



Parc national
des Cévennes



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Étude hydrogéologique du Causse Méjean

Rapport de synthèse

BRGM/RP-70405-FR

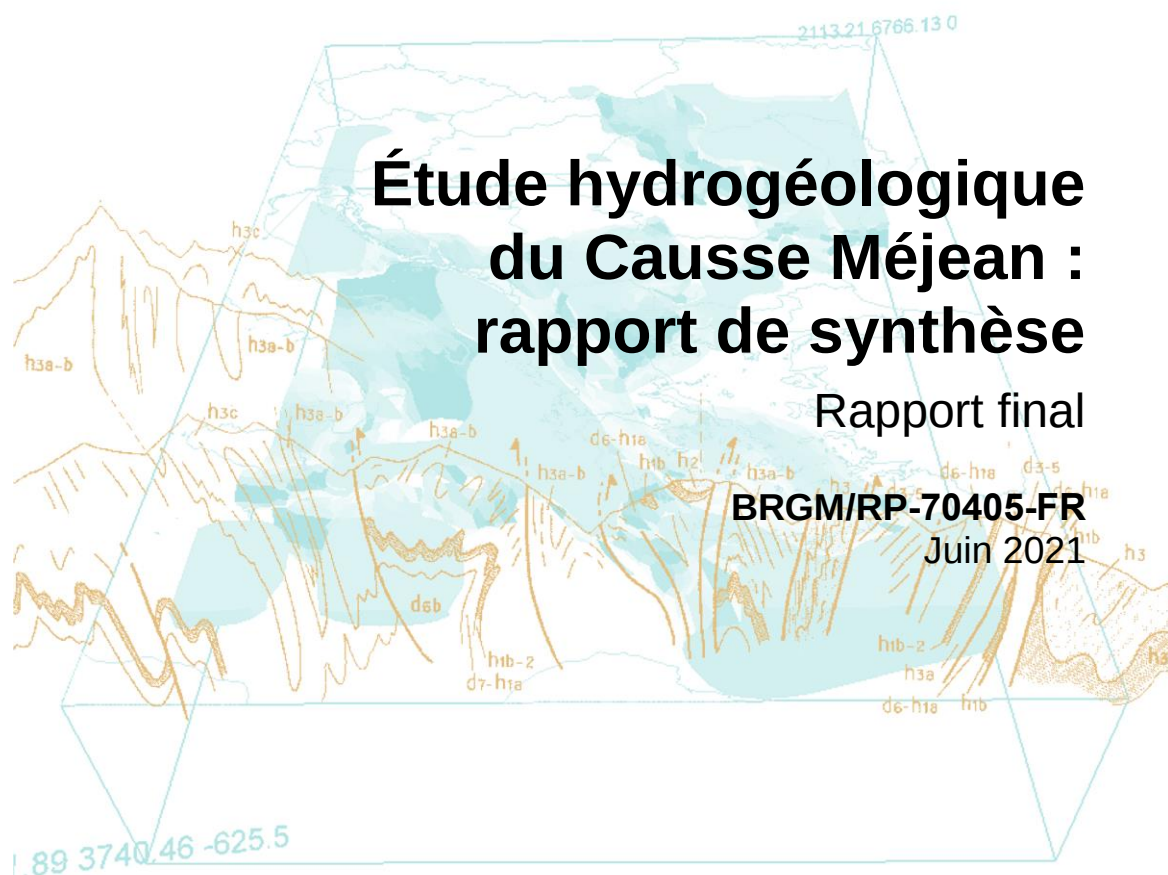
Juin 2021



La Région
Occitanie
Pyrénées - Méditerranée



Document public



Étude hydrogéologique du Causse Méjean : rapport de synthèse

Rapport final

BRGM/RP-70405-FR

Juin 2021

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

V. Bailly Comte

Avec la collaboration de

**C. Lamotte, Y. Manche, E. Husson, H. Camus, E. Le Goff, C. Ariagno, A. Jacquet
et A. Soullignac**

Vérificateur :

Nom : B. Ladouche

Fonction : Hydrogéochimiste

Date : 22/01/2021

Signature :



Approbateur :

Nom : A. Blum

Fonction : Directrice régionale
Occitanie

Date : 26/01/2021

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

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

Bailly Comte V. (2021) - Étude hydrogéologique du Causse Méjean : rapport de synthèse. Rapport final. BRGM/RP-70405-FR, 56 p., 26 fig., 11 tabl.

Sommaire

1. Contexte et objectifs de l'étude.....	11
2. Étude géologique, géomorphologique et karstologique du Causse Méjean	13
2.1. ÉTUDE GÉOLOGIQUE.....	13
2.2. ÉTUDE GÉOMORPHOLOGIQUE ET KARSTOLOGIQUE.....	17
3. Étude hydrogéologique	23
3.1. MISE EN PLACE D'UN RÉSEAU DE SUIVI QUANTITATIF : DESCRIPTION DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES ET CLIMATIQUES.....	23
3.1.1. Sélection et aménagements des stations hydrométriques.....	23
3.1.2. Données climatiques.....	24
3.2. RÉSEAU DE SUIVI QUALITÉ : SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE, FLUORESCENCE ET TURBIDITÉ	25
4. Étude hydrodynamique.....	27
4.1. OBJECTIFS ET MÉTHODES MISES EN ŒUVRE	27
4.2. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE.....	27
5. Étude hydrochimique et traçage naturel	29
5.1. MÉTHODE MISE EN ŒUVRE	29
5.2. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE HYDROCHIMIQUE.....	30
6. Tracage artificiel.....	33
7. Synthèse des résultats pour la délimitation des bassins d'alimentation des sources du Causse Méjean et la définition des potentialités aquifères	39
7.1. DÉLIMITATION DES BASSINS D'ALIMENTATION.....	39
7.2. CARTE DE SYNTHÈSE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS DU CAUSSE MÉJEAN	40
7.3. POTENTIALITÉS AQUIFÈRES DU CAUSSE MÉJEAN.....	42
7.3.1. Méthode.....	42
7.3.2. Résultat	42
7.3.3. Interprétation et discussion	43
8. Risque de pollution de la ressource en eau karstique	45
8.1. VULNÉRABILITE INTRINSÈQUE À LA POLLUTION (MÉTHODE PaPRIKa).....	45
8.2. PRESSIONS ANTHROPIQUES.....	47

8.3. CROISEMENT VULNÉRABILITE/PRESSION/ÉTAT QUALITATIF	47
8.3.1. Activités agricoles	47
8.3.2. Transport	49
8.3.3. Assainissement.....	50
8.3.4. Synthèse des risques de pollution de la ressource en eau par système karstique	50
9. Perspectives	55
9.1. RÉSEAU DE MESURE	55
9.2. ANALYSES HYDROCHIMIQUES	55
9.3. TRAÇAGES	55
9.4. MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D	56

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation des Grands-Causses, du territoire du PnC et du Causse Méjean sur le fond géologique du BRGM au 1/1 000 000.....	11
Figure 2 : Le Causse Méjean avec ses sources principales.....	12
Figure 3 : Logs hydrogéologiques synthétiques réalisés à proximité de la source de l'Ironselle, (gorges du Tarn), aux arcades de Bergers (gorges de la Jonte) et au sud de Florac (Tarnon).	13
Figure 4 : Localisation des sources (cercles verts) ayant fait l'objet d'une reconnaissance de terrain. La position de l'exurgence dans le log stratigraphique, pour chaque source, est indiquée par une couleur différente marquant l'âge des terrains.....	14
Figure 5 : (a) Cascade de la source du Moulin de Pelatan. L'eau ruisselle sur les formations de travertin et (b) sortie d'eau annexe, proche de la grotte et de la source captée. Des faciès de calcaire mudstone ont été retrouvés à la base du conduit. Photos : Coline Ariagno.	14
Figure 6 : Schéma structural du Causse Méjean. Cinq groupes structuraux se distinguent : la faille de la Parade (rouge), les failles majeures est-ouest (rose), le faisceau de Meyrueis (orange), le faisceau de Montmirat (vert), et des failles annexes du faisceau du Rozier (jaune). Les directions de mouvements ainsi que certaines structures importantes sont également représentées.	15
Figure 7 : (a) Localisation de la source de l'Ironselle (a) sur la carte géologique (b) et coupe géologique est-ouest.....	15
Figure 8 : Carte de l'altitude du toit du Bathonien interpolée. Elle met en évidence des zones topographiquement hautes et basses et un gradient topographique (flèche rouge) du sud-est vers le nord-ouest.	16
Figure 9 : Topographie du toit du socle interpolée avec localisation des sources du Pêcher et de Clauzel référencées par Rouquet ainsi que la source de Vebron non référencée.	16
Figure 10 : Structures ruiniformes de Nîmes-le-Vieux	17
Figure 11 : Carte des « formes karstiques et formations superficielles » du Causse Méjean.....	19
Figure 12 : Évolution géodynamique et karstique du Causse Méjean (extrait du bulletin n°6)	20
Figure 13 : Carte des modalités d'infiltration issue de l'étude des formations superficielles	21
Figure 14 : Points de suivis météorologiques, hydrodynamiques et physico-chimiques pour l'étude hydrogéologique du Causse Méjean (fond OpenTopoMap).....	23

Figure 15 : Relève des données à la source de Castelbouc n°1 – la sonde de mesure de niveau, température et conductivité et le fluorimètre sont logées dans le tube PVC fixé à la paroi (photo de gauche) – Tube contenant la sonde de mesure de pression absolue et conductivité/température dans le plan d'eau du siphon en amont de la source de l'Ironselle (photo de droite)– Crochet Ph.	24
Figure 16 : Carte de synthèse des résultats de l'étude hydrodynamique	28
Figure 17 : Carte de localisation des différents points de prélèvements selon le type d'analyse ou l'origine de la donnée, reportée sur le fond OpenTopoMap	30
Figure 18 : Injection du traceur à -400m, aven de la Cheminée (T2a)	33
Figure 19 : Dispositif mis en place pour le traçage de l'aven Armand depuis la plateforme (T13) – Ph Crochet	34
Figure 20 : Carte des relations hydrauliques mise en évidence par traçage avec report des traçages antérieurs sélectionnés et des points d'injection n'ayant pas donné lieu à une restitution – coordonnées en Lambert 93	37
Figure 21 : Carte des bassins d'alimentation des systèmes karstiques drainant le Causse Méjean – coordonnées en Lambert 93	39
Figure 22 : Carte de synthèse des écoulements souterrains du Causse Méjean sur le fond géologique harmonisé au 1/50 000 du BRGM – coordonnées en Lambert 93	41
Figure 23 : Analyse cartographique des potentialités aquifères du Causse Méjean	43
Figure 24 : Carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource karstique du Causse Méjean.....	46
Figure 25 : Cartographie du risque de pollution de la ressource en eau souterraine lié aux activités agricoles	48
Figure 26 : Report des principales routes sur la carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique, zoom sur 3 secteurs de la zone d'étude – A : Montbrun, B : Florac et C : Ravin des Bastides.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau de synthèse des principaux résultats apportés par chaque traceur naturel lors de l'étude hydrochimique	32
Tableau 2 : Liste des traçages réalisés dans le cadre de l'étude	35
Tableau 3 : Résultats des traçages, information relative à la restitution (R : % de restitution)	36
Tableau 4 : Définition du risque de pollution à l'échelle des systèmes karstiques par le croisement de la vulnérabilité intrinsèque et des pressions	50
Tableau 5 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique du Pêcher	51
Tableau 6 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique du Moulin de Pélatan	51
Tableau 7 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de Castelbouc (captage des Estivants)	51
Tableau 8 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de Saint-Chély/Cénarette.....	52
Tableau 9 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique des Ardennes	52
Tableau 10 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de l'Ironselle	53
Tableau 11 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique des Douzes/Maynial (captage des Douzes)	53

1. Contexte et objectifs de l'étude

Les besoins en eau, nécessaire à de multiples usages, sont en augmentation sur le territoire du PnC. La mise en place d'une gestion équilibrée des ressources en eau et de leur qualité est un enjeu fort ces prochaines années qui suppose une meilleure connaissance des eaux souterraines (Figure 1 et Figure 2). Ainsi, le PnC et le BRGM se sont associés à travers une convention de partenariat pour améliorer les connaissances sur les eaux souterraines du Causse Méjean. Une convention de partenariat associe le Parc national, le BRGM et le Comité Départemental de Spéléologie de la Lozère afin que ces derniers soient également des acteurs impliqués dans l'étude et assistent le PnC et le BRGM dans la réalisation des traçages en souterrain.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

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

Ce rapport constitue une synthèse de l'étude menée sur 4 ans (2016 – 2020), qui a donné lieu à un premier rapport BRGM RP-68189-FR dédié à l'étude géologique et la karstogenèse, ainsi qu'à un second, BRGM RP-70327-FR, consacré aux résultats des études hydrodynamiques, hydrochimiques, de traçages artificiels et d'analyse du risque de contamination de la ressource.

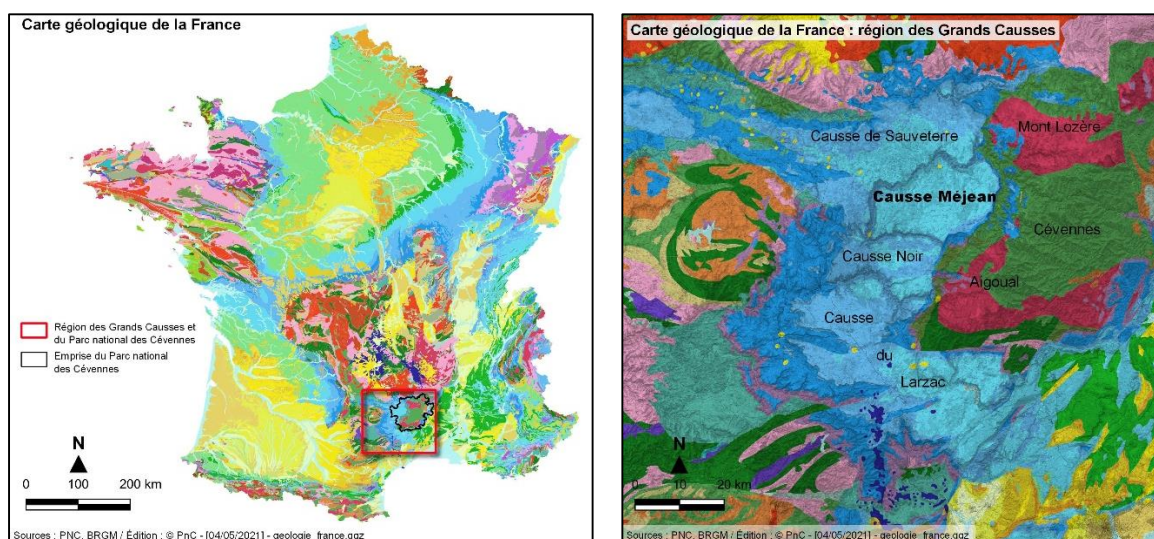


Figure 1 : Carte de localisation des Grands-Causses, du territoire du PnC et du Causse Méjean sur le fond géologique du BRGM au 1/1 000 000.



