

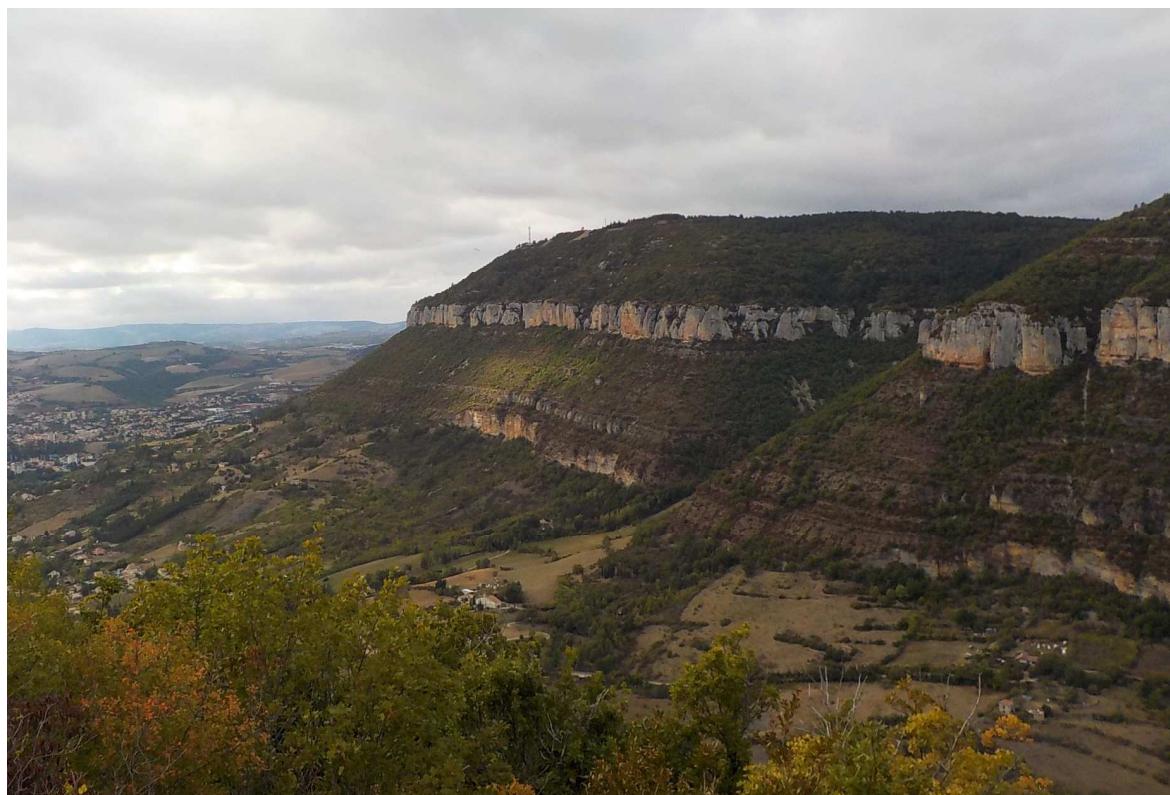
Etude hydrogéologique du Causse Noir

Lot 3 : Hydrodynamique et Hydrologie

Lot 4 : Hydrochimie

Lot 5 : Traçages

Lot 6 : Vulnérabilité et synthèse



Avec le partenariat
technique de





Fiche Signalétique

Etude hydrogéologique du Causse Noir

Lot 3 : Hydrodynamique et Hydrologie

Lot 4 : Hydrochimie

Lot 5 : Traçages

Lot 6 : Vulnérabilité et synthèse

CLIENT

Raison sociale	Syndicat Mixte du Parc Naturel Régional des Grands Causses
Coordonnées	71 Bd de l'Ayrolle BP 126 12100 Millau France
Contact / Destinataire	Laurent DANNEVILLE 05 65 61 43 59

SITE D'INTERVENTION

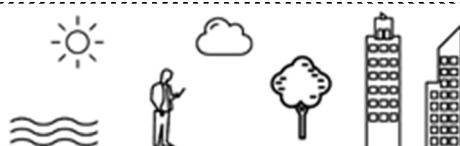
Raison sociale	Causse Noir
Coordonnées	
Famille d'activité	Ressource en eau
Domaine Antea Group	Eau

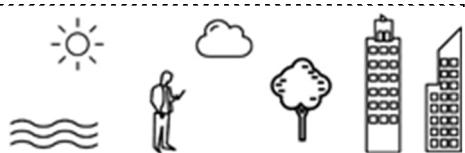
DOCUMENT

Date de remise	Juin 2020
Nombre d'exemplaire remis	10
Pièces jointes	-
Responsable Commercial	Christophe SUBIAS

N° Rapport/ N°Projet	A102255/MPYA16-0396
Révision	A

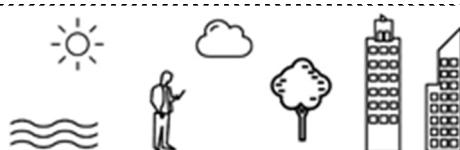
	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	Fabrice REY	Ingénieur projet		
	David Labat	Professeur à l'université de Toulouse Paul Sabatier	Juin 2020	
Vérification	Christophe SUBIAS	Expert hydrogéologue	Juin 2020	





Sommaire

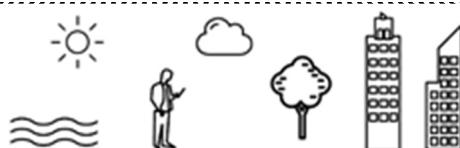
Introduction.....	15
PARTIE I : Présentation du Causse Noir.....	17
1 Rappels sur le contexte géologique	19
2 Situation géographique du Causse Noir	23
PARTIE II : Approche méthodologique	27
1 Description des sources étudiées.....	29
2 Méthodologie d'acquisition des données.....	35
2.1 Sources de catégorie 1	35
2.1.1 Suivi physico-chimique.....	35
2.1.2 Suivi hydrochimique.....	39
2.2 Sources de catégorie 2	40
2.3 Sources de catégorie 3	40
2.4 Cours d'eau.....	40
2.5 Autres	40
2.6 Stations météorologiques	41
3 Méthodes de traitement des données.....	42
3.1 Analyse du fonctionnement hydrodynamique des systèmes.....	42
3.1.1 Analyses corrélatoires simples et croisées.....	42
3.1.2 Analyse des courbes de récession.....	44
3.2 Méthodologie d'étude des données chimiques et physico-chimiques	47
3.2.1 Les paramètres géochimiques	47
3.2.2 Mise en forme des données.....	49
PARTIE III : Résultats et interprétation des suivis hydrodynamiques, physico-chimiques et hydrochimiques.....	51
1 Contexte hydroclimatique.....	53
2 Hydrodynamique : Résultats et traitements des sources de catégorie 1 suivies	57
2.1 Caractéristiques physiques des sources et de leur bassin d'alimentation	57
2.2 Débit des sources	58
2.2.1 Courbes de tarage	58



2.2.2	Variations temporelles des débits et hauteurs d'eau des sources de catégorie 1	59
2.2.3	Indice de variabilité des débits.....	70
2.3	Débits des cours d'eau	71
2.3.1	Le Tarn	71
2.3.2	La Jonte.....	78
2.3.3	La Dourbie	80
2.4	Traitements statistiques des séries de débits.....	82
2.4.1	Etude des courbes de récession.....	82
1.3.2	Analyses corrélatoires	85
1.3.2.1	Autocorrélogrammes sur la pluie.....	85
1.3.2.2	Autocorrélogrammes sur les débits et corrélations croisées Pluie-Débit	85
3	Résultats du suivi physico-chimique en continu	91
4	Résultats du suivi hydrochimique des sources	97
4.1	Caractéristiques hydrochimiques des pluies.....	97
4.2	Compositions chimiques moyennes des eaux	100
4.3	Diagramme de Piper.....	107
4.4	Diagramme de Stiff.....	108
4.5	Analyse du rapport $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$	111
4.6	Relation $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$	112
4.6.1	Distribution des fréquences de conductivité	114
4.6.2	Etude de la relation pCO_2/ISc	119
4.6.3	Analyse en Composante Principale (ACP)	127
4.7	Caractérisation de l'influence anthropique	131
5	Hydrochimie des eaux de rivière.....	134
PARTIE IV : Traçages hydrogéologiques	137	
1	Introduction.....	139
2	Rappels sur les traçages	140
2.1	Approche générale des traçages artificiels	140
2.2	Paramètres de restitution d'un traçage	144
2.3	Distribution des Temps de Séjour	145
3	Protocole de traçage mis en œuvre	148
4	Résultats des traçages.....	153
4.1	Zonage du Causse Noir à partir des résultats obtenus	161



Zone 1 : Ouest du Causse Noir	165
4.1.1 Zone 2 : Nord-est du Causse Noir	165
4.1.2 Zone 3 : Centre nord-est du Causse Noir	166
4.1.3 Zone 4 : Centre sud-est du Causse Noir	167
4.1.4 Zone 5 : Sud-est du Causse Noir.....	167
5 Interprétation de traçages artificiels en domaine karstique par l'utilisation d'une fonction de transfert	169
5.1 Etat de l'art des traçages en génie des procédés.....	169
5.1.1 Définitions et éléments de théorie	169
5.1.2 Fonction de transfert.....	170
5.2 Modèles de réacteurs chimiques et fonctions de transfert associées	172
5.2.1 PFR - Plug Flow Reactor (Advection).....	172
5.2.2 MFR – Mixed Flow Reactor (Mélange).....	173
5.3 Application à l'interprétation de traçages artificiels en domaine karstique	174
5.3.1 Modèles conceptuels et fonctions de transfert associées.....	174
5.3.2 Optimisation et ajustement des paramètres.....	177
5.3.3 Résultats de la méthode appliquée aux traçages du Causse Noir	177
PARTIE V : Vulnérabilité des systèmes aquifères du Causse Noir.....	179
1 Introduction.....	181
1.1 Rappels sur la notion de vulnérabilité des aquifères.....	181
1.2 Notion de pollution	182
1.3 Description et historique de la méthode PaPRIKa	183
1.4 Données spatiales utilisées	185
2 Application de la méthode PaPRIKa	186
2.1 Le critère de protection (P)	186
2.1.1 Le sous critère « Epikarst » : E.....	186
2.1.2 Le sous critère « Nature du sol » : S.....	187
2.1.3 Le sous critère « ZNS » (Zone Non Saturée) : ZNS	188
2.1.4 Résultats.....	189
2.2 Le critère Réservoir (R).....	193
2.2.1 Méthode.....	193
2.2.2 Résultats.....	193
2.3 Le critère infiltration (I)	197
2.3.1 Méthode.....	197



2.3.2	Résultats	198
2.4	Le critère karstification (Ka)	203
2.4.1	Méthode	203
2.4.2	Résultats	203
3	Vulnérabilité globale	207
3.1	Méthode	207
3.2	Résultats et interprétation	208
PARTIE VI : Conclusions		211

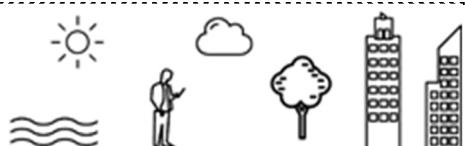


Table des illustrations

FIGURES

Figure 1 .Carte géologique du Causse Noir (BRGM Editions).....	21
Figure 2. Carte de situation du Causse Noir et des principaux bassins hydrographiques.....	25
Figure 3. Unités hydrogéologiques des Grands Causses et du Causse Noir (en rouge) (GEOTER, 2017)	30
Figure 4. Position des sources étudiées sur extrait de la carte géologique.....	33
Figure 5. Position des stations de mesure en continu et des stations météorologiques.....	37
Figure 6. Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1975).....	45
Figure 7. Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession selon Mangin, 1975 (El Hakim et Bakalowicz, 2007)	46
Figure 8. Diagramme de Piper.....	50
Figure 9. Exemple d'un diagramme de Stiff.....	50
Figure 10. Représentation graphique du cumul des pluies en 2017	54
Figure 11. Représentation graphique du cumul des pluies en 2018	55
Figure 12. Système de mesure du niveau installé dans la source de Biau	60
Figure 13. Chronique de débit de la source Biau	60
Figure 14. Seuil de mesure installé à la source de Moulin de Corp	61
Figure 15. Chronique de débit de la source Moulin de Corp	61
Figure 16. Système de mesure du niveau installé à la source Monna.....	62
Figure 17. Chronique de débit de la source Monna.....	62
Figure 18. Seuil de mesure installé à la source des Moulinets	63
Figure 19. Chronique de débit de la source Moulinets.....	63
Figure 20. Seuil de mesure installé à la source de Prades	64
Figure 21. Chronique de débit de la source Prades	64
Figure 22. Seuil de mesure installé à la source de Triadou.....	65
Figure 23. Chronique de débit de la source Triadou.....	65
Figure 24. Seuil de mesure et échelle limnومétrique installés à la source Sourguettes	66
Figure 25. Chronique de débit de la source Sourguettes.....	66
Figure 26. Chronique des débits des sources (hors Moulin de Corp) durant la période de hautes eaux de janvier 2018	69
Figure 27. Chronique des débits des sources (hors Moulin de Corp) durant la période de hautes eaux d'avril à juin 2018	69
Figure 28. Représentation du débit et des apports en eau du Tarn en février 2011	72
Figure 29. Représentation du débit et des apports en eau du Tarn en septembre 2013	74
Figure 30. Représentation du débit et des apports en eau du Tarn en septembre 2017	76
Figure 31. Evolution du débit et des apports en eau du Tarn en octobre 2017.....	77
Figure 32. Evolution du débit et des apports en eau de la Jonte en septembre 2013	78
Figure 33. Evolution du débit et des apports en eau de la Jonte en septembre 2017.....	79



Figure 34. Evolution du débit de la Dourbie d'amont en aval entre le mois d'avril 2017 et le mois de juillet 2018	81
Figure 35. Représentation du retard à l'infiltration en fonction du pouvoir de régulation de 6 sources de catégorie 1 du Causse Noir	84
Figure 36. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source de Biau.....	89
Figure 37. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source de Monna ..	89
Figure 38. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source des Moulinets 1 (année 2017)	89
Figure 39. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source des Moulinets 2 (année 2018)	89
Figure 40. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source de Prades...	90
Figure 41. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source Sourguettes	90
Figure 42. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source Triadou	90
Figure 43. Chroniques des paramètres physico-chimiques des 7 sources de catégorie suivies de février 2017 à février 2019.....	96
Figure 44. Evolution de la chimie des pluies de la station météorologique de Millau de novembre 2017 à juillet 2018	98
Figure 45. Evolution de la chimie des pluies de la station météorologique de Mazes de novembre 2017 à juillet 2018	99
Figure 46. Diagramme de Piper des sources de catégorie 1.....	108
Figure 47. Diagrammes de Stiff des sources de catégorie 1	110
Figure 48. Graphique de la relation $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ pour les sources de catégorie 1	111
Figure 49. Relation $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ pour les sources de catégorie 1	113
Figure 50. Distribution de fréquence des valeurs de la conductivité des eaux de sources d'aquifères carbonatés poreux (Evian-Cachat), fissurés (Surgeint, Lac bleu) ou plus ou moins karstifiés (Bakalowicz, 1979)	115
Figure 51. Fréquences de conductivité des sources de catégorie 1	117
Figure 52. Comparaison des fréquences de conductivité calculées à partir du suivi ponctuel et continu	118
Figure 53. Relation pCO_2/Isc pour les sources de catégorie 1	125
Figure 54. Matrice de corrélation entre les variables.....	128
Figure 55. Pourcentage de variance expliquée par composante.....	129
Figure 56. Cercles des corrélations et diagrammes des individus sur les composantes 1 et 2 (71 %).....	129
Figure 57. Evolution des teneurs en chlorures des sources de catégorie 1	131
Figure 58. Evolution des teneurs en nitrates des sources de catégorie 1	132
Figure 59. Graphique de la concentration moyenne en sulfates en fonction de la concentration moyenne en nitrates des sources de catégorie 1	133
Figure 60. Résultats des analyses chimiques réalisées sur les rivières le 9 septembre 2017	135
Figure 61. Résultats des analyses chimiques réalisées sur les rivières le 3 mars 2018	136
Figure 62. Transformation d'une courbe de restitution expérimentale.....	146
Figure 63. Approche systémique des traçages artificiels.....	146
Figure 64. Localisation des points d'injection des traçages.....	151
Figure 65. Restitution des traçages hydrogéologiques du Causse Noir.....	155
Figure 66. Classification des vitesses apparentes obtenues	157



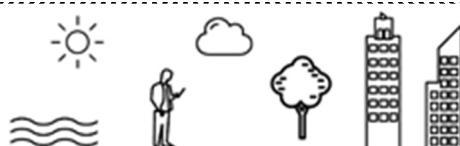
Figure 67. Organisation du Causse Noir en 5 systèmes structuraux et fonctionnels	161
Figure 68. Cartographie des réseaux karstiques souterrains explorés sur le Causse Noir (données cartographiques fournies par les spéléologues locaux).....	163
Figure 69. Schéma conceptuel d'un réacteur chimique type PFR	173
Figure 70. Schéma conceptuel d'un réacteur chimique type PFR	173
Figure 71. Schéma de réservoirs en série incluant un couplage de zones mobiles et immobiles. La lame d'agitation dans chaque réservoir indique que le mélange est parfait. Il s'agit de la notation standard en génie des procédés (Becker and Bellin, 2013).....	175
Figure 72. Nature d'un sol en fonction de sa texture et de sa proportion de cailloux.....	187
Figure 73. Description des indices du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur	187
Figure 74. Classes décrivant la lithologie de la Zone Non Saturée	188
Figure 75. Carte de vulnérabilité du Causse Noir selon le critère P	191
Figure 76. Description des indices du critère R.....	193
Figure 77. Carte de vulnérabilité du Causse Noir selon le critère R	195
Figure 78. Relation entre les pentes et la vulnérabilité en milieu carbonaté (adapté de Pranville et al.,2007).....	197
Figure 79. Carte de vulnérabilité du Causse Noir selon le critère I.....	201
Figure 80. Carte de vulnérabilité du Causse Noir selon le critère Ka.....	205
Figure 81. Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques (BRGM, 2009)	207
Figure 82. Cartes de la vulnérabilité globale du Causse Noir selon plusieurs valeurs de pondération.....	209
Figure 83. Carte de vulnérabilité globale retenue pour le Causse Noir.....	210

TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques des sources de catégories 1 et 2	32
Tableau 2 Périodes d'acquisition des données pour les sources de catégorie 1.....	36
Tableau 3. Date d'acquisition des données physico-chimiques et hydrochimiques des sources de catégorie 1.....	39
Tableau 4. Caractéristiques des stations météorologiques retenues pour l'étude du Causse Noir	41
Tableau 5. Exposants des lois puissances du spectre de densité de variance de systèmes karstiques connus.....	44
Tableau 6. Cumul des pluies 2017 sur les stations de Meyrueis, de Trèves et de Nant.....	53
Tableau 7. Cumul des pluies 2018 sur les stations de Meyrueis, de Trèves et de Nant.....	54
Tableau 8. Caractéristiques physiques des sources et des bassins d'alimentation.....	58
Tableau 9. Période de mesure des hauteurs d'eau des 7 sources de catégorie 1 et courbe de tarage	59
Tableau 10. Valeurs minimales, maximales et moyennes de débits et indice de variabilité de 7 sources de catégorie 1 suivies en continu	70
Tableau 11. Débits mesurés après jaugeage par ADCP du Tarn en février 2011	72



Tableau 12. Débits mesurés après jaugeage par ADCP du Tarn en septembre 2013.....	73
Tableau 13. Débits mesurés après jaugeage par ADCP du Tarn en septembre 2017.....	75
Tableau 14. Débits mesurés après jaugeage par ADCP du Tarn en octobre 2017	76
Tableau 15. Données obtenues après jaugeage par ADCP de la Jonte en septembre 2013 ...	78
Tableau 16. Données obtenues après jaugeage par ADCP de la Jonte en septembre 2017 ...	79
Tableau 17. Débits mesurés d'amont en aval sur la Dourbie entre avril 2017 et juillet 2018	80
Tableau 18. Débit des sources de Jouque Merles, Fournets et Moulin de Corp entre mars 2017 et juillet 2018	81
Tableau 19. Résultats de l'analyse des courbes de récession.....	82
Tableau 20. Observations sur la qualité des données enregistrées	86
Tableau 21. Résultats de l'analyse corrélatoire et spectrale	87
Tableau 22. Résultats des analyses chimiques sur les pluies recueillies à la station météorologique de Millau.....	98
Tableau 23. Résultats des analyses chimiques sur les pluies recueillies à la station météorologique de Mazes	99
Tableau 24. Synthèse statique de la base de données physico-chimiques et hydrochimiques des sources de catégorie 1 (+ Fontaine des Fournets et Gardies de catégorie 2).....	105
Tableau 25. Synthèse des relations pCO ₂ /lSc pour les sources de catégorie 1	121
Tableau 26. Propriétés des traceurs les plus courants en hydrogéologie karstique	142
Tableau 27. Avantages et inconvénients des divers traceurs utilisés.....	143
Tableau 28. Les phénomènes physiques qui régissent le transport dans un aquifère.....	144
Tableau 29. Paramètres calculés à partir de la courbe de restitution.....	145
Tableau 30. Paramètres calculés à partir de la DTS	147
Tableau 31. Caractéristiques des injections des traçages hydrogéologiques du Causse Noir	150
Tableau 32. Résultats obtenus après traitement des données issues des traçages hydrogéologiques du Causse Noir.....	159
Tableau 33. Description des indices du sous critère E	186
Tableau 34. Description des classes du critère ZNS par croisement des paramètres lithologie, fracturation et épaisseur.....	189
Tableau 35. Détermination du degré de vulnérabilité pour les sous-critères S, E et ZNS selon la lithologie et les formations de surface.....	189
Tableau 36. Détermination du degré de vulnérabilité pour le critère R selon la lithologie des formations aquifères	194
Tableau 37. Description des indices du critère I	198
Tableau 38. Détermination du degré de vulnérabilité pour le critère I.....	198
Tableau 39. Description des indices du critère Ka	203
Tableau 40. Détermination de la vulnérabilité du Causse Noir selon le critère Ka	204
Tableau 41. Tableau des valeurs de pondération des six modèles de vulnérabilité du Causse Noir	208



ANNEXES

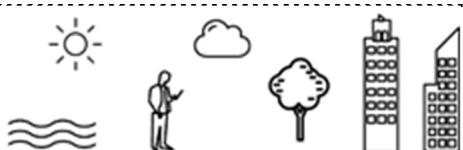
Annexe I : Résultats bruts des analyses chimiques réalisées sur les sources de février 2017 à avril 2018

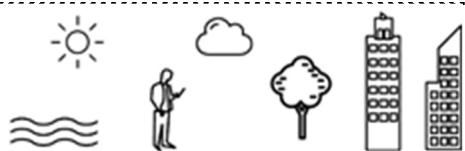
Annexe II : Graphiques des relations entre éléments chimiques et diagramme de Piper pour les sources de catégorie 1

Annexe III : Résultats des calculs des équilibres calco-carboniques

Annexe IV : Fiches de synthèse des traçages positifs

Annexe V : Résultats de l'application d'une fonction de transfert aux traçages du Causse Noir





Introduction

Dans le cadre de son programme de protection et de gestion patrimoniale de la ressource en eau entrepris depuis plusieurs années sur son territoire, le Parc Naturel Régional des Grands Causses (PNRGC) souhaite étendre sa connaissance à des zones encore mal connues d'un point de vue du fonctionnement et de la vulnérabilité des aquifères. Cette étude s'inscrit également dans le cadre de la nouvelle Charte du PNRGC et particulièrement dans deux axes :

1. développement d'une gestion concertée des patrimoines naturel, culturel et paysager dans le souci du respect des générations à venir ;
2. préservation de la ressource en eau et de sa bonne gestion.

Cette étude fait suite aux travaux réalisés sur les aquifères karstiques du Causse du Larzac (Ricard et Bakalowicz, 1996 ; Plagnes, 1997), du Causse rouge (rapport ANTEA, 1999), d'une partie du Causse de Sauveterre (PnrGC et al, 2006) et du Causse Guilhaumard et du Causse Saint-Affricain (Valdés-Lao et al., Université Pierre et Marie Curie, 2014).

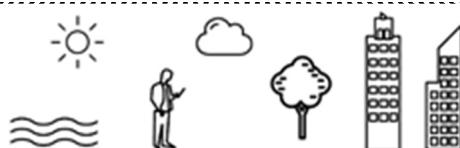
Cette étude est focalisée sur l'ensemble du Causse Noir, soit environ 300 km², dont les aquifères sont presque exclusivement localisés dans des roches carbonatées. La zone comprend de nombreux systèmes karstiques de dimensions et de ressources variables.

L'étude s'intéresse au fonctionnement hydrogéologique de ces principaux systèmes. Les objectifs sont les suivants :

- la détermination et la délimitation des bassins d'alimentation des sources ;
- la connaissance de la structure et du fonctionnement de ces systèmes karstiques ;
- l'évaluation de la ressource en eau (approche des volumes exploitables) ;
- l'évaluation de la vulnérabilité de cette ressource et de l'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau et son évolution ;
- l'élaboration d'un document d'aide à la décision pour la protection de la ressource en eau (carte de vulnérabilité).

Pour répondre à ces objectifs, 6 lots ont été définis par le PNRGC :

- Lot 1 : Géologie et Tectonique
- Lot 2 : Géomorphologie,
- Lot 3 : Hydrodynamique et hydrologie
- Lot 4 : Hydrochimie
- Lot 5 : Traçages
- Lot 6 : Vulnérabilité et synthèse.

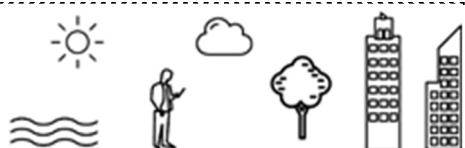


Les lots 1 et 2 ont été confiés à la société GEOTER, les 3 à 6 ont été réalisés par Antea Group avec l'appui de Monsieur David LABAT, Professeur de l'Université de Toulouse, pour une partie des calculs hydrodynamiques (traitement du signal) et des traçages (méthode spécifique développée pour le traitement des données).

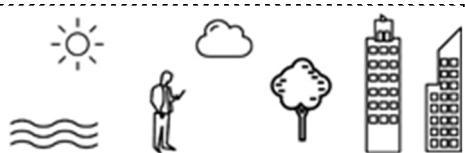
Le présent rapport traite des lots 3, 4, 5 et une partie du lot 6 (vulnérabilité). La synthèse fait l'objet d'un rapport spécifique.

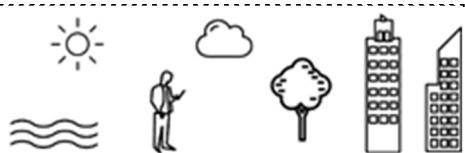
L'objectif de l'étude est d'apporter de nouveaux éléments de connaissance de la structure, du fonctionnement et de la vulnérabilité de tous ces systèmes karstiques à partir de la panoplie des analyses classiques de l'hydrogéologie karstique (méthodes hydrodynamiques, outils hydrochimiques, traçages, etc.).

Ce projet a été soutenu par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et la Région Occitanie. EDF a en outre été un partenaire technique de ce projet en tant que fournisseur des données pluviométriques de leur réseau de stations météorologiques.



PARTIE I : Présentation du Causse Noir





1 Rappels sur le contexte géologique

Les descriptions géologiques suivantes sont tirées de la notice des cartes géologiques au 1/50000 du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et de l’Institut Géographique National (IGN).

Le Causse Noir appartient au domaine des Grands Causses. Ce sont de vastes plateaux calcaires situés au sud du Massif Central. Ils présentent des paysages arides, aux formes parfois impressionnantes, que l’eau façonne depuis des millions d’années.

Les différentes vallées qui leur sont associées individualisent chaque causse comme une unité à part entière. Ils sont délimités au nord par l’Aubrac, haut plateau volcanique et granitique, à l’est par les Cévennes, au sud par la plaine Languedocienne du Lodévois et à l’ouest par le Lévézou et le Rougier.

Le début de la formation des Grands Causses commence lors du Trias, où une période de régression s’installe, les dépôts passent alors d’un environnement marin peu profond au domaine lagunaire puis fluviatile.

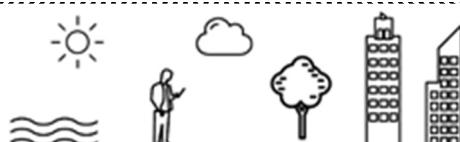
Les formations calcaires et dolomitiques du Jurassique moyen et supérieur reposent sur les formations imperméables du Lias marneux. Vient ensuite la série calcaro-dolomitique du Lias qui repose sur le Lias marneux et les formations cristallines et métamorphiques du Trias.

Le Causse Noir est quant à lui uniquement constitué de terrains appartenant à l’ère Mésozoïque, compris entre le Dogger et le Malm ([Cf. Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#)). Quelques formations du Lias supérieur affleurent dans la vallée du Tarn. Aux alentours de la commune de Paulhe, le **Domérien (l₆)** et le **Toarcien inférieur (l₇)** sont présents, ils correspondent respectivement à des marnes feuilletées et des marno-calcaires, schistes bitumeux. Sur la commune de La Cresse, le Lias supérieur est représenté par le **Toarcien supérieur et l’Aalénien inférieur (l_{8-9a})** sous la forme de marnes feuilletées. Ensuite, l’**Aalénien supérieur (l₉)** est, lui aussi, présent dans la vallée du Tarn, à Nant, Trèves et Lanuéjols. Il est composé de calcaires noduleux jaunâtres et bancs marneux grisâtres.

La sédimentation se poursuit par le **Bajocien inférieur (j_{1a})** constitué de calcaires blanc-gris, en gros bancs, à chailles. Il est présent dans les gorges de la Dourbie, à Lanuéjols et Nant.

Au **Bajocien supérieur (j_{1b})** se déposent des calcaires et des dolomies dans la vallée du Tarn et dans les gorges de la Dourbie jusqu’à La Roque-Sainte-Marguerite, et des dolomies cristallines roses à grises dans les gorges de la Jonte et sur certaines zones du plateau.

Viennent ensuite les formations datées du **Bathonien inférieur (j_{2a})**, avec des calcaires blancs en gros bancs ou en plaquettes. Elles sont présentes dans toutes les gorges et vallées mais aussi sur le plateau entre Peyreleau et La Roque-Sainte-Marguerite, à l’ouest de Lanuéjols et sur le Causse Bégon. Le **Bathonien supérieur (j_{2b})** est composé de dolomies ruiniformes sur la



partie ouest de la zone d'étude. Il recouvre quasiment toute la zone du plateau de Peyreleau à Millau et se poursuit jusqu'à La Roque-Sainte-Marguerite. Sur la partie est, l'étage du Bathonien supérieur est constitué de dolomies grises caverneuses et est retrouvé dans les gorges de la Jonte (formant des falaises) mais aussi sur le plateau vers Meyrueis, Lanuéjols, et sur le Causse Bégon. Sur la partie Ouest (entre Peyreleau, Millau et La Roque-Sainte-Marguerite) les terrains affleurants ne sont pas plus récents que le **Bathonien supérieur (j_{2b})**. La description géologique suivante ne tiendra compte que de la partie Est.

Au **Callovo-Oxfordien (j₃₋₅)** se déposent des marnes, des calcaires marneux, sables glauconieux et des formations calcaires cristallines jaunes à roses. Par ailleurs, se déposent des terrains calcaires blanc-gris au **Rauracien (j₆)**. Ces 2 formations géologiques se retrouvent sur les parties les plus hautes des gorges de la Jonte, et du plateau du Causse Noir et Bégon. Il se trouve aussi des formations datées du **Callovo-Argovien (j₃₋₄)** seulement dans les gorges du Trévezel, sous forme de calcaires blancs ou jaunes.

Ensuite, des calcaires blancs massifs et des calcaires marneux en plaquettes datés du **Kimméridgien inférieur (j₇)** se déposent, puis des calcaires blancs en gros bancs ou en plaquettes sublithostratigraphiques du **Kimméridgien supérieur (j_{8a})**. Ces terrains se situent sur les hauteurs du plateau.

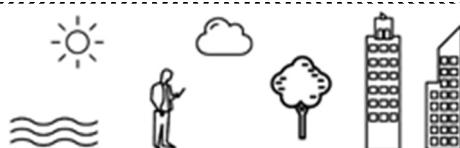
Sur l'ensemble du secteur, **des Terra Rosa (R)** ou « Terres du Causses », formations superficielles quaternaires, sont présentes dans le fond de certaines dépressions (dolines). De plus, dans les gorges et les vallées, des formations fluviatiles ou continentales comme des **colluvions (C et C_F)**, des **éboulis de pierrailles (E)**, de **blocs de grandes masses glissées et brèches de pente (E Br)** ou **des glissements en masse** sont présents.

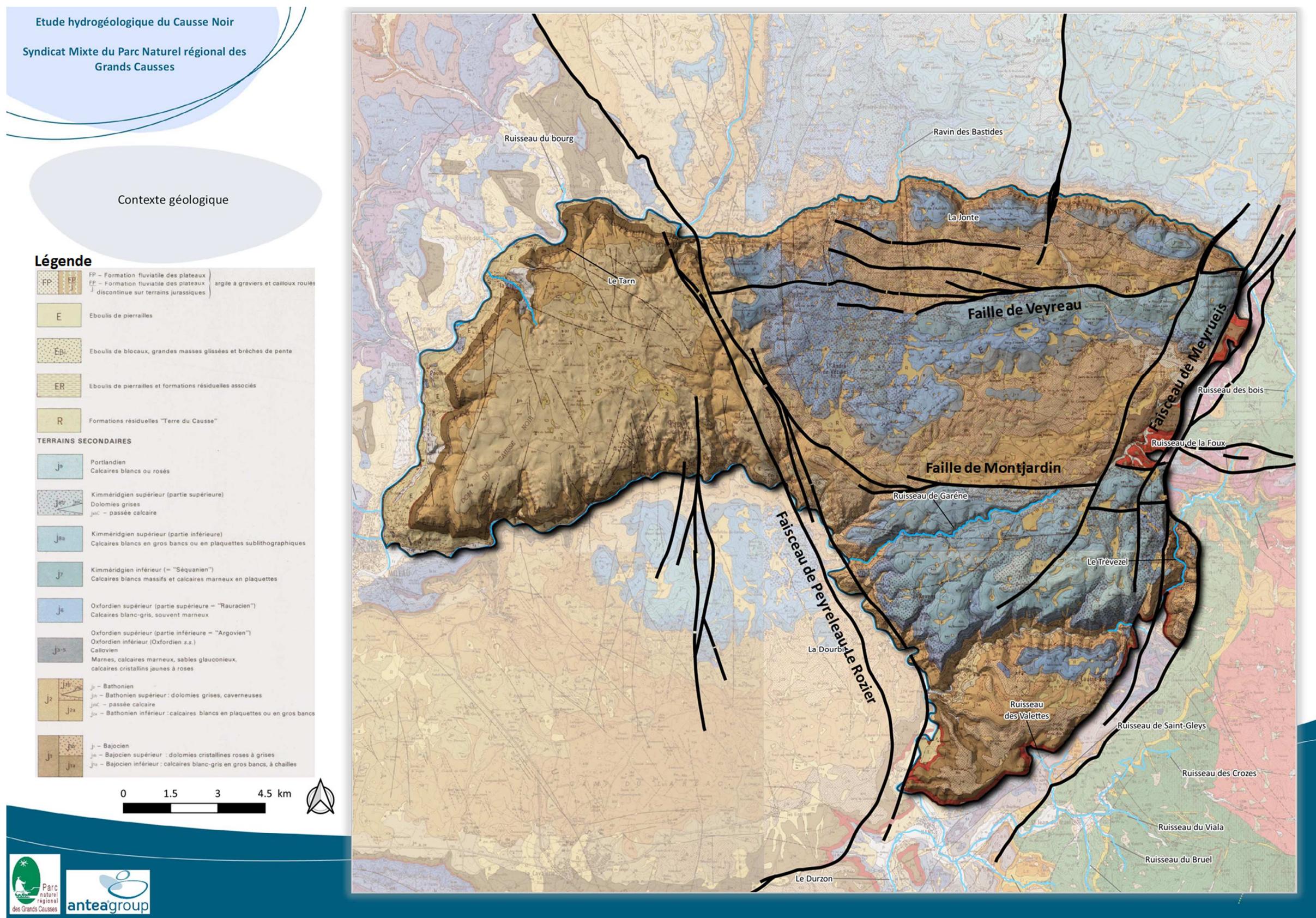
Par ailleurs, de nombreuses failles organisent le paysage géologique du Causse Noir. Deux directions majeures sont distinguées (**Cf. Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- Les failles orientées N-S (comprenant aussi les failles d'orientation NNE-SSW et NNW-SSE) ;
- Les failles orientées E-W.

Dans la partie est et centre du secteur, les failles majeures à noter sont la faille de Meyrueis orientée E-W, et la série de failles entre Meyrueis et Trèves en passant par Lanuéjols orientées NE-SW (faisceau de Meyrueis). La partie ouest possède, quant à elle, une faille majeure qui relie Peyreleau au Moulin de Corp, orientée NNW-SSE, et plusieurs grandes failles d'orientation majeure N-S autour de La Roque-Sainte-Marguerite, et quelques failles orientées SE-NW entre La Cresse et Peyreleau.

Pour rappel, les contextes géologique et géomorphologique du Causse Noir sont détaillés dans les rapports référencés GTR/PNR/1217-1685Rev1 de janvier 2019 et GTR/PNR/0719-1833 de juin 2019 rédigés par GEOTER.







2 Situation géographique du Causse Noir

Le secteur d'étude concerne le Causse Noir qui couvre une surface d'environ 300 km². Cette entité géographique et géologique est située à cheval sur trois départements avec une majeure partie en Aveyron ainsi qu'une autre partie dans le Gard et la Lozère dans la région Occitanie (Cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

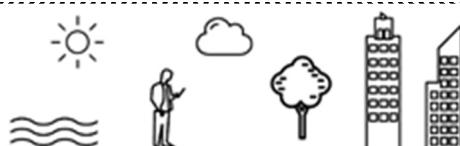
Le territoire est séparé du Causse Méjean au nord par les gorges de la Jonte, du Causse de Séverac au nord-ouest et du Causse Rouge au sud-ouest par le Tarn, du Causse du Larzac au sud-ouest par la Dourbie et du causse Bégon au sud par le Trévezel. Le causse Noir est le moins étendu des Grands Causses, il comprend 1 commune de Lozère (Meyrueis) et 11 communes de l'Aveyron :

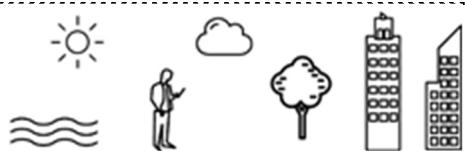
- Millau ;
- La Roque-Saint-Marguerite ;
- Paulhe ;
- La Cresse ;
- Mostuéjouls ;
- Rivièrel-sur-Tarn ;
- Peyreleau ;
- Veyreau ;
- Saint-André-de-Vézines ;
- Nant ;
- Saint-Jean de Bruel.

Il recoupe aussi 5 communes du Gard :

- Trèves ;
- Dourbies ;
- Causse-Bégon ;
- Lanuéjols ;
- Revens.

En outre, les zones de relief du Causse Noir présentent des topographies accidentées constituées reliefs calcaires et dolomitiques dépassant 900 m d'altitude et séparés par des vallons fluvio-karstiques plus ou moins bien développés, ainsi que de vastes zones planes, notamment vers 850 m d'altitude, comme entre le Pouncho d'Agast et le secteur de Roques Altès. Les secteurs bas, quant à eux, sont globalement de deux types : d'une part, des secteurs davantage plans que les précédents et qui correspondent souvent à de vastes dépressions ou à des replats plus ou moins démantelés ; et d'autre part, des dépressions profondément imprimées dans ces secteurs bas. Leur altitude varie entre 780 m et 900 m d'altitude.





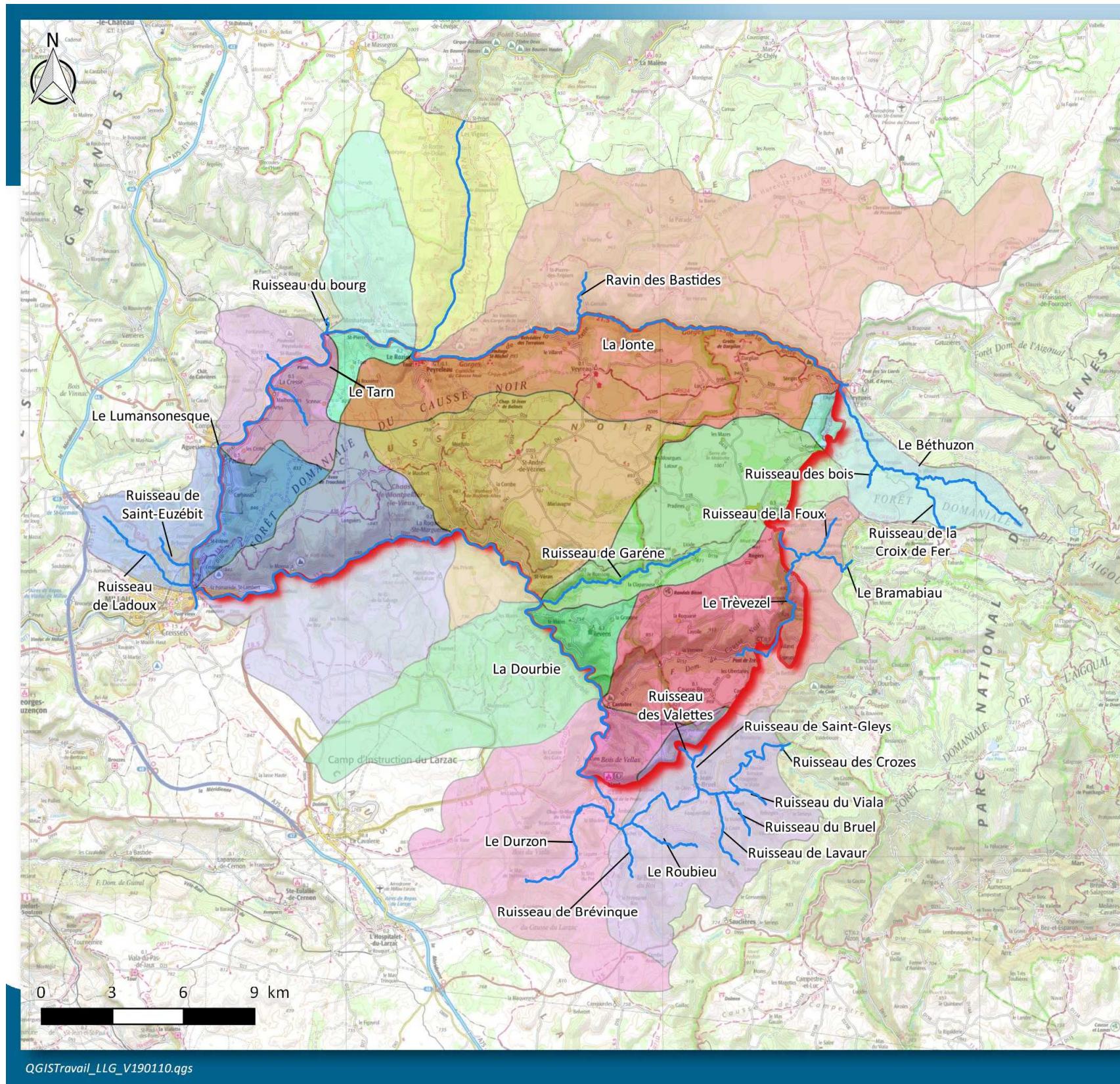


Figure 2. Carte de situation du Causse Noir et des principaux bassins hydrographiques

Etude hydrogéologique du Causse Noir

 Syndicat Mixte du Parc Naturel
régional des Grands Causses

Bassin hydrographique
LEGENDE

— Réseau hydrographique

□ Périmètre d'étude du Causse Noir

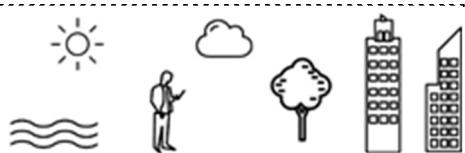
Bassin versant

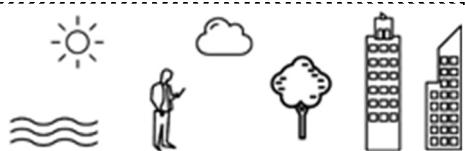
- La Dourbie du confluent de la Garène au confluent du Riou Sec (inclus)
- La Dourbie du confluent des Crozes au confluent du Brevinque (inclus)
- La Dourbie du confluent du Brevinque au confluent du Trèvezel
- La Dourbie du confluent du Riou Sec au confluent du Tarn
- La Dourbie du confluent du Trèvezel au confluent de la Garène
- La Garène
- La Jonte du confluent du Béthuzon au confluent du Tarn
- Le Béthuzon
- Le Tarn du confluent de la Jonte au confluent du Bourg
- Le Tarn du confluent du confluent non connu au confluent de la Jonte
- Le Tarn du confluent du Bourg au confluent du Lumansonesque
- Le Tarn du confluent du Lumansonesque au confluent de la Dourbie
- Le Trèvezel du confluent du Bonheur au confluent de la Dourbie





PARTIE II : Approche méthodologique





1 Description des sources étudiées

Le Causse Noir est délimité des autres grands causses par d'importantes gorges et vallées. D'un point de vue hydrologique, le Causse Noir est ainsi bordé par plusieurs cours d'eau qui constituent très souvent les exutoires (et le niveau de base) des divers réseaux karstiques développés au sein des formations calcaires et dolomitiques du Jurassique. Au nord et à l'est se trouve le cours d'eau de la Jonte, au sud le Trévezel et la Dourbie et à l'ouest le Tarn.

Le Tarn est l'affluent de la Garonne le plus important, il prend sa source au Mont Lozère dans le département du même nom. Il parcourt plus de 380 km avant de se jeter dans la Garonne près de Castelsarrasin dans le Tarn-et-Garonne. Il constitue la limite ouest du causse et correspond à la rivière au débit le plus important de la zone d'étude.

La Dourbie prend sa source dans le Mont Aigoual au massif du Lingas dans le Gard. Elle traverse les villages de Nant et La Roque-Sainte-Marguerite en serpentant à travers des gorges. Le long de son parcours, elle reçoit l'apport du Lingas et du Durzon en rive gauche et du Trévezel en rive droite. Elle se jette dans le Tarn à Millau et correspond à la limite sud de la zone d'étude.

La Jonte prend sa source dans le Mont Aigoual en Lozère, serpente entre les Cévennes et le Causse Méjean avant d'arriver à Meyrueis. A partir de Meyrueis, elle creuse d'impressionnantes gorges jusqu'au Rozier où elle se jette dans le Tarn. C'est une rivière qui, comme le Trévezel, comporte de nombreuses pertes et résurgences. Son cours d'eau devient alors souterrain les mois d'étiage entre Capelan (commune de Meyrueis) et les Douzes (commune de Hures-la-Parade). Elle crée la limite Nord du Causse Noir.

Le Trévezel débute son parcours dans les Cévennes au Mont Aigoual, dans le Département du Gard. C'est aussi une rivière temporaire, affluent de la Dourbie, qui se perd dans les calcaires et lors de fortes sécheresses une grande partie de son cours devient souterrain entre La Verrière (commune de Trèves) et sa confluence avec la Dourbie.

Dans le cas du Causse Noir, une partie des systèmes aquifères sont de type unaire, c'est-à-dire que l'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains karstifiés et que le drainage s'effectue principalement vers l'aval. L'autre partie présente un fonctionnement binaire, avec des pertes des ruisseaux du Trévezel notamment, qui se forme sur les terrains métamorphiques dans sa partie amont.

La partie de l'aquifère la plus productive se trouve être constituée par les dolomies et les calcaires du Bajocien supérieur et du Bathonien inférieur, où l'on trouve les deux résurgences les plus importantes (Moulin de Corp et les Fournets) qui drainent une majeure partie du Causse.



Un autre niveau d'émergence se distingue dans les calcaires du Bajocien inférieur, où se développent des sources un peu moins importantes que les précédentes comme la source des Moulinets, la source du camping des Prades et la résurgence du Triadou.

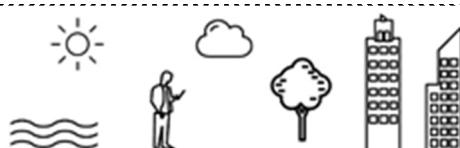
Le découpage en unités hydrogéologiques de la série sédimentaire constituant le Causse Noir, est proposé sur la figure ci-dessous.

Type d'aquifère	Nom de l'unité hydrogéologique	Label	Stratigraphie
Aquifère karstique	Aquifère supérieur du Jurassique moyen et supérieur	U1	Bathonien moyen De l'Aalénien supérieur au Kimméridgien
	Imperméable	U2	Domérien, Toarcien et Aalénien inférieur
Aquifère karstique et à porosité primaire et de fissure	Aquifère inférieur du Trias supérieur et du Lias inférieur	U3	Rhétien, Hettangien, Sinémurien et Carixien
Aquifère à porosité primaire et de fissure	Aquifère du Trias	U5	Trias (hors le Rhétien)
Aquifère supposé à porosité primaire et de fissure	Aquifère supposé du Stéphano-Permien	U6B	Stéphanien et Permien
Aquifère fissuré ou imperméable	Socle Paléozoïque	U6A	Granites de l'Aigoual schistes et granites du Paléozoïque

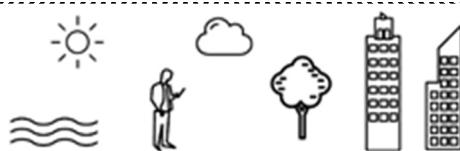
Figure 3. Unités hydrogéologiques des Grands Causses et du Causse Noir (en rouge) (GEOTER, 2017)

Il existe un étagement vertical des circulations karstiques. Un seul traçage a été effectué sur le Causse Noir, à partir de l'aven des Patates. Les vitesses d'écoulement calculées, à partir de ce traçage, sont de l'ordre de 110 m/h (Marchet P., 1988).

Sur l'ensemble du Causse Noir, 177 sources ont été répertoriées dont 6 sources qui sont captées pour l'alimentation en eau potable des villages ou de particuliers, 15 sources dites de 1^{ère} catégorie (les sources de plus de 10 L/s), 14 sources de 2^{ème} catégorie (débit compris entre 1 et 10 L/s) et 148 sources en 3^{ème} catégorie (sources dont le débit est inférieur à 1 L/s). Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-après.



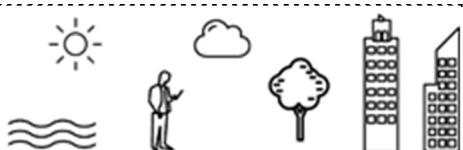
Nom	Catégorie	X (Lambert 93)	Y (Lambert 93)	Z (m)	Lithologie	Captée pour l'AEP
Moulinets	1	712 404,84	6 343 150,20	400	j1a	Non
Fournets	1	720 008,45	6 335 099,78	435	j1b	Non
Jouque Merles	1	721 686,66	6 333 147,79	432	j2a	Non
Moulin de Corp	1	719 793,33	6 335 696,25	455	j1b	Oui
Monna	1	711 789,20	6 334 159,75	380	j1a	Non
Castors	1	719 532,48	6 335 640,88	420	j1b	Non
La Fon	1	717 708,59	6 336 020,52	395	j1b	Non
Pas de l'Âne	1	731 696,56	6 332 065,14	575	I9	Non
Ubertyriès	1	729 420,18	6 330 590,15	590	j2a	Non
Villaret	1	732 016,97	6 331 439,41	725	j1a	Oui
Biau	1	718 448,25	6 343 444,30	411	j2a	Oui
Lissignol	1	715 125,98	6 343 898,82	427	j1a	Oui
Prades	1	713 882,56	6 344 517,75	392	j1a	Oui
Triadou	1	716 714,56	6 343 407,42	396	j1a	Non
Sourguettes	1	728 525,09	6 344 699,97	630	j2a	Non
Massebiau	2	710 402,02	6 333 943,72	374	j1a	Non
Lavoir Monna	2	711 183,32	6 334 542,23	404	j1a	Non
Saint-Segond	2	712 720,83	6 344 409,51	385	j1a	Non
Dargilan	2	730 103,22	6 344 558,49	640	j2a	Non
Fraissières	2	720 017,98	6 344 088,07	500	j1b	Non
Asias Negras	2	732 168,67	6 343 875,45	665	j2b	Non
Les Douzes	2	724 222,52	6 345 256,27	515	j2a	Oui
Fontaine des Moulinets	2	710 580,61	6 334 523,85	380	j1a	Non
Dourbie amont Fournets	2	719 939,58	6 335 121,34	423	j1b	Non



Nom	Catégorie	X (Lambert 93)	Y (Lambert 93)	Z (m)	Lithologie	Captée pour l'AEP
Barbaresque	2	724 395,90	6 324 894,50	484	I4-5	Non
Gardies	2	723 827,90	6 330 394,90	446	j2a	Non
Trévezel – Aval Trèves	2	730 569,55	6 331 140,66	565	j3-4	Non
Trévezel – Randavel	2	732 256,04	6 334 607,25	700	3ξ	Non
Jonte – Aval STEP Meyrueis	2	733 742,72	6 342 962,20	687	j1a	Non

Tableau 1. Caractéristiques des sources de catégories 1 et 2

La position de ces sources est reportée sur l'extrait de la carte géologique en **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**



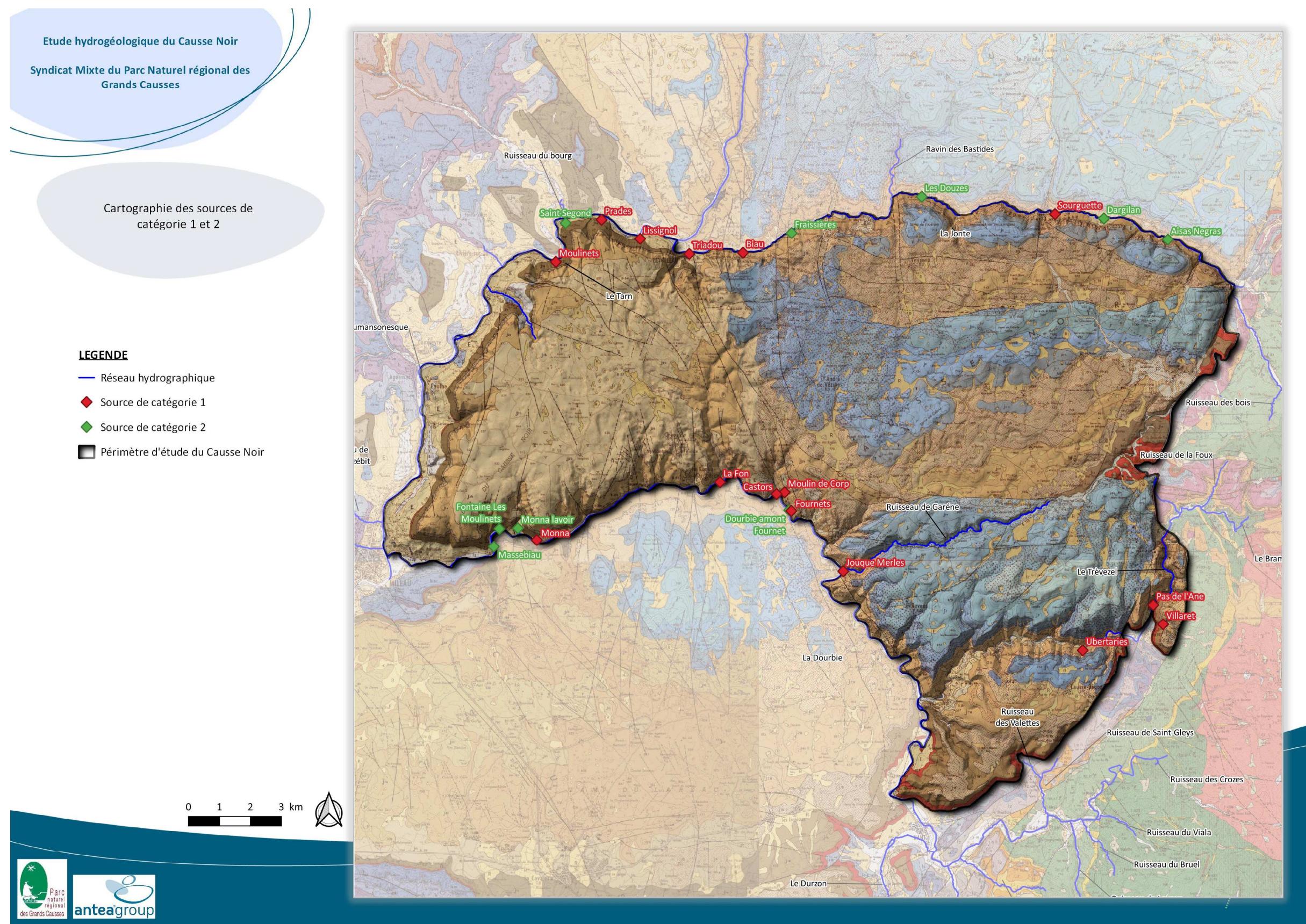


Figure 4. Position des sources étudiées sur extrait de la carte géologique





2 Méthodologie d'acquisition des données

Un suivi des principales sources du Causse Noir, catégorisées selon l'importance leur débit, a été mis en place durant deux cycles hydrologique (février 2017 à février 2019). L'ensemble de l'acquisition des données de terrain a été réalisé par les techniciens du PNRGC.

La méthodologie retenue est détaillée dans les paragraphes qui suivent.

2.1 Sources de catégorie 1

2.1.1 Suivi physico-chimique

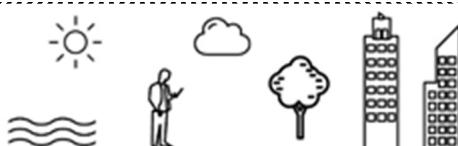
Un suivi en continu du débit, de la conductivité et de la température a été mise en place pour les sources de catégorie 1 : Biau, Monna, Moulin de Corp, les Moulinets, Prades, Sourguettes et Triadou. La position des stations est reportée sur la carte en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces sources ont donc été équipées de seuils maçonnés afin de mesurer la hauteur d'eau à un pas de temps de 30 mn. Parallèlement à ce suivi en continu, des jaugeages manuels ont été réalisés de manière régulière et dans des conditions hydrologiques différentes et ont permis d'élaborer les courbes de tarage (hauteur-débit) pour chacune des stations.

Les chroniques de débits obtenues ont des durées variables suivant la date d'installation des stations hydrométriques, les plus longues débutent en janvier 2017, les plus courtes en juin 2017. Il convient de préciser que ces dispositifs de mesure sont toujours en fonctionnement. Dans le cadre de l'étude, les mesures prises en compte s'arrêtent au mois de février 2019, soit deux cycles hydrologiques complets pour certaines stations.

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les données de débit disponibles sur chaque source.

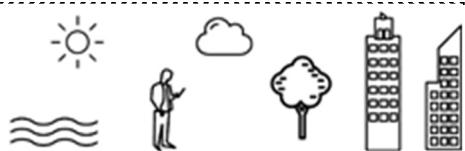
Il est à noter que la chronique de la source des Moulinets n'est pas continue en raison d'un problème technique sur le dispositif de mesure. Il a été décidé de scinder la série de données en deux sous-chroniques, nommées Moulinets 1 (correspondant à l'année 2017 et au début de l'année 2018) et Moulinets 2 (pour l'année 2018 et le début de l'année 2019) dans la suite du document.

Par ailleurs, pour les stations de Prades, Moulin de Corp et Moulinets des eaux météoriques sont venues parasiter les mesures lors des épisodes pluvieux les plus intenses, entraînant l'enregistrement de valeurs erronées. L'ensemble des séries de données enregistrées a fait l'objet d'un traitement afin de supprimer ces artefacts de mesure.



Sources de catégorie 1	Période de mesure de débit en continu	Période de mesure de la température et la conductivité en continu
Biau	15/02/2017 – 25/01/2019	08/02/2017 – 25/01/2019
Monna	13/01/2017 – 28/02/2019	12/01/2017 – 28/02/2019
Moulin de Corp	09/02/2017 – 28/02/2019	02/02/2017 – 28/02/2019
Moulinets 1	01/01/2017 – 13/02/2018	03/11/2016 -28/02/2019 pour T et 28/01/2017 – 28/02/2019 pour Cond
Moulinets 2	05/04/2018 – 28/02/2019	
Prades	01/01/2017 – 28/02/2019	20/12/2016 – 28/02/2019
Sourguettes	29/03/2017 – 25/01/2019	29/03/2017 – 25/01/2019
Triadou	08/06/2017 – 25/01/2019	20/12/2016 – 25/01/2019

Tableau 2 Périodes d'acquisition des données pour les sources de catégorie 1



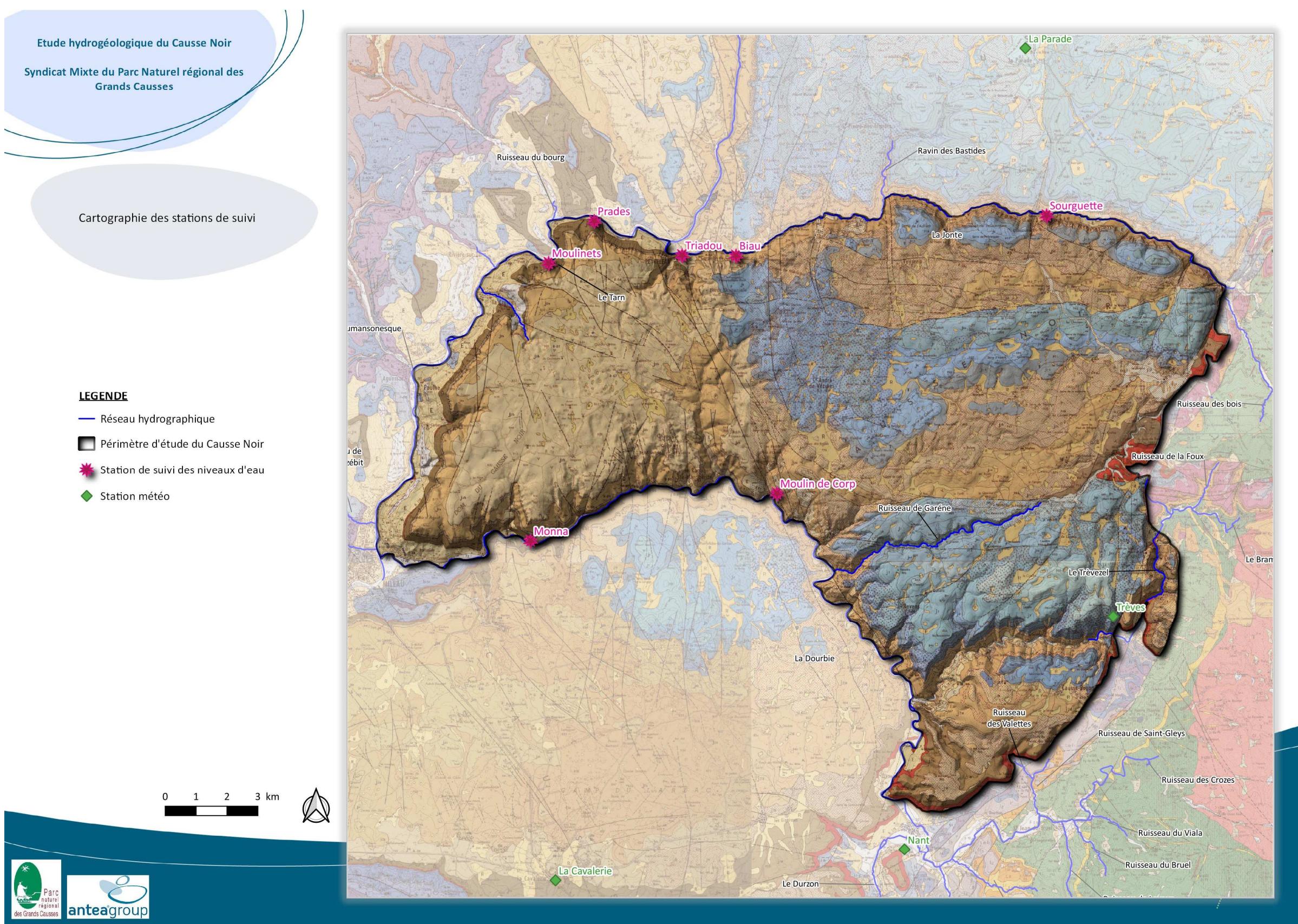


Figure 5. Position des stations de mesure en continu et des stations météorologiques





2.1.2 Suivi hydrochimique

Les sources de catégorie 1 ont fait l'objet d'un suivi physico-chimique mensuel de février 2017 à juillet 2018. Les mesures *in situ* portait sur les paramètres suivants : la conductivité électrique, le pH et la température.

