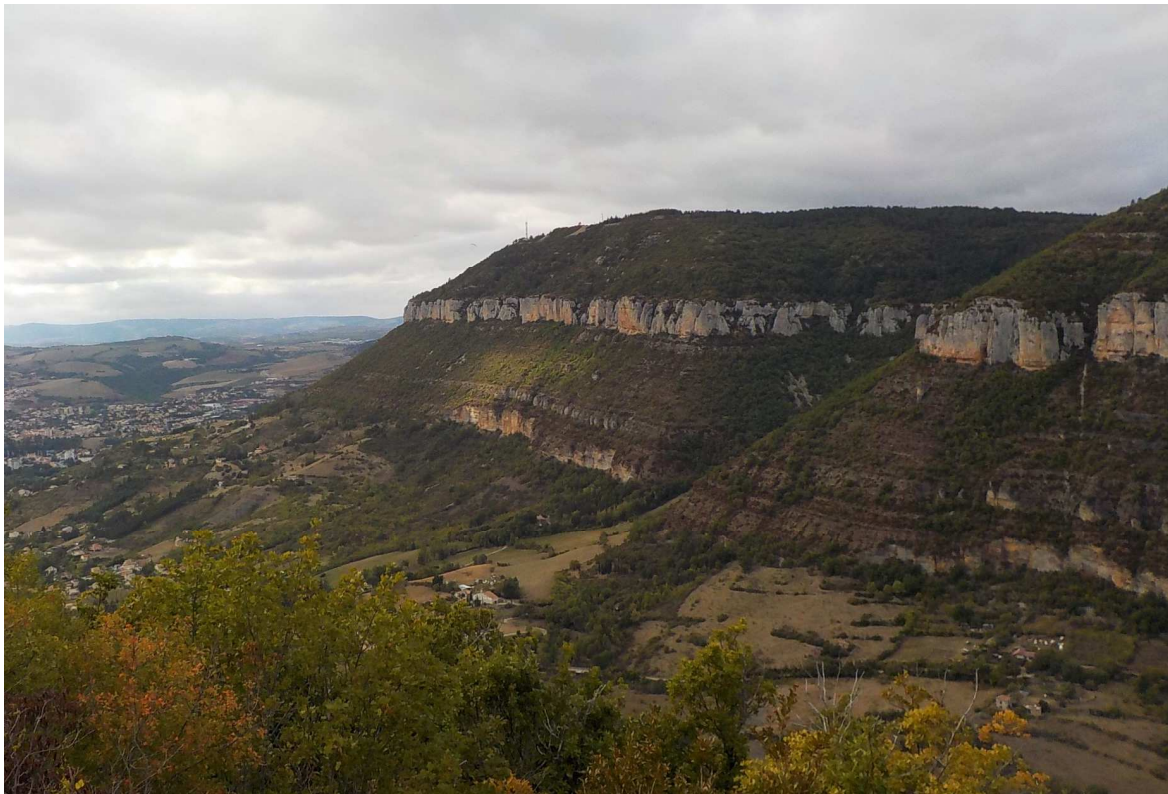




Etude géologique et hydrogéologique du Causse Noir

Lot 6 : Synthèse



Avec le partenariat
technique de



Antea Group
Diapason - Bâtiment B
Rue Jean Bart
31670 LABEGE



Fiche Signalétique

Etude géologique et hydrogéologique du Causse Noir Lot 6 : 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	1
Pièces jointes	-
Responsable Commercial	Christophe SUBIAS

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

Révision A

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	Fabrice REY	Ingénieur projet	Juin 2020	
Vérification	Christophe SUBIAS	Expert hydrogéologue	Juin 2020	



Sommaire

Introduction.....	7
PARTIE I : Synthèse de l'étude géologique et géomorphologique	9
1 Synthèse de l'étude géologique et tectonique (Lot 1).....	11
1.1 Introduction et rappels des objectifs	11
1.2 Méthodologie	11
1.3 Synthèse des résultats.....	12
2 Synthèse de l'étude géomorphologique (Lot 2).....	17
2.1 Rappels des objectifs.....	17
2.2 Méthodologie	17
2.3 Synthèse des résultats.....	17
2.3.1 Formations superficielles	17
2.3.2 Influence des formes karstiques de surface et des formations superficielles sur les modalités d'infiltration.....	23
PARTIE II : Synthèse de l'étude hydrogéologique	31
1 Préambule	33
1.1 Introduction et rappels des objectifs	33
1.2 Contexte hydrogéologique global	33
1.3 Contexte hydroclimatique de l'étude	33
2 Synthèse de l'étude hydrodynamique, hydrologique et hydrochimique	35
2.1 Rappels sur les méthodes mises en œuvre.....	35
2.2 Synthèse des résultats obtenus	36
2.2.1 Hydrodynamique.....	36
2.2.2 Hydrochimie	37
3 Traçages artificiels colorés	40
3.1 Rappels sur les objectifs et la méthode mise en œuvre	40
3.2 Synthèse des résultats obtenus	40
4 Synthèse de la vulnérabilité des systèmes aquifères à l'échelle du causse.....	45
4.1 Rappels sur la méthode mise en œuvre	45
4.2 Résultats.....	46
PARTIE III : Conclusions et perspectives.....	49



1 Conclusions.....	51
2 Perspectives.....	56



Table des illustrations

FIGURES

Figure 1. Unités hydrogéologiques du Causse Noir et du Causse Bégon (GEOTER, 2019)	12
Figure 2. Rosaces directionnelles montrant toutes fractures relevées sur la zone d'étude (en bleu ensemble des fractures, en noir fractures fermées et en vert fractures ouvertes)	15
Figure 3. Coupes géologiques (GEOTER, 2019)	16
Figure 4. Carte des formations superficielles et couvertures karstiques à l'échelle du Causse Noir	21
Figure 5. Carte des modalités d'infiltration à la surface du Causse Noir	29
Figure 6. Carte des résultats des traçages et des limites des bassins d'alimentation actualisées	43
Figure 7. Carte de vulnérabilité globale retenue pour le Causse Noir	47
Figure 8. Découpage du Causse Noir en 5 systèmes structuraux et fonctionnels	52

TABLEAUX

Tableau 1. Bilan hydrologique réalisé sur les 7 sources suivies en continu	41
--	----



Introduction

L'étude hydrogéologique du Causse Noir fait partie du programme établi par le Parc Naturel Régional des Grands Causses (PNRGC) vis-à-vis de la protection et de la gestion patrimoniale de la ressource en eau ainsi que dans les deux grands axes de la nouvelle Charte du PNRGC :

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.

Elle 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).

La présente étude s'est focalisée sur l'ensemble du Causse Noir, soit environ 300 km², dont les aquifères sont presque exclusivement localisés dans des roches carbonatées. Elle a pour principaux objectifs :

- 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 constitue la synthèse des études géologique et hydrogéologique menées par GEOTER et Antea Group. Il se base sur les rapports référencés GTR/PNR/1217-1685Rev1



de janvier 2019 (Lot 1) et GTR/PNR/0719-1833 de juin 2019 (lot 2) rédigés par GEOTER ainsi que sur le rapport n°A102255A d'Antea Group de juin 2020. La compilation de ces travaux aboutit à la caractérisation du fonctionnement et de la vulnérabilité des systèmes aquifères du Causse Noir et à la délimitation de leur bassin d'alimentation.



PARTIE I : Synthèse de l'étude géologique et géomorphologique





1 Synthèse de l'étude géologique et tectonique (Lot 1)

1.1 Introduction et rappels des objectifs

L'étude géologique et structurale du Causse Noir avait pour objectifs d'analyser le domaine d'étude sous un aspect sédimentologique et structural. L'analyse sédimentologique avait pour objectifs :

- de déterminer des ensembles à lithologie homogène et de les décliner sous forme d'unités hydrogéologiques ;
- d'identifier les variations latérales de faciès au sein des unités hydrogéologiques notamment par le levé de logs sédimentologiques à partir de travaux de terrain ;
- de caractériser la répartition et l'organisation des structures (failles, fractures, diaclases) avec notamment des mesures microtectoniques à l'affleurement, pour améliorer la connaissance des directions de drainage potentielles.
- de caractériser au mieux la géométrie des unités hydrogéologiques et des failles avec les réalisations d'une cartographie géologique de synthèse et des coupes 2D. Dans le but de mettre en évidence des continuités hydrauliques entre les formations.

1.2 Méthodologie

GEOTER a scindé son intervention géologique et structurale en 3 phases :

- Phase 1 de janvier à juin 2017 : recherche et synthèse bibliographique ;
- Phase 2 de juin à septembre 2017 : missions de terrain ;
- Phase 3 de septembre à décembre 2017 : traitement des données et restitution finale.

La recherche bibliographique s'est portée sur les publications, rapports de DEA, thèses, rapports d'études et livrets-guides établis dans le secteur du Causse Noir. Cette phase a permis de synthétiser l'histoire géologique, de définir les contextes géologique et tectonique ainsi que d'identifier les manques de connaissance pour préparer la phase n°2 d'acquisition de données de terrain.

La phase 2 de terrain a consisté à :

- lever des coupes sédimentologiques de terrain afin de fournir aux hydrogéologues une description lithostratigraphique détaillée de la série sédimentaire et de ses évolutions latérales ;
- réaliser des levés structuraux afin de caractériser la fracturation. Ce travail a fourni des indications sur les drains potentiels et leur direction.



1.3 Synthèse des résultats

Cette étude s'appuie sur une synthèse bibliographique et l'acquisition de nouvelles données de terrain. Elle a permis d'identifier entre autres 15 logs et 80 forages environs de plus de 50m. A partir de ces données, il a été effectué une synthèse géologique et structurale de la zone d'étude et un découpage en 6 unités hydrogéologiques (imperméable et aquifère), englobant les terrains du Socle à ceux du Jurassique supérieur.

