



Appui au SCHAPI 2012 – Module 1 - Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique : le bassin du Tarn à Millau

Rapport final

BRGM/RP-61816-FR

Décembre 2012



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Appui au SCHAPI 2012 – Module 1 - Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique : le bassin du Tarn à Millau

Rapport final

BRGM/RP-61816-FR
Décembre 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2012 RISI05

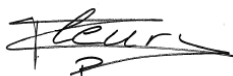
J.-B. Charlier, V. Bailly-Comte, J.-F. Desprats

Vérificateur :

Nom : P. FLEURY

Date : 10/01/2013

Signature :

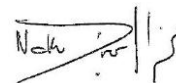


Approbateur :

Nom : N. DORFLIGER

Date : 21/01/2013

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Karst, Alerte, Vigilance, outil de prévision des crues

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

J.-B. Charlier, V. Bailly-Comte, J.-F. Desprats. 2012 - Appui au SCHAPI 2012 – Module 1 - Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique : le bassin du Tarn à Millau - Rapport final. Rapport BRGM/RP-61816-FR

Synthèse

Dans le cadre de la convention entre le BRGM et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), deux axes de travail ont été définis pour l'année 2012 :

- l'application de l'Indicateur Karst (IK) sur le bassin du Tarn à Millau (tronçon Tarn amont) sélectionné par le SCHAPI sur proposition du SPC Tarn-Lot ;
- l'étude de la zone non saturée avec le suivi du site expérimental de Warloy Baillon (Hallue) et la modélisation hydrogéologique du bassin de l'Hallue, pour le compte du SPC Artois – Picardie.

Ce programme de travail est financé à 80% par la DGPR, et à 20% par le BRGM dans le cadre de ses actions de Services Publics.

Le présent rapport fait référence au premier axe de travail sur l'Indicateur Karst (IK). Prédire les crues sur les bassins karstiques est un défi car le karst est un hydrosystème hétérogène au fonctionnement non linéaire dont les écoulements qui participent aux crues peuvent être d'origine souterraine (résurgences) ou issus du ruissellement sur surface saturée (après remplissage à saturation de la zone superficielle engendrant un refus à l'infiltration). C'est pourquoi une bonne prédiction nécessite une approche spécifique qui doit prendre en compte les caractéristiques du karst et les processus hydrogéologiques au sein de ces aquifères.

L'objectif de cette étude SCHAPI-BRGM 2012 est d'améliorer la connaissance du rôle du karst sur le fonctionnement hydrologique du Tarn à Millau lors des plus fortes crues. Ce bassin de plus de 2100 km² draine à l'amont les reliefs cévenols et les Grands Causses karstiques à l'aval. Sur la base des déterminants à la genèse des crues sur ce grand bassin, l'objectif plus spécifique est alors de proposer un outil d'aide à la prévision des débits maximum de crue à Millau.

Différents types de données spatiales et temporelles existent, et pour mener à bien cette étude nous avons dans un premier temps compilé l'ensemble des données à disposition : i) en réalisant une bibliographie sur le secteur des Grands Causse afin de recueillir le maximum d'information sur le fonctionnement hydrogéologique et hydrologique du système, et ii) en construisant une base de données des chroniques hydrologiques (pluie, piézométrie, débit des sources, débit des rivières).

Dans un second temps, une analyse fine des données de crue a été réalisée pour caractériser les processus mis en jeu. Ceci a été effectué à l'aide d'un modèle de transfert utilisant l'onde diffusante avec apports latéraux pour propager les ondes de crues dans le réseau et quantifier les pertes et apports issus du karst. Un modèle semi-distribué a été utilisé pour simuler les débits des cours d'eau à différentes stations, validant le schéma de fonctionnement proposé. Les résultats de la modélisation ont permis notamment de comparer le fonctionnement de chacun des sous-bassins, et de

quantifier le rôle du karst aux crues (rôle de contributeur ou d'écrêteur). Enfin, sur la base des résultats de la modélisation, un outil de prévision des débits de pointe de crue à Millau sous la forme d'une relation Débit aval vs. Débit amont a alors été défini.

Les principaux résultats sont :

- une variabilité spatiale des pluies entre reliefs cévenols sur socle à l'amont plus arrosés que les Causses (karst) à l'aval,
- un débit de crue élevé issu de la zone de socle du fait de pluies de très fortes intensités sur des formations peu perméables comparé aux formations karstiques de l'aval,
- un karst qui écrête les pics de crue issus du socle au niveau du contact socle-karst (fortes pertes de l'ordre de 50 à 100 m³/s sur le Haut Tarn),
- un karst qui amplifie les crues sur la partie intermédiaire et aval et qui soutient les débits de base du Tarn. Ceci engendre à l'échelle du bassin une limitation de l'effet écrêteur de la partie amont des Causses (les pertes amont sont compensées par les apports aval), et engendre également des décrues plus lentes. Les apports de la partie karst ont été quantifiés et se montent à 35% du débit maximum observé à Millau pour les plus fortes crues.

Sur la base du schéma de fonctionnement de ce karst binaire – qui comprend un tiers de sa surface sur socle à l'amont - le principal déterminant est le débit maximum issu de la zone de socle amont, là où les pluies sont les plus intenses et abondantes. De ce fait, l'indicateur retenu pour les prévisionnistes est fonction des débits amont issus du socle. La mise en place de cet indicateur reste simple et nécessite une bonne estimation des débits sur la partie non karstique des reliefs des Cévennes.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Présentation du site et des données disponibles.....	11
2.1. SITE D'ETUDE ET MODELE CONCEPTUEL	11
2.1.1. Présentation du bassin du Tarn à Millau.....	11
2.1.2. Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique des Grands Causses	13
2.2. DONNEES SPATIALES	16
2.3. DONNEES TEMPORELLES	17
2.3.1. Généralités.....	17
2.3.2. Données de pluie	18
2.3.3. Données de débit	18
2.3.4. Remarques sur la précision des données collectées	22
2.3.5. Sélection des épisodes pluie-débit	23
3. Modélisation	25
3.1. DESCRIPTION DU MODELE	25
3.1.1. Structure générale.....	25
3.1.2. Processus hydrogéologiques sur les sous-bassins karstiques	26
3.1.3. Echanges karst - rivière.....	27
3.1.4. Fonction de transfert dans le réseau hydrographique.....	27
3.2. APPLICATION AU TARN A MILLAU	29
3.2.1. Découpage du bassin.....	29
3.2.2. Paramétrisation	31
3.2.3. Stratégie de calibration.....	33
4. Rôle du karst sur les écoulements de crue	35
4.1. ANALYSE DES EPISODES DE CRUE	35
4.1.1. Les pluies.....	35
4.1.2. Les écoulements	37
4.2. RESULTATS DE LA MODELISATION	44
4.2.1. Modélisation des écoulements hydrogéologiques sur les Causses	44
4.2.2. Modèle de transfert	45

4.3. DISCUSSION DES RESULTATS DE MODELISATION ET SCHEMA DE FONCTIONNEMENT	51
5. Indicateur d'aide à la vigilance	55
5.1.1. Choix de l'outil d'aide à la vigilance	55
5.1.2. Proposition d'un outil d'aide à la vigilance pour le tronçon Tarn Amont...	55
6. Conclusion.....	59
7. Bibliographie	61

Liste des illustrations

Illustration 1. Bassin du Tarn à Millau et stations SPC sur fond géologique (BRGM 1/1 000 000).....	11
Illustration 2. Stations SPC du Tarn à Millau (à gauche) et de la Dourbie à Nant (à droite).....	12
Illustration 3. Karst binaire (Marsaud, 1996).....	13
Illustration 4. Grands Causses sur le bassin du Tarn à Millau (d'après SAGE Tarn amont).....	13
Illustration 5. Log géologique des Grands causses et localisation des principaux aquifères et aquicludes (PNRGC, 2006, d'après Berard, 1987)	14
Illustration 6. Source de l'Esperelle	15
Illustration 7. Schéma hydrogéomorphologique des karsts des Grands causses.....	15
Illustration 8. Compilation des données de traçage et des unités hydrogéologiques sur fond topographique (IGN 1/100 000).	17
Illustration 9. Liste et références géographiques des postes pluviométriques de la base climathèque Météo-France	18
Illustration 10. Inventaires des données horaires de hauteur et de débit.....	20
Illustration 11. Chronogramme des données horaires de hauteur mesurées aux 11 stations hydrologiques	21
Illustration 12. Chronogramme des débits horaires estimés aux 9 stations hydrogéologiques	21
Illustration 13. Cartographie du réseau de mesure sur fond géologique (BRGM 1/1 000 000).....	22
Illustration 14. Découpage en sous-bassins pour un modèle semi-distribué.	25
Illustration 15. Modèle hydrogéologique à réservoirs adapté aux systèmes karstiques	26
Illustration 16. Propagation de l'onde de crue entre I (inflows) et O (outflows) avec apports ou pertes répartis de manière uniforme sur la longueur du cours d'eau (d'après Moussa, 1996).	28

Illustration 17. Découpage en Unités Hydro(géo)logiques et tronçons du bassin du Tarn à Millau	30
Illustration 18. Sous-bassins et sources karstiques suivies	31
Illustration 19. Paramètres du modèle.	32
Illustration 20. Comparaison du cumul pluviométrique par épisode entre zone de socle et zone de karst en fonction de la pluie moyenne sur le bassin du Tarn.....	35
Illustration 21. Boîtes à moustaches sur les intensités maximales de pluie P_x à 1h, 3h, 6h, 12h, 24h, et 48h, exprimées en pourcentage de la pluie totale P_{tot} de l'épisode.	37
Illustration 22. Profils en long pour la crue du 30/09/2000 des débits de pointe (Q_{max}) et de base (Q_{ini}) et des volumes écoulés pour les trois affluents du Tarn : Haut Tarn en bleu, Jonte en vert et Dourbie en rouge ; les volumes totaux (V_{tot}) sont découpés en volumes de crue (V_{crue}) et de base (V_{base}).....	38
Illustration 23. Profils en long pour la crue du 23/12/2010 des débits de pointe (Q_{max}) et de base (Q_{ini}) et des volumes écoulés pour les trois affluents du Tarn : Haut Tarn en bleu, Jonte en vert et Dourbie en rouge ; les volumes totaux (V_{tot}) sont découpés en volumes de crue (V_{crue}) et de base (V_{base}).....	39
Illustration 24. Ondes de crue et apports latéraux sur le Haut tarn, sur les deux tronçons Florac -> Montbrun et Montbrun -> La Muse lors de l'épisode du 16/03/2011 (crue multiple avec deux épisodes de pluie de 55 puis 72 mm en moyenne sur le sous-bassin).....	41
Illustration 25. Ondes de crue et apports latéraux sur le sous-bassin du Haut tarn lors de l'épisode du 24/12/2010 (pluie de 65 mm en moyenne sur le sous-bassin) ; sont présentés de gauche à droite les ondes de crue et apports latéraux pour le sous-bassin global (Florac -> La Muse), pour le tronçon amont Florac -> Montbrun, et pour le tronçon aval Montbrun -> La Muse.	43
Illustration 26. Simulation du débit à la source de l'Esperelle, ainsi que des niveaux d'eau dans les réservoirs DIFFUS et CONDUIT (crue du 17/05/1999)	44
Illustration 27. Modélisation de la crue monopic du 15/09/2006.....	47
Illustration 28. Modélisation de la crue monopic du 14/11/2009.....	48
Illustration 29. Modélisation de la crue multiple du 03/12/2003	49
Illustration 30. Modélisation de la crue multiple du 16/03/2011	50
Illustration 31. Résultats de modélisation sur les pics de crue (Q_{max}). Les résultats à Millau prennent en compte les débits calculés (à gauche) des stations amont (La Muse et Massebiau), ou les débits observés (à droite).	51
Illustration 32. Réponse hydrologique des différents sous-bassins et du bassin du Tarn à Millau ; avec de haut en bas : i) la contribution du karst au débit de pointe en fonction du pourcentage de pluie cumulée sur les Causses par rapport à la pluie moyenne, ii) la contribution du karst au débit de pointe en fonction du débit de pointe amont du socle, et iii) le débit maximum à l'exutoire en fonction du débit maximum du socle.	53
Illustration 33. Relation entre débits de pointe issus du socle et débits de pointe à l'exutoire pour les sous-ébassins du Haut tarn, de la Dourbie, et du bassin du Tarn à Millau.	56