Dans le même temps, l'eau de ces sources a été prélevée pour l'analyse (au laboratoire CARSO) des ions majeurs (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- et HCO_3^-), de l'alcalinité, des silicates et des principaux paramètres microbiologiques (*Escherichia Coli*, entérocoques, etc.).

Le tableau ci-après répertorie les dates auxquelles les mesures physico-chimiques ont été réalisées pour chacune des sources.

Source	Mesures physiques (T, Cond, pH, etc.)	Mesures chimiques (cations et anions majeurs)
Biau	02/2017 – 04/2018	02/2017 – 07/2018
Castors	02/2017 – 09/2017	01/2017 – 04/2018
Fournets	02/2017 – 11/2017 et 04/2018	01/2017 – 04/2018
Jouque Merles	02/2017 – 04/2018	01/2017 – 06/2018
La Fon	02/2017 – 04/2018	01/2017 – 07/2018
Lissignol	02/2017 – 04/2018	02/2017 – 07/2018
Monna	02/2017 – 04/2018	02/2017 – 07/2018
Moulin de Corp	02/2017 – 04/2018	02/2017 – 07/2018
Moulinets	02/2017 – 04/2018	02/2017 – 07/2018
Pas de l'Âne	02/2017 – 09/2017	02/2017 – 09/2017
Prades	02/2017 – 04/2018	02/2017 – 07/2018
Triadou	02/2017 – 04/2018	02/2017 – 07/2018
Villaret	02/2017 – 04/2018	02/2017 – 06/2018
Ubertariès	02/2017 – 11/2017	02/2017 – 03/2018
Sourguettes	02/2017 – 06/2018	02/2017 – 04/2018

Tableau 3. Date d'acquisition des données physico-chimiques et hydrochimiques des sources de catégorie 1



2.2 Sources de catégorie 2

Sur les 14 sources de catégorie 2, 7 ont fait l'objet de relevés ponctuels (2 à 3 fois durant la période de suivi) pour le débit (jaugeage par empotage ou au micromoulinet) et les principaux paramètres physico-chimiques (conductivité électrique, pH et température).

Enfin, des analyses hydrochimiques en laboratoire ont été menées 2 fois au cours de la période suivie (septembre 2017 et mars 2018). Les analyses ont porté sur les mêmes éléments que pour les sources de catégorie 1 (les ions majeurs, alcalinité et bactériologie).

2.3 Sources de catégorie 3

Les 148 sources répertoriées de catégorie 3 n'ont fait l'objet d'aucune mesure supplémentaire.

2.4 Cours d'eau

Plusieurs cours d'eau du Causse Noir ont fait l'objet de mesures ponctuelles de débit. Les débits du Tarn, de la Jonte et de la Dourbie ont été mesurés par jaugeages sériés à partir de la méthode ADCP.

Le débit de la Jonte a été mesuré au mois de septembre 2013 (hors cadre de l'étude) et septembre 2017. Le Tarn a, quant à lui, fait l'objet de relevés de débit en février 2011, en septembre 2013 et durant les mois de septembre et octobre 2017 et la Dourbie a été suivi aux mois de juillet 2017 et juillet 2018.

L'évolution des débits d'amont en aval et un point situé en aval pour la Jonte et le Tarn. En plus du débit, les apports par les sources ont été calculés entre chaque point de jaugeage.

2.5 Autres

Il est à noter que les eaux d'exhaure de la mine de Trèves ont été analysées pour évaluer leur qualité physico-chimique. L'analyse a été réalisée en juillet 2018. Les paramètres analysés sont les métaux lourds et les ions majeurs.

Pour analyser l'impact de ces eaux sur le réseau d'eaux superficielles, les eaux du Trévezel, de la Dourbie et de la Jonte ont également été analysées à 2 reprises (9 septembre 2017 et le 3 mars 2018). Certains métaux lourds retrouvés dans l'eau des sources, ont permis de tracer les relations eaux de surface/eaux souterraines via les pertes de ces cours d'eau.



Enfin, la composition chimique des eaux de pluies recueillies aux stations météorologiques de Millau et des Mazes a été analysée une quinzaine de fois entre le mois de novembre 2017 et le mois de juillet 2018.

2.6 Stations météorologiques

Les chroniques des débits ont été comparées à celles des précipitations provenant de 3 stations météorologiques situées à Meyrueis, Nant et Trèves. **Ces stations appartiennent au réseau de surveillance d'EDF, partenaire du PNRGC.**

Le pas de temps d'acquisition des pluies est de 1 h afin de pouvoir comparer les données aux valeurs de débit enregistrées à un pas de temps similaire.

La station la plus pertinente d'un point de vue géographique et retenue pour les analyses du fonctionnement hydrodynamique est celle de Meyrueis.

Station	X (Lambert 93)	Y (Lambert 93)	Z (m)
Meyrueis	689118	1910489	700
Nant	677200	1891000	500
Trèves	683900	1898600	560

Tableau 4. Caractéristiques des stations météorologiques retenues pour l'étude du Causse Noir

La composition chimique des eaux des pluies recueillies sur des pluviomètres à Millau et aux Mazes a également été analysée. Les prélèvements ont eu lieu entre novembre 2017 et juillet 2018.



3 Méthodes de traitement des données

L'étude du fonctionnement des systèmes karstiques se fait au travers de différentes approches : hydrodynamique, hydrochimique, la mise en œuvre de traçages, etc. Les différentes méthodes mises en œuvre dans le cadre de cette étude sont décrites ci-après.

3.1 Analyse du fonctionnement hydrodynamique des systèmes

L'approche hydrodynamique a consisté à comparer les chroniques des signaux de sortie des systèmes (débits) aux chroniques du signal d'entrée (la pluie) à partir des méthodes de calcul suivantes :

- analyses corrélatoires et spectrales, simples et croisées (pluie et débit) ;
- analyses des courbes de récession ;
- indice de variabilité des débits ;
- bilan hydrologique.

L'étude des débits classés ne sera pas réalisée dans le cas du Causse Noir puisque les chroniques des données disponibles sont trop courtes pour effectuer ce type d'analyse. Elle nécessitait une période d'acquisition de plusieurs années pour pouvoir croiser les résultats obtenus et proposer une interprétation pertinente et représentative.

Enfin, l'approche par traçages artificiels a permis de définir les relations hydrauliques entre des points à la surface du Causse et les diverses sources. Cette approche permet de préciser le fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères à partir des paramètres calculés (vitesses d'apparition, de restitution, temps de séjour, taux de dilution, etc.).

3.1.1 Analyses corrélatoires simples et croisées

Dans le cadre général de l'étude de système karstique, plusieurs méthodes sont employées parmi lesquelles l'analyse corrélatoire et spectrale. L'analyse corrélatoire (Jenkins et Watts (1968), Box et Jenkins (1976), Max, (1980), Papoulis (1964)) et spectrale (Priestley, 1981, 1988) constitue une méthode d'estimation de paramètres en analyse systémique appliquée notamment en hydrogéologie karstique par Mangin (1985). Elle permet en particulier de caractériser les systèmes étudiés et leur fonctionnement. Une des contraintes principales de cette analyse correspond au théorème d'échantillonnage de Schannon : « Pour échantillonner un signal sans perte d'information, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit supérieure au double de la fréquence maximale du signal ». Ainsi, pour mettre en évidence un phénomène de période T, on doit utiliser un pas d'échantillonnage inférieur ou égal à $T/2$. Afin



de caractériser les signaux hydrologiques, nous utiliserons à la fois les analyses univariées ou simples et les analyses bivariées ou croisées.

Au niveau des analyses simples, nous étudierons les fonctions d'autocorrélation et les spectres de densités de variance. La fonction d'autocorrélation permet de caractériser l'effet mémoire du processus étudié: ainsi, un phénomène aléatoire sera caractérisé par une décroissance rapide de la fonction d'autocorrélation alors qu'une décroissance plus lente sera synonyme d'une persistance du signal dans le temps. Le cas échéant, il est aussi possible de mettre en évidence un phénomène périodique (en particulier annuel pour les signaux hydrologiques). La fonction d'autocorrélation permet donc de connaître la structure temporelle de chaque série étudiée (pluie ou débit) et notamment l'effet mémoire (portée ou longueur d'autocorrélation).

Soit $x(j)$ le processus stationnaire étudié discréte dans le temps, la fonction d'autocorrélation est donnée par la relation suivante (N: nombre d'échantillon du signal) :

$$C_{xx}(m) = \frac{1}{(N-m) \cdot C_{xx}(0)} \cdot \sum_{j=0}^{n-j-N-m-1} x(j) \cdot x(j+m)$$

Il convient ensuite d'étudier le spectre de densité de variance. Celui-ci permet de quantifier les résultats obtenus précédemment et de connaître exactement les divers harmoniques contenus dans le signal. Celui-ci a été calculé en utilisant le théorème de Wiener-Kinchine (dans le cas stationnaire et sous réserve que le signal soit gaussien, la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation correspond au spectre de densité de variance). Soit $x(t)$ le processus étudié, le spectre de densité de variance est (N: nombre d'échantillon du signal) :

$$S_{xx}(k+1) = \sum_{n=0}^{n=N-1} x(n+1) \cdot e^{\frac{-2\pi j kn}{N}}$$

L'analyse spectrale simple des précipitations et des débits sur diverses périodes met en général en évidence sur certaines gammes de périodes des lois puissance du type :

$$S(\omega) = \frac{1}{\omega^\alpha}$$

Pour un bruit blanc, l'exposant est proche de zéro, plus l'exposant est élevé plus le signal est déterministe et donc structuré. Le tableau II-6 résume les lois puissance obtenues pour divers systèmes karstiques pyrénéens et aveyronnais.

Dans un deuxième temps, une analyse croisée de la relation précipitations/débits est proposée en étudiant la fonction d'intercorrélation pluie/débits d'une part, et la fonction de cohérence d'autre part, qui constitue un indice de linéarité du système. La fonction d'intercorrélation quantifie ainsi le lien statistique existant entre deux séries, par exemple,



une relation cause-effet correspondant à une corrélation pluie-débit. Le tableau ci-dessous présente quelques résultats de ce type d'analyse effectuée sur des systèmes karstiques bien connus.

Station	Exposant
Boundoulaou	2,58
Cernon	2,39
Cornus (Gloriette)	2,82
Durzon	2,68
Aliou	3,02
Homède	3,03
Lavencou	2,92
Mouline	2,99
Tournemire (Balastères)	2,64

Tableau 5. Exposants des lois puissances du spectre de densité de variance de systèmes karstiques connus

3.1.2 Analyse des courbes de récession

Cette approche mathématique consiste à analyser la partie décroissante d'un hydrogramme de crue d'une source. La récession fournit des informations sur le stockage et les propriétés structurelles du système karstique étudié.

La récession peut être décomposée en deux phases, une phase de décrue suivie d'une phase de tarissement. Selon Mangin (1975), le drainage karstique en période de crue est composé d'un apport provenant de :

- la zone non saturée, durant la **phase de décrue** où la courbe de récession présente une forte pente qui correspond à la réponse du système à l'infiltration rapide d'eaux superficielles (*via* des pertes ou un réseau de conduits bien développé) ;
- la zone saturée, durant la **phase de tarissement** la courbe de récession suit une loi de vidange linéaire et correspond au débit de base qui varie lui aussi durant la crue ; cette phase correspond à la phase.

La phase de récession est analysée à partir du maximum de crue. Les phases de décrue et de tarissement sont décrites de manière analytique à partir du modèle suivant :

$$Q(t) = \varphi(t) + \Psi(t)$$

Le premier terme $\varphi(t)$ correspond au tarissement non influencé de la zone noyée en fonction du temps t qui débute à l'instant où l'infiltration devient nulle.



Cette première phase est décrite par la loi de Maillet :

$$\varphi(t) = Q_{R0} * e^{-\alpha t}$$

α : coefficient de tarissement

Q_{RO} : débit fictif qui correspond à l'extrapolation de la courbe de tarissement à l'instant de la pointe de crue.

Le second terme $\Psi(t)$ décrit la vidange du réservoir *via* la formulation homographique empirique de Mangin (1970) :

$$\Psi(t) = q_0 * (1 - \eta t) / (1 - \varepsilon t)$$

q_0 : débit d'infiltration à l'instant t_0 marquant la pointe de crue

ε : coefficient d'hétérogénéité d'écoulement

η : coefficient de vitesse d'infiltration est égal à l'inverse du temps d'infiltration (ti)

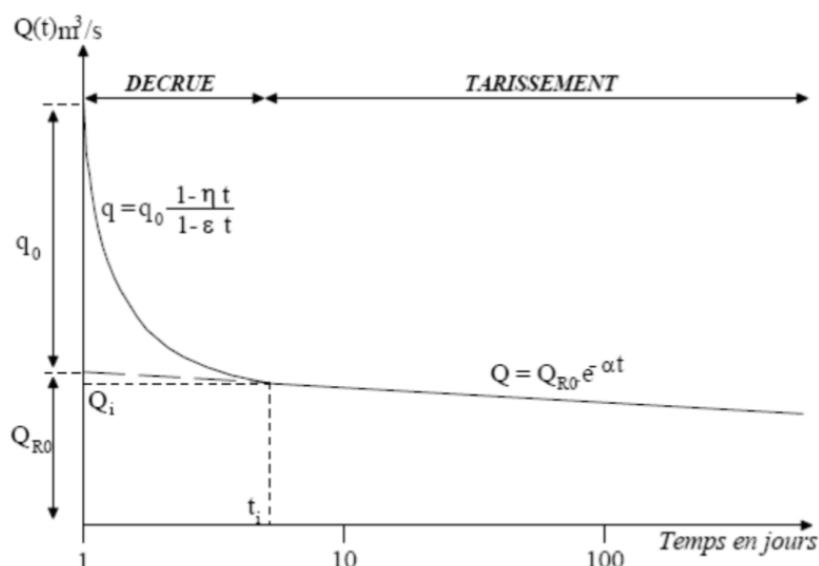


Figure 6. Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1975)

Les paramètres déterminés par ajustement de la loi de Mangin vont permettre de :

- estimer le volume d'eau contenu dans le réservoir à l'origine de la décroissance des débits observés ;
 - caractériser le fonctionnement de la zone d'infiltration par le calcul de deux coefficients **k** et **i** :
 - le paramètre **k** est le rapport du volume dynamique (volume qui s'écoule pendant la phase de tarissement à partir du temps d'infiltration) et du volume de transit annuel (volume annuel moyen qui transite dans le



système). Il traduit l'aptitude du système à stocker les précipitations et à les restituer au cours du temps. Ce paramètre est appelé **pouvoir régulateur**. Une valeur proche de zéro indique un pouvoir régulateur faible ;

- le coefficient i traduit le retard à l'infiltration. Il varie de 0 à 1 et correspond à la valeur de la fonction homographique à $t = 2$ jours après la pointe de la crue. Les valeurs élevées traduisent une infiltration (recharge) lente ou complexe contribuant à une meilleure régulation de l'écoulement alors qu'une valeur faible est à l'inverse le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée (Marsaud 1997).

À partir des valeurs de ces deux paramètres, Mangin a défini quatre domaines de référence pour les systèmes aquifères karstiques (Cf. Figure 7) :

- **Type 1** : le domaine des systèmes complexes, systèmes généralement de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes ;
- **Type 2** : le domaine des systèmes karstiques plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval et avec des retards dans l'alimentation dus soit à la présence de terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante ;
- **Type 3** : le domaine des systèmes possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante ;
- **Type 4** : le domaine des systèmes possédant un réseau spéléologique bien développé et débouchant à l'aval sur un important karst noyé.
- Un 5ème Type issu d'études plus récentes sur de très grands systèmes karstiques du Moyen-Orient (El Hakim et Bakalowicz, 2007) a été défini il a pour caractéristiques spécifiques des valeurs de k supérieures à 1.

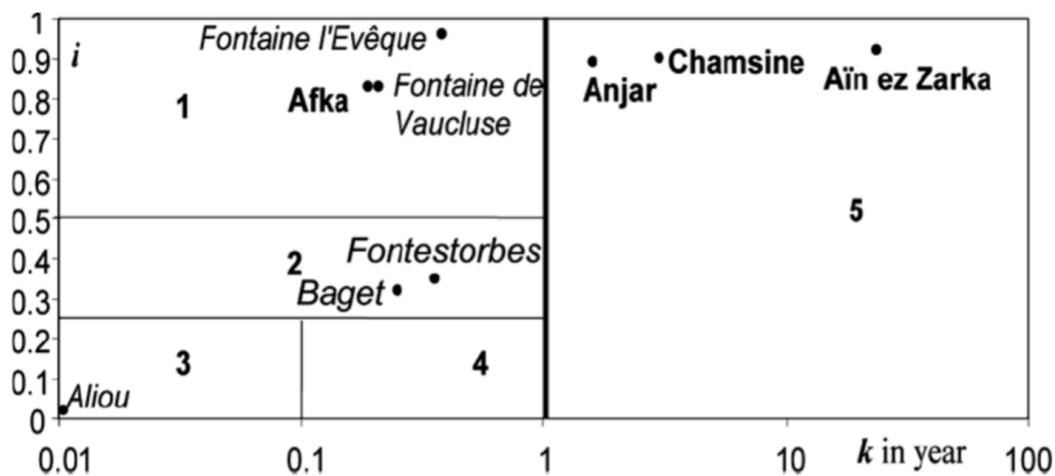


Figure 7. Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession selon Mangin, 1975 (El Hakim et Bakalowicz, 2007)



3.2 Méthodologie d'étude des données chimiques et physico-chimiques

L'approche hydrogéochimique a consisté en l'étude de l'évolution de la qualité des eaux des sources, basée sur l'enregistrement des paramètres physico-chimiques et des éléments majeurs et en la réalisation de traitements statistiques (paramètres descriptifs, Analyse en Composantes Principales, etc.), de calculs spécifiques (équilibres calco-carboniques) et de représentations graphiques classiquement utilisées en hydrogéologie (Piper et Shoëller-Berkaloff).

3.2.1 Les paramètres géochimiques

Les éléments chimiques contenus dans l'eau sont les marqueurs de la nature des roches dans lesquelles elle a circulé mais également des indices de l'anthropisation sur le bassin d'alimentation de la source.

L'origine des éléments chimiques les plus couramment rencontrés dans les eaux des systèmes karstiques, est présentée dans les paragraphes qui suivent. Ces descriptions, divisées en 2 catégories selon l'origine, sont issues du guide technique réalisé par le BRGM en 2006 et intitulé « Qualité des eaux souterraines – Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français ».

a. Les paramètres géochimiques d'origine autochtone, issus du contact eau-roche

⊕ **Les bicarbonates** : ils résultent de la dissolution des roches carbonatées par l'eau possédant un faible pH grâce à la saturation en CO₂ qui s'effectue au cours du trajet de l'eau en sub-surface dans les sols. C'est donc dans les aquifères carbonatés (calcaires et craies) riches en gaz carboniques que l'ion HCO₃⁻ prédomine. Les teneurs les plus souvent observées dans ce type de lithologie sont de quelques centaines de mg.L⁻¹.

⊕ **Calcium** : le calcium est l'un des éléments constitutifs majoritaires des roches carbonatées. La concentration en calcium dans les eaux souterraines est contrôlée par la solubilité de certains minéraux comme les minéraux carbonatés (calcite, dolomite, etc.), le gypse, les alumino-silicates. Dans les eaux naturelles, la forme prédominante du calcium est l'ion Ca²⁺. Les échanges de cations avec la matrice rocheuse contrôlent également la teneur en calcium dans les eaux souterraines.

⊕ **Magnésium** : on trouve principalement du magnésium dans les roches d'altération, les roches ignées et sédimentaires. D'un point de vue chimique, le magnésium s'apparente au calcium. Les minéraux magnésiens sont moins solubles que les minéraux contenant du calcium. Dans les eaux naturelles, la forme dissoute Mg²⁺ est prédominante. Dans les aquifères



carbonatés, la concentration en magnésium est contrôlée par les équilibres avec les minéraux carbonatés. Le magnésium est un élément prédominant dans les eaux drainant des aquifères contenant des carbonates magnésiens comme la dolomie. Dans ce contexte, les concentrations sont généralement de l'ordre de quelques dizaines de mg.L⁻¹ ou plus.

 **Rapport Ca/Mg :**

- entre 5 et 7 : présence majoritaire des calcaires ;
- entre 2 et 5 : partage calcaires et dolomies ;
- entre 1 et 2 : milieu essentiellement dolomitique.

b. Les paramètres géochimiques d'origine allochtone, marqueurs de l'anthropisation ou mixte (allochtone +autochtone)

 **Nitrate** : les nitrates sont produits naturellement par les sols par la minéralisation de la matière organique. Cependant, les sources anthropiques de nitrate sont nombreuses et sont essentiellement liées au lessivage des engrains et aux rejets domestiques et industriels. À partir d'analyses effectuées préalablement sur les eaux des sources de la région (Plagnes, 2000), on peut considérer que la valeur de 6 mg/l est le seuil au-delà duquel se manifestent les impacts de l'activité humaine.

 **Chlorure** : le chlore n'est pas un constituant des roches calcaires en l'absence de faciès évaporitique. On peut considérer que le seuil de 4 mg/l correspond aux chlorures hérités des seules précipitations efficaces. Au-delà, on observe soit la présence de roche évaporitique dans les réservoirs soit une pollution, souvent due soit au rejet d'eaux usées soit au salage des routes en hiver. Très souvent, la source principale de chlorure est l'apport atmosphérique, en effet, les pluies sont riches en chlorure.

 **Sodium** : le sodium est habituellement absent des calcaires et les teneurs des eaux du karst sont pauvres quand elles ne sont pas polluées. Le fait que le sodium soit étroitement lié au chlorure et que les chlorures accompagnent souvent les nitrates dans leur croissance indique que le sodium a une origine anthropique au-delà de l'apport naturel par les précipitations qu'on peut estimer à 2 mg/l.

 **Potassium** : le potassium est généralement très peu abondant dans les eaux naturelles et particulièrement dans les eaux du karst (teneur équivalente à 1 mg/l). D'après Hem (1985), la concentration en potassium pourrait être influencée par des facteurs biologiques comme les végétaux qui constituent une source non négligeable de potassium.

 **Sulfate** : les sulfates dans les eaux peuvent avoir soit une origine géologique si elles sont en contact de gypse ou évaporites notamment, soit une origine anthropique avec les apports des engrains utilisés dans l'agriculture. La présence de sulfate dans l'eau peut être liée à



l'oxydation de minéraux riches en soufre, principalement de sulfures primaires ou secondaires. Ces minéraux sont présents dans tous les types de lithologie (calcaires, sables, socle). Elle peut aussi découler du lessivage des formations évaporitiques ou de l'oxydation des sulfures dans les précipitations atmosphériques.

3.2.2 Mise en forme des données

Les graphiques listés ci-après ont été établis dans le cadre de ce travail afin de comparer les eaux des différentes sources et de déterminer l'origine naturelle (échanges eau/roche) ou anthropique des divers éléments.

⊕ Graphique $[Ca^{2+}] = f([Mg^{2+}])$

La calcite et la dolomie présentent des cinétiques de dissolution très différentes, en effet la première se dissout beaucoup plus vite que la deuxième, on a donc souvent des concentrations en calcium supérieures à celles de magnésium. Cependant, pour un même système, un temps de séjour plus important de l'eau aura tendance à diminuer ce rapport.

⊕ Graphique $[Cl^-] = f([NO_3^-])$

Les chlorures et les nitrates sont deux éléments marqueurs d'activité anthropique, cependant les chlorures sont des ions conservatifs tandis que ce n'est pas le cas des nitrates. Le rapport entre les concentrations de nitrates et de chlorures permet donc d'apporter une information complémentaire sur l'origine de ces éléments (apports d'engrais et/ou d'eaux usées).

⊕ Graphique $[SO_4^{2-}] = f([NO_3^-])$

Comme expliqué précédemment, les sulfates peuvent avoir deux origines. S'ils sont d'origine anthropique, les concentrations de nitrates doivent augmenter avec les concentrations de sulfate. Cependant, si on observe une augmentation des sulfates sans qu'elle soit corrélée avec une augmentation des nitrates, ces sulfates ont une origine géologique.

⊕ Diagramme de Piper :

Le diagramme de Piper est un outil de visualisation des données chimiques, utile soit pour définir le faciès chimique des eaux, ou pour suivre l'évolution de la minéralisation d'une source. Il se présente sous la forme de deux triangles présentant le faciès cationique pour celui de gauche et le faciès anionique pour celui de droite, et d'un losange synthétisant le faciès global (Cf. exemple en Figure 8).



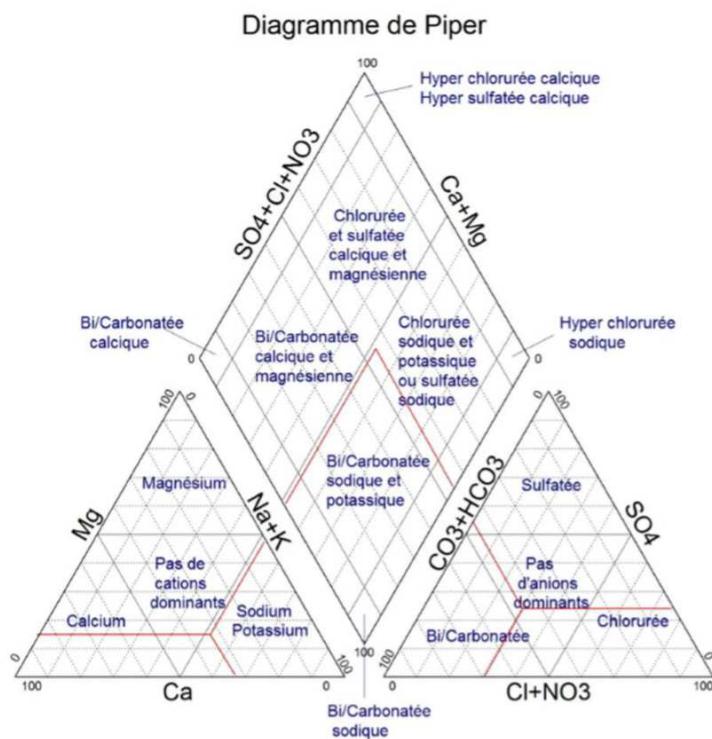


Figure 8. Diagramme de Piper

Diagramme de Stiff :

Le diagramme de Stiff permet d'obtenir une figure géométrique polygonale caractéristique d'un faciès chimique d'une eau. Les valeurs en meq/L des ions majeurs sont reportées sur des axes horizontaux de part et d'autre de l'axe vertical d'origine (Cf. exemple en Figure 9). Les cations sont représentés à gauche de l'origine et les anions à droite. Ce type de représentation permet de regrouper des faciès chimiques suivant leur forme.

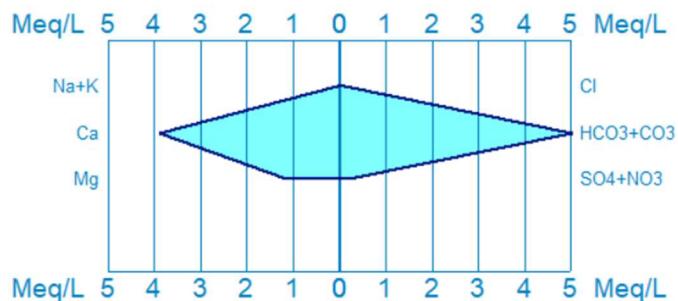


Figure 9. Exemple d'un digramme de Stiff



PARTIE III : Résultats et interprétation des suivis hydrodynamiques, physico- chimiques et hydrochimiques





1 Contexte hydroclimatique

Préalablement à l'analyse des chroniques de débit ou hydrochimiques qui caractérisent les réponses des systèmes aquifères à un signal d'entrée, il est intéressant de décrypter ce signal, la pluie. Comme évoqué dans la première partie, les données de trois pluviomètres situés sur le Causse Noir ont été utilisées dans le cadre de l'étude, celles de la station de Meyrueis ont été retenues pour la réalisation des calculs (hydrodynamique) et des chroniques des suivis physico-chimiques et de débit.

Le cumul mensuel des précipitations relevées aux stations de Meyrueis (altitude 705 m NGF), de Trèves (altitude 560 m NGF) et de Nant (altitude 500 m NGF) en 2017 est reporté au Tableau 6 et dans le Tableau 7 pour l'année 2018. Les graphiques du cumul des pluies en 2017 et en 2018 sont quant à eux représentés, respectivement, en Figure 10 et Figure 11.

2017	Pluie Meyrueis	Pluie Trèves	Pluie Nant
Janvier	107,5	116,9	98,6
Février	99,1	129,7	125,6
Mars	121,9	129,3	110,8
Avril	46,9	50,2	46,0
Mai	83,1	75,9	48,4
Juin	67,5	72,4	45,8
JUILLET	56,2	14,8	14,7
Août	21,0	8,8	0,5
Septembre	20,8	14,0	0,4
Octobre	45,2	55,2	70,6
Novembre	91,6	107,4	145,9
Décembre	108,5	90,4	69,9
Total	869,3	865,0	777,2

Tableau 6. Cumul des pluies 2017 sur les stations de Meyrueis, de Trèves et de Nant



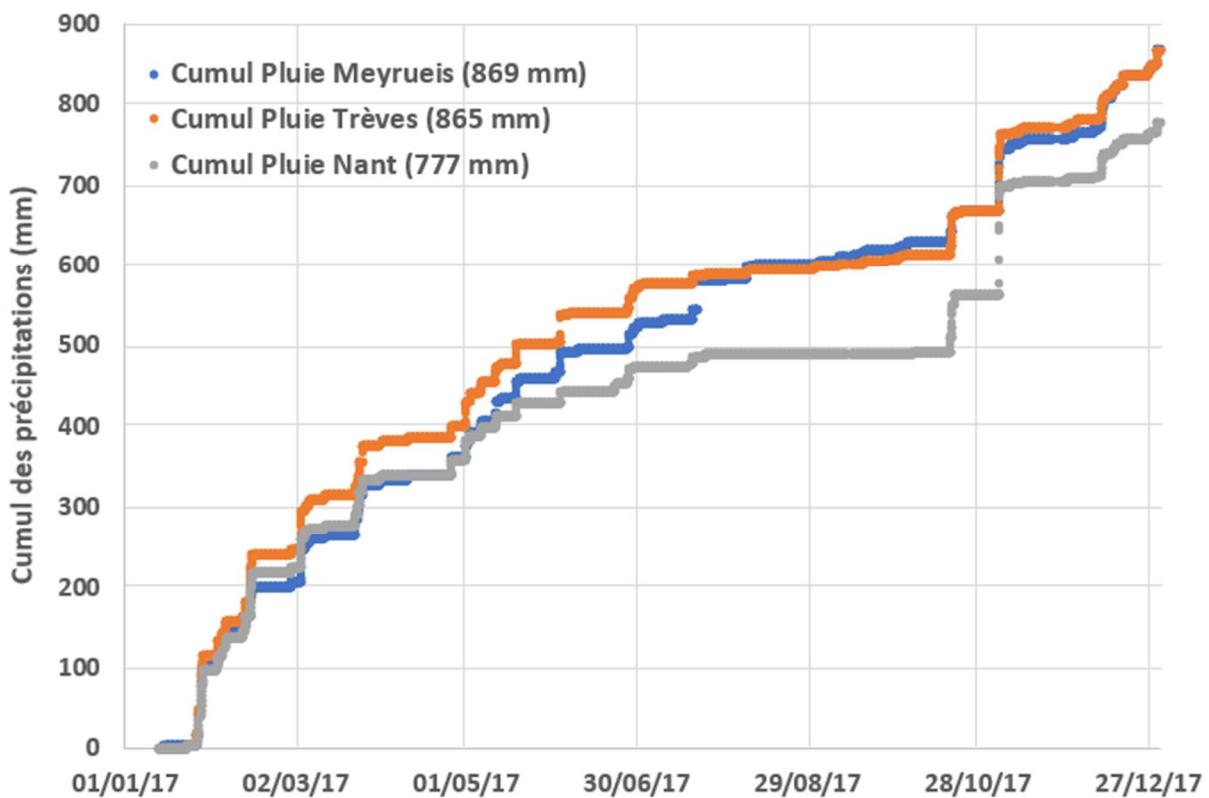


Figure 10. Représentation graphique du cumul des pluies en 2017

2018	Pluie Meyrueis	Pluie Trèves	Pluie Nant
Janvier	278,5	277,7	218,5
Février	39,9	46,2	46,6
Mars	94,7	110,5	93,2
Avril	166,1	167,5	118,6
Mai	148,4	215,7	118,6
Juin	53,0	59,9	71,5
Juillet	104,8	70,3	37,9
Août	60,8	55,4	33,4
Septembre	0,7	0,4	0,8
Octobre	224,4	250,6	224,8
Novembre	231,7	135,2	97,1
Décembre	92,8	56,5	36,2
Total	1495,8	1445,9	1097,2

Tableau 7. Cumul des pluies 2018 sur les stations de Meyrueis, de Trèves et de Nant



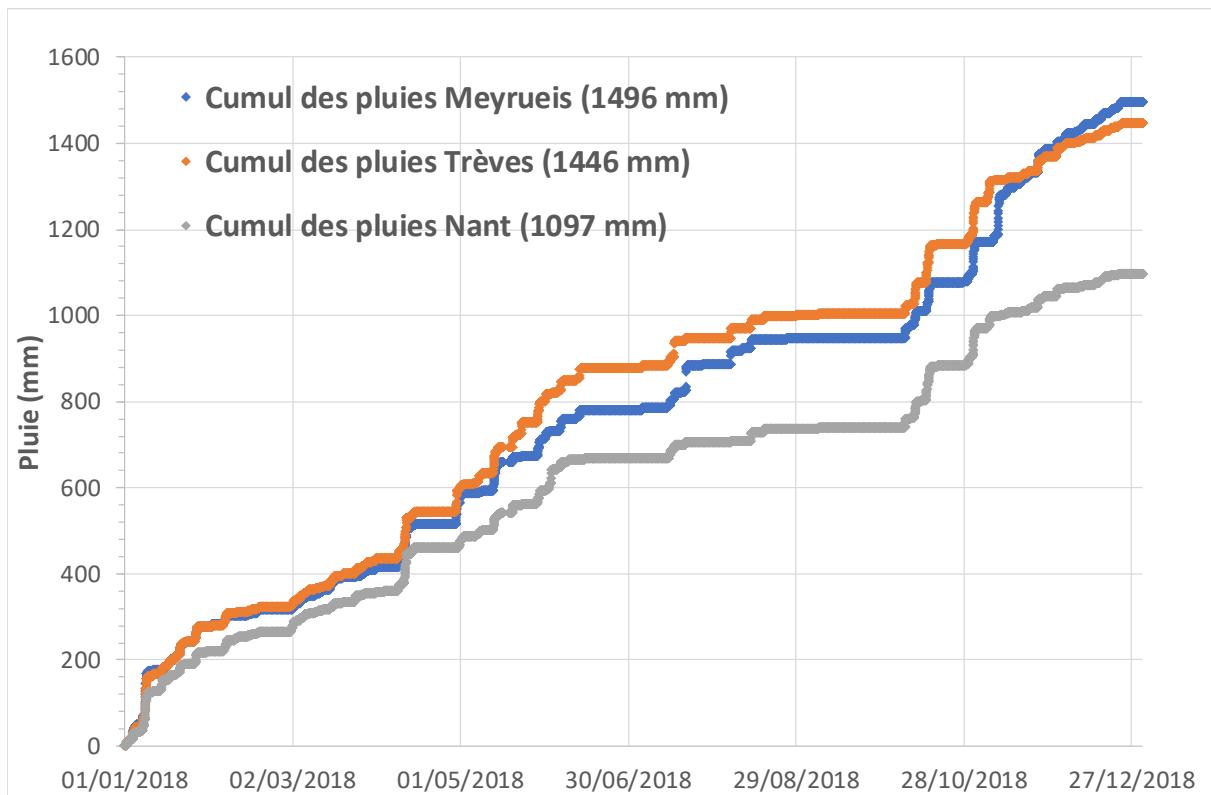


Figure 11. Représentation graphique du cumul des pluies en 2018

Il convient de noter que, malgré des cumuls annuels distincts, les tendances de l'évolution des précipitations sont comparables à Meyrueis, Trèves et Nant.

En 2017, les cumuls de pluies ont été relativement importants sur les trois stations entre les mois de janvier et mars (entre 330 et 376 mm). Par la suite, ces cumuls ont été faibles entre avril et juin 2017, ce qui indique un printemps peu pluvieux qui est pourtant une période habituelle de recharge pour les systèmes aquifères. La période de mi-juillet à mi-octobre n'a présenté pratiquement aucune pluie, ce qui est illustré par une longue période de stabilisation du cumul des précipitations sur les graphes (Cf. Figure 10). Enfin, à partir du mois de novembre, les pluies ont de nouveau fortement augmenté jusqu'en fin d'année 2017. Les pluviomètres de Meyrueis et de Trèves sont ceux ayant relevé les plus forts cumuls pluviométriques en 2017, avec respectivement 869 et 865 mm.

Le cumul des pluies relevées durant l'année 2018 est donné au Tableau 7. La représentation graphique du cumul des pluies en 2018 est illustrée à la Figure 11. La station de Meyrueis est celle pour laquelle il a été enregistré la plus grande quantité d'eau tombée sur le causse, soit de 1 496 mm.

En comparaison avec l'année 2017, 2018 a été bien plus pluvieuse avec une augmentation des précipitations annuelles de plus de 55%. Les cumuls des pluies sont particulièrement



importants entre les mois de janvier et de mai 2018 (312 mm à la station de Meyrueis entre le 27 décembre 2017 et le 27 janvier 2018). Contrairement à 2017, la période printanière (mars à mai) a été particulièrement pluvieuse sur le causse (408 mm à Meyrueis et 494 mm à Trèves), ce qui a permis d'importantes phases de recharge des aquifères locaux. Entre mi-juillet et mi-octobre, peu de précipitations ont été enregistrées pour l'ensemble des trois stations. Le cumul des précipitations augmente à nouveau de manière significative à partir du mois d'octobre 2018.

Les deux premiers de l'année 2019, le suivi physico-chimique se prolongeant jusqu'à fin février, sont en revanche peu pluvieux (cumul inférieur à 100 mm).

Les années 2017 et 2018 ont été complètement différentes d'un point de vue des cumuls pluviométriques observés et de leur répartition à l'échelle de l'année calendaire. Ceci est intéressant vis-à-vis de la représentativité des mesures réalisées durant ces 2 cycles hydrologiques et des interprétations déduites sur le fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique des systèmes étudiés.



2 Hydrodynamique : Résultats et traitements des sources de catégorie 1 suivies

2.1 Caractéristiques physiques des sources et de leur bassin d'alimentation

Le tableau ci-dessous présentent les caractéristiques physiques des sources de catégorie 1 et de leur bassin d'alimentation. Notons que l'altitude des sources est ici peu fiable (issue de la carte IGN ou de la BSS), il aurait été intéressant de les faire relever par un géomètre et de réaliser des profils en long pour les replacer le long du tracé des rivières de la Dourbie et de la Jonte. Cette option n'a pas été retenue par le PNRGC.

On peut noter que la rivière de la Dourbie au sud est plus encaissée que la Jonte au nord, ce qui d'un point de vue du drainage des eaux souterraine du causse va jouer un rôle primordial.

Nom	Catégorie	Altitude émergence (m NGF)	Débit moyen (l/s)	Surface bassin d'alimentation (km ²)
Moulinets*	1	400	26,1	2,56
Jouque Merles	1	432	1 305,5	54,31
Moulin de Corp*	1	455	412,6	102,80
Fournets	1	435	563,1	
Castors	1	420	Non mesuré	
Monna*	1	380	5,8	1,09
La Fon	1	395	12,9	2,03
Pas de l'Ane	1	575	4,4	0,53
Ubertariès	1	590	Non mesuré	Non déterminé
Villaret	1	725	0,6	0,21
Biau*	1	411	8,1	1,07
Lissignol	1	427	0,7	0,16
Prades*	1	392	27,7	5,36



Nom	Catégorie	Altitude émergence (m NGF)	Débit moyen (l/s)	Surface bassin d'alimentation (km ²)
Triadou*	1	396	16,7	4,52
Sourguettes*	1	630	30,9	1,52

* Source suivie en continu (débit et paramètres physico-chimiques)

Tableau 8. Caractéristiques physiques des sources et des bassins d'alimentation

2.2 Débit des sources

2.2.1 Courbes de tarage

Les émergences des 7 sources de catégorie 1 choisies pour le suivi en continu on fait l'objet d'aménagements spécifiques (travaux réalisés par le PNRGC) afin de pouvoir mesurer au mieux leur débit par jaugeage en période de basses et de hautes eaux. Les jaugeages réalisés dans des conditions hydrologiques différentes durant au moins 1 année, ont permis d'établir des courbes de tarage (relation hauteur-débit) pour 7 des 15 sources de catégorie 1 : Biau, Monna, Moulin de Corp, Moulinets, Prades, Sourguettes et Triadou.

Il convient de noter que l'extrapolation des valeurs pour les périodes de très hautes eaux est peu fiable du fait de l'impossibilité de réaliser des mesures dans ces conditions. Dans les gammes de mesure plus faibles, les courbes donnent de bons résultats si l'on se réfère aux coefficients de détermination élevés obtenus ($> 0,97$, hormis pour Moulinets, Cf. Tableau 9).

Le Tableau 9 *Pour cette source, au-delà de Heau = 22 cm, la section de mesure évolue, ce qui explique les 2 équations

Tableau 9ci-après renseigne sur les périodes de relevé des hauteurs d'eau des 7 sources concernées et les équations de la relation hauteur d'eau/débit pour chacune des sources.



Sources	Nombre de mesures manuelles	Période de mesure des hauteurs d'eau	Relation H _{eau} /Débit	Coeff. Détermination de la relation
Biau	15 points	15/02/2017 – 19/06/2018	$y = 76\ 701,46x^{12,80}$	0,97
Monna	9 points	26/09/2017 – 10/07/2018	$y = 0,06x^{1,32}$	0,98
Moulin de Corp	7 points	23/03/2017 – 06/04/2018	$y = 11,56x^2 - 4,91x + 0,52$	0,99
Moulinets*	15 points	15/02/2017 – 10/07/2018	$y = 44,99x^2 - 17,39x + 1,69$ ($H < 0,22\ cm$)	0,97
			$y = 0,0009e^{17,16x}$ ($H > 0,22\ cm$)	0,74
Prades	13 points	15/02/2017 – 19/06/2018	$y = 386,32x^{7,38}$	0,98
Sourguettes	12 points	16/03/2017 – 19/06/2018	$y = 3345,7x^{4,54}$	0,99
Triadou	11 points	15/02/2017 – 24/04/2018	$y = 2873,7x^{8,15}$	0,95

*Pour cette source, au-delà de Heau = 22 cm, la section de mesure évolue, ce qui explique les 2 équations

Tableau 9. Période de mesure des hauteurs d'eau des 7 sources de catégorie 1 et courbe de tarage

2.2.2 Variations temporelles des débits et hauteurs d'eau des sources de catégorie 1

Les chroniques de débit obtenues sont présentées en figures suivantes. Les mesures de débits ponctuelles réalisées par empotage (seau et chronomètre) ou à l'aide de l'ADCP (cas de Moulin de Corp) sont également reportées.

Les systèmes de mesure de débit (de niveau plus précisément) mis en place dans le cadre de l'étude sont illustrés par des photographies.





Figure 12. Système de mesure du niveau installé dans la source de Biau

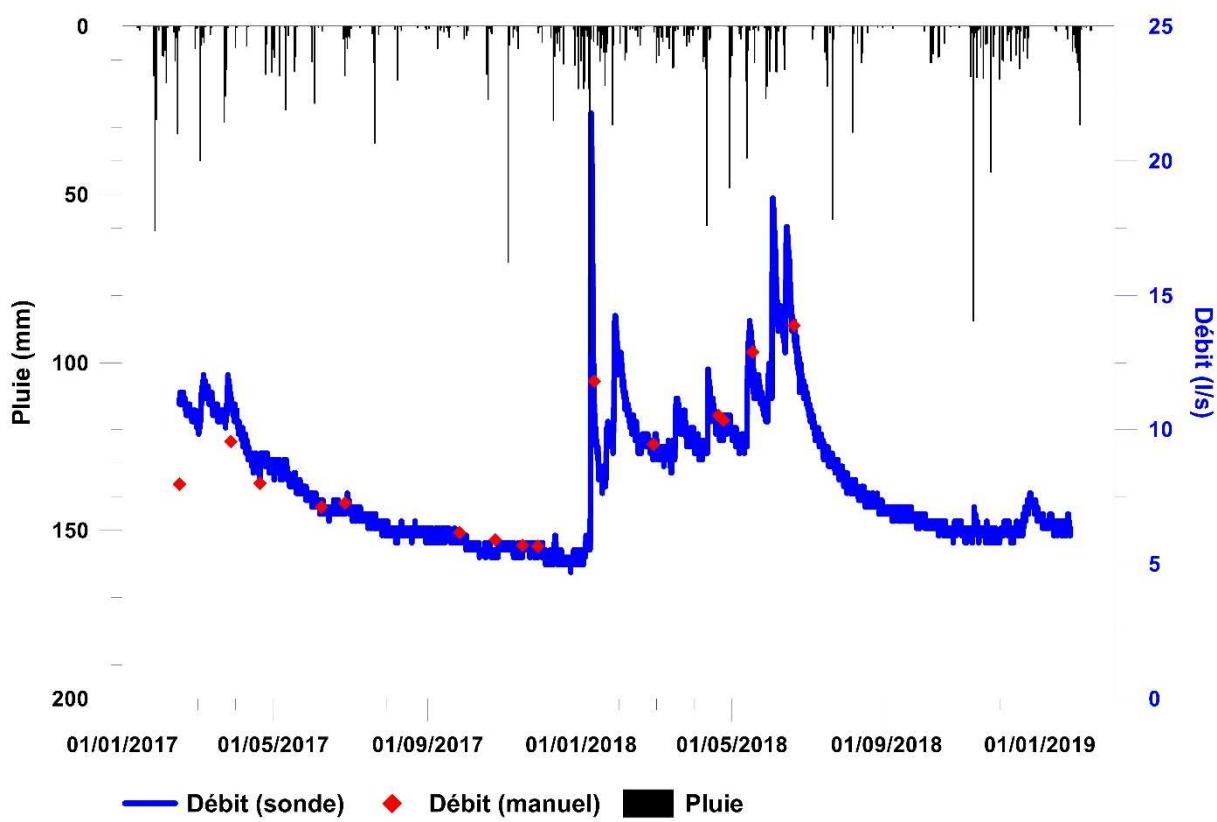


Figure 13. Chronique de débit de la source Biau





Figure 14. Seuil de mesure installé à la source de Moulin de Corp

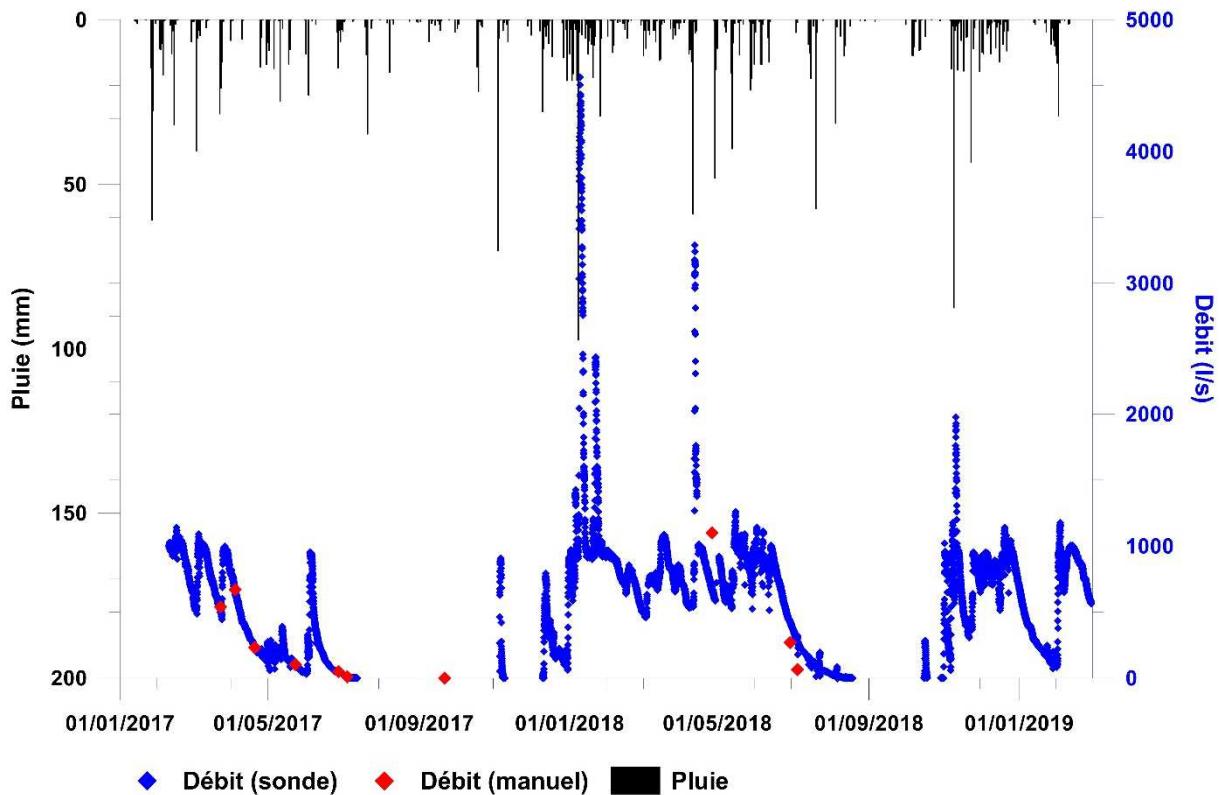


Figure 15. Chronique de débit de la source Moulin de Corp





Figure 16. Système de mesure du niveau installé à la source Monna

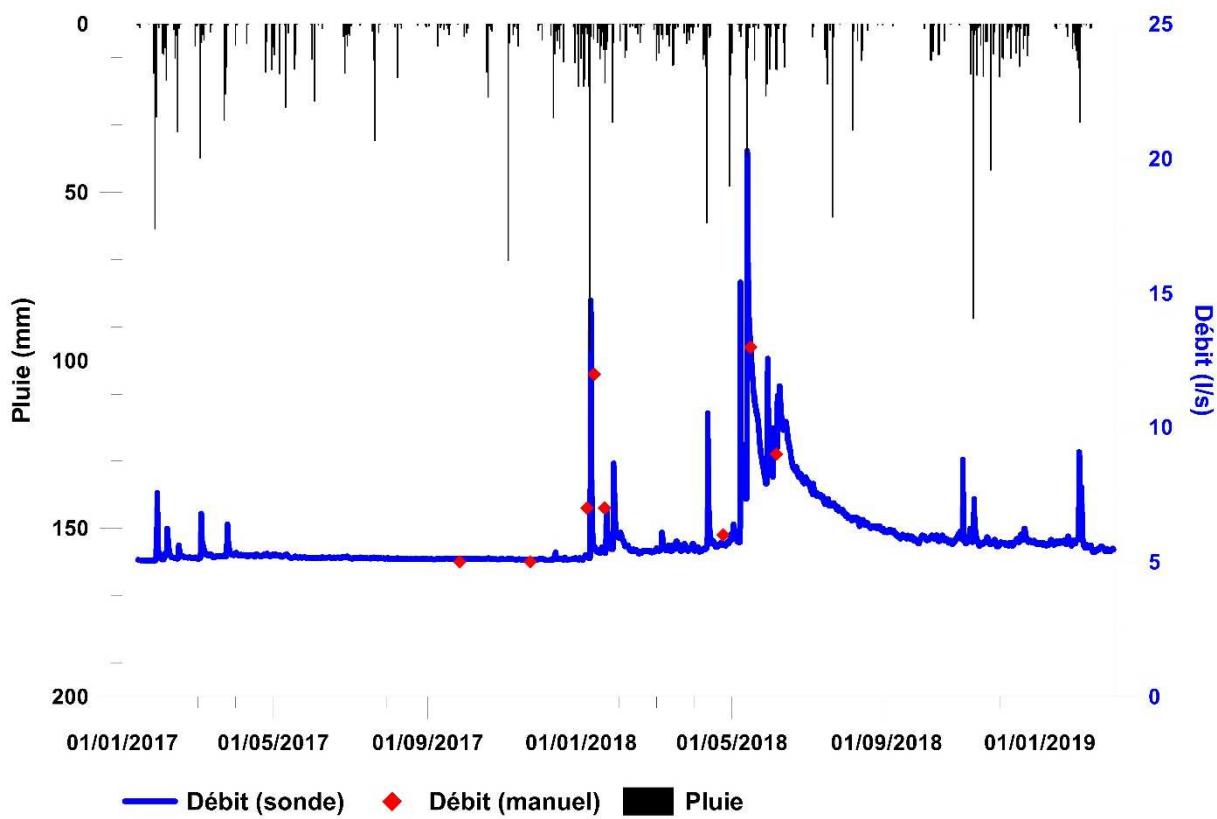


Figure 17. Chronique de débit de la source Monna





Figure 18. Seuil de mesure installé à la source des Moulinets

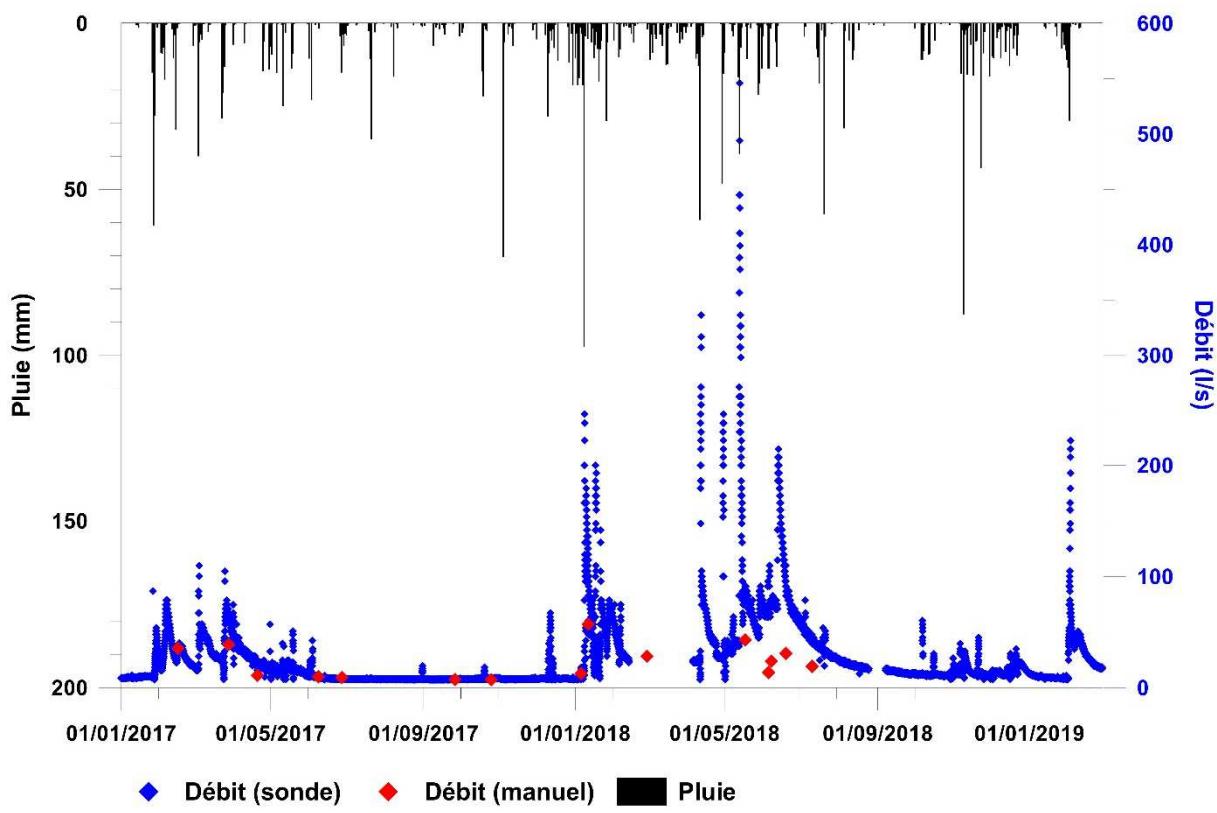


Figure 19. Chronique de débit de la source Moulinets





Figure 20. Seuil de mesure installé à la source de Prades

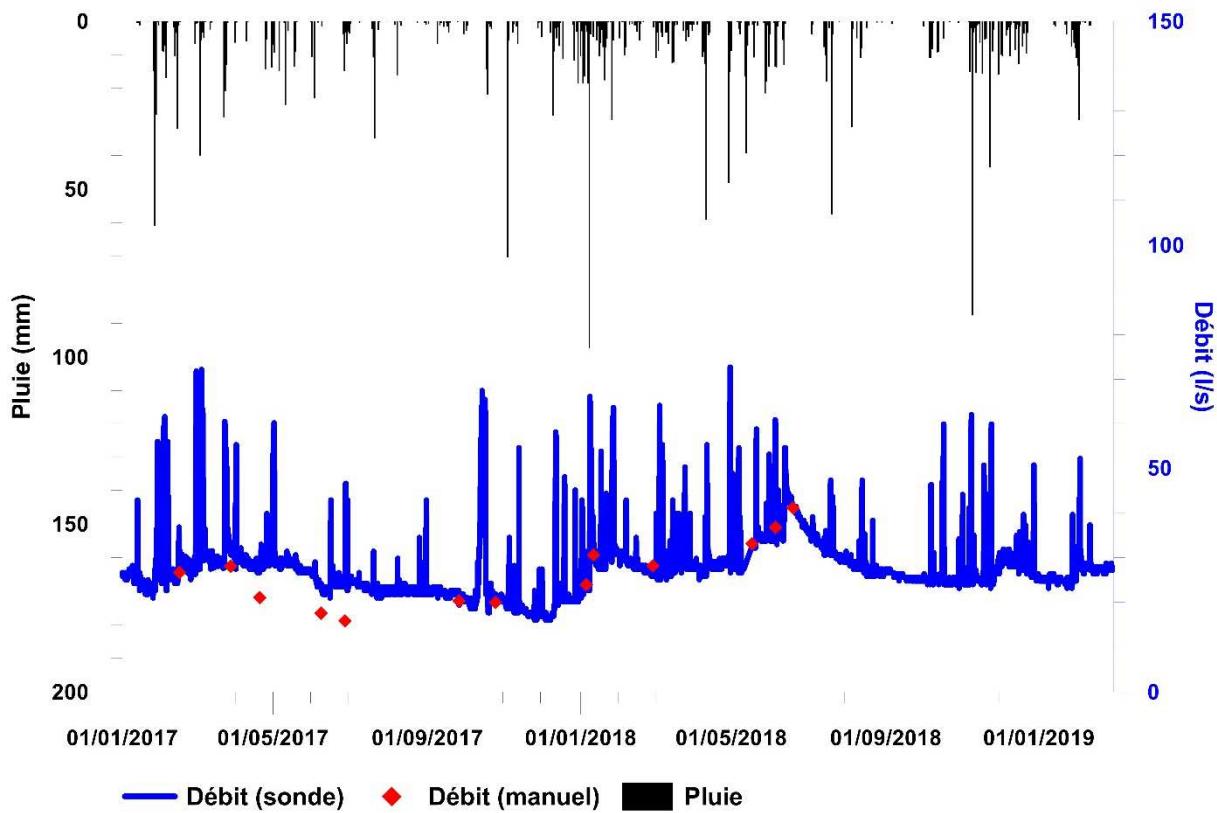


Figure 21. Chronique de débit de la source Prades





Figure 22. Seuil de mesure installé à la source de Triadou

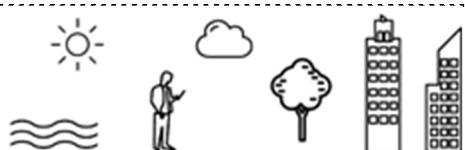
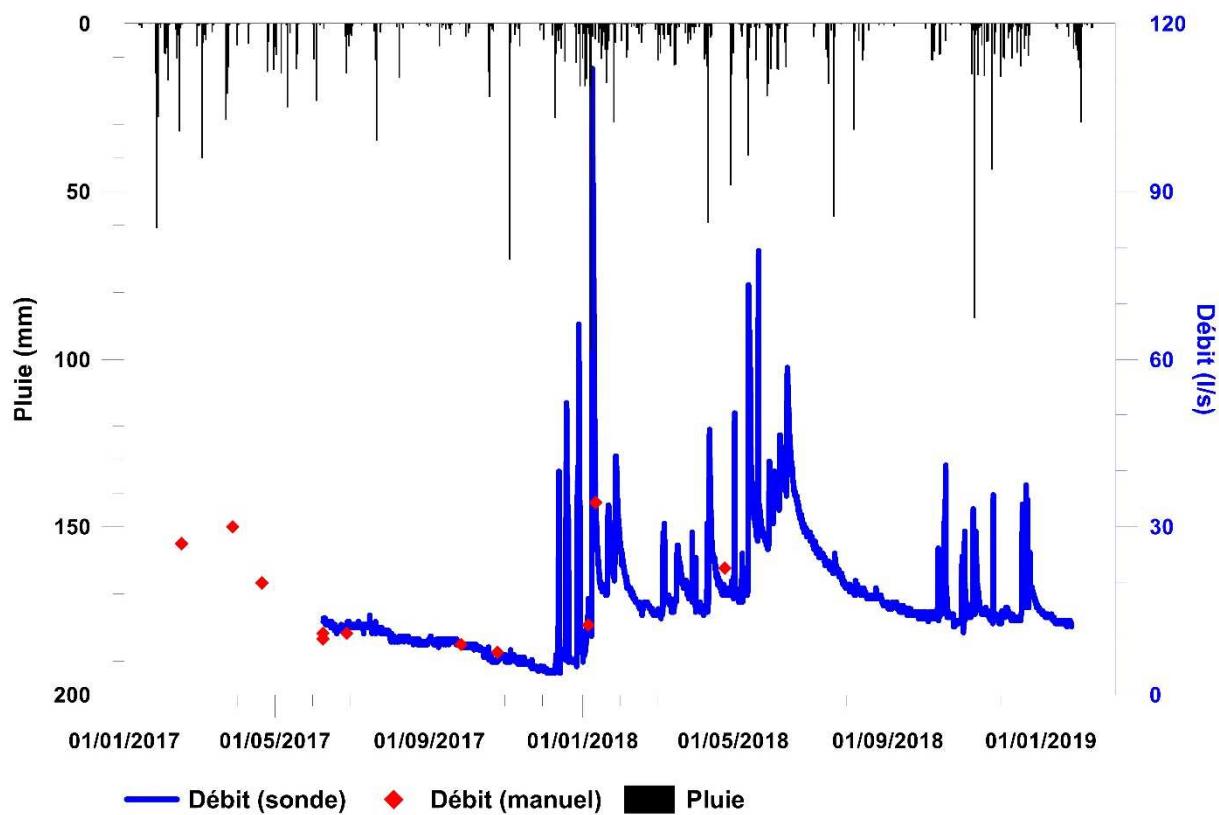




Figure 24. Seuil de mesure et échelle limnométrique installés à la source Sourguettes

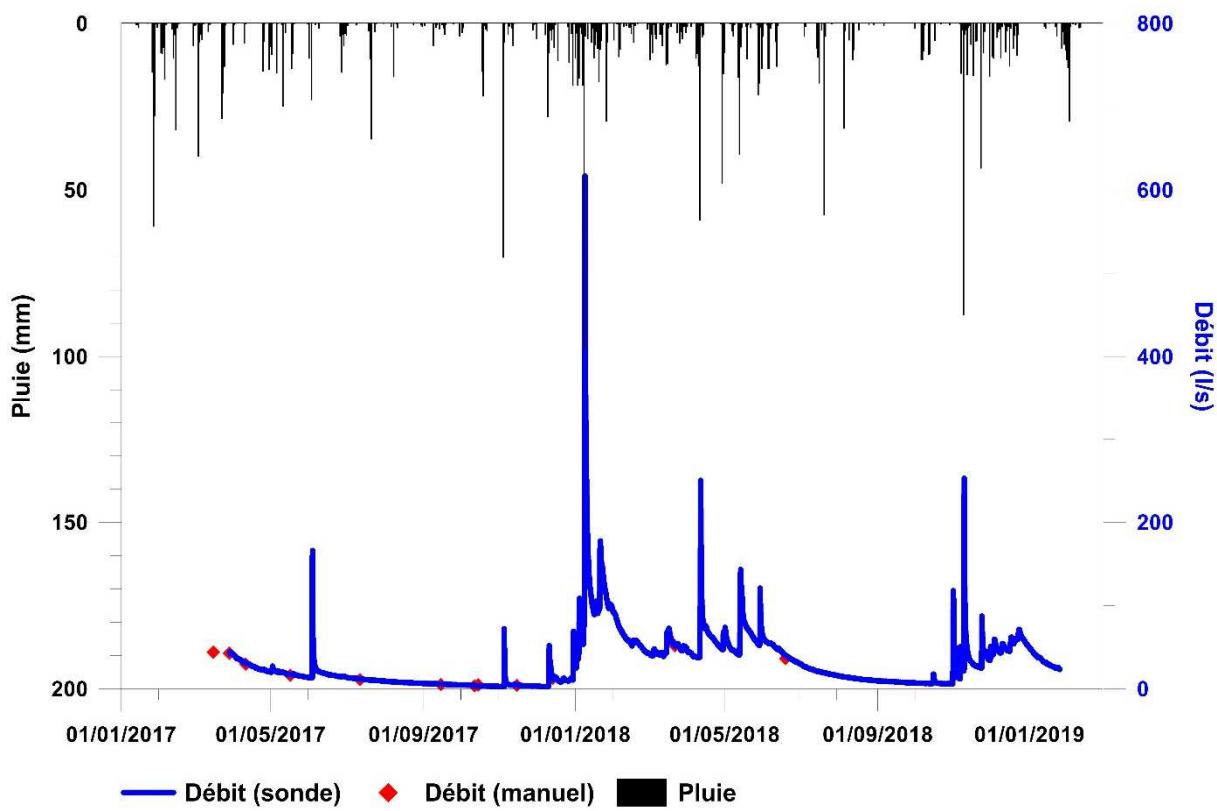


Figure 25. Chronique de débit de la source Sourguettes



Les chroniques de débits permettent mettre en évidence les points suivants :

- 4 stations de mesure ont été influencées, de manière plus ou moins importante, par l'arrivée ponctuelle d'eaux de surface en période de pluie. Il s'agit des stations de Moulinets, de Prades, de Triadou et de Moulin de Corps. Ces apports d'eaux météoriques viennent parasiter le signal de débit enregistré avec la présence de pics de débit artificiels. Les chroniques des sources de Prades et de Moulinets sont particulièrement affectées par ce phénomène. Pour la source de Moulin de Corp, ces apports d'eaux parasites interviennent uniquement à la suite des épisodes pluvieux les plus intenses (janvier, avril et novembre 2018). Pour la source du Moulin de Corps, les valeurs de débit mesurées en période de basses eaux ne sont pas totalement représentatives du système puisqu'il existe plusieurs émergences, avec l'existence possible de sous-écoulements directement dans la Dourbie (non mesurable en continu) ;
- L'année 2017 est caractérisée par une longue période de tarissement qui se déroule entre les mois de juin et de décembre. L'ensemble des systèmes est touché par cet épisode, tout particulièrement pour Biau, Monna, Moulinets et Triadou où l'on observe une lente et longue baisse du débit. Notons par ailleurs que pour les systèmes de Monna et Moulinets, le signal de base (hors perturbations par les pluies) est remarquablement stable en période basses eaux, indiquant un caractère capacatif et un pouvoir régulateur important (Cf. § 3.1.2), à savoir une grande capacité à stocker les précipitations et à les restituer au cours du temps ;
- L'année 2018, et tout particulièrement le premier semestre, est en revanche caractérisé par de nombreux épisodes pluvieux et de forts cumuls (728 mm de janvier à mai à la station de Meyrueis) qui participent à une recharge significative des systèmes. Il est intéressant de noter que la valeur maximale des débits mesurés n'a pas été atteinte au même moment pour toutes les sources alors que les cumuls de pluie les plus importants ont été enregistrés au mois de janvier 2018 (312 mm entre le 27/12/2017 et le 27/01/2018). En effet, pour les sources de Biau, Moulin de Corp, Sourguettes et Triadou ces pics de débits ont été observés au mois de janvier et pour les sources de Monna, Moulinets et Prades au mois de juin à la suite de mois d'avril et de mai particulièrement pluvieux (315 mm à Meyrueis).