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

Unités hydrogéologiques		sous-unités hydrogéologiques	Stratigraphie	épaisseur (m)	lithologie
Aquifère supérieur	U1		Kiméridgien	100 m ou plus	succession de calcaires mudstones lithographiques et fin niveau de marnes. Dolomitisée de manière hétérogène
			Oxfordien supérieur (Rauracien)	50 à 100 m	"Dolomies III" : dolomies fines à grenues
			Callovien-Oxfordien inférieur	50 m	"calcaires à microfilaments", calcaires marneux à glauconies, mudstones lithographiques et niveaux marneux
			Bathonien supérieur	150 m	"Dolomies II" : dolomies cristallines grenues à saccharoïdes
			Bathonien moyen	50 à 200 m	"Calcaires à Stipites" : alternance de calcaires mudstone, wackestone et grainstones avec des marnes et des bancs de lignites ou de charbon
			Bajocien supérieur	80 à 100 m	"Dolomies I" : dolomies cristallines grenues et calcaires à oolithes
			Bajocien inférieur	40 à 50 m	calcaires à chailles se dolomitant progressivement totalement
			Aalénien supérieur	50 à 70 m	calcarénites fines ou calcaires marneux et traces de zoophycos
Unité imperméable	U2		Aalénien inférieur	60 à 200 m	"schistes cartons" et marnes noires
			Toarcien		
			Domérien	15 à 100 m	marnes noires glauconieuses et quelques bancs calcaires
Aquifère inférieur	U3		Carixien	5 à 40 m	alternance de calcaires marneux et de marnes ou calcarénites grossières (bordure est)
			Sinemurien	40 à 80 m	calcarénites fines à grossières à l'est et calcaires oolithiques à l'ouest alternance de dolomies microcristallines, de calcaires stromatolithiques et de mud-cracks
			Hettangien	150 à 200 m	alternance de dolomies microcristallines, de calcaires stromatolithiques et de mud-cracks dolomies microcristallines à débit parallélépipédique
			Rhélien	5 à 15 m	grès dolomitiques et dolomies
Aquifère triasique	U5		Trias	30 à 150 m	grès et argiles versicolores
		grès et silts noirs, accompagnés d'une barre carbonatée			
		conglomérat de base, succession de grès et d'argiles			
Stéphano-Permien	U6B		Permien (Autunien)	100 à 200 m dans la moitié W	Grès, argiles et pélites
			Stéphanien		
Socle paléozoïque	U6A				Schistes et granites



Figure 1. Unités hydrogéologiques du Causse Noir et du Causse Bégon (GEOTER, 2019)



Les missions de terrains ont permis de détailler les caractéristiques sédimentologiques et structurales de la zone d'étude. En résultent 14 logs sédimentologiques (nouveaux ou complétés). A partir de ces levés et de la bibliographie, les faciès propres à chacune des différentes unités hydrogéologiques et leurs variations latérales ont été décrits plus précisément.

Le Causse Noir est constitué par une majorité de dépôts carbonatés du Jurassique :

- les séries calcaro-dolomitiques inférieures du Lias (**Rhétien, Hettangien, Sinémurien et Carixien**), formant l'aquifère inférieur. L'unité aquifère inférieure (U3) est constituée d'un ensemble de faciès carbonatés sans réel niveau imperméable en son sein. Les faciès dolomitiques hettangiens d'épaisseur importante et constante représentent un intervalle avec de bonnes propriétés hydrogéologiques. En revanche, les formations du Sinémurien et du Carixien sont le siège de variations de faciès et d'épaisseurs importantes entre l'est et l'ouest. Ces variations sont susceptibles de créer des discontinuités dans les écoulements grâce à leurs propriétés hydrogéologiques différentes ;
- une série marneuse imperméable du Lias supérieur (**Domérien et Toarcien**) d'une épaisseur comprise entre 100 et 250 m selon le secteur ;
- le **passage des marnes de l'unité imperméable (U2) aux calcaires de l'unité supérieure (U1)** se fait de manière progressive. Le sommet des marnes de l'Aalénien inférieur est marqué par l'apparition de bancs silto-marneux puis par des alternances de calcarénites marneuses et de marnes silteuses (Aalénien supérieur),
- les formations **calcaro-dolomitiques supérieures du Dogger et du Malm**, formant l'aquifère supérieur. Cette série constitue tout le plateau du causse :
 - les faciès de l'**Aalénien supérieur – Bajocien inférieur** traduisent un retour progressif des faciès carbonatés plus proximaux sur la zone étudiée. Ces calcaires constituent ainsi la base de l'unité aquifère supérieure (U1) du Causse Noir,
 - le **Bajocien supérieur** constitue dans le paysage la première barre calcaire massive du Causse Noir, son épaisseur est comprise entre 80 et 100 m sur l'ensemble de la zone d'étude. Le passage du Bajocien inférieur au Bajocien supérieur est marqué par des dolomies massives grenues présentant de nombreuses traces de karstification,
 - les faciès du **Bathonien moyen** correspondent à des calcaires de 50 à 200 m d'épaisseur (d'ouest en est). Ce faciès est une alternance de calcaires fins (mudstone) et plus grossiers (grainstone), de niveaux argilo-marneux et charbonneux, appelés calcaires à « stipites ». Ce dernier faciès joue un rôle imperméable vis-à-vis des écoulements souterrains,
 - le **Bathonien supérieur** constitue la seconde barre massive visible dans les paysages du Causse Noir. Son épaisseur est un peu inférieure à une centaine de mètres à l'est et est d'environ 150 m à l'ouest. Le Bathonien



supérieur correspond à un massif dolomitique très karstifié et découpé par de grandes diaclases verticales. Ce faciès de dolomies karstifiées fait de cette formation, une masse drainante importante au sein de l'aquifère supérieur (U1),

- les dépôts du **Jurassique supérieur (Malm)** regroupent des faciès du Callovo-Oxfordien, du Rauracien (Oxfordien supérieur) et du Kimméridgien. Le **Callovo-Oxfordien** est constitué de calcaires fins, de calcaire marneux et de marnes qui le rend peu perméable aux écoulements. Le **Rauracien** correspond sur le Causse Noir à des dolomies, localement karstifiées ainsi qu'à des niveaux moins perméables de calcaires fins et de marnes. Enfin, le **Kimméridgien** présente une épaisseur minimale de 100 m et est composé d'une alternance de calcaire mudstone et de marnes.

L'Unité aquifère supérieure (U1) est donc constituée majoritairement par des faciès calcaires ou dolomitiques qui sont propices à la karstification et à la circulation des eaux. Elle comporte peu de niveaux argileux ou marneux suffisamment épais pour former une surface imperméable. Seule la formation des calcaires à Stipites possède quelques niveaux charbonneux et argileux imperméables.

Par ailleurs, les nombreux relevés microstructuraux (2253 au total) ont permis de préciser la structure de la zone d'étude, en décrivant les grands accidents qui la traversent et leurs structures secondaires. Cinq zones morphostructurales ont été définies. Chaque zone correspond à un ensemble plus ou moins homogène d'un point de vue topographique, hydrologique et tectonique/structural. L'analyse des directions principales de fracturation du Causse Noir effectuée à différentes échelles d'observation a en outre permis de retracer la chronologie des déformations.

La connaissance des directions principales de fracturations a une importance pour comprendre comment et quelles directions les écoulements peuvent emprunter dans le Causse Noir et le Causse Bégon. Il a donc été identifié à l'échelle des affleurements, à partir des rosaces directionnelles et stéréogrammes (élaborés par traitements statistiques des microstructures), une répartition géographique des directions de fracturations selon trois grandes zones :

- la zone ouest présente une direction générale de fracturation NW-SE, qui est guidée par le faisceau de failles de Peyreleau ;
- la zone centrale est dominée par des directions N-S et E-W (issues des deux grandes failles inverses de Veyreau et de Montjardin) ;
- la zone est se trouve principalement affectée par une direction NE-SW, issue du faisceau de failles de Meyrueis.

A l'échelle de la zone d'étude, la fracturation est principalement dirigée selon des directions N180°E et N160°E. La seconde est majoritaire pour les fractures ouvertes et correspond également à la direction du champ de contrainte actuel.



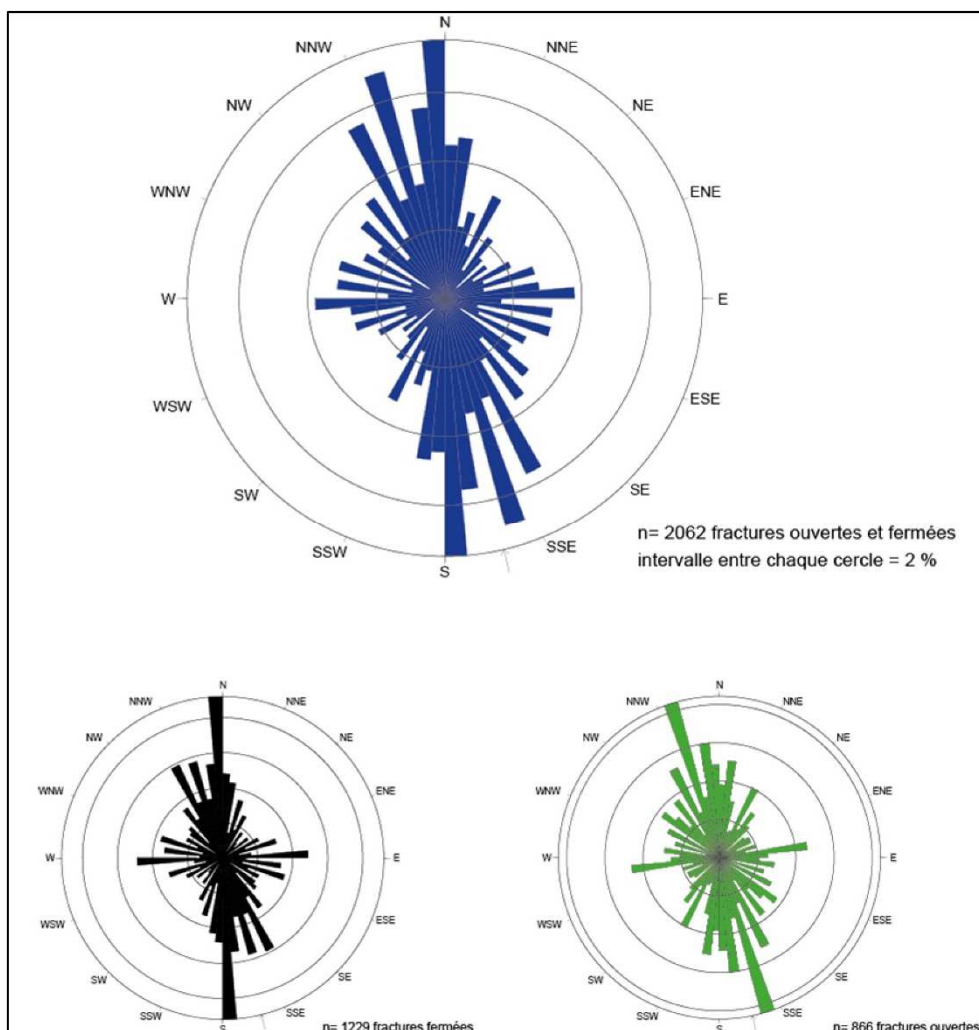


Figure 2. Rosaces directionnelles montrant toutes fractures relevées sur la zone d'étude (en bleu ensemble des fractures, en noir fractures fermées et en vert fractures ouvertes)

Cette structuration va avoir une influence sur les écoulements hydrogéologiques :

- le caractère ouvert des fractures N160°E (direction du faisceau de failles de Peyreleau) qui peut favoriser les écoulements selon cette direction principale ;
- le pendage des couches géologiques qui se fait globalement vers le nord du fait des failles inverses de Veyreau et de Montjardin, mais aussi qui converge vers le faisceau de Peyreleau-Le Rozier ;
- le pendage vers l'ouest depuis la bordure du socle cévenol (failles normales du faisceau de Meyrueis) jusqu'à Montméjean du fait d'une flexuration et de l'approfondissement du bassin.

