bien la santé humaine, la qualité de l'eau représente également un enjeu récréatif et touristique majeur pour les systèmes aboutissant dans le Tarn.

Réserves aquifères du causse Méjean

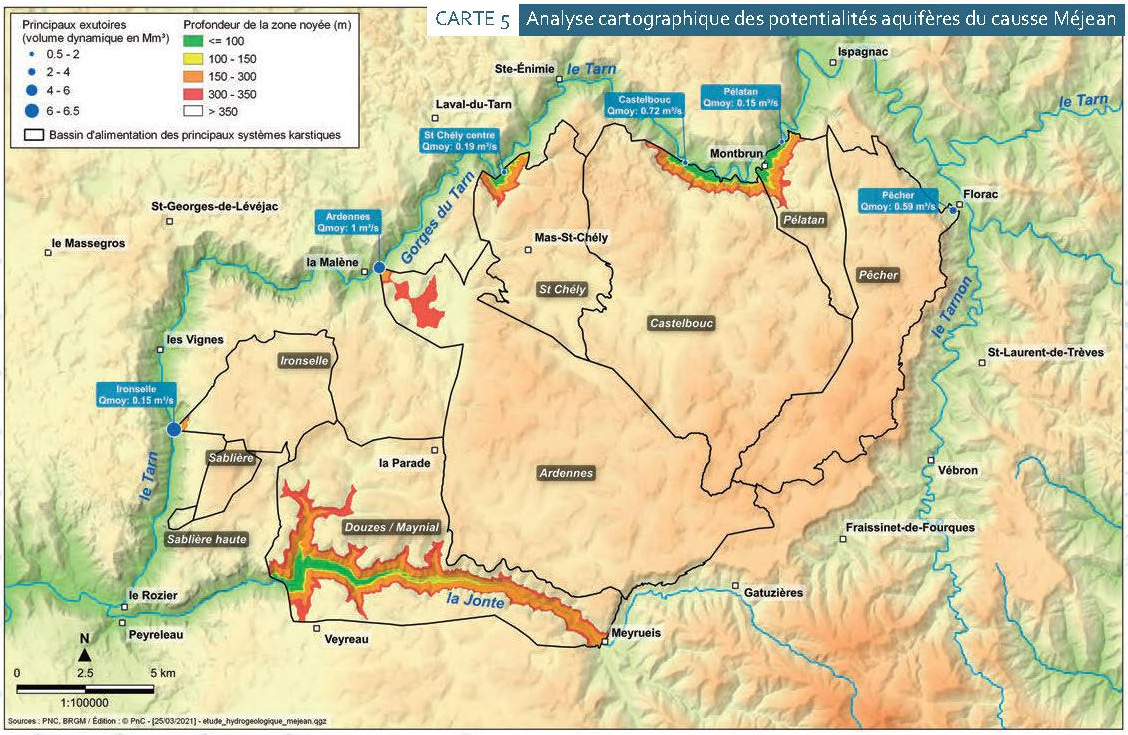
Sur la zone d'étude, l'altitude du toit de la nappe a été estimée à l'échelle de chaque bassin d'alimentation à l'aide de la méthodologie suivante : à partir de l'altitude de la source qui draine chaque système, on réalise un calcul de différence avec la topographie. On obtient ainsi une estimation de la profondeur de la zone noyée des principaux systèmes karstiques étudiés (en s'enfonçant depuis la surface du causse vers sa base, on rencontre successivement la zone d'infiltration, qui inclue le sol, puis une zone saturée en eau à une altitude proche de celle des sources, dite zone "noyée").

Ce calcul, qui est une simplification de la réalité, ne prend pas en compte certains cas de figure plus complexes (comme le réservoir hettangien drainé par la source du Pêcher) mais il permet de proposer un ordre de grandeur des profondeurs à atteindre pour un éventuel captage de la ressource.

Quatre classes ont été distinguées pour décrire une ressource en eau très facilement accessible (<100m), facilement accessible (de 100 m à 150 m), peu accessible (de 150 m à 300 m) et difficilement accessible (de 300 m à 350 m). Les limites de ces classes et la limite à 350 m ont été fixées en cohérence avec un usage eau potable de la ressource (cf. carte 5).