Liste des annexes

Annexe 1 Données de traçage sur les Causses du bassin du Tarn à Millau.....	63
Annexe 2 Episodes Pluie – Débit sélectionnés sur une base de données journalières	73

1. Introduction

Prédire les crues sur les bassins karstiques est un défi car le karst est un hydrosystème hétérogène au fonctionnement non linéaire. Les écoulements qui participent aux crues peuvent être d'origine souterraine (résurgences) ou issus du ruissellement sur surface saturée (après remplissage à saturation de la zone superficielle engendrant un refus à l'infiltration). Une bonne prédiction nécessite donc une approche spécifique qui doit prendre en compte les caractéristiques du karst et les processus hydrogéologiques. Les développements méthodologiques dans le cadre de la convention SCHAPI-BRGM sur les crues de bassins karstiques ont abouti à la mise en place d'un Indicateur Karst défini sur le karst Nîmois (Fleury et al., 2010) basé sur l'évolution de la piézométrie qui renseigne sur l'état de saturation de l'aquifère, puis mis en œuvre sur les bassins du Lez et de la Tardoire (Fleury et al., 2011).

Le BRGM a proposé une fiche de synthèse explicative pour la mise en place de l'indicateur à l'attention des prévisionnistes des SPC (Service de Prévision des Crues), détaillant la problématique karstique dans la prévision des crues, ainsi que les données requises (données hydrologiques, hydrogéologiques, ..). Le SCHAPI a sélectionné le bassin du Tarn à Millau suite à une demande du SPC Tarn-Lot pour une étude sur le tronçon Tarn Amont en 2012 selon cette méthodologie.

Le bassin du Tarn à Millau est un grand bassin de plus de 2100 km² et comprend 3 sous-bassins (Le Haut Tarn, la Dourbie, et la Jonte) pour un seul tronçon réglementaire.

Le premier objectif de cette étude est tout d'abord une meilleure compréhension du rôle du karst sur le fonctionnement hydrologique du Tarn lors des plus fortes crues. En effet, le Tarn prend naissance sur le relief des Cévennes (la zone de socle) où régulièrement des pluies abondantes et de très fortes intensités engendrent des épisodes de crue extrêmes qui vont se propager au sein des Grands Causses (la zone karstique sur la partie aval). Les karsts modifient les écoulements de surface par des échanges karst-rivière complexes et méconnus. Il est donc important de mieux définir son influence sur la dynamique de crue.

Le second objectif est d'identifier les déterminants principaux à la genèse des crues les plus fortes sur ce bassin karstique et de proposer un Indicateur Karst permettant de mieux estimer le débit de pointe à Millau sur la base des prévisions de pluie fournies au SPC.

Pour cela, sur la base de chroniques hydrologiques et hydrogéologiques, il est nécessaire de caractériser les processus de crue et de définir un schéma de fonctionnement des échanges karst – rivière. Le rôle écrêteur et/ou contributeur aux crues extrême doit être identifié. Les résultats d'une modélisation qui reprend l'ensemble des grands processus et leur variabilité spatiale permettront de valider ce schéma de fonctionnement et de proposer un outil de prévision pour la gestion de la vigilance.

2. Présentation du site et des données disponibles

2.1. SITE D'ETUDE ET MODELE CONCEPTUEL

2.1.1. Présentation du bassin du Tarn à Millau

Le bassin du Tarn à Millau se situe au croisement des départements de l'Aveyron, de la Lozère et du Gard sur une superficie de plus de 2100 km². Le Tarn possède deux affluents principaux : la Dourbie et la Jonte (Illustration 1).

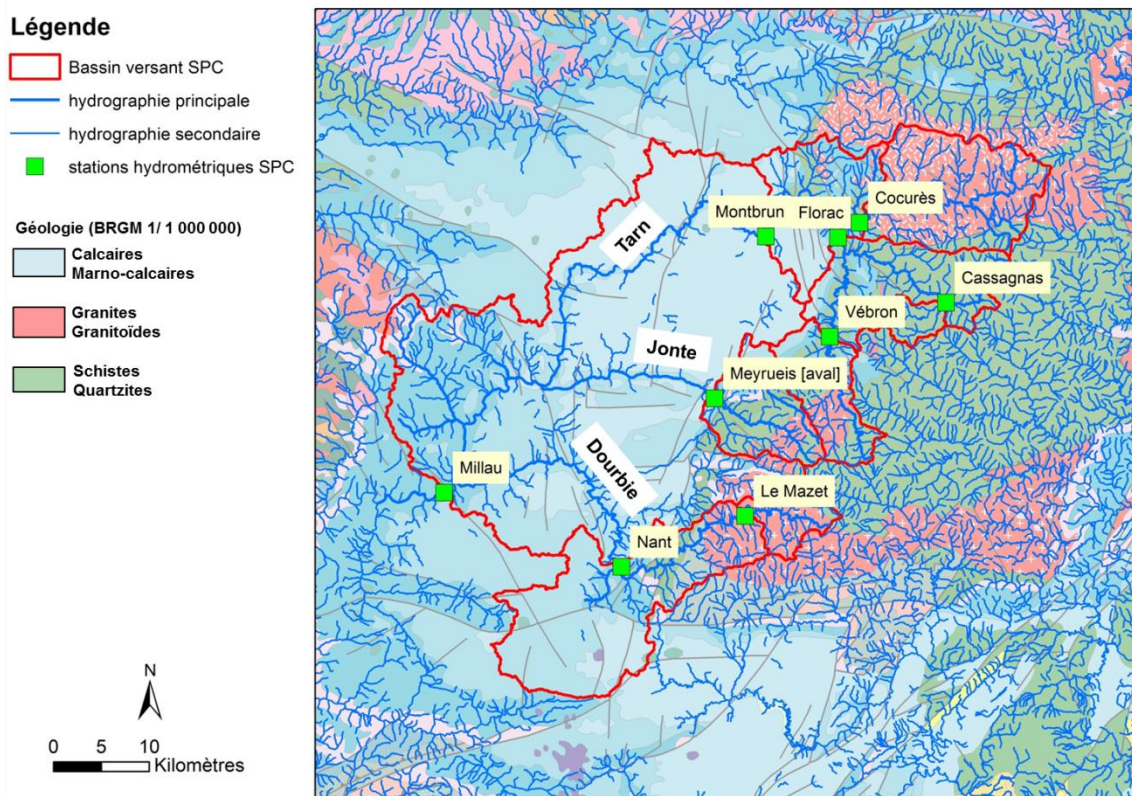


Illustration 1. Bassin du Tarn à Millau et stations SPC sur fond géologique (BRGM 1/1 000 000)

La partie amont du bassin se situe sur les reliefs cévenols incluant le flanc ouest de l'Aigoual (1567 m) et comprend une structure de réseau hydrographique ramifiée, typique des bassins sur substrat peu perméables et pentus. Dans sa partie intermédiaire et aval, le réseau hydrographique traverse la région des Grands Causses au travers de gorges profondes (400 à 500 m). Le réseau est uniquement composé du

Tarn et de ses deux affluents principaux, la Jonte et la Dourbie, car sur les plateaux des Causses, les écoulements superficiels sont nuls ou temporaires, ou bien localisés aux formations marneuses en aval de résurgences.



Illustration 2. Stations SPC du Tarn à Millau (à gauche) et de la Dourbie à Nant (à droite)

Le contexte géologique du bassin du Tarn (Illustration 1) est marqué par les deux grands types de formations cristallines et carbonatées à l'origine d'un fonctionnement hydrologique particulier pour chaque zone hydrogéomorphologique :

- **zone de socle (31%)** : à l'est les terrains cristallins (granite, granitoïdes, schistes, et quartzites) des Cévennes (formations en rouge et vert sur la carte géologique). Ces terrains regroupent des formations altérées en surface et abritant des aquifères localisés et de faible épaisseur. Le réseau hydrographique est pérenne avec un chevelu relativement dense. Les vallées sont étroites avec des pentes du cours d'eau qui atteignent localement 30%. Cette zone de socle en tête de bassin apporte un débit conséquent en crue.
- **zone de karst (69%)** : au centre et à l'ouest, les formations carbonatées (calcaires, marno-calcaires, dolomies) du Jurassique des Grands Causses (formations en bleu sur la carte géologique). Ces formations sont globalement tabulaires avec une faible déclivité ouest, et compartimentées par de grands accidents majoritairement ouest-est et nord-sud. Le réseau hydrographique est réduit aux affluents principaux qui dessinent des gorges profondes (gorges du Tarn, de la Jonte, de la Dourbie). Au contact socle/karst, de fortes pertes du débit issu du socle sont visibles et engendrent dans certaines vallées un assèchement complet en étiage (ex. des gorges de la Jonte en aval de Meyrueis et de la vallée du Trévezel, affluent de la Dourbie). Le débit augmente à nouveau progressivement vers l'aval en drainant les Causses. Bérard (1987) note que, à partir des débits moyens mensuels sur le tronçon Montbrun-La Muse, le karst apporte jusqu'à 50% des écoulements du Tarn.

Au niveau du bassin du Tarn qui draine majoritairement des formations carbonatées, l'hydrosystème karstique est dit binaire (Illustration 3), comprenant une partie de son bassin d'alimentation sur une zone non karstifiable (socle à l'amont) et concentrant une partie de l'infiltration au niveau du réseau hydrographique. Les proportions socle amont et karst aval sont d'environ 1/3 – 2/3 sur le Tarn à Millau.

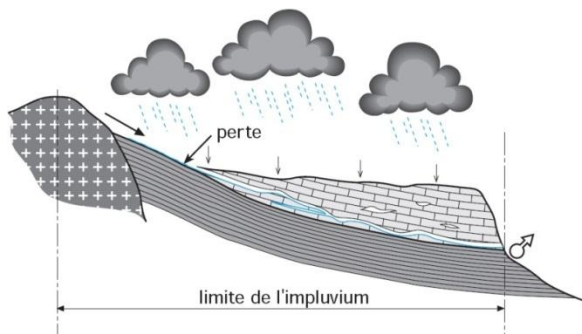


Illustration 3. Karst binaire (Marsaud, 1996)

2.1.2. Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique des Grands Causses

Les Grands Causses situés sur l'illustration 4 sont des plateaux calcaires et dolomitiques fortement karstifiés. Les altitudes les plus élevées se situent sur le Causse Méjean à plus de 1200 m. Ces plateaux sont découpés par une série de gorges profondes de plus de 400 m de profondeur.