L'ensemble de ces travaux a permis d'établir plusieurs coupes géologiques à l'échelle du Causse Noir qui décrivent sa structure et celle des systèmes aquifères.



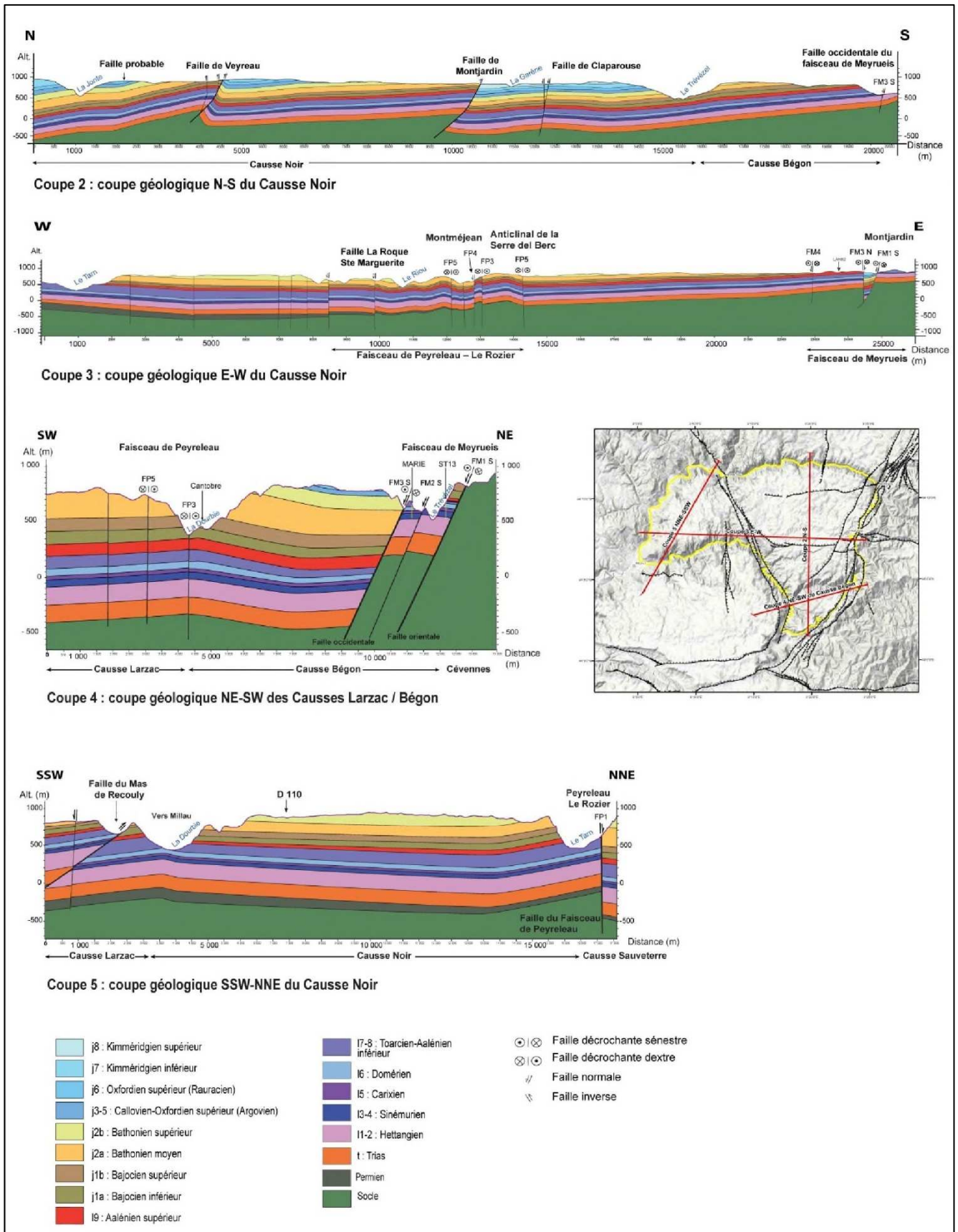


Figure 3. Coupes géologiques (GEOTER, 2019)



2 Synthèse de l'étude géomorphologique (Lot 2)

2.1 Rappels des objectifs

Les objectifs de l'étude géomorphologique (Lot 2) étaient les suivants :

- détermination des formes karstiques de surface et des formations superficielles ;
- détermination des conditions de karstification et des étapes de structuration karstique des aquifères ;
- détermination du rôle des formes de surface et de leur raccordement aux réseaux souterrains, notamment la position des pertes et des bassins versants concernés ;
- détermination du rôle des formations superficielles et de la morphologie karstique dans les modalités d'infiltration.

Les documents établis de cette partie de l'étude ont servi dans le cadre de l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque des systèmes aquifères.

2.2 Méthodologie

Pour répondre aux objectifs, l'étude s'est déroulée en 3 phases :

- Phase 1 : analyse bibliographique ;
- Phase 2 de mai 2017 à novembre 2017 : reconnaissances de terrain ;
- Phase 3 de septembre de 2017 à 2018 : traitement des données, cartographie et restitution finale.

Lors de la phase bibliographique, GEOTER s'est appuyé sur sa longue expérience de recherches dans les Grands Causses, ce qui leur a permis de disposer, de manière quasi exhaustive, de toutes les publications concernant la géomorphologie de ce secteur (publications, rapports d'étude, masters, thèses).

La phase 2 a permis d'acquérir des données complémentaires dans le but d'identifier les principales formes du paysage, de cartographier de manière détaillée les formes karstiques de surface, d'inventorier et de caractériser les différentes formations superficielles et enfin, de rechercher dans la partie ouest et nord des zones de pertes pouvant permettre la réalisation de traçages afin de localiser la limite entre le drainage vers le Tarn ou la Jonte et vers la Dourbie.

2.3 Synthèse des résultats

2.3.1 Formations superficielles

Le travail de cartographie des formes et des formations superficielles du Causse Noir a permis de comprendre les grandes étapes de la structuration du drainage de surface mais aussi



souterrain. La carte des formations superficielles est un des apports majeurs de l'étude d'un point de vue de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique des systèmes. Cette carte est présentée en Figure 4 et a été utilisée dans le cadre de la mise en œuvre de la méthode de caractérisation de la vulnérabilité des aquifères (PaPRIKa, Cf. § 4).

Les formations superficielles ont souvent été interprétées à tort comme des secteurs d'aléa karstique faible, tant du point de vue géotechnique qu'en termes de vulnérabilité. Afin d'éviter les zones d'affleurement calcaires ou dolomitique, les aménageurs ont considéré ces formations comme une protection pour les eaux souterraines, soit comme filtre, soit comme couche imperméable permettant de retenir les effluents pollués en surface. C'était sans compter sur leur extrême variabilité et, dans certains secteurs, leur grande fragilité, mais s'était surtout ignorer la réalité des dynamiques karstiques de sub-surface des karsts couverts.

Les cinq grands types de formations superficielles répertoriés dans le secteur étudié sont décrits ci-après :

- le **grésou dolomitique** est extrêmement poreux et très sensible au soutirage. Lorsqu'il est encore en place en surface, il peut entretenir une petite nappe perchée temporaire qui se ressuie lentement vers le front d'altération où elle est lentement drainée en profondeur par de petits conduits d'interface dans la roche saine. Ainsi, même s'il peut y avoir une forte épaisseur de grésou et une tendance à une infiltration tamponnée, ces secteurs peuvent être considérés comme très sensibles à toute pollution. Il en ressort cependant une tendance significative à tamponner les flux vers la zone noyée ce qui a d'importantes conséquences en termes de fonctionnement hydrodynamique ;
- la **couverture d'argiles à chailles** est une formation sensible. Elle offre l'aspect d'une couverture épaisse et étanche capable de maintenir une pollution en surface, de plus elle est souvent mise en culture. En fait, son imperméabilité permet la concentration préalable des eaux de surface et des polluants avant leur absorption massive et sans la moindre filtration par une série de pertes, notamment le long des bordures de corrosion ;
- Les **dépôts crétacés résiduels** offrent localement une des meilleures protections quand leur épaisseur et leur consistance sableuse assurent une infiltration lente, et donc une pollution moindre des infiltrations dans aquifères. En revanche, dans les paléo-vallons fluviokarstiques de véritables ruisseaux se forment lors d'épisodes pluvieux exceptionnels et leur enfouissement massif dans des pertes élimine toute possibilité de filtration ;
- les **dépôts fluviatiles allochtones** remaniés ou même en position de piémont sur le contact avec le massif cévenol n'offrent pas une grande protection pour les eaux souterraines. Ils colmatent cependant le fond des vallons fluviokarstiques et les dolines périphériques mais, ils n'entravent que très ponctuellement l'absorption des écoulements superficiels par le karst ;
- les **dépôts volcaniques** et les **dépôts périglaciaires** à la surface du plateau ne jouent qu'un rôle très local sur le Causse Noir en termes d'infiltration.



Outre la constitution des formations superficielles et leur épaisseur, la notion de dynamique karstique introduit une variable de taille dans l'appréciation de leur rôle. L'ensemble du secteur drainé par le système de Moulin de Corp est caractérisé par un fort gradient hydraulique entre la surface et le niveau de base jusqu'au zones les plus centrales du plateau comme l'attestent les grands réseaux karstiques explorés : l'Aven des Patates, le réseau du Sotch de la Tride et l'aven des Lavandes.







2.3.2 Influence des formes karstiques de surface et des formations superficielles sur les modalités d'infiltration

Le diagnostic karstologique établi à l'échelle du Causse Noir a conduit à repérer plusieurs phases de karstification majeures à l'origine de la structuration du réservoir et de mettre en évidence le rôle des couvertures sur la recharge de l'aquifère.

Sur la base de ces résultats, une carte interprétative des modalités d'infiltration depuis la surface a été réalisée. Cette carte est présentée en Figure 5.