La carte 5 figure la localisation et la profondeur des réserves aquifères pour les principaux systèmes karstiques drainant le causse Méjean. Les limites d'affleurement du Causse et des bassins d'alimentation des principaux systèmes karstiques y sont également reportées pour mieux repérer les différents secteurs.

CARTE 5 Analyse cartographique des potentialités aquifères du causse Méjean



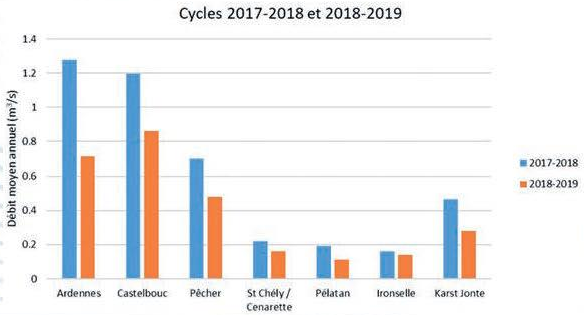
Ainsi, on constate que les secteurs où la ressource en eau karstique reste accessible se localisent en bordure du Causse à proximité des exutoires. A la surface du Causse, seuls deux secteurs, relativement bas du point de vue topographique, permettent d'envisager une exploitation par forage de la ressource en eau :

- le système des Ardennes qui se caractérise par des réserves importantes et un débit moyen élevé (1 m³/s) présente au niveau du vallon qui remonte vers Carnac et la plaine de Carnac un secteur favorable à la réalisation d'un forage de l'ordre de 300 m de profondeur ;

- le système des Douzes/Maynial présente un secteur favorable en remontant le vallon des Bastides, avec une profondeur de la ressource plus faible. Cette partie du système karstique ne draine que le causse Méjean et n'est donc pas influencée par les eaux de la Jonte, contrairement au forage profond des Douzes (qui est alimenté par l'ensemble des gorges de la Jonte) très vulnérable aux pollutions (voir « risque de pollution de la ressource en eau »).

Ces informations doivent être complétées par les suivis hydrométriques (mesures en continu) des sources principales pour permettre une évaluation de la ressource souterraine.

Il faut retenir qu'environ 75% des précipitations efficaces (après avoir retiré l'évapotranspiration) qui tombent sur le causse sont restitués par ces sources. Les systèmes karstiques des Ardennes et de Castelbouc se démarquent nettement, avec un débit moyen annuel de l'ordre de 1 m³/s. Vient ensuite la source du Pêcher, puis les autres systèmes de St-Chély/Cénarette, Pélatan et Ironselle :



Comparaison des débits moyens des systèmes karstiques étudiés (seuls les débits associés au drainage du causse Méjean sont pris en compte pour les exutoires de la Jonte)

Comme présentée sur la figure ci-dessus sur deux cycles, la variation des débits moyens annuels peut être importante d'une année sur l'autre, ce qui justifie la durée des études. D'autre part, les experts travaillant sur le réchauffement climatique prévoient une baisse des débits moyens annuels des cours d'eau comprise entre 20% et 40 % pour le bassin Adour-Garonne, à l'échelle d'une génération. A cette analyse s'ajoutent notamment des étiages plus précoces, plus sévères et plus longs. L'ensemble des cours d'eau du versant atlantique du Parc national est concerné, notamment les têtes de bassin (Lot, Tarn, Jonte et Dourbie) qui seront les plus touchés.

Ainsi, avec une ressource en eau venant du causse Méjean, importante mais appelée à diminuer à relativement court terme, et la difficulté d'accès à la ressource depuis le Causse, les solutions, collectives et individuelles qui s'offrent à nous, passent également par la mise en place d'une gestion raisonnée et par un usage vertueux de la ressource en eau.



Les gorges du Tarn en automne © MANCHE Yannick

Pour plus d'information

Les documents relatifs à l'étude sont consultables en ligne sur www.cevennes-parcnational.fr Pour un accès direct, suivez le QR code.