Figure 2 : Le Causse Méjean avec ses sources principales.

2. Étude géologique, géomorphologique et karstologique du Causse Méjean

Axées sur une meilleure compréhension de l'hydrogéologie du Causse Méjean, ces études amènent des informations capitales pour la compréhension des systèmes karstiques et leur fonctionnement hydrodynamique.

2.1. ÉTUDE GÉOLOGIQUE

L'étude géologique s'est focalisée sur la géométrie des réservoirs aquifères. À l'échelle du Causse Méjean, on s'est attaché à réaliser des logs synthétiques le long du Tarn, du Tarnon et de la Jonte et à y positionner les principales sources afin de mettre en évidence les formations géologiques imperméables et semi-perméables constituant potentiellement des barrières aux écoulements, permettant ainsi de caractériser les différents réservoirs karstiques (Figure 3).

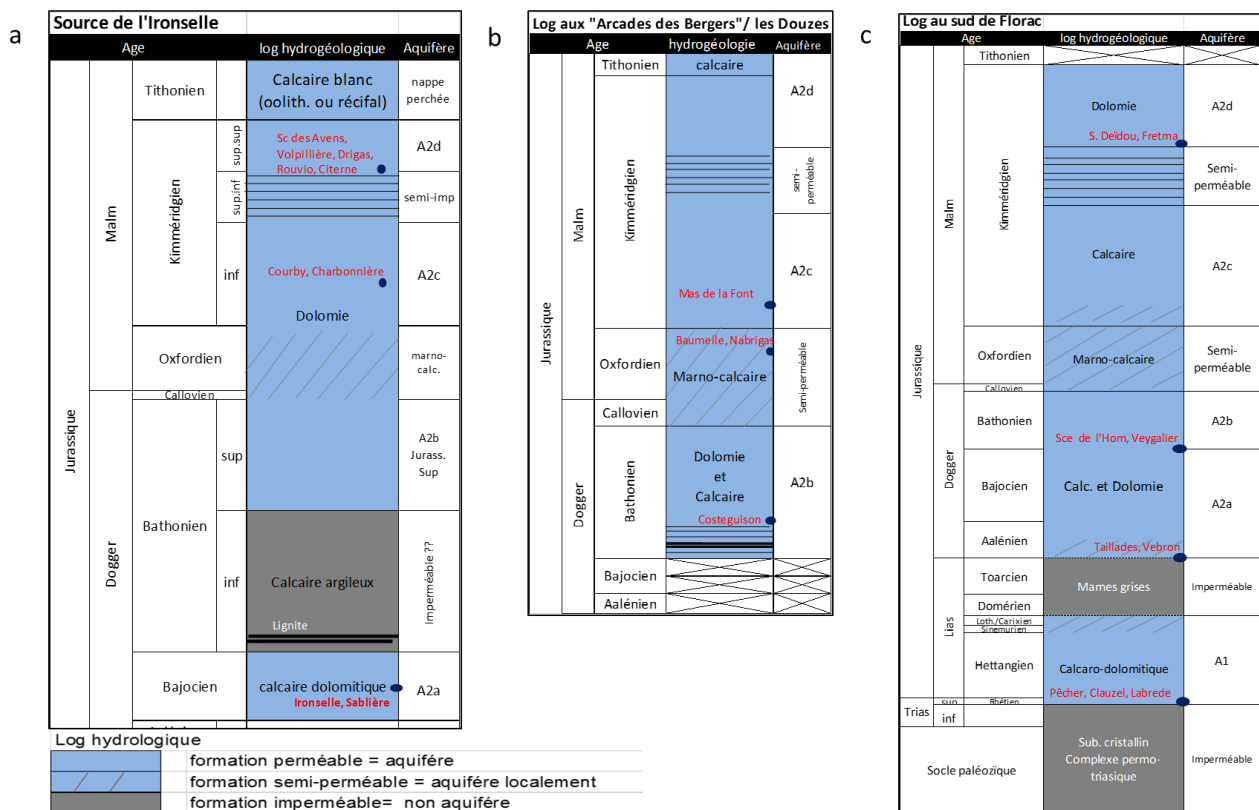


Figure 3 : Logs hydrogéologiques synthétiques réalisés à proximité de la source de l'Ironselle, (gorges du Tarn), aux arcades de Bergers (gorges de la Jonte) et au sud de Florac (Tarnon).

Des reconnaissances de terrain ont permis de préciser le contexte géologique d'émergence des sources étudiées (Figure 4 et Figure 5).

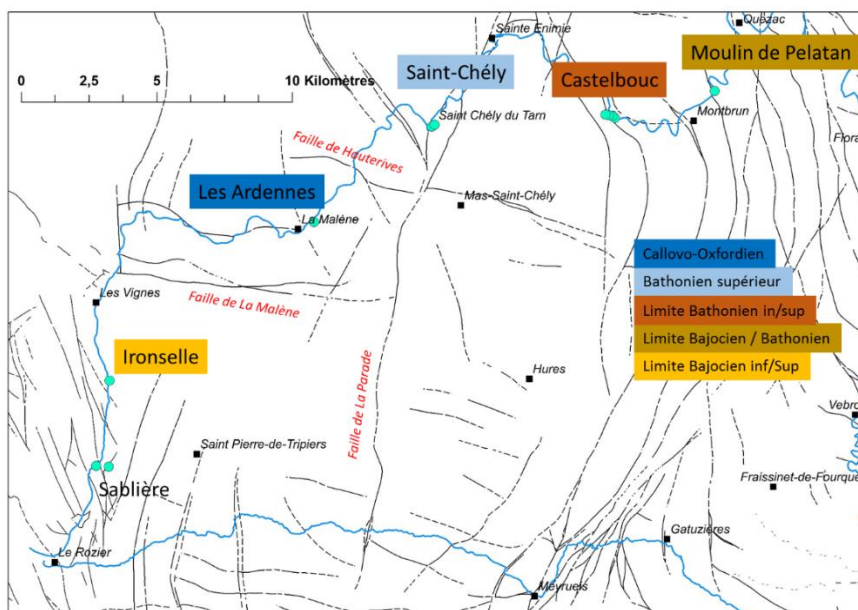


Figure 4 : Localisation des sources (cercles verts) ayant fait l'objet d'une reconnaissance de terrain. La position de l'exsurgence dans le log stratigraphique, pour chaque source, est indiquée par une couleur différente marquant l'âge des terrains.



Figure 5 : (a) Cascade de la source du Moulin de Pelatan. L'eau ruisselle sur les formations de travertin et (b) sortie d'eau annexe, proche de la grotte et de la source captée. Des faciès de calcaire mudstone ont été retrouvés à la base du conduit. Photos : Coline Ariagno.

Ce travail a été complété par l'observation et l'étude des failles qui modifient la géométrie des réservoirs (Figure 6). Il met en évidence une compartimentation des réservoirs associée au faisceau de Meyrueis et en particulier la faille reliant Meyrueis à Quézac qui abaisse d'environ 300 m le compartiment ouest. Elle est associée à la faille de la Parade de même cinématique dont le jeu n'a pu être estimé. Les failles normales est-ouest du Pas-de-Souci et de Hauterives abaissent tout le secteur compris entre le cirque de Pugnadoires et la Malène qui correspond à un graben.

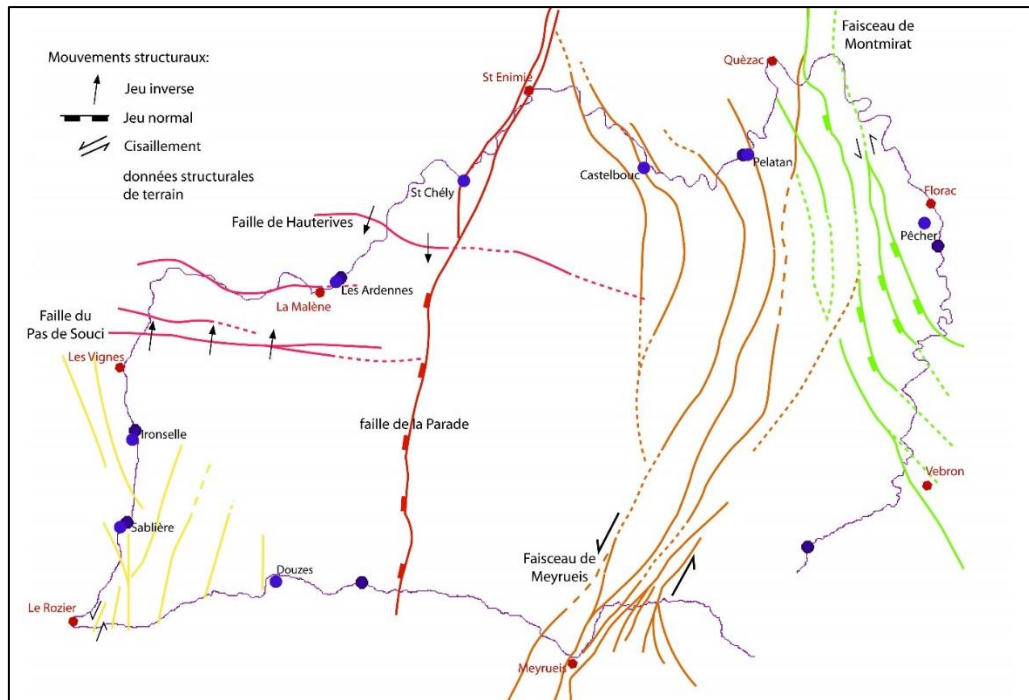


Figure 6 : Schéma structural du Causse Méjean. Cinq groupes structuraux se distinguent : la faille de la Parade (rouge), les failles majeures est-ouest (rose), le faisceau de Meyrueis (orange), le faisceau de Montmirat (vert), et des failles annexes du faisceau du Rozier (jaune). Les directions de mouvements ainsi que certaines structures importantes sont également représentées.

Des coupes synthétiques à l'échelle du Causse et à l'échelle des principales sources ont été proposées (Figure 7).

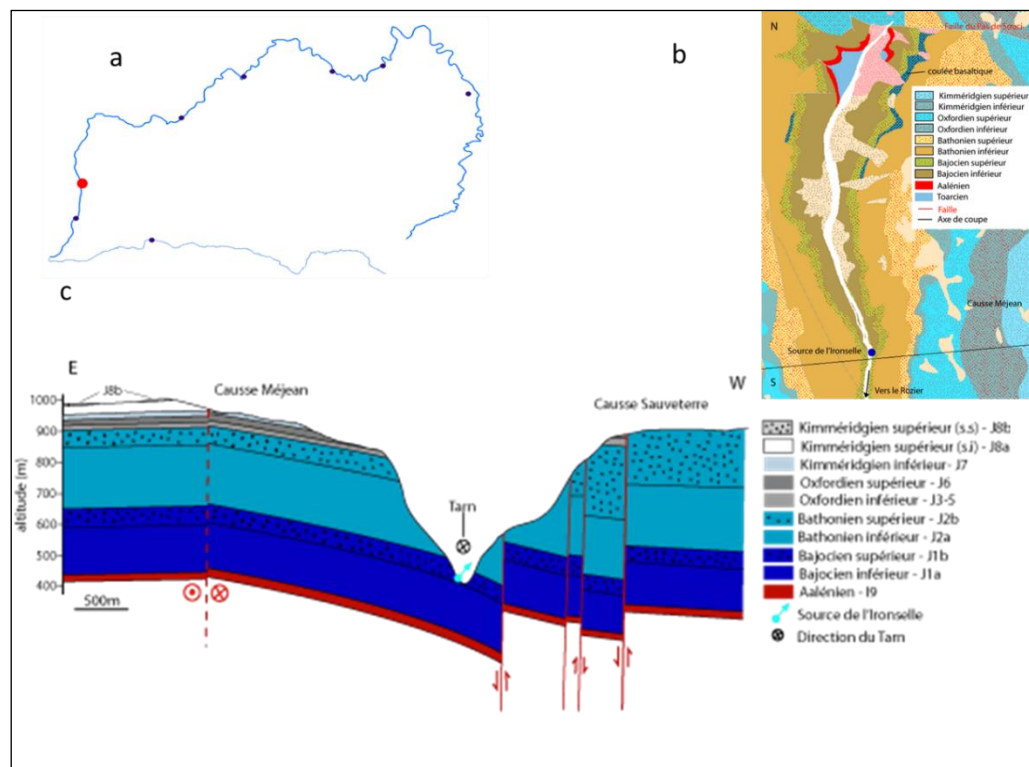


Figure 7 : (a) Localisation de la source de l'Ironselle (a) sur la carte géologique (b) et coupe géologique est-ouest.

La cartographie du toit ou mur de certaines formations clés (Figure 8) et les profils réalisés le long du Tarn, de la Jonte et du Tarnon mettent en évidence des zones topographiquement basses, des gradients topographiques et hydrauliques qui apportent un éclairage nouveau pour la compréhension des circulations souterraines jusqu'aux exutoires, validée par les résultats issus des campagnes de traçage.