La surface du causse a ainsi été divisée en quatre zones dont les caractéristiques d'infiltration sont comparables. Les structures d'infiltration verticale qui affectent le réservoir en profondeur comme les couloirs de brèches d'altération profonde et les injections volcaniques ont été figurés de manière distincte sur cette carte. En outre, au sein de ces zones, des secteurs ponctuels ou plus ou moins linéaires tels que les dolines donnant directement accès à un réseau souterrain ou bien les vallons fluviokarstiques creusés directement dans le substratum, ont été représentés lorsqu'ils étaient à l'origine d'un fonctionnement local très différent d'une de ces zones.

Ces 4 zones définies ont été interprétées de la manière suivante.

a. Zone d'infiltration concentrée rapide (en rouge sur la carte)

Les zones d'infiltrations concentrées se manifestent sous forme de pertes (ou paléo-pertes) ou de points d'infiltration dans les talwegs, le long des bordures de corrosion. Ces pertes peuvent aussi correspondre à des avens, dans des dépressions ou des fonds de canaux, ainsi qu'à des soutirages actifs ou à des effondrements.

Les zones en réseau en baïonnettes correspondent aux couloirs d'altérations matérialisés par les mégalapiés, essentiellement au passage du faisceau de faille de Peyreleau-La Roque-Ste-Marguerite. Ces secteurs sont aussi les réceptacles des eaux collectées dans les zones peu perméables. Les eaux se perdent de manière fortement concentrée et rejoignent rapidement les circulations karstiques profondes. Ce sont donc des zones très vulnérables vis-à-vis des ressources en eau.

Ces secteurs correspondent aux bordures de corrosion et pertes notoires des poljés et des dépressions endoréiques et à certaines mégadolines ou ouvalas comblées de grésou ou perte de vallons inondables.



b. Zone de faible infiltration et de concentration des eaux en surface (en orange sur la carte)

Les zones de faible infiltration correspondent à la présence d'un substrat marneux ou de formations de couverture tels que les calcaires à chailles ou les calcaires à stipites. Des secteurs présentant d'autres natures lithologiques, calcaire ou dolomitique, peuvent être inclus à ces zones de faible perméabilité en surface lorsque des couvertures suffisamment épaisses les recouvrent, notamment les couvertures de formations fluviatiles cévenoles ou d'argiles à chailles, ainsi que les dépôts résiduels d'argiles à chailles.

Sont inclus aussi à cette zone, tous les secteurs présentant un réseau hydrographique organisé en direction de zone d'infiltration rapide (représentées en rouge), là aussi, quelle que soit la nature lithologique du substratum, puisque dans des conditions de moindre perméabilité, gel par exemple, ces réseaux sont destinés à concentrer les écoulements de surface.

Ces secteurs constituent un impluvium où les eaux s'infiltrent relativement lentement. En temps normal, l'infiltration et le drainage par le karst sont fonctionnels, mais l'engorgement est rapide et les eaux de surface ruissellent lors d'évènements pluvieux modérés à forts, sans doute avec un fort contrôle du manteau neigeux.

Ce type de zone occupe une grande partie de la moitié est du Causse Noir et un large faisceau orienté nord-sud le long, correspondant à celui de Peyreleau-Le-Rozier.

c. Zone d'infiltration diffuse contrariée et à concentration locale (en violet sur la carte)

Ces zones sont des secteurs de reliefs où des formations sablo-argileuses résiduelles issues des dépôts créacés empâtent le bas des topographies : vallons fluviokarstiques, ouvalas et mégadolines, mégadolines, etc.

Dans le secteur à faciès callovo-oxfordien marneux, les infiltrations diffuses s'opérant dans le Jurassique supérieur sus-jacent, sont dirigées en sub-surface en direction des points bas constitués par les culots résiduels de mégadolines. A ces dépressions réceptacles du Jurassique supérieur s'ajoute le poljé de Sérigas et plusieurs autres zones inondables. On observe ainsi deux modalités d'infiltrations dans ces dépressions :

- infiltration rapide dans des pertes ou des ponors, généralement disposés en position latérale et un peu plus haut que le fond de la dépression, rappelant un ancien niveau de colmatage des dépressions concernées ;
- infiltration faible en raison du colmatage argileux de ces dépressions, souvent des argiles à chailles remaniées, permettant éventuellement l'inondation des fonds de dépressions pouvant être soumises à de puissants soutirages.

d. Zone d'infiltrations diffuses fortement tamponnées (en vert sur la carte)



La zone d'infiltration diffuse, sans drainage de surface, s'effectue sur substratum majoritairement dolomitique, mais parfois calcaire. Ce sont des secteurs où l'essentiel des eaux de surface s'infiltrent directement sans avoir la possibilité de se concentrer au préalable.

Ces surfaces correspondent le plus souvent à des replats lapiazés, avec de profondes canaux dans les dolomies ou une forte densité de dolines dans les calcaires. En l'absence de couvertures imperméables, comme des argiles à chailles ou des altérations des marnes du Callovo-Oxfordien ou issues des calcaires à stipites, toutes les précipitations qui tombent sur ces surfaces sont intégralement drainées par infiltration verticale dans le karst.

Dans le cas des secteurs dolomitiques, on note deux comportements dans la partie ouest du Causse Noir. Sur les parties du plateau en rive droite de la Dourbie, les dolomies sont décapées de leur couverture de grésou par ruissellement en direction de la vallée, mais aussi par l'intense soutirage qui vidange les canaux par de grands puits rejoignant directement les étages de galeries des réseaux karstiques drainés vers le fond de la vallée (Puech Nègre). Vers le centre du plateau, au-delà de la zone d'érosion assurée par ce double drainage, la couverture de grésou est préservée et tamponne l'infiltration diffuse dans de nombreuses dépressions morcelées par les canaux et dans d'encore plus nombreuses dolines à remplissage de grésou qui filtrent l'eau en ralentissant sa vitesse d'infiltration.

Dans ce secteur, la présence du maar de Puech Margue peut par ailleurs jouer un rôle dans le ralentissement de cette infiltration en perturbant l'interconnectivité au sein même du réservoir dolomitique, mais aussi à l'interface avec le réservoir sous-jacent, c'est-à-dire en perturbant le système karstique antérieur à l'explosion phréatomagmatique.

Les **structures d'infiltration verticales**, qui jouent un rôle non négligeable dans la dynamique des systèmes karstiques, ont quant à elles été interprétées de la manière suivante.

e. Couloirs d'altération profonde et injections volcaniques

Les réseaux de couloirs d'altération profonde, présents au sein du réservoir, sont particulièrement sollicités dès que l'érosion de surface a commencé à s'opérer dans la masse rocheuse sous les fronts de crypto-altération.

Le chevelu hydrographique est dès lors contraint par les discontinuités du réservoir, calquées sur la fracturation, représentées ici par les couloirs d'altération profonde évoluant en brèches karstiques.

Là où l'érosion mécanique n'a pas été suffisamment en profondeur pour décaper les dolomies du Bathonien supérieur, le drainage karstique a emprunté ces drains préférentiels dans un premier temps en décolmatant l'altérite profonde (réseaux de décolmatage) et en l'évacuant par les sources. En profondeur, le maillage de couloir d'altération favorise le continuum de l'aquifère et les effets de dilution. En revanche, la connexion avec la sub-surface de ce maillage



et ses extensions à l’affleurement sont propice à l’introduction des polluants en profondeur (zone vulnérable), souvent directement vers la zone noyée.

f. Dépressions et réseau endoréiques

Les réseaux de drainage des dépressions endoréiques correspondent à des vallons secs imprimés dans le substratum. Ces réseaux de drainage, les plus récents à se mettre en place dans l’organisation du drainage du plateau, ne parviennent pas à se raccorder au réseau hydrographique des vallées et se perdent dans le karst au niveau des points bas du plateau, souvent dans le fond des vallons fluviokarstiques ou dans de vastes dépressions endoréiques.

Dans tous les cas, on observe une concentration préalable des eaux en surface avant l’infiltration (zone orange). Cette concentration est en partie liée à des joints ou des couches stratigraphiques moins perméables, comme les calcaires marneux du Callovo-Oxfordien ou les calcaires à stipites du Bathonien inférieur, mais surtout au rôle des couvertures argileuses sur lesquelles s’installe en premier lieu le réseau de drainage.

Ensuite ou concomitamment, ce drainage de surface organisé peut être exacerbé lors des périodes froides par le gel partiel des sols. Le rôle de ces ravins périglaciaires, souvent surestimé en termes d’organisation du drainage karstique, est ici indéniable comme le prouve la forte proportion de gélifracsts dans toutes les dépressions du plateau. On en retrouve aussi assez systématiquement dans les entonnoirs des points d’absorption.

g. Les points de perte ou d’absorption concentrée

Plusieurs pertes sont connues dans l’axe des talwegs des vallons. Le Vallon de la Garène est exemplaire à ce titre.

On observe de véritables paléo-pertes dans les dépressions endoréiques, ce qui suggère leur ancien statut de poljé. On notera que dans la plupart des cas, ces paléo-pertes ne sont pas situées au point bas des dépressions, mais légèrement au-dessus, en position latérale. Cette position surélevée suggère qu’elles ont été fonctionnelles alors que le colmatage des dépressions était plus important, ces pertes étaient alors disposées en bordure de couverture. Ceci est une position classique que l’on retrouve d’ailleurs dans plusieurs mégadolines au nord de la faille inverse de Veyreau.

Enfin, les modalités d’infiltration des formations superficielles s’insèrent dans des schémas de fonctionnements hydrodynamiques à l’échelle des systèmes karstiques. En fait, on observe plusieurs types de modèles de dynamiques morphokarstiques qui contrôlent les zones de recharge des aquifères à travers les modalités d’infiltration et les types de connexion entre la surface (poljés, vallons fluviokarstiques, dolines, lapiaz) et l’endokarst (réseaux karstiques, couloirs fantômisés, aquifères temporaires perchés), jusqu’aux sources. Cette diversité



géomorphologique engendre une variabilité du fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères à l'échelle du Causse Noir.