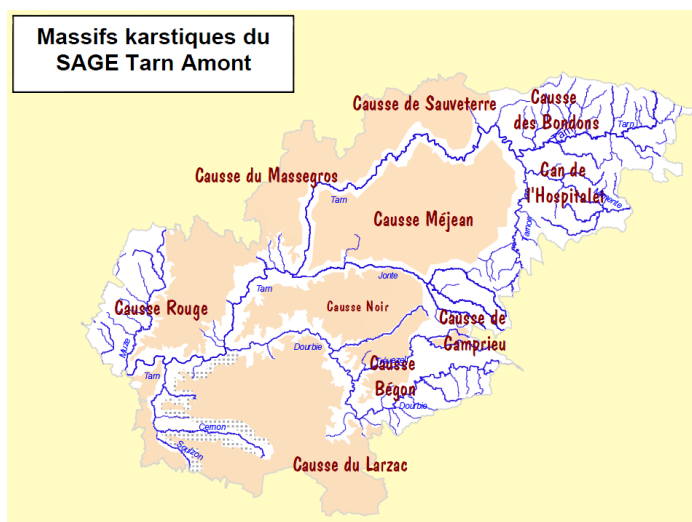


Illustration 4. Grands Causses sur le bassin du Tarn à Millau (d'après SAGE Tarn amont)

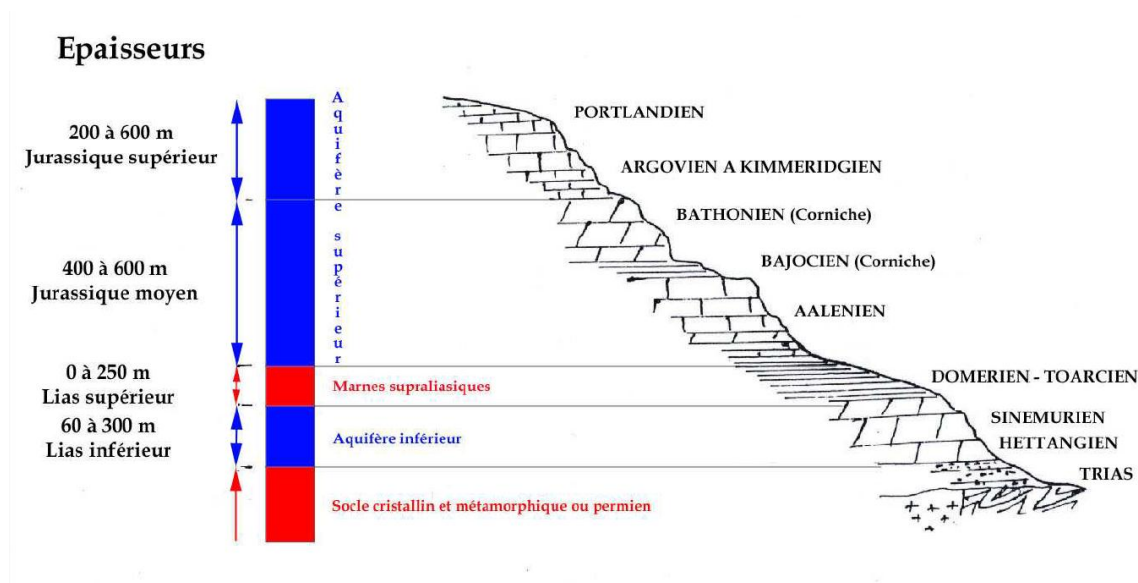


Illustration 5. Log géologique des Grands causses et localisation des principaux aquifères et aquicludes (PNRGC, 2006, d'après Bérard, 1987)

La coupe hydrogéologique type des Grands Causses (PNRGC, 2006) reproduite à l'illustration 5 montre deux séries aquifères, une supérieure et l'autre inférieure, séparées par les marnes du Lias :

- l'unité supérieure de plus de 400 m d'épaisseur correspond aux formations calcaires, marno-calcaires et dolomitiques de l'Aalénien au Portlandien. Affleurant sur toute la zone de Causse, c'est l'unité aquifère principale du secteur des Grands Causses.
- l'épaisseur des séries marneuses du Lias est très grande vers la confluence Tarn et Jonte (~ 250 m), et sur le Causse de Sauveterre ; elle se réduit sur les bordures Nord-Est et vers l'Est (Bérard, 1987). Plusieurs auteurs supposent une connexion possible entre aquifère supérieur et inférieur par le rejeu de failles provoquant localement un amincissement voir une disparition totale du toit marneux (Bérard, 1987 ; PNRGC, 2006),
- l'unité inférieure des calcaires et calcaires dolomitiques de l'Hettangien-Sinémurien de 60 à 300 m d'épaisseur repose par l'intermédiaire du Trias sur le substratum granitique et schisteux que l'on peut supposer imperméable. Il affleure au contact socle/Causse en aval de Florac,

Les systèmes karstiques qui vont contribuer au réseau du Tarn se situent donc principalement dans l'unité supérieure, c'est-à-dire les formations du Jurassique moyen et supérieur. Au cœur des gorges qui découpent les Causses, une multitude de sources sont le témoin des apports des karsts au réseau hydrographique. Les sources de l'Esperelle (Illustration 6), du Durzon sur le Causse du Larzac, et de la Burle et Beldoire sur le Causse de Sauveterre sont les principales. Cependant, ces sources ne

sont que la partie visible des apports des Causses. Des émergences dans le lit du cours d'eau sont nombreuses sur la partie Haut-Tarn.



Illustration 6. Source de l'Esperelle

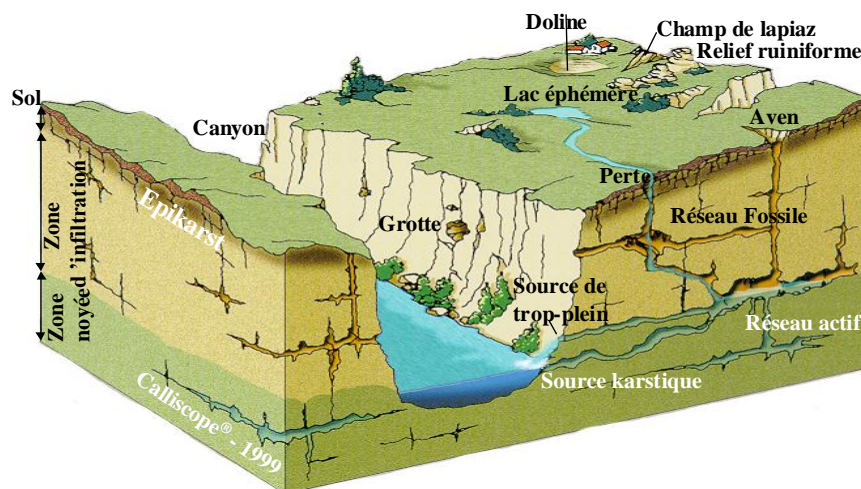


Illustration 7. Schéma hydrogéomorphologique des karsts des Grands causses

A l'échelle du bassin du Tarn à Millau, nous pouvons donc conceptualiser les systèmes karstiques avec les propriétés suivantes (Illustration 7) :

- une zone non saturée très épaisse jusqu'à 500 m d'épaisseur à l'image de la profondeur des gorges qui découpent les Causses,
- une zone saturée conséquente permettant de soutenir le débit de base des cours d'eau, notamment dans la partie aval du bassin
- une karstification bien développée comme en témoigne le paysage karstique (sources, dolines, relief ruiniformes, avens, etc.).

Ce constat général n'implique pas un fonctionnement similaire pour les différents systèmes karstiques sur les Causses. Des études hydrodynamiques et hydrochimiques

sur différentes sources du Causse du Larzac (Plagnes, 1997 ; Pinault et al., 2001) montrent bien les spécificités de chacune.

2.2. DONNEES SPATIALES

L'acquisition des données spatiales de base a porté sur :

- La topographie : IGN 1/25000
- La géologie : carte géologique BRGM 1/1 000 000 et 1/50 000
- Le réseau hydrographique : BD CARTHAGE
- Les émergences : portail ADES

Les données spatiales vont permettre de délimiter les bassins d'alimentation des différents systèmes hydrologiques de la zone d'étude. Sur substrats peu perméables comme la zone de socle, la limite topographique est un contour cohérent des systèmes hydrologiques. Mais sur substrats fortement infiltrants comme les formations carbonatées karstifiées, c'est le bassin hydrogéologique qui doit être considéré pour délimiter l'impluvium. Les limites des bassins d'alimentation des systèmes karstiques sont difficiles à définir car elles dépendent de la structure géologique (pendage des couches, niveaux imperméables, fractures) et de l'état de karstification des formations (développement du réseau de drainage, géométrie des axes de drainage). Ces informations sur le souterrain sont difficiles à obtenir, et dans la plupart des cas, ce sont les données de traçage artificiel – qui renseignent sur les connections entre surface et souterrain - associées aux données géologiques qui sont utilisées.

Dans le cas de cette étude, les données hydrogéologiques ont été compilées à partir des données de traçage et de limites d'unités hydrogéologiques définies selon les dires d'experts (Illustration 8). Les données de traçages présentées en Annexe 1 sont issues des rapports suivants :

- Causse du Larzac : d'après Ricard et Bakalowicz (1996) ; PNRGC (2011),
- Causse Noir : d'après Ambert et al. (1994) ; et les données non publiées du PNRGC,
- Causse Méjean : d'après Bérard (1987),
- Causse de Sauveterre Ouest (ou Causse de Masegros – Séverac) : d'après Bérard (1987) et PNRGC (2006)
- Causse de Sauveterre Est : d'après Bérard (1987) et Dörfliiger et Meus (2006),
- Causse Rouge : d'après Braneyre et al. (1998).

Le bassin hydrologique calculé pour cette étude comprend alors le bassin topographique sur la zone de socle, et le bassin hydrogéologique sur la zone karstique (Illustration 8). Ainsi il totalise 2385 km², soit une surface augmentée de 11% par rapport au bassin topographique (2144 km²) généralement attribué pour les études à Millau. Cette augmentation est principalement due au rattachement du système karstique de Fontmaure/Beldoire au nord-ouest sur le Causse de Sauveterre est, et à l'agrandissement du bassin au sud sur le Causse du Larzac pour tenir compte des zones de recharge de l'Esperelle et du Durzon.