Afin de comparer les réactions aux pluies des différentes systèmes aquifères, 2 périodes de hautes eaux ont été ciblées : janvier 2018 et avril-juin 2018. L'évolution des débits au cours de ces périodes est présentée en Figure 26 et Figure 27. Le débit de la source de Moulin de Corp n'a pas été reporté pour faciliter la lecture des graphiques (échelle des valeurs incompatible avec celle des autres sources).

Ces graphiques permettent d'observer que les hausses de débit ne sont pas toutes concomitantes pour un même événement pluvieux. Ceci s'explique d'une part, par la différence de fonctionnement hydrodynamique d'un système à l'autre, tout particulièrement



vis-à-vis des modalités d'infiltration sur le bassin d'alimentation et d'autre part, par le fait que les pluies ne sont pas réparties de la même manière à l'échelle des 300 km² que couvre le causse Noir. Seul l'épisode pluvieux majeur de fin janvier (près de 100 mm le 8 janvier) engendre une hausse du débit quasi simultanée sur l'ensemble des sources.

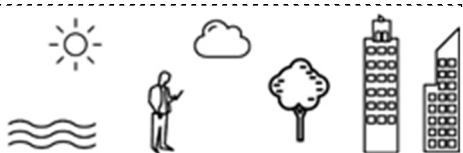
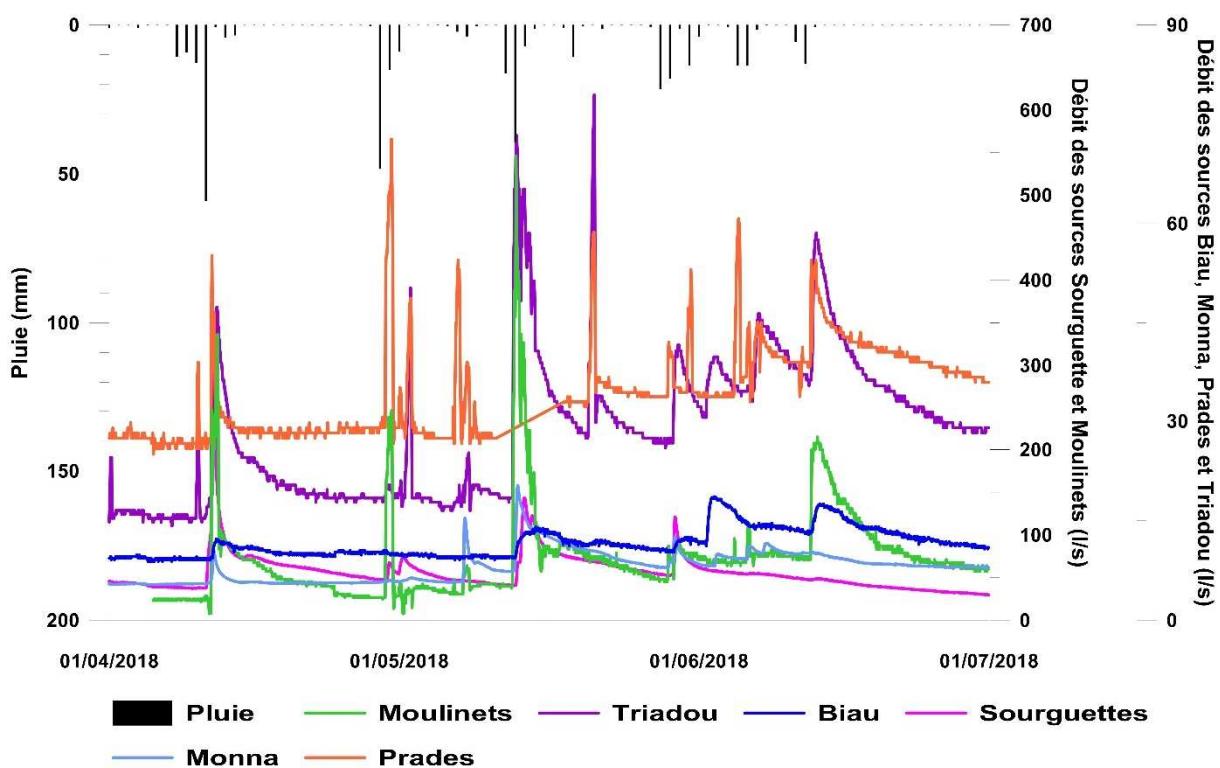
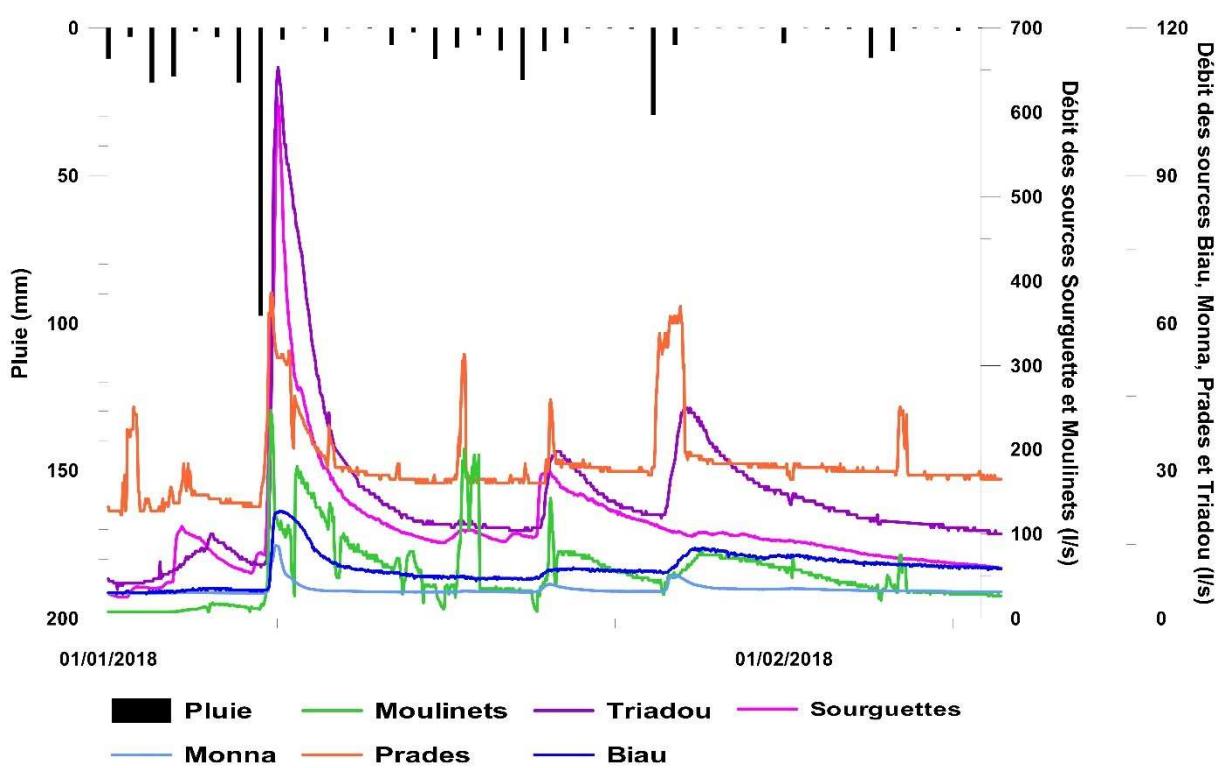
En outre, il est intéressant de noter que certains systèmes ne réagissent pas aux pluies les plus faibles (< 10 mm), comme Monna, Triadou et Biau. Notons que certaines variations de débit enregistrées à la source de Prades sont biaisées par l'arrivée d'eaux parasites, la forme atypique des pics de crue en est une preuve (hausse et baisse très rapides).

Le système de Monna présente un comportement hydrodynamique singulier caractérisé par des phases de décrue courtes en comparaison des autres systèmes, y compris ceux de taille équivalente (Cf. Tableau 8). Les réponses des systèmes de Biau et Triadou sont comparables mais dans une moindre mesure.

Concernant la source de Moulin de Corps, non figurée sur les graphes, elle montre des réactions rapides et significatives à l'ensemble des évènements pluvieux (y compris pour les faibles cumuls pluviométriques), ce qui indique un système fonctionnel dont le drainage est bien organisé. Le caractère binaire de son alimentation *via* les pertes du Trévezel (Cf. § 4) est également une des raisons de ce fonctionnement.

Ainsi, ces chroniques de débit en période pluvieuse sont caractéristiques de systèmes karstiques classiques connus par ailleurs, à l'exception de la source de Monna qui possède un fonctionnement hydrodynamique se démarquant des autres systèmes.





2.2.3 Indice de variabilité des débits

L'indice de variabilité des débits, rapport Q_{\max}/Q_{\min} , a été calculé pour les sept sources de catégorie 1 qui ont fait l'objet d'un suivi en continu. Dans le cas d'un aquifère karstique fonctionnel cette valeur est généralement supérieure à 50 (voire 100).

La valeur calculée, sur deux cycles hydrologiques dans le cas présent, donne une idée sur le fonctionnement des systèmes karstiques étudiés et tout particulièrement leur caractère plus ou moins fonctionnel.

Précisons que les indices calculés sont liés à la taille du bassin d'alimentation. Les surfaces des bassins d'alimentation supposés de chaque système ont donc été ajoutées dans le tableau. On remarque que les surfaces des systèmes sont du même ordre de grandeur, hormis celle du système de Moulin de Corp qui beaucoup plus étendue. L'interprétation et la comparaison des indices paraissent donc pertinentes dans le cas traité.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

Sources	Q_{\min} m^3/s	Q_{\max} m^3/s	Q_{moy} m^3/s	Indice variabilité	Taille du bassin d'alimentation (km^2)
Biau	0,005	0,022	0,008	5	1,07
Monna	0,005	0,020	0,006	4	1,09
Moulin de Corp	0,033	4,566	0,412	138	102,80
Moulinets	0,008	0,548	0,027	72	2,56
Sourguettes	0,003	0,617	0,031	225	-*
Prades	0,016	0,073	0,028	4	5,36
Triadou	0,004	0,112	0,017	28	4,52

* Non défini

Tableau 10. Valeurs minimales, maximales et moyennes de débits et indice de variabilité de 7 sources de catégorie 1 suivies en continu

Les systèmes étudiés peuvent se classer en 2 catégories distinctes :

- Caractérisés par des indices inférieurs à 30 : sources de Biau, de Prades, de Triadou et de Monna. Ces systèmes sont les moins fonctionnels d'un point de vue hydrodynamique karstique. Triadou se démarque cependant des 3 autres avec un indice de variabilité 5 à 6 fois supérieur, ce qui est significatif tout particulièrement en comparaison de celui de Prades qui présente un bassin d'alimentation avec une superficie comparable ;



- Caractérisés par des indices supérieurs à 70 : Moulinets, Moulin de Corp et Sourquettes. Hormis Moulinets dont il faut probablement nuancer le résultat compte tenu des arrivées d'eau de surface (Cf. ci-avant), les systèmes de Moulin de Corp et de Sourquettes présentent des indices de variabilité caractéristiques d'aquifères karstiques bien développés d'un point de vue fonctionnel (drainage, infiltration). Rappelons que ces deux systèmes sont en lien hydraulique indirect avec les eaux superficielles (pertes du Trévezel dans le cas de Moulin de Corp et de la Dourbie pour Sourquettes).

Ces résultats confortent les conclusions issues de l'analyse des chroniques de débit. Les systèmes de Biau, Monna et Prades ont un fonctionnement distinct de celui de Moulin de Corp et des Moulinets, voire de Triadou qui sont les systèmes karstiques les plus fonctionnels.

Il convient de noter que ces indices de variabilité sont en partie influencés par les biais de mesure liés aux systèmes de mesure mis en place (arrivées d'eau météoriques, débit non pris en compte dans sa totalité, etc.). Il donne cependant une image globale du fonctionnement hydrodynamique des systèmes.

2.3 Débits des cours d'eau

Dans le cadre de cette étude, des mesures de débit par jaugeage (méthode ADCP) ont été réalisées par les techniciens du PNRGC sur les rivières du Tarn, de la Jonte et de la Dourbie entre le mois de mars 2017 et le mois de juillet 2018. Ces mesures complètent des données existantes (2010, 2011 et 2013) et ont pour objectifs d'identifier d'éventuelles anomalies, positives ou négatives, et mettre en évidence des apports (sources émergent dans le lit des cours d'eau) ou des pertes non encore recensés.

2.3.1 Le Tarn

Le débit du Tarn a été mesuré par les techniciens du PNRGC en février 2011, septembre 2013 et en septembre et octobre 2017. Les différentes valeurs obtenues sont reportées dans le Tableau 11, le Tableau 12, le Tableau 13 et le Tableau 14 et graphiquement en Figure 28, Figure 29, Figure 30 et en Figure 31.



Date	Localisation	Débit du Tarn (m ³ /s)	Apports par les sources karstiques entre deux profils (m ³ /s)
09/02/2011	Aval le Rozier	12,47	0,00
09/02/2011	Camping Peyrelade (aval Jonte)	12,82	0,35
09/02/2011	Pont de la Cresse	12,83	0,01
09/02/2011	Amont Aguessac	14,11	1,28
09/02/2011	Amont Carbassas	14,59	0,48
09/02/2011	Aval Carbassas	14,18	-0,41
09/02/2011	Camping Millau Plage	14,20	0,02
09/02/2011	Camping les 2 rivières (amont Dourbie)	14,30	0,10

Tableau 11. Débits mesurés après jaugeage par ADCP du Tarn en février 2011

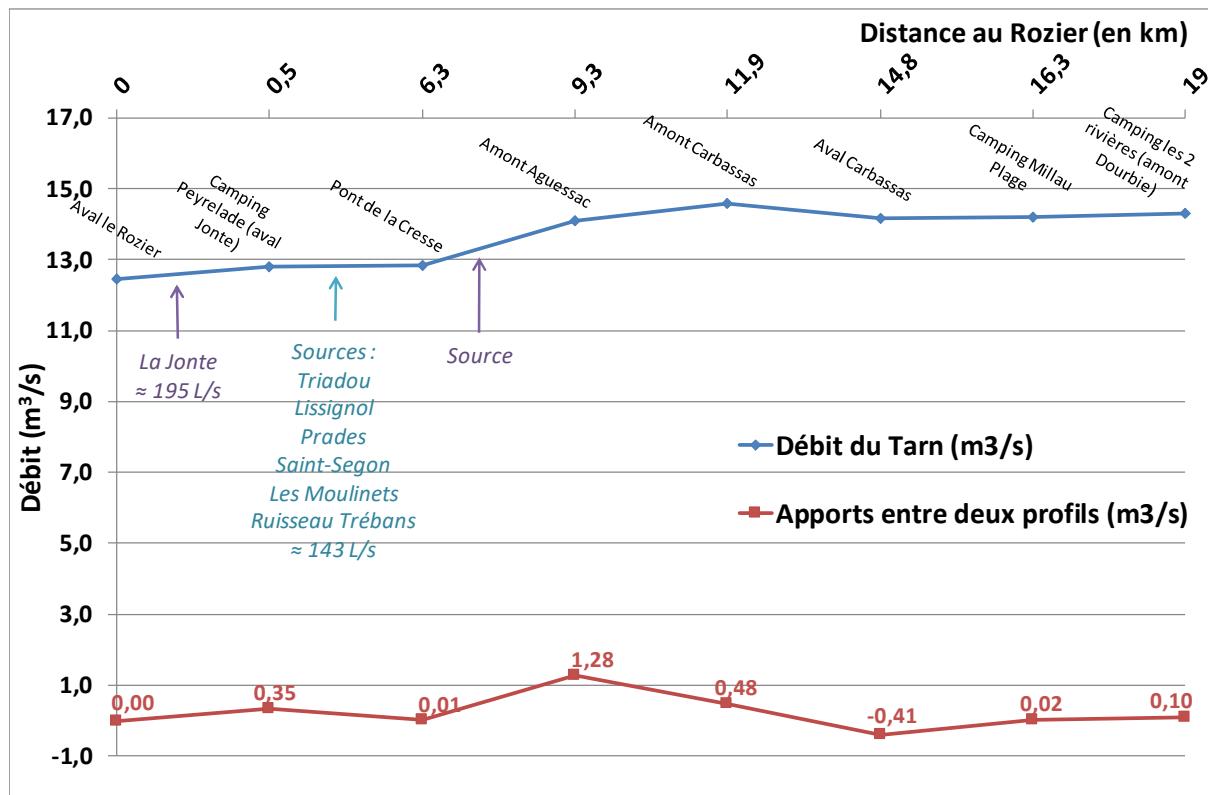


Figure 28. Représentation du débit et des apports en eau du Tarn en février 2011



Les mesures de 2011 donnent 2 informations notables :

- une augmentation significative du débit entre les points « Pont de la Cresse » et « Amont Aguessac », $+1,28 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une augmentation de 10 %. Cet apport, mesuré en période de hautes eaux (février), ne correspond pas à des arrivées d'eaux de surface, aucun cours d'eau pérenne n'est répertorié entre ces deux points. Cette augmentation de débit est donc liée à un apport d'eaux souterraines qui peut correspondre soit, à une alimentation du Tarn par la nappe alluviale (mais extension réduite dans ce secteur), soit à l'existence d'une ou plusieurs sources. Aucune source majeure (plusieurs centaines de litres par seconde) n'est répertoriée dans ce secteur. La réalisation d'un profil de l'évolution des paramètres physico-chimiques dans le Tarn sur ce tronçon permettrait d'identifier d'éventuelles venues d'eau (non réalisé à ce jour de manière continu) ;
- une baisse du débit de $0,41 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx 3\%$) entre les points et « Amont Aguessac » et « Aval Carbassas » qui pourrait s'expliquer par des pertes dans les alluvions du Tarn.

Date	Localisation	Débit du Tarn (m^3/s)	Apports par les sources karstiques entre deux profils (m^3/s)
25/09/2013	Quézac	0,99	0,00
25/09/2013	Amont perte Tarn	1,18	0,18
25/09/2013	Aval perte Tarn	0,49	- 0,69
25/09/2013	Restitution perte	1,23	0,74
25/09/2013	Sainte-Enimie	1,87	0,64
25/09/2013	Amont Ardennes	2,21	0,34
25/09/2013	Aval Ardennes	3,21	1,00
25/09/2013	Amont Pas de Soucy	3,62	0,41
25/09/2013	Aval Pas de Soucy	4,53	0,91
26/09/2013	Amont Ironselle	4,74	0,21
26/09/2013	Aval Ironselle	4,85	0,11
26/09/2013	Amont Sablière	5,02	0,17
26/09/2013	Rozier	5,31	0,29

Tableau 12. Débits mesurés après jaugeage par ADCP du Tarn en septembre 2013

En comparaison des mesures réalisées en 2011, celles de 2013 se sont focalisées sur une partie bien plus en amont du Tarn, entre Quézac et Le Rozier, hors cadre géographique du Causse Noir. L'apport majeur de cette campagne de mesure est la mise en évidence d'une zone de



perte majeure (près de 700 l/s) au niveau d'un tronçon qui voit affleurer les calcaires et dolomies karstifiés du Bajocien inférieur.

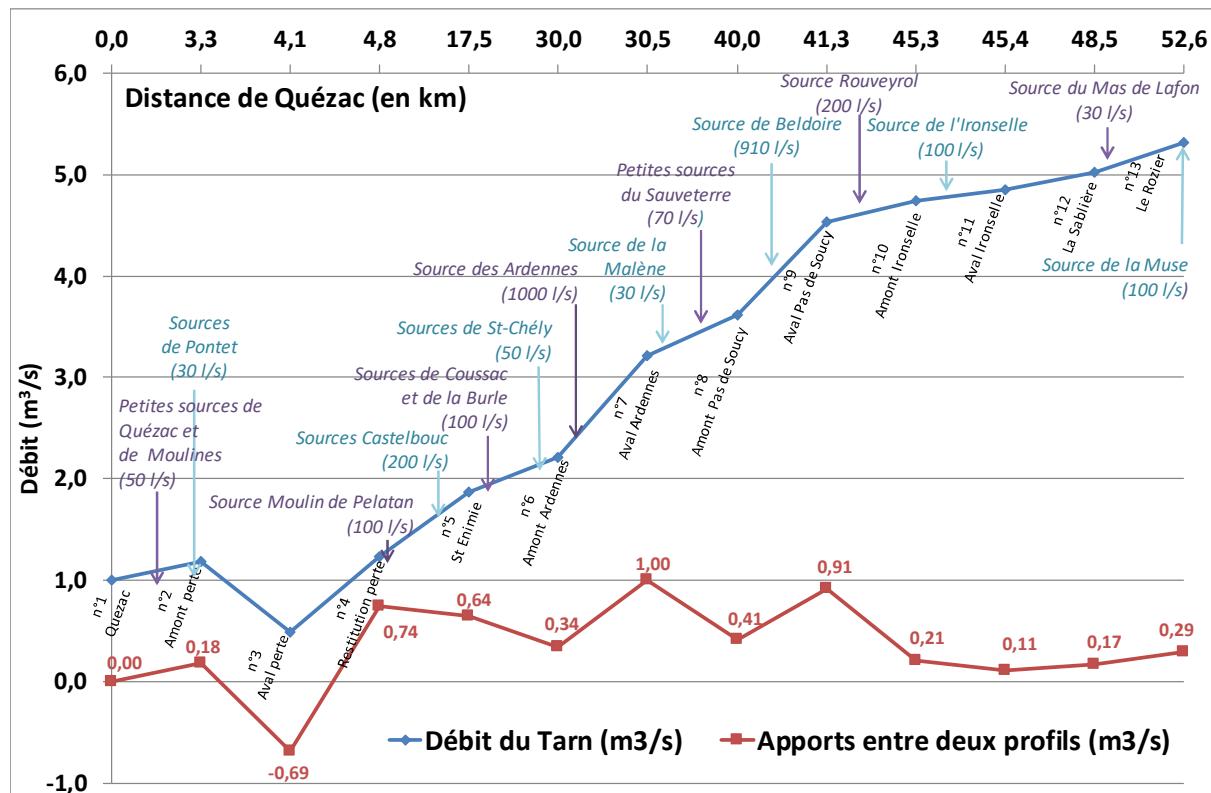


Figure 29. Représentation du débit et des apports en eau du Tarn en septembre 2013

En 2017, dans le cadre de l'étude du Causse Noir, les mesures se sont à nouveau déroulées entre le Rozier et Millau (Cf. Tableau 13 et Tableau 14). Contrairement à 2011, la période de mesure (septembre et octobre) correspond à des basses eaux, le débit global du Tarn a ainsi largement diminué (de 13,7 à 4,8 m³/s en moyenne).

On peut observer au mois de septembre les mêmes phénomènes qu'en 2011, à savoir une augmentation du débit du Tarn entre les points de « Pont de la Cresse » et « Amont Aguessac » de 360 l/s (soit + 7%) et une baisse significative du débit de 440 l/s entre Carbassas et Millau (soit - 9%). Ces résultats confortent donc les conclusions réalisées à partir des mesures de février 2011 et qu'il serait intéressant d'effectuer un profil en long des paramètres physico-chimiques dans le Tarn entre « Pont de la Cresse » et « Amont Aguessac » pour identifier les apports.



Au mois d'octobre, les mesures ont été effectuées plus à l'aval sur le tronçon « Amont Aguessac » / « Aval île de Carbassas » afin de préciser la localisation de la zone de perte. 2 zones de pertes principales se distinguent :

- entre les points « Le Mas de Compeyre » et « La Barque » (en amont de la confluence du ruisseau du Lumensonques), - 220 l/s (soit - 4,6 %) ;
- entre les points « Stade de foot d'Aguessac » et « Amont île de Carbassas », - 260 l/s (soit -5,3 %). Sur ce tronçon, il convient de noter la présence d'un forage en nappe alluviale utilisé pour l'alimentation en eau potable.

Date	Localisation	Débit du Tarn (m ³ /s)	Apports par les sources karstiques entre deux profils (m ³ /s)
07/09/2017	Pont de Rozier	4,283	0,00
07/09/2017	Aval Jonte	4,478	0,19
07/09/2017	Saint-Hilarin	4,621	0,14
07/09/2017	Pont de la Cresse	4,916	0,30
07/09/2017	Amont Aguessac	5,277	0,36
07/09/2017	Carbassas aval île	5,071	-0,21
07/09/2017	Aval Carbassas	5,066	-0,01
07/09/2017	Millau	4,835	-0,23

Tableau 13. Débits mesurés après jaugeage par ADCP du Tarn en septembre 2017



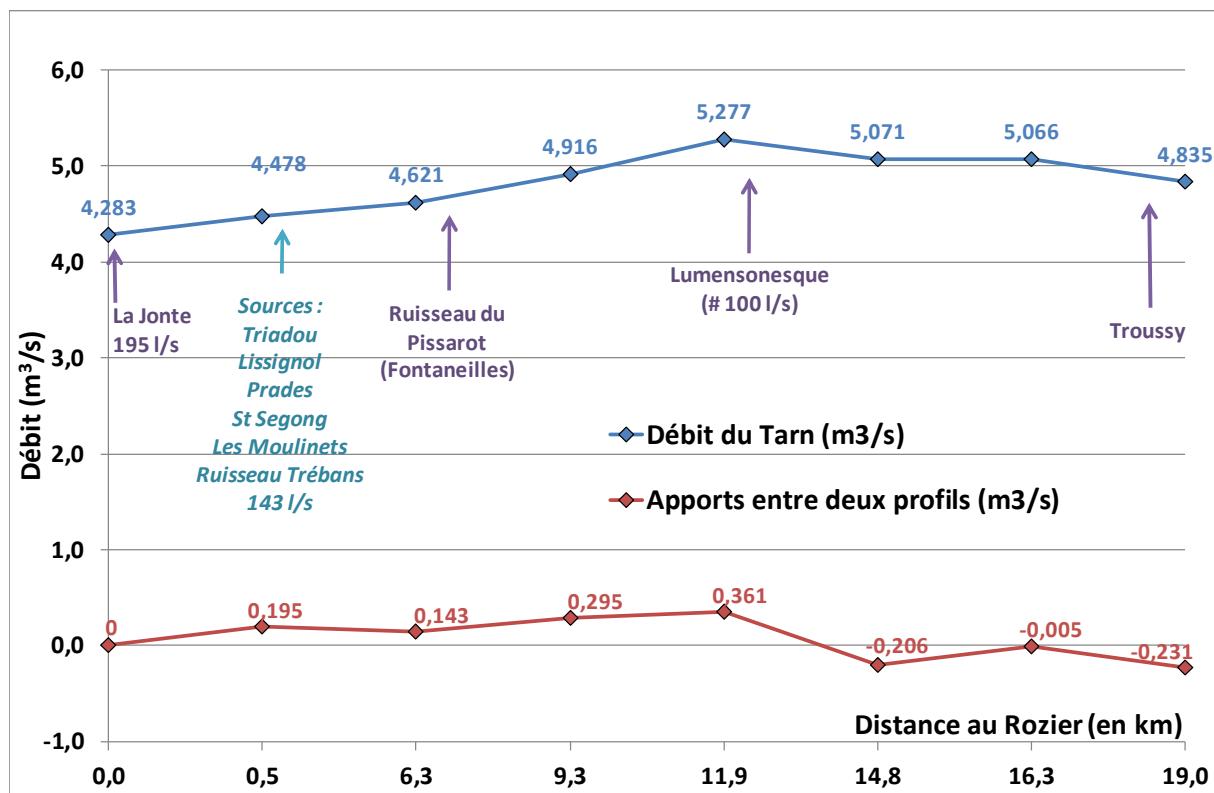


Figure 30. Représentation du débit et des apports en eau du Tarn en septembre 2017

Date	Localisation	Débit du Tarn (m^3/s)	Apports par les sources karstiques entre deux profils (m^3/s)
05/10/2017	Plage de Daniel	4,80	0,00
05/10/2017	Le Mas de Compeyre	4,77	-0,03
05/10/2017	La Barque amont Lumenesquesque	4,55	-0,22
05/10/2017	Aval Lumenesquesque	4,82	0,27
05/10/2017	Stade de foot Aguessac	4,92	0,10
05/10/2017	Amont île de Carbassas	4,66	-0,26
05/10/2017	Aval île de Carbassas	4,73	0,07

Tableau 14. Débits mesurés après jaugeage par ADCP du Tarn en octobre 2017



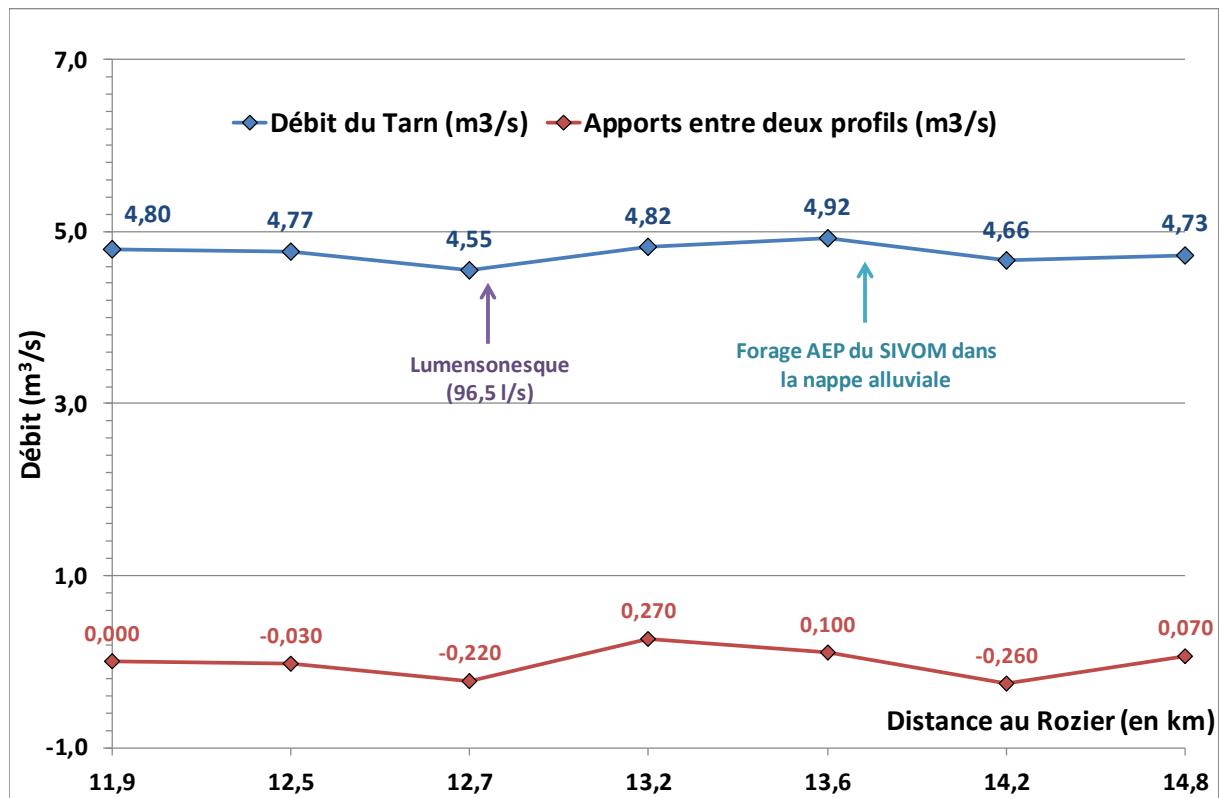


Figure 31. Evolution du débit et des apports en eau du Tarn en octobre 2017



2.3.2 La Jonte

Le même type de mesure avec le même matériel a été réalisée sur la rivière de la Jonte en septembre 2013 et septembre 2017, soit en période de basses eaux.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 15 et le Tableau 16. Notons qu'au mois de septembre 2013, la dernière mesure au niveau du Rozier n'a pas été réalisée de manière concomitante aux deux premières (23 jours après), il n'est donc pas pertinent d'interpréter ces valeurs.

Date	Localisation	Débit de la Jonte (m ³ /s)	Apports par les sources karstiques entre deux profils (m ³ /s)
03/09/2013	Meyrueis	0,180	0,00
03/09/2013	Pont des Douzes	0,374	0,194
26/09/2013	Le Rozier	0,677	0,303

Tableau 15. Données obtenues après jaugeage par ADCP de la Jonte en septembre 2013

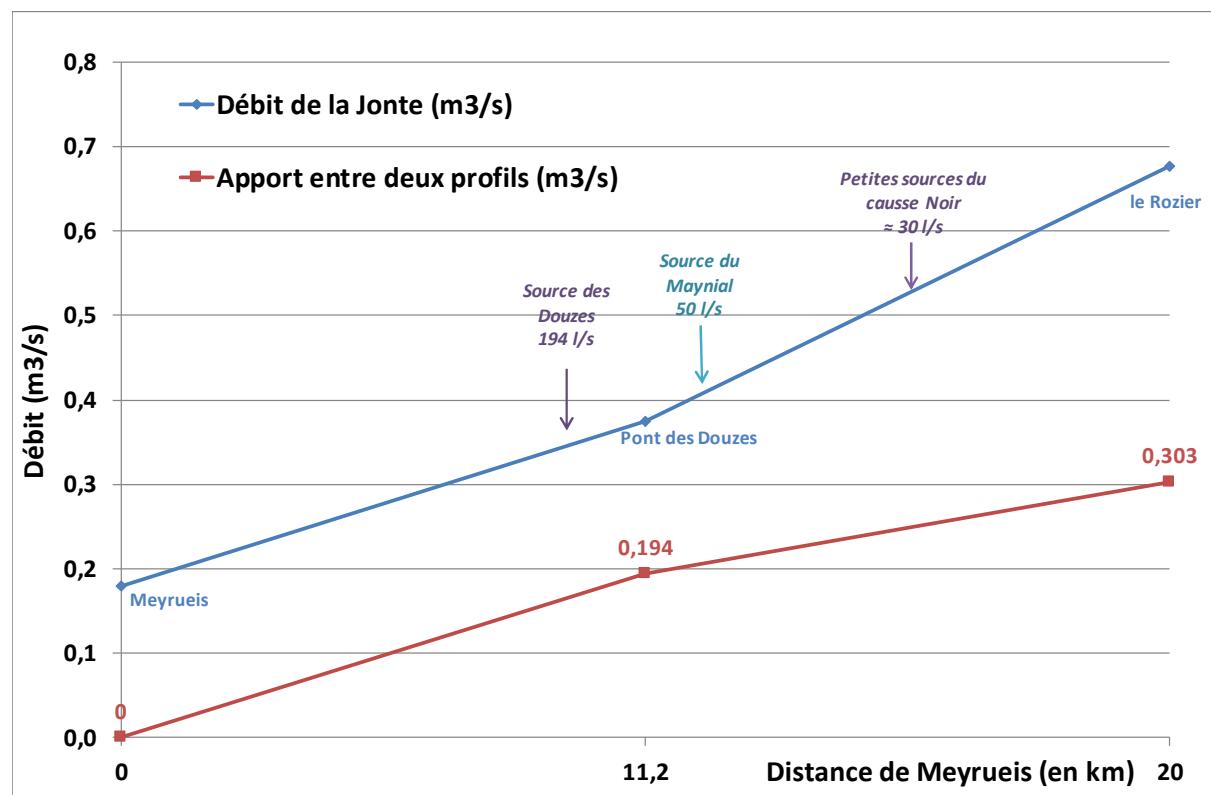


Figure 32. Evolution du débit et des apports en eau de la Jonte en septembre 2013



En 2017, les mesures ont bien été effectuées le même jour. Elles montrent une augmentation du débit entre Meyrueis et Le Rozier en cohérence avec les apports des nombreuses sources qui s'y écoulent. Ces mesures ne permettent pas en revanche de mettre en évidence le caractère en partie souterrain, connu des spéléologues, des écoulements de la Jonte (système de perte et de résurgences le long de son tracé).

Date	Localisation	Débit de la Jonte (m ³ /s)	Apports par les sources karstiques entre deux profils (m ³ /s)
28/09/2017	Meyrueis	0,096	0,00
28/09/2017	Les Douzes	0,185	0,089
28/09/2017	Biau	0,348	0,163
28/09/2017	Le Rozier	0,415	0,067

Tableau 16. Données obtenues après jaugeage par ADCP de la Jonte en septembre 2017

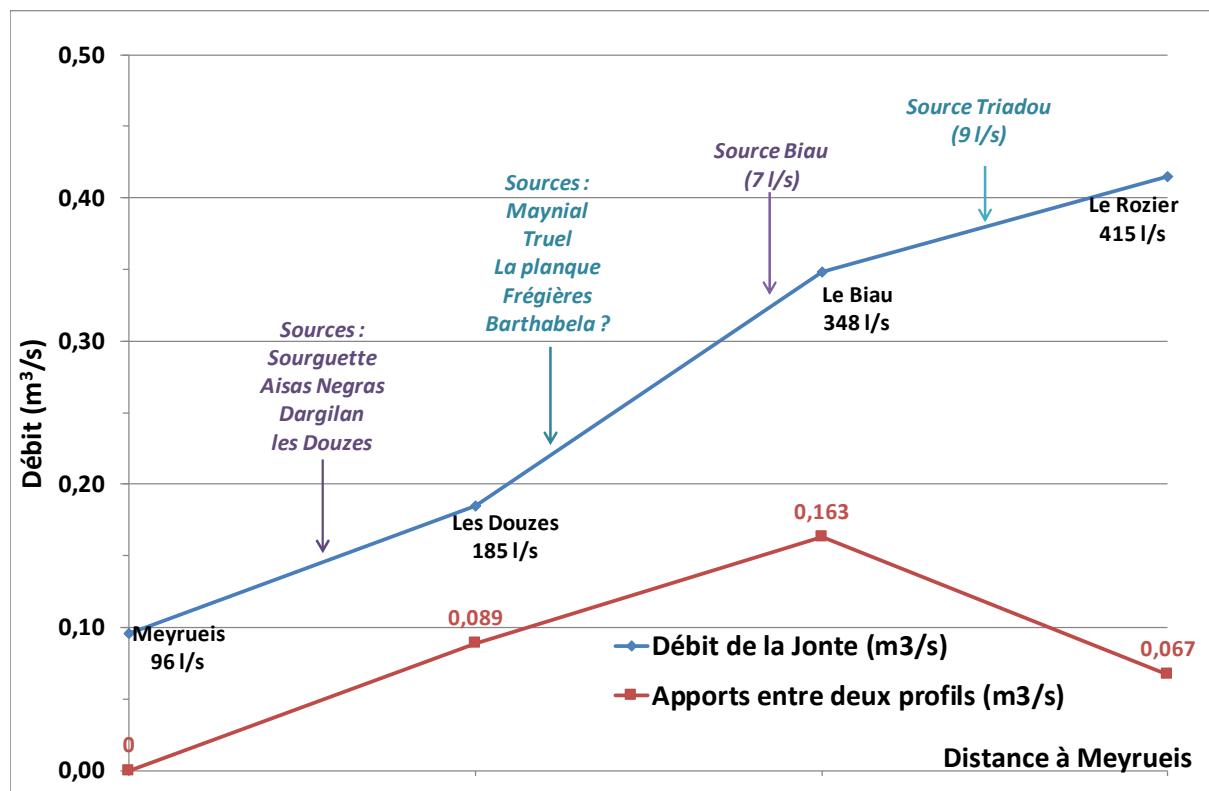


Figure 33. Evolution du débit et des apports en eau de la Jonte en septembre 2017



2.3.3 La Dourbie

Enfin, des mesures de jaugeages ont été réalisés sur la Dourbie de manière régulière entre les mois de mars 2017 et le mois de juillet 2018 (15 mesures au total) au niveau de 6 points de mesure situés, d'amont en aval, entre Nant et l'aval de la source de Moulin de Corp.

Ces points de mesure ont été répartis de manière à mesurer le débit de la Dourbie en amont et aval des 3 principales sources : Jouques Merles, Fournets et Moulin de Corp (d'amont en aval). Cette méthodologie a permis de calculer par différence des points de mesure amont/aval le débit de chacune des sources (Cf. Tableau 18). Ces 3 sources présentent les débits les plus élevées du Causse Noir, elles drainent la plus grande partie de sa surface.

Les mesures montrent que quelle que soit la période hydrologique (basses ou hautes eaux), le débit de la Dourbie augmente de manière régulière d'amont (Nant) en aval (aval de Moulin de Corp) en cohérence avec les apports des différentes sources connues qui y émergent. Aucune zone de perte n'a été mise en évidence sur ce tronçon du cours d'eau.

Débit (m ³ /s)	Dourbie (Nant amont)	Trévezel amont	Jouque Merles amont	Jouque Merles aval/Fournets amont	Fournets aval/Moulin de Corp amont	Moulin de Corp aval
Date						
23/03/2017	-	-	6,452	9,13	-	-
04/04/2017	-	-	-	10,51	10,67	12,53
25/04/2017	1,24	-	3,55	4,81	5,08	5,90
23/05/2017	-	-	-	6,08	6,83	7,01
04/07/2017	0,26	0,31	1,87	2,47	2,90	2,93
21/07/2017	-	-	1,25	1,83	-	-
24/07/2017	-	-	1,49	1,87	-	-
21/09/2017	0,17	-	1,06	1,46	1,70	1,75
20/10/2017	1,38	-	2,86	3,77	4,08	4,14
21/11/2017	1,00	-	1,93	2,63	2,97	3,01
19/12/2017	1,86	-	3,15	4,66	5,30	5,96
09/02/2018	-	-	9,37	12,92	-	-
26/04/2018	4,59	-	9,56	12,60	13,30	14,40
29/06/2018	-	-	4,07	5,64	6,46	6,73
05/07/2018	-	0,36	3,43	4,54	5,56	5,62

Tableau 17. Débits mesurés d'amont en aval sur la Dourbie entre avril 2017 et juillet 2018



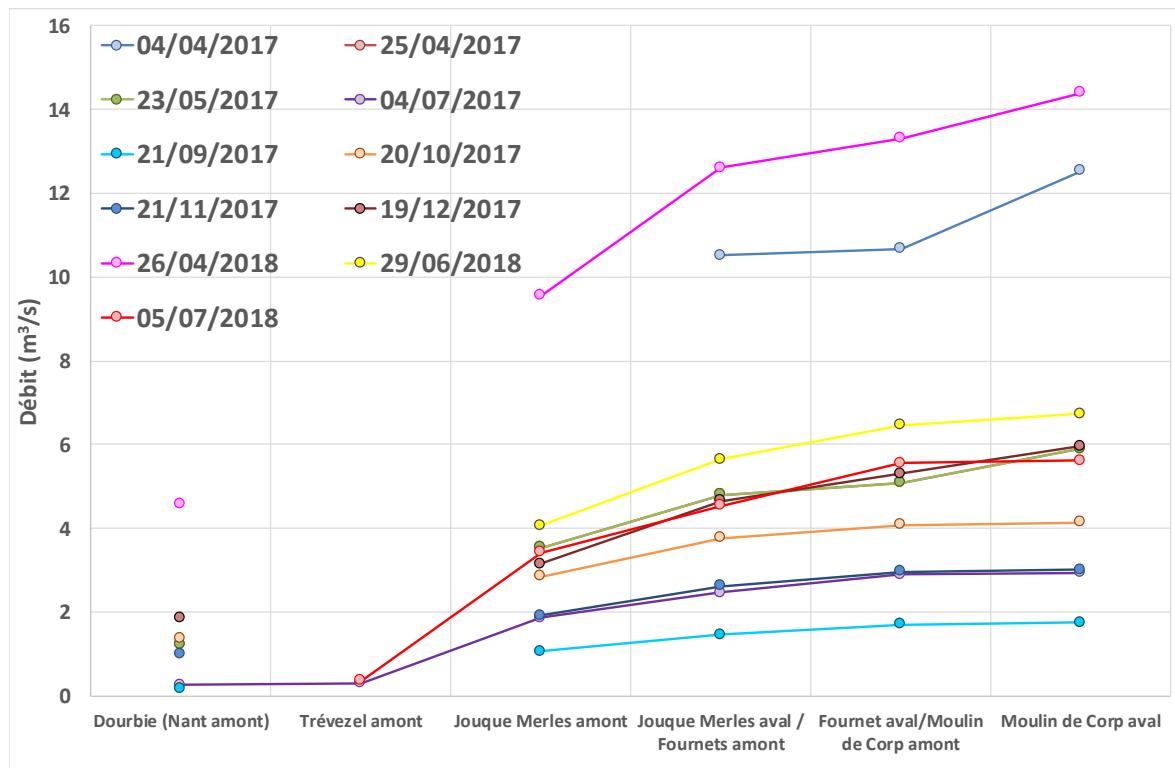


Figure 34. Evolution du débit de la Dourbie d'amont en aval entre le mois d'avril 2017 et le mois de juillet 2018

Date	Débit (m³/s)		
	Jouque Merles	Fournets	Moulin de Corp
23/03/2017	2,68	-	-
04/04/2017	-	0,16	1,86
25/04/2017	1,26	0,28	0,82
23/05/2017	-	0,75	0,18
04/07/2017	0,61	0,43	0,03
21/07/2017	0,58	-	-
24/07/2017	0,39	-	-
21/09/2017	0,40	0,24	0,05
20/10/2017	0,91	0,31	0,06
21/11/2017	0,70	0,35	0,04
19/12/2017	1,51	0,64	0,66
09/02/2018	3,55	-	-
26/04/2018	3,04	0,70	1,10
29/06/2018	1,57	0,82	0,27
05/07/2018	1,11	1,02	0,06
Moyenne	1,41	0,52	0,47

Tableau 18. Débit des sources de Jouque Merles, Fournets et Moulin de Corp entre mars 2017 et juillet 2018



2.4 Traitement statistique des séries de débits

2.4.1 Etude des courbes de récession

L'analyse des courbes de récession s'est portée sur les valeurs moyennes journalières de débit pour chacune des sources (pour rappel, la chronique de la source Moulinets a été scindée en 2, Moulinets 1 pour l'année 2017 et Moulinets 2 pour l'année 2018). Les périodes suivantes ont été prises en compte :

- Biau : du 13/06/2018 au 15/12/2018 ;
- Monna : du 08/06/2018 au 28/02/2019 ;
- Moulinets 1 : du 26/03/2017 au 09/12/2017 ;
- Moulinets 2 : du 13/06/2018 au 31/01/2018 ;
- Prade : du 13/06/2018 au 24/10/2018 ;
- Sourguettes : du 29/05/2018 au 30/10/2018 ;
- Moulin de Corp : pas de chronique suffisamment longue et continue.

Ces périodes ont été retenues en raison de leur durée (la plus longue possible) et de la qualité des données disponibles (chronique continue, pas de lacune) pour qu'elles soient les plus représentatives du fonctionnement des systèmes aquifères étudiés.

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Sources	Loi d'infiltration			Tarissemant		Volume dynamique (m ³)	V _{total} (m ³)	Coefficients de Mangin	
	q ₀	η (j-1)	ε (j-1)	Q ₀	α (j-1)			k (Vd/Vt)	I
Biau	9,166	0,013	0,082	6,891	0,0020	297 687	274 363	1,085	0,83
Monna	4,615	0,008	0,053	5,944	0,0004	1 283 947	204 984	6,264	0,88
Moulinets 1	65,706	0,007	0,100	8,568	0,0001	7 402 925	495 115	14,952	0,82
Moulinets 2	154,570	0,007	0,146	13,085	0,0020	565 272	1 087 992	0,519	0,76
Prades	15,836	0,063	0,063	27,280	0,0020	1 178 496	898 776	1,311	0,86
Sourguettes	55,447	0,047	0,047	9,659	0,0080	104 323	1 198 368	0,087	0,90
Triadou	24,591	0,017	0,121	19,118	0,0050	330 359	602 338	0,548	0,79

Tableau 19. Résultats de l'analyse des courbes de récession

Les coefficients de tarissement (α) sont extrêmement faibles ($< 0,0005$) pour les systèmes de Monna et Moulinets 1 (caractérisant le comportement de l'aquifère pour l'année 2017). Comme observé précédemment, le système de Monna présente un signal de base très



homogène et se vidange lentement. L'aquifère de Moulinets s'est comporté de manière comparable au cours de l'année 2017, qui a été peu pluvieuse.

On retrouve suite les systèmes de Biau, Prades et Moulinets (caractérisant le comportement de l'aquifère pour l'année 2018) avec des valeurs de coefficient plus élevés (0,0020) et enfin, les systèmes de Triadou ($\alpha = 0,0050$) et Sourguettes ($\alpha = 0,0080$) dont les cycles de recharge puis de vidange se déroulent plus rapidement. Ceci met en évidence des systèmes plus fonctionnels que celui de Monna.

Les coefficients d'hétérogénéité (ϵ) sont faibles pour l'ensemble des systèmes mais leur ordre de grandeur est proche ($0,047 < \epsilon < 0,126$). Ces valeurs indiquent que l'infiltration est majoritairement indirecte et diffuse (pas ou peu de points d'infiltration préférentielle) avec l'existence de formations superficielles (grésou ou argiles à chailles) ou d'un épikarst dans certains cas, qui ralentissent cette infiltration.

Il convient en outre de noter que pour un même système aquifère, Moulinets, selon une sollicitation extérieure du système aquifère différente (cumul pluviométrique), le fonctionnement du système peut évoluer de manière significative. Ceci est une conclusion particulièrement intéressante car elle démontre l'importance d'un suivi des débits sur au minimum 2 cycles hydrologiques, bien distincts d'un point de vue des cumuls pluviométriques, pour pouvoir caractériser au mieux le comportement hydrodynamique d'un système. Cette observation est notamment importante dans le cas de la réalisation de traçages artificiels colorés dont la réussite et l'interprétation dépendent de la connaissance du fonctionnement hydrodynamique du système tracé.

Enfin, les coefficients de Mangin calculés ont été reportées sur le graphique de classification des systèmes selon le travail de Mangin (1975), actualisé par El Hakim et Bakalowicz en 2007 (ajout d'un 5^{ème} domaine). Ce graphe est présenté en Figure 35.

La représentation graphique des paramètres de Mangin permet d'observer que les sources étudiées font partie de deux domaines différents : le n°1 et le n°5. Ce qui est intéressant de noter que c'est que pour l'ensemble des systèmes du Causse Noir étudiés les valeurs de I sont proches de 1. Seule la valeur de k, c'est-à-dire du pouvoir de régulation traduisant l'aptitude du système à stocker les précipitations et à les restituer au cours du temps, présente une variabilité significative selon les systèmes étudiés. Par exemple, le système de Sourguette possède un faible pouvoir de régulation, cohérent avec un fonctionnement karstique bien développé et fonctionnel.

On peut à nouveau noter que pour le système de Moulinets, les résultats diffèrent de manière importante selon la chronique de données choisie (2017 et 2018). En 2018, le système des Moulinets se rapproche plus de celui des Sourguettes, bien fonctionnel, alors qu'en 2017, en période « sèche », il est comparable à système plus inertiel comme celui de Monna.



Vis-à-vis du paramètre **I**, les résultats confirment que l'ensemble des systèmes étudiés ici (hors Moulin de Corp) présente un retard à l'infiltration élevé qui s'explique dans la plupart des cas par la présence de formations de recouvrement, cartographiées en détail dans le cadre de l'étude géomorphologique (lot 2). Ces formations selon leur nature vont jouer un rôle particulier vis-à-vis des modalités d'infiltration des eaux météoriques. Le fonctionnement hydrodynamique karstique des systèmes aquifères du Causse Noir paraît particulièrement affecté par la variabilité des modes d'infiltration.

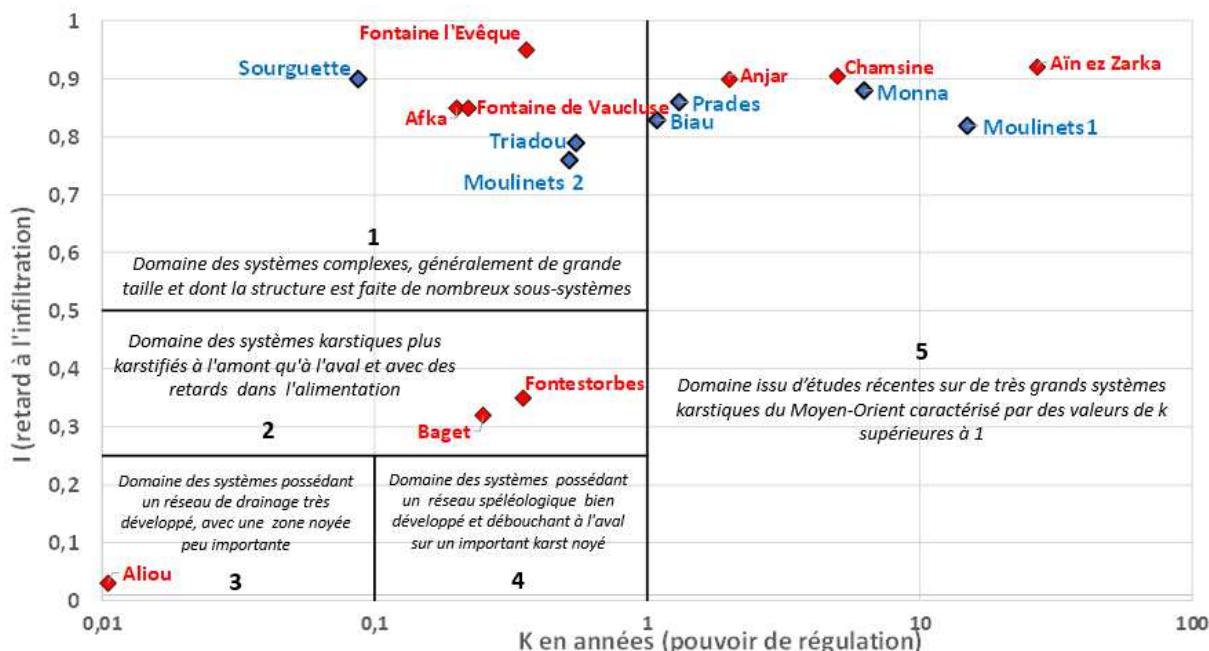
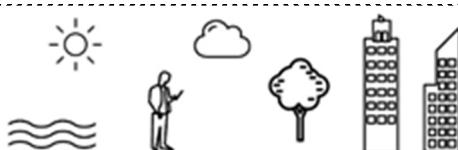


Figure 35. Représentation du retard à l'infiltration en fonction du pouvoir de régulation de 6 sources de catégorie 1 du Causse Noir



1.3.2 Analyses corrélatoires

1.3.2.1 Autocorréogrammes sur la pluie

Les résultats des calculs d'autocorrélation des pluies horaires sont présentés de la Figure 36 à la Figure 42~~Erreur ! Source du renvoi introuvable..~~

Conformément aux séries de précipitations habituellement étudiées, l'effet mémoire est de l'ordre de 2 h. Cet effet mémoire correspond au décalage de temps lorsque la valeur de la fonction d'autocorrélation passe en dessous de 0,40 et devient peu significative d'un point de vue statistique.

La valeur de 2 h correspond ainsi à la durée moyenne des épisodes pluvieux dans ce secteur. Aucune structure à plus long terme n'est observée sur le signal. Le caractère aléatoire de la série de précipitations étudiée est donc vérifié.

1.3.2.2 Autocorréogrammes sur les débits et corrélations croisées Pluie-Débit

Les corréogrammes simples et croisés ont été réalisés sur l'ensemble des chroniques des sources. L'ensemble des résultats est présenté de la Figure 36 à la Figure 42.

a. Synthèse des résultats sur la « qualité » des données de débits

Les traitements statistiques spécifiques mis en œuvre dans le cadre de cette étude nécessitent des chroniques de données **continues** et couvrant une période d'au minimum **un cycle hydrologique complet** afin que les résultats soient les plus représentatifs et intégratifs des phénomènes physiques naturels étudiés.

Le tableau ci-dessous synthétise les observations sur la « qualité » des données utilisées pour chacune des sources étudiées.

Il convient de préciser que la chronique de débit enregistré à la source de Moulin de Corp n'a pas pu être traitée en raison des trop nombreuses lacunes de données.

Station de mesure	Période de mesure		Observations
	Début	Fin	
Biau	15/02/2017 14:00	10/10/2018 00:00	Bruit blanc pour des périodes inférieures à 8h. Le spectre ne présente aucune distorsion.
Monna	13/01/2017 12:00	10/10/2018 00:00	Bruit blanc pour des périodes inférieures à 4h. Le spectre présente une périodicité fictive due à des



Station de mesure	Période de mesure		Observations
	Début	Fin	
			changements rapides des débits sous forme d'escaliers (bruit instrumental).
Moulinets 1	01/01/2017 00:00	13/02/2018 05:00	Bruit blanc pour des périodes inférieures à 4h. Le spectre présente une périodicité fictive due à des changements rapides des débits sous forme d'escaliers (bruit instrumental).
Moulinets 2	05/04/2018 13:00	10/10/2018 00:00	Bruit blanc pour des périodes inférieures à 4h. Le spectre présente une périodicité fictive due à des changements rapides des débits sous forme d'escaliers (bruit instrumental).
Prades	01/03/2017 00:00	07/09/2018 08:00	Bruit blanc pour des périodes inférieures à 3h. Le spectre ne présente aucune distorsion.
Sourguettes	29/03/2017 08:00	07/09/2018 07:00	Bruit blanc pour des périodes inférieures à 4h. Le spectre ne présente aucune distorsion sérieuse même si un bruit instrumental est légèrement présent.
Triadou	08/06/2017 12:00	10/10/2018 00:00	Bruit blanc pour des périodes inférieures à 4h. Le spectre ne présente aucune distorsion sérieuse même si un bruit instrumental est légèrement présent.

Tableau 20. Observations sur la qualité des données enregistrées

b. Synthèse des résultats sur l'analyse corrélatoire et spectrale

Le Tableau 1 synthétise les résultats de l'analyse corrélatoire et spectrale réalisée sur l'ensemble des sources (hormis Moulin de Corp, Cf. précédemment). Notons qu'en deçà de la valeurs 0,35, les coefficients d'autocorrélation ont été considérées comme non significatifs.

L'existence du bruit instrumental plus ou moins présent suivant les séries de débits rend difficile l'interprétation des pentes de spectres qui demeure uniquement qualitative.

Globalement, les pentes sont comprises entre 2 et 3 ce qui conduit à des systèmes globalement développés comparables aux systèmes déjà étudiés par ailleurs (Grands Causses, Ariège, etc.). Cependant, une discrimination plus claire peut être proposée en examinant les résultats de l'analyse corrélatoire simple et croisée.



Les systèmes karstiques correspondant aux exutoires Moulinets 2 (année 2018) et source de Prades sont caractérisés par des effets mémoire très courts et un temps correspondant au maximum d'intercorrélation lui aussi très court. Ceci concourt à les classer parmi des systèmes karstiques développés et bien karstifiés. Dans le cas de Prades, ce résultat est biaisé par le fait qu'en période pluvieuse des eaux de surface viennent parasiter le signal de débit mesuré.

Les systèmes karstiques correspondant aux exutoires Moulinets 1 (année 2017), Sourguettes et Triadou sont caractérisés par des effets mémoire courts (entre 20 et 30 jours) et un temps correspondant au maximum d'intercorrélation lui aussi court. Ceci concourt à les classer parmi des systèmes karstiques assez développés et karstifiés mais dans une moindre mesure que les premiers.

Les systèmes karstiques correspondant aux exutoires des sources de Biau et de Monna sont caractérisés par des effets mémoire longs supérieurs au mois et un temps correspondant au maximum d'intercorrélation long. Ceci concourt à les classer parmi des systèmes karstiques moins développés et karstifiés. Pour le système de Monna, ces résultats établissent le fait que cet aquifère présente un fonctionnement hydrodynamique singulier par rapport aux 6 autres.

Enfin, il faut noter que globalement les valeurs de cohérence spectrale obtenues pour les fréquences inférieures à 3 mois sont très faibles. Ceci met clairement en évidence la forte non-linéarité de la relation précipitations/débits à court terme pour ces systèmes, visible notamment lors des périodes d'étiage ou les impulsions de pluie n'entraînent aucune réponse en termes de variations de débits. Ceci est cohérent avec des systèmes caractérisés par une grande inertie.