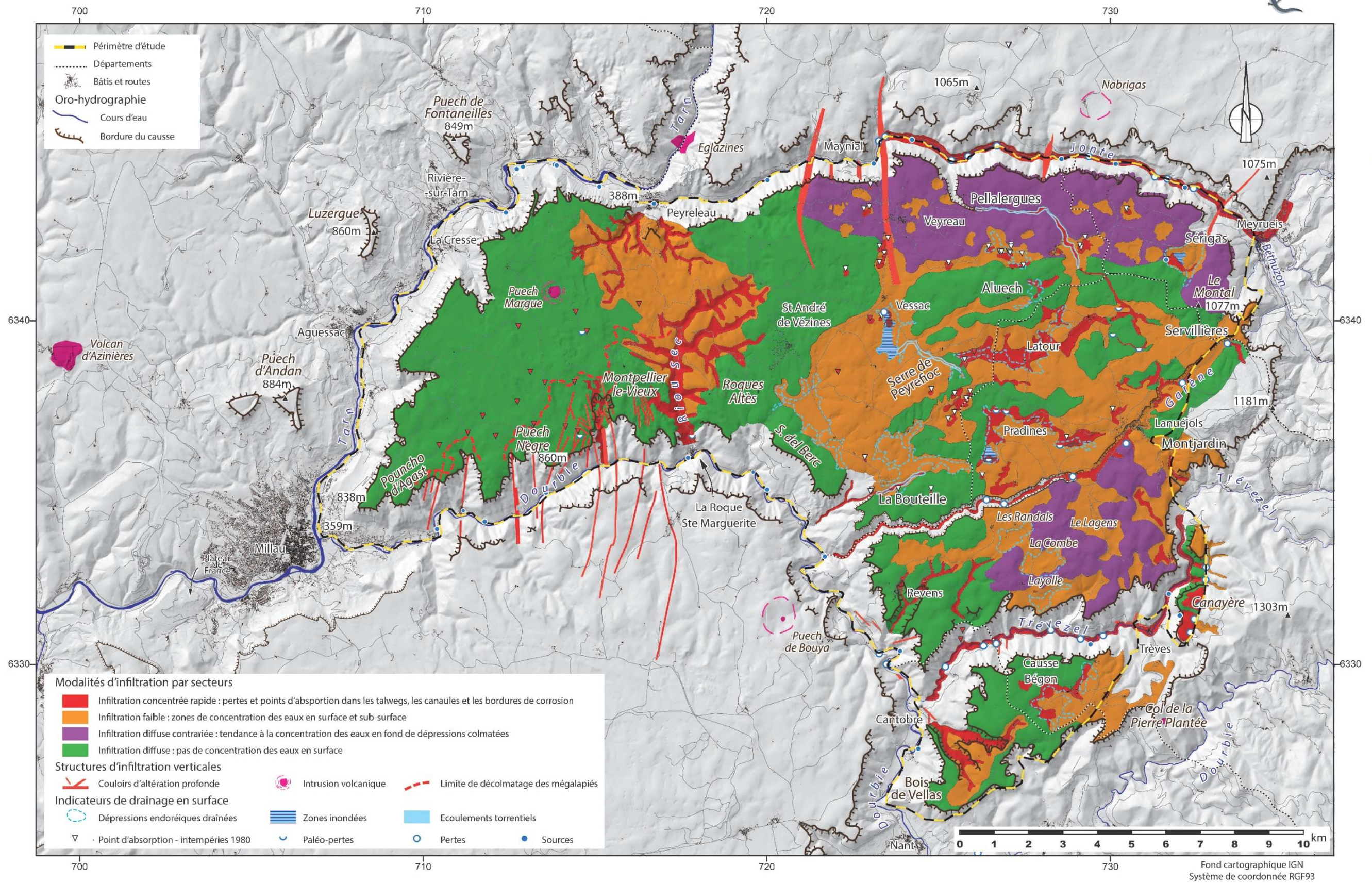


Figure 5. Carte des modalités d'infiltration à la surface du Causse Noir





PARTIE II : Synthèse de l'étude hydrogéologique





1 Préambule

1.1 Introduction et rappels des objectifs

L'étude hydrogéologique du Causse Noir a été menée par Antea Group et a été scindée en plusieurs domaines d'étude : hydrodynamique, hydrochimie, traçages et vulnérabilité des systèmes aquifères. Pour une partie des calculs hydrodynamiques et de l'interprétation des traçages, Antea Group s'est appuyé sur l'expertise de David LABAT, Professeur de l'université de Toulouse III.

L'objectif de cette étude multidisciplinaire était de caractériser les systèmes aquifères du Causse Noir en termes de fonctionnement hydrodynamique, de la nature des formations géologiques traversées, de temps de transferts, de qualité de l'eau et définir leur bassin d'alimentation. L'étude s'est déroulée sur 2 cycles hydrologiques complets entre février 2017 et février 2019.

1.2 Contexte hydrogéologique global

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.

Les systèmes aquifères les plus productifs se trouvent être constitués 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 Moulins, la source du camping des Prades et la résurgence du Triadou.

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. Les sources ont été catégorisées en 3 selon leur débit : 15 sources dites de catégorie 1 ($Q > 10$ L/s), 14 sources de catégorie 2 ($1 < Q < 10$ L/s) et 148 sources de catégorie 3 ($Q < 1$ L/s).

1.3 Contexte hydroclimatique de l'étude

Afin d'apprécier l'influence du signal d'entrée, la pluie, sur les aquifères, les données de la station de Meyrueis appartenant au réseau EDF ont été utilisées. Le cumul des précipitations relevé à cette station est de 869 mm en 2017 et de 1 496 mm en 2018.



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 ont été particulièrement importants entre les mois de janvier et de mai 2018 (312 mm 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, ce qui a permis d'importantes phases de recharge des aquifères locaux.

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 a été intéressant vis-à-vis de la représentativité des mesures réalisées durant les 2 cycles hydrologiques et des interprétations déduites sur le fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique des systèmes étudiés.



2 Synthèse de l'étude hydrodynamique, hydrologique et hydrochimique

2.1 Rappels sur les méthodes mises en œuvre

L'acquisition des données de terrain a été réalisée par les techniciens du PNRGC. Elle a consisté en la mesure *in situ* des principaux paramètres physico-chimiques (conductivité, température, pH, oxygène dissous), du débit des sources et des cours d'eau et en la réalisation d'analyse hydrochimique en laboratoire.

Un suivi mensuel a débuté au mois de février 2017 pour s'achever au mois de février 2019 et s'est focalisée sur les 15 principales sources du Causse Noir, les sources de catégorie 1. 2 cycles hydrologiques complets ont ainsi pu être observés.

Parallèlement à ce suivi de fréquence mensuelle, 7 des 15 sources ont été équipées de sondes de mesure en continu (niveau, conductivité et température) avec des enregistrements à un pas de temps de 30 mn.

L'analyse des données hydrodynamiques 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.

Les mesures de débit des cours d'eau qui délimitent le Causse Noir (La Jonte, la Dourbie et le Tarn) ont en outre été interprétées pour mettre en évidence d'éventuels apports ou pertes non identifiés à ce jour.

Enfin, quant à l'approche hydrogéochimique, l'analyse de l'évolution de la qualité des eaux des sources et des équilibres calco-carboniques, la réalisation de traitements statistiques (statistiques descriptives, distribution des fréquences de conductivité et ACP) et de représentations graphiques classiquement utilisées en hydrogéologie, ont été mis en œuvre.



2.2 Synthèse des résultats obtenus

2.2.1 Hydrodynamique

Dans un premier temps, les chroniques de débits ont mis en évidence que l'apports d'eaux météoriques sur certaines stations ont parasité le signal de débit enregistré avec la présence de pics de débit artificiels.

Dans un second temps, l'analyse de ces chroniques a cependant permis de caractériser les différences de fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères étudiées tout particulièrement en période de fortes pluies. Les hausses de débit ne sont pas toutes concomitantes, ce qui s'explique en partie par une différence de fonctionnement d'un système à l'autre et plus précisément vis-à-vis des modalités d'infiltration sur le bassin d'alimentation comme l'a montré l'étude géomorphologique. Les formations de recouvrement (grésou, argiles à chailles) engendrent un effet retard important sur l'infiltration des eaux météoriques. Ce comportement se distingue des systèmes de type binaire (Moulin de Corp) où chaque épisode pluvieux entraîne une réaction du système aquifère. Le fonctionnement des sources du quart nord-ouest du Causse Noir est tout particulièrement influencé par le rôle tampon joué par les formations de recouvrement.

Cette conclusion est confortée par celles de l'étude des indices de variabilité des débits, des courbes de récession et des analyses corrélatoires. Il est en effet intéressant de noter que pour l'ensemble des systèmes du Causse Noir étudiés les valeurs des coefficients de Mangin traduisent des retards à l'infiltration élevés. Pour la majorité des systèmes, correspondant au type unaire, ceci est couplé à un pouvoir de régulation important, c'est-à-dire l'aptitude du système à stocker les précipitations et à les restituer au cours du temps. La convergence de ces 2 phénomènes engendre un fonctionnement hydrodynamique inertiel à l'opposé des systèmes de type binaire, bien fonctionnels.

Il est en outre intéressant de noter que pour un même système aquifère (Moulinets en l'occurrence), les résultats de ces analyses diffèrent de manière significative selon l'année observée. Lors de l'année 2018, marquée par de fortes pluies, le système des Moulinets se rapproche de celui d'un système fonctionnel, alors qu'en 2017 (année plutôt « sèche »), il est comparable à système plus inertiel. Ce résultat confirme le caractère primordial d'un suivi sur au moins 2 cycles hydrologiques complets dans le cadre d'étude à grande échelle, comme celle du Causse Noir.

L'étude hydrodynamique a donc permis de mettre en évidence 2 grands types de fonctionnement. Le premier correspond à des systèmes peu fonctionnels, de type unaire, pour lesquels les modalités d'infiltration (effet retard dû aux formations de recouvrement) au droit de leur bassin d'alimentation jouent un rôle majeur. Ce type de fonctionnement caractérise la majorité des systèmes étudiés sur le causse. Le second correspond à des systèmes karstiques plus fonctionnels en lien avec l'origine superficielle d'une partie de leur alimentation par le biais des pertes des cours d'eau du Trévezel ou de la Jonte.



Au sujet des bilans pertes/apports, mesurés sur le Tarn, la Dourbie et la Jonte, il convient de retenir la mise en évidence de la hausse significative (entre 7 et 10 % selon les périodes hydrologiques) du débit du Tarn sur le tronçon compris entre « Pont de la Cresse » et « Amont Aguessac ». L'origine de ces apports n'a pas pu être identifiée dans le cadre de cette étude mais nécessiterait la mise en œuvre de nouveaux moyens de mesures (physico-chimiques, voire isotopiques) pour la déterminer. L'arrivée d'eaux souterraines issues de l'extrémité ouest du Causse Noir pourrait être envisagée compte tenu du fait que l'(ou les) exutoire(s) de ce secteur (couvrant une surface non négligeable) n'est pas connu.

2.2.2 Hydrochimie

a. Evolution des paramètres physico-chimiques

Notons en premier lieu que certaines chroniques de conductivité et de température ont été difficiles à interpréter en raison de l'arrivée d'eaux superficielles qui sont venues perturbées artificiellement le signal enregistré (Prades ou Triadou par exemple).

A la suite de forts cumuls pluviométriques, hormis le système de Moulin de Corp, les 6 autres montrent un comportement atypique pour des aquifères karstiques à savoir que le signal de conductivité de ces sources montre une tendance à la hausse. Ces tendances à la hausse 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.