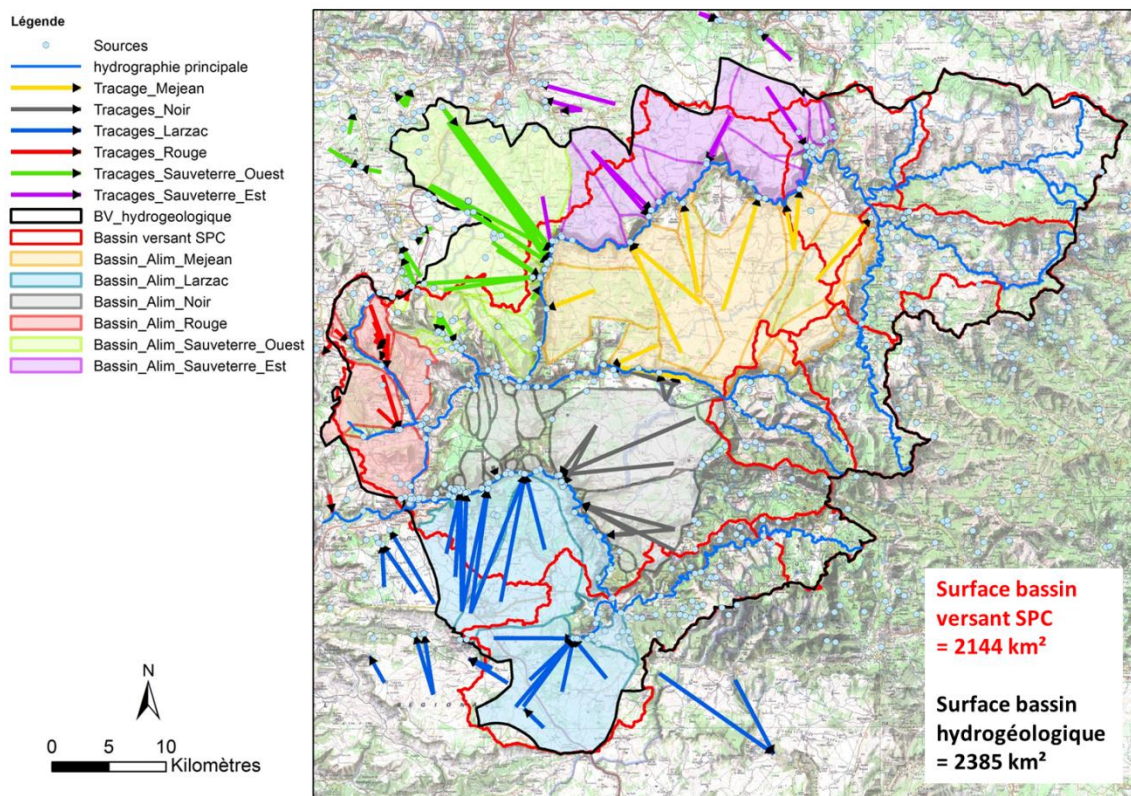


Illustration 8. Compilation des données de traçage et des unités hydrogéologiques sur fond topographique (IGN 1/100 000).

2.3. DONNEES TEMPORELLES

2.3.1. Généralités

Les données climatiques sont limitées aux informations de précipitations (pluie, neige) fournies par Météo-France. Nous n'avons pas retenu celles des stations SPC car elles sont situées au niveau des stations hydrométriques en fond de vallée, où les effets de relief peuvent fortement perturber localement les intensités et cumuls pluviométriques. Les données de hydrologiques et hydrogéologiques ont été collectées auprès de nombreux organismes, selon qu'elles caractérisent des eaux de surface (réseau hydrographique du bassin du Tarn amont) ou des eaux souterraines (piézométrie en forage ou au niveau des vasques des sources et suivi des principaux exutoires karstiques). La description des stations s'appuie sur une distinction entre les stations hydrologiques d'une part, caractérisant les eaux de surface au sein du réseau hydrographique du Tarn sur la Jonte, la Dourbie, la Mimente ou le Tarnon, et les stations hydrogéologiques d'autre part, dédiées au suivi de sources drainant les différents causses calcaires.

L'ensemble de la collecte des données au pas de temps journalier couvre la période 1998-2012. Seuls les épisodes pluie-débit sélectionnés par la suite à partir des données journalières ont été collectés au pas de temps horaire.

2.3.2. Données de pluie

15 postes pluviométriques ont été sélectionnés pour couvrir au mieux le bassin d'alimentation (bassin hydrogéologique) du Tarn à Millau. Ces stations ont été renumérotées de 1 à 15 pour les besoins de l'étude (Illustration 9).

Id	Numéro	Nom	Latitude	Longitude	Altitude (m NGF)
1	48094001	LE MASSEGROS	44°18'30"N	3°10'36"E	873
2	12145001	MILLAU	44°07'06"N	3°01'06"E	714
3	12063003	CAVALERIE	43°59'12"N	3°10'54"E	795
4	48176002	ST-PIERRE-DES-TRIEPIERS	44°14'42"N	3°18'12"E	929
5	48146002	STE ENIMIE	44°21'48"N	3°24'42"E	480
6	30297001	ST SAUVEUR CAMPRIEU	44°07'06"N	3°28'24"E	1107
7	30009001	ALZON	43°58'42"N	3°26'36"E	611
8	48069001	GATUZIERES_SAPC	44°11'42"N	3°29'54"E	965
9	48186001	LA SALLE PRUNET	44°18'54"N	3°39'00"E	903
10	48130002	ROUSSES_SAPC	44°12'24"N	3°35'00"E	812
11	30339006	VALLERAUGUE	44°04'48"N	3°38'00"E	360
12	30339001	MONT AIGOUAL	44°07'12"N	3°34'48"E	1567
13	48027003	LE BLEYMARD	44°27'06"N	3°44'24"E	1418
14	48020003	BASSURELS	44°11'54"N	3°37'54"E	1042
15	48171001	ST MARTIN DE LANSUSCLE	44°12'24"N	3°46'06"E	620

Illustration 9. Liste et références géographiques des postes pluviométriques de la base climathèque Météo-France

2.3.3. Données de débit

a) Stations SPC

Neuf stations hydrométriques sont suivies par le SPC Tarn Lot sur le bassin du Tarn en amont de Millau :

- Station SPC 440 de Millau sur le Tarn
- Station SPC 441 de Nant sur la Dourbie
- Station SPC 442 de Meyrueis sur la Jonte
- Station SPC 443 de Montbrun sur le Tarn
- Station SPC 444 de Florac sur le Tarnon
- Station SPC 445 de Vébron sur le Tarnon
- Station SPC 447 de Cassagnas sur la Mimente
- Station SPC 448 de Cocurès sur le Tarn
- Station SPC 449 du Mazet sur la Dourbie

Les stations 442, 444, 445 et 447 ont fait l'objet de rapports rédigés par le CETE de Bordeaux décrivant les courbes de tarage (rapports SPC Tarn Lot, 2012a, b, c). Pour les autres stations, des relations provisoires fournies par la DREAL Languedoc-Roussillon (station 448) ou Midi-Pyrénées (stations 440, 441, 443 et 449) ont été utilisées.

Les 9 barèmes hauteur/débit retenus pour cette étude ont été fournis dans leur version provisoire d'août 2012. Les débits ont été estimés par interpolation linéaire entre chaque point du barème.

Comme cette étude porte sur le rôle des zones karstiques dans la modification des écoulements de crue, nous ne nous sommes pas intéressés aux trois stations les plus amont sur le socle (Vébron, Cassagnas, Mazet).

b) Stations hydrométriques complémentaires sur le réseau hydrographique

Deux autres stations issues de la Banque Hydro ont été ajoutées dans la base de données pour obtenir des informations sur l'évolution hydrologique du Tarn et de la Dourbie sur des tronçons isolant des formations karstiques :

- Station DDT48 n°03141010 de Mostuéjols sur le Tarn, « La Muse »
- Station DREAL Midi-Pyrénées n°03394030 sur la Dourbie, « Massebiau »

c) Stations hydrogéologiques (sources et piézomètres)

Il n'existe pas de suivi quantitatif des eaux souterraines sur la partie socle du bassin du Tarn.

Des données de hauteur d'eau ont été récupérées auprès du PNRGC sur sept stations comptabilisant des débits de sources karstiques :

- Fontmaure, n° 03130110
- Beldoire, n° 03130120
- Rouveyrol, n° 03140110
- Mas Lafont n° 03140120
- Font Liane, n° 03237910
- Esperelle, n° 03395010
- Durzon, n° 03335010

A l'exception du piézomètre de Font-Liane, des barèmes de conversion hauteur/débit ont été construits par le PNRGC pour chaque station. Ceux-ci ont été utilisés pour reconstituer par interpolation linéaire des chroniques horaires et journalières de débits entre 1998 et 2012.

Les suivis réalisés par le BRGM pour le réseau patrimonial ont permis d'ajouter deux points sur la partie amont des Grands-Causse :

- Source de Burle, BSS 08866X0047
- Résurgence de la Cenarette, BSS 08866X0059

Pour ces deux stations, des courbes de tarage provisoires fournies par le BRGM SGR LRO ont été utilisées.

d) Synthèse des données hauteur/débit

L'illustration 10 récapitule l'ensemble des données issues des stations hydrologiques et hydrogéologiques.

Nom	Longitude	Latitude	Date Début	Date Fin	% lacunes	Durée (an)
Véron	3,5789	44,2379	01/01/1998	04/06/2012	8	13,3
Cassagnas	3,7308	44,2696	01/01/1998	04/06/2012	11	12,83
Florac	3,5903	44,3313	01/01/1998	04/06/2012	10	13,03
Cocures	3,6185	44,3457	01/01/1998	04/06/2012	10	13,01
Montbrun	3,4962	44,3330	01/01/1998	04/06/2012	10	12,99
Muse	3,2224	44,2105	01/01/1998	31/12/2011	0	13,99
Meyrueis	3,4288	44,1801	01/01/1998	04/06/2012	12	12,63
Le Mazet	3,4662	44,0701	31/03/2004	04/06/2012	4	7,88
Nant	3,3042	44,0226	01/01/1998	04/06/2012	6	13,55
Massebiau	3,1294	44,1017	01/01/1998	01/09/2012	5	13,89
Millau	3,0756	44,0923	01/01/1998	04/06/2012	11	12,78
Burle	3,4101	44,3679	10/02/2005	31/05/2012	9	6,63
Cenarette	3,3835	44,3344	01/05/2007	07/06/2012	7	4,76
Fontmaure	3,2393	44,2977	27/09/2002	27/06/2012	12	8,55
Beldoire	3,2359	44,2877	19/09/2002	22/02/2011	26	6,21
Rouveyrol	3,2264	44,2766	27/09/2002	27/06/2012	18	7,95
Mas de Lafont	3,2228	44,2200	14/11/2002	24/04/2012	11	8,42
Font Liane	3,0693	44,1559	25/09/2001	19/11/2008	5	6,79
Durzon	3,2857	43,9969	01/01/2001	07/06/2012	13	9,97
Esperelle	3,2094	44,1215	06/11/1998	07/06/2012	2	13,25

Illustration 10. Inventaires des données horaires de hauteur et de débit

Les Illustration 11 et Illustration 12 présentent le chronogramme associé aux données de débits horaires respectivement pour les stations hydrologiques et hydrogéologiques.

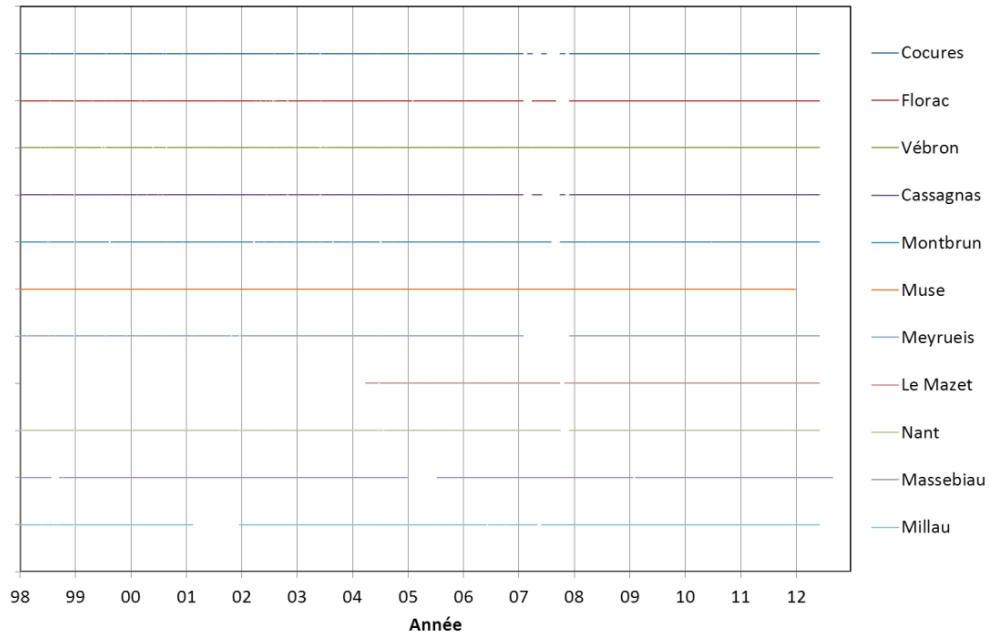


Illustration 11. Chronogramme des données horaires de hauteur mesurées aux 11 stations hydrologiques

Pour la source de Rouveyrol, des travaux d'aménagement ont modifié la relation hauteur/débit, et il n'est donc pas possible pour le moment d'avoir des données de débits après 2010. Pour les autres stations, toutes ces données ont été converties en débit horaire.