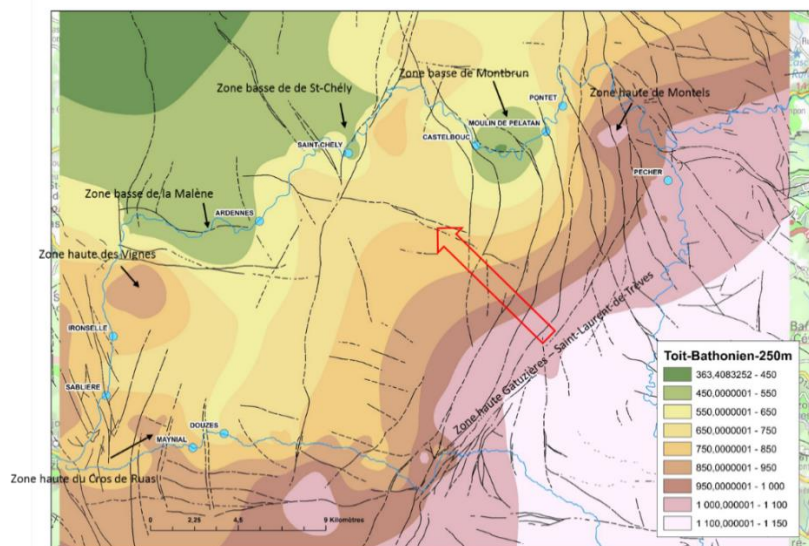


Figure 8 : Carte de l'altitude du toit du Bathonien interpolée. Elle met en évidence des zones topographiquement hautes et basses et un gradient topographique (flèche rouge) du sud-est vers le nord-ouest.

Pour l'aquifère inférieur de l'Hettangien, la cartographie du toit du socle imperméable et le profil du Tarnon soulignent des gradients topographiques du sud-ouest vers le nord-est, de Gatuzières à Florac (Figure 9). On note également un gradient nord-sud depuis le Fayet jusqu'à Florac. En outre, la topographie du toit du socle met en évidence l'enracinement des failles du Causse Méjean dans le socle des Cévennes.

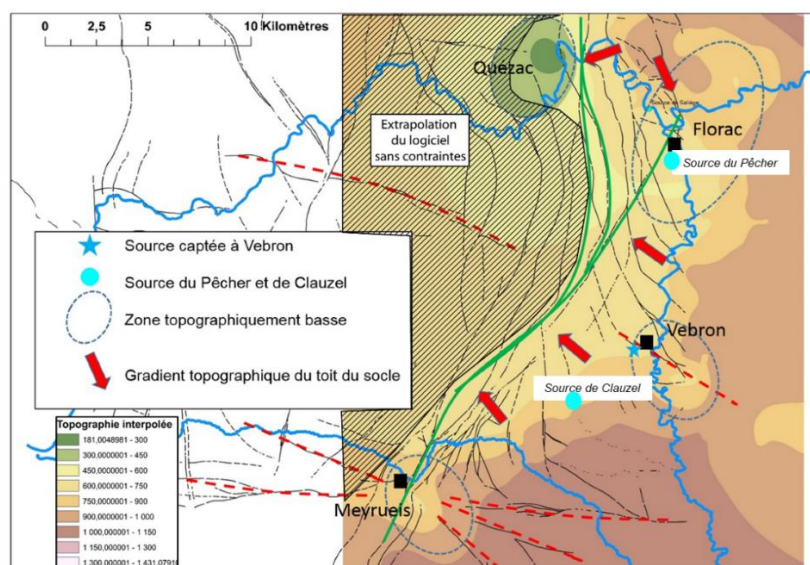


Figure 9 : Topographie du toit du socle interpolée avec localisation des sources du Pêcher et de Clauzel référencées par Rouquet ainsi que la source de Vebron non référencée.

Ainsi, grâce à l'étude géologique, le contexte d'émergence des sources a pu être précisé. Les sources Pelatan, Castelbouc, Saint-Chély et Ironselle émergent dans le Dogger tandis que celle des Ardennes émerge dans un niveau stratigraphique supérieur (Callovo-Oxfordien). La localisation stratigraphique de la Source des Ardennes s'explique par les jeux de deux familles de failles normales, l'une de direction Est-Ouest (failles de Hauterives et de la Malène abaissant le secteur des Ardennes), l'autre Nord-Sud (faille de la Parade abaissant le compartiment ouest du Causse).

2.2. ÉTUDE GÉOMORPHOLOGIQUE ET KARSTOLOGIQUE

L'étude géomorphologique et karstologique s'est concentrée sur l'analyse cartographique de la surface du Causse. Elle s'est intéressée à la détermination des formations superficielles et à la reconnaissance des différentes morphologies karstiques.

Concernant les formations superficielles, il s'agit d'une véritable mise à jour, puisque le seul document de cartographie géologique existant sur le Causse Méjean demeure la carte géologique (au 1/50 000 - harmonisée ou non) prenant peu en compte les formations superficielles, regroupées en « Terre des Causses » et datées du Quaternaire. Notre étude montre qu'au contraire, ces formations superficielles sont les résidus d'anciennes couvertures qui ont recouvert successivement le Causse Méjean depuis le Crétacé inférieur avec parfois des épaisseurs conséquentes. On citera notamment l'épisode des bauxites, les grès marins du Crétacé supérieur, les remplissages karstiques marins du Paléocène, les épandages détritiques venant du Massif Central au cours de l'Éocène, et enfin, les premiers cortèges cévenols provenant de l'Aigoual au Miocène.

Les formations post-jurassiques altérées puis érodées au fil du temps ont modelé les formations carbonatées jurassiques sous couverture, leur permettant en particulier d'acquérir des morphologies karstiques. En surface du Causse, on retrouve encore la trace de ces évolutions sous couverture, laissant des géomorphologies typiques et caractéristiques comme des ruiniformes (Figure 10), des couloirs, des vallons perchés et déconnectés de leurs anciens amonts fluviaux, des paléokarsts ...

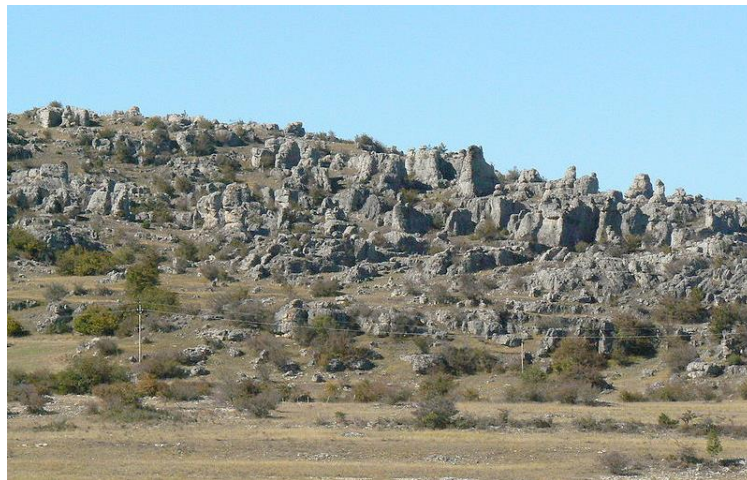


Figure 10 : Structures ruiniformes de Nîmes-le-Vieux.

Il en résulte une carte des « formes karstiques et formations superficielles » qui fait la synthèse des observations de terrain et de l'interprétation qui en est faite (Figure 11). À partir de cette carte, il nous est possible de reconstituer l'évolution géodynamique et karstique du Causse Méjean (Figure 12).

Plusieurs phases de karstification majeures à l'origine de la structuration du réservoir ont été repérées et le rôle des couvertures sur la recharge de l'aquifère a été mis en évidence. Sont distinguées trois grandes phases majeures de structuration karstique :

- une première organisation profonde et une pré-structuration du réservoir se sont développées au sein du substratum carbonaté jurassique au cours du Crétacé et début du Paléogène. Elles ont été acquises par crypto-karstification et fantômisation alors que le massif était recouvert par une couverture principalement constituée de sédiments d'âge Crétacé à Paléocène soumise à de fortes altérations ;
- une deuxième phase majeure s'opère lors des évènements tectoniques polyphasés (pyrénéens à oligocènes) provoquant l'érosion et le retrait de ces anciennes couvertures et permettant la mise en place de grandes surfaces d'aplanissement (*poljés**). Celles-ci vont s'emboîter les unes dans les autres au fur et à mesure des variations du niveau de base. Lors de cette période charnière, les écoulements vont progressivement passer d'une circulation aérienne sur la couverture, à une circulation souterraine lors de son décapage ;
- les derniers évènements majeurs structurants correspondent aux incisions du Tarn, de la Jonte et du Tarnon qui vont modifier les chemins de drainage « historiques ». Le Tarn, premier canyon à se former, est le plus structurant, suivi par la paléo-Jonte qui peu à peu capture la partie sud-ouest du Causse. Enfin, l'incision du Tarnon a permis l'émergence de la source du Pêcher. C'est durant cette troisième phase que se soulève le massif cévenol et s'acquièrent les paléotopographies des formations jurassiques avec un gradient orienté nord-ouest – sud-est.

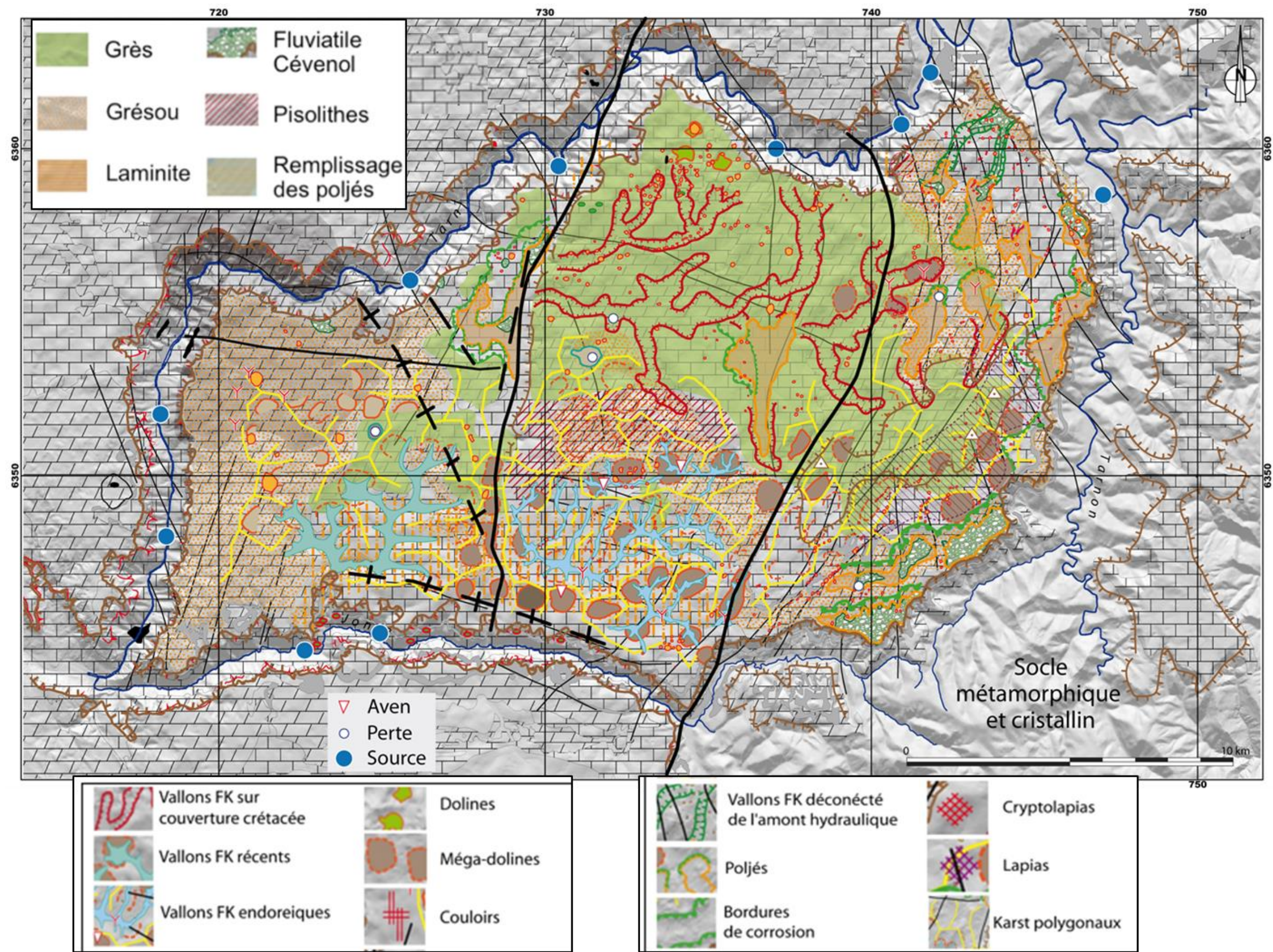


Figure 11 : Carte des « formes karstiques et formations superficielles » du Causse Méjean.

Chronique de la genèse des paysages caussenards

Au Crétacé inférieur (-140 Ma), la région sort des mers sous l'effet d'un soulèvement général qui provoque l'érosion et l'altération des terrains se retrouvant hors d'eau. Sur le calcaire jurassique se dépose une formation issue de cette altération, la bauxite, sous laquelle les carbonates sont altérés et karstifiés. Cette première phase d'érosion souterraine marque le début du façonnage des formes que nous connaissons aujourd'hui (voir bulletin 7). En surface, avec l'altération, s'installent des « karst à butte », un paysage typique de petits dômes séparés par des dépressions fermées. On retrouve actuellement sur plusieurs causses des résidus de bauxite au fond de ces anciennes dépressions.

Au Crétacé supérieur et au Paléocène (-80 à -60 Ma), la mer revient et se retire plusieurs fois. A chaque retrait, l'érosion et la karstification reprennent, puis lorsque la mer revient, elle fige les formes, dépose des sédiments dans les cavités karstiques et les dépressions du paysage, et finalement une épaisse couverture de sédiments dont de nombreux témoins nous sont parvenus comme des formations superficielles.

La mer quitte définitivement la région au début du Tertiaire (-60 Ma). Des dynamiques continentales prennent alors le dessus avec l'altération des couvertures sédimentaires précédemment déposées. L'altération et l'érosion de ces couches donnent un cortège « sidérolithique » (riche en fer) de formations superficielles. Ce cortège est progressivement érodé et transporté par les cours d'eau qui s'écoulent à la surface des causses, formant des petits vallons aujourd'hui complètement secs comme par exemple au-dessus du ravin des Bastides. D'autre part, la formation de la chaîne pyrénéenne dont les contraintes tectoniques se font ressentir jusque dans la région provoque des déformations et des ondulations à la surface des Grands Causses. Les cours d'eau se concentrent alors dans les creux et les bosses sont décapées par l'érosion, mettant à nu les calcaires du Jurassique.