Station de mesure	Période de mesure		Effet mémoire (j)	Max Intercorrélation (en h)	Pente
	Début	Fin			
Biau	15/02/2017 14:00	10/10/2018 00:00	46	30	2,50
Monna	13/01/2017 12:00	10/10/2018 00:00	41	9 (pas représentatif)	2,31
Moulinets 1	01/01/2017 00:00	13/02/2018 05:00	20	37	2,02
Moulinets 2	05/04/2018 13:00	10/10/2018 00:00	8.5	10	2,66
Prades	01/03/2017 00:00	07/09/2018 08:00	10	6	2,16
Sourguettes	29/03/2017 08:00	07/09/2018 07:00	24	12	3,00
Triadou	08/06/2017 12:00	10/10/2018 00:00	33	24	2,95

Tableau 21. Résultats de l'analyse corrélatoire et spectrale





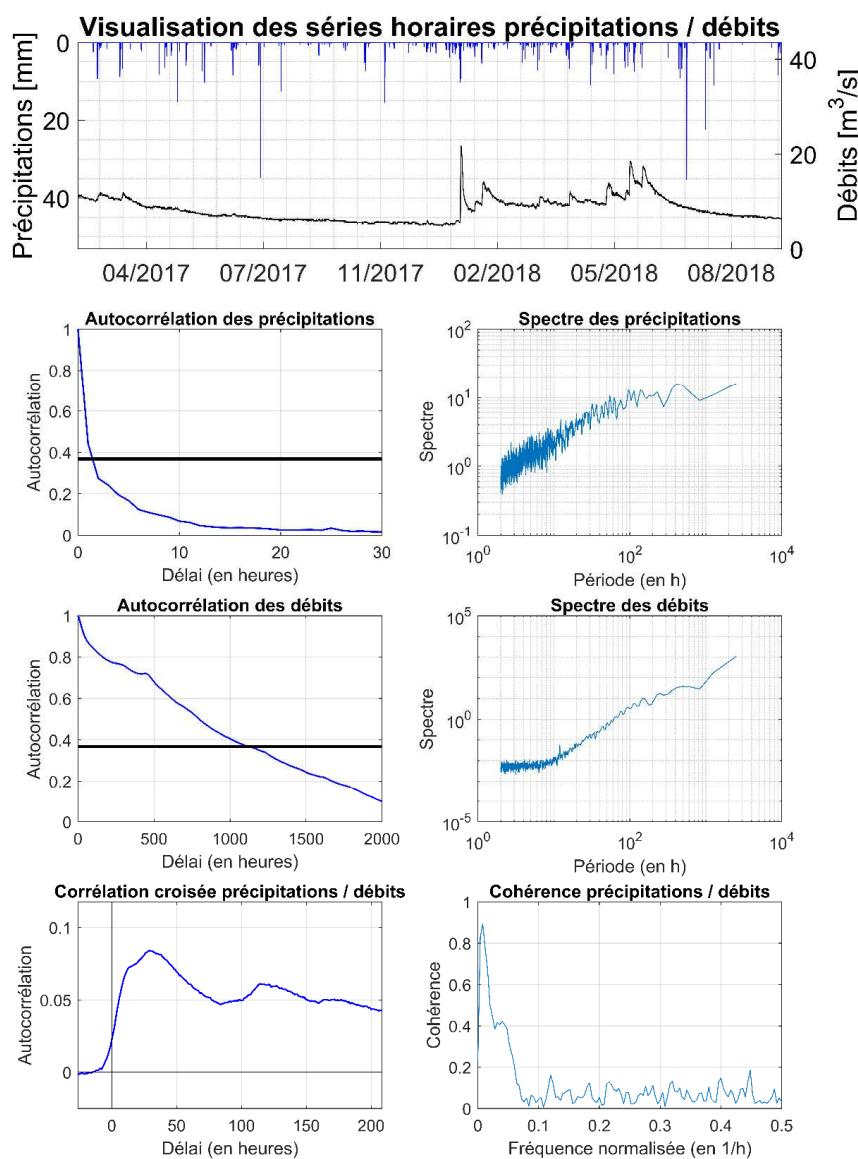


Figure 36. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source de Biau

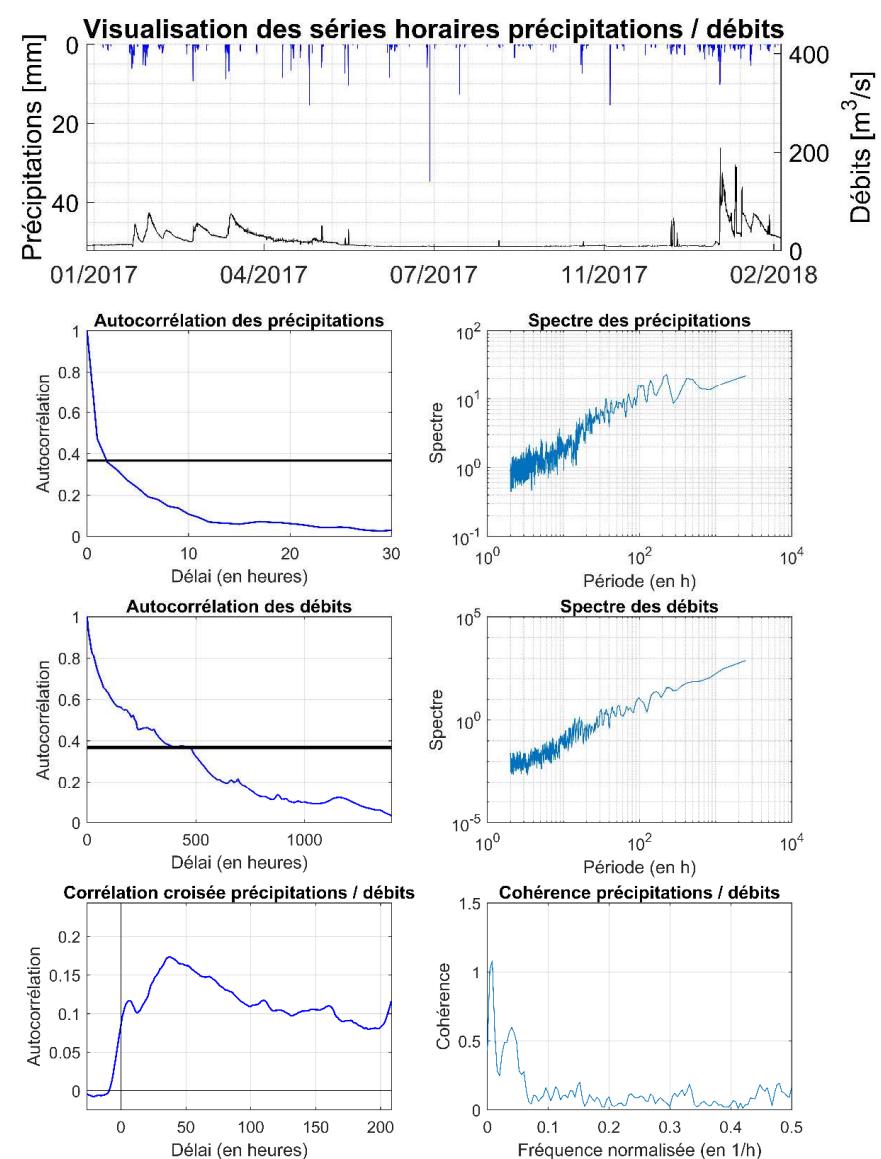


Figure 38. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source des Moulinets 1 (année 2017)

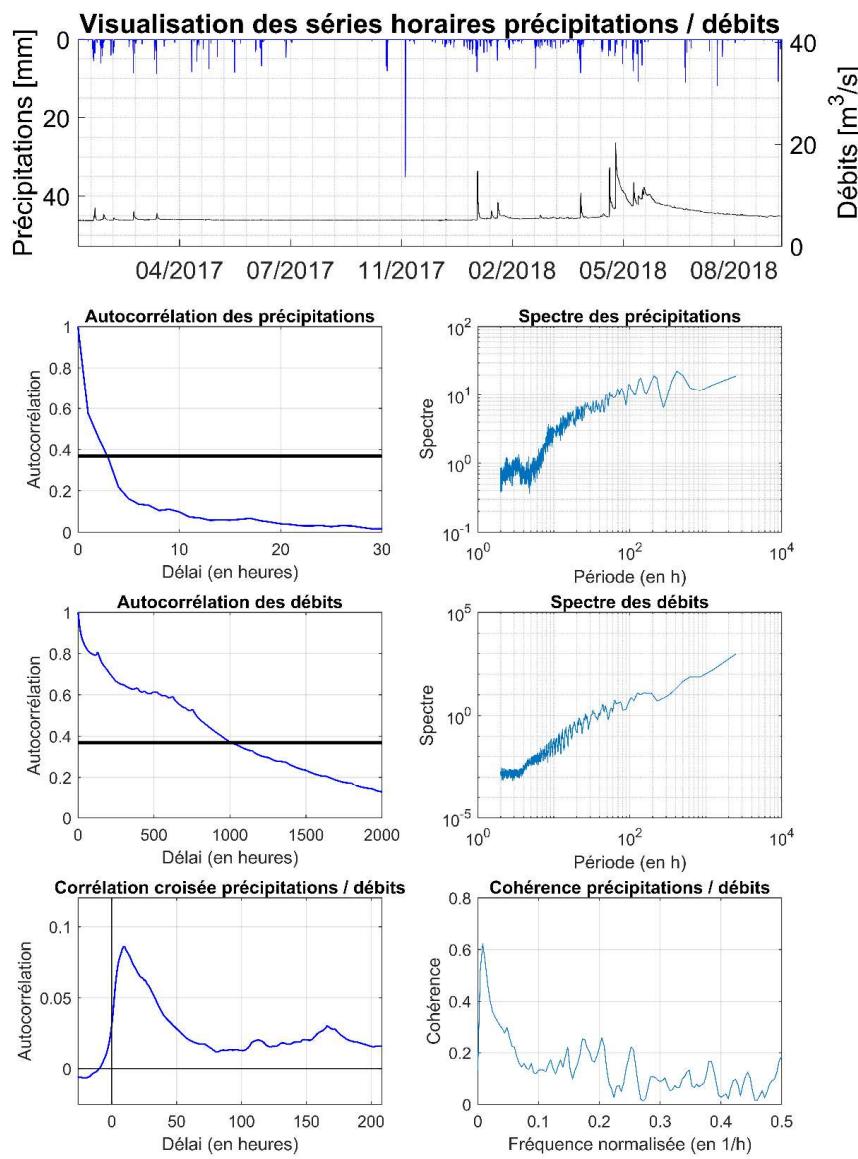


Figure 37. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source de Monna

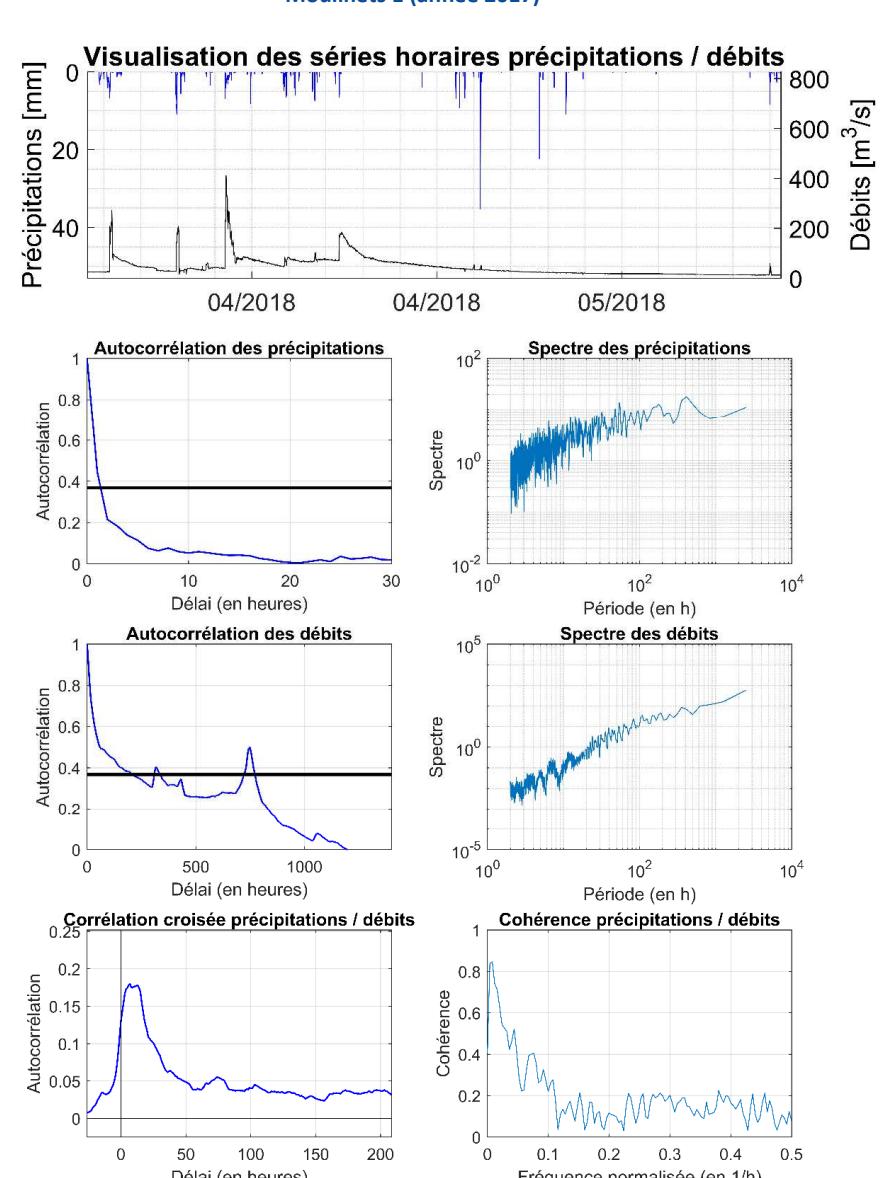
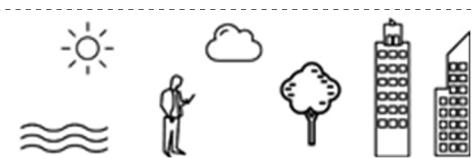


Figure 39. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source des Moulinets 2 (année 2018)



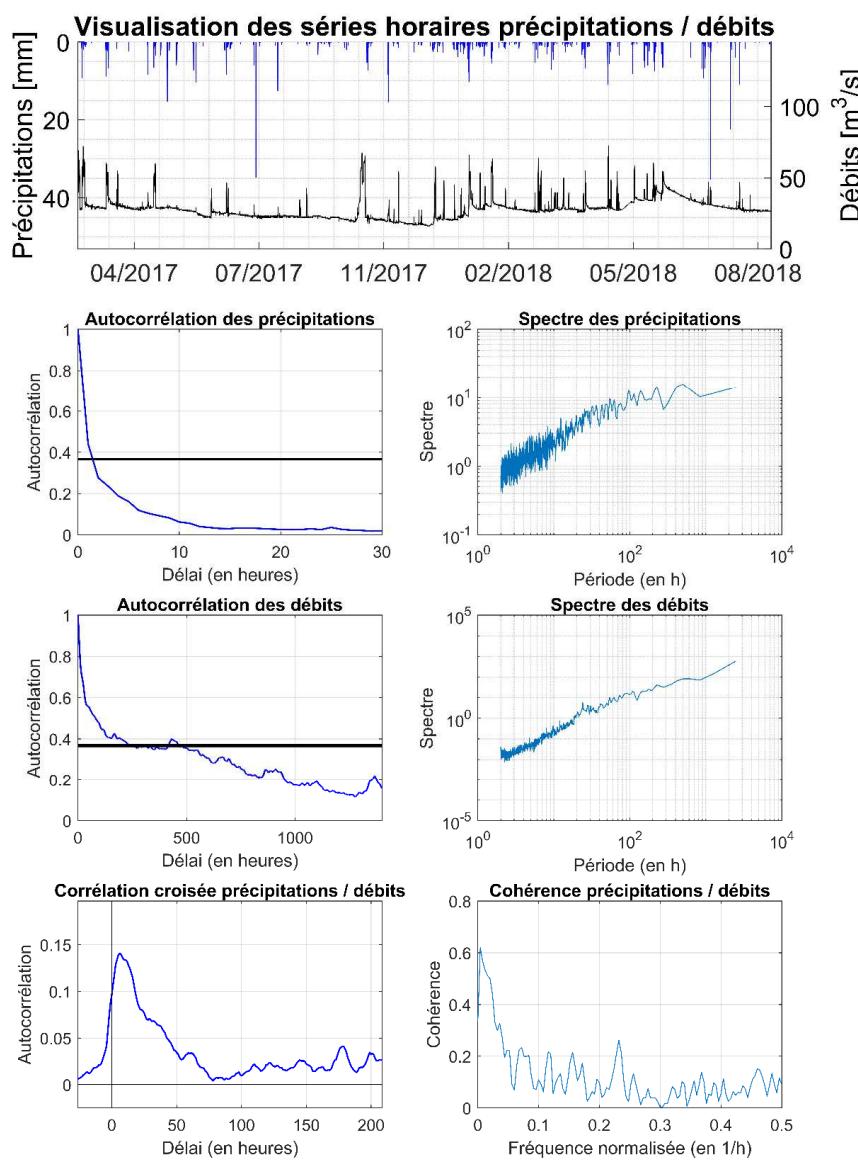


Figure 40. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source de Prades

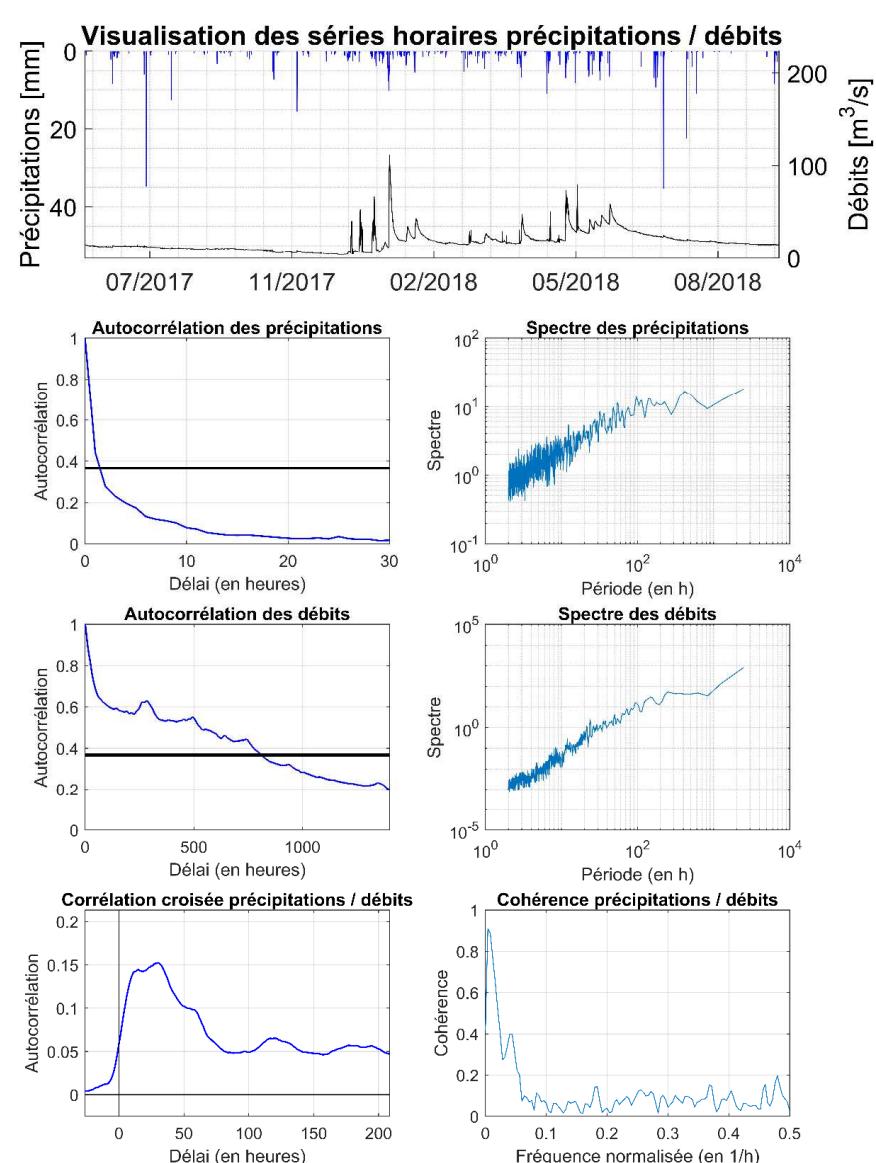


Figure 42. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source Triadou

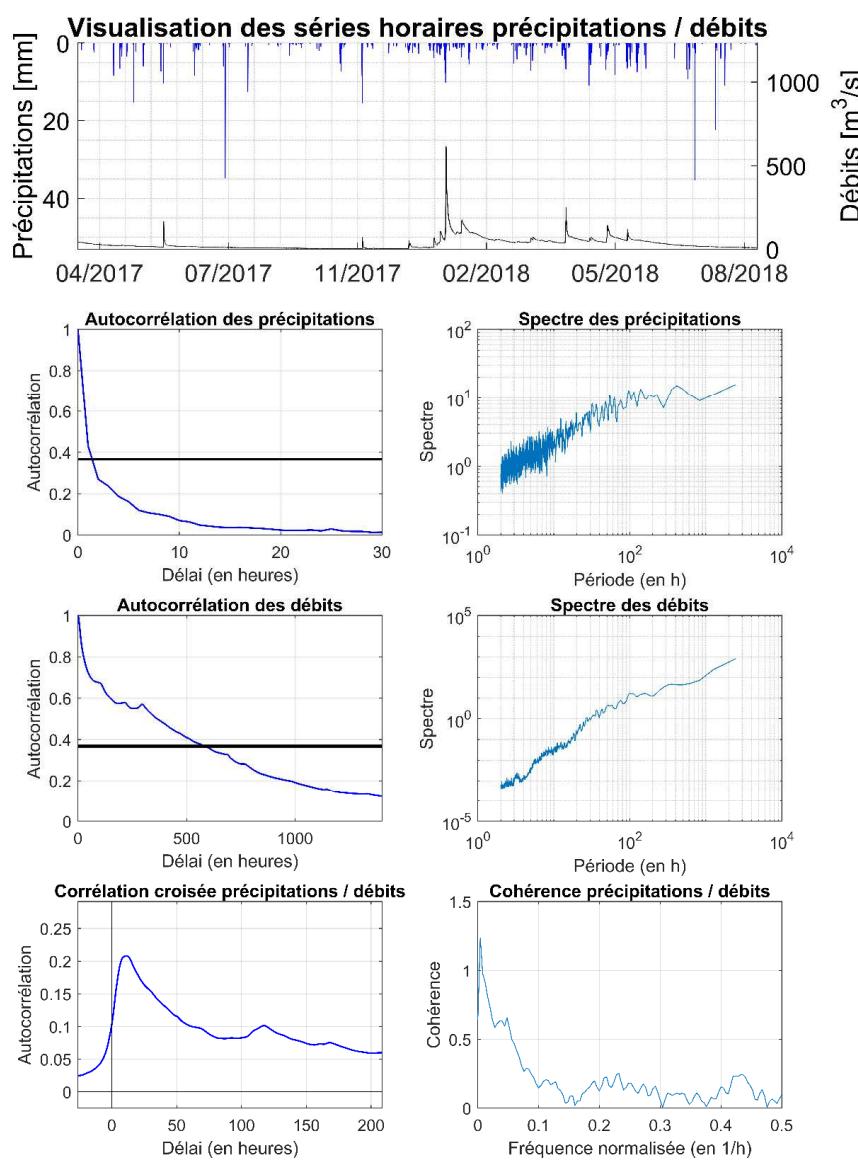
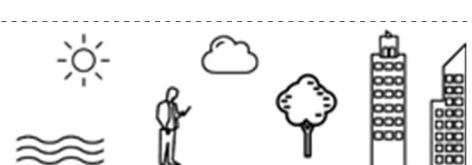


Figure 41. Analyse corrélatoire et spectrale des données mesurées à la source Sourguettes



3 Résultats du suivi physico-chimique en continu

Les chroniques des paramètres physico-chimiques issues du suivi en continue réalisés sur les sources de Biau, Monna, Moulin de Corps, Moulinets, Prades, Triadou et Sourguettes sont présentées en Figure 43. Les chroniques de débit ont été ajoutées sur les graphes.

Il convient de préciser qu'une partie des données a été supprimée pour les sources de Moulin de Corp et de Prades. Dans le cas de Moulin de Corp, la sonde de mesure était hors d'eau en période très basses eaux (été 2017 et fin d'été 2018). Pour la source de Prades, il s'agit d'un problème lié au seuil de mesure. Les données de conductivité enregistrées au mois de septembre 2017 étaient anormalement basses (mélange d'eaux superficielles) et n'ont donc pas été retenues. Enfin, pour la source Moulinets, l'absence de données en début d'année 2018 correspond à un dysfonctionnement de la sonde de mesure.

Il est intéressant de noter que sur la quasi-totalité des chroniques de conductivité, on peut observer des chutes brutales des valeurs mesurées (associée à des baisses concomitantes de température, hormis pour Sourguettes) plus ou moins importante, de 50 µS/cm (Biau, Sourguettes) à plus de 100 µS/cm (Moulin de Corp au mois de d'août 2018). L'origine de ces baisses de conductivité s'explique de diverses manières selon les sources.

Pour les sources de Triadou, Prades et Moulinets, elles sont dues à des arrivées d'eaux météoriques peu minéralisées au niveau du seuil de mesure. Elles n'ont aucun lien avec le fonctionnement de l'aquifère. De ce fait, les chroniques de conductivité et de température de la source Triadou sont particulièrement difficiles à interpréter.

Dans le cas de la source Biau, le dispositif de mesure est positionné à l'intérieur du captage, à moins d'un défaut d'étanchéité de l'ouvrage (toujours possible), ces baisses ne peuvent être dues qu'à des infiltrations rapides d'eaux météoriques au sein de l'aquifère. Cette tendance à la baisse est cependant mineure au regard de l'évolution globale à la hausse de la conductivité en période pluvieuse.

La source Sourguettes, compte tenu du caractère souterrain de l'installation, l'origine de ces chutes brutales n'est pas due à l'arrivée d'eaux superficielles « parasites ». Il est intéressant de noter que certaines baisses brutales de conductivité sont associées à des hausses de température (hors épisode de janvier 2018). Ceci est principalement observé aux mois de mai et de juin lorsque la température extérieure est élevée. Ces variations peuvent donc être liées à des pertes de la rivière de la Jonte en amont.



Contrairement aux autres sources et si l'on ne tient pas compte des valeurs mesurées fin août 2018 (problème de mesure ?), le signal de conductivité de la source de Moulin de Corp est perturbé par chaque évènement pluvieux, y compris pour de faibles cumuls (< 20 mm). Ce comportement est atypique par rapport aux autres sources et indique un caractère fonctionnel bien développé, tout particulièrement vis-à-vis de la structure de drainage interne. Ces variations physico-chimiques sont également liées au fait que l'aquifère est en partie alimenté par les pertes du Trévezel (Cf. résultats des traçages).

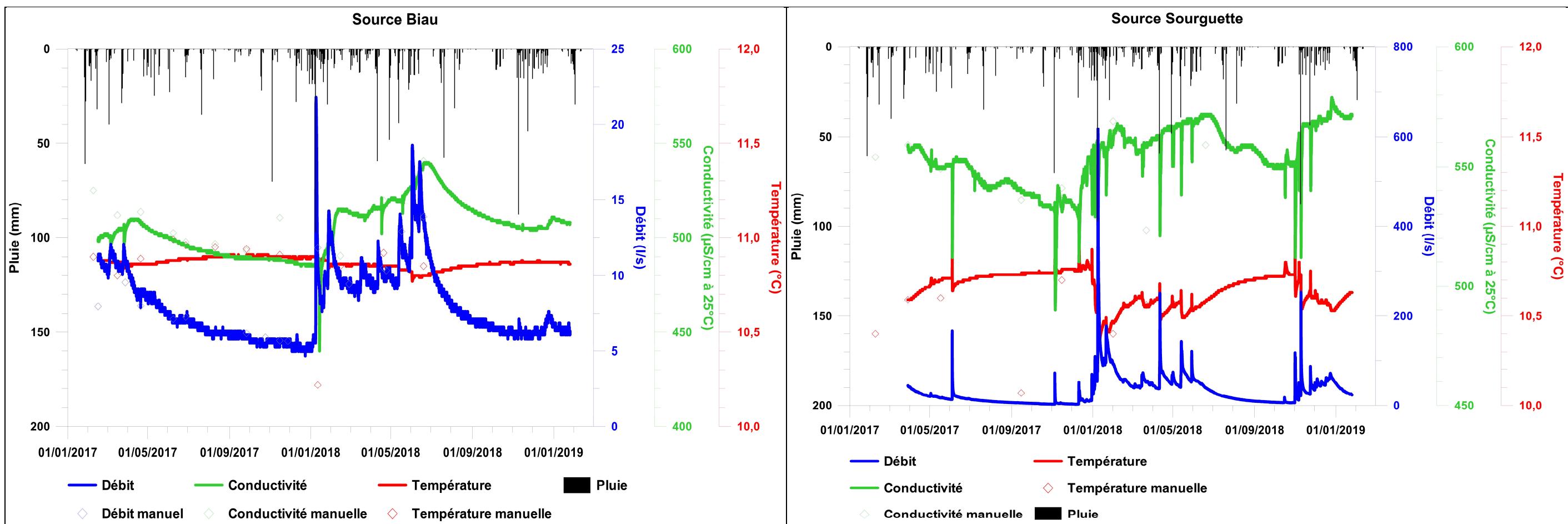
Enfin, la source Monna réagit quant à elle de manière singulière une nouvelle fois avec des baisses de conductivité très peu marquées au cours du suivi ($\approx 10 \mu\text{S}/\text{cm}$), hormis lors de l'épisode pluvieux majeur de fin janvier 2018 ($\approx 50 \mu\text{S}/\text{cm}$). D'un point de vue global, le signal de conductivité à la source montre une tendance à la hausse à la suite de forts cumuls pluviométriques.

De ce point de vue, elle se rapproche du fonctionnement de la majorité des sources suivies (Biau, Moulinets, Prades et Sourguettes). Ces tendances à la hausse de la conductivité en période pluvieuse démontrent que l'influence des apports météoriques à la surface des bassins d'alimentation est retardée dans le temps. Pour ces systèmes, les transferts de pression engendrés par les pluies provoquent la mobilisation d'eaux anciennes (plus minéralisées) au sein de la zone non saturée de l'aquifère. Le rôle de la zone non saturée, en tant que retardateur des écoulements, est donc primordial dans le fonctionnement hydrodynamique de ces systèmes.

Seul le système de Moulin de Corp se comporte de manière distincte. Le signal de base de la conductivité, aux alentours de $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($\pm 20 \mu\text{S}/\text{cm}$), est régulièrement perturbé (à la baisse dans la majorité des cas) par chaque évènement pluvieux enregistré, y compris les moins importants en termes de cumuls. Une nouvelle fois, ceci illustre le caractère karstique fonctionnel de ce système et l'aspect binaire de son alimentation.

Ces enregistrements en continu et à un pas de temps de courte durée (30 mn) permettent l'observation de phénomènes qui sont invisibles dans le cadre d'un suivi ponctuel (y compris hebdomadaire). Ils aident à caractériser avec plus de précision le fonctionnement des aquifères. Les systèmes du Causse Noir présentent un comportement hydrodynamique karstique, plus ou moins fonctionnel, qui nécessite la mise en œuvre de ce type d'instrumentation. Dans le cas des systèmes étudiés, les résultats de ce suivi permettent de mettre en évidence l'importance de l'influence des modalités d'infiltration à la surface des bassins versants dans leur fonctionnement hydrodynamique.



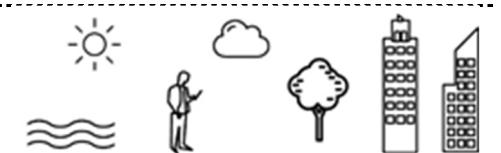


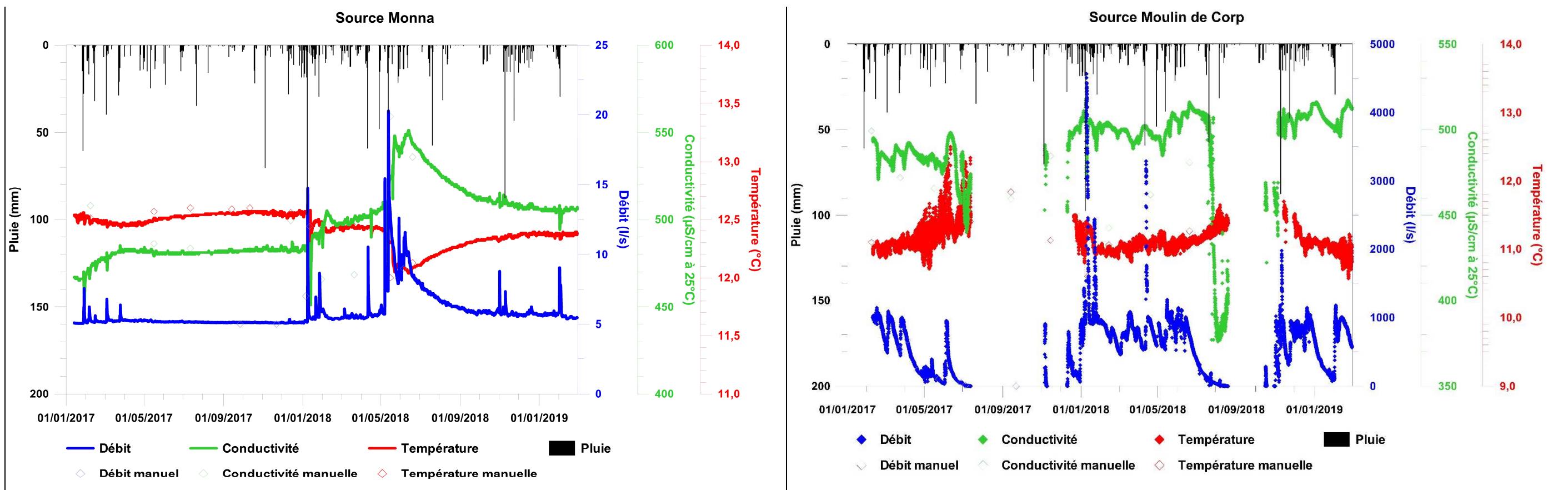
Biau	Débit (l/s)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Nbre valeurs	16 909		
Moyenne	8,1	495	10,9
Médiane	7,1	496	10,9
Ecart type	2,4	12,5	0,0
Coeff. Var.	29,8%	2,5%	0,2%

Synthèse statistique

Sanguette	Débit (l/s)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Nbre valeurs	16 008		
Moyenne	30,9	554	10,6
Médiane	19,9	556	10,7
Ecart type	34,0	12,2	0,1
Coeff. Var.	110,0%	2,2%	0,8%

Synthèse statistique



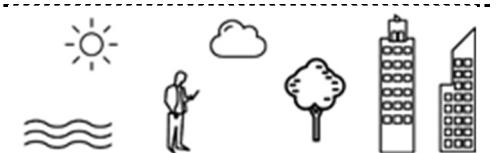


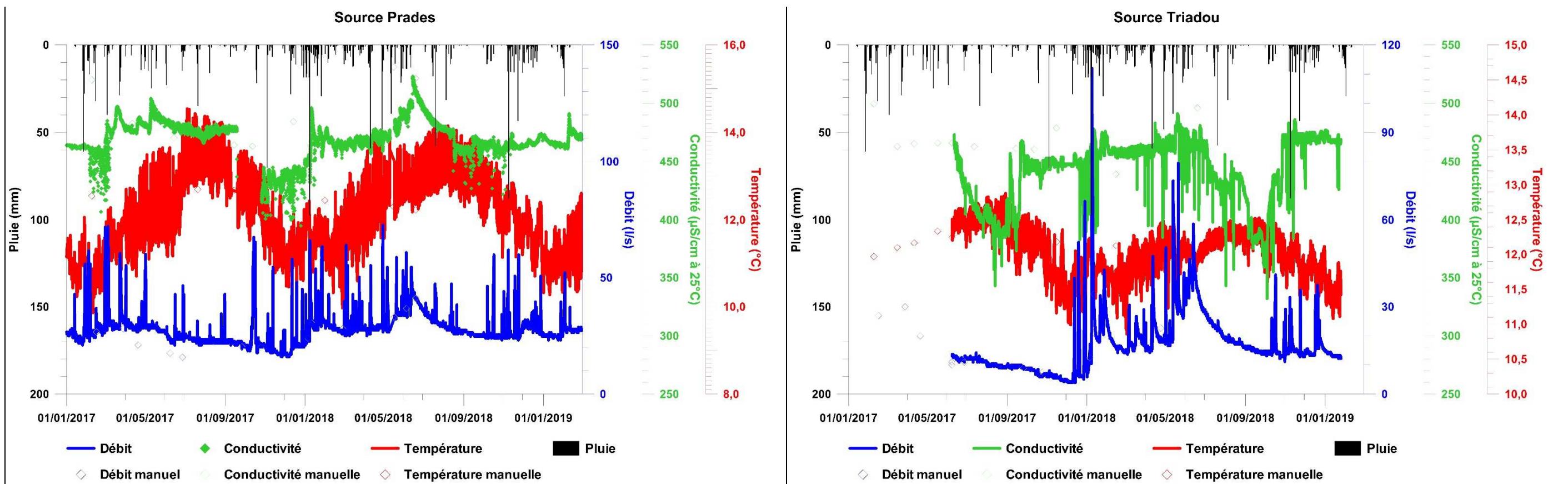
Monna	Débit (l/s)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Nbre valeurs	18 470		
Moyenne	5,8	497	12,4
Médiane	5,4	497	12,4
Ecart type	1,2	19,4	0,1
Coeff. Var.	21,4%	3,9%	1,1%

Synthèse statistique

Moulin de Corp	Débit (l/s)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Nbre valeurs	17 284		
Moyenne	412,6	475	11,2
Médiane	222,8	487	11,1
Ecart type	472,5	35,2	0,2
Coeff. Var.	114,5%	7,4%	1,9%

Synthèse statistique



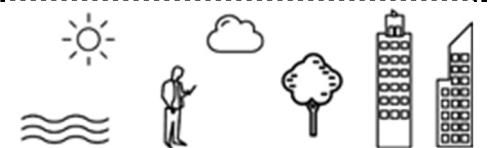


Prades	Débit (l/s)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Nbre valeurs	17 521	17 378	17 305
Moyenne	27,7	461	12,2
Médiane	26,6	469	12,3
Ecart type	7,0	40,3	0,9
Coeff. Var.	25,1%	8,7%	7,0%

Synthèse statistique

Triadou	Débit (l/s)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Nbre valeurs	14 130	13 788	14 130
Moyenne	16,7	443	12,0
Médiane	14,8	450	12,0
Ecart type	9,8	27,0	0,3
Coeff. Var.	58,5%	6,1%	2,9%

Synthèse statistique



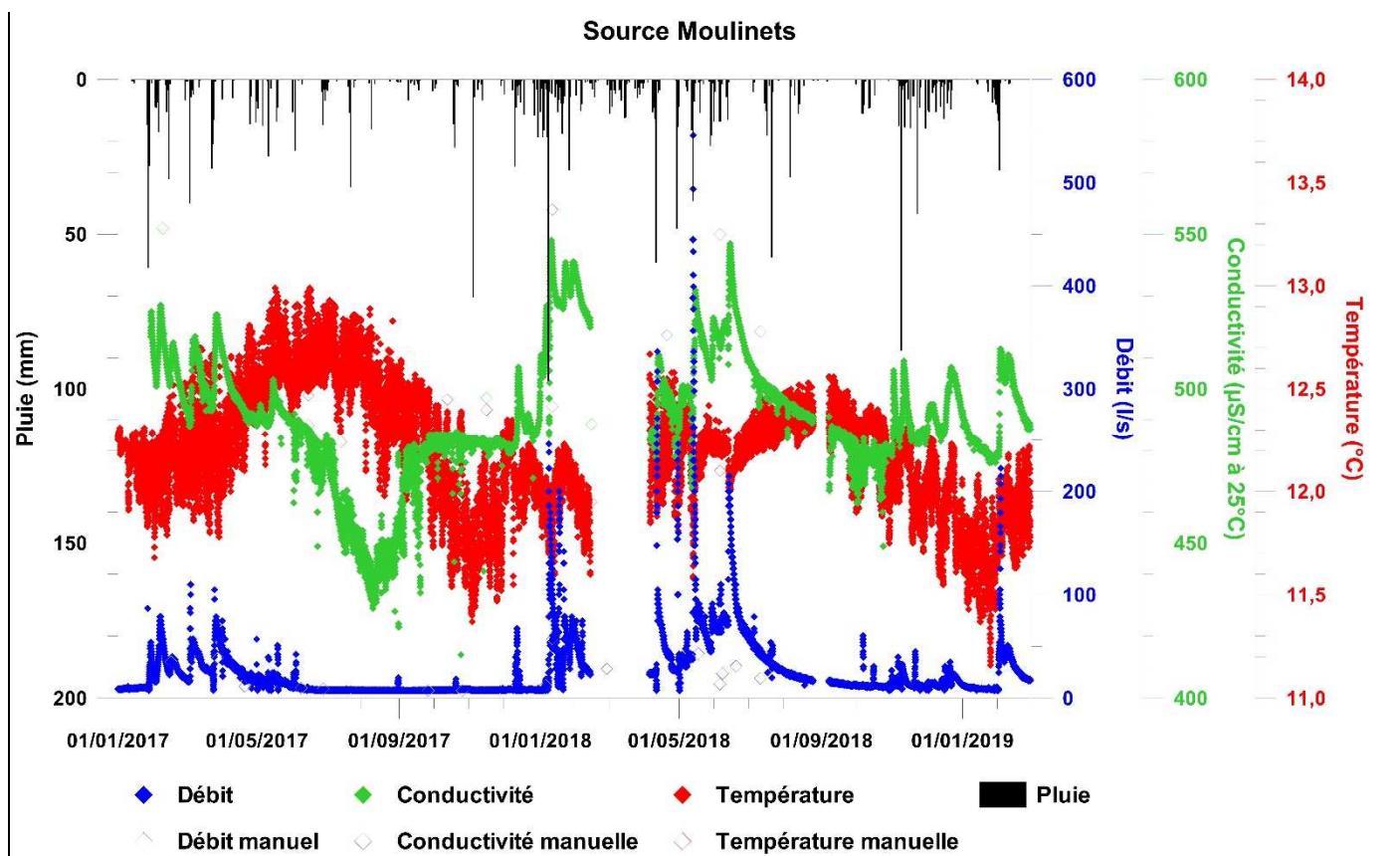


Figure 43. Chroniques des paramètres physico-chimiques des 7 sources de catégorie suivies de février 2017 à février 2019

Moulinets	Débit (l/s)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température (°C)
Nbre valeurs	17 368	16 656	17 368
Moyenne	26,1	491	12,2
Médiane	14,8	490	12,2
Ecart type	30,6	20,4	0,3
Coeff. Var.	117,4%	4,1%	2,3%

Synthèse statistique



4 Résultats du suivi hydrochimique des sources

Comme indiqué précédemment, un suivi hydrochimique mensuel a été mis en place sur l'ensemble des sources de catégorie 1 de janvier 2017 à avril 2018, soit un peu plus d'un cycle hydrologique. L'ensemble des périodes hydrologiques, basses, moyennes et hautes eaux, a été couverte. Les paramètres analysés sont décrits au § 2.1.2 et l'ensemble des résultats bruts est reporté en annexe I.

Cette base de données importante a été analysée et interprétée avec les outils de représentation classique utilisée en hydrogéologie des systèmes karstiques (détails au § 3.2).

4.1 Caractéristiques hydrochimiques des pluies

Avant d'analyser les caractéristiques hydrochimiques de l'eau des sources, il est intéressant de s'intéresser à celui des pluies qui constituent le « signal d'entrée » dans les systèmes. La composition chimique des pluies recueillies au stations météorologiques de Millau et de Mazes ont été analysés une quinzaine de fois entre novembre 2017 et juillet 2018.

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux synthétiques pour chacune des deux stations (Tableau 1 Tableau 22 Tableau 23) et de graphes présentant l'évolution des concentrations des éléments majeurs (Figure 44 et Figure 45).

Rappelons que la composition chimique des précipitations dépend de la nature et de la quantité de composés contenus dans l'atmosphère. Ils proviennent des processus naturels ou d'origine anthropique tels que la mise en suspension par le vent, les embruns marins, les émissions par les végétaux, les sols et les émissions industrielles (Celle, 2000). Les principales sources des composés chimiques présents dans l'atmosphère, qui constituent par la suite les précipitations, sont définies par trois pôles d'influence majeurs (Loÿe-Pilot, 1995) :

- origine marine : Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} ;
- origine continentale : Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} ;
- origine anthropique : SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , K^+ .



Date	Calcium (mg/l)	Magnésium (mg/l)	Sodium (mg/l)	Potassium (mg/l)	Chlorures (mg/l)	Sulfates (mg/l)	Orthophosphates (mg/l)	Nitrates (mg/l)	Silicates (mg/l)
06/11/2017	0,90	0,05	0,30	0,00	0,20	0,40	0,02	0,70	0,10
13/11/2017	0,70	0,09	0,30	0,20	0,40	0,50	0,02	1,40	0,10
27/11/2017	2,00	0,16	0,70	0,50	1,00	1,20	0,00	2,40	0,10
01/12/2017	0,40	0,00	0,30	0,00	0,50	0,20	0,00	1,00	0,00
08/12/2017	0,70	0,05	0,40	0,10	0,50	0,60	0,00	1,20	0,00
11/12/2017	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,30	0,00
12/12/2017	0,00	0,00	0,50	0,00	0,50	0,20	0,00	0,50	0,00
08/01/2018	4,80	0,19	0,20	0,10	0,40	0,50	0,03	0,00	0,30
07/02/2018	0,10	0,00	0,40	0,00	0,30	0,20	0,02	0,80	0,00
26/03/2018	0,50	0,00	0,30	0,00	0,50	0,50	0,02	1,20	0,00
09/04/2018	8,10	0,59	3,10	0,60	5,50	4,70	0,03	4,20	0,20
09/05/2018	0,90	0,08	0,00	0,00	0,20	0,90	0,00	1,90	0,05
14/05/2018	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,20	0,00	0,00	0,00
29/05/2018	0,70	0,05	0,00	0,00	0,20	0,60	0,03	0,60	0,00
05/07/2018	1,20	0,11	0,00	0,30	0,60	0,60	0,24	1,50	0,10
Moyenne	1,40	0,09	0,43	0,12	0,75	0,75	0,03	1,18	0,06
Médiane	0,70	0,05	0,30	0,00	0,40	0,50	0,02	1,00	0,00
Ecarts type	2,13	0,15	0,74	0,19	1,29	1,09	0,06	1,03	0,09
Coeff. Var.	65,7%	62,7%	58,4%	63,0%	58,0%	68,8%	47,0%	114,1%	73,2%

Tableau 22. Résultats des analyses chimiques sur les pluies recueillies à la station météorologique de Millau

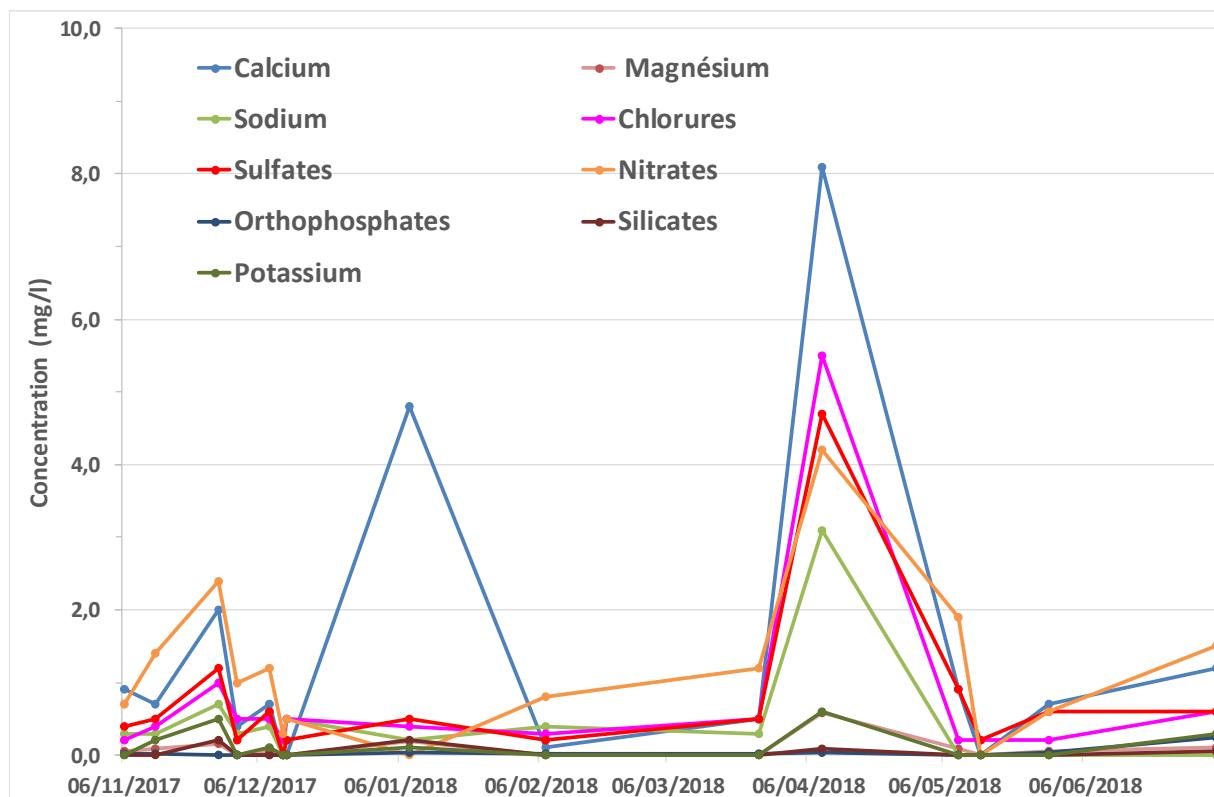


Figure 44. Evolution de la chimie des pluies de la station météorologique de Millau de novembre 2017 à juillet 2018



Date	Calcium (mg/l)	Magnésium (mg/l)	Sodium (mg/l)	Potassium (mg/l)	Chlorures (mg/l)	Sulfates (mg/l)	Orthophosphates (mg/l)	Nitrates (mg/l)	Silicates (mg/l)
06/11/2017	0,30	0,00	0,00	0,10	0,20	0,50	0,01	0,60	0,00
13/11/2017	0,00	0,00	0,20	0,05	0,30	0,00	0,02	0,80	0,00
27/11/2017	0,70	0,10	0,70	0,20	1,30	0,70	0,02	2,80	0,20
01/12/2017	0,20	0,06	0,60	0,05	1,10	0,50	0,01	2,00	0,00
08/12/2017	0,40	0,00	0,00	0,05	0,40	0,40	0,01	1,60	0,00
11/12/2017	0,00	0,00	0,00	0,05	0,20	0,20	0,00	0,30	0,00
12/12/2017	0,20	0,00	0,70	0,05	0,70	0,20	0,01	0,50	0,00
08/01/2018	5,60	0,43	1,60	0,30	2,20	2,80	0,05	1,30	0,20
07/02/2018	0,20	0,05	0,60	0,05	0,80	0,40	0,00	0,90	0,00
26/03/2018	23,50	0,14	0,80	351,90	1,20	1,20	0,01	2,80	0,00
09/04/2018	3,40	0,26	1,30	0,20	2,30	2,20	0,04	2,10	0,08
09/05/2018	0,50	0,07	0,00	0,05	4,10	1,70	0,00	7,30	0,00
14/05/2018	0,00	0,00	0,00	0,05	0,20	0,20	0,00	0,00	0,00
29/05/2018	0,30	0,00	0,00	0,05	0,20	0,40	0,00	0,40	0,00
05/07/2018	1,80	0,21	0,00	0,40	0,50	0,80	0,16	2,00	0,06
Moyenne	0,97	0,09	0,43	0,12	1,05	0,81	0,02	1,69	0,04
Médiane	0,30	0,05	0,20	0,05	0,70	0,50	0,01	1,30	0,00
Ecarts type	1,56	0,12	0,50	0,11	1,05	0,79	0,04	1,73	0,07
Coeff. Var.	62,2%	72,5%	85,9%	107,6%	99,4%	103,2%	57,5%	97,8%	52,5%

Tableau 23. Résultats des analyses chimiques sur les pluies recueillies à la station météorologique de Mazes

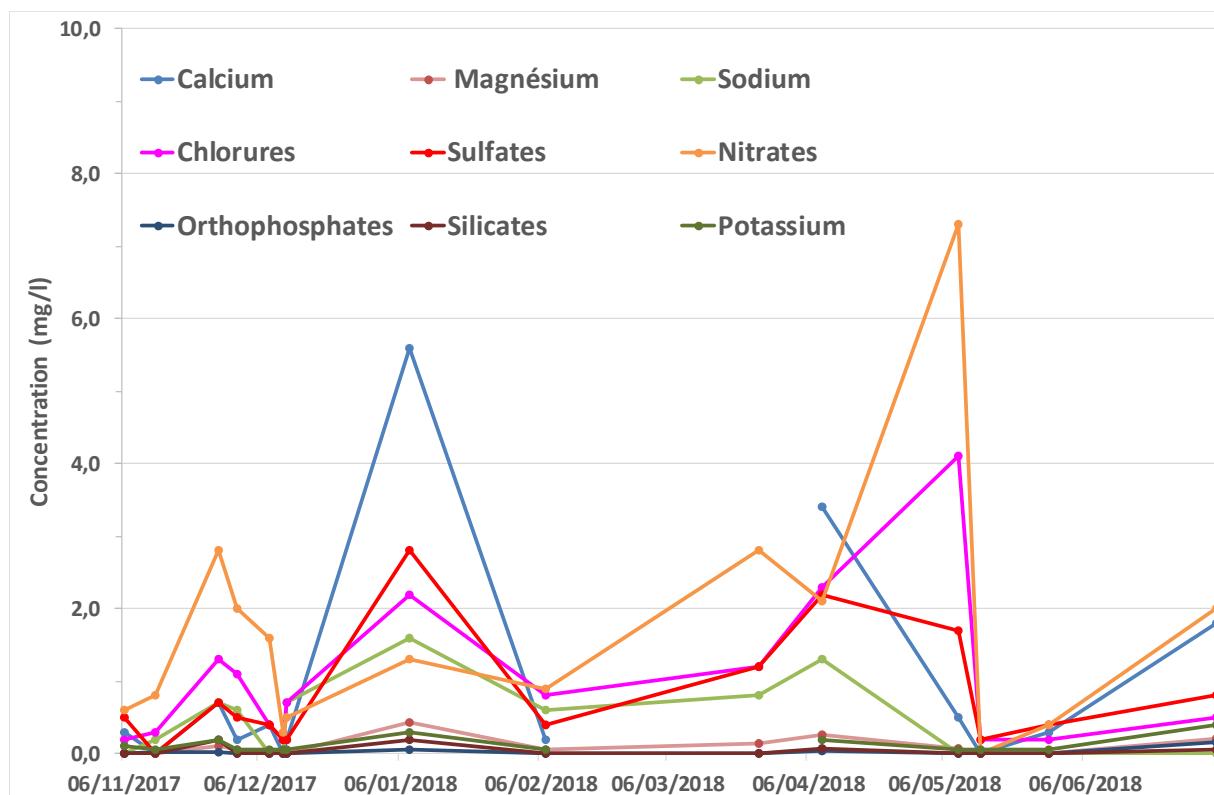


Figure 45. Evolution de la chimie des pluies de la station météorologique de Mazes de novembre 2017 à juillet 2018



D'après les tableaux de synthèse établis, On peut noter que les coefficients de variation sont élevés pour l'ensemble des éléments, ce qui montrent ainsi la grande variabilité des concentrations chimiques dans les précipitations.

Les ions dominants sont le calcium et les nitrates. La prédominance du calcium étant certainement due à l'environnement carbonaté du secteur d'étude.

Les sulfates et les nitrates ont très couramment une origine commune, la pollution anthropique. Les concentrations en sulfates sont faibles aux deux stations ($< 1 \text{ mg/l}$). Quant aux nitrates, ils sont généralement issus des émissions d'oxyde d'azote par les véhicules à moteurs thermiques, transformé en acide nitrique gazeux qui lui-même réagit par la suite avec des particules ou des gaz présents dans l'atmosphère pour donner des composés solubles dans l'eau de pluie (Klein, 1998).

Les concentrations en chlorures et en sodium présentent les plus faibles variabilités dans la composition chimique des précipitations de la station de Millau. Le fait que la grande majorité des épisodes pluvieux dans la région provient des dépressions formées au-dessus de Méditerranée et de l'océan Atlantique (dans lequel les précipitations trouvent une source quasi intarissable de chlorures et de sodium) peut expliquer le fait que les chlorures et le sodium aient une variabilité plus faible que les autres éléments.

4.2 Compositions chimiques moyennes des eaux

Le Tableau 24 synthétise quelques paramètres statistiques calculés à partir de la base de données constituée sur les 15 sources de catégorie 1 et 2 sources de catégorie 2 (Fontaine des Fournets et Gardies). Cette base de données est issue des mesures physico-chimiques mensuelles réalisées *in situ* et des résultats d'analyses chimiques effectuées en laboratoire.

Ces valeurs vont être utilisées et mises en forme par la suite afin de mettre en évidence les spécificités chimiques des eaux des sources issues du Causse Noir.

De manière synthétique, on peut relever :

- Des eaux moyennement minéralisées avec des conductivités moyennes qui varient entre 165 et 545 $\mu\text{S/cm}$, avec une grande majorité des valeurs comprises entre 450 et 545 $\mu\text{S/cm}$. Les valeurs inférieures à cette gamme correspondent à des systèmes influencés par des pertes de cours d'eau comme Fournets, Castors ou Jouques Merles (Pas de l'Âne est une résurgence de pertes du Trévezel) ;
- Des valeurs moyennes de température comprises entre 9,1 et 12,9°C. Cette variabilité est en partie due à l'influence de mélange d'eaux superficielles qui engendre des températures inférieures à 10,0°C (Pas de l'Âne, Gardies, etc.). Notons qu'une partie de cette variabilité est aussi la conséquence des conditions de prise de mesure dans certains cas. Au vu de l'altitude des bassins d'alimentation des différents systèmes du



Causse Noir, la température moyenne « attendue » aux sources est comprise entre 11,0 et 12,0 °C ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$). Aucune anomalie positive de température (eaux issues de circulation profondes) n'a été identifiée ;

- Des concentrations moyennes en sulfates relativement faibles (< 8,5 mg/l). La présence de pyrite dans certains niveaux du Jurassique est une des origines des sulfates dans l'eau ;
- Des concentrations moyennes en nitrates variables d'un système à l'autre (de 0,1 à 14,2 mg/l). Ces concentrations restent faibles (< 10 mg/l) pour la grande majorité des sources suivies ;
- La présence de silice à des concentrations supérieures à 5 mg/l dans l'eau de certaines sources (La Fon, Villaret, Lissignol, Moulinets, Prades) indiquent des temps de transfert relativement longs dans ces aquifères.

De manière globale, les eaux des sources issues du Causse Noir présentent des caractéristiques physico-chimiques comparables et homogènes à de rares exceptions près (Pas de l'Âne et Gardies). Ces résultats vont être analysées plus en détails dans les paragraphes qui suivent.





Source	Catégorie	Paramètre statistique	Température (°C)	Conductivité (µS/cm à 25°C)	pH	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)
Fournets	1	Nbre valeurs	12	12	12	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
		Moyenne	11,36	473	7,4	73,0	16,9	1,6	0,5	305,0	3,2	3,8	0,04	8,8	3,8
		Médiane	11,37	468	7,4	71,5	17,4	1,6	0,5	303,5	3,2	3,7	0,04	8,9	3,8
		Ecart type	0,22	14	0,09	4,3	1,5	0,1	0,1	10,5	0,2	0,3	0,01	0,5	0,3
		Coeff. Var.	2,0%	3,1%	1,3%	5,9%	8,8%	7,6%	14,9%	3,4%	5,3%	8,2%	17,3%	5,3%	8,6%
Jouque Merles	1	Nbre valeurs	18	18	18	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	10,52	310	7,5	47,5	11,3	2,2	0,5	192,9	3,7	7,6	0,03	4,0	4,6
		Médiane	9,95	304	7,5	48,8	9,9	2,2	0,6	190,0	3,6	6,9	0,03	4,0	4,5
		Ecart type	1,69	53	0,20	7,8	3,0	0,1	0,2	30,9	0,3	2,1	0,00	0,8	0,4
		Coeff. Var.	16,0%	17,2%	2,6%	16,3%	26,6%	6,6%	31,1%	16,0%	8,7%	28,2%	17,7%	20,0%	8,8%
Moulin de Corp	1	Nbre valeurs	20	20	20	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	11,25	467	7,4	74,4	16,7	1,6	0,5	300,5	3,3	3,8	0,04	9,6	3,8
		Médiane	11,17	469	7,4	73,6	16,6	1,6	0,5	300,0	3,2	3,7	0,03	9,3	3,7
		Ecart type	0,33	17	0,22	13,7	3,7	0,3	0,2	58,2	0,4	2,9	0,01	2,4	0,5
		Coeff. Var.	2,9%	3,5%	3,0%	18,5%	22,2%	22,4%	34,1%	19,4%	13,4%	77,0%	15,9%	25,1%	13,8%
Monna	1	Nbre valeurs	20	20	20	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	12,42	496	7,3	67,6	25,1	1,7	0,2	323,3	3,2	5,0	0,02	2,5	4,6
		Médiane	12,55	486	7,4	70,6	18,1	1,6	0,3	300,0	3,3	4,2	0,03	8,8	4,3
		Ecart type	0,24	27	0,10	2,5	0,6	0,1	0,1	5,9	0,2	0,2	0,01	0,1	0,2
		Coeff. Var.	1,9%	5,5%	1,4%	3,7%	2,4%	5,9%	44,9%	1,8%	6,7%	3,9%	42,5%	5,5%	4,2%
Castors	1	Nbre valeurs	10	10	10	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		Moyenne	11,83	371	7,7	55,6	14,3	2,1	0,6	230,8	3,8	8,2	0,03	5,9	4,0
		Médiane	11,52	373	7,7	57,1	14,1	2,2	0,6	237,0	3,6	7,4	0,03	5,9	4,1
		Ecart type	2,45	38	0,14	6,9	2,4	0,2	0,0	23,8	0,3	2,8	0,01	0,8	0,3
		Coeff. Var.	20,7%	10,2%	1,8%	12,4%	16,8%	9,6%	8,6%	10,3%	9,2%	34,5%	16,7%	14,3%	7,4%
La Fon	1	Nbre valeurs	23	23	23	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	12,90	460	7,5	68,7	20,0	1,8	0,3	305,2	3,2	4,4	0,02	1,4	6,3
		Médiane	12,90	458	7,4	68,8	20,0	1,5	0,3	305,0	2,9	4,4	0,02	1,4	6,3
		Ecart type	0,27	16	0,19	2,6	0,5	0,8	0,1	1,2	0,9	0,1	0,01	0,1	0,1
		Coeff. Var.	2,1%	3,5%	2,6%	3,7%	2,3%	43,6%	24,9%	0,4%	28,6%	1,6%	54,4%	10,0%	2,0%
Ubertariès	1	Nbre valeurs	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
		Moyenne	9,84	491	8,1	86,8	12,3	2,2	1,2	311,7	5,0	5,6	0,12	14,2	4,8
		Médiane	9,40	493	8,1	88,4	11,6	2,2	1,1	312,0	4,8	5,6	0,12	13,4	4,7
		Ecart type	2,36	21	0,27	4,3	1,2	0,1	0,2	13,9	0,4	0,3	0,02	1,8	0,3
		Coeff. Var.	24,0%	4,2%	3,4%	4,9%	10,1%	4,1%	15,8%	4,5%	7,8%	5,7%	17,1%	12,6%	6,3%



Source	Catégorie	Paramètre statistique	Température (°C)	Conductivité (µS/cm à 25°C)	pH	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)
Villaret	1	Nbre valeurs	19	19	19	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	9,70	460	8,1	55,6	29,6	2,2	0,2	312,4	4,6	5,5	0,02	0,1	5,5
		Médiane	9,38	470	8,1	55,6	30,0	2,2	0,2	320,0	4,4	5,7	0,02	0,0	5,5
		Ecart type	0,64	25	0,14	3,9	1,4	0,1	0,1	18,0	0,3	0,5	0,01	0,2	0,5
		Coeff. Var.	6,6%	5,4%	1,7%	7,1%	4,7%	6,7%	33,7%	5,8%	6,8%	9,2%	55,8%	209,3%	8,8%
Lissignol	1	Nbre valeurs	21	21	21	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	12,44	465	7,6	62,4	23,9	1,5	0,3	310,9	2,9	4,3	0,02	1,7	6,3
		Médiane	12,41	459	7,5	62,5	23,9	1,5	0,3	309,0	2,9	4,2	0,02	1,6	6,3
		Ecart type	1,07	20	0,17	3,1	0,8	0,1	0,0	5,9	0,1	0,5	0,01	0,2	0,3
		Coeff. Var.	8,6%	4,2%	2,2%	5,0%	3,4%	7,7%	15,9%	1,9%	4,4%	12,0%	38,5%	14,6%	4,4%
Moulinets	1	Nbre valeurs	26	26	26	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	12,33	503	7,6	72,2	21,8	1,9	0,6	323,5	3,9	6,5	0,03	6,4	5,8
		Médiane	12,38	497	7,6	71,1	22,1	1,8	0,6	326,0	3,8	6,5	0,03	6,4	5,9
		Ecart type	0,27	23	0,17	5,8	1,8	0,1	0,1	9,4	0,4	0,2	0,00	1,7	0,4
		Coeff. Var.	2,2%	4,5%	2,2%	8,1%	8,1%	7,4%	11,2%	2,9%	10,0%	3,3%	18,8%	27,1%	6,1%
Prades	1	Nbre valeurs	22	22	22	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	12,50	484	7,4	65,7	24,4	1,6	0,3	318,7	3,0	3,8	0,02	3,5	5,7
		Médiane	12,53	482	7,3	65,8	24,5	1,5	0,4	318,0	3,0	3,7	0,02	3,4	5,7
		Ecart type	0,25	22	0,14	4,0	0,7	0,1	0,1	5,9	0,2	0,2	0,01	0,9	0,3
		Coeff. Var.	2,0%	4,6%	1,9%	6,0%	2,9%	8,4%	20,9%	1,8%	7,3%	5,8%	29,7%	27,4%	5,3%
Biau	1	Nbre valeurs	24	24	24	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	10,87	505	7,6	66,9	28,7	1,8	0,2	341,2	3,4	5,6	0,02	1,1	1,8
		Médiane	10,91	505	7,6	67,5	28,9	1,7	0,2	343,0	3,4	5,6	0,02	1,1	1,8
		Ecart type	0,15	19	0,15	3,2	0,9	0,2	0,0	8,2	0,3	0,2	0,01	0,2	0,1
		Coeff. Var.	1,3%	3,7%	1,9%	4,8%	3,1%	12,5%	18,2%	2,4%	10,0%	2,9%	40,5%	18,9%	4,3%
Sourguettes	1	Nbre valeurs	15	15	15	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
		Moyenne	10,47	545	7,5	78,5	24,6	1,6	0,7	363,9	3,3	3,6	0,06	4,4	3,7
		Médiane	10,53	547	7,5	78,7	25,6	1,7	0,6	368,0	3,2	3,5	0,06	4,4	3,7
		Ecart type	0,34	13	0,22	4,5	3,0	0,2	0,1	10,7	0,5	0,3	0,01	0,5	0,5
		Coeff. Var.	3,3%	2,4%	2,9%	5,8%	12,3%	15,1%	9,7%	2,9%	13,5%	9,3%	14,8%	11,7%	13,7%
Triadou	1	Nbre valeurs	28	28	28	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Moyenne	12,13	468	7,5	65,1	22,3	1,8	0,6	306,4	3,6	4,9	0,03	3,6	5,4
		Médiane	12,20	465	7,5	64,5	22,4	1,8	0,6	306,0	3,5	5,0	0,03	3,4	5,5
		Ecart type	0,28	16	0,16	4,0	1,4	0,2	0,1	3,0	0,3	0,5	0,01	0,4	0,4
		Coeff. Var.	2,3%	3,3%	2,2%	6,1%	6,4%	11,0%	16,0%	1,0%	9,4%	10,8%	35,8%	11,7%	7,5%



Source	Catégorie	Paramètre statistique	Température (°C)	Conductivité (µS/cm à 25°C)	pH	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)
Pas de L'Ane	1	Nbre valeurs	11	11	10	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		Moyenne	10,21	165	7,6	20,2	9,4	2,5	0,6	131,5	3,6	8,4	0,02	1,2	5,0
		Médiane	9,94	173	7,6	20,6	9,2	2,5	0,6	103,0	3,5	7,1	0,02	1,1	4,9
		Ecart type	1,82	52	0,27	3,6	1,7	0,3	0,1	83,5	0,4	3,1	0,00	0,4	0,3
		Coeff. Var.	17,8%	31,7%	3,5%	17,8%	18,5%	11,3%	11,8%	63,5%	10,1%	37,1%	20,4%	33,7%	6,1%
Fontaine des Moulinets	2	Nbre valeurs	13	13	13	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		Moyenne	12,47	498	7,3	76,9	20,0	2,2	0,3	320,8	4,2	6,2	0,02	2,7	5,4
		Médiane	12,52	485	7,3	76,0	19,8	2,2	0,3	319,5	4,2	6,1	0,02	2,8	5,4
		Ecart type	0,34	31	0,09	7,0	1,7	0,2	0,1	7,6	0,6	0,4	0,01	0,4	0,6
		Coeff. Var.	2,8%	6,2%	1,2%	9,1%	8,4%	10,1%	23,6%	2,4%	14,8%	6,3%	35,4%	16,4%	11,9%
Gardies	2	Nbre valeurs	14	14	14	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		Moyenne	9,12	246	7,8	36,8	8,5	2,3	0,5	145,8	3,9	7,5	0,02	2,7	4,6
		Médiane	8,52	238	7,7	33,2	8,0	2,3	0,5	134,0	3,8	7,3	0,03	2,5	4,3
		Ecart type	1,20	47	0,42	7,8	1,6	0,1	0,1	25,1	0,2	0,9	0,01	1,0	0,4
		Coeff. Var.	13,2%	19,3%	5,3%	21,3%	18,9%	3,2%	14,4%	17,2%	6,4%	11,8%	33,3%	35,0%	9,4%

Tableau 24. Synthèse statique de la base de données physico-chimiques et hydrochimiques des sources de catégorie 1 (+ Fontaine des Fournets et Gardies de catégorie 2)





4.3 Diagramme de Piper

A partir de la base de données établie, les diagrammes de Piper pour chacune des 15 source de catégorie 1 sont reportés en annexe I. Ces diagrammes ont été réalisée avec le logiciel Diagramme, développé par l'Université d'Avignon.