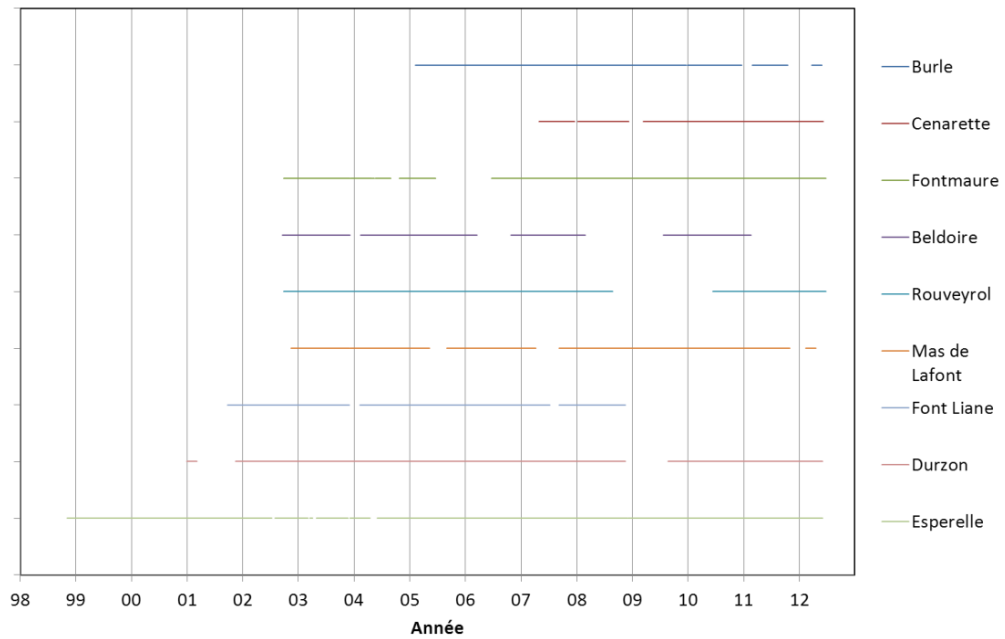


Illustration 12. Chronogramme des débits horaires estimés aux 9 stations hydrogéologiques

L'illustration 13 présente l'ensemble du réseau de mesure qui a été utilisé pour constituer la base de données, tout en visualisant les stations relatives aux domaines de socle (en rouge et vert) et aux domaines sédimentaires (en bleu), ce dernier comprenant les formations karstiques traversées par le Tarn.

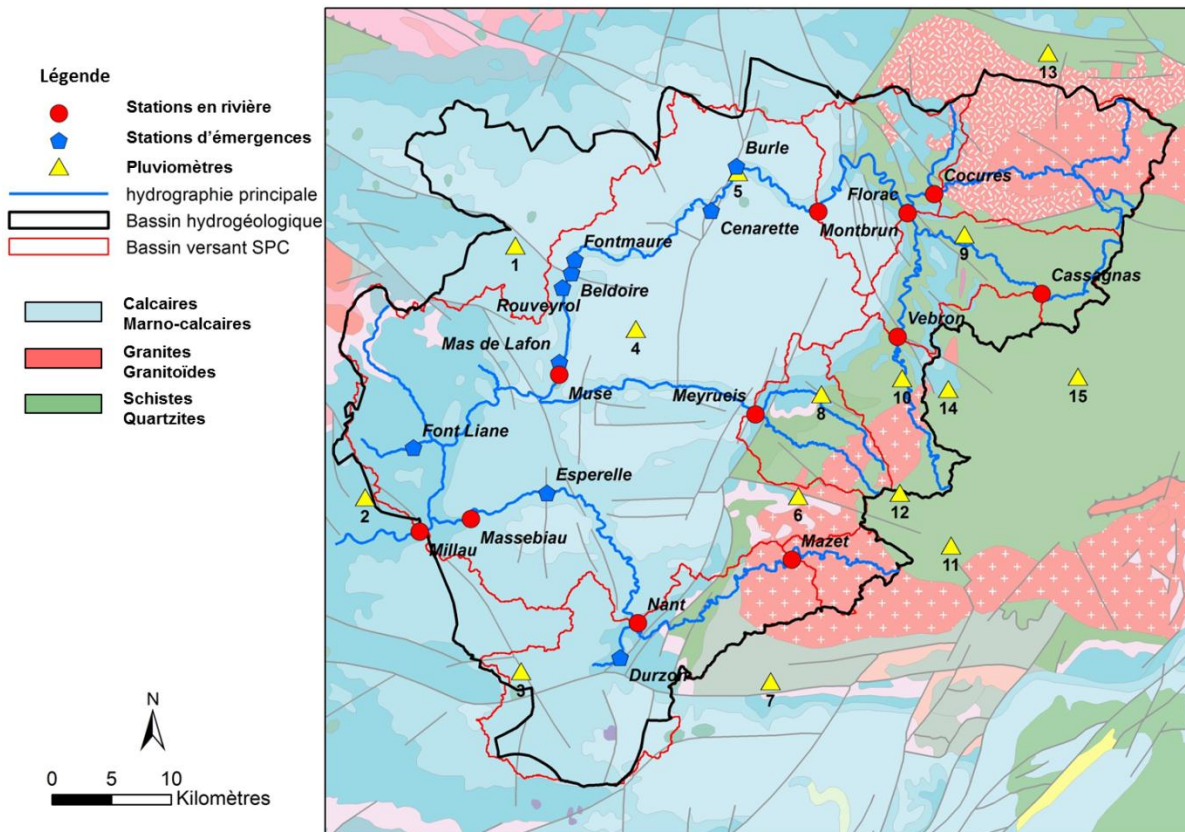


Illustration 13. Cartographie du réseau de mesure sur fond géologique (BRGM 1/1 000 000)

2.3.4. Remarques sur la précision des données collectées

a) Précision temporelle

L'ensemble des données horaires a été converti dans le système horaire UTC. Pour les stations du SPC, la conversion des données initialement en heures légales a pu générer quelques imprécisions pour les données anciennes (jusqu'en 2008) pour la semaine qui suit les dates légales de changement d'heure, car la date et l'heure exacte du changement d'heure n'est pas connu. Pour les stations « Muse » et « Marsebiau », les données ont été assimilées à des données en heure UTC, sans que cette information soit disponible. Il en va de même pour les données de hauteur pour les stations hydrogéologiques du réseau patrimonial (« Burle » et « Cenarette »).

b) Extrapolation des courbes de tarage

L'ensemble des barèmes hauteur/débit utilisés présentent des grandes incertitudes sur les débits de pointe. Cette incertitude est difficile à évaluer et dépend de chaque station. Il convient de garder un regard critique sur les débits de pointes présentés dans ce travail.

Par ailleurs, certaines stations suivies par le SPC n'ont pour vocation que de caractériser les hautes eaux. L'effort de construction des courbes de tarage est concentré sur les hauts débits, ce qui signifie que les débits d'étiage sont extrapolés. Il s'agit des stations de Montbrun et de Nant, les autres stations du SPC étant des stations mixtes, donc également jaugées en basses eaux.

2.3.5. Sélection des épisodes pluie-débit

A partir des données pluie et débit journalières, une sélection d'évènements a été effectuée en s'appuyant sur la vérification d'au moins un des trois critères suivants :

- Débit journalier supérieur à 300 m³/s à Millau
- Pluie journalière moyenne sur le bassin du Tarn en amont de Millau supérieure à 75 mm
- Cumul sur 10 jours de cette pluie moyenne journalière supérieur à 150 mm

Ces critères ont été choisis afin de sélectionner les crues les plus importantes, mais aussi les crues relativement faibles en réponse à des épisodes pluvieux intenses et/ou de longue durée. Cette procédure a permis d'isoler 29 évènements pluie/débit sur la période 1998-2012 sur la base de données journalières. Les données horaires ont ensuite été collectées sur ces 29 périodes présentés en Annexe 2.

A partir de ces évènements sélectionnés au pas de temps journalier, une analyse plus fine des épisodes de pluie et des dynamiques de crue a permis d'isoler 18 évènements caractérisés par un seul pic ayant une structure de pluie « simple » sans intermittence associé à un pic de crue. Douze autres évènements avec plusieurs pics ont été définis.

Les évènements caractérisés par un seul pic vont permettre de caractériser les pluies, les dynamiques de crue, et les relations pluie-débit de manière cohérente. Le modèle sera calé sur ces épisodes, et sera validé sur les évènements avec plusieurs pics.

3. Modélisation

3.1. DESCRIPTION DU MODELE

3.1.1. Structure générale

L'objectif de la modélisation est de simuler la propagation de l'onde de crue dans le réseau hydrographique en tenant compte d'apports ou de pertes uniformément réparties sur le tronçon. L'approche est une modélisation semi-distribuée (Illustration 14) découpant l'espace de manière simple sur les principaux cours d'eau du réseau hydrographique.

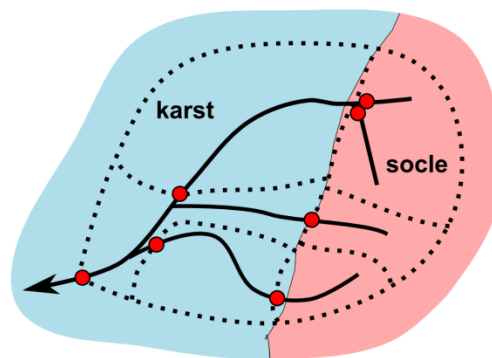


Illustration 14. Découpage en sous-bassins pour un modèle semi-distribué.

Chaque sous-bassin fonctionne de manière globale, et comprend en entrée les débits mesurés issus de la zone amont (zone de socle ou sous-bassin amont) et ceux mesurés à l'exutoire. Sur chaque sous-bassin, l'objectif du modèle est :

- de simuler à partir d'un modèle global adapté aux systèmes karstiques le débit (apports ou pertes) de la zone des Causses au réseau hydrographique principal,
- de simuler le débit maximum à l'exutoire en utilisant une fonction de transfert basée sur l'onde diffusante qui propage le débit de la zone de socle (débit amont) et les apports ou pertes latéraux de la zone karstique à travers le réseau hydrographique.