Autour de -25 Ma, la région est bouleversée par l'ouverture de la Méditerranée. Le massif des Cévennes constitue désormais un point haut et est peu à peu érodé jusqu'à son socle composé de granite et de schiste. Les écoulements se mettent en place de part et d'autre de cette nouvelle limite de partage des eaux entre Atlantique et Méditerranée. Côté Atlantique, le causse Méjean se retrouve alors en position de piémont vis-à-vis de ce qui deviendra le massif du mont Aigoual. De grandes plaines à fond plat se déploient au contact des Cévennes qui réceptionnent les cours d'eau et leurs sédiments en provenance de ce relief.

Puis, vers -13 Ma, sous l'effet de la poussée alpine, le Massif central et les Cévennes sont soulevés. Les grandes plaines à fond plat sont découpées par de nouvelles vallées qui correspondent aux futurs canyons encadrant le causse Méjean (Tarn et Jonte). En se creusant en dernier, le Tarnon finit de séparer le causse Méjean du massif des Cévennes.

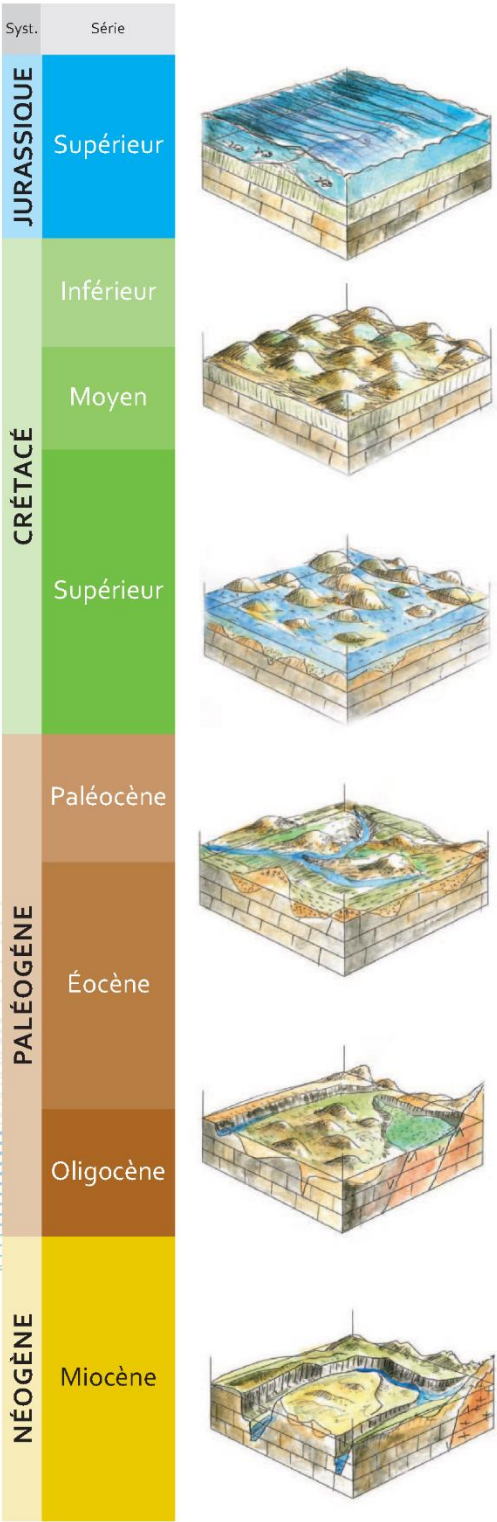


Figure 12 : Évolution géodynamique et karstique du Causse Méjean (extrait du bulletin n°6).

Cette reconstitution couplée à l'histoire géologique constitue le socle de connaissance nécessaire à la compréhension de la mise en place polyphasée du karst et de son fonctionnement actuel sur le Causse Méjean. Cette approche couplée géologie/géomorphologie/karstologie nous permet de mieux contraindre la géométrie des réservoirs, leurs propriétés et leur découpage, ainsi que de mieux comprendre les résultats des traçages.

Une carte des modalités d'infiltration déduite de l'analyse des formations superficielles a également été réalisée pour guider par la suite l'un des éléments clef de l'analyse de la vulnérabilité à la pollution des sources principales du Causse Méjean. Cette carte distingue quatre niveaux de modalités d'infiltration : les formations peu perméables drainées en surface par une perte bien identifiée apparaissent comme « Pertes concentrées » et sont distinguées des formations peu perméables pour lesquels le drainage vers une zone de perte est moins bien organisé (« Peu perméables à concentration rapide »). Les deux autres catégories distinguent les secteurs recouverts par des formations plus perméables et favorables à une recharge répartie à la surface du Causse selon leur capacité à concentrer les écoulements dans la zone d'infiltration.

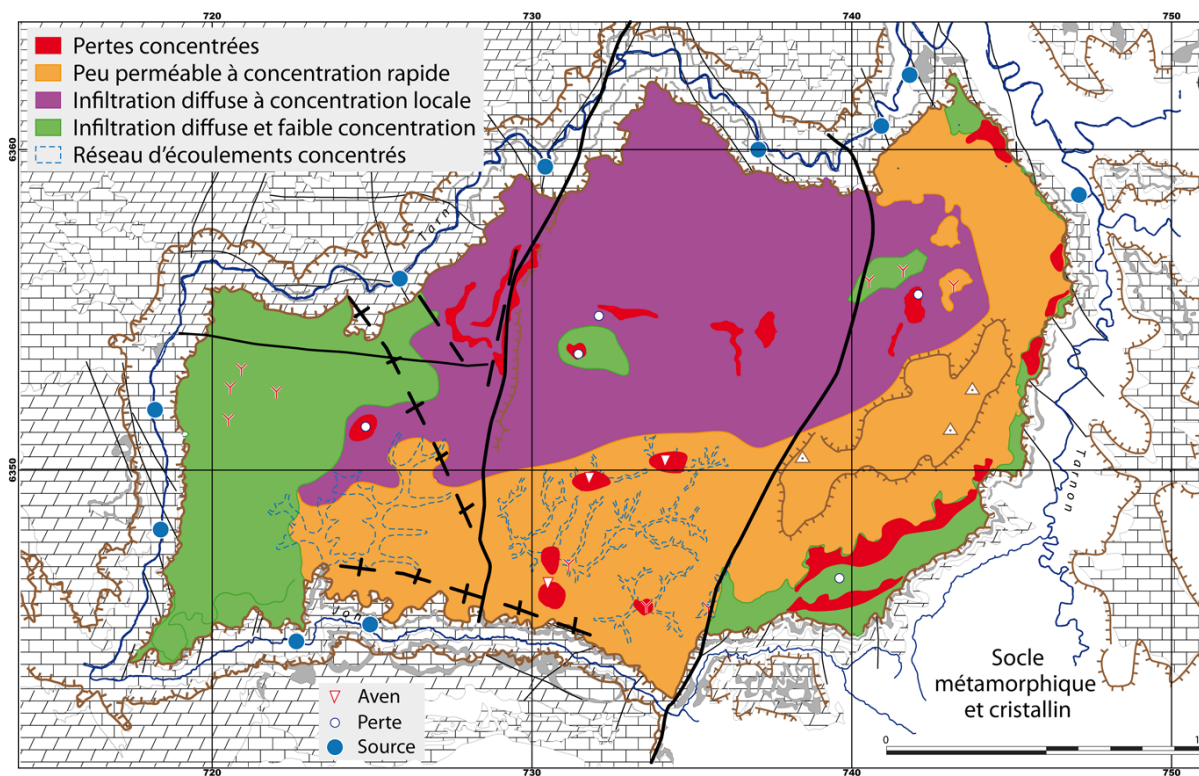


Figure 13 : Carte des modalités d'infiltration issue de l'étude des formations superficielles.

3. Étude hydrogéologique

3.1. MISE EN PLACE D'UN RÉSEAU DE SUIVI QUANTITATIF : DESCRIPTION DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES ET CLIMATIQUES

3.1.1. Sélection et aménagements des stations hydrométriques

La première étape de l'étude hydrodynamique a consisté à sélectionner les sources devant être instrumentées pour un suivi quantitatif (débit) et qualitatif (conductivité, température, turbidité et fluorescence naturelle) à haute fréquence (<15 min) des principaux systèmes karstiques drainant le Causse Méjean sur la durée du projet (Figure 14).

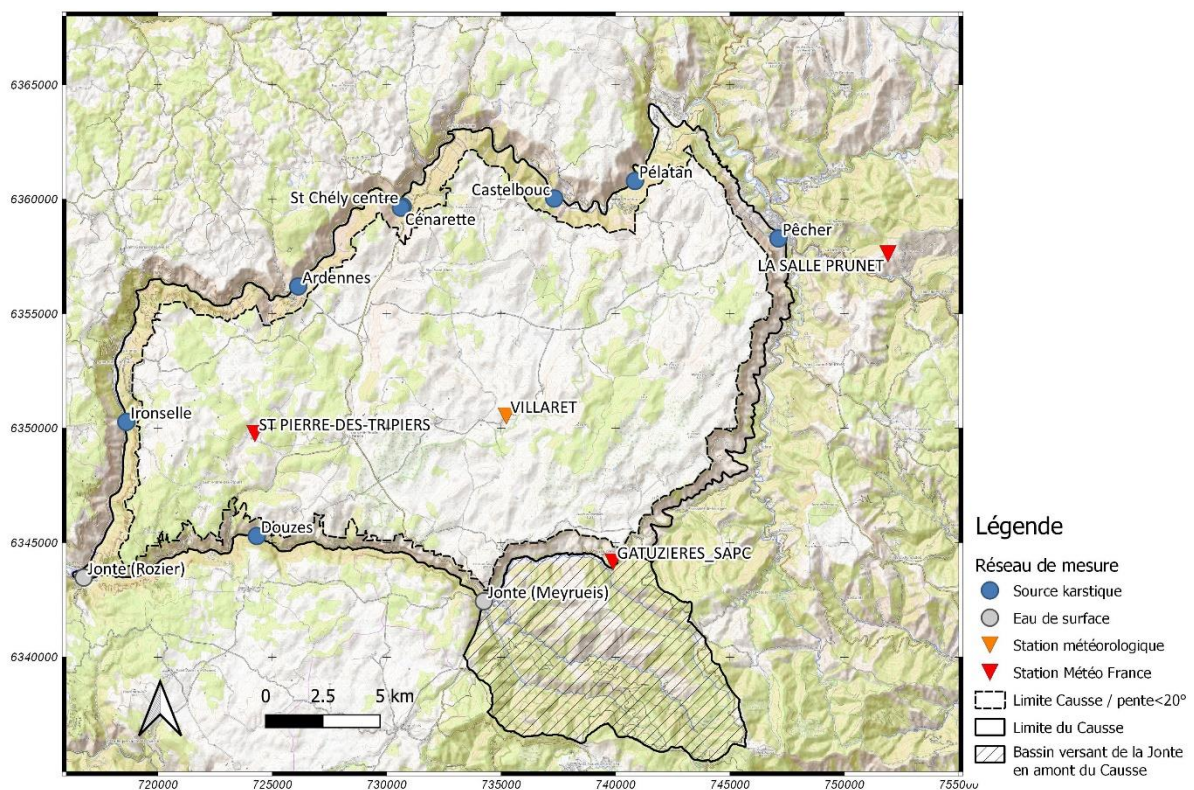


Figure 14 : Points de suivis météorologiques, hydrodynamiques et physico-chimiques pour l'étude hydrogéologique du Causse Méjean (fond OpenTopoMap).

Les études précédentes (Rouquet, 1976 ; Bérard, 1987) et la pré-étude hydrogéologique du Causse Méjean (Bechelen, 2013) ont permis de sélectionner les principaux systèmes karstiques devant faire l'objet d'un suivi quantitatif pour estimer les ressources en eau souterraine du Causse Méjean. Les exutoires associés sont localisés dans les vallées du Tarnon, du Tarn mais aussi de la Jonte. Il s'agit du système karstique du Pêcher, de Castelbouc, de Pélatan, de Saint Chely/Cénarette, des Ardennes, de l'Ironselle (Figure 2). Les hydrogrammes ont été calculés à partir des relations hauteur/débit obtenues par jaugeages ou résultats d'essais de traçage.

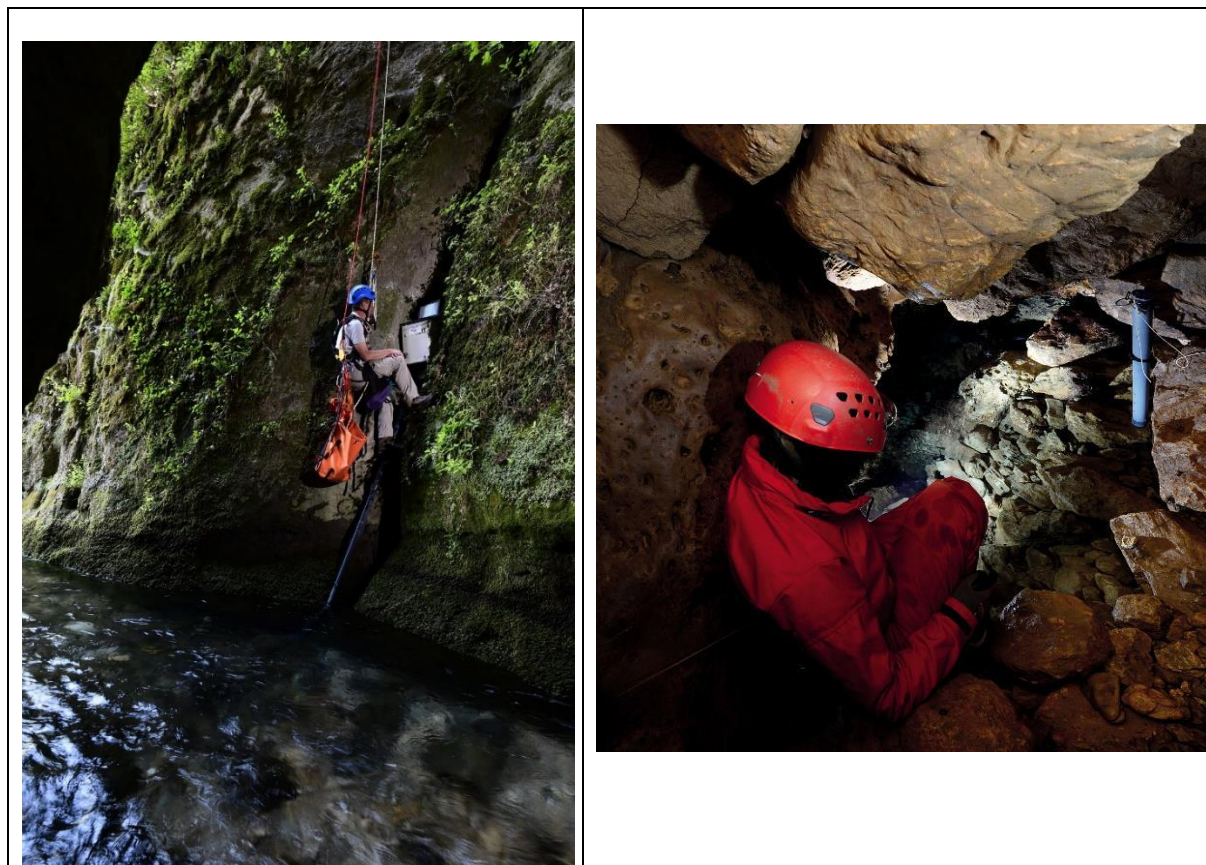


Figure 15 : Relève des données à la source de Castelbouc n° 1 – la sonde de mesure de niveau, température et conductivité et le fluorimètre sont logées dans le tube PVC fixé à la paroi (photo de gauche) – Tube contenant la sonde de mesure de pression absolue et conductivité/température dans le plan d'eau du siphon en amont de la source de l'Ironselle (photo de droite)– Crochet Ph.