Pour la source de Moulin de Corp, on observe des baisses de conductivité en période pluvieuse en lien avec un drainage bien développé du système et avec le fait que l'aquifère soit en partie alimenté par les pertes du Trévezel.

De manière globale, les enregistrements en continu 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 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.

Ces conclusions sont par ailleurs étayées par les résultats des calculs de fréquence de conductivité. Les systèmes binaires présentent des distributions plurimodales et étalées caractérisant une grande variabilité de la minéralisation au cours de l'année alors que les systèmes unaires montrent des distributions soit quasi unimodales traduisant une chimie homogène, soit bimodales avec un premier pic de distribution majeur et un second, de



fréquence plus faible traduisant des valeurs de conductivité plus élevées (hausse observée à la suite des événements pluvieux).

b. Caractérisation des faciès chimique

Préalablement à la caractérisation du faciès hydrochimique des eaux des systèmes aquifères, la chimie des précipitations analysées aux stations météorologiques de Millau et des Mazes indique des eaux peu chargées en ions, le calcium et les nitrates étant les ions dominants. L'influence anthropique (industrie, circulation des véhicules à moteur thermiques, etc.) sur ces eaux de pluie n'est pas visible. En revanche, les concentrations en chlorures et en sodium montrent 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). Les apports des pluies en anions et cations pour les eaux souterraines du causse sont donc faibles voire négligeables pour la plupart des éléments.

Concernant, les eaux des sources (catégorie 1 et 2), elles présentent un faciès bicarbonaté calcique avec un pôle magnésien plus marqué pour certaines sources. 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. Le système aquifère d'Ubertariès se distingue des autres car il est le seul à présenter une nature à dominance calcaire.

En outre, le caractère binaire du fonctionnement hydrodynamique de certains systèmes se traduit par des minéralisations moyennes et des teneurs en hydrogénocarbonates plus faibles que les autres systèmes, de type unaire. Ce trait caractéristique, binaire ou unaire, apparaît également dans les évaluations des temps de séjour des eaux au sein des aquifères (analyse du rapport $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$). Les sources à faible temps de séjour comme Gardies ou Pas de l'Âne, alimentées majoritairement par des cours d'eau (résurgence directe du Trévezel dans le cas de Pas de l'Âne), se distinguent nettement des autres systèmes moins fonctionnels (Biau, Monna, etc.) au sein desquels l'eau transite plus longtemps.

c. Influence anthropique

Les éléments chimiques qui marquent classiquement l'influence anthropique (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) sont peu présents dans les eaux des sources de catégorie 1 et 2. En effet, les concentrations en nitrates (marqueurs classiques de l'activité agricole) ne dépassent pas 6 mg/l pour la grande majorité des sources, soit l'équivalent de l'apport naturel issu des précipitations et de l'activité bactérienne dans le sol. Seul le système d'Ubertariès et dans une moindre mesure ceux de Moulin de Corp et Fournets sont « marqués » en nitrates (respectivement, 14,2 mg/l, 9,6 mg/l et 8,8 mg/l). Les ressources en eaux souterraines du Causse Noir restent relativement préservées jusqu'à aujourd'hui des problèmes de contamination par les nitrates.



Un autre type d'influence anthropique apparait sur quelques systèmes, regroupés pour la plupart sur le secteur nord-ouest, une augmentation des concentrations en chlorures en période hivernale (décembre 2017-janvier 2018). Cette augmentation correspond très probablement au salage des routes en hiver.

Le dernier marqueur de l'activité anthropique qui ressort des analyses chimiques réalisées sur les eaux souterraines du causse, est celui hérité de l'activité minière (secteur de de Trèves notamment). On retrouve en effet dans les rivières du Trévezel la présence de quelques métaux lourds (aluminium, arsenic, plomb, nickel et zinc).

Ces métaux lourds ont été retrouvés dans l'eau de plusieurs sources (Moulin de Corp, Jouque Merles, Pas de l'Âne, Sourguettes, les Douzes, etc.) permet 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 mettent à nouveau en évidence le fonctionnement binaire, plus ou moins important selon les systèmes. Cette influence reste cependant difficile à quantifier.



3 Traçages artificiels colorés

3.1 Rappels sur les objectifs et la méthode mise en œuvre

Les 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 ont été réalisées par les techniciens du PNRGC entre les mois de mars 2017 et de décembre 2018. La localisation des points d'injection a été décidée en concertation avec les spéléologues locaux ayant une bonne connaissance de la zone.

Les injections 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, directement dans les écoulements actifs souterrains dans certains cas grâce à l'aide des spéléologues locaux.

Les traceurs utilisés ont été la fluorescéine et la sulforhodamine B. Lors des injections, un apport d'eau de plusieurs m³ par citerne a été systématiquement déversé au niveau du points d'injection.

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.

Des bilans de restitution ont été systématiquement établis lorsque des mesures de débit étaient disponibles. Ces bilans permettent notamment de calculer les temps de transfert, les masses restituées, pourcentages de restitution et des taux de dilution.

3.2 Synthèse des résultats obtenus

Les résultats obtenus à l'échelle du Causse Noir sont marqués par une grande variabilité en termes de taux de restitution du traceur (entre 0,04 % et 95,40 %), e taux de dilution (compris entre 5,71E-12 L⁻¹ et 8,21E-08 L⁻¹) et des vitesses maximales (4,7 m/h à 500,0 m/h) ou modales calculées (de 4,2 à 194,0 m/h). Cette disparité montre une grande hétérogénéité du fonctionnement hydrodynamique des systèmes tracés et des conditions de transferts en leur sein. Il en en outre intéressant de retenir que pour un même système aquifère, ces paramètres varient selon les conditions hydrologiques dans lesquelles se sont déroulées le traçage.

Au-delà de ce bilan chiffré, le résultat essentiel de ces traçages est la 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. Ce découpage fait écho à la carte des réseaux karstiques souterraines explorés par les spéléologues locaux qui montre que plus de 85 % de ces réseaux se développent sur la partie Est du causse. 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.

A partir des résultats de ces traçages, les limites des bassins d'alimentation des sources du Causse Noir ont été actualisées. Elles sont présentées sur la carte en Figure 6.

Une partie de ces bassins versants définis a pu être validée grâce au bilan de flux entrants et sortants calculés pour les 7 systèmes qui ont fait l'objet d'un suivi en continu à leur exutoire. Ces suivis effectués sur 2 cycles hydrologiques offrent l'avantage de disposer d'une valeur de débit moyen fiable et représentative, tout particulièrement si l'on considère 2 années, 2017 et 2018, si différentes en termes de pluviométrie.

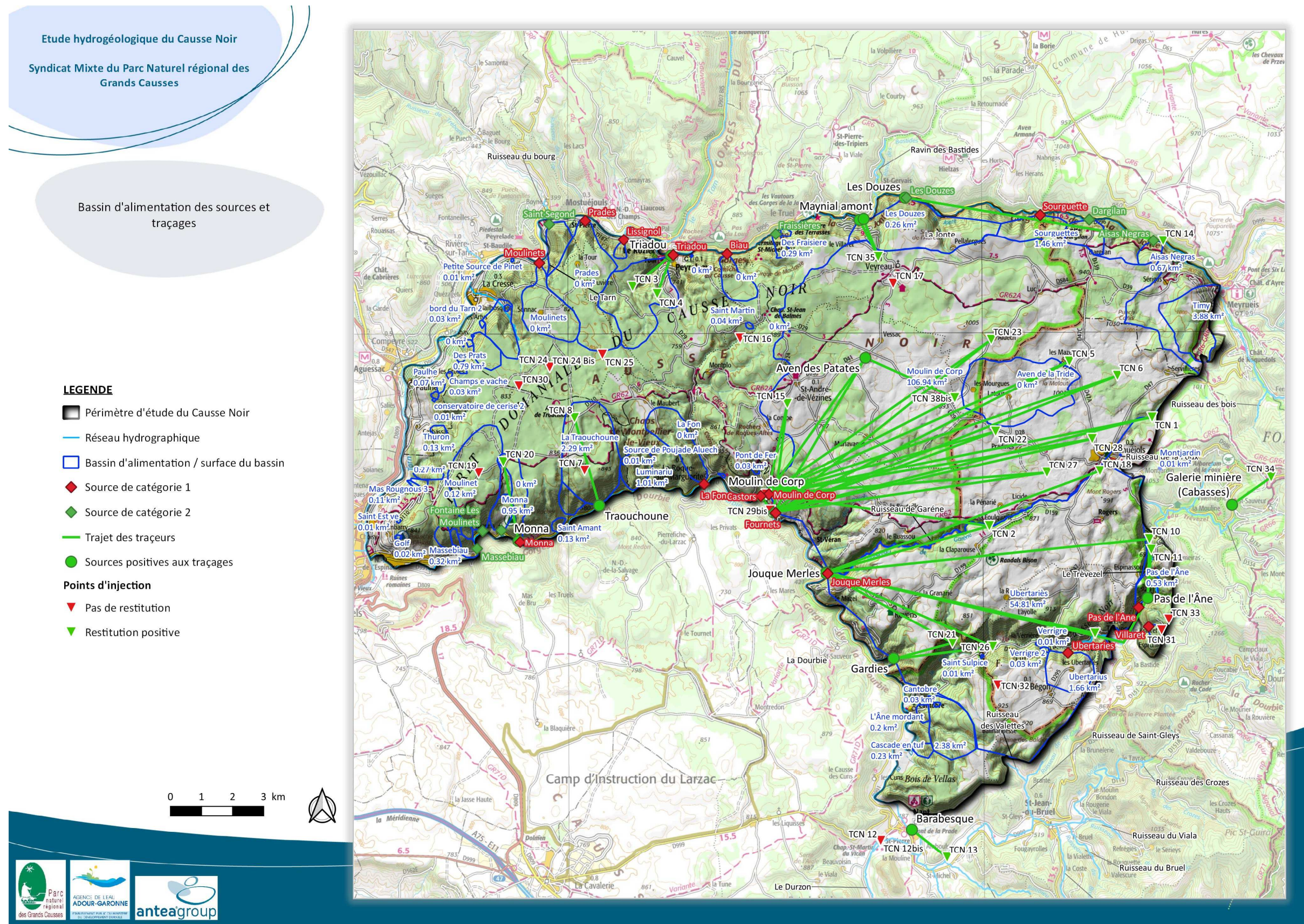
Les résultats de ces bilans montrent qu'il est nécessaire d'affiner les connaissances sur les systèmes de Triadou et de Lissignol à partir de nouveaux traçages et de Prades, Monna et Biau dans une moindre mesure.