3.1.2. Processus hydrogéologiques sur les sous-bassins karstiques

a) Structure du modèle

La modélisation des écoulements au sein des sous-bassins karstiques est réalisée de manière globale à l'aide d'un modèle à réservoirs (Charlier et al., 2012). Ce modèle présenté en Illustration 15 comprend 3 réservoirs principaux interconnectés. Le réservoir SOL permet de calculer la part de la pluie qui va s'infiltrer dans le système. Celle-ci est alors dissociée en écoulement lent (infiltration diffuse dans la matrice fissurée) dans le réservoir DIFFUS et en écoulement rapide (infiltration dans les conduits karstiques) dans le réservoir CONDUIT. La somme des débits issus de ces deux réservoirs correspond au débit total du système.

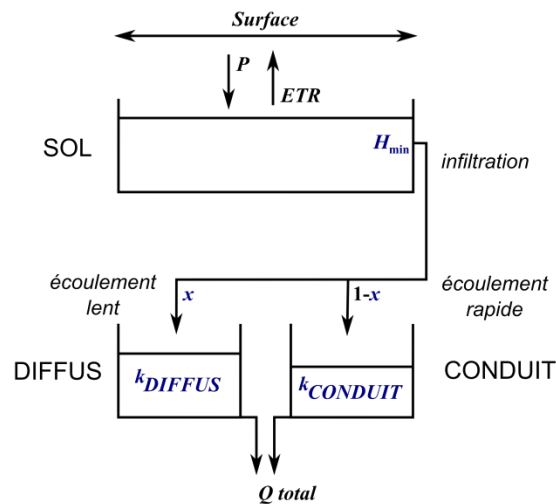


Illustration 15. Modèle hydrogéologique à réservoirs adapté aux systèmes karstiques

Le réservoir SOL stocke l'eau de pluie jusqu'à un seuil H_{min} que l'on peut assimiler à la RFU (Réserve en eau Facilement Utilisable). Si la pluie est en excès par rapport à ce seuil, l'eau s'infiltré dans le système. L'ETR est estimée à partir des données d'ETP et du stock d'eau disponible dans le SOL. Chaque réservoir DIFFUS et CONDUIT a une entrée V_{in} [L³] et une sortie V_{out} [L³]. Le volume d'eau stocké, V , dans le réservoir est calculé selon l'équation suivante :

$$\frac{dV}{dt} = V_{in} - V_{out} \quad \text{avec} \quad V_{out} = k \cdot V$$

où $k[T^{-1}]$ est une constant caractérisant la courbe de récession du réservoir.

Les variations dans chaque réservoir peuvent être assimilées à des variations de la piézométrie au sein du système. Les fluctuations de niveau d'eau simulées pour le réservoir CONDUIT sera utilisé pour les échanges karst – rivière.

b) Paramètres

Les entrées du modèle sont la pluie et l'ETP de l'unité hydrogéologique ou du sous-bassin, et la sortie est le débit calculé qui est comparé à celui mesuré. Les conditions initiales sont i) un volume initial nul dans le sol, ii) un niveau initial dans le réservoir DIFFUS qui est calculé à partir du débit observé avant l'épisode de crue, iii) un niveau initial dans le réservoir CONDUIT égal à 0.

Le modèle comporte 4 paramètres qui peuvent être fixés ou calés. k_{DIFFUS} peut être calculée à partir des courbes de récession du débit mesuré, et une optimisation est à rechercher pour $k_{CONDUIT}$, X , et H_{min} .

3.1.3. Echanges karst - rivière

a) Structure du modèle

Les échanges karst-rivière permettent de simuler la contribution du karst au réseau hydrographique : des apports à la rivière si le karst est en charge, ou des pertes si son niveau de saturation est trop bas.

Une fonction seuil est utilisée pour identifier les périodes d'apport et de pertes. Si le niveau d'eau $h_{CONDUIT}$ dans le karst (réservoir CONDUIT) est inférieur au seuil $h_{échanges}$, la rivière perd une partie de son débit de manière proportionnelle à celui-ci (pour simuler des pertes proportionnelles à la charge existante dans le réseau), et si le seuil est supérieur, le karst apporte un débit latéral au tronçon par une loi de vidange simple.

- Si $h_{CONDUIT} < h_{échanges}$ alors $q(t) = k_{pertes} \times Q_{amont}(t)$
- Si $h_{CONDUIT} \geq h_{échanges}$ alors $q(t) = k_{apports} \times (h_{CONDUIT}(t) - h_{échanges})$

Le débit de contribution du karst à la rivière $q(t)$ peut être soit négatif si le karst fonctionne en pertes ($k_{pertes} < 0$), soit positif s'il fonctionne en apports à la rivière ($k_{apports} \geq 0$).

b) Paramètres

Les paramètres sont le seuil $h_{échanges}$ de partage pertes/apports, et les coefficients de pertes et d'apports k_{pertes} et $k_{apports}$ qui doivent être calés.

3.1.4. Fonction de transfert dans le réseau hydrographique

a) Structure du modèle

Comme notre problématique est de simuler le pic de crue à différentes stations hydrométriques amont et aval, il est important de simuler la propagation de l'onde de crue dans le réseau hydrographique entre chaque station. Un modèle linéaire d'hydrogramme unitaire, basé sur la méthode du noyau d'Hayami (1951) qui est une

résolution de l'équation de l'onde diffusante, a été choisi pour simuler le transfert (Moussa et Bocquillon, 1996). Pour tenir compte des contributions du karst au débit en rivière, nous utilisons la résolution de l'équation de l'onde diffusante qui tient compte d'apports ou de pertes latéraux uniformément répartis sur la longueur du tronçon (Moussa, 1996). Le principe est présentée Illustration 16.

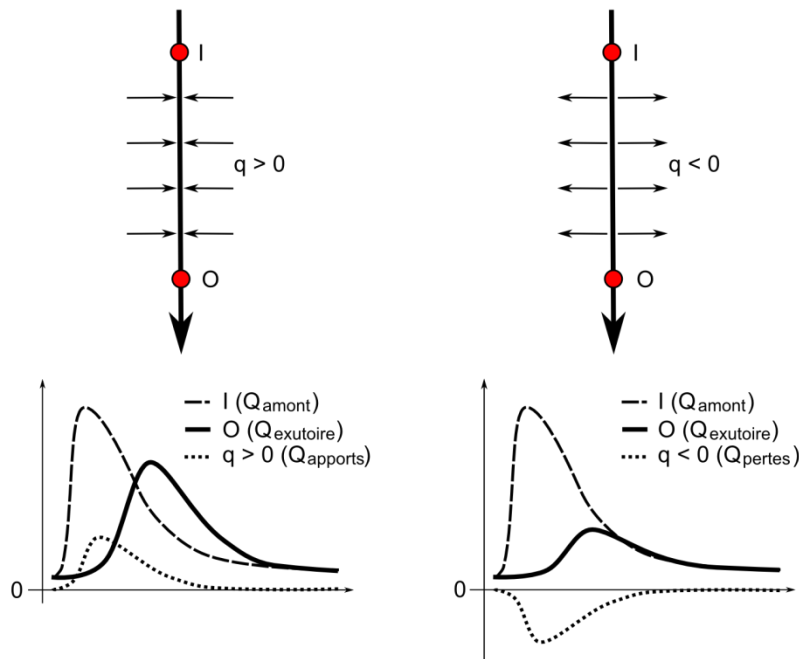


Illustration 16. Propagation de l'onde de crue entre I (inflows) et O (outflows) avec apports ou pertes répartis de manière uniforme sur la longueur du cours d'eau (d'après Moussa, 1996).

Les deux paramètres sont la célérité $C [L T^{-1}]$ et la diffusivité $D [L^2 T^{-1}]$ qui représentent respectivement la vitesse de propagation de l'onde et son étalement.

L'équation de l'onde diffusante dépend des conditions initiales à $t = 0$ et aux limites amont et aval, des caractéristiques géométriques et hydrauliques de la rivière (profil en travers, pente et rugosité) exprimées à travers les relations $C(Q)$ et $D(Q)$, et de la fonction $q(t)$ d'apports ou pertes latéraux selon que $q(t)$ est positif ou négatif. Le terme $q(t) [L^2.T^{-1}]$ représente la distribution latérale des apports ou pertes par unité de longueur.

Dans le cas général où la célérité C et la diffusivité D sont constants sur un tronçon de rivière de longueur L , l'équation de l'onde diffusante admet une solution analytique exacte (Moussa, 1996) :

$$O(t) = \Phi(t) + (I(t) - \Phi(t)) * K(t)$$

Le symbole (*) représente le produit de convolution. $I(t)$ et $O(t)$ sont respectivement l'hydrogramme d'entrée et l'hydrogramme de sortie. $K(t)$ est la fonction « noyau d'Hayami » avec

$$K(t) = \frac{L}{2(\pi D)^{1/2}} \frac{\exp\left(\frac{CL}{4D}\left(2 - \frac{L}{Ct} - \frac{Ct}{L}\right)\right)}{t^{3/2}}$$

$$\Phi(t) = \frac{C}{L_i} \int_0^t (Q_a(\lambda) - Q_a(0)) d\lambda \quad \text{et} \quad Q_a(t) = \int_0^t q(x, t) dx$$

b) Paramètres

La célérité C et la diffusivité D peuvent être tous deux approchés à partir des observations :

$$C \text{ [L T}^{-1}\text{]} = \text{longueur du réseau} / \text{temps de réponse}$$

$$D \text{ [L}^2 \text{T}^{-1}\text{]} = \text{Débit moyen} / (\text{pente} * \text{largeur cours d'eau})$$

Le temps de réponse a été fixé comme le temps de décalage des pics de crue entre l'amont et l'aval, et le débit moyen a été calculé à partir des observations. Les autres paramètres morphologiques du cours d'eau (longueur, pente, largeur) peuvent être estimés à partir de données cartographiques.

3.2. APPLICATION AU TARN A MILLAU

3.2.1. Découpage du bassin

La première étape pour la modélisation des débits sur le bassin est le découpage spatial en unités hydro(géo)logiques (UH) considérées comme homogènes. Les critères utilisés sont :

- la géologie : formations carbonatées ou formations de socle,
- le réseau hydrographique : on suppose que les cours d'eau délimitent deux UH sauf en tête de bassin,
- l'hydrogéologie : le fonctionnement hydrogéologique est considéré comme homogène sur une UH,
- les stations hydrométriques : qui se situent entre deux UH.

Pour relier ces UH, les tronçons du réseau hydrographique principal ont été retenus. L'illustration 17 présente le résultat du découpage du Tarn à Millau en UH et tronçons.