Les débits journaliers de la Jonte à la station de Meyrueis fournis par la Banque Hydro (station [O3194010](#)) ont été utilisés pour quantifier les apports non karstiques au débit de la Jonte. Une station complémentaire a été mise en place au niveau du pont du Rozier dans le cadre de ce projet pour estimer le débit de la Jonte à l'aval de toutes les résurgences karstiques. Un suivi de hauteur d'eau a également été mis en place dans la Jonte au niveau d'une sortie d'eau permanente de la résurgence des Douzes.

3.1.2. Données climatiques

Une station météorologique a été mise en place au hameau du Villaret. Cette station permet de suivre le cumul des précipitations, la température, la vitesse du vent et son orientation au pas de 15 min.

Des données de précipitations journalières complémentaires ont été acquises auprès de Météo France du 01 janvier 2017 au 01 janvier 2020 pour les stations de Gatuzières (station # 48069001) et La Salle Prunet (station # 48186001), ainsi que des données de précipitation journalière et d'ETP (grille de 12 km autour du point - [Données Publiques de Météo-France - ETP quotidienne en points de grille \(meteofrance.fr\)](#)) pour la station de Saint-Pierre des Tripiers (station # 48176002) du 01 septembre 2016 au 05 février 2020.

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

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

À l'exception de la source de Saint-Chély Centre, tous les exutoires suivis d'un point de vue quantitatif ont fait l'objet d'un suivi physico-chimique et de fluorescence, incluant une mesure de la turbidité. Les fluorimètres permettent de suivre la fluorescence naturelle de l'eau liée à la présence de matière organique naturellement fluorescente, ainsi que le contenu particulaire par une mesure de la turbidité (Bailly-Comte *et al.*, 2018). Ils permettent également de surveiller la restitution des traceurs artificiels (cf. 6).

Une carte de synthèse des différents suivis mis en place est illustrée en Figure 14.

4. Étude hydrodynamique

4.1. OBJECTIFS ET MÉTHODES MISES EN ŒUVRE

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

Les données obtenues dans le cadre de ce projet (cf. 3.1) ont été analysées dans le but de caractériser le fonctionnement hydrodynamique de chaque système karstique, en lien avec les modalités de recharge, la structure géologique des réservoirs aquifères et l'organisation du drainage karstique. Elles sont également utilisées pour estimer les surfaces des bassins d'alimentation par une approche de bilan hydrologique.

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

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

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

4.2. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE

Les principaux exutoires karstiques suivis permettent de décrire le fonctionnement des systèmes karstiques du Causse Méjean. L'étude de bilan hydrologique sur l'ensemble des systèmes étudiés montre que la recharge à la surface du Causse par les précipitations est largement suffisante pour expliquer les volumes d'eau écoulés par les différents systèmes karstiques étudiés. Une part non négligeable de cette recharge (de l'ordre de 30 %) pourrait concerner les secteurs pour lesquels le devenir des eaux infiltrées n'a pu être déterminé (7.2).

Du point de vue du débit moyen interannuel, les systèmes karstiques des Ardennes et de Castelbouc se démarquent nettement, avec un débit moyen de l'ordre de 1 m³/s. Viennent ensuite la source du Pêcher, puis les autres systèmes de Saint Chély/Cénarette, Pélatan et Ironselle pour les systèmes unaires (impluvium uniquement karstique).

Les volumes dynamiques (c'est-à-dire le volume d'eau maximal stocké dans la zone noyée qui va pouvoir s'écouler à l'exutoire en l'absence de recharge) estimés à partir des courbes de récession attribuent au système des Ardennes un pouvoir régulateur relativement élevé ($k = 0.19$ pour $V_d \sim 6.10^6$ m³), notamment par rapport à Castelbouc ($k = 0.08$ pour $V_d \sim 2.10^6$ m³).

Le système des Ardennes présente donc des réserves bien plus importantes, et constitue ainsi la ressource en eau karstique majeure du Causse Méjean.

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

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

Ces résultats traduisent une logique géographique et géologique d'Est en Ouest représenté sur la carte de la Figure 16, avec un passage progressif des systèmes les plus karstifiés à proximité du contact Cévenol (Pêcher, Pélatan) vers des systèmes peu fonctionnels comblés d'altérites à l'Ouest (Ironselle).

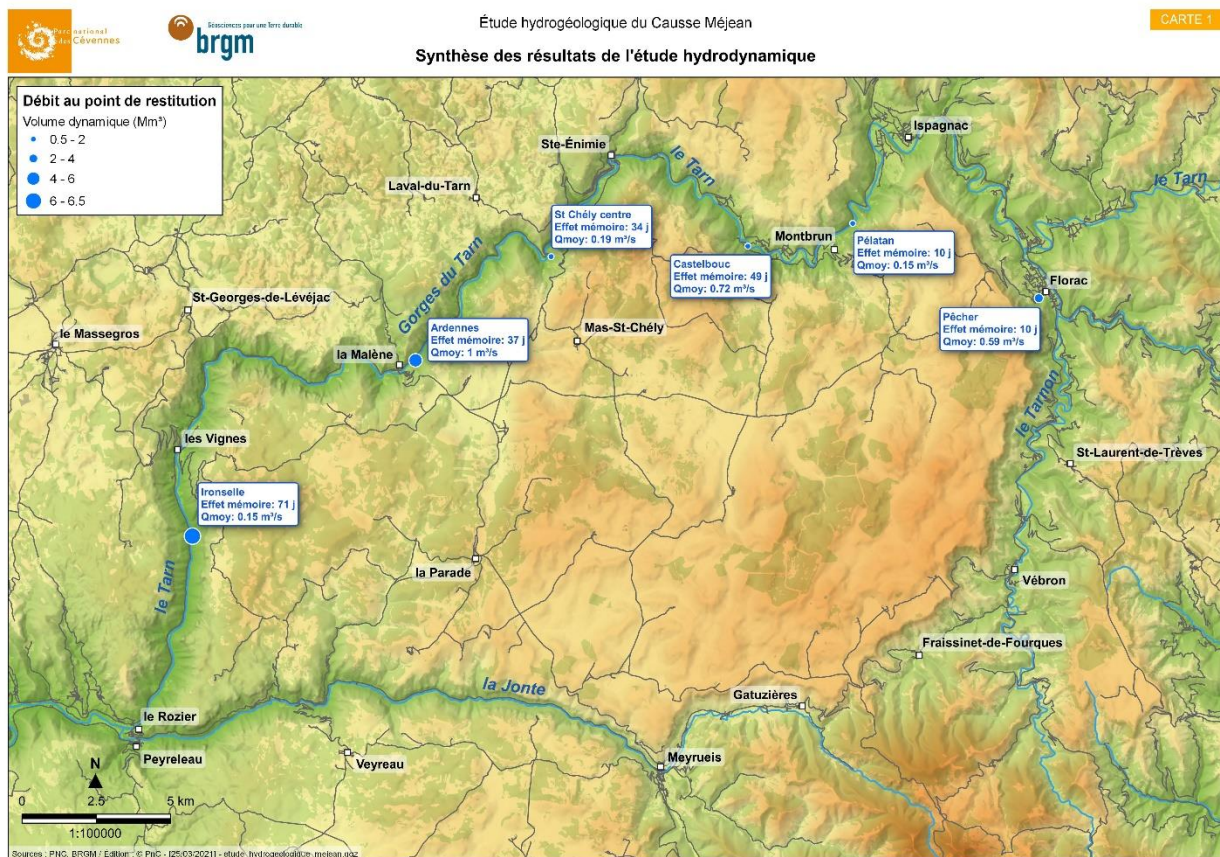


Figure 16 : Carte de synthèse des résultats de l'étude hydrodynamique.

5. Étude hydrochimique et traçage naturel

5.1. MÉTHODE MISE EN OEUVRE

Une campagne de caractérisation des faciès chimiques de l'eau en basses eaux a été réalisée en Juillet 2017, complétée par 2 autres campagnes en Septembre 2018 et Octobre 2019 pour caractériser les signatures des exutoires karstiques principaux et celles des différents pôles associés.

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

Ces trois campagnes d'analyses réalisées en basses eaux ont été complétées en Mars 2018 par deux campagnes sur un nombre plus réduit de sources afin de préciser le fonctionnement en hautes eaux de certains systèmes. L'évolution géochimique commune des basses eaux aux hautes eaux de plusieurs exutoires permet notamment d'en proposer un regroupement. Par ailleurs, les prélèvements en hautes eaux ont aussi pour but de mieux caractériser la variabilité des teneurs en nitrates sur les principales sources, en vue d'identifier une éventuelle influence des usages agricoles sur la ressource en eau.

Les résultats obtenus sur ces trois années de suivis sont également comparés aux suivis disponibles sur la base de données ADES afin d'identifier d'éventuelles évolutions et de mieux définir la variabilité naturelle des faciès chimiques des eaux du Causse Méjean. La carte présentée sur la Figure 17 positionne l'ensemble des points échantillonnés. La base de données relative au projet totalise 63 échantillons répartis sur 33 points de prélèvements.

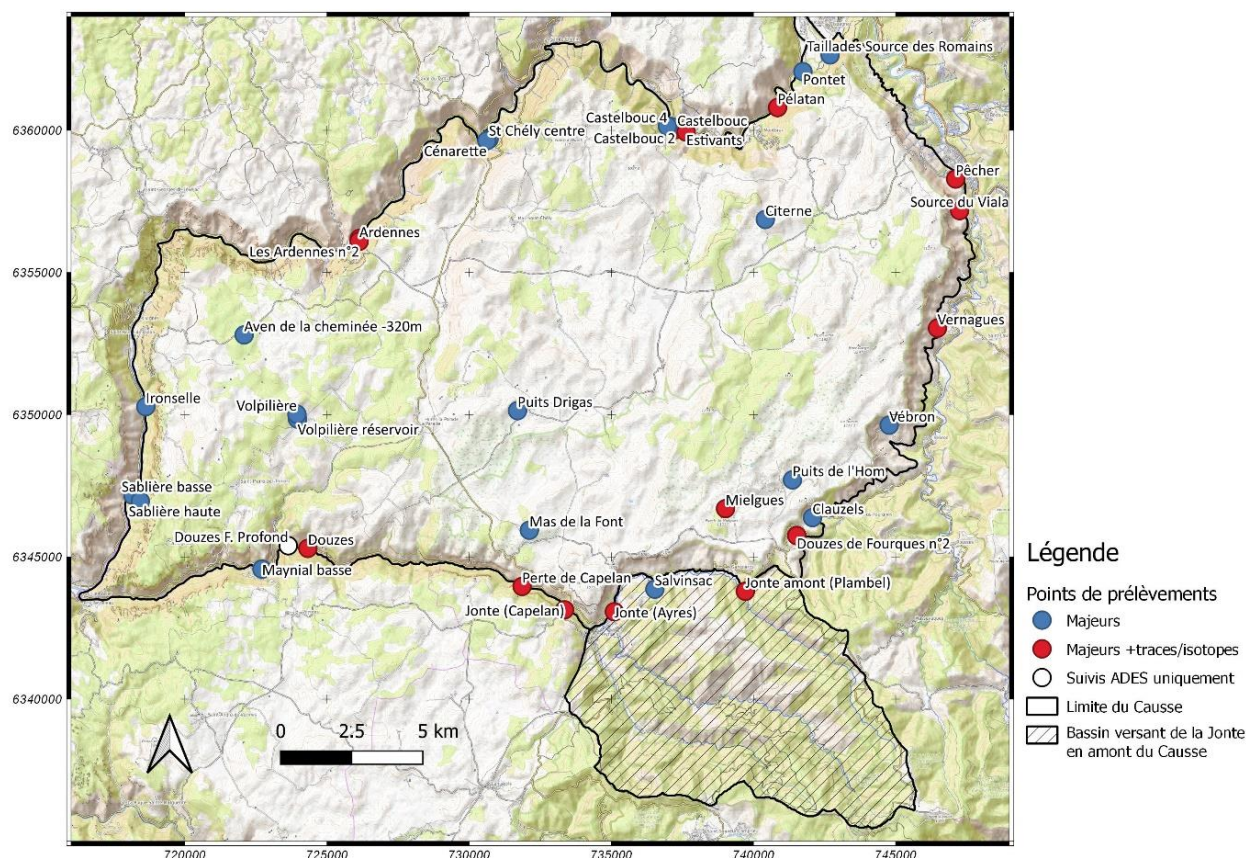


Figure 17 : Carte de localisation des différents points de prélèvements selon le type d'analyse ou l'origine de la donnée, reportée sur le fond OpenTopoMap.

5.2. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE HYDROCHIMIQUE

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

- les sources bicarbonatées calciques rechargées sur la partie Est du Causse Méjean : Pêcher, Moulin de Pélatan, Castelbouc, Ardennes ;
- les sources bicarbonatées calciques et magnésiennes rechargées sur l'Ouest du Causse Méjean, en lien avec une lithologie plus dolomitique du réservoir, et de la zone d'infiltration : Moulin de Cénarette, Saint Chély, Ironselle, Sablière basse ;
- les sources et le forage des Douzes influencés par les eaux de la Jonte : Les Douzes, le Maynial, le forage (profond) des Douzes.