Pour certaines sources (Biau, La Fon, Lissignol, Monna), les points sont regroupés dans la même portion du diagramme, ce qui montre que le faciès chimique n'évolue pas ou peu au sein des systèmes aquifères.

D'un point de vue global, le diagramme de Piper présenté en Figure 46 a été établi à partir de la valeur moyenne de chaque élément pour chacune des sources de catégorie 1. Cette représentation permet de comparer le faciès chimique des sources.

Toutes les sources présentent un faciès bicarbonaté calcique avec un pôle magnésien plus marqué pour certaines sources (Villaret, Biau, Prades, Lissignol, etc.). Cet élément issu de la dissolution des dolomies, est le pôle le plus discriminant d'un point de vue chimique, des eaux émergeant du Causse Noir. Ce résultat est cohérent avec qui correspond à des eaux souterraines ayant circulé dans les roches carbonatées, calcaires et dolomitiques, du Jurassique qui constituent le Causse Noir (Cf. Figure 3).



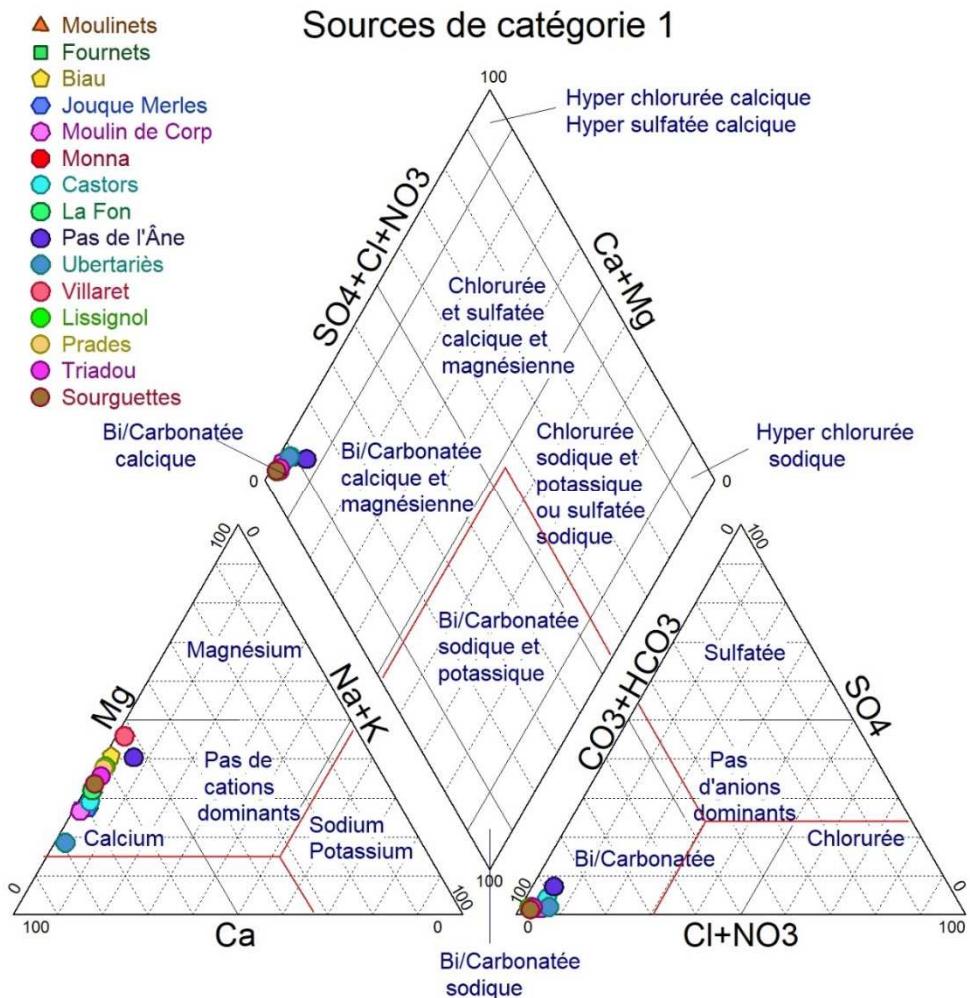


Figure 46. Diagramme de Piper des sources de catégorie 1

4.4 Diagramme de Stiff

Contrairement au diagramme de Piper, le diagramme de Stiff propose une lecture plus fine du faciès chimique des eaux car il permet la représentation simultanée de 6 pôles chimiques distincts (Na^+K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^-$ et $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$) contre 4 pour le diagramme de Piper ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^-$ et Na^+K^+). Les diagrammes des Stiff sont présentés en Figure 47.

On peut ainsi distinguer 5 groupes de faciès chimiques dans les sources de catégorie 1 (et 2 pour la source de Gardies) selon la forme du diagramme de Stiff :

- 1 : Biau, Lissignol, Prades, Triadou, Monna, La Fon ;
- 2 : Moulinets, Fournets et Moulin de Corp ;



- 3 : Jouque Merles et Castors ;
- 4 : Pas de l'Âne et Gardies
- 5 : Villaret.

Les groupes 1 et 2 sont comparables mais diffèrent sensiblement vis-à-vis du pôle constitué par le magnésium. La concentration en magnésium est plus élevée dans le cas du groupe 1, marquant la circulation des eaux au sein d'un aquifère de nature dolomitique plus marquée.

Le groupe 3 se distingue du groupe 2 par des concentrations moins élevées en carbonates ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^-$) et en magnésium et carbonates par rapport au groupe 1. Ces eaux sont moins minéralisées ce qui indique des temps de transferts moins importants au sein de l'aquifère et/ou une influence marquée de l'apport d'eaux superficielles. Les sources de Jouque Merles sont en effet caractérisées par une alimentation de type binaire avec une partie de la recharge qui est issue d'un système de pertes des cours d'eau du Trévezel et de Garène (Cf. résultats des traçages au § 4).

Le groupe 4 composé par les sources du Pas de l'Âne et de Gardies caractérise des eaux peu minéralisées directement influencées par les eaux superficielles. La source du Pas de l'Âne est en effet une résurgence de .

Ces diagrammes permettent donc d'affiner l'interprétation des faciès chimiques des eaux, et donc de leur origine, par rapport à la représentation qu'apporte le diagramme de Piper.



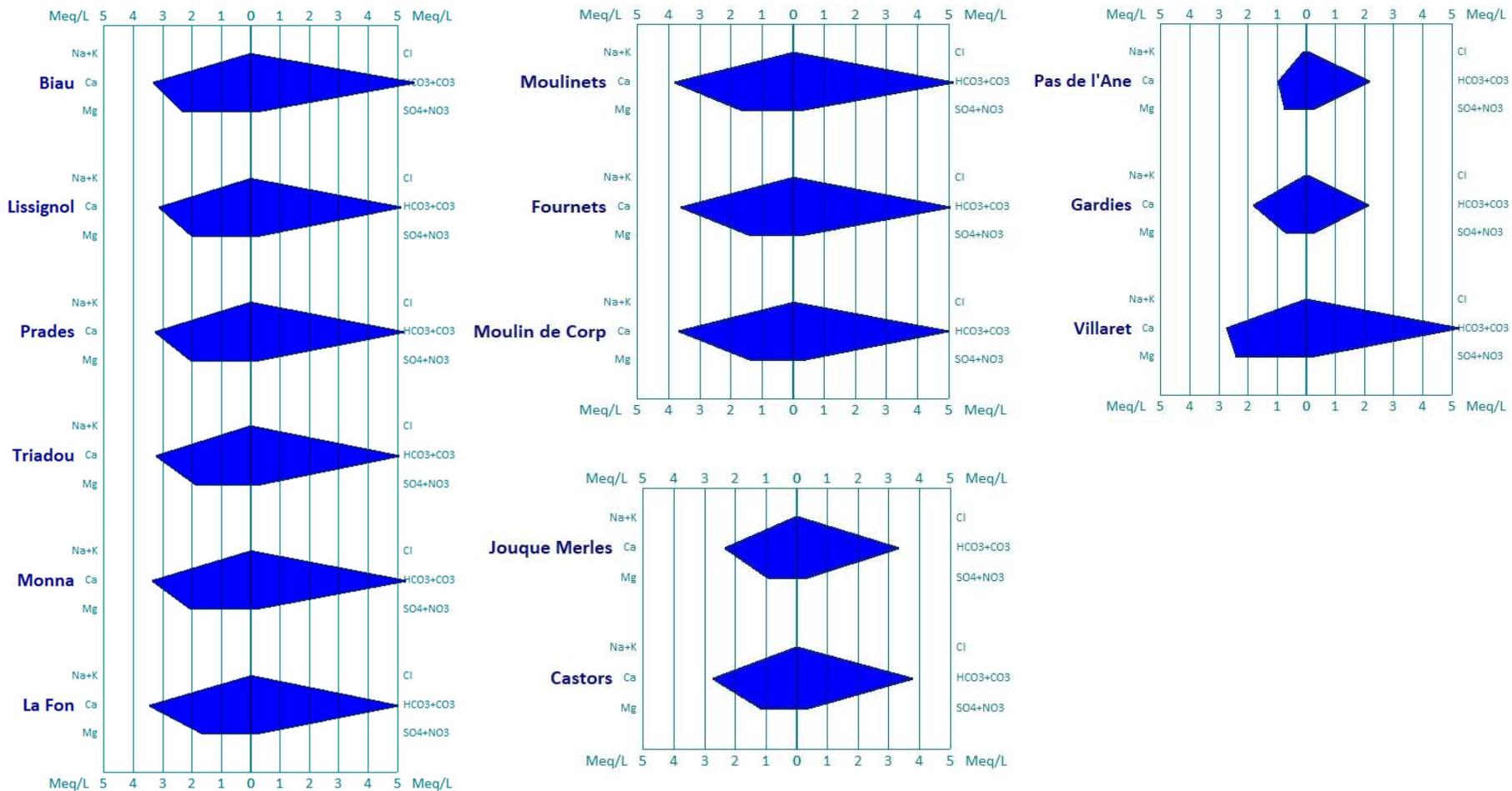
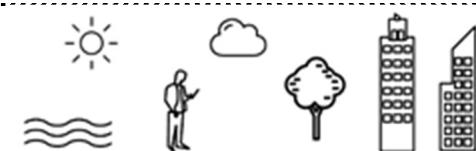


Figure 47. Diagrammes de Stiff des sources de catégorie 1



4.5 Analyse du rapport $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$

Comme indiqué précédemment, le calcul du rapport Ca/Mg permet de caractériser le contact eau/roche et donc la nature de l'encaissant dans lequel circule l'eau. Ce calcul a été réalisé pour les sources de catégorie 1.

Les résultats sont présentés ci-dessous (graphe réalisé à l'aide du logiciel Diagrammes).

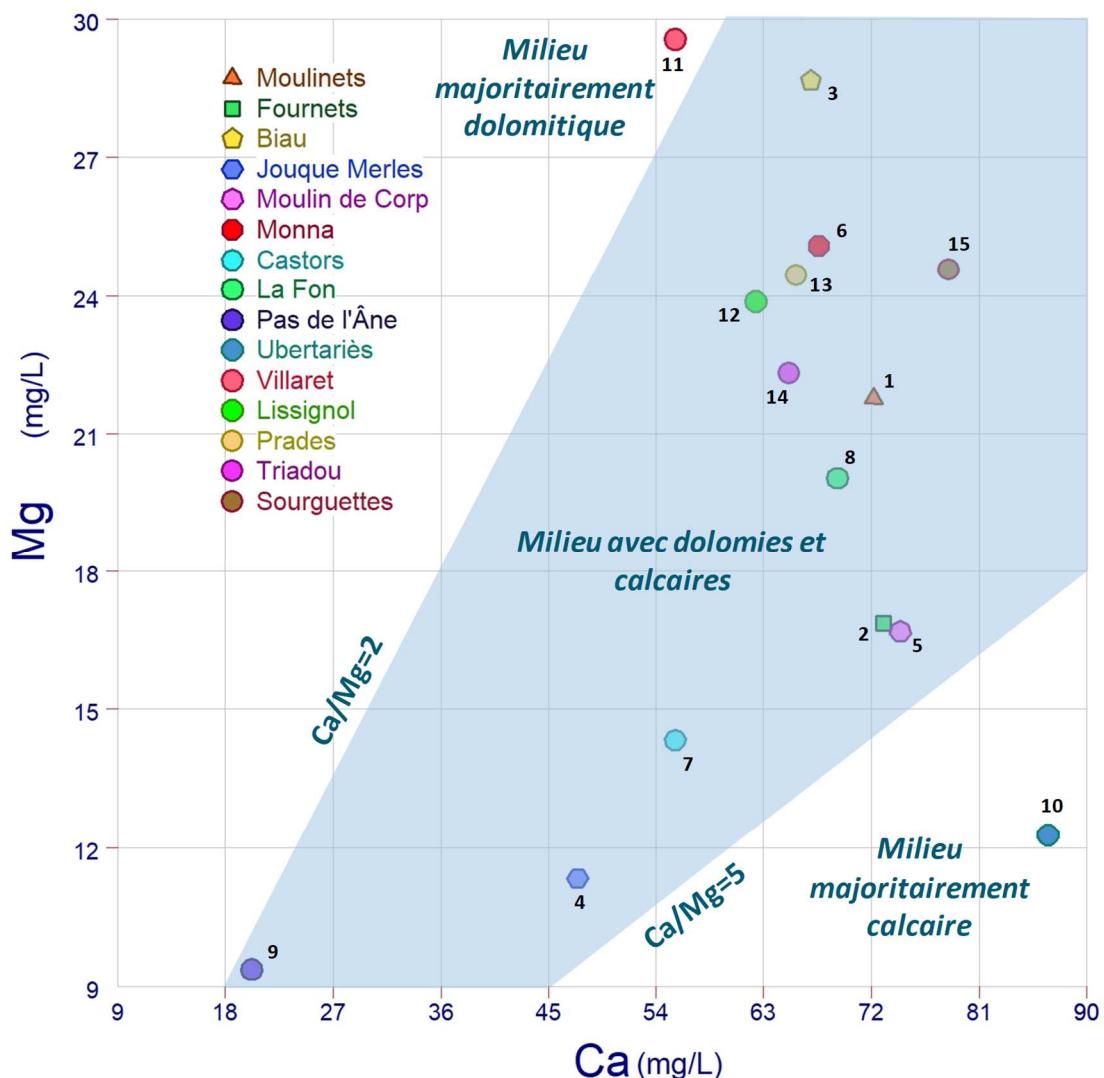


Figure 48. Graphique de la relation $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ pour les sources de catégorie 1



Les résultats permettent de distinguer les systèmes aquifères du Causse Noir de la manière suivante :

- Aquifère de nature à dominance calcaire : Ubertariès ;
- Aquifère de nature à dominance dolomitique : Villaret ;
- Aquifère calcaire et dolomitique : Biau, Castors, Fournets, Gardies, Jouque Merles, La Fon, Lissignol, Monna, Moulinets, Moulin de Corp, Pas de l'Âne, Sourquettes, Triadou.

4.6 Relation $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$

Un autre moyen de caractériser les écoulements au sein de l'encaissant est d'étudier les rapports $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ et $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$.

Plummer et *al.* (1978) et plus tard Dreybrodt et *al.* (1996) ont montré que l'équilibre de la réaction de dissolution des carbonates met plusieurs jours, voire plusieurs mois à se réaliser (en fonction des teneurs en CO_2 dissous). Ainsi, plus la valeur de ce rapport est élevée, plus les eaux concernées ont séjourné longtemps au sein de l'aquifère.

En outre, les valeurs des rapports $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ et $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ devraient théoriquement être égales à 1 dans le cas d'une mise en solution de carbonates purs (CaCO_3) et pour le second dans le cas d'un mélange de carbonates purs et de carbonates de magnésium.

Les rapports $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ ont été calculés pour les 15 sources de catégorie 1 à partir des valeurs moyennes de ces éléments (concentrations transformées en meq/l). Les résultats sont présentés en Figure 49 et mettent en évidence une variabilité importante entre les sources de Pas de l'Âne et de Sourquettes qui constituent les 2 extrêmes.

Les eaux de la source Sourquettes sont donc caractérisées par un temps de séjour long, tout comme la source Biau qui se démarque également de la majorité des sources. La majorité des autres sources est regroupée, ce qui montre une certaine homogénéité du fonctionnement (et de la nature) des systèmes à l'échelle du Causse Noir.

Il est en outre logique de retrouver la source Pas de l'Âne à l'autre extrémité du graphique du fait de son origine superficielle (résurgence du Trévezel). Le caractère binaire de l'alimentation des systèmes de Gardies, de Jouque Merles et de Castors est également mis en valeur grâce à cette analyse. On peut également constater que l'influence de ce type de fonctionnement est moins marquée pour les systèmes de Moulin de Corp et Fournets.



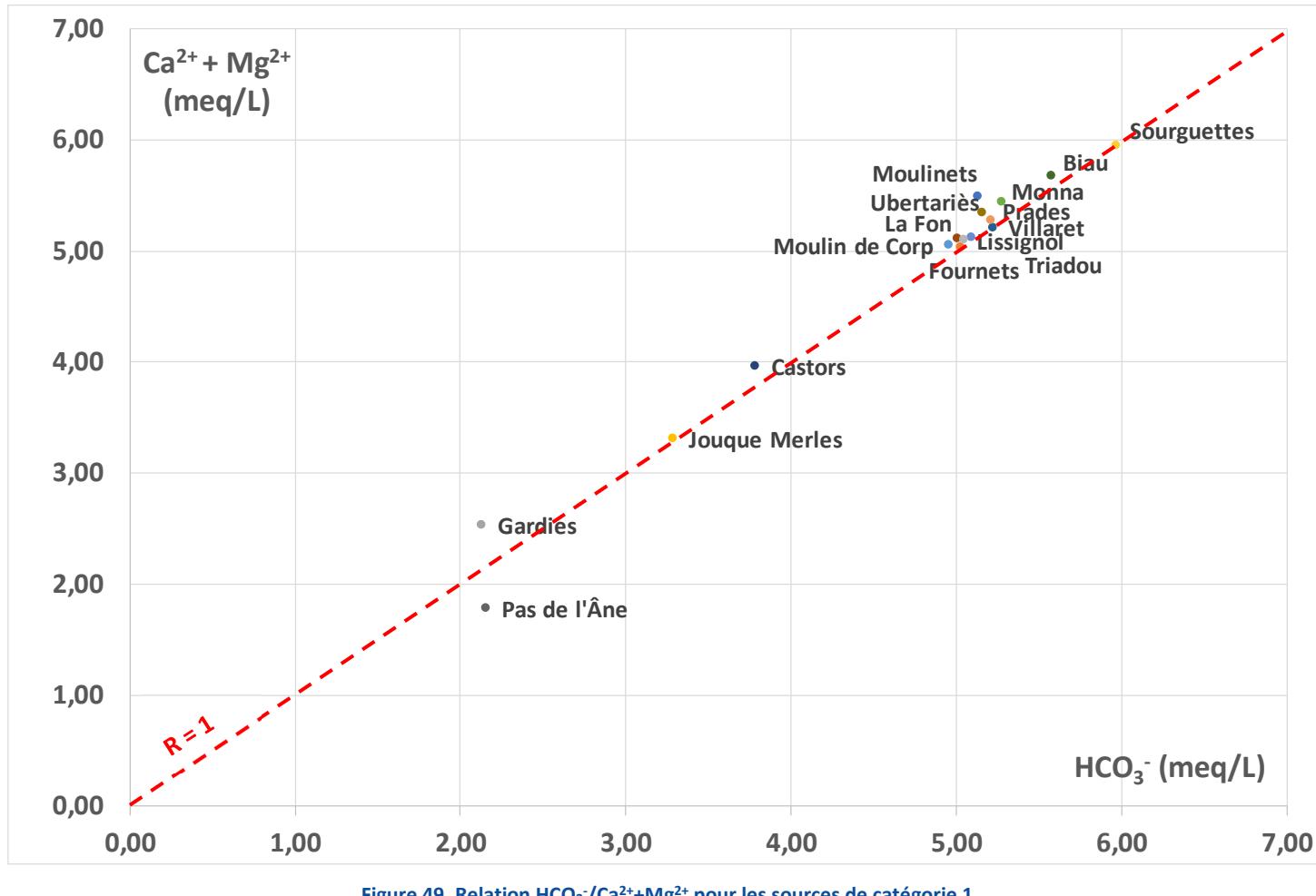
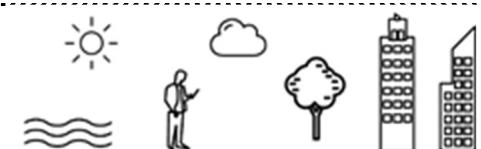


Figure 49. Relation $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ pour les sources de catégorie 1



4.6.1 Distribution des fréquences de conductivité

a. Rappels

D'après Bakalowicz (1979), « la courbe de distribution d'un paramètre géochimique d'échantillons d'eau, représentatifs des variations saisonnières au cours d'un cycle hydrologique, donne une image convenable du degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquifères carbonatés ».

La distribution des fréquences de minéralisation (ou de conductivité) est une méthode descriptive des variations hydrochimiques, établie par Bakalowicz en 1977, qui s'applique quasi systématiquement dans les études portant sur les exutoires des aquifères karstiques et plus généralement des systèmes carbonatés. Certains auteurs ont par ailleurs adapté ce type de calcul aux séries de données concernant la température afin de différencier le fonctionnement de certains aquifères karstiques (Freixes et al., 1998).

Cette méthode consiste à considérer « *la courbe des variations de la minéralisation au cours du cycle hydrologique comme la fonction aléatoire de la variable régionalisée "minéralisation". La distribution de fréquence des valeurs de cette variable représente une loi de probabilité qui définit cette fonction aléatoire* ». La courbe obtenue permet d'une part, de mettre en évidence le fonctionnement des aquifères étudiés et d'autre part, de déterminer le degré de développement du système de drainage karstique en profondeur. Toutefois, ces interprétations n'ont de sens qu'à la condition que les échantillons (les mesures) soient suffisamment nombreux et répartis de manière homogène au cours du cycle hydrologique.



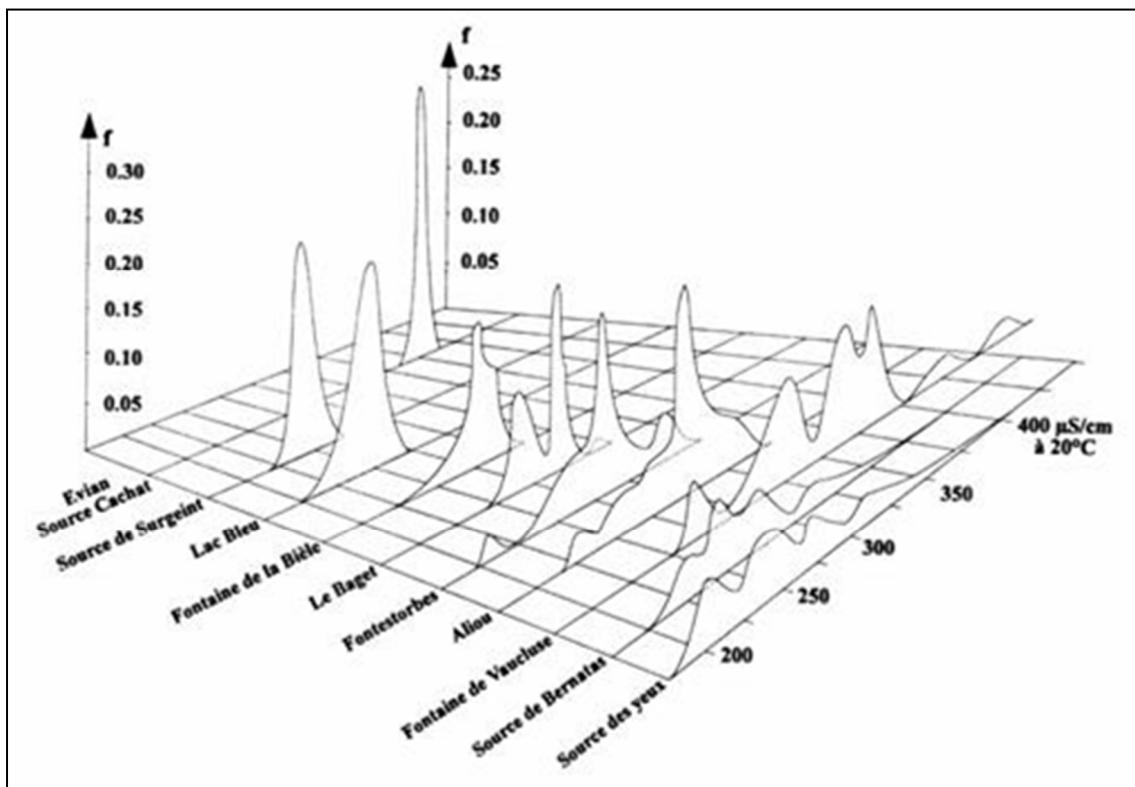
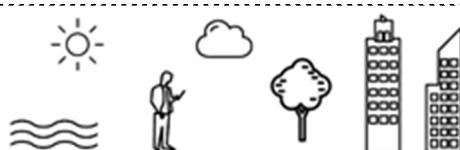


Figure 50. Distribution de fréquence des valeurs de la conductivité des eaux de sources d'aquifères carbonatés poreux (Evian-Cachat), fissurés (Surgeint, Lac bleu) ou plus ou moins karstifiés (Bakalowicz, 1979)

A partir de divers exemples connus (Cf. Figure 50) et représentatifs d'un mode de fonctionnement particulier (fissurés, poreux, karstifiés, etc.), Bakalowicz (1979) a proposé une classification des systèmes carbonatés en fonction des distributions de fréquence de minéralisation. Ainsi, des aquifères de type carbonaté fissuré ou poreux présenteront systématiquement une courbe de distribution unimodale et peu dispersée (Source d'Evian, de Surgeint ou du Lac Bleu, Cf. Figure 50), traduisant une chimie homogène au cours du cycle hydrologique. En revanche, les aquifères karstiques montrent des courbes de distribution plurimodales et très étalées (sources de la Fontaine de Vaucluse, d'Aliou, de Bernatas, etc.) caractérisant une grande variabilité de la minéralisation au cours de l'année, due à un réseau de drainage karstique complexe et bien développé. Il est alors possible de comparer n'importe quel aquifère carbonaté à ces systèmes de référence.

Cette méthode a été appliquée aux systèmes étudiés afin de caractériser leur mode de fonctionnement et le degré de développement de leur structure interne. A partir des données hebdomadaires de conductivité mesurée *in situ* et enregistrées en continu, la distribution des fréquences relatives a ainsi été calculée.



b. Analyse des résultats

Les fréquences de conductivité ont été calculées à partir des mesures réalisées de manière ponctuelle *in situ* pour l'ensemble des sources de catégorie 1. Elles sont représentées graphiquement en Figure 51. Précisons que ce calcul n'a pas été réalisé avec les données des sources de catégorie 2 en raison de la taille des échantillons (valeurs disponibles) qui n'est pas suffisamment importante pour considérer les séries de données comme représentatives d'un cycle hydrologique complet.

D'après le graphique de Figure 51, les sources des Castors, de Jouque Merles et du Pas de l'Âne et dans un degré moindre de Villaret, présentent une distribution plurimodale et étalée caractérisant une grande variabilité de la minéralisation au cours de l'année. Pour les deux premières sources, cette variabilité est liée à l'influence du caractère binaire de l'alimentation des systèmes.

Un second groupe de sources est caractérisé une distribution bimodale, avec un premier pic de distribution majeur et un second, de fréquence plus faible mais correspondant à des valeurs de conductivité plus élevées. Il s'agit des systèmes suivants : Fournets, Prades, Biau, Moulinets, Lissignol et Monna. Ce résultat est la conséquence des hausses de conductivité observées à la suite d'évènements pluvieux. Ces hausses sont engendrées par la vidange d'eaux plus anciennes très probablement stockées dans la zone non saturée.

Enfin, un dernier groupe constitué des sources de Moulin de Corp, de La Fon, de Triadou et de Sourguettes, montre des distributions quasi unimodales qui traduisent une chimie homogène tout au long de l'année et des systèmes. On peut relever une nuance pour les systèmes de La Fon et de Moulin de Corp pour lesquels la base du pic de distribution est plus étalé que pour les 2 autres systèmes. Ceci indique une certaine variabilité de la minéralisation au cours du cycle hydrologique mais un fonctionnement qui diffère du groupe précédent par le fait que les perturbations engendrées par les pluies ne se traduisent pas systématiquement par une hausse significative de la conductivité.



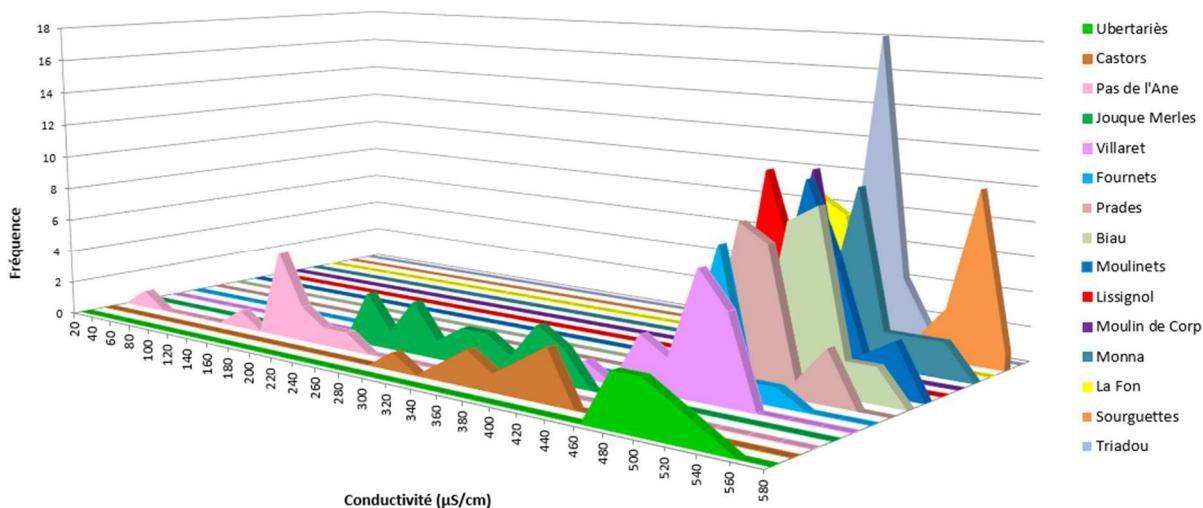


Figure 51. Fréquences de conductivité des sources de catégorie 1

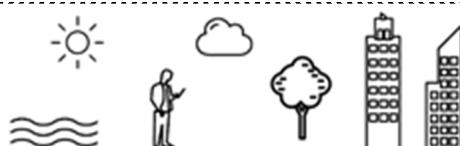
Le même type de calcul a été réalisé avec les données enregistrées à un pas de temps semi-horaire sur les 7 stations de mesures : Biau, Monna, Moulinets, Moulin de Corp, Prades, Triadou et Sourguettes. Les distributions de fréquence calculées sur les données ponctuelles et en continu sont ainsi comparées. Les résultats sont présentés sur 2 graphes distincts (Cf. Figure 52) dans un souci de facilité leur lecture.

Pour le système de Moulinets, les deux distributions calculées sont comparables et restent bimodales. Celle obtenue à partir du suivi en continu laisse entrevoir des valeurs de conductivité plus faibles pour le pic secondaire. Ces valeurs plus faibles sont influencées par des problèmes de mesure de sonde au cours de l'été 2017 (Cf. Figure 43).

Des différences notables sont observées entre les distributions calculées à partir des données ponctuelles et en continu pour les systèmes de Moulin de Corp et de Triadou. Pour le premier, la distribution devient nettement plurimodale et traduit l'influence des pertes du Trévezel qui alimentent en partie l'aquifère avec des transferts rapides vers l'émergence. Pour Triadou, le constat est le même, l'origine diffère en revanche. La variabilité mesurée à partir du suivi en continu est en grande partie due à l'influence d'eaux météoriques en période pluvieuse qui parasitent les mesures.

Pour les systèmes de Biau, de Monna et de Prades, le suivi en continu permet à l'inverse d'observer une homogénéisation de la minéralisation des seaux écoulées à la source à l'échelle du cycle hydrologique.

Pour le système de Sourguettes, la distribution reste unimodale mais est plus étalée avec les données enregistrées en continu, ce qui est plus représentatif de son mode de fonctionnement.



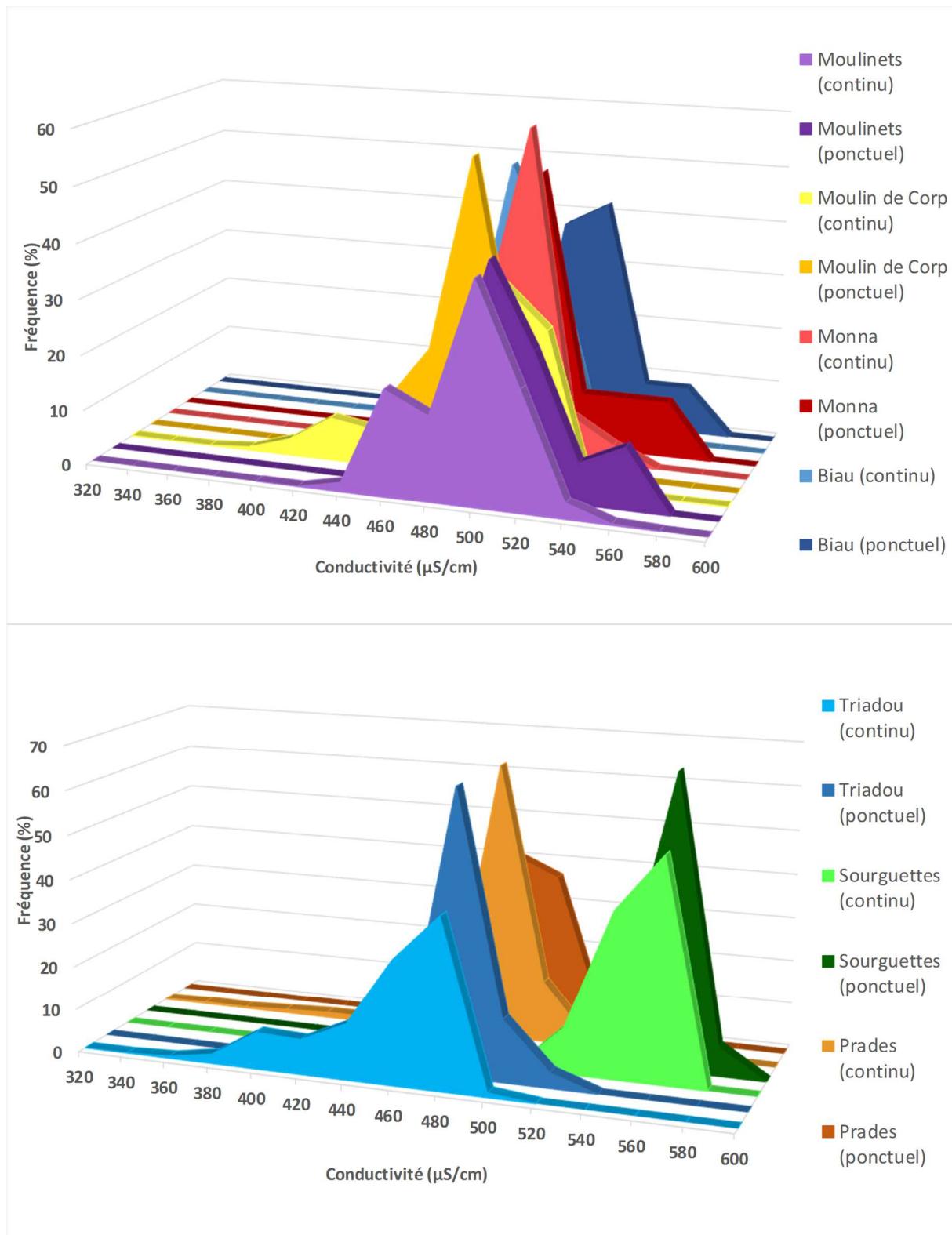


Figure 52. Comparaison des fréquences de conductivité calculées à partir du suivi ponctuel et continu



4.6.2 Etude de la relation pCO₂/ISc

a. Rappels

Les roches carbonatées sont peu solubles dans l'eau mais en présence d'un acide, produit par exemple par la dissolution du CO₂ dans l'eau (formation de H₂CO₃ qui en se dissociant provoque la libération d'ions H⁺), leur solubilité augmente considérablement (Dreybrodt et al., 1996).

Le développement d'un système carbonaté fissuré vers un système karstique est donc étroitement lié à la pression de CO₂. L'apport de gaz carbonique est d'origine multiple, l'atmosphère y contribue mais pour une faible proportion environ 3,4 10⁻⁴ atm (Michard, 1989), la grande majorité de la production de CO₂ est en effet attribuée à des phénomènes pédologiques comme la dégradation de la matière organique, catalysée par la présence de bactéries, ou la respiration racinaire et des micro-organismes (l'activité de ces organismes dans le sol étant maximale pour des températures élevées).

Le CO_{2g} est ensuite mis en solution lors de l'infiltration des eaux météoriques dans le sol, elles acquièrent alors un potentiel « agressif » vis-à-vis de la matrice carbonatée et vont pouvoir la dissoudre en profondeur, entraînant la formation d'espèces carbonatées dissoutes (H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻). L'état d'équilibre d'une solution peut être défini par deux paramètres :

- la pCO₂ équilibrante qui correspond à la pression partielle de la phase gazeuse fictive associée à la solution, dont la minéralisation (HCO₃⁻) et le pH sont donnés, pour laquelle chacun des équilibres serait atteint :

$$\log p\text{CO}_2\text{éq} = \log [\text{HCO}_3^-] - \log (K_1) - \log (K_0) + \text{pH}_{\text{mesuré}}$$

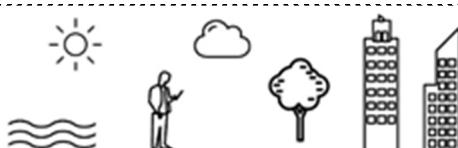
avec [X] : activité de l'ion, K₁ : constante de dissociation de H₂CO₃, K₀ : constante de dissociation de Henry.

- l'indice de saturation (ISc ou dpH = pH_{mesuré}-pH_{calculé}), proposé par Back et Hanshaw [1970] :

$$\text{ISc} = \log [\text{Ca}^{2+}] + \log (K_2) + \log [\text{HCO}_3^-] - \log (K_s) + \text{pH}_{\text{mesuré}}$$

avec K_s : constante d'équilibre de la calcite (à la température de l'échantillon), K₂ : constante d'équilibre de dissociation des bicarbonates (à la température de l'échantillon), [X] : activité des ions en solution. Si 0,1 ≥ ISc ≥ -0,1 la solution est considérée à l'équilibre, si ISc > + 0,1 elle est sursaturée et il y a précipitation de carbonates et enfin si ISc < - 0,1 la solution est sous-saturée et il y a dissolution de carbonates.

Les calculs de la pCO₂ et des indices de saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite ont été réalisés grâce aux logiciels et AQUACHEM© qui prennent en compte la force ionique de



chaque espèce en solution dans les calculs d'équilibres. L'ensemble des résultats des calculs est présenté en annexe II.

b. Analyse des résultats

La Figure 53 montre la relation entre l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite et le logarithme de la pCO₂ pour les sources de catégorie 1. Ce mode de représentation (Harum et al., 1992a et 1992b) est couramment utilisé dans les études hydrogéologiques sur les aquifères carbonatés (Lastennet, 1994 et Emblanch, 1997) et permet de comparer les caractéristiques des différents systèmes étudiés.

Ce qui ressort de ces calculs, c'est qu'il existe une similarité de certains systèmes aquifères qui se distinguent en 4 groupes par un coefficient de régression comparable :

- 1 : les sources des Fournets, de Biau, des Moulinets, de Sourguettes et dans une moindre mesure celle des Castors. En effet, la relation linéaire pCO₂/ISc pour cette dernière source est moins significative d'un point de vue statistique au vu du coefficient de détermination (0,40). La part de la variance de l'ISc expliquée par la pCO₂ est donc faible dans ce cas précis. Pour les autres sources, les valeurs du coefficient de régression sont proches de - 1 et indiquent une faible variabilité des éléments carbonatés au cours de la période d'étude (ainsi que des paramètres tels que la température et la conductivité), ce qui montre une faible karstification de ces systèmes. Ce résultat est toutefois surprenant dans le cas du système de Fournets qui présente une karstification développée et un fonctionnement binaire. Le spectre d'échantillonnage est probablement trop restreint pour mettre en évidence le comportement réel de ce système ;
- 2 : les sources de Triadou, Ubertariès, La Fon et Lissignol sont également caractérisées par des valeurs de coefficient de régression relativement proches de -1. Ces systèmes sont également caractérisés par une faible variabilité des éléments carbonatés et une karstification peu marquée ;
- 3 : les sources de Prades, Moulin de Corp, Villaret et Fontaine des Moulinets. Ces systèmes présentent des coefficients de régression compatibles avec une variabilité plus significative des éléments carbonatés et donc la mise en évidence d'apports rapides d'eaux depuis la surface ;
- 4 : les sources de Jouque Merles et de Gardies. Les relations pCO₂/ISc pour ces deux sources sont les seules à présenter un coefficient de régression positif. Les coefficients de détermination sont également peu élevés (<0,40). Notons que pour Gardies le nombre d'échantillons est faible et donc peu représentatif du fonctionnement de la source. Cette variabilité peut également s'expliquer par le fait que la source est alimentée par des pertes du Trévezel, tout comme Jouque Merles qui fonctionne de manière binaire avec les pertes du Trévezel.



Ces conclusions sont cependant à nuancer en raison de la fréquence mensuelle des analyses à partir desquelles les calculs d'équilibre ont été réalisés. En effet, dans le cas d'aquifère karstique, le pas de temps mensuel n'est la plupart du temps pas suffisant pour appréhender l'ensemble des phénomènes qui peuvent se produire. Le suivi en continu des paramètres physico-chimiques va permettre une interprétation plus fine du fonctionnement de ces systèmes aquifères.

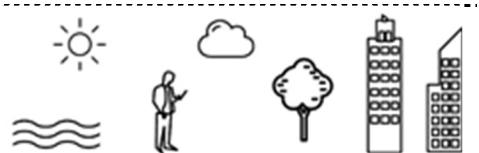
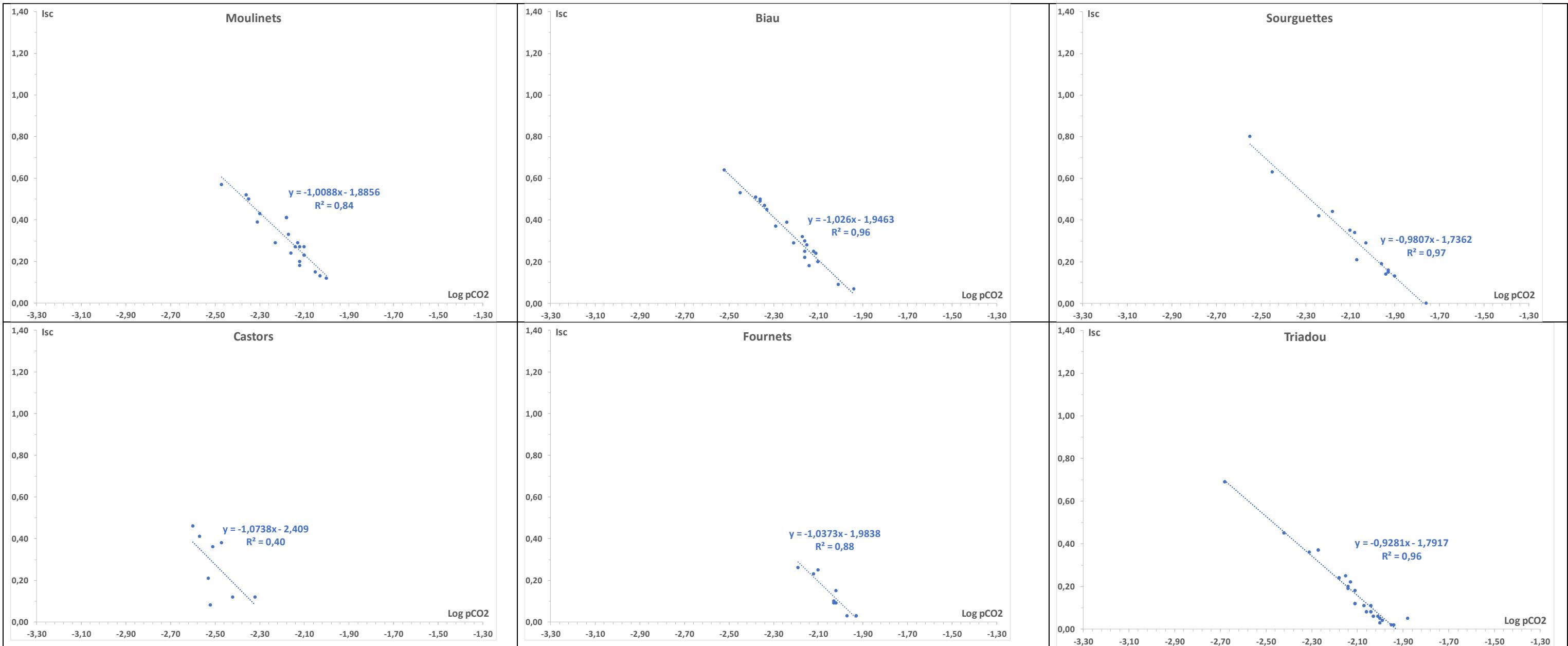
Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 25 en page suivante.

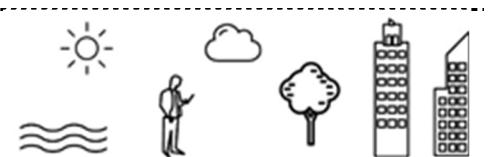
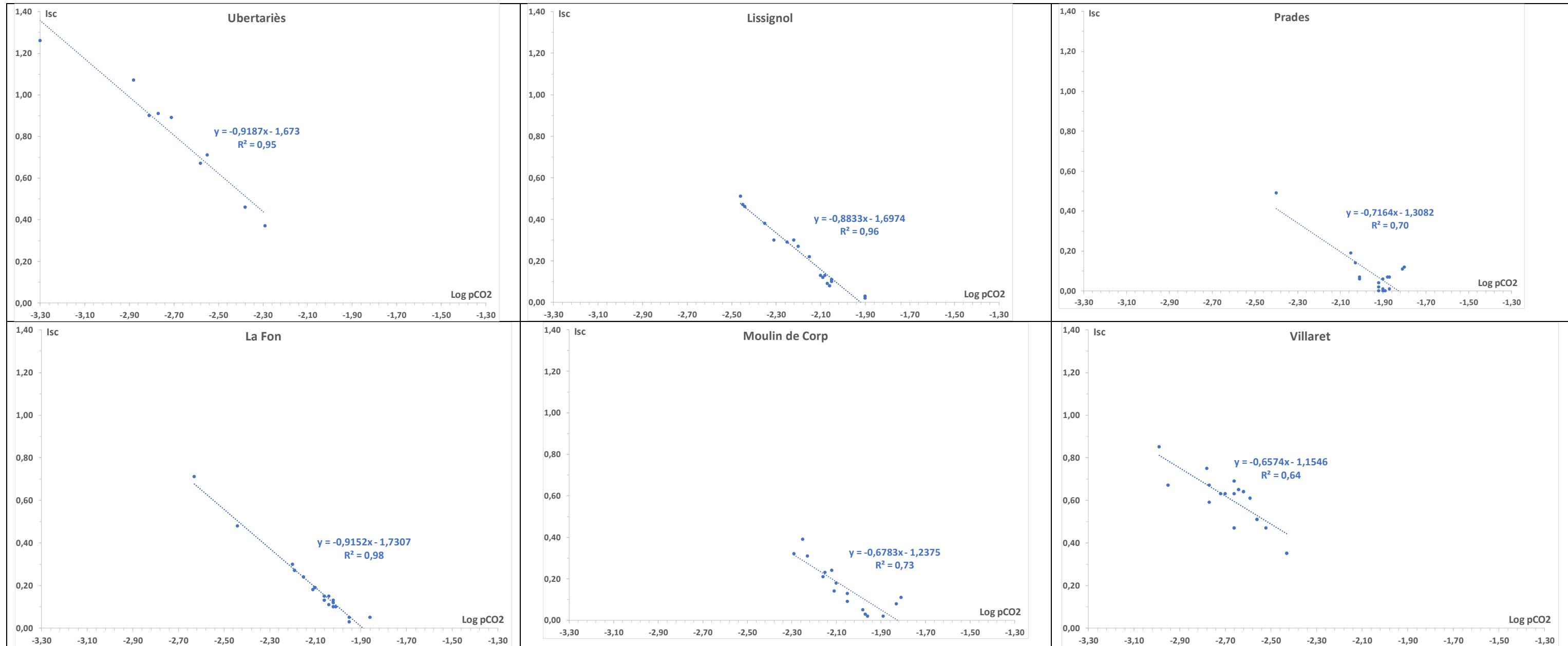
Groupe	Source	Relation Isc/pCO ₂	Coefficient de détermination
1	Castors	y = -1,07x - 2,409	0,40
1	Fournets	y = -1,04x - 1,9838	0,88
1	Biau	y = -1,03x - 1,9463	0,96
1	Moulinets	y = -1,01x - 1,8856	0,84
1	Sourguettes	y = -0,98x - 1,7362	0,97
2	Triadou	y = -0,93x - 1,7917	0,96
2	Ubertariès	y = -0,92x - 1,673	0,95
2	La Fon	y = -0,92x - 1,7307	0,98
2	Lissignol	y = -0,88x - 1,6974	0,96
3	Prades	y = -0,72x - 1,3082	0,70
3	Moulin de Corp	y = -0,68x - 1,2375	0,73
3	Villaret	y = -0,66x - 1,1546	0,64
3	Fontaine des Moulinets	y = -0,65x - 1,1439	0,51
3	Monna	y = -0,55x - 0,9826	0,63
4	Jouque Merles	y = 0,54x + 1,5002	0,34
4	Gardies	y = 0,34x + 1,163	0,40

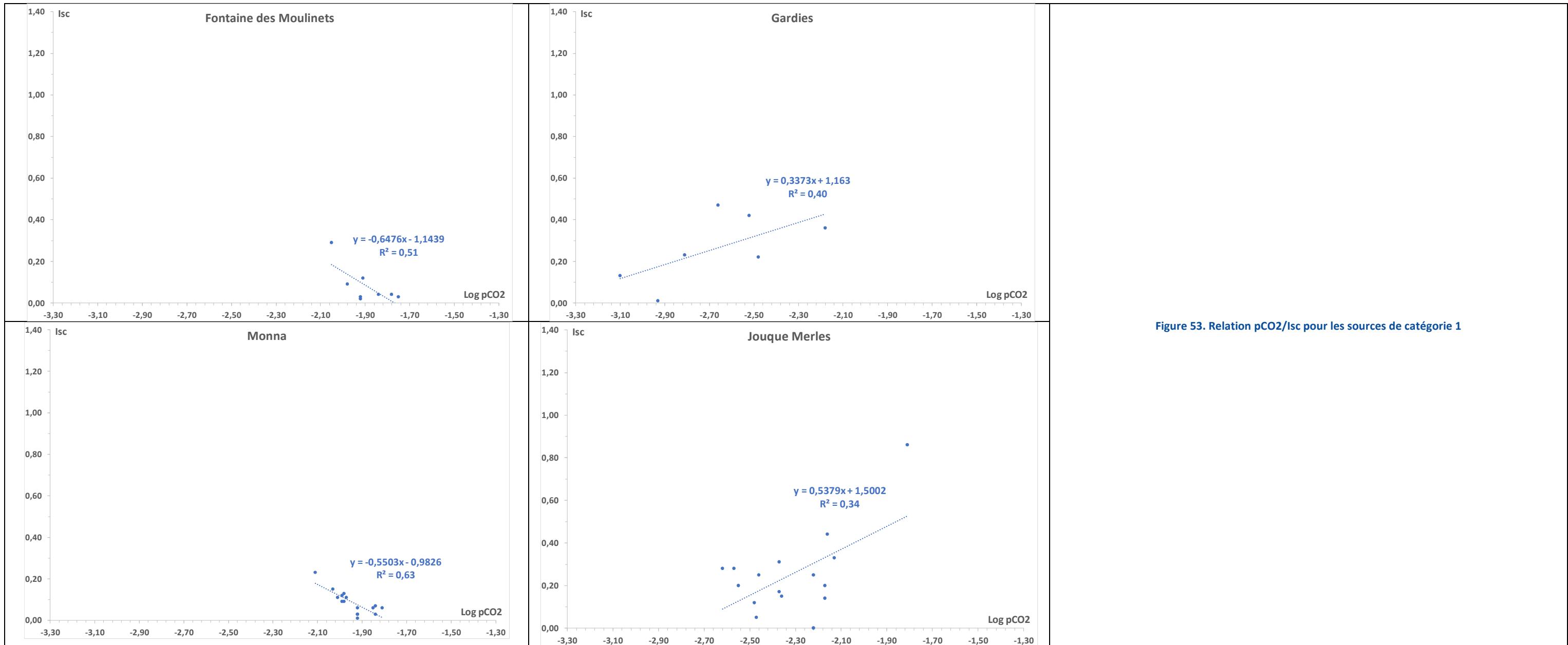
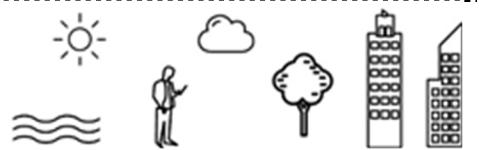
Tableau 25. Synthèse des relations pCO₂/ISc pour les sources de catégorie 1









Figure 53. Relation pCO₂/Isc pour les sources de catégorie 1



4.6.3 Analyse en Composante Principale (ACP)

a. Rappels

L'ACP peut être considérée comme une méthode de projection qui permet de projeter les observations depuis l'espace à p dimensions des p variables vers un espace à k dimensions ($k < p$) tel qu'un maximum d'informations soit conservé (l'information est ici mesurée au travers de la variance totale du nuage de points) sur les premières dimensions. Si l'information associée aux 2 ou 3 premiers axes représente un pourcentage suffisant de la variabilité totale du nuage de points, on pourra représenter les observations sur un graphique à 2 dimensions, facilitant ainsi grandement l'interprétation.

Une analyse en composante principale a été réalisée en utilisant les données hydro-chimiques des eaux des 15 sources de catégorie 1 et 2 de catégorie 2 (Gardies et Fontaine des Moulinets). Les variables sont au nombre de 12 et sont : les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-) auxquels s'ajoutent les paramètres physiques tels que la température, le pH, l'oxygène dissous et la conductivité.

Une analyse préliminaire des variations temporelles des différentes variables au cours du cycle hydrologique étudié montre une relative stabilité temporelle pour toutes les sources. Aussi nous focaliserons notre analyse ACP sur les moyennes des différents paramètres sur ce cycle.

La méthode d'ACP utilisée pour cette étude est basée sur l'interprétation des différents facteurs de la matrice de corrélation obtenue à la suite du traitement des données. Le nuage de points résultant de ce traitement a été projeté dans les différents plans factoriels qui sont déterminés dans l'espace des variables et dans celui des unités statistiques. Le choix des axes principaux tient compte de la réduction du nombre de facteurs. Ce nombre est tel que la somme cumulée des contributions est importante (75 % qui représente les trois quarts de l'inertie totale). En effet, deux variables sont corrélées lorsque leur coefficient de corrélation est supérieur ou égal à 0,7. De plus au niveau des plans factoriels, des variables ne sont représentatives que lorsqu'elles sont proches de l'extrémité de ces facteurs.

Lorsque deux variables sont corrélées, la variation de l'une entraîne celle de l'autre. Le coefficient de corrélation exprime le niveau de corrélation (linéaire) entre les variables : plus il est proche de 1, plus les variables sont corrélées positivement, plus il est proche de -1, plus elles sont corrélées négativement. Un coefficient de corrélation nul indique l'absence de corrélation linéaire. L'utilisation de l'analyse en composantes principales (ACP) pour l'étude globale des eaux souterraines permet une différenciation sur leurs particularités chimiques, une détermination de leurs variations d'ensemble (facteurs) suivant les axes principaux et surtout une caractérisation des différents pôles d'acquisition de la minéralisation.



Les coefficients de corrélation entre les éléments sont reportés dans le tableau suivant :

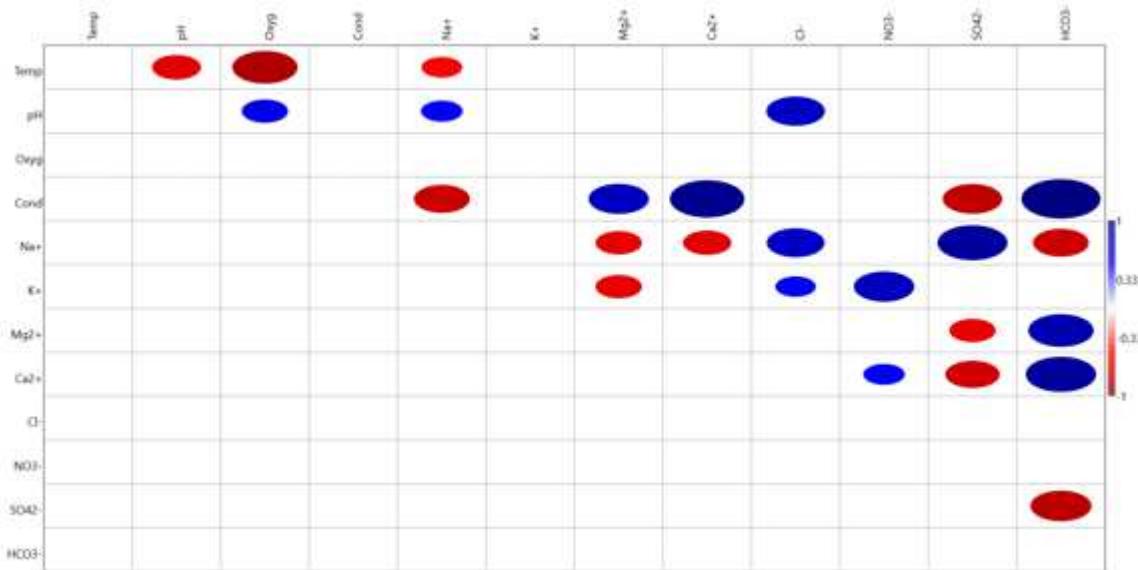


Figure 54. Matrice de corrélation entre les variables

On retrouve les corrélations classiques entre éléments au sein d'un aquifère karstique comme la conductivité qui est corrélée avec les ions hydrogénocarbonates, le calcium et le magnésium. Ceci s'explique par le fait que la nature des aquifères est à dominance calcaire et dolomitique. La minéralisation des eaux est donc essentielle due à ces 3 éléments.

A noter comme on pouvait s'y attendre à la faible corrélation des NO_3^- avec les autres éléments du fait de son origine anthropique.

Puis, au vu de la quasi stationnarité des valeurs des éléments chimiques, nous avons effectué l'ACP sur les moyennes obtenues au cours de l'échantillonnage. Ceci nous donne donc un ensemble de 17 individus.