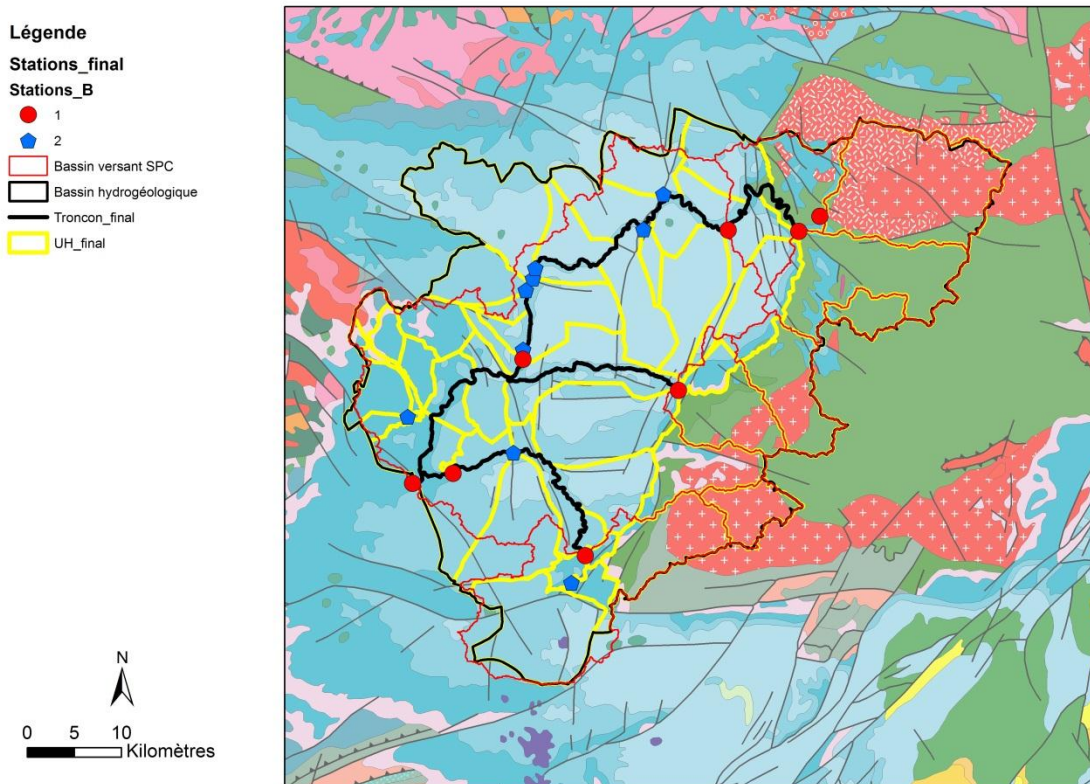


Illustration 17. Découpage en Unités Hydro(géo)logiques et tronçons du bassin du Tarn à Millau

Enfin, les UH ont été regroupées en sous-bassins dont les exutoires sont les stations retenues pour l'étude. Elles sont de deux types :

- les stations situées sur les cours d'eau à la limite socle / karst : Florac, Cocures, Meyrueis, et Nant (de la station de Nant, nous avons soustrait le débit de la source du Durzon qui est un affluent de la Dourbie juste en amont de la station SPC),
- les stations situées sur les cours d'eau de la partie Causse : La Muse sur le Haut Tarn, Massebiau sur la Dourbie, et Millau.
- Les stations des sources karstiques.

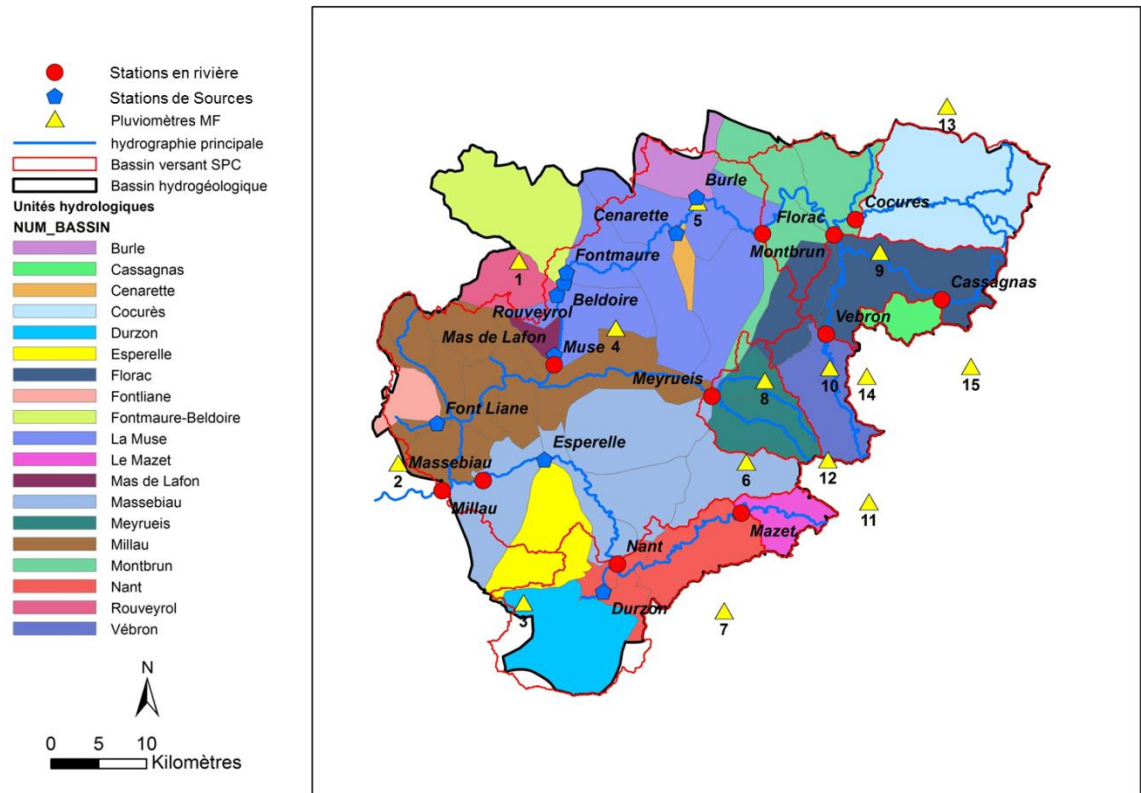


Illustration 18. Sous-bassins et sources karstiques suivies

Ce découpage (Illustration 18) nous amène à considérer un sous-bassin sur le Haut-Tarn à La Muse, un sur la Dourbie à Massebiau, et un sur le Tarn à Millau. Le sous-bassin de la Jonte n'est pas représenté par manque d'une station à son aval juste avant la confluence avec le Tarn.

La répartition spatiale des précipitations pour chaque UH et sous-bassin identifié a été calculée par la méthode des polygones de Thiessen.

3.2.2. Paramétrisation

Le modèle hydrogéologique des systèmes karstiques comporte 4 paramètres. k_{DIFFUS} a été calculé à partir des courbes de récession, et une optimisation a été recherchée pour $k_{CONDUIT}$, X , et H_{min} . Cette optimisation a été réalisée à l'aide de la méthode par essaim de particules ou *Particle Swarm Optimization* (PSO) (Robinson and Rahmat-Samii, 2004 ; Bardole F., thèse BRGM en cours) qui est essentiellement utilisée afin de trouver l'optimum de fonctions non-linéaires.

Fonction ou Réservoir	Paramètre	Signification	Valeur calée manuellement	Valeur calée par optimisation
Modèle hydrogéologique (cf. Charlier et al., 2012)	H_{min}	Seuil minimal de stock d'eau du sol pour l'infiltration	/	Si $Q_{Esperelle\ ini} < 0.85\ m^3/s$ = $-0.074 * Q_{Esperelle\ ini} + 0.056$ Si $Q_{Esperelle\ ini} > 0.85\ m^3/s$ = $-0.009 * Q_{Esperelle\ ini} + 0.055$
	X	Partage des écoulements entre les deux réservoirs Conduit et Diffus	/	Si $Q_{Esperelle\ ini} < 0.85\ m^3/s$ = $-0.600^{**} * Q_{Esperelle\ ini} + 0.440$ Si $Q_{Esperelle\ ini} > 0.85\ m^3/s$ = $-0.150 * Q_{Esperelle\ ini} + 0.542$
	k_{DIFFUS}	Coef. de vidange du réservoir Diffus	A partir des courbes de récession (source de l'Esperelle)	/
	$k_{CONDUIT}$	Coef. de vidange du réservoir Conduit	/	= $-0.0016 * (Q_{Esperelle\ max} - Q_{Esperelle\ ini}) + 0.042$
Echanges nappe - rivière	$h_{échanges}$	seuil pour identifier les périodes d'apport et de pertes	Haut Tarn = Dourbie = Jonte = 0.005 Millau = 0.002	/
	k_{pertes}	Coef. de pertes	-0.2	/
	$k_{apports}$	Coef. des apports	Haut Tarn = 0.025 Dourbie = 0.015 Jonte = 0.02 Millau = 0.015	/
Fonction de transfert dans le RESEAU (cf. Moussa et Bocquillon, 1996)	C	Célérité (Vitesse de propagation dans le réseau)	longueur du réseau / temps de réponse	/
	D	Diffusivité (Etalement de l'hydrogramme de crue)	Débit moyen / (pente * largeur cours d'eau)	/

Illustration 19. Paramètres du modèle.

Les paramètres $h_{échanges}$, k_{pertes} et $k_{apports}$ de la fonction d'échanges karst-rivière ont été calés manuellement.

Les paramètres C et D de la fonction de transfert ont été estimés à partir de la géométrie du réseau hydrographique (données IGN 1/25000), et des débits mesurés. Le temps de réponse a été calculé à partir du décalage des pics $Q_{amont} - Q_{aval}$.

Les paramètres du modèle sont présentés dans l'illustration 19.

3.2.3. Stratégie de calibration

Le modèle nécessite un calage des fonctions de production sur les UH karst. Cela a été testé sur les différentes sources suivies par le PNRGC et le BRGM. La première hypothèse était de définir une paramétrisation sur chaque sous-bassin à partir d'une source qui y était localisée. Cependant, la qualité des données pour les crues sélectionnées (et notamment des courbes de tarage) nous a conduit à utiliser la paramétrisation de la source de l'Esperelle pour toutes les UH du bassin du Tarn à Millau.

Une première version du modèle de transfert a été utilisée sur le Haut Tarn en découpant le tronçon Florac-> La Muse en deux : Florac -> Montbrun et Montbrun -> La Muse pour l'étude des processus de crue.

Le modèle semi-distribué a été appliqué sur l'ensemble du bassin en tenant compte des trois sous-bassins de tête : Haut Tarn (La Muse), Jonte (pas de station), et Dourbie (Massebiau), et le sous-bassin situé à leur aval dont l'exutoire est Millau.

Comme le modèle est utilisé pour simuler correctement les débits de pointe, les performances du modèle sont évaluées sur la base d'une comparaison entre débits observés et simulés. Les critères de Nash et RMSE calculés sur les événements présentés permettent d'évaluer les performances de modélisation de la dynamique des crues.

4. Rôle du karst sur les écoulements de crue

4.1. ANALYSE DES EPISODES DE CRUE

4.1.1. Les pluies

a) Régime pluviométrique

Le régime des pluies sur le bassin du Tarn est très variable spatialement car le bassin s'étend sur près de 2400 km² entre Cévennes à l'amont et Causses à l'aval. Sur les reliefs cévenols, le régime des pluies est marqué par des épisodes de très fortes intensités (plusieurs dizaines de mm en 1 heure) se produisant généralement en automne.

Il existe un fort contraste entre la zone amont des reliefs des Cévennes avec un cumul annuel moyen (1961-1990) de 2200 mm à l'Aigoual, et la zone aval des Causses avec un cumul annuel d'environ 760 mm à Millau. Nous avons comparé dans la suite de l'étude ces deux zones de socle et de karst lors des épisodes de pluie.

b) Cumul par épisodes

L'illustration 20 compare le cumul de pluie sur chaque épisode par secteurs géographiques. Elle exprime la pluie moyenne par secteur en fonction de la pluie moyenne sur l'ensemble du bassin du Tarn. Ainsi, la droite $x=y$ représente une uniformité de la répartition spatiale des pluies entre les deux zones amont et aval.