Source	Débit moyen (l/s)	Volume annuel réel (m ³)	Surface BV (m ²)	Volume théorique	Ecart (Vth/Vr)
				Pluie efficace (200 mm)	
Biau	8,1	255 442	1 068 000	213 600	-16%
Monna	5,8	182 909	1 085 000	217 000	19%
Prades	27,8	876 701	5 360 000	1 072 000	22%
Triadou	16,7	526 651	4 523 000	904 600	72%
Moulinets	17,7	558 187	2 561 000	512 200	-8%
Lissignol	0,7	21 444	165 100	33 020	54%
La Fon	12,9	406 814	2 030 000	406 000	0%

Tableau 1. Bilan hydrologique réalisé sur les 7 sources suivies en continu









4 Synthèse de la vulnérabilité des systèmes aquifères à l'échelle du causse

4.1 Rappels sur la méthode mise en œuvre

La définition de la vulnérabilité reconnue et utilisée par tous aujourd'hui distingue deux notions :

- la **vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques 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.

C'est la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère qui est retenue dans le cadre des études hydrogéologiques classiques. Elle 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.

La méthode appliquée dans le cadre de l'étude du Causse Noir est la méthode multicritère PaPRIKa qui repose sur l'élaboration de 4 cartes correspondant à 4 notions : Protection, Réservoir, Infiltration et degré de Karstification. Ces critères **P**, **R**, **I** et **Ka** sont utilisés pour décrire la structure et le fonctionnement du système karstique et sont définis comme suit :

- **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 ;
- **Ka** (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.



Pour calculer l'indice de vulnérabilité globale prenant en compte les données spatialisées pour chacun des 4 critères pondérés, la formule suivante est utilisée :

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

Les poids affectés aux critères 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%.

Cinq classes sont ensuite calculées à partir du calcul de Vg : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée.

4.2 Résultats

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.

Le modèle retenu et considéré comme le plus représentatif de la vulnérabilité du Causse Noir met en relief les deux critères considérés comme les plus importants vis-à-vis de la vulnérabilité du causse : l'infiltration et la karstification. Ce choix est basé sur les caractéristiques hydrodynamiques majeures mises en évidence à partir de l'étude hydrodynamiques et des résultats des traçages colorés.

On relèvera que 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).



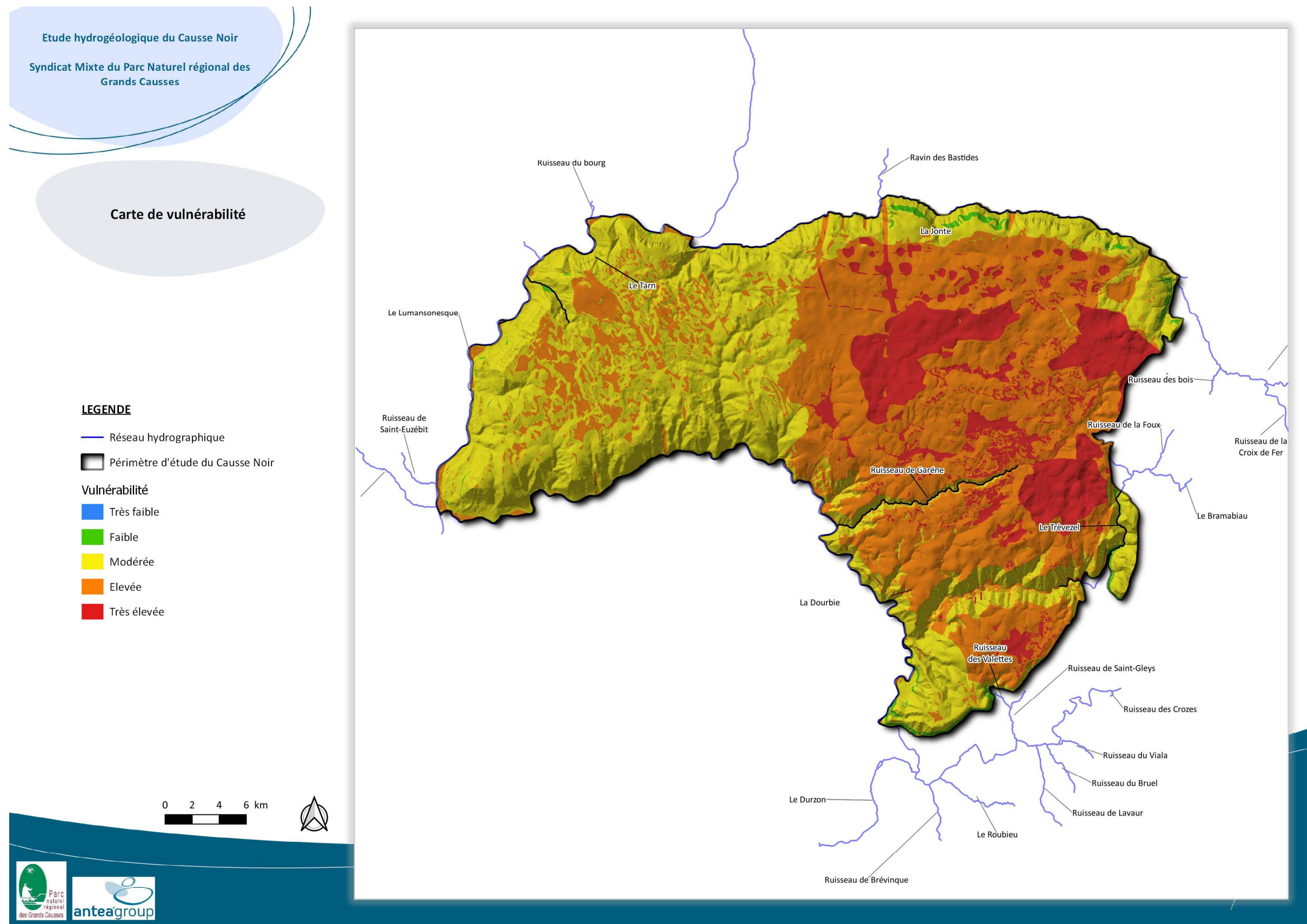


Figure 7. Carte de vulnérabilité globale retenue pour le Causse Noir





PARTIE III : Conclusions et perspectives





1 Conclusions

L'étude hydrogéologique du Causse Noir a été menée de 2016 à 2019 par le groupement des bureaux d'études GEOTER, pour la partie géologie et géomorphologie (lots 1 et 2), Antea Group pour la partie hydrogéologie (lots 3 à 6).

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 vont jouer un rôle majeur dans le développement des systèmes karstiques et sur leur compartimentation dans l'espace.

Quant à l'étude géomorphologique, un des apports majeurs de ces travaux réside dans la mise en évidence du rôle des formations de surface vis-à-vis des modalités d'infiltration des eaux superficielles en profondeur. L'étude a montré 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 distinct (plus ou moins inertiel) et une vulnérabilité intrinsèque variable (plus vulnérable dans les secteurs caractérisés par une infiltration concentrée).

Ces résultats couplés à ceux de l'interprétation des données hydrodynamiques, et hydrochimiques et des traçages), ont abouti à proposer un découpage du Causse Noir en 5 secteurs géographiques, chacun caractérisé par des modes de fonctionnement distincts. Ces 5 secteurs correspondent à 5 blocs structuraux délimités par des grands accidents tectoniques (ou faisceaux de failles) également décrits dans les conclusions de l'étude géologique (lot 1). Enfin, ces 5 zones présentent leur couverture superficielle propre associée à des modalités d'infiltration spécifiques qui vont jouer un rôle majeur dans le fonctionnement hydrodynamique des aquifères.

La carte présentée en figure suivante illustre ces 5 secteurs. 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).



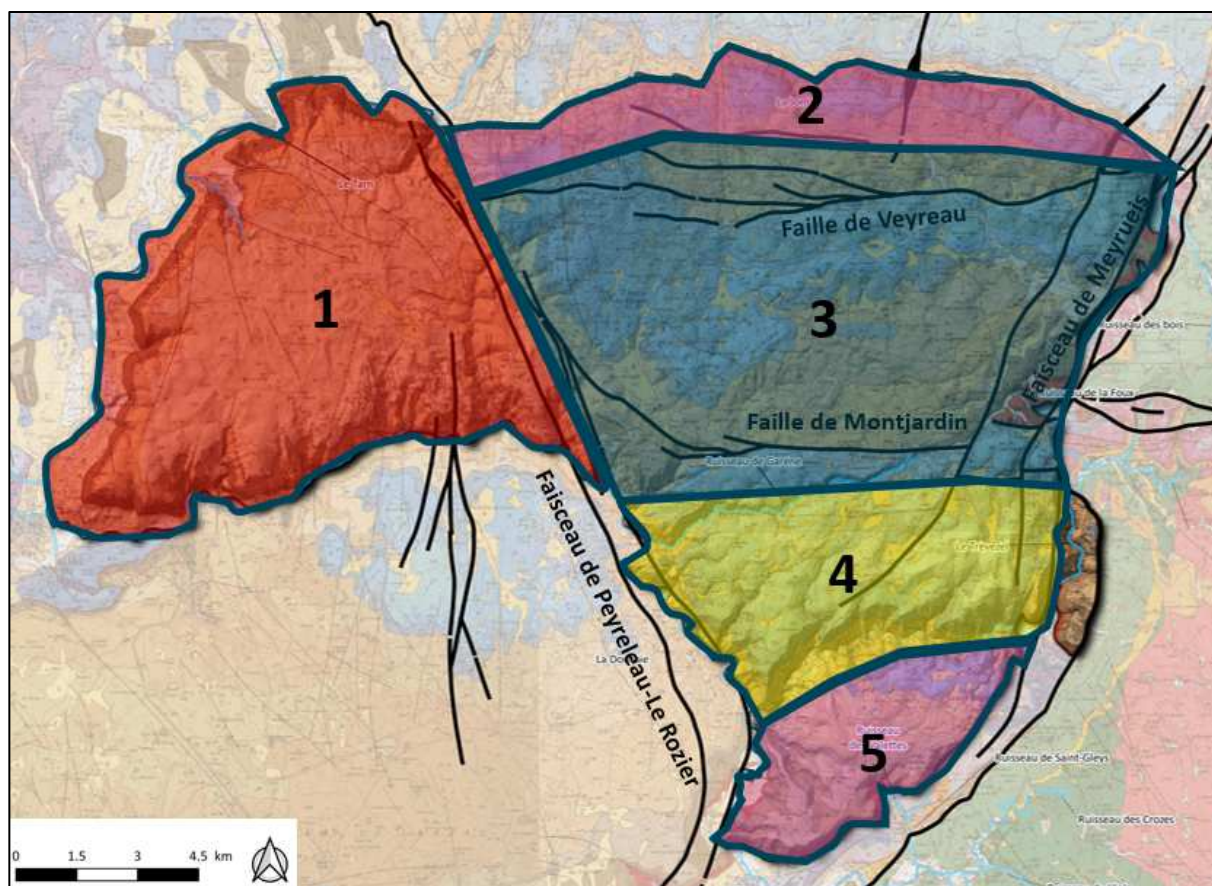


Figure 8. Découpage du Causse Noir en 5 systèmes structuraux et fonctionnels

a. Zone 1 : Ouest du Causse Noir

Cette zone se caractérise tout particulièrement par le peu de restitutions positives obtenues lors des opérations de traçages menés en 2017 et 2018. Seuls quatre traçages se sont avérés positifs sur cette partie du Causse Noir, dont 2 vers la source de Triadou. Pour ces deux traçages les vitesses de restitution observées sont faibles, moins de 10 m/h. Ces observations sont cohérentes avec celles issues des études hydrodynamique et hydrochimique qui montrent des systèmes peu réactifs aux précipitations en termes de transferts de masse, avec un effet retard important joué par la zone non saturée.