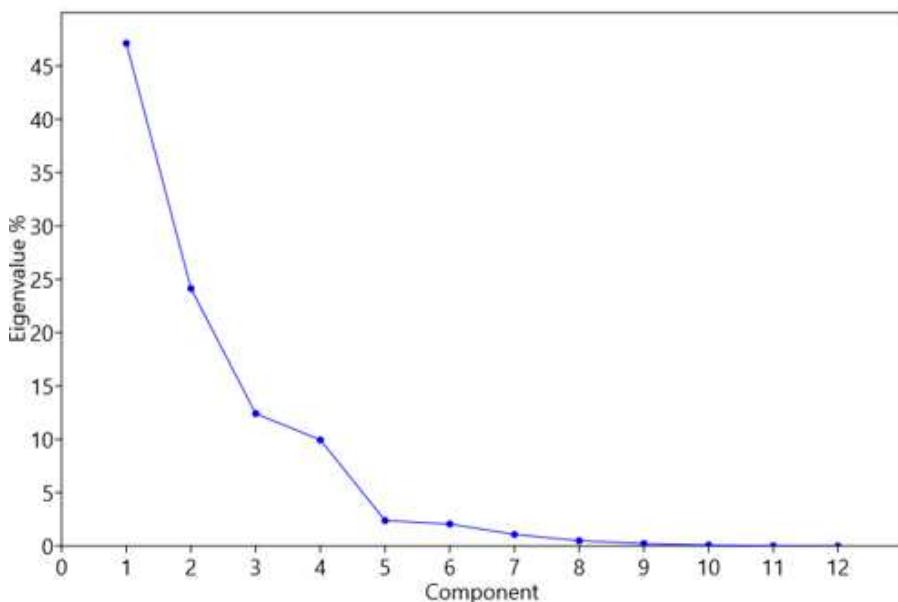


Figure 55. Pourcentage de variance expliquée par composante

Les deux premières composantes concentrent 47% et 24% de la variance totale. Nous nous focaliserons donc dans un premier temps sur ces deux composantes (71 % de la variance expliquée). La projection sur ces deux axes donne les résultats suivants :

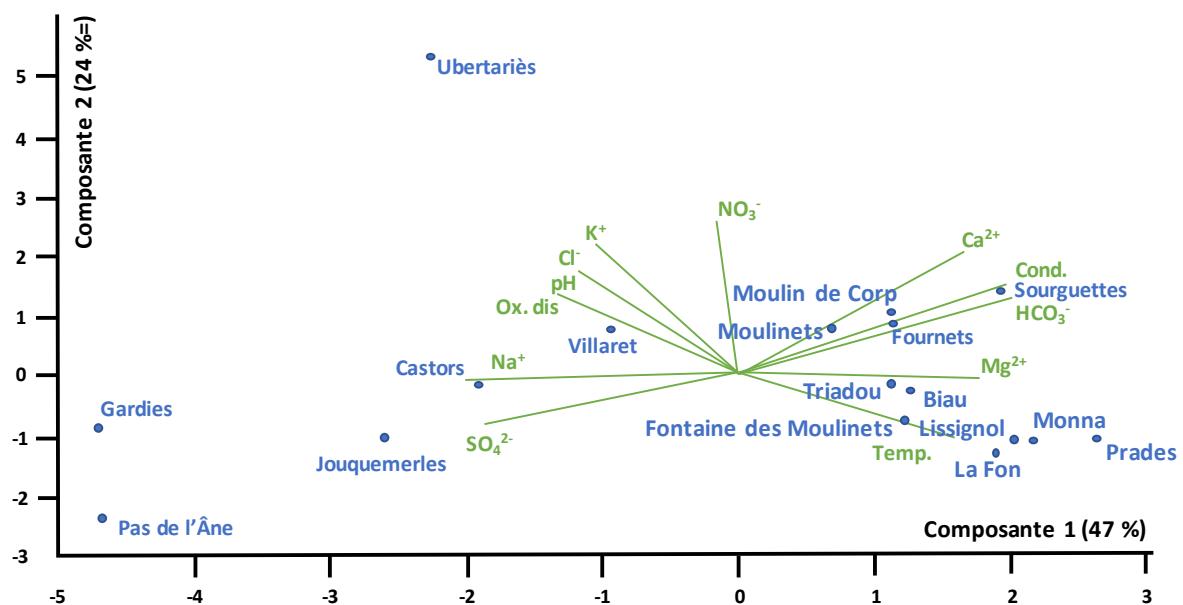


Figure 56. Cercles des corrélations et diagrammes des individus sur les composantes 1 et 2 (71 %)



Ces résultats permettent une lecture globale de la base de données physico-chimiques établie. On peut ainsi distinguer certains systèmes et en regrouper d'autres avec des spécificités physico-chimiques :

- Les systèmes de Gardies, du Pas de l'Âne se distinguent des autres du fait de la faible (très négativement corrélé à la variable conductivité) et des concentrations plus élevées en sulfates tout comme le système de Jouque Merles qui se différencie des autres systèmes par ce biais ;
- Ubertariès se retrouve également isolé de la majorité des autres systèmes du fait d'une eau caractérisée par des teneurs en nitrates et potassium plus élevées que les autres ;
- Le système de Sourguettes se différencie sensiblement des autres à cause des 2 variables conductivité et HCO_3^- . L'eau de la source est en effet la plus minéralisée des 17 sources étudiées ici et présentent les concentrations en hydrogénocarbonates les plus fortes ;
- Les systèmes de Moulinets, Moulin de Corp, Fournets, Triadou et Biau, Fontaine des Moulinets sont proches sur le diagramme. Ils présentent des caractéristiques physico-chimiques homogènes. Tout comme le groupe composé des systèmes Monna, Prades, Lissignol et La Fon caractérisés une composante magnésienne marquée.



4.7 Caractérisation de l'influence anthropique

Il existe plusieurs méthodes pour caractériser l'influence anthropique sur les eaux souterraines à partir de la chimie des eaux. Classiquement, l'analyse des éléments suivants est utilisée : Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} .

La Figure 57 présente l'évolution des concentrations en chlorures de février 2017 à avril 2018 pour les sources de catégorie 1.

Les concentrations moyennes sont majoritairement faibles (inférieures à 4 mg/l). Cependant, deux sources se démarquent par une teneur plus élevée, il s'agit de Villaret et Ubertariès.

La source de La Fon présente des pics de teneur en chlorures en mars 2017 (supérieur à 5 mg.L⁻¹) et en août 2017 (supérieur à 5,5 mg.L⁻¹). La station d'Ubertariès possède globalement une concentration en Cl^- toujours supérieure à 4,5 mg.L⁻¹ et un pic à plus de 5,5 mg.L⁻¹ en mars 2017.

Il est intéressant de noter une augmentation des concentrations sur la période décembre 2017-janvier 2018 pour plusieurs sources : Villaret, Moulinets, Prades, Lissignol, Biau, Monna, Fournets et Triadou. Cette augmentation peut être au salage des routes en hiver qui traversent ces bassins d'alimentation, les sources de Moulinets, Prades, Lissignol, Biau, et Triadou se situant dans le même secteur géographique. Le sel agit dans ce cas comme un traceur de l'activité humaine.

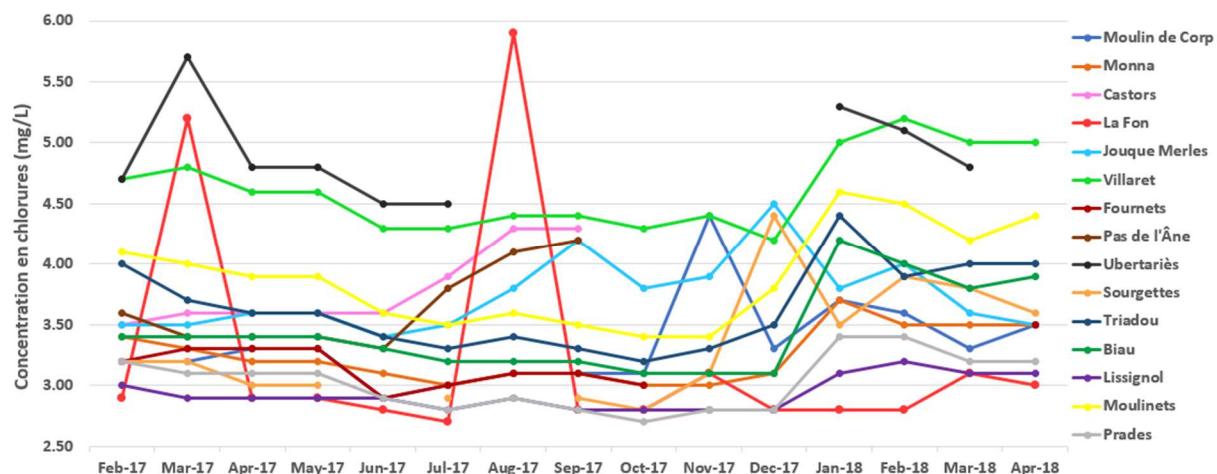


Figure 57. Evolution des teneurs en chlorures des sources de catégorie 1

Concernant les concentrations en nitrates (marqueurs classiques de l'activité agricole), présentée en Figure 58, elles n'excèdent pas 6 mg/l pour la grande majorité des sources. Ces



valeurs correspondent à l'apport naturel issu des précipitations et de l'activité bactérienne dans le sol.

Seuls 3 systèmes se démarquent d'un point de vue de la teneur en nitrates. Il s'agit d'Ubertariès, Moulin de Corp et Fournets qui présentent des concentrations moyennes de, respectivement, 14,2 mg/l, 9,6 mg/l et 8,8 mg/l. Ces systèmes sont les plus « impactés » par les nitrates. Ces valeurs moyennes restent cependant faibles au regard de celle de la norme de qualité pour l'eau potable (50 mg/l). Les ressources en eaux souterraines du Causse Noir restent relativement préservées jusqu'à aujourd'hui des problèmes de contamination par les nitrates.

Enfin, aucune tendance saisonnière globale n'est mise en évidence. Cependant, les Moulinets présentent un pic de concentration entre les mois de décembre 2017 et février 2018. A Moulin de Corp et Fournets une augmentation entre les mois de mai 2017 et d'août 2017 (période des cultures céréalières) est observée.

Il serait ainsi intéressant de recenser les activités existantes au sein des différents bassins d'alimentation pour pouvoir localiser les éventuelles sources de pollution anthropiques issues notamment de l'agriculture.

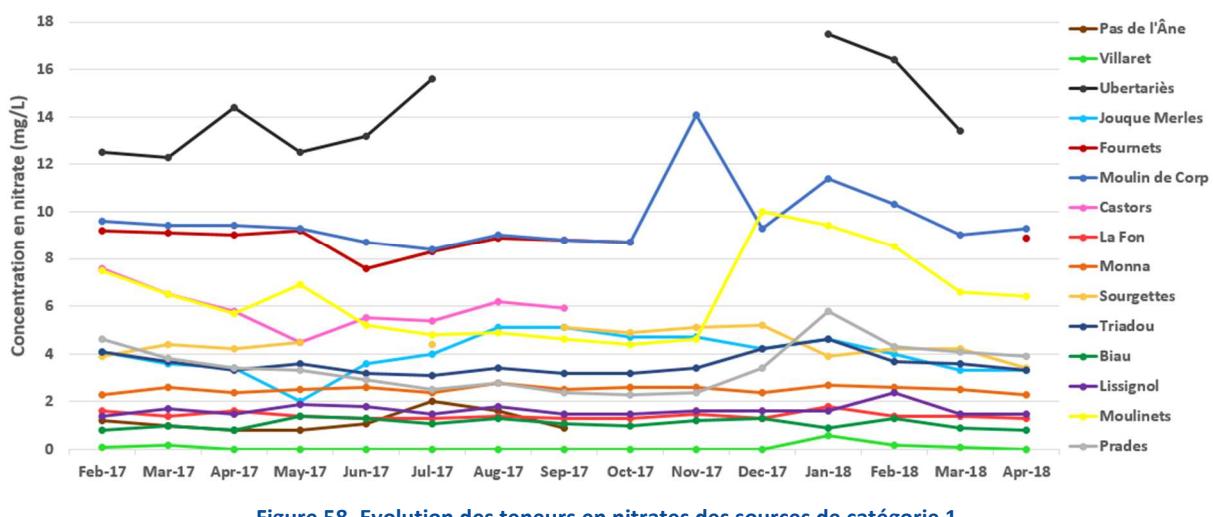


Figure 58. Evolution des teneurs en nitrates des sources de catégorie 1

La Figure 59 illustre la teneur moyenne en sulfates des sources de catégorie 1 en fonction de leur concentration moyenne en nitrates. Cette représentation permet d'identifier l'origine naturelle ou anthropique des composés azotés présents au niveau des sources.

Les sources du Pas de l'Âne, de Jouque Merles et la résurgence des Castors se distinguent par une teneur en sulfates supérieure à 8 mg/l. Cette concentration est issue de processus



naturels et influencée par la lithologie (dissolution de certains minéraux comme la pyrite, FeS_2) et le trajet de l'eau dans les formations géologiques jusqu'aux points de résurgence.

Cependant, comme décrit précédemment 3 sources sont caractérisées par une concentration en nitrates plus élevée, il s'agit des Fournets, de Moulin de Corp et d'Ubertariès. Leur position sur ce graphique démontre distinctement une influence anthropique sur la qualité de l'eau.

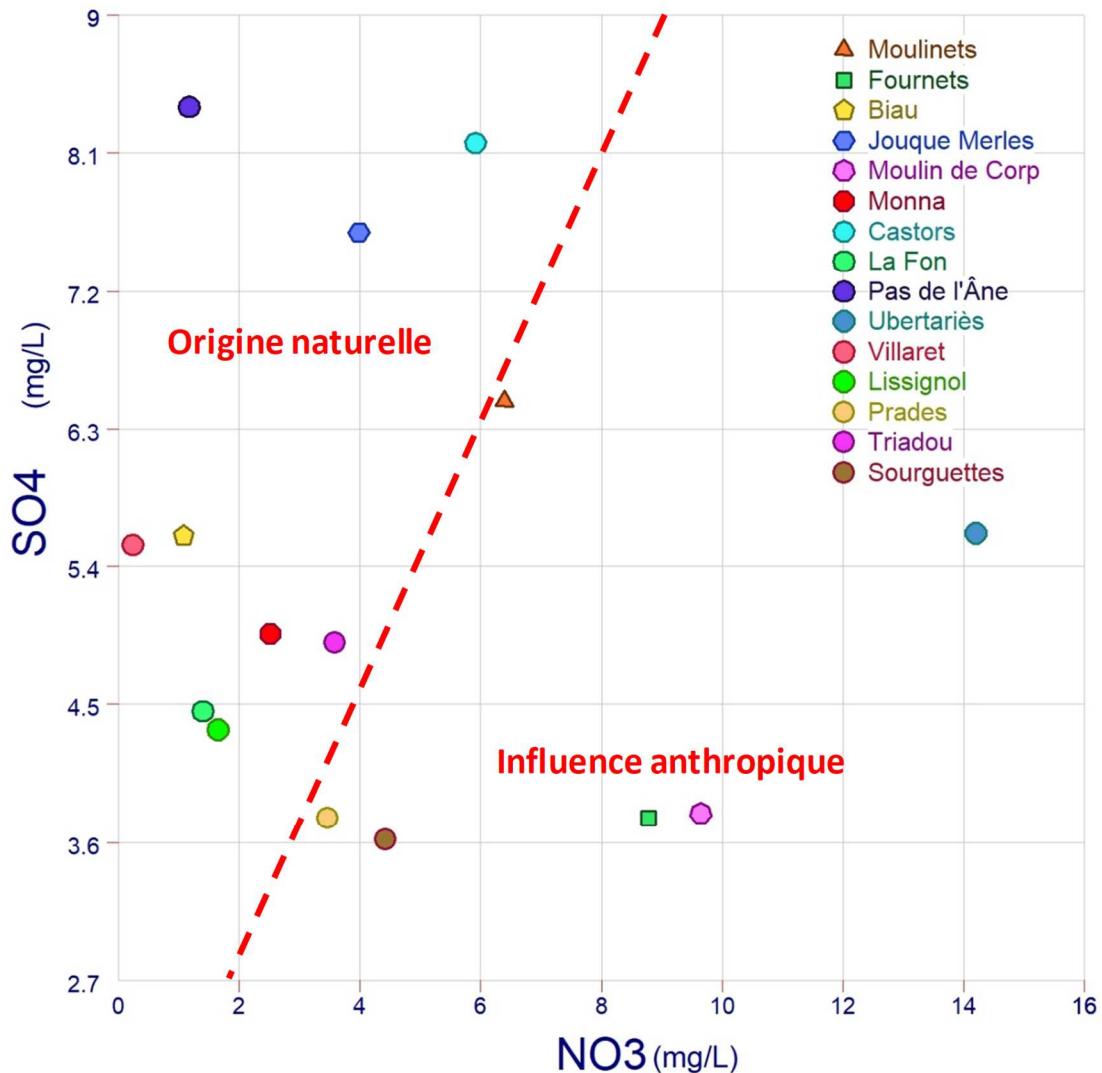


Figure 59. Graphique de la concentration moyenne en sulfates en fonction de la concentration moyenne en nitrates des sources de catégorie 1



5 Hydrochimie des eaux de rivière

Les eaux d'exhaure de la mine de Trèves ont fait l'objet d'une analyse le 23/07/2018 ciblée sur les métaux lourds et les ions majeurs. Parallèlement à ces analyses, les eaux du Trévezel, de la Dourbie et de la Jonte ont également été analysées en septembre 2017 et en mars 2018.

Les résultats analytiques les plus pertinents issus de ces prélèvements réalisés sur les rivières sont reportés sur les cartes en Figure 60 (septembre 2017) et en Figure 61 (mars 2018)**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Les résultats des analyses effectuées au même moment sur les sources de catégorie 1 sont également figurés sur les cartes afin de pouvoir les comparer.

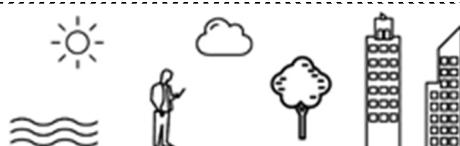
Les principaux résultats de ces analyses et leur interprétation sont les suivants :

- les eaux de la mine de Trèves sont composées, de manière non exhaustive, des éléments suivants : sulfates (150 mg/l), aluminium (1,2 µg/l), arsenic (7,9 µg/l), nickel (5,0 µg/l) et zinc (551 µg/l) ;
- on retrouve la présence de plusieurs métaux lourds dans les rivières et tout particulièrement de l'aluminium, du cuivre, du plomb et du zinc, en des concentrations plus ou moins fortes selon la rivière et la période de prélèvement (effet de dilution de certains éléments en hautes eaux au mois de mars 2018 ?) ;
- au droit des sources :
 - au sud du Causse Noir, la présence d'aluminium, de zinc et de plomb dans une moindre mesure a été identifiée sur les sources de Moulin de Corp, de Gardies, du Pas de l'Âne et de Jouque Merles,
 - au nord du Causse Noir, ce sont de l'aluminium, du zinc et du cuivre qui sont retrouvés aux sources de Sourquettes, des Douzes et de Triadou.

La présence de métaux lourds dans l'eau des sources précitées, permet donc d'établir les relations eaux de surface/eaux souterraines à l'échelle du Causse Noir *via* les pertes de ces cours d'eau. Ces résultats, hors traçages artificiels colorés, mettent en évidence un fonctionnement binaire (plus ou moins important selon les systèmes mais difficile à quantifier) pour les systèmes suivants :

- sur la partie nord du Causse Noir : Sourquettes, les Douzes et Triadou ;
- sur la partie nord du Causse Noir : Jouque Merles, Pas de l'Âne, Gardies, Moulin de Corp.

Ces résultats étayent les conclusions réalisées à partir de l'analyse des données hydrochimiques établies précédemment.



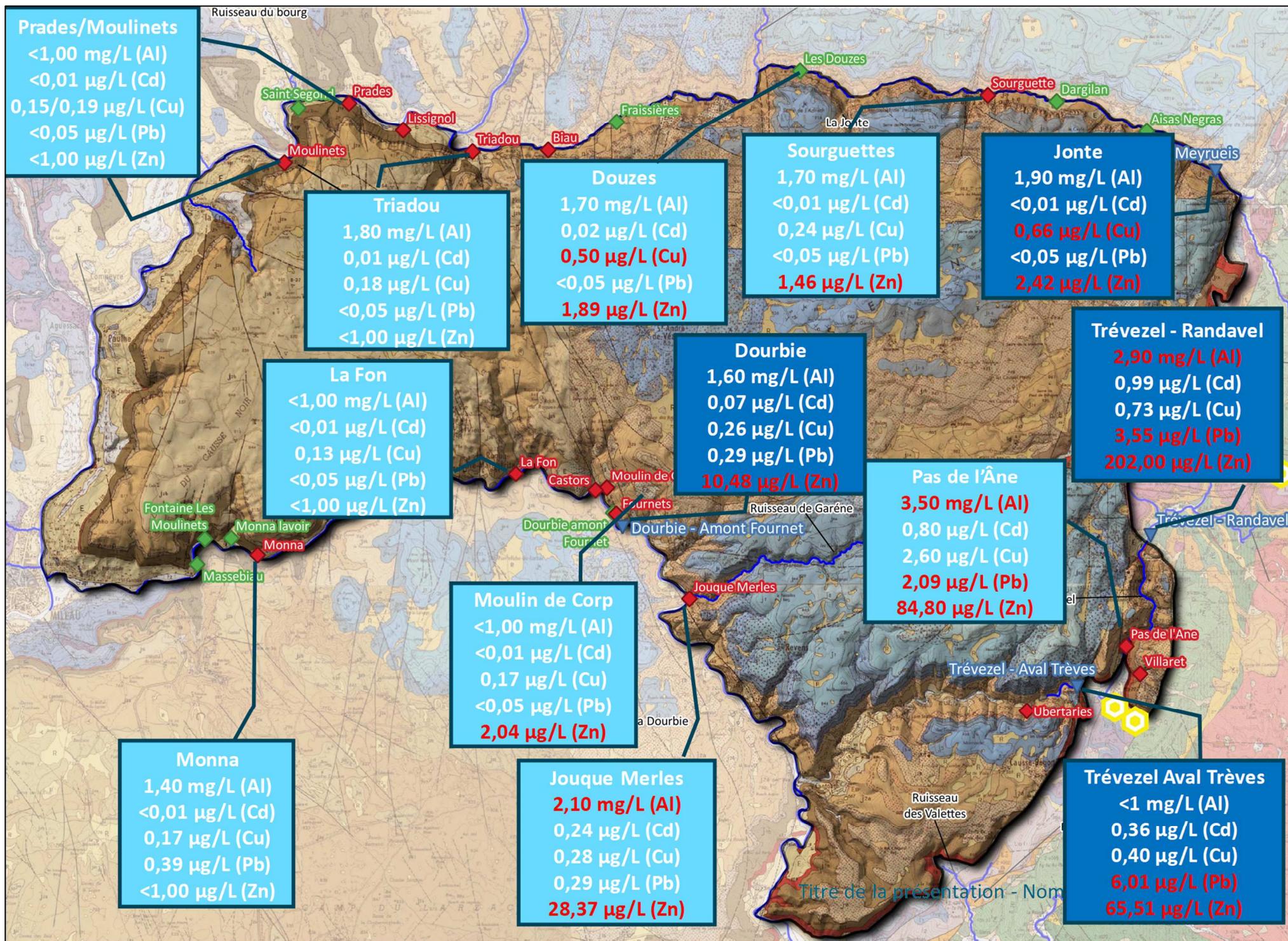


Figure 60. Résultats des analyses chimiques réalisées sur les rivières le 9 septembre 2017



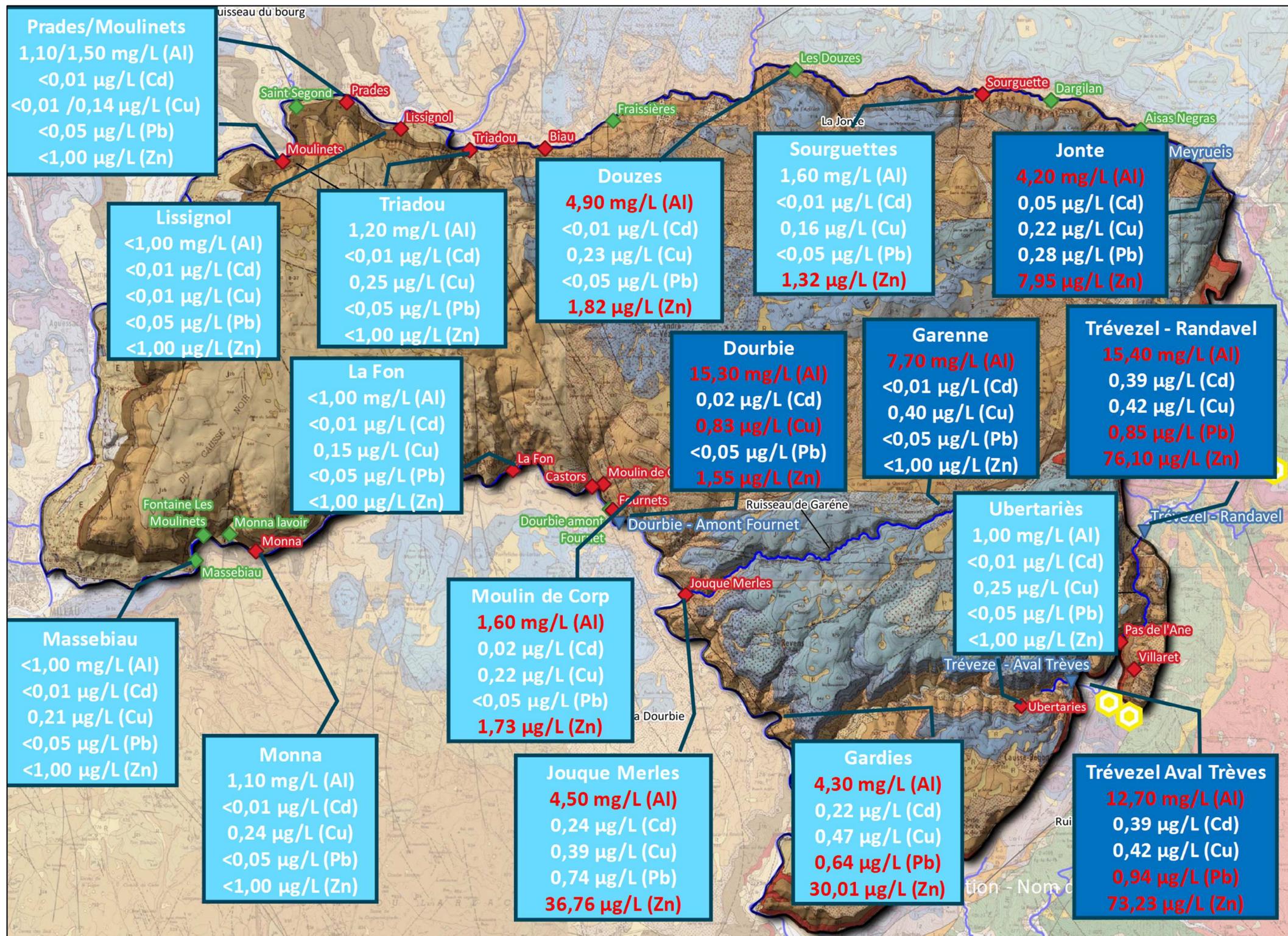


Figure 61. Résultats des analyses chimiques réalisées sur les rivières le 3 mars 2018



PARTIE IV : Traçages hydrogéologiques





1 Introduction

Dans le cadre de l'étude hydrogéologique du Causse Noir, des opérations de traçage hydrogéologique ont été menées avec les objectifs suivants :

- caractériser le fonctionnement des systèmes karstiques
- estimer la vulnérabilité des ressources en eaux souterraines locales
- valider la délimitation des bassins d'alimentation des systèmes karstiques préalablement définis par le Parc Naturel Régional des Grands Causses.

36 injections (notées par la suite TCN pour Traçages du Causse Noir) ont été réalisées par les techniciens du PNRGC entre les mois de mars 2017 et de décembre 2018. Précisons que les traçages TCN 36 et TCN 37 n'ont pas pu être réalisés dans le cadre de cette étude en raison d'une crue importante de la Jonte.

La localisation des points d'injection a été décidée en concertation avec les spéléologues locaux ayant une bonne connaissance de la zone.

Cette partie du rapport décrit la méthodologie employée et les résultats de ces opérations de traçage réalisées au sein du Causse Noir.



2 Rappels sur les traçages

2.1 Approche générale des traçages artificiels

Une opération de traçage a pour objectif de mettre en évidence le mouvement de masses d'eaux souterraines en observant l'évolution d'un (ou plusieurs) caractère spécifique de l'eau, appelé traceur. Il peut s'agir de propriétés physiques (température, conductivité, etc.) ou chimiques (pH, concentration en éléments dissous, signature isotopique, etc.). Ce caractère spécifique permet alors d'identifier les masses d'eau et de quantifier leur mouvement entre une source et un (ou plusieurs) point d'observation dans l'aquifère. La source peut être artificielle ou naturelle, fonction de l'acquisition du (ou des) caractère spécifique observé. C'est sur ce point que se différencient deux grands types de traçages : les traçages naturels et les traçages artificiels qui nous intéressent ici.

Un **traçage artificiel** constitue une procédure expérimentale visant à rendre apparent et observable le déplacement réel de l'eau souterraine dans un aquifère suivant une (ou des) trajectoire définie entre un point d'origine et un ou plusieurs points de détection, au moyen de traceur artificiel marquant l'eau. Cette approche consiste donc à mettre en évidence les modalités de transport entre deux points d'un aquifère en sollicitant essentiellement les structures principales de drainage. Dans les aquifères karstiques, les écoulements ont lieu principalement dans les conduits karstiques. Par conséquent les opérations de traçage artificiels ne sollicitent que les chemins préférentiels d'écoulement et ne sont pas représentatif de l'intégralité de l'aquifère karstique.

Dans l'étude des aquifères karstiques, les traçages peuvent avoir des objectifs différents :

- Un **traçage de reconnaissance** a pour but de déterminer s'il existe ou non une continuité hydraulique entre un point d'injection et un ou plusieurs points de sortie. Cette approche permet de déterminer si un point appartient ou non à un bassin versant. Le résultat est binaire : il y a ou il n'y a pas de connexion entre le point d'injection et la ou les sources observées.
- Un **traçage de simulation** a pour but de décrire les modalités de transport d'un traceur au sein de l'aquifère. Le plus souvent, l'injection est faite de façon quasi-instantanée, c.-à-d. que le temps d'injection est très faible comparé au temps de résidence moyen. Cela permet d'obtenir en sortie une distribution des temps de séjour correspondant à la réponse impulsionnelle du système (aussi appelée fonction de transfert). Cette approche permet de simuler des scénarii de pollution.

Un **traceur** désigne « tout caractère spécifique ou toute substance solidaire d'un corps en mouvement, notamment de l'eau en déplacement, permettant d'identifier et de décrire son mouvement ». Le choix du traceur constitue une étape importante pour assurer la qualité d'un



traçage d'eau souterraine. Le traceur doit posséder certaines propriétés. En effet, le traceur doit s'intégrer au mieux aux masses d'eau puisque ce sont les mouvements du traceur au sein de l'aquifère qui vont permettre d'interpréter les mouvements des masses d'eau.

Un traceur idéal est constitué par une substance qui n'est pas réactive, qui est absente naturellement mais facilement soluble dans l'eau, facile à détecter quantitativement, non toxique, invisible, peu coûteuse et facile à manipuler. Le traceur idéal n'existe pas, cependant il existe des substances qui s'en rapprochent. En hydrogéologie karstique ce sont essentiellement des traceurs non réactifs qui sont utilisés. Cependant, les traceurs réactifs permettent de simuler le transport d'agents contaminants et sont soumis à des processus tels que l'adsorption, l'oxydation ou le filtrage.

Il existe deux types de traceurs artificiels : les substances solubles et les particules. Les principaux traceurs artificiels sont présentés dans le Tableau 26. Les traceurs les plus fréquemment utilisés en hydrogéologie karstique correspondent aux traceurs fluorescents et aux traceurs salins.

	No.	Traceur	Limite de détection ($\mu\text{g/L}$)	Fond naturel	Toxicologie	Interférence analytique avec	Autres problèmes spécifiques
Colorants fluorescents	1	Uranine	10^{-3}	Absent	Sans danger	2, 6	Forte sorption à pH faible
	2	Eosine	10^{-2}	Absent	Sans danger	1, 4	Très sensible à la lumière
	3	Sulforhodamine B	10^{-2}	Absent	Sans danger écotoxicologique	4, 5	
	4	Amidorhodamine G	10^{-2}	Absent	Sans danger	2, 3, 5	
	5	Rhodamine WT	10^{-2}	Absent	Génotoxique	3, 4	
	6	Pyranine	10^{-2}	Absent	Sans danger	1, 2	Pas fiable (dégradation)
	7	Naphthionate	10^{-1}	Absent	Sans danger	8, DOC	
	8	Tinopal	10^{-1}	Absent	Sans danger	7, DOC	Forte sorption
Sels	9	Sodium	Dépend de la méthode : 0.1 $\mu\text{g/L}$ à 1mg/l	Fort	Sans danger	-	
	10	Potassium		Modéré	Sans danger	-	
	11	Lithium		Très faible	Sans danger avec restriction	-	
	12	Strontium		Modéré	Sans danger avec restriction	-	Forte sorption
	13	Chloride		Fort	Sans danger avec restriction	-	
	14	Bromide		Faible	Sans danger avec restriction	-	



No.		Traceur	Limite de détection ($\mu\text{g/L}$)	Fond naturel	Toxicologie	Interférence analytique avec	Autres problèmes spécifique
	15	Iodide		Très faible	(Non évaluée)		Chimiquement instable
Particules	16	Spores	Détection de particule	Absent	Sans danger	Particules naturelles	Pas quantitatif
	17	Microsphères fluorescentes		Absent	Sans danger	Particules naturelles	Temps d'analyse long
	18	Bactéries spécifiques		Absent	(Non évaluée)	(Autres bactéries)	Temps d'analyse long
	19	Bactériohages		Absent	(Non évaluée)	-	Temps d'analyse long

Tableau 26. Propriétés des traceurs les plus courants en hydrogéologie karstique

(Les limites de détections constituent un ordre de grandeur et sont valides pour des eaux claires et un fluorimètre récent.

Les limites de détection dépendent de la méthode analytique)

Les traceurs fluorescents ne présentent généralement pas de toxicité sur les humains ou sur l'environnement aquatique pour les niveaux de concentration qui sont mesurés dans les opérations de traçage artificiel. Selon US EPA (United State Environmental Protection Agency), les traceurs fluorescents peuvent être utilisés sans danger tant que la concentration à l'eau des robinets des consommateurs ne dépassent pas 1 à 2 mg/L pendant 24 heures. Cependant, il est rarement fait mention de l'impact de leurs produits de dégradation, celui-ci dépendant fortement des systèmes et de l'activité des voies de dégradation. La toxicité des traceurs fluorescents et de leurs résidus après dégradation reste assez faible compte tenu des faibles concentrations qui sont observées lors des opérations de traçage dans des karsts en général.

Chaque traceur possède ses avantages et ses inconvénients et le choix du traceur constitue une étape fondamentale pour assurer la qualité d'un traçage artificiel. Le Tableau 27 synthétise les principales caractéristiques des traceurs artificiels les plus couramment utilisés en hydrogéologie karstique.

Type	Avantages	Inconvénients
Traceurs fluorescents	Adsorption souvent faible, Bruit de fond naturel souvent faible, Limite de détection basse, Généralement bonne solubilité à l'eau, Le plus souvent sans impact sur le milieu naturel, Faible coût d'achat et d'analyse.	Ne se comporte pas exactement comme l'eau, La plupart perdent leur caractère fluorescent en présence d'oxydants puissants (chlore notamment) ou lors d'exposition à la lumière (UV principalement), Sensibles à certains paramètres (pH principalement)



Type	Avantages	Inconvénients
Traceurs salins	Se dégradent peu dans le milieu naturel, Faible adsorption pour les anions, Généralement bonne solubilité à l'eau, Le plus souvent sans impact sur le milieu naturel, Faible coût d'achat et d'analyse, Invisibles et stables à la lumière.	Ne se comportent pas exactement comme l'eau Phénomènes d'adsorption souvent importants (cations) Bruit de fond naturel élevé et variable Limites de détection assez fortes
Tensioactifs, Colorant alimentaires, Composés aromatiques	Bruit de fond assez faible, Se dégradent peu dans le milieu naturel, Généralement bonne solubilité à l'eau, Le plus souvent sans impact sur le milieu naturel, Faible coût d'achat et d'analyse.	Ne se comportent pas exactement comme l'eau, Phénomènes d'adsorption souvent importants, Limites de détection très forte
Spores	Facile à détecter au microscope.	Echantillonnage cumulatif ne permettant pas de décrire fidèlement la restitution
Microsphères fluorescentes	Assez facile à analyser	Phénomènes d'adsorption souvent importants
Bactéries	Simulation du transport des agents pathogènes.	Manipulations délicates, Coûts analytiques élevés
Bactériophages	Bon comportement dans le milieu souterrain (préférable aux bactéries) Absence de toxicité pour le milieu aquatique et l'homme, Seuil de détections assez bas	Manipulations délicates et très spécifiques faites dans des instituts spécialisés, Coûts analytiques élevés

Tableau 27. Avantages et inconvénients des divers traceurs utilisés

Une opération de traçage artificiel permet d'analyser le temps de transit d'un traceur artificiel dans un système karstique entre un point d'injection et un (ou plusieurs) point de restitution. Cela consiste à injecter une quantité connue de traceur et à analyser la courbe de restitution du traceur, au niveau du (ou des) point instrumenté. Le transfert de traceur dans un système est régi par plusieurs phénomènes détaillés dans le Tableau 28 ci-après.

Phénomène physique	Définition
Convection	Transport de matière lors du déplacement d'un fluide
Dispersion cinématique	L'eau circulant à des vitesses différentes suivant les points de l'aquifère, la matière va se disperser dans la masse d'eau. C'est le nombre de Peclet qui permet de rendre compte de ce phénomène.



Phénomène physique	Définition
Diffusion moléculaire	L'agitation moléculaire tend à équilibrer les concentrations dans l'eau en fonction des gradients de concentration (Loi de Fick)
Adsorption	La matière est retenue sur des éléments solides.

Tableau 28. Les phénomènes physiques qui régissent le transport dans un aquifère

Au sein d'un aquifère karstique, il n'est pas chose aisée d'identifier la contribution relative de chacun de ces phénomènes. Les aquifères karstiques constituent des systèmes fortement hétérogènes dans leur structuration spatiale : les champs de perméabilité sont très contrastés entre porosité matricielle, de fissures et de conduits. Cela conduit à de fortes variations dans les modalités de transport : des écoulements lents dans une matrice rocheuse ne sont pas régis par la même physique que des écoulements turbulents confinés ou à surface libre dans le système de drainage principal. La structure de drainage sollicitée par le transport du traceur est assimilée à un système qui est étudié à travers ses fonctions d'entrée et de sortie, communément appelé « système traçage ». Il représente uniquement les structures par lesquelles le traceur a transité, et n'est pas représentatif de la totalité du système karstique.

A noter qu'une approche systémique constitue un bon moyen d'identifier le comportement hydrodynamique d'un système karstique en se basant sur des signaux pluies-débits ou à l'aide de modèles non linéaires couplés à des analyses non stationnaires. Contrairement à ces approches pluies-débits, les opérations de traçages artificiels permettent de mener une étude scientifique avec un signal d'entrée clairement défini et maîtrisé par l'opérateur.

2.2 Paramètres de restitution d'un traçage

Si une masse de traceur est injectée instantanément à l'entrée du système traçage, toutes les particules de traceur ne vont pas atteindre le point de sortie en même temps. En pratique, les temps de transit sont déterminés à partir de la courbe de restitution du traceur. Si une masse de traceur, notée M , est introduite dans le système à instant $t = 0$, alors la concentration à la sortie va être une fonction du temps, notée $C_{sortie}(t)$. Après un temps infini et en raison de la conservation des masses on obtient :

$$M = \int_{t=0}^{t=\infty} C_{sortie}(t) \cdot Q(t) \cdot dt$$

Avec $Q(t)$ = débit à la sortie du système (m^3/s)

$C_{sortie}(t)$ = concentration en fonction du temps à la sortie du système (g/m^3)

La courbe de restitution permet d'obtenir certaines informations sur le transport du traceur dans le système traçage. Le calcul des vitesses se base sur une distance linéaire la plus



probable, notée L. Cette longueur peut intégrer de nombreux critères structuraux et énergétiques. Le taux de restitution permet d'identifier s'il y a des pertes de traceur dans le système. Un taux de restitution bas peut témoigner d'un piégeage de traceur dans une zone d'eau morte ou bien l'existence de multiples chemins de drainage.

Temps de transit	$t_1 = t(C_{sortie} > 0)$
Volume du système traçage	$V = \int_0^{t_1} Q(t). dt$
Vitesse de transit	$v = L/t_1$
Temps de disparition	$t_2 = t(C_{sortie} \rightarrow 0)$
Durée de restitution	$t_r = t_2 - t_1$
Temps modal	$t_m = t[C_{sortie} = \max(C_{sortie})]$
Concentration maximale	$C_{max} = \max(C_{sortie})$
Masse restituée	$M_r = \int_0^{+\infty} Q(t). C_{sortie}(t). dt$
Taux de restitution	$R\% = \frac{M_r}{M} * 100$

Tableau 29. Paramètres calculés à partir de la courbe de restitution

2.3 Distribution des Temps de Séjour

L'évolution dans le temps de la concentration permet de construire la Distribution des Temps de Séjour (DTS). Elle décrit le transit du traceur dans le système traçage et correspond à la densité de probabilité du temps de transit des particules. En d'autres termes, la DTS permet de quantifier la probabilité qu'une particule a de rester dans le système traçage pendant un temps donné. La DTS correspond à la normalisation à 1 de la courbe de concentration de sortie fonction du temps $C_{sortie}(t)$.

En l'absence de zone morte dans le système traçage, la DTS est définie telle que :

$$DTS(t) = \frac{C(t). Q(t)}{\int_{t=0}^{t=\infty} C(t). Q(t) dt} \text{ avec } \int_{t=0}^{t=\infty} DTS(t). dt = 1$$

Avec $C(t)$ = concentration en fonction du temps à la sortie du système [g/m³]

M = masse injectée [g]

$Q(t)$ = débit à la sortie du système (m³/s)



A noter que le changement de variable opéré ici consiste à exprimer une concentration exprimée en g/m³ en une nouvelle variable exprimée un inverse du temps (Figure 62) :

$$DTS(t) = \frac{C}{M/Q_m} = \frac{g/m^3}{g/(\frac{m^3}{s})} = [s^{-1}]$$

Avec C = concentration [g/m³]

M = masse [g]

Q_m = débit moyen en cours de restitution du traceur [m³/s]

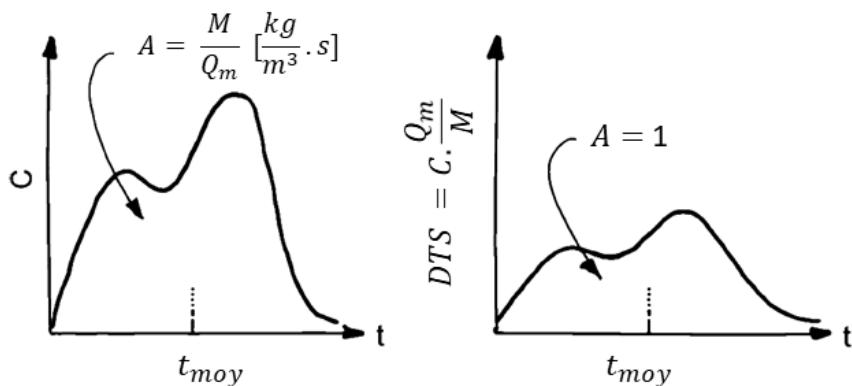


Figure 62. Transformation d'une courbe de restitution expérimentale

Si le traceur est injecté instantanément, alors la DTS correspond à la réponse impulsionnelle du système traçage. Le signal d'entrée correspond alors à un signal de Dirac. La réponse impulsionnelle est aussi appelée « fonction de transfert ».

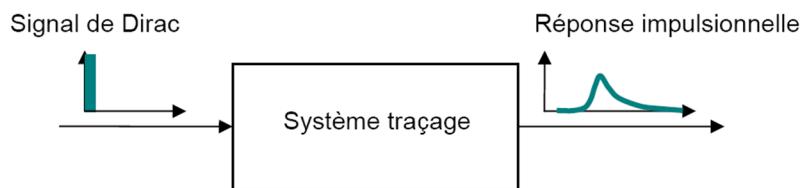


Figure 63. Approche systémique des traçages artificiels

Lorsque le débit est constant tout au long de la restitution du traceur alors la DTS peut se calculer ainsi :

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_{t=0}^{t=\infty} C(t) \cdot dt}$$



La DTS apporte des informations complémentaires sur les modalités de transport dans le système traçage :

Temps de séjour moyen	$t_{moy} = \int_0^{+\infty} t \cdot DTS \cdot dt$
Vitesse moyenne de transit	$V_{moy} = L * \int_0^{+\infty} \frac{1}{t} \cdot DTS \cdot dt$
Vitesse apparente de transit	$V_{app} = \frac{L}{t_{moy}}$

Tableau 30. Paramètres calculés à partir de la DTS

La vitesse moyenne de transit V_{moy} prend en compte tous les phénomènes physiques pouvant impacter le transport du traceur au cours de son parcours dans le système traçage : diffusion, dispersion, turbulence, adsorption-désorption. Par opposition, la vitesse apparente V_{app} ne prend en compte que le phénomène d'advection puisqu'elle correspond à la vitesse de déplacement du nuage de traceur, sans tenir compte de la répartition statistique des particules de traceur.



3 Protocole de traçage mis en œuvre

Les 36 injections (les TCN 36 et 37 n'ayant pu être exécutés) ont été réalisées au niveau de pertes dans les cours d'eau de la Jonte, du Trévezel, de Garène et de la Dourbie ainsi que dans des avens, si possible directement dans les écoulements actifs souterrains grâce à l'aide des spéléologues locaux. Lors des injections, un apport d'eau de plusieurs m³ par citerne a été systématiquement déversé au niveau du points d'injection.

Les traceurs utilisés ont été la fluorescéine et la sulforhodamine B. Les quantités ont été adaptées pour chaque opération en fonction de la distance du point d'injection à l'émergence de restitution supposée et du débit de celle-ci. En outre, il convient de noter que pour éviter toute interaction d'un traçage à l'autre, les injections rapprochées dans le temps ont été réalisées sur des secteurs éloignés.

Dans le cadre du suivi des sources, des fluorimètres (GGUN FL30) et des préleveurs automatiques (24 flacons) ont été mis en place en parallèle. Les durées de suivi se sont déroulées sur une période de 4 à 6 semaines. Les échantillons prélevés ont été analysés au spectrofluorimètre au laboratoire CETRAHE de l'Université d'Orléans.

La mission d'Antea dans cette étude a consisté à interpréter les résultats obtenus. Un calcul de bilan de restitution a été réalisé lorsque des mesures de débit étaient disponibles. L'interprétation des données s'est effectuée à l'aide d'un outil développé par Antea Group (adapté de laboratoire CETRAHE) pour les calculs des temps de transfert, des masses restituées et des pourcentages de restitution et des taux de dilution.

Les caractéristiques des points d'injection des 36 traçages réalisés, coordonnées géographiques, altitude, nature du traceur injecté, masse déversée et dates des injections des traceurs, sont répertoriées au Tableau 31 en page suivante.



N° du traçage	X injection (L93)	Y injection (L93)	Altitude Z (en m)	Traceur	Masse (g)	Date de l'injection
TCN 1	732123,823	6338173,905	935	Fluorescéine	6 000	20/03/2017
TCN 2	726887,435	6334685,410	798	Sulforhodamine B	6 000	20/03/2017
TCN 3	715410,40	6342396,06	682	Sulforhodamine B	1 000	03/05/2017
TCN 4	716195,17	6342154,02	670	Fluorescéine	1 500	03/05/2017
TCN 5	729480,45	6339988,01	919	Sulforhodamine B	20 000	24/05/2017
TCN 6	731008,89	6339525,49	956	Fluorescéine	12 000	25/05/2017
TCN 7	713836,94	6336486,89	813	Sulforhodamine	200	26/06/2017
TCN 8	713525,78	6338133,26	855	Fluorescéine	1 500	23/06/2017
TCN 9	730305,69	6331216,41	560	Fluorescéine	6 000	18/07/2017
TCN 10	732044,93	6334262,22	692	Fluorescéine	1 500	26/07/2017
TCN 11	732101,59	6333915,50	686	Sulforhodamine B	1 000	26/07/2017
TCN 12	723369,94	6324537,85	500	Sulforhodamine B	200	10/08/2017
TCN 12 bis	723393,95	6324544,927	498	Sulforhodamine B	100	21/08/2017
TCN 13	725531,61	6324003,21	485	Fluorescéine	1 500	17/08/2017
TCN 14	732485,98	6343867,09	668	Fluorescéine	200	01/09/2017
TCN 15	720386,41	6338607,38	828,5	Sulforhodamine B	6 000	12/10/2017
TCN 16	719017,54	6340959,50	799	Fluorescéine	3 000	12/10/2017
TCN 17	723780,44	6342506,04	859	Sulforhodamine B	6 000	23/11/2017
TCN 18	730436,74	6336464,67	893	Fluorescéine	7 000	23/11/2017
TCN 19	710448,60	6336372,12	820	Fluorescéine	3 000	23/11/2017
TCN 20	711256,13	6336745,00	799	Sulforhodamine B	3 000	23/11/2017
TCN 21	725700,74	6330911,42	530	Fluorescéine	6 000	04/02/2018
TCN 22	727064,31	6337718,12	912	Sulforhodamine B	10 000	13/02/2018
TCN 23	726954,55	6340682,02	972	Fluorescéine	9 000	13/02/2018
TCN 24	712739,13	6339783,98	834	Fluorescéine	6 000	17/02/2018
TCN 25	714441,63	6340192,56	797	Sulforhodamine B	8 000	16/02/2018
TCN 26	727538,91	6331013,93	517	Sulforhodamine B	6 000	09/02/2018
TCN 27	726954,55	6340682,02	972	Sulforhodamine B	4 000	27/03/2018
TCN 28	730198,23	6337486,02	93	Fluorescéine	6 000	21/03/2018
TCN 29	719706,49	6335697,47	441	Sulforhodamine B	200	06/04/2018
TCN 29 bis	719870,98	6335147,50	426	Fluorescéine	300	06/04/2018
TCN 30	711752,80	6339180,93	839	Sulforhodamine B	12 000	15/05/2018
TCN 31	732415,59	6331299,62	848	Sulforhodamine B	1 500	05/07/2018



N° du traçage	X injection (L93)	Y injection (L93)	Altitude Z (en m)	Traceur	Masse (g)	Date de l'injection
TCN 32	727165,76	6329542,38	878	Sulforhodamine B	10 000	01/06/2018
TCN 33	732644,66	6331700,57	897	Fluorescéine	1 500	05/07/2018
TCN 34	735959,00	6336234,00	1 131	Fluorescéine	500	17/07/2018
TCN 35	723312,46	6343351,66	835	Fluorescéine	9 000	14/09/2018
TCN 36				Non réalisé		
TCN 37				Non réalisé		
TCN 38	725911,92	6338986,14	890	Fluorescéine	1 500	22/12/2018

Tableau 31. Caractéristiques des injections des traçages hydrogéologiques du Causse Noir

La localisation des points d'injection est reportée sur la Figure 64.



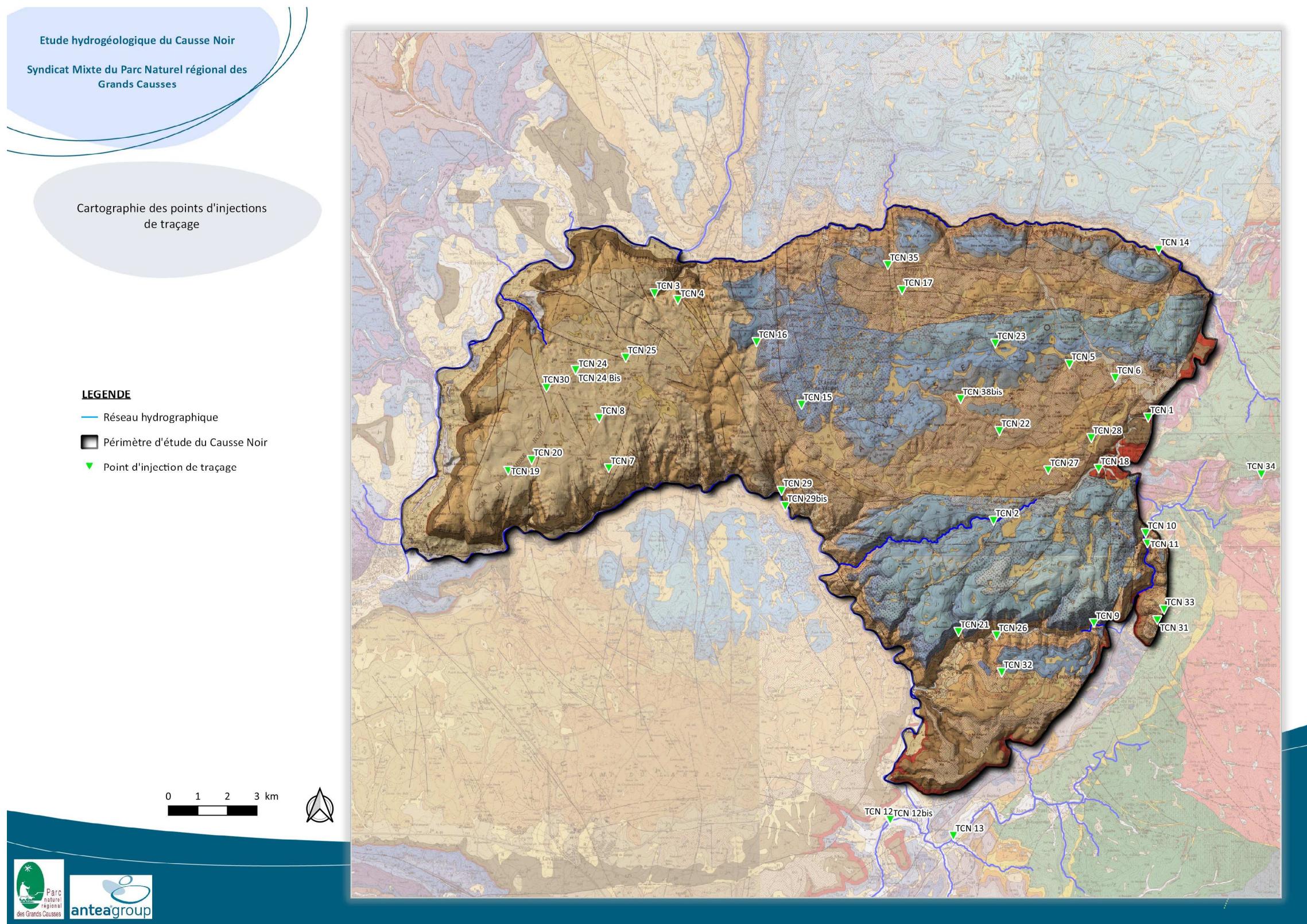


Figure 64. Localisation des points d'injection des traçages





4 Résultats des traçages

Les traçages ayant révélé une restitution aux sources suivies par le PNRGC sont reportés à la Figure 65. Ils sont figurés sur la carte par un trait vert reliant le point d'injection et la (ou les) source (s) où le traceur a été retrouvé. Les données issues des fluorimètres ont été confrontées aux résultats des analyses du laboratoire pour valider la restitution.

Il est intéressant de remarquer une répartition spatialisée des restitutions positives. La zone ouest du Causse Noir ne présente pratiquement aucune restitution, à l'inverse des zones est et sud-est du causse. Sur les 36 traçages hydrogéologiques effectués, 26 se sont avérés positifs dont 22 dans la moitié est du Causse Noir.

Pour les opérations de traçages où une restitution a été observée, un suivi des débits a permis d'établir un bilan massique. Chaque traçage positif a fait l'objet d'une fiche de synthèse qui récapitule l'ensemble des conditions de traçage ainsi que les résultats des interprétations. Ces fiches sont reportées en annexe III.





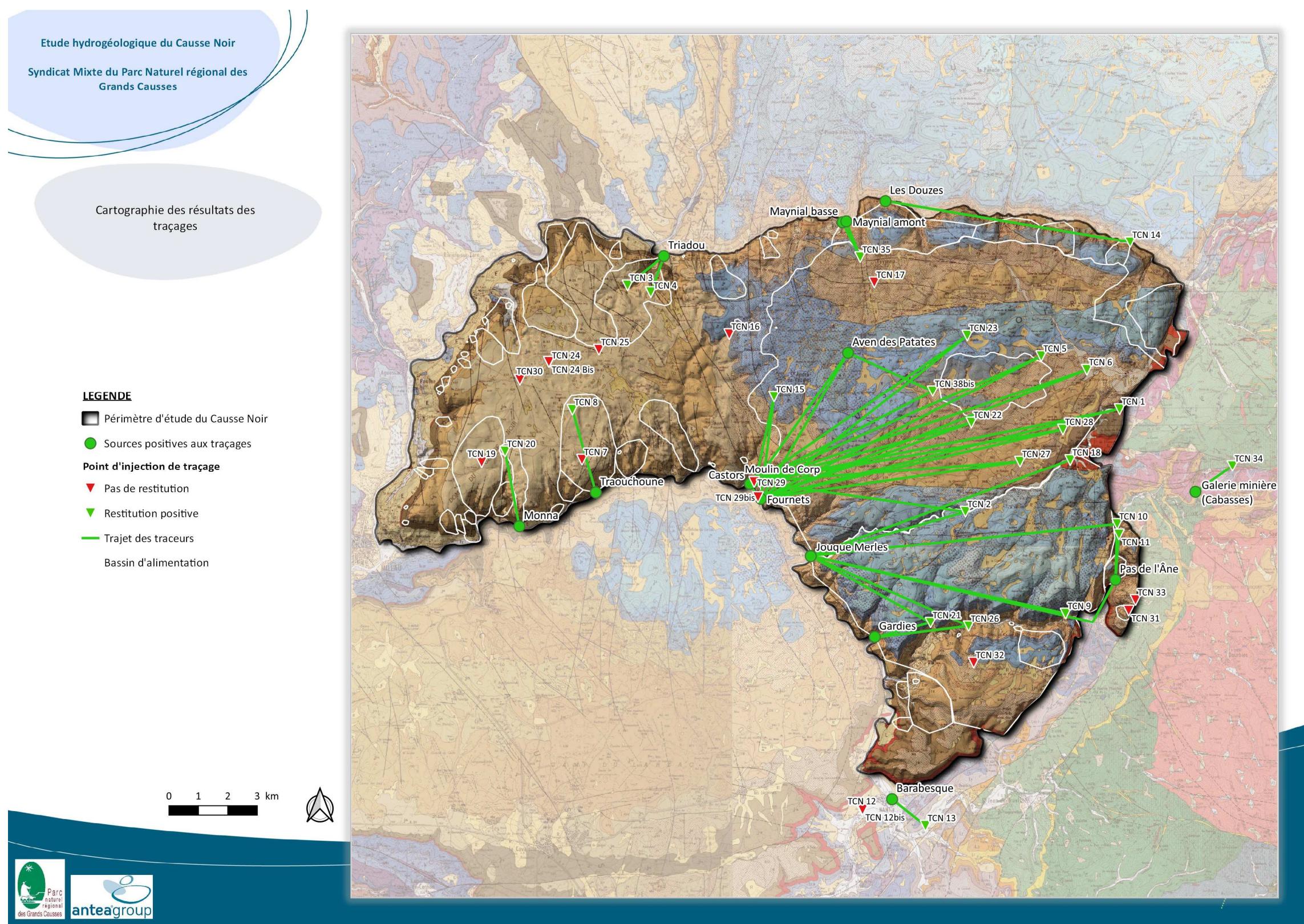


Figure 65. Restitution des traçages hydrogéologiques du Causse Noir





Le Tableau 32 synthétise les résultats obtenus. Parmi les calculs réalisés, il est indiqué le taux de restitution, le taux de dilution, la distribution du temps de séjour (DTS) maximale, la vitesse maximale, la vitesse modale, la vitesse moyenne et la vitesse apparente (plus de paramètres sont donnés sur les fiches de synthèse en annexe III).

Les taux de restitution du traceur varient entre 0,04 % (TCN 2) et 95,40 % (TCN 9), ce qui indique une disparité dans les conditions de transferts au sein des aquifères tracés. Les taux de dilution du traceur sont également variables, ils sont compris entre 5,71E-12 L⁻¹ (TCN 18) et 8,21E-08 L⁻¹ (TCN 11). Ils varient pour un même système aquifère selon les conditions hydrologiques dans lesquelles se sont déroulées le traçage. Ceci est particulièrement observable pour le système de Moulin de Corp où de nombreux traçages y ont été positifs au cours de périodes hydrologiques distinctes (basses eaux pour les TCN 5 à TCN 15 et hautes eaux pour les TCN 22 à TCN 30). En effet, rappelons que cumuls pluviométriques enregistrés en 2017 et 2018 durant la phase des opérations de traçages, sont significativement différents (Cf. Tableau 6 et Tableau 7) et que les transferts souterrains sont favorisés lors de précipitations abondantes.

Les vitesses maximales calculées sont comprises entre 4,7 m/h (TCN 4) et 500,0 m/h (TCN 21) et de 4,2 (TCN 4) à 194,0 m/h (TCN 26) pour la vitesse modale. Cette disparité montre une grande hétérogénéité du fonctionnement hydrodynamique des systèmes tracés. La Figure 66 ci-dessous présente la classification des vitesses apparentes des 26 traçages positifs. On remarque que la majorité des valeurs est comprise dans une gamme allant de 10 à 70 m/h, ce qui traduit globalement la présence de systèmes karstiques peu fonctionnels.

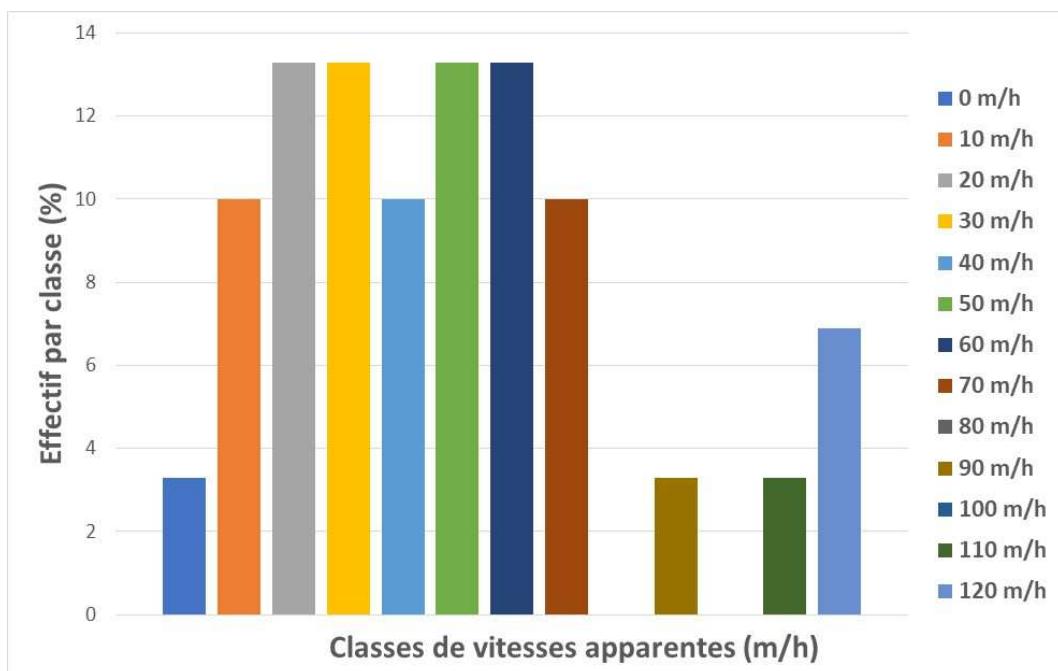


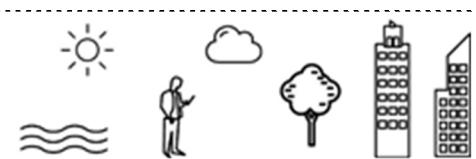
Figure 66. Classification des vitesses apparentes obtenues





N° traçage	Sources avec restitution	Taux de restitution (%)	Taux de dilution (L^{-1})	DTS max (s^{-1})	Vitesse max (m/h)	Vitesse modale (m/h)	Vitesse moyenne (m/h)	Vitesse apparente (m/h)
TCN 1	Fournets	2,65	1,24E-09	7,10E-06	81,86	72,03	63,87	59,50
	Moulin de Corp	19,86	1,28E-09	6,31E-06	85,76	75,04	65,35	62,20
TCN 2	Jouque Merle	19,88	5,48E-10	6,99E-06	49,23	43,72	33,96	29,30
	Fournets	0,04	1,37E-11	5,77E-06	72,16	45,75	47,20	45,70
TCN 3	Triadou	7,01	7,74E-09	1,42E-06	11,69	5,30	6,99	6,23
TCN 4	Triadou	0,99	2,14E-09	2,67E-06	4,68	4,15	3,65	3,30
TCN 5	Fournets	0,79	1,54E-11	1,59E-06	32,93	28,70	23,32	22,40
	Moulin de Corp	0,11	6,90E-12	2,51E-06	31,70	25,36	26,26	25,80
TCN 6	Fournets	7,19	3,42E-09	1,45E-05	46,07	44,69	39,01	37,10
	Moulin de Corp	32,34	4,87E-09	1,39E-05	51,17	47,52	45,46	44,70
TCN 7				Pas de restitution				
TCN 8	Traouchoune				Pas de données de débit			
TCN 9	Jouque Merle	95,40	2,43E-08	1,44E-05	128,96	101,04	96,69	93,80
TCN 10	Jouque Merle	51,31	1,25E-08	8,49E-06	225,81	70,71	143,28	53,80
	Pas de l'Ane	0,01	9,71E-08	6,90E-06	65,08	38,02	32,64	29,50
TCN 11	Jouque Merle	27,50	2,76E-09	3,86E-06	85,95	70,87	56,36	50,00
	Pas de l'Ane	2,49	8,21E-08	1,44E-05	300,00	90,29	71,12	45,50
TCN 12				Pas de restitution				
TCN 13	Barbaresque	10,14	2,68E-09	3,96E-06	32,62	17,91	18,38	15,60
TCN 14	Les Douzes				Pas de données			
TCN 15	Moulin de Corp	1,14	7,23E-09	6,93E-06	45,28	26,97	5,53	5,20
TCN 16				Pas de restitution				
TCN 17				Pas de restitution				
TCN 18	Jouque Merle	1,19	5,71E-12	7,58E-07	22,72	19,43	13,43	12,80
TCN 19				Pas de restitution				
TCN 20	Monna	1,52	2,78E-08	9,11E-06	54,45	40,78	28,18	15,30
TCN 21	Gardies	0,35	2,31E-09	6,68E-06	500,00	58,82	72,89	31,60
	Jouque Merle	36,70	7,25E-10	7,01E-06	368,75	147,50	147,97	66,90
TCN 22	Moulin de Corp	20,59	4,47E-09	1,78E-05	70,70	63,60	79,42	61,10
TCN 23	Moulin de Corp	15,04	3,19E-09	1,72E-05	96,26	85,09	93,67	73,60
TCN 24				Pas de restitution				
TCN 25				Pas de restitution				
TCN 26	Jouque Merle	35,82	1,19E-09	1,18E-05	359,39	193,97	197,71	74,10
	Gardies	8,97	2,29E-09	1,55E-05	208,09	140,08	142,59	124,40
TCN 27	Moulin de Corp	9,93	2,58E-10	5,23E-06	34,72	27,93	24,56	24,30
TCN 28	Moulin de Corp	22,86	8,61E-10	2,62E-06	49,25	37,16	94,14	42,60
TCN 29				Pas de restitution				
TCN 30				Pas de restitution				
TCN 31				Pas de restitution				
TCN 32				Pas de restitution				
TCN 33	Trévezel				Pas de données de débit			
TCN 34	Galerie minière des Cabasses				Pas de données de débit			
TCN 35	Maynial amont et Maynial basse	Pas de données						
TCN 36				Non réalisé				
TCN 37				Non réalisé				
TCN 38	Moulin de Corp (Fluorescéine)	50,64	1,45E-08	3,02E-05	142,13	126,70	136,91	117,80
	Moulin de Corp (Sulfo B)	34,08	7,22E-09	2,25E-05	135,92	121,74	175,75	111,50

Tableau 32. Résultats obtenus après traitement des données issues des traçages hydrogéologiques du Causse Noir





4.1 Zonage du Causse Noir à partir des résultats obtenus

Au vu des données obtenues après la réalisation des traçages hydrogéologiques, un zonage du Causse Noir est proposé pour interpréter le fonctionnement hydrodynamique des systèmes karstiques qui le composent.