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

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

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

Tous les exutoires présentent des écoulements rapides qui contribuent à leur alimentation lors des crues. Le signal de fluorescence naturelle permet de quantifier ce temps de transfert. Celui-ci dépend du débit et peut être inférieur à la journée, ce qui montre la **grande vulnérabilité de ces systèmes à une contamination accidentelle à la surface de leur bassin, mais aussi une capacité de résilience compte tenu de l'évacuation rapide d'éventuels contaminants.** Le bruit de fond de fluorescence des différents exutoires suivis caractérise une eau naturelle sans influence anthropique. Le système de l'Ironselle est le seul à montrer un comportement plus inertiel, avec une contribution relativement faible de ces écoulements rapides lors des crues, limités aux épisodes de crue majeurs. La turbidité observée au Moulin de Pélatan traduit un transfert de MES depuis la zone d'infiltration et suit la dynamique de transfert de la matière organique dissoute. Pour les autres systèmes karstiques, une turbidité des eaux n'apparaît que lors d'épisode de crue permettant de remettre en eau des réseaux exondés. Les informations obtenues par les différents outils mis en œuvre dans l'étude hydrochimique sont reportées pour chaque système karstique dans le tableau suivant (Tableau 1). L'ensemble de ces résultats est également synthétisé à travers une estimation du degré (relatif) de karstification de chaque système (+ = faible / ++ = moyen / +++ = fort), en tenant compte de l'ensemble des résultats apportés par l'étude hydrochimique.

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

Tableau 1 : Tableau de synthèse des principaux résultats apportés par chaque traceur naturel lors de l'étude hydrochimique.

6. Tracage artificiel

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

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

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

Un total de 22 injections de traceurs a été réalisé de 2017 à 2020, totalisant 60.5 kg de traceurs, dont 20 kg de sulforhodamine B et 40.5 kg d'uranine. Ces 22 injections ont donné lieu à 6 échecs, dont 3 depuis le même point d'injection (aven de la Sompe à Riese).

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



Figure 18 : Injection du traceur à -400 m, aven de la Cheminée (T2a).

Le traçage de l'Aven Armand (T13) a nécessité un apport d'eau pour que le traceur injecté par un tuyau au fond du puits terminal depuis la plateforme puisse être bien entraîné vers la zone noyée. 22 m³ ont été déversés par les pompiers, dont une partie a été stockée puis écoulée lentement après l'injection (Figure 19).



*Figure 19 : Dispositif mis en place pour le traçage de l'aven Armand depuis la plateforme (T13)
– Ph Crochet.*

Les 22 injections se répartissent en 5 multi-traçages de 2 injections et 12 traçages uniques. À l'exception des traçages de la perte de la Fontaine de Mielgues (T6) et de l'Aven Armand (T13), les spéléologues locaux, très motivés et disponibles nous ont permis de réaliser des injections en profondeur, missions encadrées par une convention avec le Comité Départemental de Spéléologie de Lozère (Figure 18).

Le tableau suivant présente les caractéristiques de chaque traçage réalisé dans le cadre de cette étude (Tableau 2).

#	Id	Injection	Date	BSS	Conditions	Traceur	m (g)	Exutoires suivis
1	T1a	Aven des Loups	18/03/2017	BSS004ABXP	au fond de la salle de l'écho à – 160 m	SulfoB	4000	Pêcher, Pelatan, Castelbouc
2	T1b	Aven du Pic d'Usclats n°2	18/03/2017	BSS002CHBT	actif à – 200m, en bas du P57	Uranine	4000	Pêcher, Pelatan, Castelbouc
3	T2a	Cheminée	29/04/2017	BSS002CGWC	siphon à -400m	Uranine	1000	Ironnelle
4	T2b	Montbuisson n°6	06/05/2017	BSS004ABXQ	actif à – 144 m, débit faible	SulfoB	1500	Ironnelle, Sablière basse
5	T3a	Saut du Loup n°2	04/06/2017	BSS004ABXR	à – 140 m, à la base du P15 terminal	Uranine	3000	Pêcher, Pelatan, Castelbouc
6	T3b	Mativet n°2	17/06/2017	BSS004ABXT	Injection effectuée à - 130 (avant le dernier ressaut)	SulfoB	1000	Pêcher, Pelatan, Castelbouc, Pontet
7	T4a	Sompe à Rieisse	02/07/2017	BSS004ABXU	au fond du « puits de la douche », dans l'actif à - 78m	Uranine	500	Ardennes, Ironnelle
8	T4b	Baume Fromagère	08/07/2017	BSS004ABXW	Injection à -190 m	SulfoB	500	Ironnelle, Sablière
9	T5	Bastide	23/12/2017	BSS002BLEJ		Uranine	500	Pêcher, Pelatan, Castelbouc
10	T6	Perte de la Fontaine de Mielgues	17/01/2018	BSS004ABXX		Uranine	4000	Ardennes, Castelbouc, Pêcher, Douzes
11	T7	Aven de la Barelle	14/02/2018	BSS002CGZA	Injection à -90 m	SulfoB	5000	Ardennes, Douzes, St Chély, Ironnelle
12	T8	Sompe à Rieisse	22/04/2018	BSS004ABXU		SulfoB	3000	Ardennes, Douzes, St Chély, Ironnelle
13	T9	Hures	26/05/2018	BSS002CHAC	Injection à -205m	Uranine	4000	Ardennes, Douzes, St Chély, Ironnelle, Castelbouc
14	T10	Crapaud	15/07/2018	BSS004ABXZ	Injection à -110m	Uranine	6000	Ardennes, Douzes, St Chély, Ironnelle, Castelbouc, Pêcher
15	T11	Aven des Loups	01/12/2018	BSS004ABXP		Uranine	4000	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants
16	T12	La Caze	02/12/2018	BSS004ABYA	Au terminus à – 177m, dans le gour en bas du dernier ressaut de 5m.	Uranine	400	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants
17	T13	Aven Armand	08/01/2018	BSS002GGZT	Injection poussée avec 11m3 avant et suivant l'injection	Uranine	4000	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants
18	T14	Sompe à Rieisse	02/03/2019	BSS004ABXU	au fond du « puits de la douche », dans l'actif à - 78m	SulfoB	2000	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants, Galène
19	T15	Aven du Deves	10/03/2019	BSS002BKZM	Injection à -44m dans un actif	Uranine	2000	Castelbouc 1 2 3 4 , Estivants
20	T16a	Aven Bancou	02/12/2019	BSS004ABYB	Injection dans un actif, +/- 6L/min	SulfoB	3000	Maynial basse, Douzes
21	T16b	Fumade	02/12/2019	BSS004ABYD	Injection dans un actif, +/- 1L/min	Uranine	3000	Maynial basse, Douzes, Hérans
22	T17	Aven du Veygalier	11/01/2020	BSS002CHBW	Injection poussée avec 13m3 en deux étapes	Uranine	4000	Maynial basse, Douzes, Hérans

Tableau 2 : Liste des traçages réalisés dans le cadre de l'étude.

Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 3, et présentés sous forme cartographique sur la Figure 20. Ces résultats ont également été bancarisés dans la BD Traçages (<https://bdtracages.brgm.fr/>).

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

Tableau 3 : Résultats des traçages, information relative à la restitution (R : % de restitution).

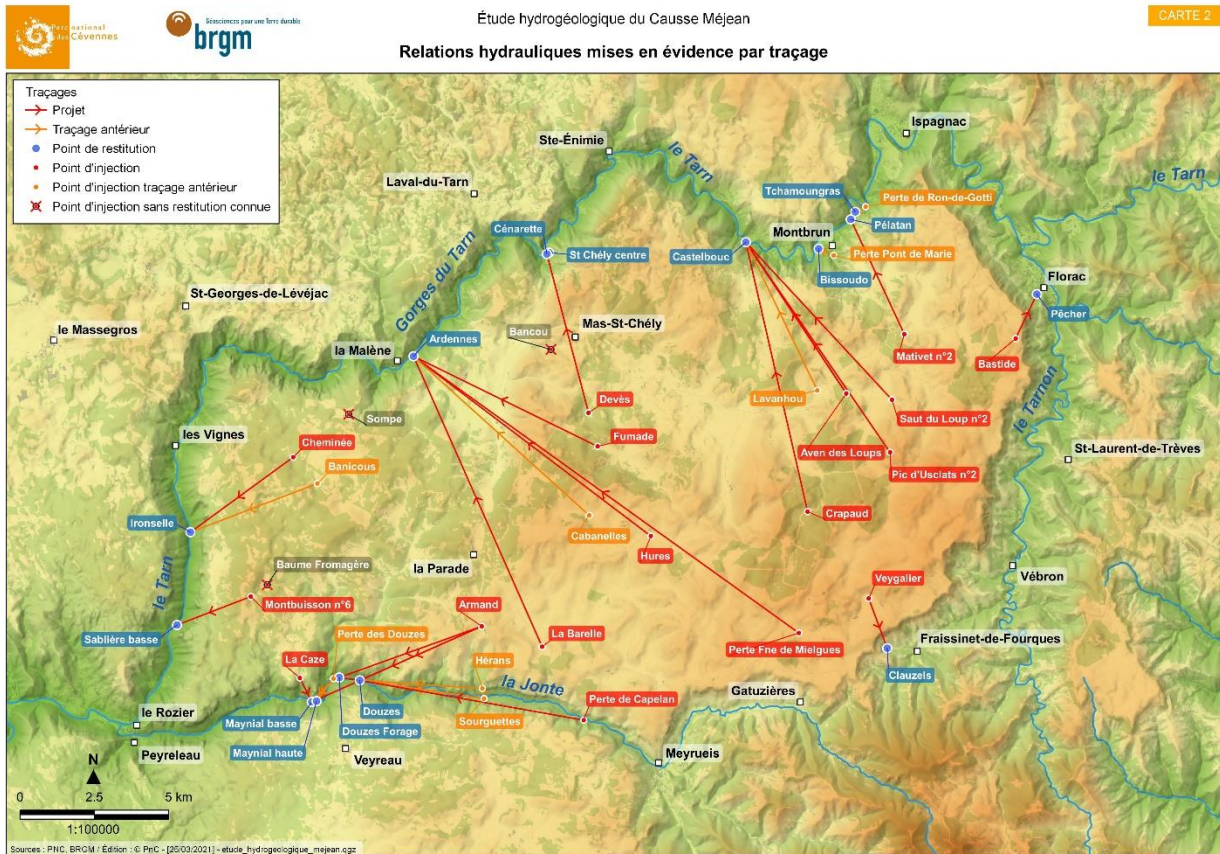


Figure 20 : Carte des relations hydrauliques mise en évidence par traçage avec report des traçages antérieurs sélectionnés et des points d'injection n'ayant pas donné lieu à une restitution – coordonnées en Lambert 93.

L'étude hydrodynamique a montré un passage progressif d'Est en Ouest des systèmes les plus karstifiés à proximité du contact Cévenol (Pêcher, Pélatan) vers des systèmes peu fonctionnels comblés d'altérites à l'Ouest (Ironsele). Cependant, les résultats des traçages ne mettent pas en évidence de circulations karstiques mieux organisées vers l'Est du Causse. Au contraire, les traçages de l'aven de la Cheminée (T2a) ou de l'aven de Monbuisson n° 6 (T2b) mettent en évidence l'existence d'un réseau karstique très fonctionnel permettant de transporter le traceur avec peu de dispersion. Ces systèmes traçages sollicitent ici des réseaux karstiques très développés localement, issus de la vidange des altérites (fantôme de roche). Ces drains de grande taille permettent ainsi de drainer les compartiments du réservoir où les fantômes de roche sont toujours en place. Ces systèmes présentent ainsi un fonctionnement de type « double porosité » très marqué entre les systèmes de drains très transmissifs et les masses rocheuses comblées d'altérites plus capacitives.

Enfin, le résultat du traçage depuis l'aven Armand (T13) permet d'interpréter les résurgences du Maynial et des Douzes comme les exutoires d'un système karstique unique, alimenté par les pertes de la Jonte à hauteur de 60 % d'après les analyses isotopiques des stables de l'eau et du Sr. Les 40 % restants proviennent de la recharge sur le Causse Méjean, et notamment au niveau du bassin versant du ravin des Bastides, mais également de la recharge sur le Causse Noir, directement ou via les systèmes de perte/résurgence comme celui des Sourguettes. Les eaux prélevées au forage profond montrent que celui-ci capte la même ressource influencée par les pertes de la Jonte. Ce captage présente donc également une forte vulnérabilité vis-à-vis d'une contamination de l'eau de la Jonte, ce qui a été confirmé par le traçage du 21 octobre 2020.

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

7.1. DÉLIMITATION DES BASSINS D'ALIMENTATION

Les tracés des bassins d'alimentation des principales sources drainant le Causse Méjean sont reportés sur la Figure 21. Les surfaces drainées par ces systèmes karstiques sont directement reportées sur la carte. L'utilisation des contours géologiques ou du résultat des calculs des lignes de crêtes topographiques explique que les contours des bassins d'alimentation présentent localement une grande résolution spatiale. Il a été décidé de conserver cette résolution pour mieux identifier l'origine de l'information utilisée par comparaison avec les courbes de niveaux ou les contours géologiques, bien que ce degré de précision soit illusoire.