Ce secteur ne présente par ailleurs aucun réseau karstique développé connu, ce qui met en lumière le faible degré de développement karstique des aquifères au droit de cette zone. Ce développement et cet hydrodynamisme karstique limités peut en outre être mis en relation avec la présence massive du grésou en surface. Le rôle de cette formation de surface vis-à-vis des modalités d'infiltration a été démontré dans le cadre de l'étude géomorphologique.

Enfin, au niveau de l'extrémité ouest du causse, le long de la vallée du Tarn, aucune émergence significative (plusieurs l/s) n'est connue à aujourd'hui. Ceci peut être mis en relation avec les apports importants identifiés dans la rivière (plusieurs centaines de litres par seconde) dont



l'origine et la localisation restent à préciser. Des sources drainant une partie de ce secteur ouest du causse pourraient en outre être un des exutoires possibles aux traçages non restitués.

b. 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.

L'étude hydrodynamique a montré l'importance du retard à l'infiltration dans ce secteur mais un pouvoir de régulation faible contrairement aux systèmes de la zone 1. Ceci peut être relié à la présence de grésou sur la majorité de la surface des bassins d'alimentation des systèmes karstiques de cette zone. Seule la relation des systèmes aquifères avec la Jonte engendre des différences de fonctionnement avec ceux de la zone 1.

En effet, les résultats positifs des traçages dans ce secteur (en rive droite de la Jonte, côté Causse Méjean) montrent d'une part, les relations de la Jonte avec les aquifères du secteur par le biais de nombreuses pertes et d'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.

c. 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 zones définies. 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.

Sur large secteur, la quasi-totalité des injections de traceurs réalisées a abouti à des restitutions vers les sources de forts débits, à savoir Moulin de Corp, Castors et des Fournets qui drainent cette partie du causse. Les vitesses observées lors de certaines opérations de traçage dépassent les 120 m/h, ce qui classe les systèmes tracés dans le aquifères karstiques fonctionnels.

En outre, l'influence des relations eaux de surface/eaux souterraines s'expriment à la fois d'un point de vue hydrodynamique (forte réactivité en termes de débit en période de pluie) et d'un point de vue hydrochimique où plupart des eaux de source montrent une grande variabilité de leur chimisme au cours de l'année.



En outre, dans cette zone, se trouvent les réseaux souterrains de l'aven des Patates et l'aven du sotch de la Tride qui démontrent le degré élevé de karstification des formations aquifères, à mettre également en relation avec la grande variabilité des formations de surface cartographiées (argiles, à chailles, grésou et aussi, localement, l'absence de ces formations de surface) et des modes d'infiltration qui y sont associés.

Dans ce secteur, les systèmes karstiques majeurs 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.

d. 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.

Sur cette zone, les relations avec les eaux de surface, le Trévezel et le ruisseau de la Garène, influent largement sur le fonctionnement des systèmes aquifères. Cette influence est d'ailleurs bien plus marquée en termes de signature chimique (peu de données sur l'hydrodynamique) que pour la zone 3 précédente. Les transferts entre les eaux de surface et les eaux souterraines s'effectuent de manière plus rapides (vitesses modales obtenues de près de 200 m/h lors de certains traçages) et plus conséquentes vis-à-vis des débits écoulés qu'au droit de la zone 3. Ce fonctionnement binaire est une des particularités communes entre les zones 3 et 4.

Un autre point commun majeur à ces deux zones est la présence de nombreux réseaux souterrains, développés pour la plupart le long de la vallée du ruisseau de la Garène.

Les formations de surface, de manière comparable à la zone 3, sont diverses et n'occupent pas la totalité de la surface des bassins d'alimentation des systèmes karstiques, laissant place à de larges zones d'affleurements des roches aquifères.

Enfin, il est intéressant de noter qu'à partir des résultats d'un traçage, un phénomène de difffluence a été observé, entre les sources de Jouque Merles et de Fournets (situé dans la zone 3). Ceci a permis de limiter 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 selon la période hydrologique ce phénomène de difffluence se met ou non en fonctionnement.



e. Zone 5 : Sud-est du Causse Noir

Cette cinquième zone du Causse Noir, correspond au causse Bégon qui constitue une entité hydrogéologique à part entière.

Aucun traçage positif n'a été observé sur ce secteur. Les relations hydrauliques avec les cours d'eau du Trévezel et de la Dourbie ne sont pas connues.

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.



2 Perspectives

Sur les aspects hydrogéologiques, plusieurs pistes de poursuite de l'amélioration de la connaissance du fonctionnement du Causse Noir et des Grands Causses plus globalement, peuvent être évoquées :

- la continuité des mesures de débit et des paramètres physico-chimiques et la pérennisation de ces stations de mesure sur le long terme afin de préciser les bilans hydrologiques établis et d'évaluer les effets du changement climatique sur les ressources en eau souterraine du Causse Noir ;
- l'identification de l'origine des apports (voire des pertes) sur la rivière du Tarn, au droit du tronçon ciblé à partir des premières mesures de débit réalisées en 2011 et 2017. De nouvelles mesures de débit, plus resserrées sur ce tronçon, couplées à des mesures de conductivité et température (à réaliser sur la rivière à l'aide d'une embarcation) permettraient d'identifier des apports. Dans le cas où l'arrivée d'eaux souterraines devait être mise en évidence, les bassins d'alimentation de la partie ouest du Causse Noir devront être révisés ;
- la réalisation de nouveaux traçages au droit des zones 1, 2 et 5 définies précédemment avec la mise en place d'un suivi des sources sur plusieurs mois voire 1 année entière. En effet, il existe une possibilité que l'apparition des traceurs n'ait pas été observée durant la période retenue dans le cadre de l'étude (1 à 1,5 mois) ;
- la mise en œuvre d'investigations complémentaires (suivis physico-chimiques en continu et traçages colorés à minima) sur le Causse Bégon dont le fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique n'a pas pu être défini de manière précise ;
- la datation des eaux de certaines sources, issues des systèmes les moins fonctionnels, à partir de la méthode CFC-SF6. Cela permettrait d'obtenir un ordre de grandeur des temps de transferts au sein de ces aquifères et de comprendre l'absence de restitution lors des opérations de traçages de 2017 et 2018 (zone 1) ;
- l'homogénéisation de l'évaluation de la vulnérabilité des systèmes aquifères à l'échelle des Grands Causses à partir de la mise en œuvre d'études géomorphologiques similaires à celle réalisée sur le Causse Noir. Ce type d'étude amène un nouvel éclairage sur les modalités d'infiltration des eaux de surface à la surface des causses, paramètre primordial dans la dynamique et le fonctionnement des systèmes aquifères du secteur.

D'un point de vue géomorphologique, la présente étude correspond à une phase d'identification, elle demanderait des compléments et des approfondissements concernant les sujets abordés en priorité. D'un point de vue opérationnel il faudrait procéder à l'établissement de cartes à une échelle plus grande, mieux adaptée à la gestion des territoires karstiques et à la prise de décision.

En effet, l'essentiel de ces résultats est destiné à caractériser la vulnérabilité karstique du Causse Noir, à évaluer les ressources en eaux et identifier le patrimoine naturel des sites karstiques du massif. Mais, ils doivent être complétés par des observations dans plusieurs



domaines. Le principal de ces domaines est le milieu souterrain qui n'a été que très légèrement abordé dans cette étude grâce à la connaissance antérieurement acquise. Une étude complémentaire sur les formes et les formations souterraines s'impose pour mener ce genre d'étude à terme, qui font particulièrement défaut compte tenu de l'exceptionnel patrimoine souterrain du Causse Noir à propos duquel on se contentera de citer l'Aven Noir.

D'autres sujets d'ordre scientifique demandent des études plus poussées. On pense notamment aux problématiques de datation des remplissages karstiques et à l'étude des processus d'incision des vallées. Ces thèmes sont abordés depuis longtemps dans la vallée du Tarn, mais ils bénéficient depuis peu d'innovations techniques qui permettraient de réviser ou d'affiner les résultats obtenus dans le passé. Les derniers résultats concluants dans les vallées de la Jonte et du Tarn restent encore à être replacés dans leur contexte géologique et géomorphologique. Evidemment, comme pour l'étude de l'endokarst, le canyon du Trévezel est un des enjeux majeurs de cette problématique.

Enfin, un grand nombre de déterminations réalisées lors de ce travail mériterait, d'ores et déjà, des analyses minéralogiques ou géochimiques afin de les confirmer. Plusieurs de ces analyses pourraient révéler des observations de première main ou compléter utilement la connaissance géologique des karsts caussenards, on pense ici à la détermination faunistique des grès du Crétacé et des laminites intra-bréchiques, ou encore à l'analyse des ciments des brèches d'altération, ainsi qu'à l'étude d'un nouveau maar à étudier.

Les résultats obtenus dans le cadre de l'étude du Causse Noir et leurs apports en termes de vulnérabilité des eaux d'infiltration et de la ressource ouvrent des perspectives sur les approches karstologiques intégrées qui peuvent prendre en compte les données de l'endokarst et des zones capacitives (fantômes, brèches karstiques, altérites) et le contrôle hydrodynamique des niveaux de base au cours de la structuration des aquifères karstiques.

Par ailleurs, l'aspect novateur d'une partie de ces résultats, tant en ce qui concerne l'extension de la zone d'étude dont une grande partie n'a fait l'objet que de très rares investigations, qu'en ce qui concerne les phénomènes karstiques et la méthodologie d'investigation mise en œuvre, mettent en évidence la nécessité de réviser les données acquises ailleurs et de passer à une synthèse sur les Grands Causses.



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.






anteagroup®