5 zones ont été définies. Elles correspondent à 5 systèmes structuraux au sein du Causse Noir dont le fonctionnement karstique est caractéristique pour chaque zone. La répartition de ces zones est illustrée à la Figure 67 ci-après.

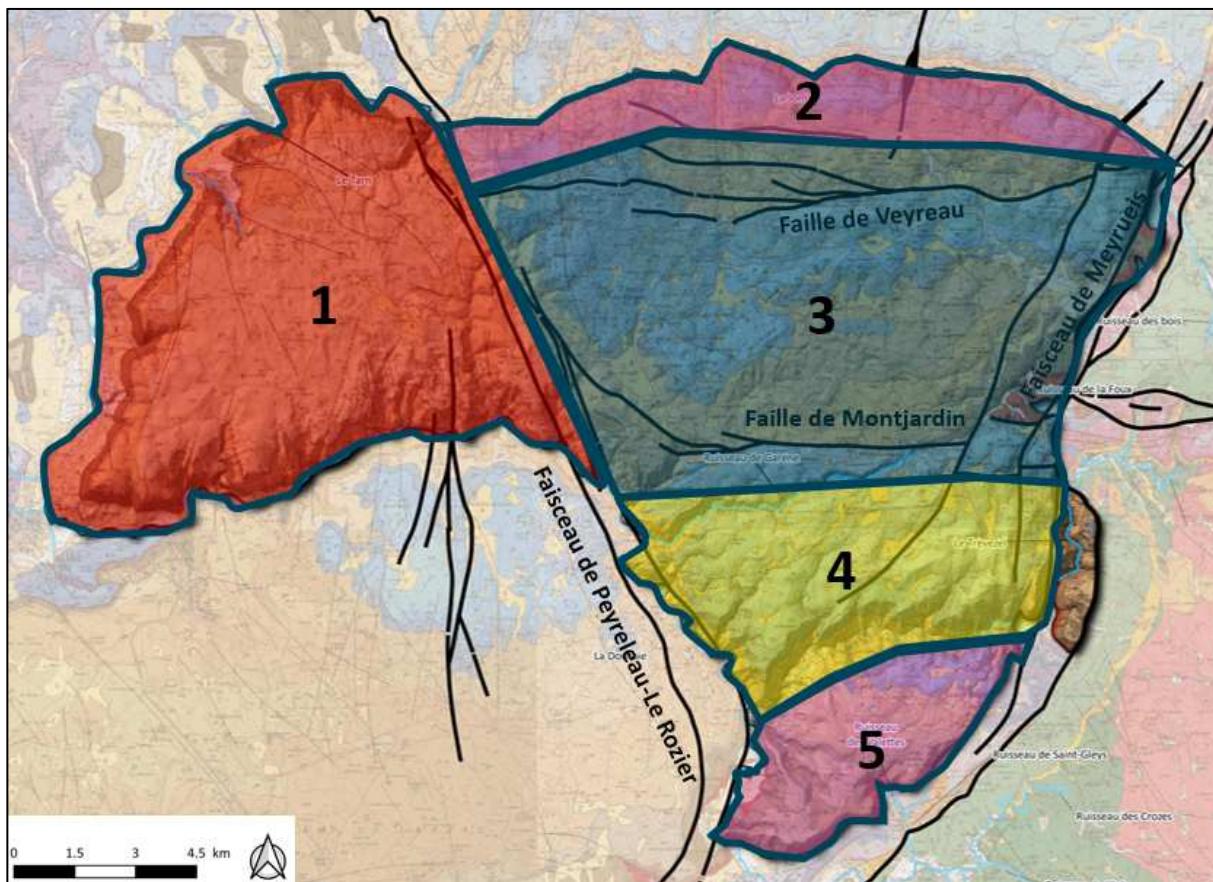
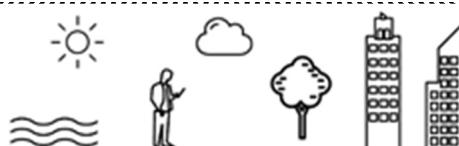


Figure 67. Organisation du Causse Noir en 5 systèmes structuraux et fonctionnels

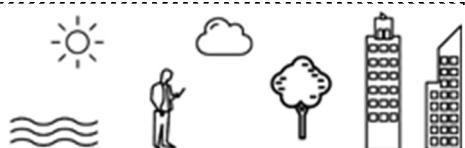
La zone 1 correspond à l'ouest du Causse Noir, la zone 2 à la partie nord-est en bordure de la Jonte, la zone 3 au centre nord-est, la zone 4 définit la partie centre sud-est, et la zone 5 correspond au sud-est du causse (Causse Bégon).

La délimitation des différents secteurs du Causse Noir a été réalisée en lien avec ses caractéristiques structurales, les réseaux de failles et la géologie locale. En effet, ces propriétés ont une influence directe sur la structure des systèmes karstiques, leur fonctionnement hydrodynamique et la surface des bassins d'alimentation que drainent les différentes sources.



Ainsi, le faisceau de failles de Peyreleau-Le Rozier sépare la zone ouest du reste du Causse Noir. Les parties 2 et 3 sont, quant à elles, séparées par la faille de Veyreau. Le faisceau de failles de Meyrueis fracture la bordure est du causse. Les zones 3 et 4 sont divisées l'une de l'autre par la faille de Montjardin. La partie 5 correspond au Causse Bégon, situé au sud-est du Causse Noir qui constitue une entité hydrogéologique à part entière.

Ce découpage donne par ailleurs du relief à la carte des réseaux karstiques souterraines explorés par les spéléologues locaux. Cette carte, présentée en Figure 68, montre la répartition des 85,5 km de réseaux découverts au droit du Causse Noir. Plus de 73 km se développent sur la partie est du causse, soit plus de 85 %. La majorité de ces réseaux se développent dans les zones 3 et 4 définies ici. Ces surfaces correspondent aux bassins d'alimentation des systèmes de Moulin de Corp et de Jouque Merles, les plus productifs en termes de débit. On notera également l'absence de réseaux découverts dans le quart nord-ouest du causse dans laquelle de nombreux traçages n'ont abouti à aucune restitution.



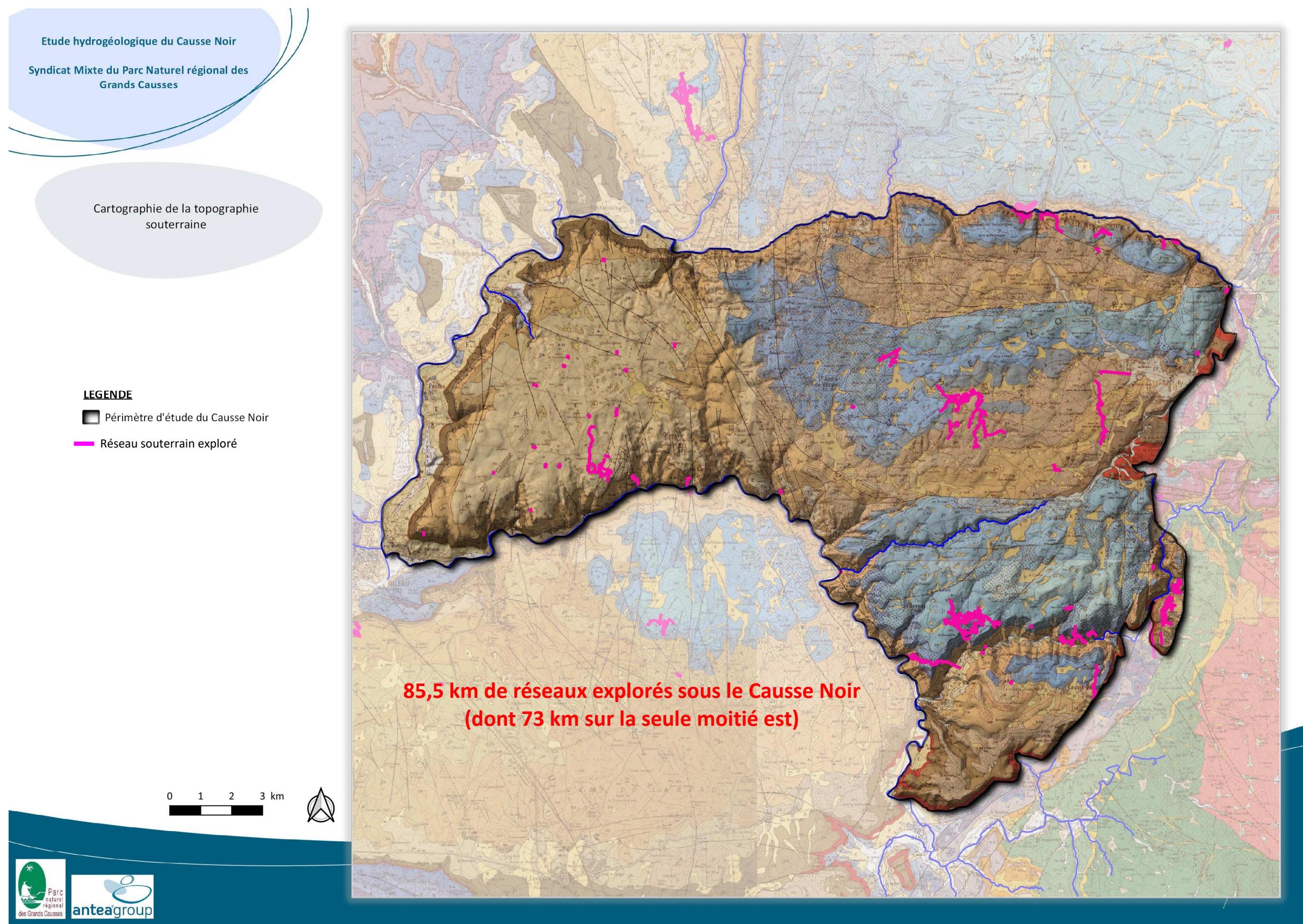


Figure 68. Cartographie des réseaux karstiques souterrains explorés sur le Causse Noir (données cartographiques fournies par les spéléologues locaux)





Zone 1 : Ouest du Causse Noir

Cette zone ne présente pratiquement aucune restitution. Seuls quatre traçages se sont avérés positifs sur cette partie du Causse Noir, dont les TCN 3 et 4 vers la source de Triadou. Ces deux traçages présentent des taux de restitution relativement faibles, entre 1 % et 7 % et des vitesses moyennes peu élevées de 3,7 à 7 m/h. Ces observations sont cohérentes avec celles issues des études hydrodynamique et hydrochimique.

Le TCN 8 a, quant à lui, présenté une restitution positive à la source de Traouchoune. Le manque de données sur ce traçage ne permet pas de connaître la vitesse de déplacement du traceur et le taux de restitution. On notera que cette source se situe en aval d'un réseau karstique exploré par les spéléologues (Cf. Figure 68).

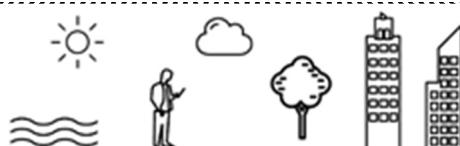
Par ailleurs, le TCN 20 a débouché vers la source de Monna à une vitesse moyenne de 28,2 m/h. Cette vitesse peu élevée est en adéquation avec le fonctionnement singulier de la source mis en lumière à travers les résultats des études hydrodynamique et hydrochimique.

En ce qui concerne les cinq autres traçages réalisés sur cette même zone, aucune restitution n'a été observée. Pour ces absences de restitution il existe plusieurs hypothèses :

- ce secteur ne présente aucun réseau karstique développé connu. Le traceur a pu rester piégé dans la zone non saturée qui joue un rôle important dans l'hydrodynamique des systèmes comme nous l'avons vu précédemment ;
- le traceur a pu être restitué au niveau de sources non suivies par le PNRGC ou le temps de suivi n'est pas été suffisamment long pour pouvoir constater la restitution du traceur ;
- la restitution s'est effectuée directement dans le Tarn à l'ouest du Causse Noir avec un taux de dilution tellement important que la présence du traceur n'a pas pu être décelée par le matériel mis en place. Dans le cadre des mesures de débit réalisés sur le Tarn des apports importants avaient été identifiés mais leur origine et leur localisation restaient à préciser (Cf. Figure 28). Des sources drainant une partie du secteur ouest du causse pourraient être un exutoire possible à ces traçages ;
- la structure géologique sur cette partie du territoire présente une formation synclinale qui pourrait être à l'origine de rétention du traceur en profondeur (hypothèse discutée avec GEOTER).

4.1.1 Zone 2 : Nord-est du Causse Noir

La zone 2 correspond à la bordure nord du Causse Noir qui longe la rivière de la Jonte. Deux traçages ont montré des résultats positifs. Le traceur du TCN 14 a été retrouvé à la source des Douzes et celui du TCN 35 au niveau des sources du Maynial (amont et basse) en rive droite de la Jonte. Ces résultats montrent d'un part, les relations de la Jonte avec les aquifères du



secteur par le biais de nombreuses pertes et ‘autre part, l’existence de relation entre le Causse Noir et le Causse Méjean situé au nord de la Jonte. L’étude hydrogéologique de ce causse est en cours (traçages notamment) et permettra probablement de mieux apprécier les relations entre ces deux causses. Le rôle de la Jonte du fait de son parcours à la fois superficiel et souterrain reste également préciser. Dans ce secteur géographique du Causse Noir, les systèmes aquifères sont caractérisés par de petits bassins d’alimentation qui pourraient s’étendre vers le nord en direction du Causse Méjean à la lumière de nouveaux résultats de traçages.

4.1.2 Zone 3 : Centre nord-est du Causse Noir

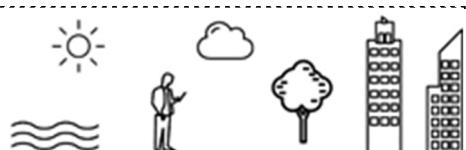
La zone 3 issue du découpage du Causse Noir couvre la surface la plus large des 5. Elle est limitée au nord par la faille de Veyreau, au sud par la faille de Montjardin, à l’ouest par le faisceau de failles de Peyreleau-Le Rozier et à l’est par le faisceau de Meyrueis.

Mis à part les TCN 16 et 17 qui n’ont abouti à aucun résultat positif, l’ensemble des traçages effectués sur cette zone a abouti à des restitutions vers les sources de forts débits, à savoir Moulin de Corp, Castors et des Fournets qui draient cette partie du causse.

Les traçages réalisés dans la zone 3 qui possèdent les vitesses modales les plus élevées sont les TCN 1 (72 et 75 m/h), TCN 22 (63,6 m/h), TCN 23 (85,1 m/h) et TCN 38 (121,7 et 126,7 m/h). Ce sont ces mêmes traçages qui possèdent les plus hauts taux de restitution (entre 15% et 50,6%). Ces traçages ont pour point commun la période de l’année où le traceur a été injecté. En effet, les traçages 1, 22 et 23 ont été réalisés aux mois de mars 2017 et février 2018, et le traçage 38 durant le mois décembre 2018, soit des périodes de hautes eaux. Les autres traçages réalisés sur la zone 3 ont été effectués durant une période estivale. D’une manière générale, les traçages hydrogéologiques réalisés durant l’année 2018 ont été plus efficaces que ceux opérés en 2017.

En outre, dans cette zone, se trouve l’aven des Patates et l’aven du sotch de la Tride, bien connu des spéléologues. Associé à ces avens, il existe le réseau souterrain actif de la Tride qui fera prochainement l’objet d’un prélèvement d’eau destinée à l’alimentation en eau potable des abonnés du syndicat du Causse Noir, via un forage (déjà réalisé). Ce réseau a déjà fait l’objet de traçages par le passé (Marchet en 1989) qui avait montré la relation entre l’aven des patates et les sources de Moulin de Corp et Fournets. Le TCN 38 bis a montré que l’injection du traceur dans l’aven de la Tride transitait par l’aven de Patates situé à plus de 3 km au nord-ouest, avant d’être restitué aux sources de Moulin de Corp et de Fournets qui émergent à 6 km au sud-est de ce point.

En conclusion, les données obtenues à partir des traçages hydrogéologiques de la zone 3 permettent de qualifier ce secteur comme étant bien karstifié et bien drainé vers les sources à fort débit des Castors, de Moulin de Corp et des Fournets. Ces systèmes karstiques



présentent un fonctionnement de type binaire (pertes du Trévezel et cours d'eau de Garène) avec une structure de drainage complexe et étendue sur de longues distances.

4.1.3 Zone 4 : Centre sud-est du Causse Noir

La zone 4 est séparée de la zone 3 par la faille de Montjardin, qui découpe d'est en ouest la partie est du causse. Elle est située au sud du secteur 3 et présente la même configuration que ce dernier. En effet, elle couvre un bassin d'alimentation étendu où la majeure partie des traçages hydrogéologiques réalisés débouchent à la source de Jouque Merle caractérisée par un fort débit (Cf. Tableau 18).

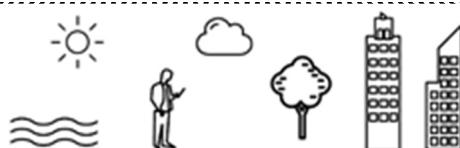
Les TCN 9, 10, 11, 18, 21 et 26 (pertes du Trévezel et de Garène) indiquent des restitutions positives à la source de Jouque Merle et, dans une moindre mesure, à la source de Gardies pour les TCN 21 et 26 (pertes du Trévezel). Le taux de restitution le plus fort concerne le TCN 9 (pertes du Trévezel) avec plus de 95% de traceur restitué et une vitesse de modale de 194 m/h. Ce résultat montre l'existence d'une relation rapide et directe (peu de dispersion du traceur) entre les pertes du Trévezel et la source de Jouque Merles. Le taux de restitution le plus faible a été observé au TCN 18 (ruisseau de Garène, aval station d'épuration) avec 1,2% et une vitesse modale 19,4 m/h. On peut donc penser que le système de drainage entre le Trévezel et Jouque Merles est mieux développé et organisé que celui avec les pertes du ruisseau de Garène. Ce fonctionnement est binaire est un des particularités communes entre les zones 3 et 4.

Enfin, il est intéressant de noter que pour le TCN 2 (réalisé au droit de pertes du ruisseau Garène en mars 2017 en période de hautes eaux), une restitution a été observée à la source de Fournets (zone 3) et à la source de Jouque Merles (zone 4). Ce phénomène de diffluence permet de séparer les bassins d'alimentation de ces deux sources au tracé du cours d'eau de Garène et d'actualiser les limites de ces 2 systèmes majeurs. Notons cependant que pour le TCN 18, réalisé en novembre 2017 (en basses eaux) plus en amont dans le ruisseau de Garène, le traceur n'a été retrouvé qu'à Jouque Merles. La période hydrologique (basses eaux dans le cas du TCN18 et hautes eaux dans le cas du TCN 2) doit donc jouer un rôle dans le fonctionnement de la diffluence des écoulements.

4.1.4 Zone 5 : Sud-est du Causse Noir

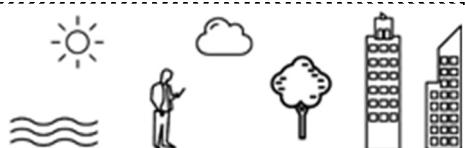
Cette cinquième zone du Causse Noir, correspondant au causse Bégon, n'a fait l'objet que d'un seul traçage (TCN 32) pour lequel aucune restitution n'a été observée (suivi des sources de Jouque Merles et de Gardies et du Trévezel).

Peu de données sont en outre disponibles sur cette partie du Causse Noir où une douzaine de sources sont répertoriées dont la source Ubertariès qui a fait l'objet d'un suivi hydrochimique. L'eau se caractérise notamment par des teneurs en nitrates les plus élevées de l'ensemble des



sources suivies et des concentrations en magnésium peu élevées traduisant des circulations essentiellement dans un milieu calcaire.

Cette unité hydrogéologique semble fonctionner de manière indépendante, isolée entre la profonde vallée de la Dourbie à l'ouest et au sud, la vallée du Trévezel au nord et le faisceau de failles de Meyrueis à l'est.



5 Interprétation de traçages artificiels en domaine karstique par l'utilisation d'une fonction de transfert

Le travail qui suit a été réalisé avec David LABAT, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse.

5.1 Etat de l'art des traçages en génie des procédés

La réalisation d'un traçage dans un réacteur chimique a pour objectif de répondre aux questions suivantes :

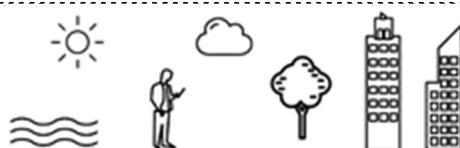
- Existe-t-il des zones mortes, stagnantes ou inutilisées dans le réacteur ?
- Existe-t-il des courts circuits ou une canalisation des écoulements dans le réacteur ?
- Existe-t-il des circulations de fluides dans le réacteur ou bien des entrées et/ou sorties ?
- Peut-on développer un modèle cohérent pour représenter les écoulements internes ?

5.1.1 Définitions et éléments de théorie

Le génie des procédés étudie les phénomènes de transport, de transfert et de transformation de la matière pour appliquer les principes de chimie physique à l'échelle industrielle. Les transformations de matière s'effectuent dans des enceintes dimensionnées à cet effet : les réacteurs chimiques. Ces derniers sont dimensionnés afin d'optimiser l'interaction entre les processus physiques et les réactions chimiques et doivent répondre à des critères de performance. Les opérations de traçage constituent alors un bon moyen de tester la performance de ces réacteurs chimiques. Un réacteur chimique est une enceinte (ou récipient) permettant la réalisation et l'optimisation des réactions chimiques et des procédés de transformation de la matière. Il y a une transformation entre l'entrée et la sortie du réacteur chimique. Cette transformation peut être modélisée par une approche systémique qui consiste à étudier le réacteur à partir de ses fonctions d'entrée et de sortie. La réalisation d'un essai de traçage permet de déterminer la réponse impulsionale du réacteur, aussi appelée fonction de transfert.

Nous avons vu précédemment les éléments théoriques de base pour l'interprétation d'une courbe des restitutions et la DTS associée en domaine karstique. A ce stade, quelques précisions doivent être apportées en se basant sur les connaissances disponibles dans le domaine de génie des procédés.

Dans la littérature du génie des procédés, la courbe de restitution est le plus souvent notée $C(t)$ et la DTS est notée $E(t)$. Les méthodes de calculs pour passer pour passer de la courbe de concentration $C(t)$ et la DTS $E(t)$ sont identiques celles présentées précédemment. Si une masse



de traceur M est injectée dans un réacteur, l'aire théorique sous la courbe de restitution $C=f(t)$ est :

$$A_{th} = \frac{M}{Q_m} \left[\frac{kg}{m^3/s} \right]$$

Avec M = masse de traceur injectée [g]

Q_m = débit moyen en cours de restitution du traceur [m^3/s]

5.1.2 Fonction de transfert

La réponse d'un système à un essai de traçage est exprimée comme un bilan de masse non stationnaire, sous formes d'équations différentielles linéaires avec des coefficients constants qui relient une fonction d'entrée $C_{entrée}(t)$ à une fonction de sortie $C_{sortie}(t)$. La forme générale de ces équations est :

$$\sum_0^n a_n \cdot \frac{d^n \cdot C_{sortie}}{dt^n} = C_{entrée}$$

Avec : n = paramètre de la distribution de la loi Erlang ou la loi Gamma
 dt = pas de temps

A tout instant t le bilan de masse s'exprime tel que :

$$\textbf{Injection + Sources} = \textbf{Restitution + Perte + Accumulation}$$

Avec : *Injection* = quantité de matière injectée pour le traçage.

Sources = quantité de matière présente dans le système ayant une autre origine que le traçage.

Restitution = quantité de matière restituée à la sortie du système.

Perte = quantité de matière qui sort du système par un autre chemin que le point de mesure

Accumulation = quantité de matière piégée dans une zone morte du système.

La transformation de signal entre l'injection et la restitution peut être décrite par une fonction de transfert, notée $H(p)$. Celle-ci est définie dans le plan de Laplace, telle que :

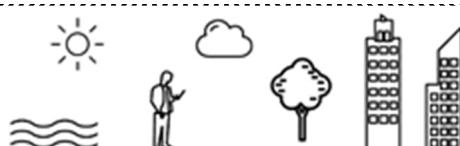
$$H(p) = \frac{C_{sortie}(p)}{C_{entrée}(p)}$$

Avec : $H(p)$ = fonction de transfert

$C_{entrée}(p)$ = transformée de Laplace de la fonction d'entrée (injection)

$C_{sortie}(p)$ = transformée de Laplace des fonctions de sortie (restitution)

p = variable complexe dans le plan de Laplace



La fonction de transfert d'un système est donc définie comme étant le ratio de signaux sortie/entrée dans le plan de Laplace. L'expression générale de la transformée de Laplace d'une variable exprimée dans le domaine temporel est :

$$F(p) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_{0^-}^{+\infty} e^{-pt} \cdot f(t) \cdot dt$$

Avec : $f(t)$ = variable fonction du temps exprimée dans le domaine temporel

\mathcal{L} = opérateur désignant la transformation de Laplace

$F(p)$ = transformée de Laplace de la variable $f(t)$

p = variable complexe dans le plan de Laplace

L'inversion de Laplace est réversible il est donc possible d'inverser la transformation pour exprimer dans le domaine temporel une fonction connue dans le plan de Laplace. L'inversion s'effectue par le calcul d'une intégrale dans le plan de Laplace avec la formule de Mellin :

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{F(p)\} = \frac{1}{2\pi i} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{\gamma-iT}^{\gamma+iT} e^{pt} \cdot F(p) \cdot dp$$

Avec : $f(t)$ = variable fonction du temps exprimée dans le domaine temporel

\mathcal{L}^{-1} = opérateur désignant l'inversion de la transformée de Laplace

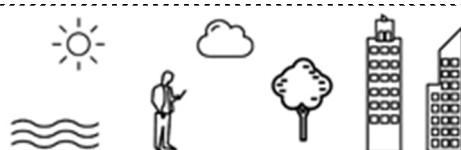
$F(p)$ = transformée de Laplace de la variable $f(t)$

p = variable complexe dans le plan de Laplace

Lorsque les signaux sont suffisamment simples, l'inversion de la transformée de Laplace peut se faire directement à condition de connaître les relations entre domaine temporel et le plan complexe. Certaines fonctions élémentaires et leur transformée de Laplace sont accessibles dans des tables, facilitant ainsi le traitement du signal sans avoir recours la formule de Mellin pour l'inversion. Il existe plusieurs fonctions de bases, plus ou moins employées selon les disciplines et les champs d'application : impulsion de Dirac et peigne de Dirac, fonction rampe, fonction échelon, entre autres. L'impulsion de Dirac est souvent employée dans les opérations de traçages artificiels. Cela consiste à injecter une quantité de matière connue sur un intervalle de temps bref, voire infinitésimal comparé au temps de résidence du traceur dans le système traçage. Dans ce chapitre, seule l'impulsion de Dirac sera présentée puisqu'il s'agit de la fonction d'entrée servant de base à l'interprétation des traçages en domaine karstique. La description des autres signaux de base peut se trouver facilement dans la littérature.

L'impulsion de Dirac, aussi appelée « distribution de Dirac » ou « fonction δ de Dirac », peut être assimilée à une fonction $\delta(t)$ telle que :

$$\begin{cases} \delta(0) = +\infty \\ \delta(t) = 0 \end{cases} \quad \forall t \neq 0 \quad \text{et} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) = 1$$



La fonction δ est un élément de convolution neutre et sa transformée de Laplace est égale à l'unité : $\mathcal{L}[\delta(t)] = 1$. Par conséquent, l'utilisation d'une fonction δ comme signal d'entrée pour l'étude d'un système permet d'en simplifier l'étude. En effet, dans ce cas précis la fonction de transfert du système est directement déterminée à partir de la transformée de Laplace de la fonction de sortie :

$$H(p) = \frac{C_{sortie}(p)}{C_{entrée}(p)} = C_{sortie}(p)$$

Avec : $C_{entrée}(p) = 1$ si $C_{entrée}(t) = \delta(t)$

Dans les opérations de traçages artificiels, les injections sont réalisées sur une période relativement faible (voire négligeable par rapport au temps de résidence moyen dans le système) afin de se rapprocher du cas particulier de la fonction de Dirac. Ainsi, la distribution des temps de séjours correspond à la réponse impulsionnelle du système.

5.2 Modèles de réacteurs chimiques et fonctions de transfert associées

L'approche systémique basée sur l'utilisation d'une fonction de transfert consiste à étudier les phénomènes de transport, de mélange et de transformation de la matière dans un réacteur chimique à partir des signaux d'entrée et de sortie. Ainsi, une fonction de transfert permet de formaliser mathématiquement le lien entre une fonction d'entrée et une fonction de sortie d'un système.

Le comportement des réacteurs chimiques est parfois conforme à celui d'un réacteur idéal. Pour des réacteurs non-idéaux, il est possible de modéliser le réacteur chimique par un assemblage de réacteurs idéaux élémentaires. L'ajustement d'une fonction de transfert sur un système complexe nécessite donc de constituer un assemblage de réacteurs chimiques élémentaires dont le comportement est décrit par sa fonction de transfert.

Il sera abordé ici les principaux modèles de réacteurs idéaux avec leur fonction de transfert associée. Ces modèles seront référencés selon leur appellation anglo-saxonne et la nomenclature couramment utilisée dans la littérature de génie de procédés.

5.2.1 PFR - Plug Flow Reactor (Advection)

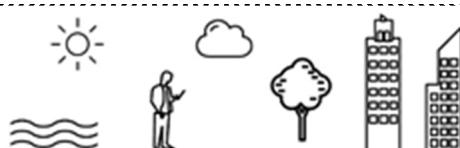
Dans le modèle PFR toutes les particules ont le même temps de résidence. Il en résulte que la fonction de sortie est identique en tout point à la fonction d'entrée, décalée dans le temps. La concentration varie en fonction du temps et de la position :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V' \frac{\partial C}{\partial V_r} = 0$$

Avec : C = concentration [g/L]

V' = flux volumétrique [L/s]

V_r = volume du réacteur [L]



Nous avons abordé précédemment le théorème du retard. Il trouve ici un parfait exemple d'application. En effet, un réacteur PFR a pour seul rôle d'induire un retard temporel dans la fonction d'entrée (Figure 69). Sa fonction de transfert est :

$$H(p) = \exp(-\bar{t} * p)$$

Avec : \bar{t} = temps de résidence moyen

p = variable complexe dans le plan de Laplace

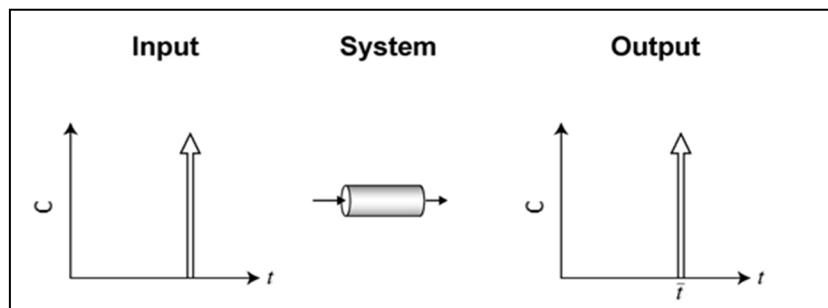


Figure 69. Schéma conceptuel d'un réacteur chimique type PFR

5.2.2 MFR – Mixed Flow Reactor (Mélange)

Un réacteur MFR est un réacteur dans lequel la concentration est identique en tout point. Le fonctionnement du réacteur permet une homogénéisation parfaite avant la restitution au point de sortie. De ce fait, la première concentration mesurée, au premier temps de la restitution, correspond à la concentration moyenne dans le réacteur. Celle-ci correspond au rapport de la masse de traceur injecté sur le volume de fluide contenu dans le réacteur. Dans le cas d'un processus à volume et à débit constants, la courbe de concentration mesurée en sortie correspond à une fonction exponentielle décroissante dépendante du temps (Figure 70). Sa fonction de transfert est donnée par

$$H(p) = \frac{1}{1 + \bar{t} * p}$$

Avec : \bar{t} = temps de résidence moyen

p = variable complexe dans le plan de Laplace

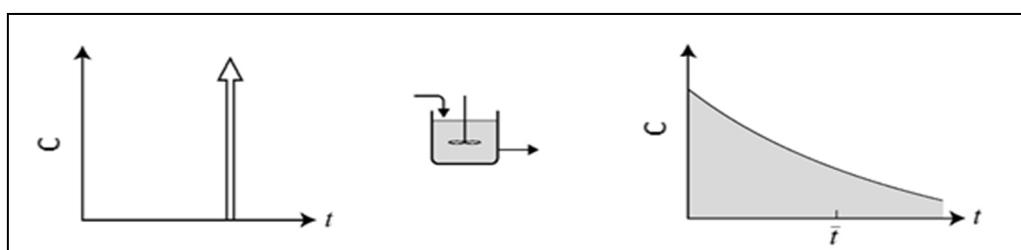
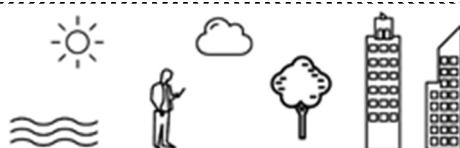


Figure 70. Schéma conceptuel d'un réacteur chimique type PFR



5.3 Application à l'interprétation de traçages artificiels en domaine karstique

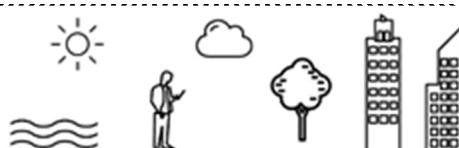
Nous avons abordé précédemment l'application des traçages artificiels en hydrogéologie karstique puis l'application des traçages en génie des procédés. En considérant un système karstique comme un réacteur chimique, il est possible d'appliquer les outils du génie des procédés à l'étude des aquifères karstiques. Pour ce faire, une approche « fonction de transfert » a été développée pour l'interprétation des résultats de traçages artificiels en domaine karstique. Une telle approche systémique permet de modéliser les modalités de transport et de transfert en intégrant l'ensemble des processus physiques se produisant en cours du transit du traceur dans le système : advection, mélange, diffusion, dispersion.

Contrairement à une approche physique basée sur une équation Advection-Dispersion, une approche fonction de transfert n'utilise pas d'information sur la géométrie des écoulements telles que la distance de transit ou la section des conduits. L'approche consiste alors à proposer un modèle de réacteur chimique ayant un comportement semblable au système traçage, qui constitue un sous ensemble du système karstique.

Le génie des procédés étudie des systèmes dont la structure interne est connue puisque les réacteurs chimiques sont des systèmes artificiels conçus spécifiquement pour répondre à des objectifs. A l'inverse, l'hydrogéologie karstique étudie des systèmes naturels, dont la structure interne demeure complexe. Le plus souvent, la répartition spatiale des écoulements n'est que partiellement connue grâce à des investigations spéléologiques ou géophysiques. Il est donc difficile de clairement délimiter le système traçage. En effet, les opérations de traçage ne permettent de caractériser que les chemins d'écoulements préférentiels. Cela peut poser un problème pour interpréter correctement les processus physiques à partir de modèles de réacteurs chimiques. Par ailleurs, la stationnarité du débit ne peut pas être assurée pendant un essai de traçage en domaine karstique. Il est préférable d'effectuer les essais sur des périodes sans influence de la pluie pour limiter les variations de débits en cours d'essais. De fortes variations de débits en cours d'essais peuvent entraîner l'apparition de plusieurs modes dans la DTS.

5.3.1 Modèles conceptuels et fonctions de transfert associées

Le recours à une fonction de transfert pour modéliser un système suppose que la structure et le fonctionnement sont, au moins partiellement, connus. L'objet de l'étude est de proposer un assemblage de modèles de réacteurs idéaux capable de reproduire correctement le comportement du système naturel. Pour ce faire, la fonction de transfert doit intégrer des éléments dont le sens physique est connu. Les principaux modèles conceptuels et fonction de transfert associée seront présentés à partir de la littérature. Dans un souci, d'uniformisation des notations, les fonctions de transfert seront notées $H(p)$.



Becker et Bellin (2013) ont été les premiers à proposer une fonction de transfert pour interpréter des données de traçages artificiels en domaine karstique. La fonction de transfert qu'ils proposent repose sur un modèle de réservoirs en série incluant des zones mobiles et immobiles (Figure 71). Le partitionnement des eaux entre des zones mobiles et immobiles a fait l'objet de nombreuses études. La prise en compte de zones immobiles permet de modéliser les DTS présentant de longue queue de dispersion, appelé « *tailing effect* », difficilement modélisable avec une équation Advection-Dispersion.

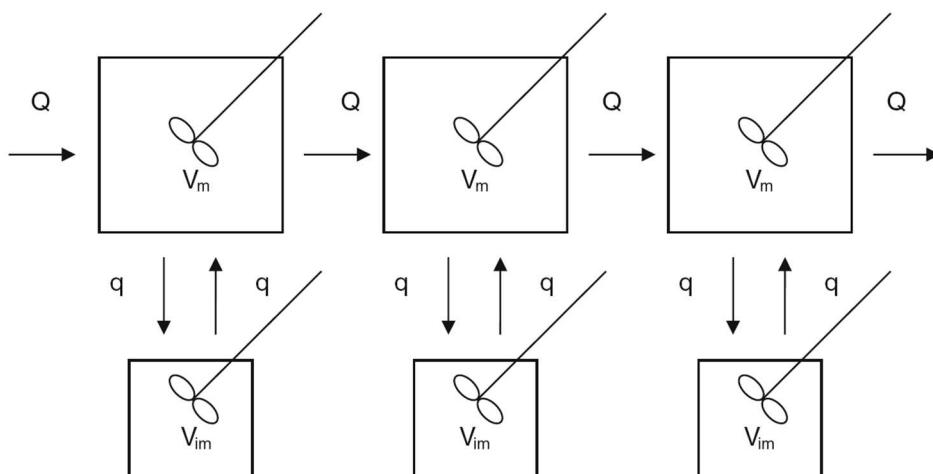


Figure 71. Schéma de réservoirs en série incluant un couplage de zones mobiles et immobiles. La lame d'agitation dans chaque réservoir indique que le mélange est parfait. Il s'agit de la notation standard en génie des procédés (Becker and Bellin, 2013)

La fonction de transfert associée à ce système de réservoirs avec zones mobiles et immobiles est :

$$H(p) = f_m \left(\frac{1}{1 + \frac{p}{N}} \right)^N + f_{im} \left(\frac{1}{1 + \frac{p}{N}} \right)^N \left(\frac{1}{1 + \tau_r p} \right)$$

Avec : f_m = fraction mobile

f_{im} = fraction immobile

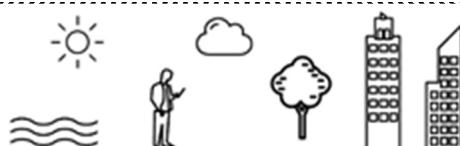
p = variable complexe dans le plan de Laplace

N = nombre de réservoir mobile-immobile

τ_r = ratio entre temps de résidence dans la zone immobile et mobile

L'introduction d'un délai, noté τ , permet de prendre en compte les phénomènes pouvant induire des retards dans la restitution du traceur. Il semble clairement établi que la dispersion ne permet pas à elle seule d'expliquer l'étalement des courbes de restitution dans certains aquifères karstiques.

Labat et Mangin (2015) proposent une approche « fonction de transfert » similaire à celle utilisée pour modéliser la transformation de signal entre pluie et débit. Cela consiste à séparer le transport de traceur entre une composante rapide et une composante lente. Cette approche permet alors de quantifier le rôle des écoulements rapides dans la prévision des



pollutogrammes. Une composante rapide prédominante implique généralement un pic de concentration important et faible mélange des masses d'eau. A l'inverse, un écoulement lent implique une dispersion plus grande et donc une atténuation importante du pic de concentration.

$$H(\mathbf{p}) = \alpha \left[\frac{1}{(1 + A_1 \cdot \mathbf{p})(1 + A_2 \cdot \mathbf{p})} \right]^{N_A} + (1 - \alpha) \left[\frac{1}{(1 + D_1 \cdot \mathbf{p})(1 + D_2 \cdot \mathbf{p})^2} \right]^{N_D}$$

Avec : α = coefficient de partage entre la composante rapide et la composante lente. Il est compris entre 0 et 1.

A_1 et A_2 = paramètres qui contrôlent la composante advective de la fonction de transfert.

D_1 et D_2 = paramètres qui contrôlent la composante lente de la fonction de transfert.

N_A et N_D = exposants respectifs des composantes advective et lente de la fonction de transfert.

Appliquée au système karstique du Baget (Ariège, France), cette fonction de transfert a produit des résultats prometteurs pour modéliser des essais de traçage à la fluorescéine (Labat and Mangin, 2015). Toutefois, l'absence de fonction de délai ne permet pas de modéliser correctement les DTS présentant un effet de « tailling » important et/ou présentant plusieurs modes. Une nouvelle fonction de transfert composée d'un assemblage de k réacteurs chimiques en parallèle, incluant chacun une fonction de mélange et un effet piston, offre une plus grande flexibilité pour modéliser ces DTS complexes. Cela permet, d'une part, de déconvoluer le signal en plusieurs composantes plus ou moins rapides (effet piston) et, d'autre part, de quantifier le degré de mélange de chacune de ces composantes (effet de mélange).

$$H_i(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^k \left[\alpha_i * \left(\frac{1}{1 + A_i * \mathbf{p}} \right)^{N_i} * \exp(-\tau_i * \mathbf{p}) \right]$$

Avec : k = nombre de composantes qui contribue au transport du traceur.

α = contribution de la composante dans le transport du traceur restitué.

A et N = facteur qui contrôle la composante dispersive de la fonction de transfert.

τ = retard à partir de la restitution du traceur.

La déconvolution de l'écoulement entre plusieurs composantes constitue un point essentiel dans la modélisation des processus d'écoulement dans les systèmes karstiques. La décomposition des hydrogrammes a fait l'objet de nombreux travaux. L'hydrogramme de crue peut être décomposé en plusieurs composantes. Celles-ci correspondent à la décroissance du débit en fonction du temps (selon une loi de vidange) de réservoirs fonctionnant en parallèle. Chacun de ces réservoirs contribue au débit au niveau de la source: un système principal correspondant au réseau de conduits, un système intermédiaire composé d'une matrice fissurée et une matrice poreuse. Cette approche consiste à séparer les écoulements à l'échelle du bassin. Il est important de noter que la déconvolution de l'écoulement à partir de données de traçage artificiel ne permet de traiter que la partie des écoulements dans le réseau de drainage principal. En effet, les écoulements en domaine karstique se font essentiellement dans les conduits. Cela restreint les interprétations des données de traçages artificiels à la



compréhension des mécanismes de transport dans les systèmes traçage, et donc à une connaissance partielle du système karstique.

5.3.2 Optimisation et ajustement des paramètres

La détermination des paramètres d'une fonction de transfert d'un système à partir de données d'essais de traçage revient à résoudre un problème inverse. On cherche à déterminer les propriétés d'un système à partir de données expérimentales. Si le problème est bien posé il existe une solution unique qui peut être identifiée de manière analytique ou numérique. Dans le cas d'une résolution numérique d'un problème inverse, la résolution passe par la minimisation ou maximisation d'une fonction coût. Dès lors que cette fonction coût dépasse un certain seuil, la pseudo-solution est jugée apte à résoudre le problème. La qualité de la solution dépend de la qualité des données expérimentales, de l'algorithme d'optimisation, de la fonction coût et du seuil d'acceptation de la solution.

La transformée inverse de Laplace ne pouvant pas être résolue de façon analytique, un algorithme est utilisé pour recalculer le signal temporel correspondant au signal de sortie dont la fonction de transfert est connue. Cet algorithme est implémenté sur MATLAB®.

La procédure consiste ensuite à ajuster les paramètres avec un algorithme génétique. Ce type d'algorithme d'optimisation est basé sur la notion de sélection naturelle. Un ensemble de valeur, appelé « génération », est créé aléatoirement. La fonction coût est calculée pour chaque individu de cette génération. L'algorithme génère ensuite plusieurs générations successives. A chaque génération, l'algorithme retient l'individu le plus apte à résoudre le problème (minimisation de la fonction coût). A terme, la solution qui minimise la fonction coût est retenue. Ce genre algorithme peut être appliqué à l'optimisation de paramètre de fonctions de transfert et il est implémenté sur Matlab®. Le critère d'optimisation qui est retenu ici consiste à minimiser les écarts entre les données simulées et les données expérimentales. Cela revient alors à maximiser le critère de Nash :

$$Nash(\%) = 1 - \frac{\sum(y_{mod}(i) - y_{mes}(i))^2}{\sum(y_{mes}(i) - \bar{y}_{mes})^2}$$

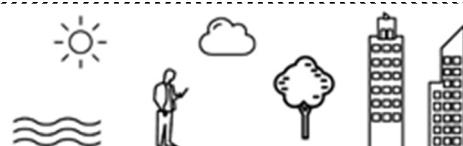
Avec : y_{mod} = données simulées par le modèle.

y_{mes} = données expérimentales mesurées sur le terrain

5.3.3 Résultats de la méthode appliquée aux traçages du Causse Noir

L'ensemble des résultats est présenté en annexe IV.

L'ensemble des identifications des deux parties de la fonction de transfert converge vers la présence d'une première fonction de transfert correspondante à la partie advective du mouvement du traceur très prépondérante par rapport à la deuxième partie. Ceci se traduit ainsi par un pic bien identifié suivi d'un second pic qui est confondu avec la récession de la première partie de la fonction.



En effet la première composant dite rapide correspond en moyenne à 70 à 80% de la réponse totale (mise sous forme de DTS ici) et donc par complémentarité la réponse plus lente correspondant à la réponse matricielle ne correspond qu'à 20 à 30% de la réponse totale.

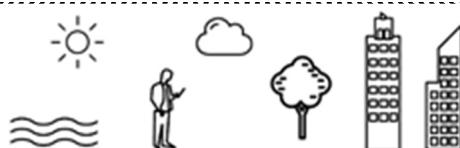
De plus le nombre de réservoirs en cascade (qui correspond aux exposants NA et ND des deux fonctions de transfert restent faibles (inférieur à 3 en moyenne) et donc la réponse du système s'approche d'une fonction linéaire caractérisé par un exposant égal à 1.

Il faut noter que certaines DTS demeurent difficiles à interpréter :

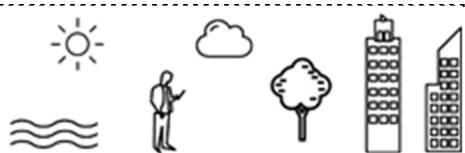
- Le traçage TCN2_Fournets dont la première partie de la fonction de transfert ne correspond visiblement pas à un transfert advectif et par conséquent il faut considérer que la fonction C2 joue le rôle de transfert advectif ;
- Les traçages TCN2_Jouquemerle et TCN11_Jouquemerle dont les exposants de l'ordre de 4 à 7 ne reflètent visiblement pas la réalité du transfert car ceux-ci essaient de rendre compte de la queue de distribution présentant plusieurs pics ;
- Les traçages TCN5_Fournets et TCN5_MoulinCorp présentent de fortes oscillations en queue de distribution qui entraînent des partitions entre C1 et C2 plus proches de 60/40 ou de 50/50 qui ne reflètent pas là non plus forcément du coup la réalité du transfert de soluté.

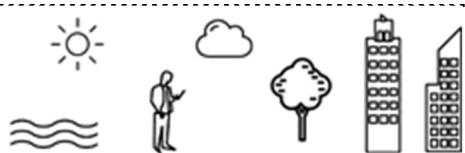
Enfin, certaines fonctions de transfert présentent des exposants très élevés (comme TCN22_Moulin_Corp et TCN38_MoulinCorp) qui caractérisent un écoulement de type dispersif donc un peu plus ralenti et caractérisée par une montée plus lente que lors d'un transfert advectif.

Dans le cas de Moulin de Corp, le modèle restitue donc de manière tout à fait correcte la restitution du traceur avec les limitations explicitées précédemment et conforte donc l'hypothèse de la présence d'un réseau de drainage développé et bien drainé avec une réponse rapide de l'aquifère karstique.



PARTIE V : Vulnérabilité des systèmes aquifères du Causse Noir





1 Introduction

1.1 Rappels sur la notion de vulnérabilité des aquifères

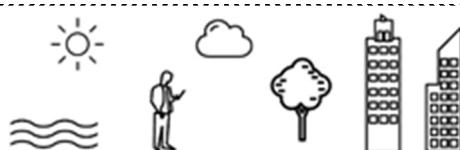
Le concept de vulnérabilité en hydrogéologie est apparu dans les années soixante avec une première définition de J. MARGAT : « pour une nappe, fait d'être plus ou moins exposée, par la nature des terrains et par les conditions hydrogéologiques, à un risque d'être polluée ». La vulnérabilité ou sensibilité des eaux souterraines aux contaminations est une propriété relative, non mesurable ou quantifiable et sans dimensions [VRBA et ZAPOROZEC, 1994].

Cinquante ans plus tard, il n'existe toujours pas de définition simple et unique. En 1970, ALBINET et MARGAT, la définissent comme la possibilité qu'à un contaminant de percoler de la surface jusqu'au réservoir d'eau dans des conditions naturelles. Pour OLMER et REZAC (1974), la vulnérabilité des eaux souterraines est le degré de dangerosité déterminé par les conditions naturelles et non pas par les sources de pollution. En 1983, VILLUMSEN et al. la définissent comme le risque qu'une substance chimique, utilisée ou entreposée sur le sol, représenterait pour la qualité des eaux souterraines. Ces auteurs recommandent par ailleurs l'utilisation de la composition chimique de l'eau souterraine comme indicateur de vulnérabilité et proposent que les analyses chimiques puissent vérifier les cartes de vulnérabilité.

On commence ici à voir apparaître les concepts de vulnérabilités intrinsèque et spécifique qui seront développés plus tard. En effet, en 1998, le Comité National Français des Sciences Hydrologiques (CNFSH), note que le concept de vulnérabilité «en général», indépendamment des types de polluants et des processus de pollution, est trop simple. Il doit non seulement faire l'objet d'une classification en différents degrés, mais aussi d'une différenciation en fonction des principaux processus de pollution : suivant l'origine (surface du sol, sous-sol, stockage souterrain, forage, eau de surface polluée), la durée (pollution accidentelle ou chronique) et l'extension (source de pollution ponctuelle ou diffuse).

Ces définitions ont été complétées par FOSTER, qui, en 1987, fait une distinction entre vulnérabilité intrinsèque et vulnérabilité spécifique. Nous retiendrons les définitions de l'Action COST 620 [ZWALHEN F., 2004], reconnues et utilisées par tous :

- la **vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques (et éventuellement climatologiques et de végétation) qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines aux contaminations par les activités humaines ;
- la **vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un contaminant particulier ou à un groupe de contaminants. Elle caractérise donc la vulnérabilité du milieu indépendamment des éléments transportés. Elle prend en compte la nature du polluant dont le comportement dépend à la fois de ses propres propriétés physico-chimiques et des caractéristiques physico-chimiques et biochimiques du milieu. Les principaux mécanismes observés sont:



- l'adsorption, qui caractérise le pouvoir de fixation des minéraux et de la matière organique du sol ;
- la complexité, combinaison chimique de composés pouvant changer le pouvoir migrant du produit initial ;
- la précipitation sous forme d'un composé plus complexe et insoluble ;
- la biodégradation pouvant affecter certains polluants organiques ;
- la volatilisation.

Cette liste non exhaustive montre la difficulté de connaître les caractéristiques de propagation des polluants dans le sol. C'est pourquoi il apparaît plus logique d'étudier la vulnérabilité intrinsèque, car plus généraliste et objective dans l'approche de la vulnérabilité d'un milieu à une pollution quelconque. Ainsi, dans les méthodes développées, les pressions anthropiques en surface ainsi que la nature et les modalités de transport des contaminants dans l'aquifère ne sont pas prises en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque.

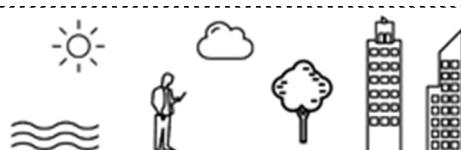
L'appréciation de la vulnérabilité intrinsèque repose sur la distinction de trois milieux bien définis jouant chacun un rôle différent dans la migration d'un polluant, à savoir le sol, la zone non saturée et la zone saturée. Il a été fait une distinction entre la vulnérabilité de la ressource et la vulnérabilité de l'exutoire qui peut être naturel (source) ou anthropique (pompage sur un forage) (BRGM, 2009) :

- la vulnérabilité de la ressource doit permettre de caractériser la vulnérabilité du transfert potentiel du contaminant au sein de la zone d'infiltration jusqu'à la surface de la zone noyée et quantifier ainsi la plus ou moins grande facilité qu'aura un polluant de pénétrer jusqu'au réservoir aquifère. Il s'agit de caractériser des zones qui influencent la qualité de l'eau d'un aquifère sur toute l'étendue de son bassin d'alimentation, soit de manière permanente (bruit de fond constitué par une pollution diffuse), soit accidentelle (anticipation sur les conséquences). Elle prend donc principalement en compte les caractéristiques du transfert vertical.
- la vulnérabilité de l'exutoire (source ou captage) prend en considération en plus les caractéristiques du transit et horizontal dans la zone saturée jusqu'à l'exutoire du système. Il s'agit dans ce cas-là d'apprécier la façon dont le polluant s'évacue du réservoir aquifère une fois que celui-ci est atteint. Elle est fonction de l'inertie du système et de l'importance de la réserve en eau de celui-ci.

Dans la présente étude, la cartographie de la vulnérabilité se limite à l'analyse de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques du Causse Noir.

1.2 Notion de pollution

Une pollution appliquée à la surface d'un bassin d'alimentation se définit à la fois du point de vue spatial et temporel. D'un point de vue spatial, les pollutions peuvent être diffuses ou ponctuelles. D'un point de vue temporel, les pollutions peuvent être accidentelles ou chroniques.



La réalisation d'une carte de la vulnérabilité de la ressource en eau permet d'appréhender les conséquences de ces pollutions. Selon le type de pollution identifiée, des recommandations peuvent par exemple être proposées en vue de mettre en place ou de modifier les contours des périmètres de protection rapprochés (cas d'une pollution ponctuelle, qu'elle soit accidentelle ou chronique) ou des zones d'action prioritaire au sein d'une Aire d'Alimentation de Captage (pollution diffuse chronique).

1.3 Description et historique de la méthode PaPRIKa

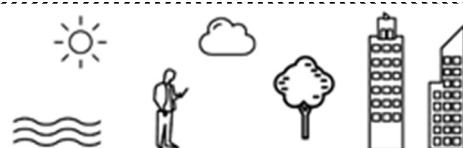
Les premières cartes de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine étaient principalement basées sur la nature des terrains affleurant. Elles représentaient une transcription de la carte géologique en estimant les vitesses de transferts en fonction de la nature lithologique des terrains. Dans cette classification; les zones karstiques ont ainsi toujours été considérées comme très vulnérables.

Ces cartes ont évolué dans les années 1990 en prenant en compte la typologie des substances polluantes au comportement différent dans la zone non saturée. Les SIG (Systèmes d'Information Géographiques) ont ensuite permis de combiner des couches de données de nature différente, afin d'obtenir automatiquement de nouvelles informations spatiales et descriptives. Les cartes ont ainsi évolué passant de documents destinés à des techniciens, à des outils d'aide à la décision.

Parmi les nombreuses approches développées dans le monde entier pour déterminer la vulnérabilité des eaux souterraines, les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères sont apparues comme les plus pertinentes vis-à-vis des réalités de terrain. Le principe de ces méthodes est basé sur le choix de critères caractérisant la vulnérabilité du milieu, eux-mêmes divisés en une gamme d'index. Un système de pondération est également introduit entre les critères traduisant leur importance relative les uns par rapport aux autres.

La vulnérabilité peut ainsi être appréciée par croisement de critères cartographiques simples (morphologiques, pédologiques, géologiques, structuraux et hydrogéologiques). L'objectif est d'identifier les zones où des pollutions ont potentiellement les temps de transferts les plus courts vers la source et/ou le captage à travers la zone d'infiltration et la zone noyée.

L'application de cette approche aux aquifères karstiques a été initialement développée en 1998 en Suisse avec la méthode EPIK qui permet de dresser une cartographie de la vulnérabilité intrinsèque à partir de quatre paramètres : Epikarst, couverture Protectrice, conditions d'Infiltration et développement du réseau Karstique [Doerfliger N., Zwahlen F., 1998]. Les zones de protection sont directement issues des résultats de cette cartographie selon des critères imposés dans un guide (OFEFP, 2004).



Elle a été adaptée de façon différente dans plusieurs pays (SYNTACS Pro Karst en Italie, COP en Espagne, etc.). En France, un outil analogue a été développé en 2001 (RISKE). Il repose sur un modèle conceptuel de l'aquifère karstique pour déterminer quatre à cinq critères [Pettelet-Giraud E., Doerfliger N., Crochet Ph., 2000] :

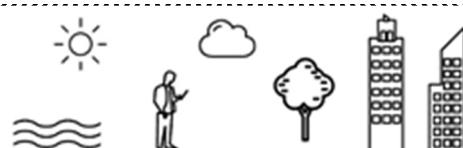
- **R** (Roche) : nature lithologique et état de fracturation du réservoir aquifère ;
- **I** (Infiltration) : conditions d'infiltration diffuse et ponctuelle à partir des pentes et de la cartographie des pertes, dolines et avens, ainsi que la distance aux cours d'eau alimentant les éventuelles pertes ;
- **S** (Sol) : caractéristiques de la couverture pédologique et des formations géologiques sus-jacentes à la roche aquifère ;
- **K** (Karstification) : degré d'organisation des écoulements et position des axes de drainage connus à partir des études hydrogéologiques ou par exploration directe ;
- **E** (Epikarst) : morphologie karstique en surface (regroupé avec S dans la méthode RISKE 2, dans un critère P = Protection).

Les cartes obtenues répartissent la vulnérabilité en 5 classes, allant de 0 à 4, 0 étant la vulnérabilité la plus faible, 4 étant la vulnérabilité la plus forte.

La méthode **PaPRIKa** (acronyme de « Protection des aquifères karstiques basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification ») constitue l'évolution de la méthode RISKE. Elle constitue un outil de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères et des systèmes karstiques permettant, soit de caractériser la vulnérabilité de la source ou du captage en vue de délimiter des périmètres de protection, soit de caractériser les bassins d'alimentation des captages dans une démarche de protection prioritaire des captages vis-à-vis des pollutions diffuses.

Les notions de Protection, de Réservoir, d'Infiltration et de degré de Karstification correspondent à 4 critères **P**, **R**, **I** et **Ka** qui décrivent la structure et le fonctionnement du système karstique. Ils sont définis comme tel :

- **P** (couverture Protectrice) : correspond à la structure la plus protectrice résultant de la combinaison du critère Sol, des caractéristiques de la zone non saturée (lithologie, épaisseur, fracturation) et le fonctionnement épikarstique. C'est sur ce critère que l'analyse géomorphologique doit guider l'interprétation de l'hydrogéologue ;
- **R** (nature du réservoir souterrain) : caractérise la potentialité de la roche à être karstifiée ;
- **I** (nature de l'infiltration) : caractérise les conditions d'infiltration diffuse et ponctuelle à partir des pentes et de la cartographie des pertes, dolines et avens, ainsi que la distance aux cours d'eau alimentant la perte. C'est une modification de ce critère à partir de la connaissance des données de traçages qui permet de passer de la carte de vulnérabilité de la ressource à la carte de la vulnérabilité du captage ;



- **K_a** (degré de karstification et de fonctionnement du système karstique) : tient compte du degré d'organisation des écoulements et souligne la position des axes de drainage connus à partir des études hydrogéologiques et/ ou reconnus par exploration directe.

L'ajout de valeurs de pondération à chacune des cartes obtenues permet de définir la vulnérabilité intrinsèque globale qui distingue les zones non-karstiques qui participent à l'alimentation du système.

PaPRIKa résulte de la prise en compte des méthodes EPIK et RISKE (1 et 2) ainsi que des nombreux développements qui ont eu lieu au niveau européen au cours de la dernière décennie. Elle a fait l'objet d'un guide BRGM – ONEMA en 2010 et est développée par l'Unité Mixte de Recherche (UMR) SISYPHE de l'université Pierre et Marie Curie PARIS VI.

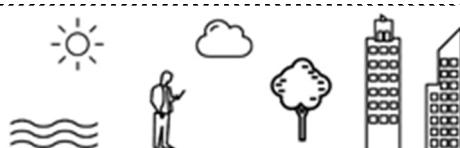
1.4 Données spatiales utilisées

Dans le cadre de l'étude du Causse Noir, les sources de données suivantes ont été utilisées :

- version numérique vectorielle des cartes géologiques (Saint-Beauzély-909, Meyrueis-910, Millau-935, Nant-936) ;
- le Modèle Numérique de Terrain de l'IGN à la résolution de 5 m, notamment pour le calcul des pentes ;
- les cartes géomorphologiques établies par GEOTER (Lot 2) dans un format vectoriel géoréférencé.

La version numérique des cartes géologiques et le MNT ont été fournis par le PNRGC.

Il convient de préciser que dans un souci de cohérence et d'homogénéité avec les études réalisées sur les causses voisins (Saint-Affricain et Guilhaumard tout particulièrement, Cf. rapport n°RP-64689 de juillet 2015 du BRGM), certains critères ont été interprétés à l'identique dans la présente étude (notamment vis-à-vis du rôle des formations superficielles sur l'infiltration des eaux météoriques).



2 Application de la méthode PaPRIKa

2.1 Le critère de protection (P)

Le critère P donne des informations sur la couverture protectrice et caractérise l'aptitude à générer un retard à l'infiltration. Il dépend des sous-critères « Sol » (S), « aquifère Epikarstique » (E) et « Zone Non Saturée » (ZNS). Lorsque l'écoulement est vertical, la protection est assurée par la couche la moins perméable. On retient donc lors du croisement des sous-critères, celui qui est le moins protecteur vis-à-vis de la ressource en eau (cas le plus pénalisant). Ces trois sous-critères sont décrits ci-après.