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

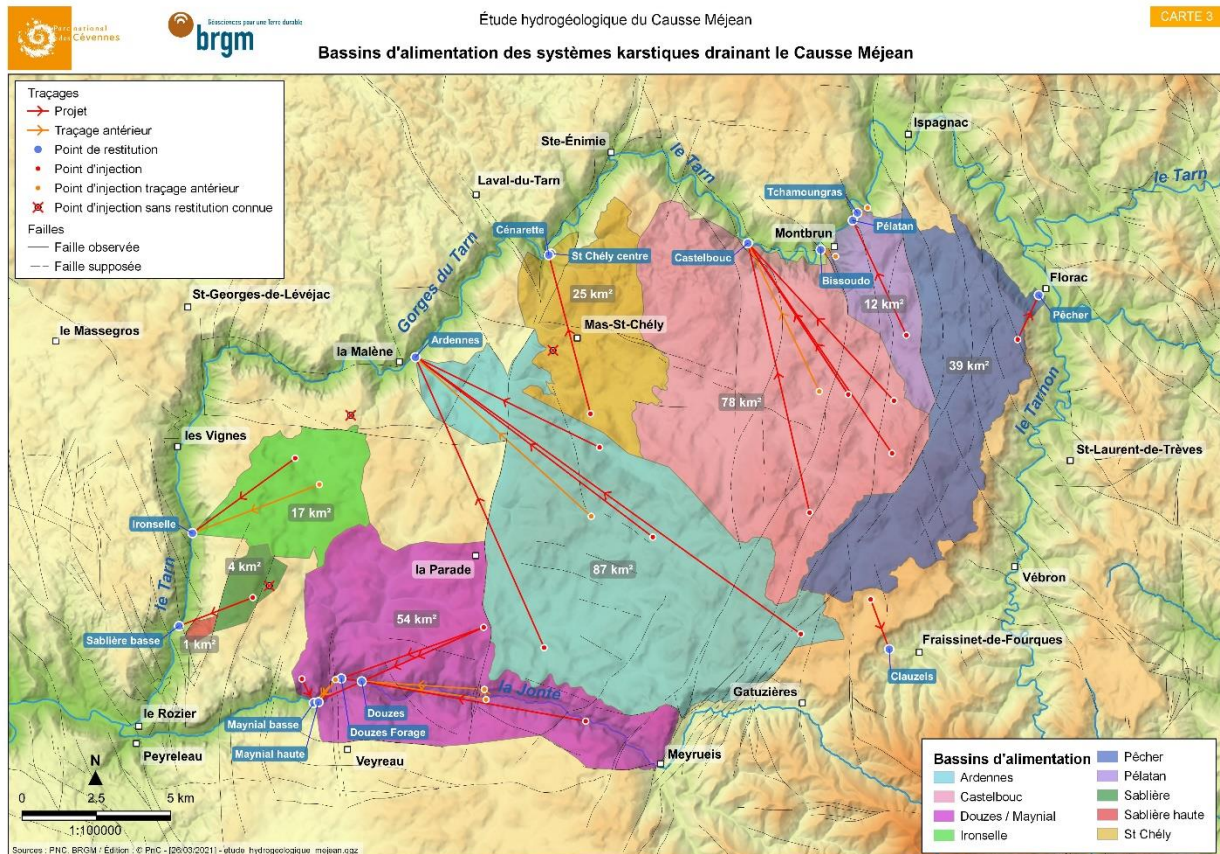


Figure 21 : Carte des bassins d'alimentation des systèmes karstiques drainant le Causse Méjean – coordonnées en Lambert 93.

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

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

7.2. CARTE DE SYNTHÈSE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS DU CAUSSE MÉJEAN

L'essentiel de la surface du Causse Méjean a pu être associé à l'un des systèmes karstiques étudiés. Il reste néanmoins 3 secteurs repérés par des « ? » sur la carte de la Figure 22 dont le devenir des eaux infiltrées n'a pas pu être déterminé, en plus du graben au Nord-Ouest du Causse Méjean qui est associé à un exutoire du Pas-de-Soucy, sans que celui-ci ait pu être identifié.

La forme des bassins, complétée par les informations issues de l'interprétation des traçages permet de schématiser l'organisation spatiale des principaux axes de drainage karstique. Ainsi, 2 axes de drainage sont proposés pour le système du Pêcher, l'un drainant le Nord-Ouest du bassin et l'autre toute la bordure Sud-Est du Causse en direction de Nîmes-le-Vieux, ce qui peut expliquer les deux réponses successives observées sur les paramètres physico-chimiques. La convergence des écoulements souterrains au niveau de la plaine de Carnac en amont de la source des Ardennes est également bien identifiée.

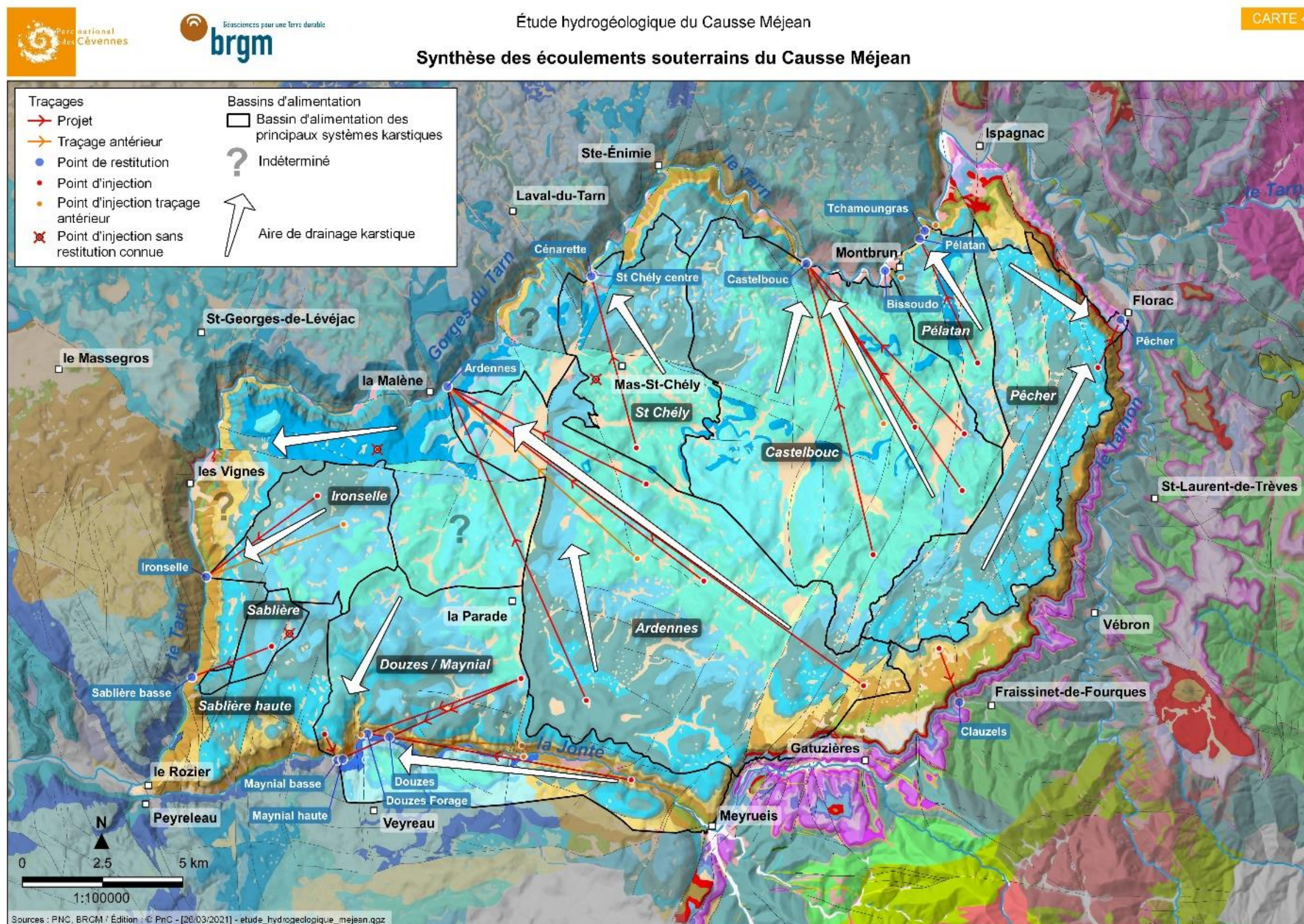


Figure 22 : Carte de synthèse des écoulements souterrains du Causse Méjean sur le fond géologique harmonisé au 1/50 000 du BRGM – coordonnées en Lambert 93.

7.3. POTENTIALITÉS AQUIFÈRES DU CAUSSE MÉJEAN

7.3.1. Méthode

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

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

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

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

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

7.3.2. Résultat

La carte suivante (Figure 23) représente le résultat obtenu selon les 4 classes définies précédemment pour les principaux systèmes karstiques drainant le Causse Méjean. Les limites d'affleurement du Causse et des bassins d'alimentation des principaux systèmes karstiques y sont également reportées pour mieux localiser les différents secteurs.

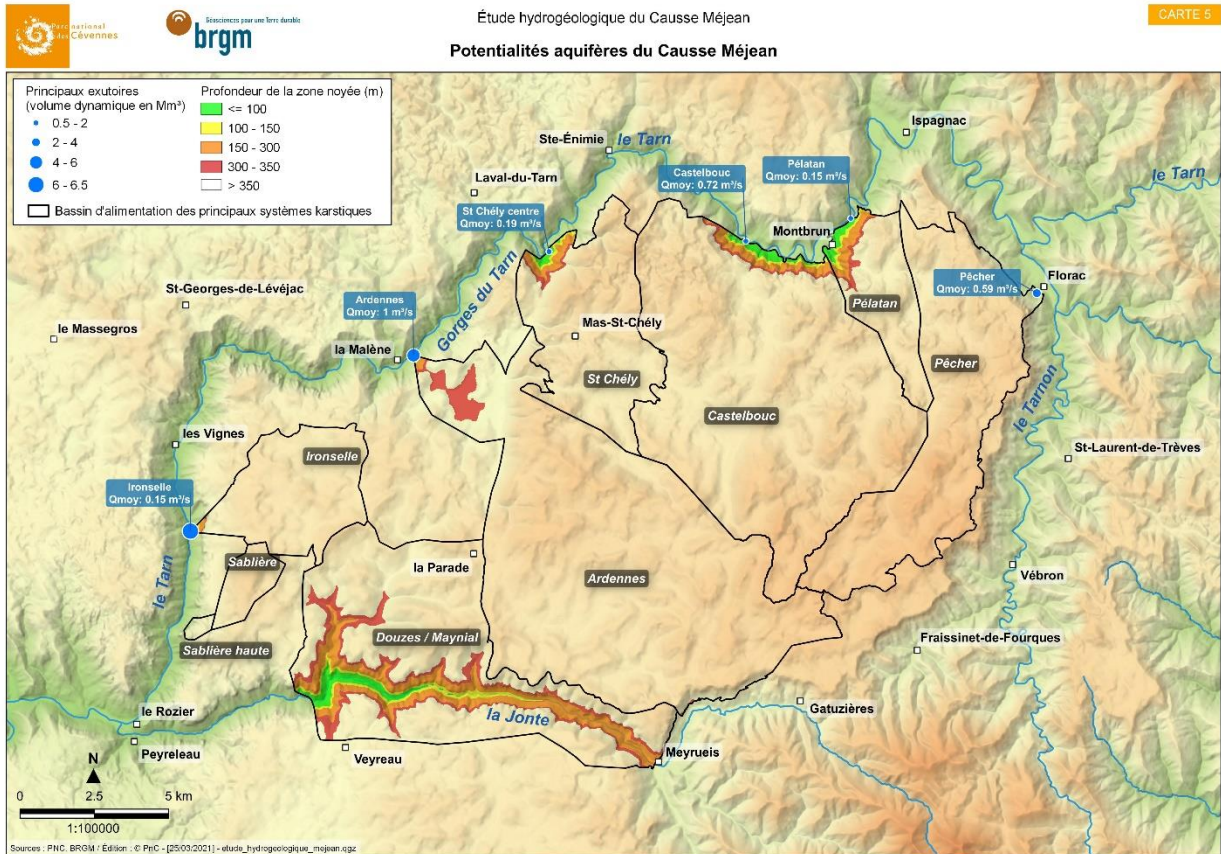


Figure 23 : Analyse cartographique des potentialités aquifères du Causse Méjean. Interprétation et discussion

Les secteurs où la ressource en eau karstique reste accessible se localisent en bordure du Causse à proximité des exutoires. A la surface du Causse, seuls 2 secteurs relativement bas du point de vue topographique permettent d'envisager une exploitation par forage de la ressource en eau :

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

8. Risque de pollution de la ressource en eau karstique

8.1. VULNÉRABILITE INTRINSÈQUE À LA POLLUTION (MÉTHODE PaPRIKa)

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

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

La Figure 24 cartographie la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique du Causse Méjean. Il apparaît une plus forte vulnérabilité du système des Douzes/Maynial en lien avec le fonctionnement binaire de ce système, mais également sur les systèmes drainant l'Est de la zone d'étude. Les systèmes les plus vulnérables présentant un mode de recharge directe à la surface du karst (système unaire) sont les systèmes du Moulin de Pélatan, du Pêcher et de Castelbouc. Les systèmes drainant la partie ouest apparaissent les moins vulnérables, mais présentent tout de même une vulnérabilité moyenne qualifiée de modérée.

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

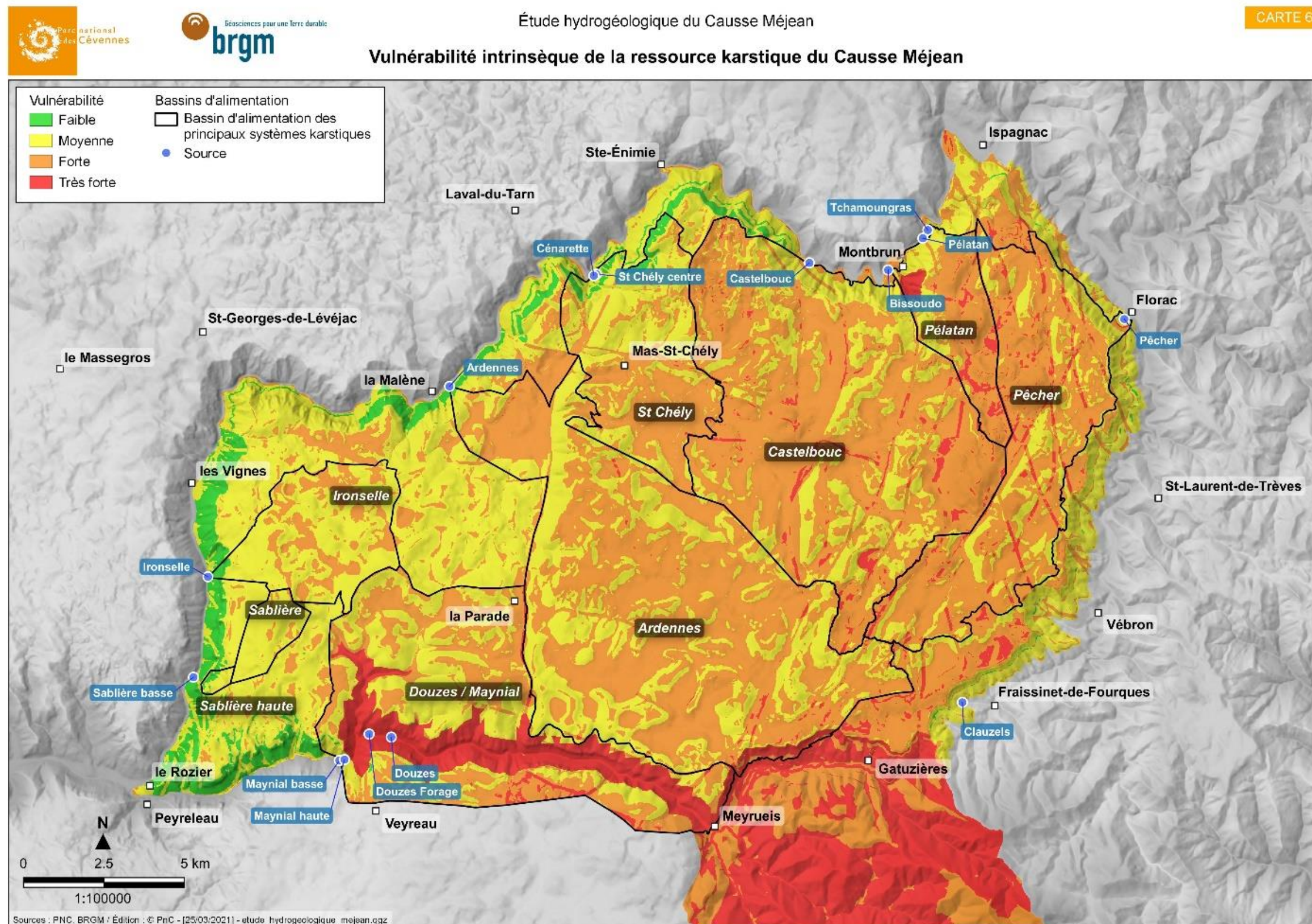


Figure 24 : Carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource karstique du Causse Méjean.