- Bulletin hydrogéologique du causse Méjean n°1 « *Présentation de l'étude hydrogéologique* »
- Bulletin hydrogéologique du causse Méjean n°2 « *Etude des ressources en eaux souterraines* »
- Bulletin hydrogéologique du causse Méjean n°3 « *Une étude géologique de terrain pour une meilleure compréhension de l'hydrogéologie* »
- Bulletin hydrogéologique du causse Méjean n°4 « *Une étude géologique de terrain… la suite !* »
- Bulletin hydrogéologique du causse Méjean n°5 « *Bilan intermédiaire des opérations de traçage* »
- Bulletin hydrogéologique du causse Méjean n°6 « *A la recherche des paysages disparus* »
- Bulletin hydrogéologique du causse Méjean n°7 « *La karstification sous couverture* »
- Rapport final « *Étude hydrogéologique du causse Méjean* », BRGM-PNC
- Rapport de synthèse « *Étude hydrogéologique du causse Méjean* », BRGM-PNC

Dans le cadre du colloque national de restitution de l'étude hydrogéologique du causse Méjean, du 23-25 septembre 2021 à Florac-Trois-Rivières, plusieurs événements grand public sont prévus.

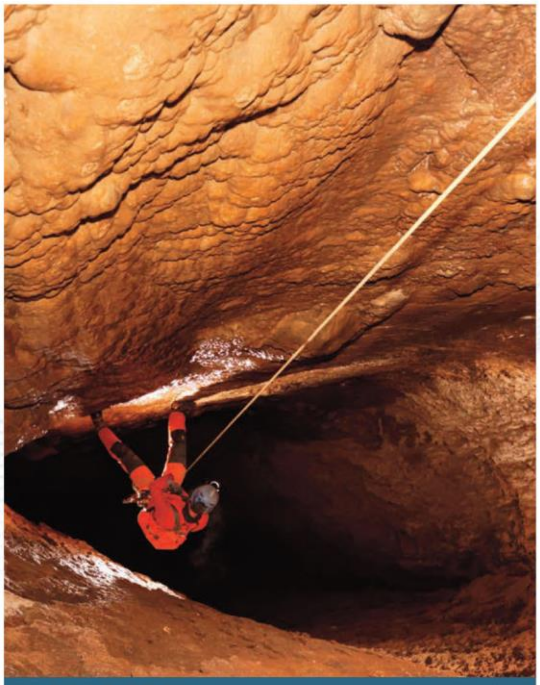
Présentation publique

Bilan de l'étude hydrogéologique du causse méjean
• Co-animée par le BRGM et le PNC
Vendredi 24 septembre à 19 h00 • *Salle des fêtes de Florac-Trois-Rivières*
Sur inscription (selon consignes COVID-19 en vigueur) sur www.cevennes-parcnational.fr

Animations tous publics

Des sorties sur le terrain abordant les différents sujets de l'étude, animées par les scientifiques qui ont mené l'étude, seront proposées samedi 25 septembre

Sorties tous publics à partir de 8 ans, sur inscription (selon consignes COVID-19 en vigueur) sur www.cevennes-parcnational.fr



Aven de Hures © AZEMA Didier

© Conception : Parc national des Cévennes - Juin 2021 • Crédit photos : Yannick Manche PNC- Cartographie : BRGM, Kisito Cendrier PNC

Pour de plus amples informations et recevoir ce bulletin, contactez :

- Yannick Manche PNC • 04 66 49 53 11 • yannick.manche@cevennes-parcnational.fr
- Claudine Lamotte BRGM - Direction régionale Occitanie • 04 67 15 79 87 • c.lamotte@brgm.fr
- Vincent Bailly-Comte BRGM - Direction de l'Eau, Environnement, Procédés et Analyses • 04 67 15 79 61 • v.bailly-comte@brgm.fr



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 - Orléans Cedex 2 - France
Tél. : 02 38 64 34 34 - **www.brgm.fr**

Direction régionale Occitanie
1039 rue de Pinville
34000 - Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 90