Les données utilisées pour la réalisation de la carte de ce critère sont en partie issues des données géomorphologiques fournies par GEOTER dans le cadre du Lot 2.

2.1.1 Le sous critère « Epikarst » : E

L'épikarst ou zone épikarstique correspond à la partie superficielle d'une formation carbonatée sous couverture ou non. L'épikarst peut jouer le rôle de réservoir temporaire et a donc une fonction de retardateur vis-à-vis de l'infiltration d'un éventuel polluant. Ce sous-critère est ainsi considéré comme protecteur.

L'absence d'un aquifère épikarstique est considérée comme la situation la plus pénalisante vis-à-vis de la vulnérabilité de l'aquifère sous-jacent. Un épikarst développé assure une protection plus efficace de la ressource en eau de l'aquifère karstique, en limitant ou retardant l'infiltration rapide vers la zone noyée sous-jacente.

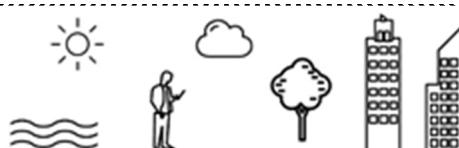
Ainsi, selon la méthode PaPRIKa, un secteur où l'épikarst est peu développé se verra affecter un indice de vulnérabilité élevé, et inversement.

Pour le sous critère E, quatre classes sont définies et illustrées dans le tableau ci-dessous :

Indice	Description
E ₁	Aquifère perché avec présence de puits et d'un niveau piézométrique, voir d'un lac temporaire
E ₂	Aquifère épikarstique continu latéralement avec des sources temporaires d'un débit de l'ordre du litre/seconde et existence de puits collectant les eaux ; effet de stockage vérifié
E ₃	Existence d'un aquifère avec présence de sources de débits peu importants et d'une continuité latérale plus ou moins bien représentée ; l'effet retard est limité
E ₄	Pas d'aquifère épikarstique

Tableau 33. Description des indices du sous critère E

En ce qui concerne le Causse Noir, les paramètres définissant le degré de vulnérabilité de l'épikarst ont été définis selon la cartographie des formations superficielles et des couvertures karstiques réalisée par GEOTER. Ainsi, les zones présentant des argiles à chailles ou des argiles



d'altération volcanique sont considérées comme très vulnérables puisqu'elles ne disposent pas d'un épikarst sous-jacent développé qui tamponnerait les écoulements d'eau superficielle. Au contraire, la présence de grésou en surface indique l'existence d'un épikarst développé qui retarde l'infiltration et limite la vulnérabilité du site vis-à-vis d'une pollution. Cette interprétation est cohérente avec celle de l'étude réalisée sur le Causse Saint-Affricain.

2.1.2 Le sous critère « Nature du sol » : S

Le sol représente la couche superficielle du système karstique. L'épaisseur et la nature du sol déterminent la quantité d'eau qui peut s'infiltrer dans le système. Pour caractériser le sol, le guide PaPRIKa a dressé deux tables types. Dans un premier temps, la nature du sol est caractérisée à partir de sa texture et du pourcentage de cailloux (Cf. tableau ci-dessous).

		Texture		
		<i>Argile</i> $A > 12 \%$	<i>Limons</i> $A < 12 \% \text{ et } S < 60 \%$	<i>Sable</i> $S \geq 60 \%$
% cailloux	0-15 %	1	1	2
	15-60 %	1	2	3
	>60 %	2	3	4

Figure 72. Nature d'un sol en fonction de sa texture et de sa proportion de cailloux

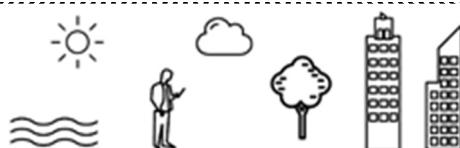
Dans un second temps, la nature du sol est croisée avec son épaisseur pour obtenir la note finale du sous critère « sol » (Cf.).

Critère S		Nature du sol				
		<i>inconnue</i>	1	2	3	4
Zones imperméabilisées		S_0				
Epaisseur	> 5 m	S_1	S_1	S_1	S_2	S_3
	1-5 m	S_1	S_1	S_2	S_3	S_3
	60-100 cm	S_2	S_2	S_3	S_4	S_4
	30-60 cm	S_3	S_3	S_4	S_4	S_4
	0-30 cm	S_4	S_4	S_4	S_4	S_4

Figure 73. Description des indices du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur

On obtient *in fine* une note comprise entre S_0 et S_4 correspondant respectivement à une vulnérabilité très faible à très forte.

Pour déterminer la vulnérabilité du Causse Noir selon le critère sol, il a été choisi d'utiliser la carte des formations superficielles élaborée par GEOTER. Contrairement au sous critère « épikarst », les zones présentant des argiles à chailles sont considérées comme des formations imperméables, donc très peu vulnérables. Les sites dépourvus de sol ou composés de grésou sont propices à l'infiltration rapide des écoulements superficiels, ils sont donc représentés par un degré de vulnérabilité élevé.



2.1.3 Le sous critère « ZNS » (Zone Non Saturée) : ZNS

La zone non saturée de l'aquifère assure le transfert de l'eau infiltrée vers la zone saturée, lieu des écoulements souterrains. La lithologie, l'épaisseur ainsi que le degré de fracturation de cette partie de l'aquifère vont influencer la vitesse de transfert et donc la vulnérabilité du système. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces trois paramètres de manière distincte pour caractériser le critère ZNS.

Pour déterminer l'épaisseur de la zone non saturée sur le Causse Noir, celui-ci a été découpé suivant les bassins d'alimentation des principales sources (catégorie 1 et 2). A l'échelle de chaque bassin, l'épaisseur de la ZNS a été calculée à partir de la différence entre le modèle numérique de terrain (MNT) et la cote d'émergence de la source, ce qui amène à considérer par simplification une piézométrie plane sur l'ensemble du bassin d'alimentation. Cette épaisseur est par la suite couplée aux données de lithologie et de fracturation pour estimer le niveau de vulnérabilité.

La lithologie de la zone non saturée est prise en compte pour l'estimation de la vulnérabilité. Elle est définie selon quatre classes notées (L_{ZNS}) de la manière suivante :

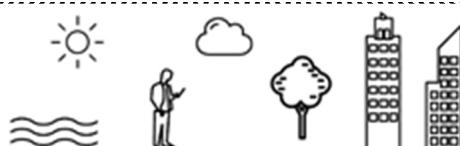
Lithologie de la ZNS (L_{ZNS})	
$L_{ZNS}0$	Couches d'argiles de forte épaisseur
$L_{ZNS}1$	Marno-calcaires, craie
$L_{ZNS}2$	Calcaires en petits bancs et/ou avec intercalations d'argiles
$L_{ZNS}3$	Calcaires en gros bancs massifs

Figure 74. Classes décrivant la lithologie de la Zone Non Saturée

Lorsque la zone non saturée est caractérisée par des lithologies différentes, il sera seulement retenu le terrain le moins perméable de la colonne lithostratigraphique.

Dans un second temps, l'intégration du degré de fracturation et de l'épaisseur de la zone non saturée permet de déterminer les différentes classes du critère ZNS (Cf. Tableau 34).

Notons que les failles représentent les formations de plus haut degré de vulnérabilité. Compte tenu de la taille de la maille de calcul sous SIG (5 m), une zone tampon de 50 mètres a été délimitée de part et d'autre des failles afin qu'elles soient rendues visibles sur la carte finale.



Le croisement des trois paramètres : lithologie, fracturation et épaisseur donne les cinq classes suivantes (ZNS_0 à ZNS_4 , correspondant respectivement à une vulnérabilité très faible à très forte) :

Critère ZNS		Epaisseur		
		< 15 m	15-50 m	> 50 m
Fracturation	Faible-moyenne	Lzns +1	Lzns	Lzns
	Importante	Lzns +1	Lzns +1	Lzns
	Forte au niveau de faille	4	4	4

Tableau 34. Description des classes du critère ZNS par croisement des paramètres lithologie, fracturation et épaisseur

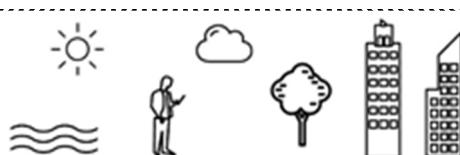
2.1.4 Résultats

Le degré de vulnérabilité vis-à-vis du critère P se définit selon trois sous-critères S, E et ZNS dont la notation va être fortement liée à la lithologie et à la nature des formations de surface. Le détail est illustré dans Tableau 35 ci-après.

A titre d'exemple, une couverture pédologique composée d'éboulis a été considérée comme peu vulnérable, tandis qu'un sol nu (formation carbonatée fracturée dans ce cas) est plus sensible aux éventuelles pollutions. L'épikarst se développant plus favorablement au droit des zones recouvertes de grésou, ces surfaces apparaissent avec un degré de vulnérabilité faible. D'un point de vue structural, les failles correspondent à des formations très vulnérables et les zones couvertes d'argile et de marnes sont moins vulnérables selon la méthode PaPRIKa.

Note	Critère P		
	S « Sol ou couverture pédologique »	E « Epikarst »	ZNS « Zone Non Saturée »
0	-	-	Argiles, marnes noires, schiste bitumineux, formations marno-calcaire
1	Masses glissées, formations colluviales, éboulis (périglaciaires)	Zones inondées, remplissage de grésou, dolines et canaules	Grès, dolomies, calcaires, alternances calco-marneuses
2	Argiles à chailles (fond), argiles d'altération volcanique, formations fluviatiles (y/c résiduelles), mégadolines fond, remplissage de grésou, dolines et canaules	Formations fluviatiles (y/c résiduelles), formation colluviales, éboulis (périglaciaires), zone sans sol	Dolomies cristallines, calcaires à chaille calcaires en gros bancs, calcaires dolomitiques, calcaires à lits marneux
3	Grésou	Masses glissées, drainages endoréiques	Dolomies, calcaires dolomitiques, calcaires blancs en gros bancs, dolomie grises caverneuses, dolomies cristalline
4	Pas de sol	Argiles à chailles (fond), argiles d'altération volcanique, pente > 50%	Failles

Tableau 35. Détermination du degré de vulnérabilité pour les sous-critères S, E et ZNS selon la lithologie et les formations de surface



La réalisation des cartes de vulnérabilité de ces trois sous critères permet d'établir la carte globale de vulnérabilité du critère « Protection » en retenant le plus haut degré de vulnérabilité en chaque point. Cette carte est présentée en Figure 75.

La moitié est et le pourtour du causse présentent une vulnérabilité très élevée (figurée en couleur rouge), tandis que le centre et la partie ouest possèdent une vulnérabilité élevée (couleur orange). Cette répartition de la vulnérabilité est largement influencée par le critère S et tout particulièrement, par la présence et la nature des formations de recouvrement.

Cette observation est cohérente avec les résultats mis en évidence à partir des traçages et des suivis hydrodynamiques et physico-chimiques, le grésou et les argiles à chailles jouent un rôle prépondérant dans le fonctionnement hydrogéologique des systèmes aquifères du Causse Noir, tout particulièrement sur l'effet retard vis-à-vis de l'infiltration des eaux météoriques.



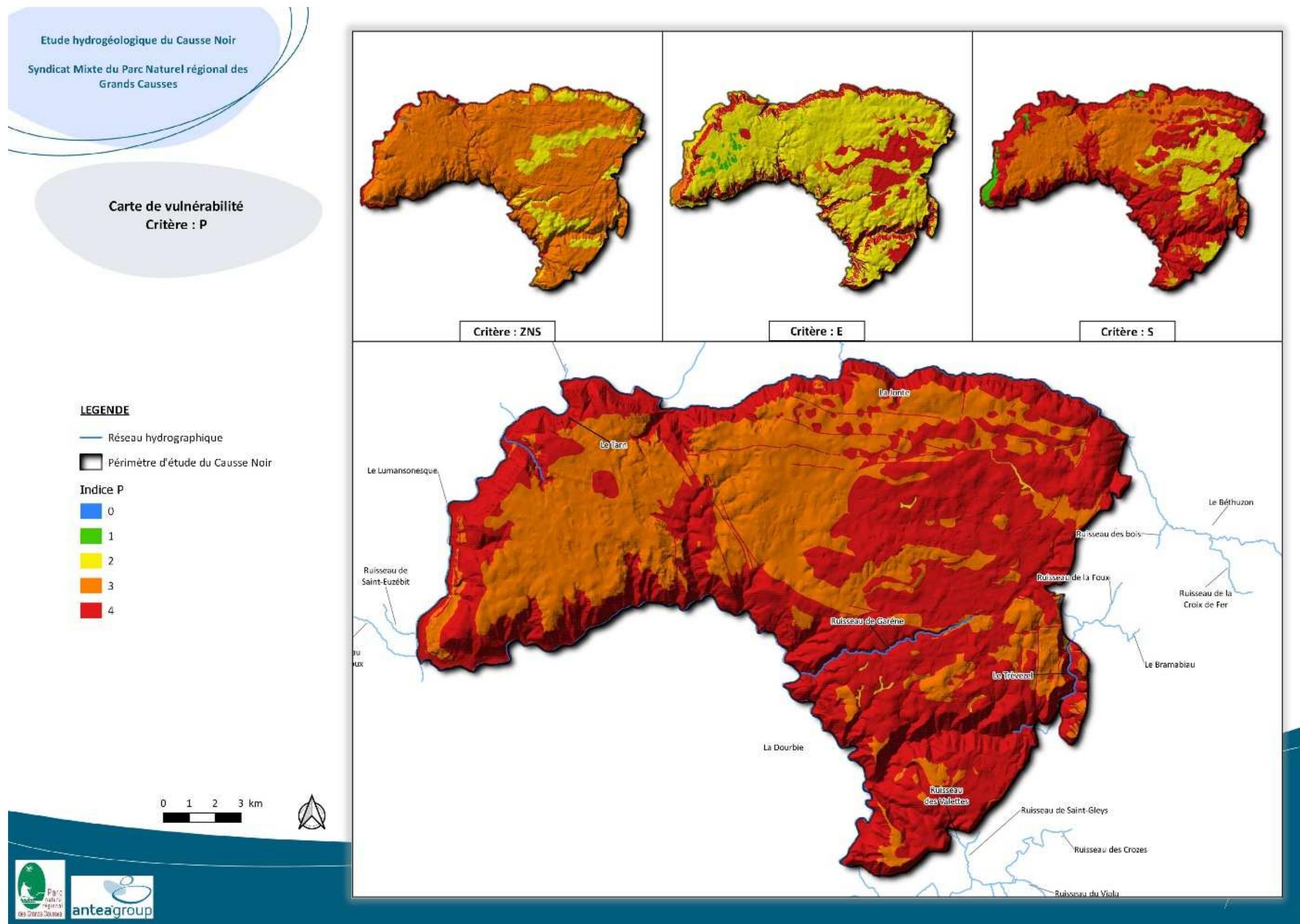


Figure 75. Carte de vulnérabilité du Causse Noir selon le critère P





2.2 Le critère Réservoir (R)

2.2.1 Méthode

Le critère R décrit la nature lithologique la roche réservoir. Il est apprécié suivant la lithologie et la fracturation.

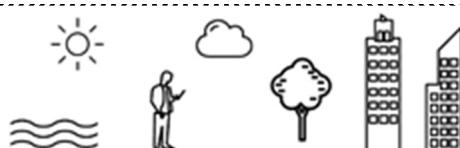
Le guide PaPRIKa propose un classement des principales formations géologiques à potentialité aquifère. Elles ont été classées en fonction de l'influence qu'elles peuvent avoir sur la vulnérabilité des aquifères (Cf. tableau ci-dessous).

Indice	Description
R ₁	Cette classe regroupe les formations marno-calcaires (25-35% minéraux argileux) ainsi que la craie, affectée d'une fracturation faible qui auront une influence limitée en termes de vulnérabilité, les circulations d'eau restant là encore relativement lentes.
R ₂	Cette classe regroupe les formations de calcaires marneux (la proportion argileuse est plus faible que pour la classe R ₁ : 10-25%), craie affectée d'une fracturation forte ; Calcaires et dolomies en petits et gros bancs avec fracturation homogène et pendage ou contre pendage inférieur à 45 degrés , dont le sens est favorable à un écoulement en direction du captage comme cela l'est confirmé par ailleurs lors de la délimitation préalable du bassin d'alimentation.
R ₃	Cette classe regroupe les formations calcaires et dolomitiques, soit massives en gros bancs non fracturés, soit en petits bancs avec des intercalations argilo-marneuses avec une fracturation homogène. Ce type de formation permet des circulations relativement faciles et rapides : <ul style="list-style-type: none"> - Calcaires et dolomies massifs en gros bancs fracturés et karstifiés, - Calcaires et dolomies en gros bancs avec un pendage ou contrependage supérieur à 45 degrés par rapport à la localisation de la source
R ₄	Cette classe regroupe les zones reconnues cartographiées ou présupposées de réseau de cavités et de zones de failles affectant le réservoir, parallèles au gradient hydraulique.

Figure 76. Description des indices du critère R

2.2.2 Résultats

Le Tableau 36 présente la notation de la vulnérabilité de la roche réservoir selon sa nature. Les argiles et les marnes sont des formations peu vulnérables puisque qu'elles sont peu perméables. Les dolomies et les calcaires présentent, eux, une vulnérabilité modérée à élevée vis-à-vis des écoulements souterrains et du processus de karstification. Enfin, les failles sont ici considérées comme très vulnérables puisqu'elles favorisent généralement le transfert des eaux de surface vers les réseaux souterrains.



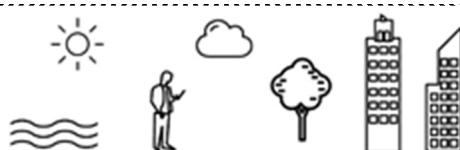
Note	Critère R
0	Argiles, marnes noires, formations marno-calcaires, fracturation faible voire nulle
1	Grès, dolomies, calcaires avec fracturation homogène, formations calco-marneuses
2	Dolomies cristallines, calcaires à chailles, calcaires en gros bancs et avec une fracturation homogène, calcaires dolomitiques, calcaires à lits marneux
3	Dolomies massives fracturées ou non, calcaires dolomitiques, calcaires en gros bancs fracturés ou non, dolomies grises caverneuses, dolomies cristallines
4	Failles et réseau de cavités

Tableau 36. Détermination du degré de vulnérabilité pour le critère R selon la lithologie des formations aquifères

La cartographie de la vulnérabilité du Causse Noir selon le critère R est illustrée à la Figure 77.

La majeure partie du causse possède des roches aquifères composées de calcaires et de dolomies. Ces formations sont perméables en grand et propices à la dissolution, ce qui les rend vulnérables selon la méthode PaPRIKa.

La partie ouest du Causse Noir est illustrée par une vulnérabilité élevée (couleur orange), tandis que quelques zones à l'est sont considérées comme possédant une vulnérabilité modérée (couleur jaune) du fait de la présence de niveaux calcaires à intercalations marneuses.



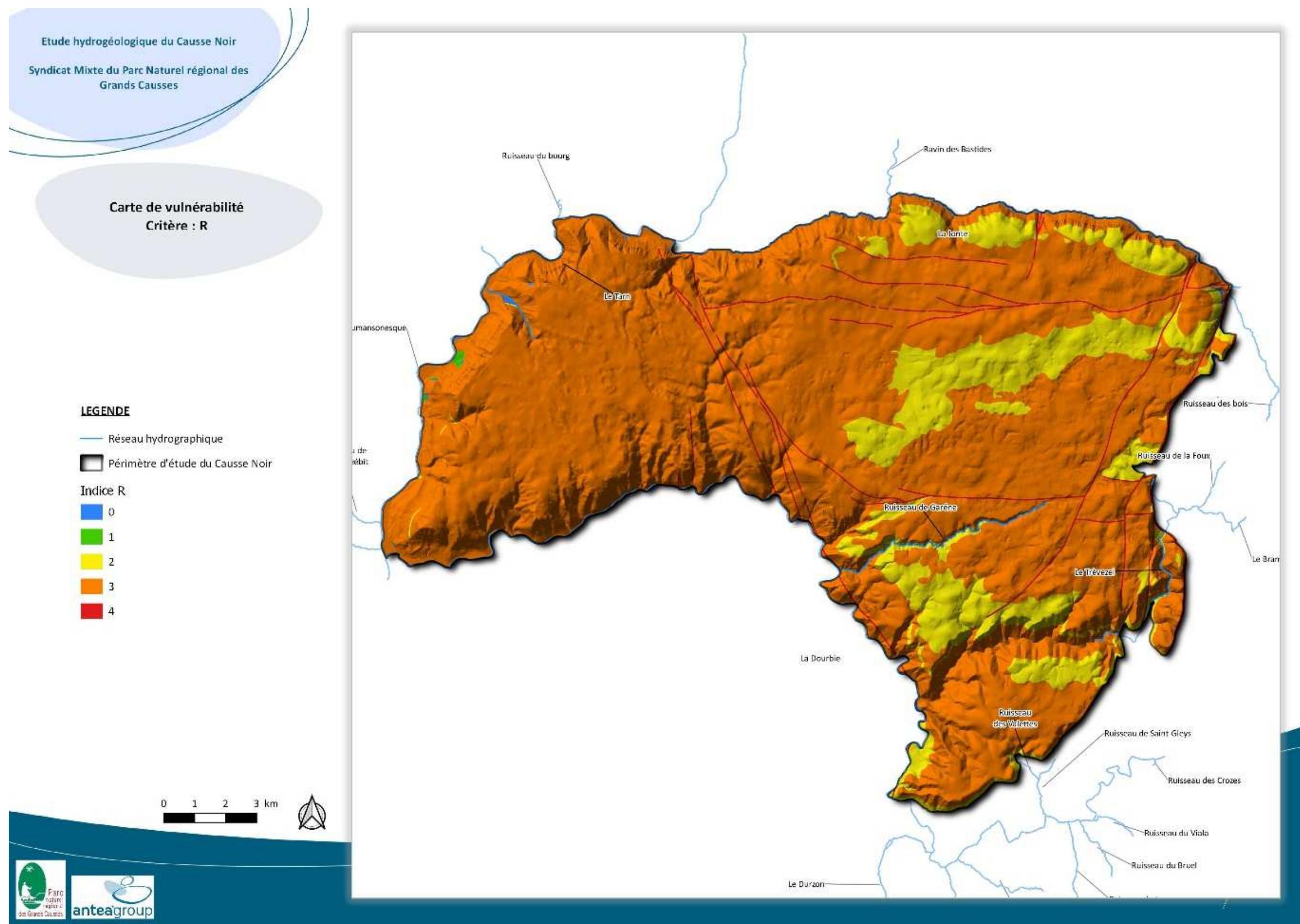


Figure 77. Carte de vulnérabilité du Causse Noir selon le critère R





2.3 Le critère infiltration (I)

2.3.1 Méthode

Les paramètres primordiaux pour le critère I sont la pente qui favorise plus ou moins le ruissellement au détriment de l'infiltration, et les phénomènes karstiques de surface qui permettent une infiltration plus ou moins rapide jusqu'à l'aquifère. Le critère I est donc la combinaison des paramètres « pente » et « phénomènes karstiques de surface ». Ces deux paramètres sont décrits ci-après.

Le critère « infiltration » est complété par la prise en compte d'éléments morphologiques karstiques (dolines, lapiaz, vallées fluviokarstiques, pertes et leurs bassins d'alimentation). La cartographie de ce critère s'appuie principalement sur les résultats issus de l'étude géomorphologique, et notamment les cartes interprétatives identifiant des zones de pertes et leurs bassins d'alimentation.

La carte des pentes, est réalisée à partir du Modèle Numérique de Terrain et respecte le principe de classification illustré ci-dessous.

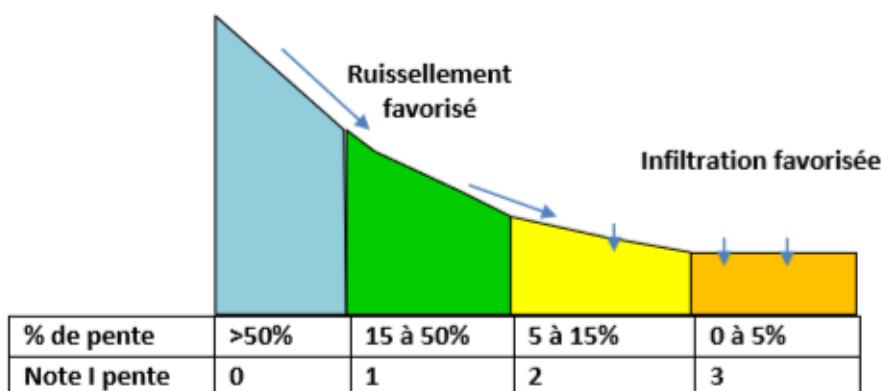
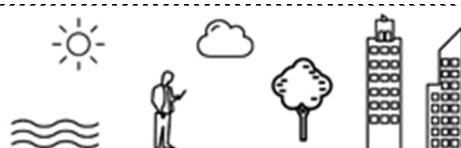


Figure 78. Relation entre les pentes et la vulnérabilité en milieu carbonaté (adapté de Pranville et al., 2007)

Une distinction est faite entre une infiltration diffuse ou ponctuelle. La pente favorise ainsi plus ou moins le ruissellement au détriment de l'infiltration, et les pertes permettent une infiltration très rapide jusqu'à l'aquifère.

Le Tableau 37 ci-après représente les relations entre les pentes et la prise en compte des phénomènes karstiques de surface. Cela se traduit sous la forme de cinq classes distinctes pour le critère I (I_0 à I_4).



Indice	Description
I ₀	Cette classe regroupe les zones du bassin où les pentes sont très fortes (>50%), induisant un ruissellement de l'eau très important (vers d'autres aquifères ou la mer etc.) et une infiltration négligeable voire même nulle.
I ₁	Zones où les pentes sont fortes (15-50%) favorisant grandement le ruissellement.
I ₂	Zones du bassin où la pente est moyenne (5-15%) et/ou zones où le ruissellement est limité en terrains carbonatés (ex. vallées sèches, lapiaz peu développé verticalement).
I ₃	Zones à pente faible (0-5%) où le ruissellement est limité et l'infiltration beaucoup plus forte. Les zones avec dolines et poljés sont prises en compte dans cette classe. De plus, les lapiaz bien développés verticalement (25cm) et non colmatée font partie de cette classe.
I ₄	Manifestations de l'infiltration concentrée au niveau des pertes. Ne sont retenues dans la classification "perte" que les pertes situées sur un cours d'eau pérenne ou temporaire. A la perte elle-même est associée le bassin versant du cours d'eau l'alimentant dont l'état de surface est caractérisé à l'aide de P. Celui-ci peut être calculé à partir du MNT et des outils spécifiques du SIG (fonction bassin versant dans ArcGis). Pour les karsts en région de montagne, les bassins ainsi déterminés seront systématiquement trop grands par rapport aux zones réelles de ruissellement. Les dimensions de ces bassins seront donc ajustées aux observations.

Tableau 37. Description des indices du critère I

2.3.2 Résultats

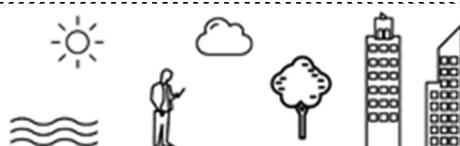
Comme énoncé précédemment, la vulnérabilité de l'aquifère liée au critère infiltration est estimée selon la pente du terrain et en considérant certains phénomènes karstiques de surface. Le Tableau 38 ci-dessous énonce les caractéristiques prise en compte dans le cas du Causse Noir

Note	Critère I
0	Pente > 50%, ruissellement de l'eau très important, infiltration négligeable voire nulle
1	Pente 15-50%, favorise le ruissellement
2	Pente moyenne 5-15%, zones où le ruissellement est limité en terrain carbonaté
3	Pente faible 0-5%, drainage endoréïques, ruissellement limité et infiltration beaucoup plus forte, dolines, poljés
4	Infiltration concentrée au niveau des pertes (bassins versants), mégadolines, couloir d'altération, point d'absorption

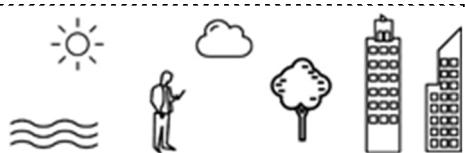
Tableau 38. Détermination du degré de vulnérabilité pour le critère I

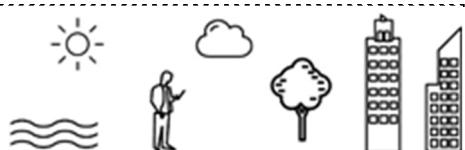
Notons qu'au niveau des pertes, des fractures ou des couloirs d'altération, l'infiltration est favorisée, la vulnérabilité est donc plus élevée. Les dolines recensées lors des études de terrain (Lot n°2) apparaissent avec le plus haut degré de vulnérabilité.

La Figure 79 présente la carte de vulnérabilité du Causse Noir selon le critère I. La partie est montre la présence de plusieurs zones à vulnérabilité très élevée. Elles correspondent à des zones de replat sur le causse. Au contraire, les zones de fortes pentes situées sur le pourtour



du causse et suivant les cours d'eau sont illustrées par une vulnérabilité faible à très faible du fait d'une forte pente. Le degré de variabilité de la vulnérabilité vis-à-vis de ce critère est directement lié au fait que le calcul des pentes a été réalisé à partir du modèle numérique de terrain dont la résolution est de 5 mètres.





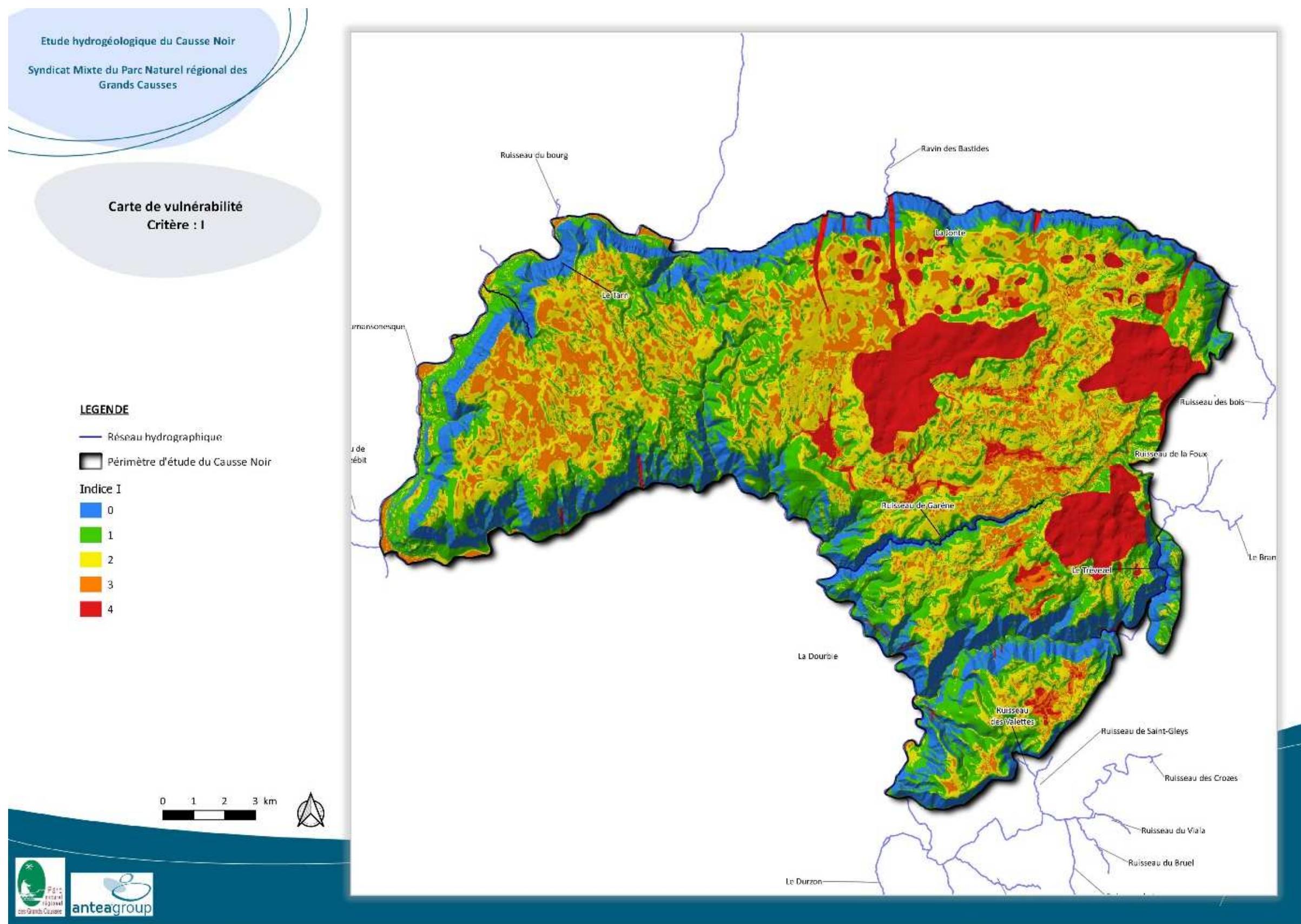


Figure 79. Carte de vulnérabilité du Causse Noir selon le critère I





2.4 Le critère karstification (Ka)

2.4.1 Méthode

Le critère Ka (degré de karstification) est défini à l'aide de :

- la classification des aquifères karstiques (guide Technic'eau de l'AERMC) ;
- la fonctionnalité du système basée entre autres, sur l'analyse des courbes de récession, des essais de traçages, des hydrogrammes et des paramètres chimiques.

Le fonctionnement d'un système karstique traduit la structure des vides résultant de la karstification mais également de l'organisation des écoulements. L'aquifère est alors fonctionnel et caractérisé d'une part, par l'existence de vitesses d'écoulement souterrain très rapides (jusqu'à quelques centaines de m/h) et par une variabilité spatiotemporelle des caractéristiques physiques et hydrauliques de l'aquifère.

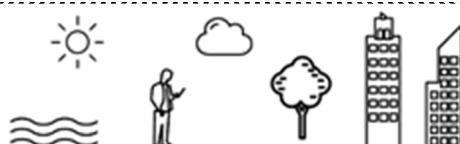
La valeur de l'indice Ka est ensuite définie suivant quatre classes distinctes comme illustré dans le tableau ci-dessous.

Indice	Description
Ka₁	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 1 (<10km ² , Q moyen annuel faible) et uniquement si le système karstique est caractérisé par un comportement peu fonctionnel (faible variabilité du débit et des paramètres physico-chimiques), et en l'absence de preuves ou d'indices de circulation rapide.
Ka₂	Degré de karstification correspondant soit aux systèmes karstiques de type 2 (> 10 km ²) ou de type 3, unaires et peu fonctionnels (fonctionnalité est appréciée à partir d'indices caractérisant le degré de karstification tels que des vitesses de traçage artificiel rapides, la variabilité du débit et de la chimie de la source), soit à des systèmes complexes.
Ka₃	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 2 ou 3, fonctionnels et binaires/unaires ; il s'agit soit de systèmes karstiques binaires peu fonctionnels ou unaires très fonctionnels. Le réseau karstique de ce type de systèmes karstiques est bien développé avec la présence d'un drain collecteur de petite taille connu connecté avec la surface. Les vitesses de transit mises en évidence à l'aide d'essais de traçages sont importantes (entre 50 et 100m/h).
Ka₄	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques binaires du type 2. Le réseau karstique très bien développé avec la présence d'un gros collecteur connecté avec la surface, comme l'atteste la fonctionnalité du système. Les vitesses de transit mises en évidences à l'aide d'essais de traçage sont importantes (> 100m/h).

Tableau 39. Description des indices du critère Ka

2.4.2 Résultats

Pour établir la cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère selon le critère de karstification, le caractère unaire ou binaire du système karstique a également été pris en compte, en plus



des vitesses d'écoulement déterminées lors des traçages, de la caractérisation hydrodynamique issue du travail sur la relation pluie/débit ou encore de l'analyse des chroniques de physico-chimie.

Le tableau 13 présente les caractéristiques permettant de définir la vulnérabilité du Causse Noir selon son degré de karstification.

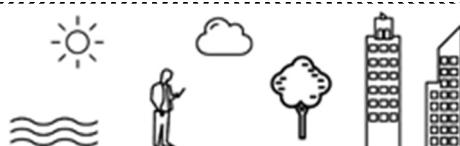
Note	Critère Ka
1	Débit moyen annuel faible, système karstique à comportement peu fonctionnel, faible variabilité du débit et des paramètres physico-chimiques
2	Systèmes karstiques unaires et peu fonctionnels, vitesse de traçage artificiel rapide, débit et chimie variables
3	Systèmes karstiques binaires peu fonctionnels ou unaires très fonctionnels, bien développé, vitesses de transit des traçages sont importantes
4	Réseau karstique très bien développé avec la présence d'un gros collecteur connecté à la surface, vitesses de transit importantes

Tableau 40. Détermination de la vulnérabilité du Causse Noir selon le critère Ka

La Figure 79 illustre la cartographie de la vulnérabilité du Causse Noir selon le critère « karstification ».

Il apparaît une distinction de vulnérabilité des systèmes karstiques entre les parties ouest et est du causse. Ces informations sont cohérentes avec les données obtenues lors des traçages hydrogéologiques et les interprétations réalisées à partir des données hydrodynamiques et physico-chimiques.

L'ensemble de la zone est du Causse Noir présente une karstification bien développée, avec des bassins d'alimentation étendus et des transferts rapides en lien avec un fonctionnement binaire (Moulin de Corp, Fournets et Jouque Merles). Elle correspond donc à un territoire à vulnérabilité élevée. La partie ouest du Causse Noir est caractérisée par une karstification faiblement développée, des systèmes aquifères avec un fonctionnement relativement inertiel mis en valeur par le peu de restitution positive lors des opérations de traçage et un comportement physico-chimique singulier en période pluvieuse (augmentation globale de la conductivité). La vulnérabilité y est donc illustrée en vert, soit une vulnérabilité faible. Seulement deux zones situées au nord-ouest du causse présentent un degré de vulnérabilité modérée, il s'agit des systèmes de Triadou et de Prades. Triadou est la seule source dans cette partie du causse à laquelle une restitution de traceur a été observée.



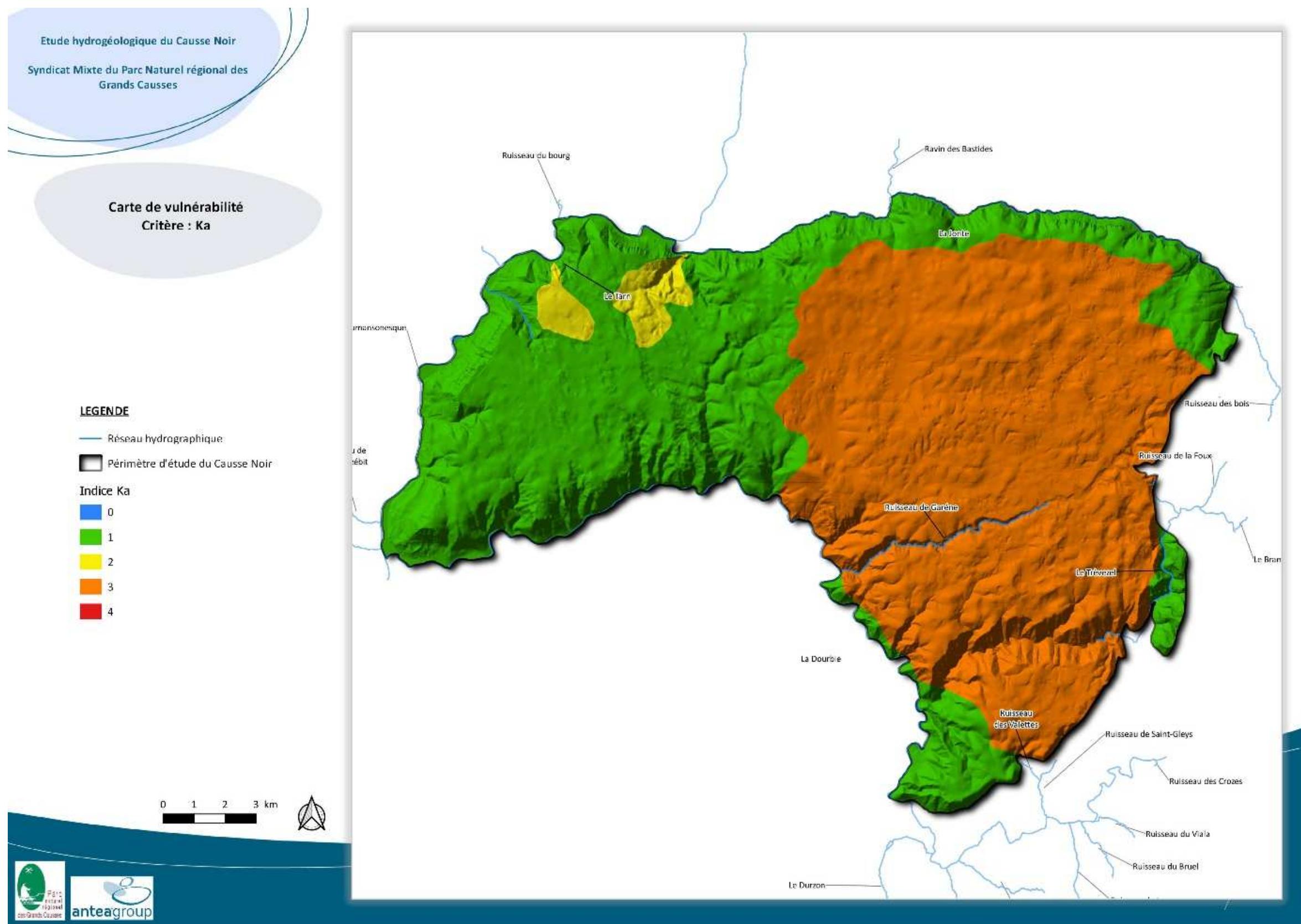


Figure 80. Carte de vulnérabilité du Causse Noir selon le critère Ka





3 Vulnérabilité globale

3.1 Méthode

Pour étudier le degré de vulnérabilité du territoire du Causse Noir, la méthode PaPRIKa a été appliquée et est illustrée à la Figure 81.

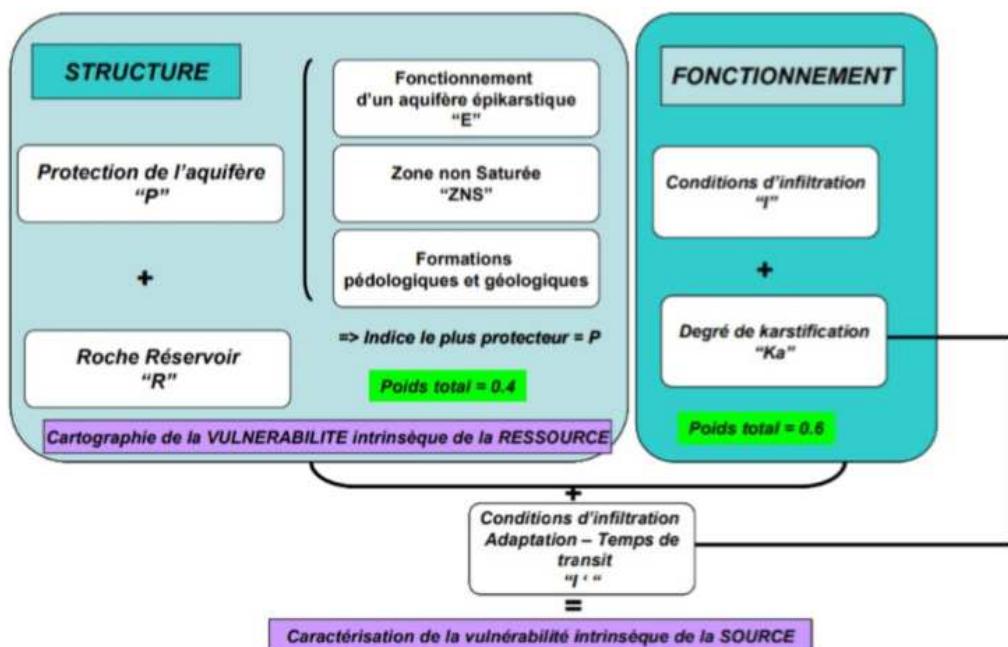


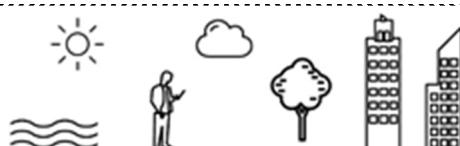
Figure 81. Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques (BRGM, 2009)

Le calcul de l'indice de la vulnérabilité globale Vg se fait sur la base de la formule suivante :

$$Vg = iI_{0-4} + rR_{1-4} + pP_{0-4} + kKa_{1-4}$$

Les poids affectés sont exprimés sous forme de pourcentage. Leur somme est égale à 1 ($i+r+p+k$). Il faut noter que la somme des pondérations des critères relatifs au fonctionnement de l'aquifère karstique (K et I) est comprise entre 50 et 65% alors que la somme des pondérations des critères relatifs à la structure de l'aquifère karstique (P et R) est comprise entre 35 et 50%. Les valeurs de pondérations ne sont pas imposées dans la méthode, ce qui permet d'effectuer un certain nombre de tests pour évaluer la sensibilité de chaque critère (Cf. Tableau 41).

Cinq classes sont ensuite calculées à partir du calcul de Vg.



3.2 Résultats et interprétation

Après avoir établi les cartes pour chacun des quatre critères de la méthode PaPRIKa à l'échelle du Causse Noir, une carte globale de la vulnérabilité est proposée. Elle est illustrée en Figure 82.

Plusieurs valeurs de pondération ont été utilisées pour fournir différentes hypothèses de la vulnérabilité réelle du secteur et permettre de tester la sensibilité de chaque critère. Pour le Causse Noir, six modèles ont été calculés afin d'évaluer l'influence de chaque critère sur la vulnérabilité globale. Les valeurs des coefficients associés à chaque critère pour chacun des modèles sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Pondération	P	R	I	Ka
N°1	0,2	0,2	0,4	0,2
N°2	0,25	0,25	0,25	0,25
N°3	0,2	0,1	0,4	0,3
N°4	0,2	0,2	0,5	0,1
N°5	0,2	0,2	0,3	0,3
N°6	0,3	0,1	0,5	0,1

Tableau 41. Tableau des valeurs de pondération des six modèles de vulnérabilité du Causse Noir

Dans ce contexte, le modèle retenu et considéré comme le plus représentatif de la vulnérabilité du Causse Noir est celui obtenu avec le test n°5. En effet, le choix des critères les plus importants vis-à-vis de la vulnérabilité du causse s'est arrêté sur l'infiltration et la karstification. Il a ainsi été choisi d'affecter un coefficient de 0,2 aux critères P et R, tandis que des coefficients plus élevés (0,3) ont été associés aux critères I et Ka. Les hypothèses retenues sont celles présentant le plus haut degré de vulnérabilité. Sur la carte n°5, la vulnérabilité est supérieure pour les systèmes karstiques situés sur la partie est du territoire, ce qui est cohérent avec le mode de fonctionnement hydrogéologique mis en évidence par ailleurs des principaux systèmes aquifères dans ce secteur (Moulin de Corp, Fournets et Jouque Merles).

Par ailleurs, la comparaison de la carte de vulnérabilité globale avec celle établie à l'échelle du causse sur les modalités d'infiltration dans le cadre du lot n°2, apporte certaines informations précieuses. Il est en effet intéressant de noter que les secteurs caractérisés par une infiltration concentrée (rapide ou non) correspondent aux secteurs les plus vulnérables alors que les secteurs caractérisés par une infiltration diffuse présentent une vulnérabilité plus faible (moitié ouest du Causse Noir tout particulièrement).



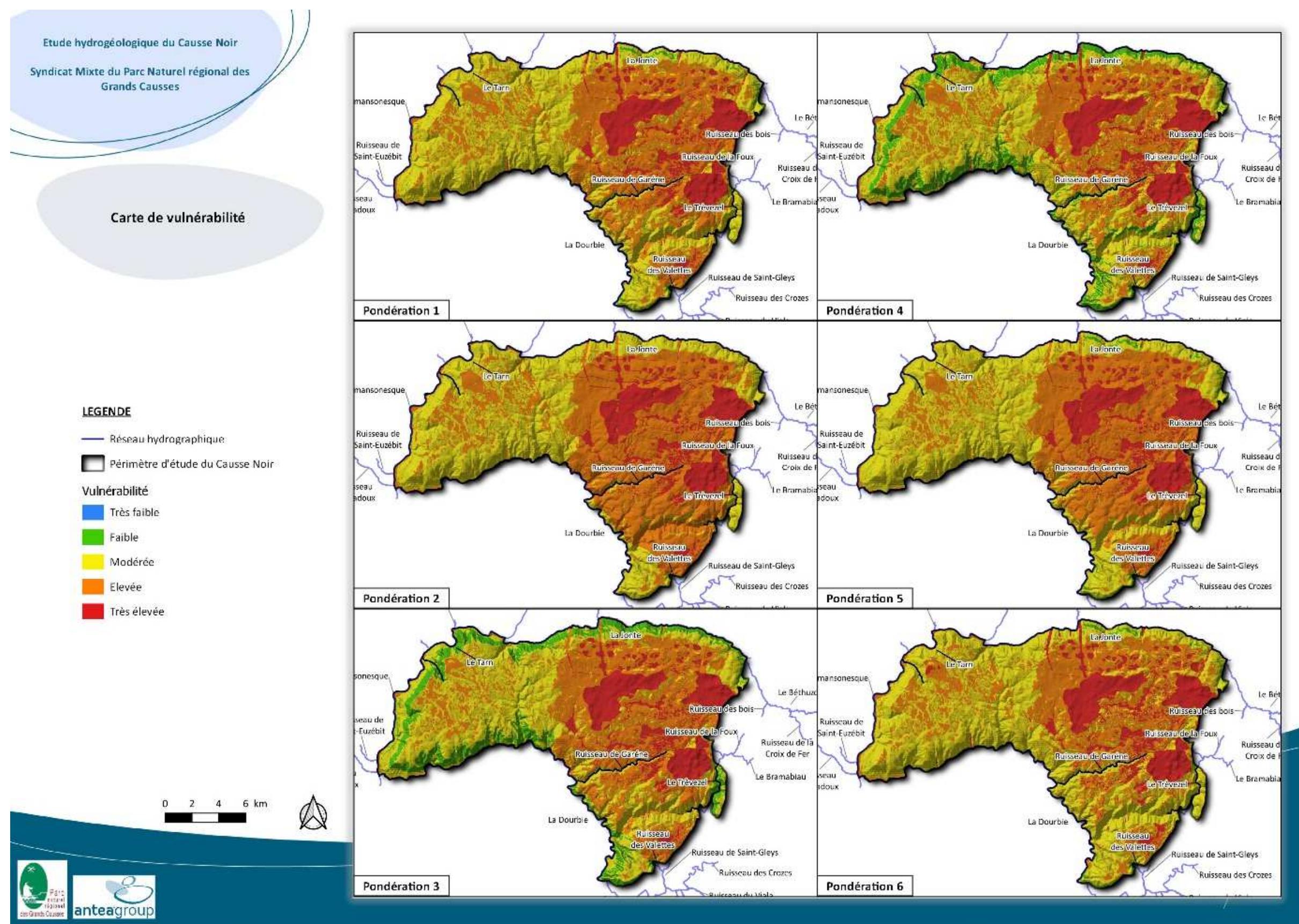
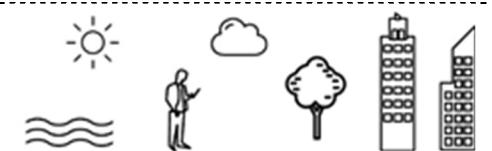


Figure 82. Cartes de la vulnérabilité globale du Causse Noir selon plusieurs valeurs de pondération



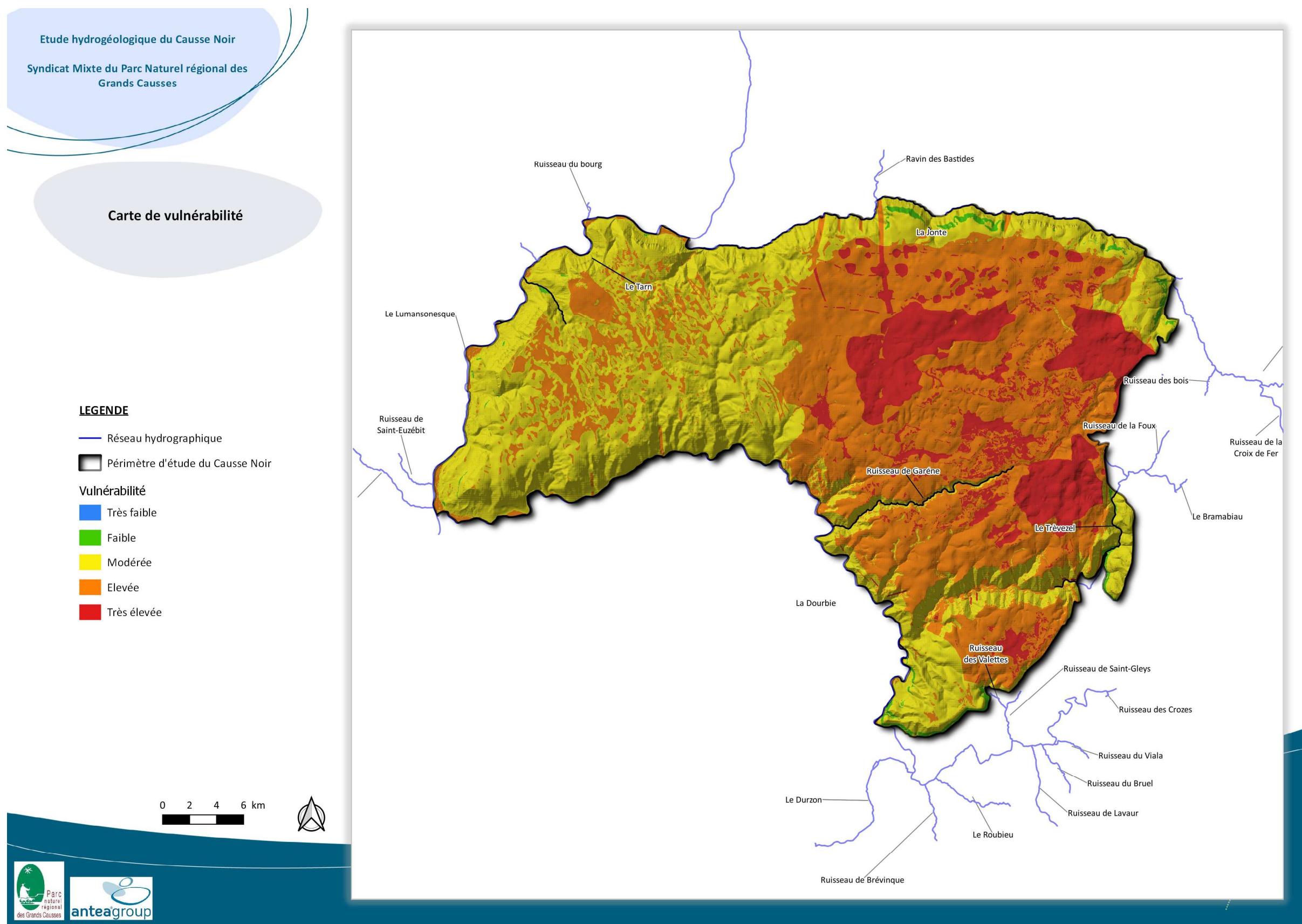
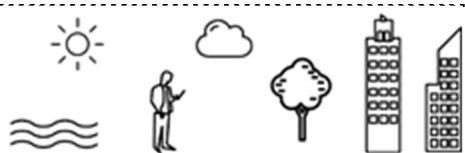
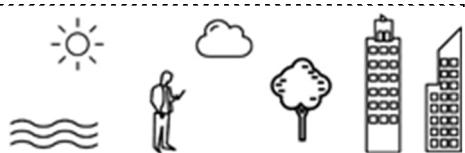


Figure 83. Carte de vulnérabilité globale retenue pour le Causse Noir



PARTIE VI : Conclusions





L'étude géologique et hydrogéologique du Causse Noir a été menée par le groupement des bureaux d'études GEOTER, pour la partie géologie et géomorphologie (lots 1 et 2), et Antea Group pour la partie hydrogéologie. Cette seconde partie a été scindée en plusieurs domaines d'étude : hydrodynamique, hydrochimie, traçages et vulnérabilité des systèmes aquifères. L'acquisition des données de terrain a débuté dès 2016 pour la partie géologie et s'est prolongée du mois de janvier 2017 au mois de février 2019 pour la partie hydrogéologie (données acquises et fournies par le PNRGC).

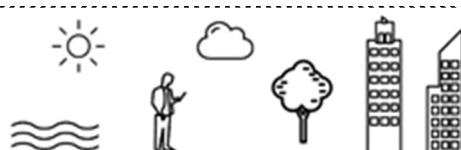
Il est important de rappeler que d'un point de vue des enjeux, au regard des 177 sources issues des formations carbonatées du Causse Noir, peu d'entre elles sont utilisées pour des besoins en eau potable des populations locales. Les deux ressources les plus importantes en termes de débit, Moulin de Corp et Jouque Merles, qui drainent une grande partie de la surface du causse, ne sont pas captées pour l'eau potable (hormis une infime partie du débit de Moulin de Corp pour les besoins en eau potable d'un gîte privé).

Les études géologique et géomorphologique du Causse Noir ont dans un premier temps permis de déterminer la structure géologique de cette entité, en termes de lithologie et de tectonique qui va jouer un rôle majeur dans le développement des systèmes karstiques et sur leur compartimentation dans l'espace. En effet, à la suite de l'interprétation des données hydrodynamiques et hydrochimiques (y compris celles des traçages), le Causse Noir a pu être découpé en 5 parties, chacune caractérisée par des modes de fonctionnement distincts, qui correspondent à 5 blocs structuraux délimités par des grands accidents tectoniques (ou faisceaux de failles).

En outre, l'analyse géomorphologique s'est notamment focalisée sur le rôle des formations de surface vis-à-vis des modalités d'infiltration des eaux superficielles. L'étude a montré l'existence de deux grands types de modalités d'infiltration, diffuse et concentrée. Selon les modalités d'infiltration des eaux en surface, les formations aquifères sous-jacentes vont présenter un mode de fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique distinct (plus ou moins inertiel avec des transferts de pression engendrant la vidange d'eaux stockées dans la zone non saturée) et une vulnérabilité intrinsèque différente (plus vulnérable dans les secteurs caractérisés par une infiltration concentrée).

Ce travail sur la géomorphologie est un apport majeur à la fois en termes de connaissance scientifique du territoire du Causse Noir et dans l'approche méthodologique à mettre en œuvre pour la compréhension des systèmes aquifères karstiques au vu de l'importance du rôle de ces formations de surface sur leur fonctionnement hydrodynamique et leur développement.

Quant aux nombreux traçages hydrogéologiques effectués sur l'ensemble du territoire du Causse Noir, couplés aux données obtenues grâce au suivi des paramètres physico-chimiques, ils ont permis de croiser les résultats, de confirmer et d'actualiser la délimitation des bassins d'alimentation et d'appréhender avec plus de précision le fonctionnement des systèmes karstiques composant le Causse Noir. Il a en effet été possible de différencier les systèmes



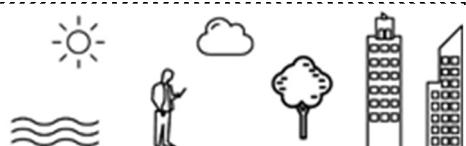
unaire et binaire (Moulin de Corp, Fournets et Jouque Merles notamment) qui présentent des eaux avec un faciès chimique et une qualité sensiblement différents. L'influence des eaux de surface dans l'alimentation des systèmes binaires engendre des risques plus importants de dégradation de la qualité de l'eau. Ceci a notamment été mis en lumière à partir de l'analyse chimique des eaux des rivières découpant le Causse Noir qui sont marquées par des indicateurs (aluminium, plomb, zinc, etc.) de l'activité minière passée du secteur. Les signatures anthropiques observées lors de l'étude hydrochimique (présence de nitrates et de chlorures) traduisent une sensibilité élevée des ressources en eau souterraine vis-à-vis des pollutions agricoles, notamment dans le bassin d'alimentation des sources d'Ubercariès, de Villaret et du Pas de l'Âne.

À l'échelle de la zone d'étude, la vulnérabilité apparaît plus élevée sur les terrains situés à l'est du Causse Noir (couverts en grande partie par les systèmes de Moulin de Corp et de Jouque Merles). Il existe en effet une vraie distinction vis-à-vis de la vulnérabilité et du fonctionnement des systèmes aquifères entre les parties est et ouest du Causse Noir.

Quant à l'étude hydrodynamique, elle a mis en lumière des fonctionnements bien différents selon les secteurs géographiques du Causse Noir. L'information majeure apportée par ce travail est la capacité de régulation des eaux de surface infiltrées pour la plupart des systèmes étudiés. Seuls les systèmes binaires présentent des vitesses de transfert importantes (de l'ordre de 100 m/h, obtenues grâce aux traçages) cohérentes avec des aquifères karstiques fonctionnels connus par ailleurs. Ce pouvoir de régulation, lié en grande partie aux formations de surface, a notamment une influence significative sur la vulnérabilité intrinsèque des systèmes aquifères locaux.

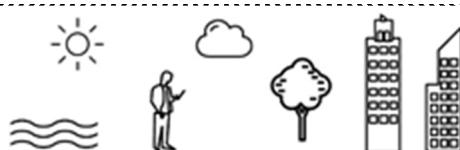
Ce travail permet d'illustrer l'intégration des résultats des différents lots de l'étude pour fournir *in fine* un document d'aide à la décision à travers une carte de vulnérabilité de la ressource en eau karstique sur le Causse Noir. La qualité des données d'entrée pour l'application de la méthode PaPRIKa, et notamment la richesse des données géomorphologiques permettent de proposer une cartographie de la vulnérabilité de la ressource en eau karstique à l'échelle de la zone d'étude. La précision de la carte globale peut être appréciée, par la résolution du Modèle Numérique de Terrain (5 mètres) qui a aidé à sa réalisation et par la carte de recouvrement pédologique et de la couverture karstique fournie par GEOTER.

En conclusion, il a été défini un zonage du Causse Noir en plusieurs unités structurales où les fonctionnements hydrogéologiques se distinguent les uns des autres. L'ouest du causse est caractérisé par des systèmes avec une grande inertie des écoulements, correspondant à une karstification limitée et des systèmes karstiques de type unaire. De même, le nord-est du Causse Noir possède des systèmes karstiques peu développés mais en relation avec la rivière de la Jonte, voire du Causse Méjean. Cette dernière hypothèse est une piste de travail intéressante et devrait en partie trouver des réponses dans le cadre de l'étude géologique et hydrogéologique en cours de ce causse, menée par le BRGM. La partie centrale de l'est du causse abrite les deux plus grands systèmes séparés par la faille de Montjardin, où les écoulements s'orientent soit vers les sources de Moulin de Corp, des Fournets et des Castors,



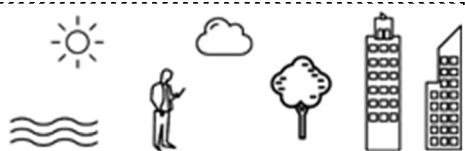
soit vers la source de Jouque Merles plus au sud. Enfin, la zone située au sud-est du causse, le Causse Bégon, se distingue du fonctionnement hydrogéologique du reste du territoire du Causse Noir puisqu'il n'a démontré aucune restitution positive lors des opérations de traçage et s'apparente à un système karstique isolé et indépendant des autres zones.

Cette étude hydrogéologique du Causse Noir s'inscrit dans le cadre du programme de protection et de gestion patrimoniale de la ressource en eau entrepris depuis plusieurs années par le Parc Naturel Régional des Grands Causses. La vulnérabilité des systèmes karstiques nécessitait d'être étudiée pour croiser ces informations géoréférencées avec celles des sources de pollution, des risques et d'occupation du sol.



Observation sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable ; en conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle de ce rapport et annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'Antea Group ne sauraient engager la responsabilité de celle-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.





ANNEXES

Annexe I : Résultats bruts des analyses chimiques réalisées sur les sources de février 2017 à avril 2018

Annexe II : Graphiques des relations entre éléments chimiques et diagramme de Piper pour les sources de catégorie 1

Annexe III : Résultats des calculs des équilibres calco-carboniques

Annexe IV : Fiches de synthèse des traçages positifs

Annexe V : Résultats de l'application d'une fonction de transfert aux traçages du Causse Noir

Annexe I : Résultats bruts des analyses chimiques réalisées sur les sources de février 2017 à avril 2018

Annexe II : **Graphiques des relations entre éléments chimiques et diagramme de Piper pour les sources de catégorie 1**

Annexe III : Résultats des calculs des équilibres calco-carboniques

Annexe IV : **Fiches de synthèse des traçages positifs**

**Annexe V : Résultats de l'application d'une fonction de transfert
aux traçages du Causse Noir**