8.2. PRESSIONS ANTHROPIQUES

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

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

8.3. CROISEMENT VULNÉRABILITE/PRESSION/ÉTAT QUALITATIF

8.3.1. Activités agricoles

Concernant les risques de contamination liée aux activités agricoles (Figure 25), les cultures céréalières ou pour le fourrage sont demandeuses d'intrants azotés, et peuvent donc être à l'origine d'une contamination en nitrates des sols, puis des eaux souterraines. Il s'agit de petites parcelles réparties à la surface du Causse, ce qui rend ce type de pression anthropique relativement marginal. On note cependant une parcelle de plus grande superficie (23 ha) dans la dépression de Mativet (blé tendre), complétée par les parcelles cultivées pour d'autres céréales dans la dépression du paléo-poljé de la Fajole. On dénombre également une densité d'exploitation agricole un peu plus importante dans ce secteur (La Fajole, Mativet, Mercoire, Les Champs, Cros-Garnon, Valbelle etc.) relativement au reste du Causse Méjean. Il est donc possible que ces activités agricoles soient à l'origine des teneurs plus élevées en nitrates observées sur le système karstique du Moulin de Pélatan et du Pontet, ainsi qu'une plus grande présence de coliformes sur les suivis ADES au captage AEP du Moulin de Pélatan. La carte suivante permet de superposer les informations relatives aux pressions agricoles, en ciblant les cultures céréalières et le fourrage, à la carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique dans ce secteur. Seuls les pixels de la carte de vulnérabilité concernés par ce type d'usage du sol, avec une zone tampon de 50 m, sont conservés, afin d'identifier les secteurs présentant un risque vis-à-vis de la pollution de la ressource en eau. Les bâtiments agricoles y sont également reportés.

Cette carte de risque de pollution de la ressource par les activités agricoles met bien évidence des secteurs de risque fort à très fort constituant une part importante du bassin d'alimentation du système karstique du Moulin de Pélatan. Une analyse identique peut-être menée au Sud de Gally et de l'Hom dans le secteur de Nîmes le Vieux, avec un drainage des eaux probable vers la source des Clauzels. Cette source présente également une teneur en nitrates légèrement supérieure au bruit de fond naturel, et une mauvaise qualité microbiologique des eaux par rapport aux autres exutoires du Causse, ce qui peut être la conséquence de l'utilisation d'un amendement organique des sols. Enfin, la légère anomalie en nitrates aux sources de Saint-Chély/Cénarette et des Ardennes peut être attribuée aux activités agricoles dans le secteur de Mas Saint-Chély-Mas de Val et de la plaine de Carnac.

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

8.3.2. Transport

Pour les **risques de contamination associés au transport routier**, 3 secteurs représentés sur les cartes A, B et C de la Figure 26 peuvent être mis en avant. L'interprétation en termes de risque revient à décrire la vulnérabilité à proximité immédiate de ces tronçons de route sélectionnés selon l'importance du trafic (sélection proposée par la BD Topo® de l'IGN).

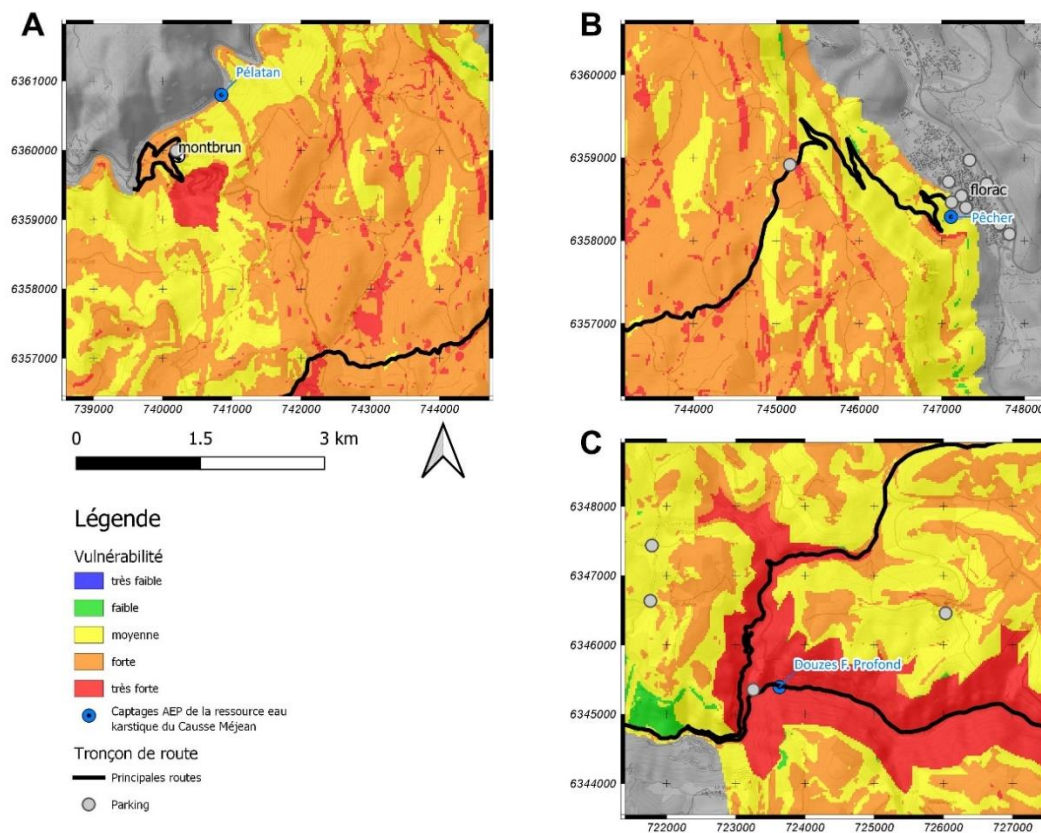


Figure 26 : Report des principales routes sur la carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau karstique, zoom sur 3 secteurs de la zone d'étude – A : Montbrun, B : Florac et C : Ravin des Bastides.

La carte B de cette figure met en évidence un risque plus élevé au droit de la source du Pêcher le long de la route qui mène au col de Pierre Plate (D16). Bien que la zone de très forte vulnérabilité soit localisée en amont de la route à proximité immédiate du Pêcher, un travail complémentaire permettant de mieux localiser les modalités d'infiltration des eaux de ruissellement vers la source lors de fortes pluies serait nécessaire pour préciser la spatialisation de la vulnérabilité à ce niveau. La carte A met en avant un risque plus élevé au droit de la source Bissoudo à Montbrun au sein du système karstique du Moulin de Pélatan. Bien que moins fréquentée, la route D68 qui rejoint le Causse depuis Montbrun traverse une zone de très forte vulnérabilité. A cela s'ajoute pour la partie karstique la route qui remonte la Jonte (D996) à partir du Hameau du Maynial, ainsi que celle qui remonte le ravin des Bastides depuis le Maynial jusqu'au hameau des Bastides (D63), représentée sur la carte C de la Figure 26. Dans le bassin versant connexe de la Jonte les routes qui longent la Jonte et ses affluents à l'amont de Meyrueis confèrent également un risque de contamination plus élevé de la ressource en eau au système des Douzes/Maynial.

8.3.3. Assainissement

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

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

Une analyse du risque de pollution de la ressource est proposée ci-dessous sous la forme de tableaux de synthèse pour chaque système karstique étudié. La méthode consiste à décrire de manière globale la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau pour chaque système, puis d'identifier et de caractériser les pressions anthropiques qui s'exercent sur son bassin d'alimentation. Une note relative à chaque type de pression est attribuée selon 3 classes à l'échelle du système karstique en interprétant à l'échelle du système karstique les résultats décrits précédemment :

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

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

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

Tableau 4 : Définition du risque de pollution à l'échelle des systèmes karstiques par le croisement de la vulnérabilité intrinsèque et des pressions.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

SYSTÈME KARSTIQUE DU PÊCHER

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

Tableau 5 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique du Pêcher.

SYSTÈME KARSTIQUE DU MOULIN DE PELATAN

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

Tableau 6 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique du Moulin de Pélatan.

SYSTÈME KARSTIQUE DE CASTELBOUC (+ ESTIVANTS)

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

Tableau 7 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de Castelbouc (captage des Estivants)

SYSTÈME KARSTIQUE DE SAINT CHÉLY-CENARETTE

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

Tableau 8 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de Saint-Chély/Cénarette.

SYSTEME KARSTIQUE DES ARDENNES

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

Tableau 9 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique des Ardennes.

SYSTÈME KARSTIQUE DE L'IRONSELLE

RESSOURCE CAPTEE	Non					
VULNERABILITE	Moyenne, localement forte dans les dépressions					
TYPE PRESSION	Assainissement	Agricole	Industrielle commerciale	et Déchet	Transport	Tourisme
DESCR. PRESSION	-	Cultures céréalières / fourrage	-	-	-	-
NOTE PRESSION	0	0	0	0	0	0
RISQUE	0	0	0	0	0	0

Tableau 10 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique de l'Ironselle.

SYSTÈME KARSTIQUE DES DOUZES / MAYNIAL

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

Tableau 11 : Analyse du risque de pollution de la ressource en eau à l'échelle du système karstique des Douzes/Maynial (captage des Douzes).

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

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

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

9. Perspectives

9.1. RÉSEAU DE MESURE

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

9.2. ANALYSES HYDROCHIMIQUES

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

9.3. TRAÇAGES

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

- **secteur Est** : Hormis le traçage T5, il n'a pas été possible de valider l'extension du bassin d'alimentation du Pêcher par traçage. Il n'existe cependant pas de points d'injection connus dans ce secteur. Il conviendrait par exemple d'identifier le devenir des eaux dans les dépressions telles que celle de Combebelle lors de fortes pluies, et de profiter d'un flux d'infiltration pour tenter une opération de traçage, ce qui nécessite une très grande disponibilité pour la réalisation d'une telle opération ;
- **secteur Nord-Est** : Une recherche de diffuence pourrait être tentée entre les systèmes de Pélatan et de Castelbouc en renouvelant le traçage T3a (Saut du Loup n°2) en hautes eaux, pour identifier un éventuel drainage vers la source de Pélatan et/ou ses exutoires de trop-pleins (Bissoudo, [BSS002BLCT](#)). En cas de diffuence avérée, la même expérience pourrait être reconduite depuis l'aven des Aouglanets ([BSS002BLBM](#)), dont un traçage réalisé en 1978 par Maurin et reporté par Bérard (1987) aurait donné lieu à une restitution aux exutoires de Pélatan et de Bissoudo ;

- **secteur Nord** : Mas Saint-Chély : À titre exploratoire, 2kg d'uranine ont été versés le 09/09/2019 dans le lagunage situé entre Anilhac et Caussignac à l'Ouest de Mas Saint-Chély, en attendant la possibilité de tracer l'aven Bancou. Les suivis aux sources de Saint-Chély et des Ardennes n'ont pas permis d'identifier le passage du traceur. Le devenir des eaux des lagunages reste ainsi relativement incertain, sachant que ce secteur est probablement très proche de la limite entre les bassins des Ardennes et de Saint-Chély ;
- **secteur Nord-Ouest** : À l'ouest de Rieisse, le devenir des eaux infiltrées reste incertain, et un drainage vers le Tarn selon une direction Est-Ouest est possible jusqu'aux différents exutoires du Pas-de-Soucy reste envisageable. Une campagne de recherche de sources par analyse de la conductivité de l'eau n'a pas permis de mettre en évidence de sources drainant le Causse Méjean entre la source de Galène en aval de la Malène et l'Ironselle. Il pourrait être intéressant de reconduire le traçage de l'aven de la Sompe à Rieisse en surveillant, en plus des Ardennes, de la Galène et de l'Ironselle, également les exutoires connus sous le Tarn ou en bordure du Tarn vers le Pas-de-Soucy ;
- **secteur Sud, Jonte et forage des Douzes** : L'analyse hydrochimique permet d'identifier une grande similitude de faciès chimique entre les eaux de la Jonte, de la résurgence des Douzes et du forage profond des Douzes. Quelques prélèvements réalisés sur le forage profond des Douzes lors du traçage T13 présentent des résultats positifs à l'uranine par analyse spectrale au laboratoire, mais l'évolution des intensités est assez incohérente et la possibilité d'une pollution ne peut être écartée. Un traçage des pertes des Douzes avec un suivi fluorimétrique sur les eaux pompées au forage profond des Douzes est prévu dans la continuité de cette étude.

9.4. MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Occitanie

1039 rue de Pinville

34000 Montpellier – France

Tél. : 04 67 15 79 80 - www.brgm.fr