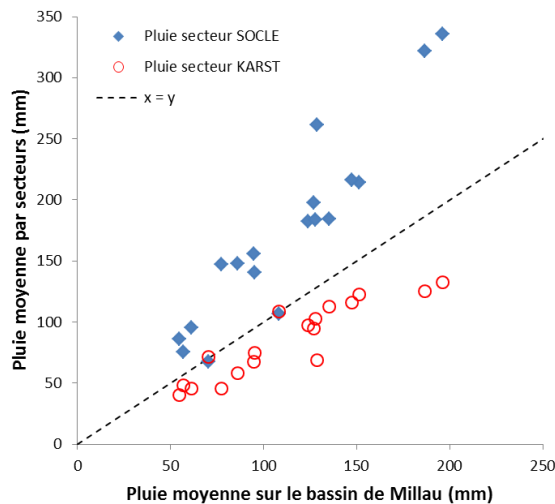


Illustration 20. Comparaison du cumul pluviométrique par épisode entre zone de socle et zone de karst en fonction de la pluie moyenne sur le bassin du Tarn.

On observe que les cumuls de pluie sur la zone de socle (bleu) sont - à part deux épisodes – systématiquement au-dessus de cette droite, au contraire de ceux de la zone karstique (rouge). La répartition des points montre que l'écart entre cumul pluviométrique sur socle et sur karst augmente avec l'augmentation du cumul moyen de l'épisode. Globalement, pour les plus forts épisodes, les pluies sur socle sont près de deux fois supérieures en cumul que celles sur la zone des Causses.

c) Intensités par épisode

Les intensités maximales de pluie P_x sur chacun des épisodes avec un seul pic ont été calculées pour différentes durées. Dans le cas d'épisodes de pluie « simples », c'est-à-dire non étalés dans le temps, cette analyse permet d'étudier la structure de la pluie. Les boîtes à moustache (Illustration 21) représentent la distribution des valeurs maximales d'intensités de pluie pour les durées de 1, 3, 6, 12, 24, et 48h. Plus les boîtes sont aplaties, et plus la variabilité de P_x est faible entre les 18 événements.

Les valeurs de P_x sont exprimées en pourcentage du cumul total P_{tot} de l'épisode. Globalement, sur l'ensemble du bassin, on observe une augmentation de P_x/P_{tot} avec l'augmentation de la durée de calcul des intensités. $P_x 1h$ représente environ 10% du cumul, $P_x 12h$ plus de 50%, et $P_x 24h$ près de 75%. Les mêmes tendances sont observées sur les zones de socle et de karst avec des pourcentages légèrement plus faibles pour la zone des Causses, ainsi qu'une plus forte variabilité pour les durées de 24 et 48h. Ceci permet de conclure que les données de prévisions de pluie à 24h mises à disposition des SPC représentent en moyenne 3/4 du cumul pluviométrique d'un épisode pluvieux.

Le choix des épisodes avec un seul pic qui ont une grande chance d'être de durée inférieure à 24h peut biaiser une étude statistique qui aurait pour but d'étudier l'ensemble des épisodes pluvieux faibles ou élevés en terme de durée et d'intensité. Cependant, pour une étude sur les pluies les plus intenses et générant les plus fortes crues, on peut considérer que les prévisions à 24h sont une base fiable pour la prédiction des crues sur le secteur du Tarn.

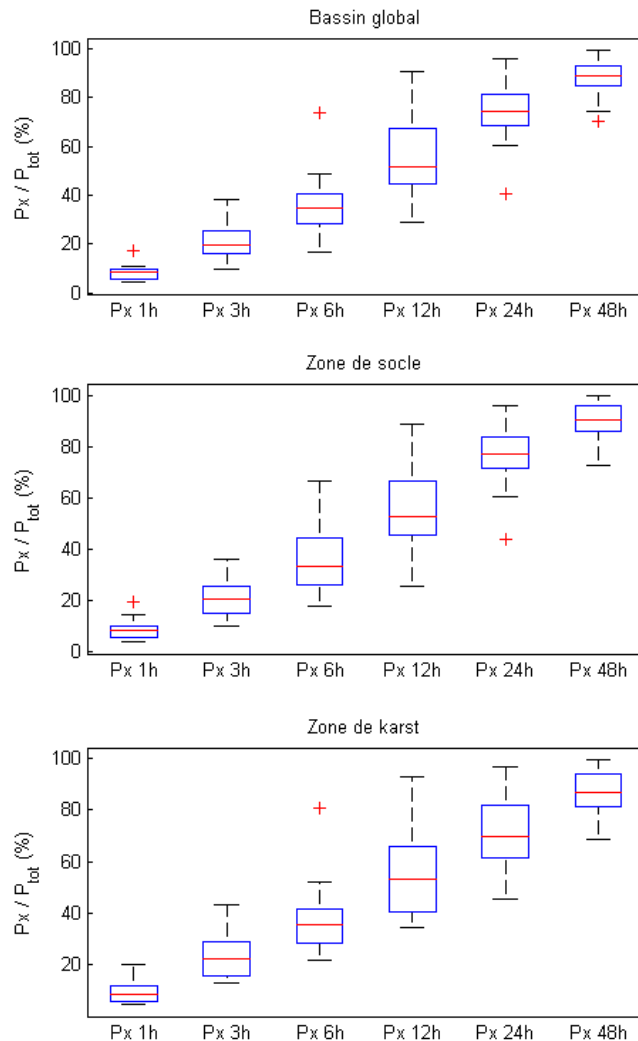


Illustration 21. Boîtes à moustaches sur les intensités maximales de pluie P_x à 1h, 3h, 6h, 12h, 24h, et 48h, exprimées en pourcentage de la pluie totale P_{tot} de l'épisode.

4.1.2. Les écoulements

a) Volumes écoulés et pics de crue

Pour mieux comprendre les écoulements de crue sur le bassin du Tarn, nous nous focalisons sur l'étude des débits instantanés et des volumes écoulés cumulés. Le débit de base (ou initial Q_{ini}) est un indicateur du niveau de saturation de la zone noyée du karst qui peut faire varier la réponse hydrologique dont l'indicateur le plus simple est le débit de pointe (Q_{max}). Les volumes écoulés durant des épisodes avec un seul pic traduisent également la contribution moyenne du bassin. Nous avons alors séparé le volume écoulé total V_{tot} en volume de base V_{ini} et volume de crue V_{crue} .

Crue du 30/09/2000. L'illustration 22 présente les fluctuations des débits Q_{ini} et Q_{max} , et des volumes V_{tot} , V_{ini} et V_{crue} sur les profils en long des trois affluents du Tarn. Cette représentation exprimée en fonction de la surface de l'impluvium permet de voir les contributions relatives des différents tronçons de l'amont vers l'aval quand la surface d'impluvium augmente.

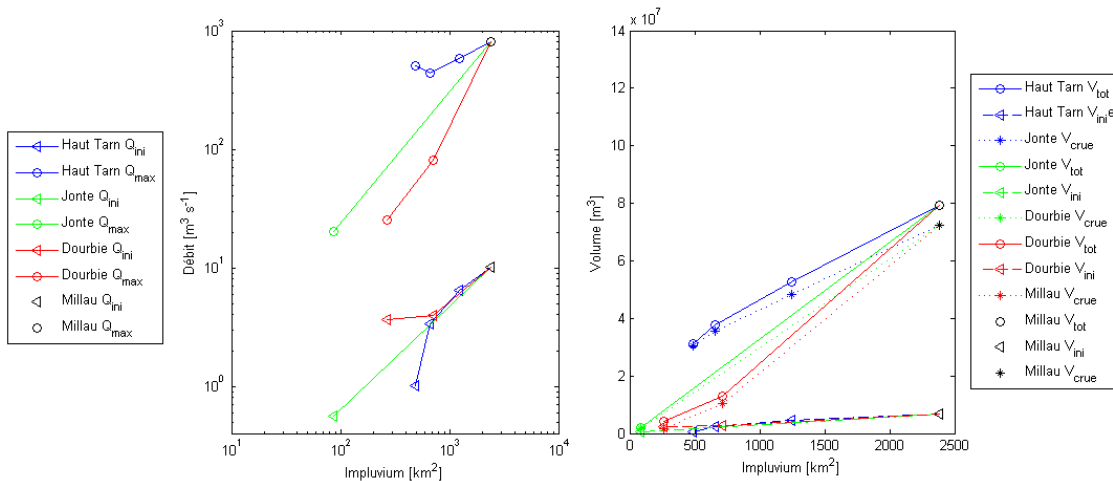


Illustration 22. Profils en long pour la crue du 30/09/2000 des débits de pointe (Q_{max}) et de base (Q_{ini}) et des volumes écoulés pour les trois affluents du Tarn : Haut Tarn en bleu, Jonte en vert et Dourbie en rouge ; les volumes totaux (V_{tot}) sont découpés en volumes de crue (V_{crue}) et de base (V_{base}).

Si l'on regarde le Haut Tarn en bleu, on voit une augmentation du débit de base (Q_{ini}) le long du cours d'eau depuis l'amont (la zone de socle) jusqu'à Millau. L'augmentation de débit est plus importante entre les deux premières stations (entre les stations Florac+Cocures et Montbrun), puis semble linéaire sur le reste du profil vers Millau. Ceci montre un plus fort soutien du débit par l'aquifère karstique sur la zone amont des Causses entre le contact socle-calcaire à l'aval de Florac et la station de Montbrun. Sur ce même affluent, le débit de pointe diminue sur le tronçon le plus amont, puis augmente jusqu'à Millau. L'incertitude qui existe sur les courbes de tarage nous oblige à nuancer l'analyse des variations des débits estimés le long du cours d'eau, mais on voit ici que le tronçon amont écrête en partie la crue, et que les tronçons intermédiaires et aval l'amplifient à nouveau.

Bien que le pic de crue soit écrêté sur la partie amont des Causses, les volumes écoulés (V_{tot} , V_{crue} et V_{base}) augmentent de manière linéaire à travers les Causses. Cette augmentation de V_{crue} concomitante d'un écrêtement puis d'une amplification de Q_{max} s'explique par l'étalement de la crue.

Sur la Dourbie - en rouge sur l'illustration 22 - ce sont les débits de base (Q_{ini}) qui renseignent sur une faible contribution du karst au soutien à l'étiage : il n'y a quasiment pas d'augmentation de Q_{ini} entre les deux premières stations (Nant et Massebiau).

La Jonte – en vert sur l'illustration 22 – est représentée à titre d'information. L'absence de station hydrométrique sur les Causses ne permet pas de discuter du rôle du karst sur les crues de cet affluent.

Crue du 23/12/2010. L'illustration 23 présente les fluctuations des débits et des volumes de manière identique. Les échelles en abscisse et ordonnée sont conservées pour mieux comparer les deux épisodes.

Lors de cet épisode, les débits de base Q_{ini} sont plus forts indiquant un niveau de remplissage des karsts plus élevés (hautes eaux).

Sur le Haut Tarn – en bleu – le débit de base augmente fortement sur la zone amont, puis semble quelque peu diminuer et augmenter sur la partie aval du fait des confluences avec la Dourbie et la Jonte. Il est intéressant de noter que les plus fortes contributions du karst hors périodes de crue - c'est-à-dire à l'étiage - se produisent sur la partie amont du Haut Tarn. Comme cet épisode se situe en période de hautes eaux, ceci témoigne d'un faible gradient de nappe sur la partie intermédiaire et aval des Causses lorsque les systèmes karstiques sont proches de la saturation. Les fluctuations des volumes V_{base} écoulés traduisent bien ce comportement.

Les pics de crue (Q_{max}) sont écrêtés sur la partie amont du Haut Tarn, et les volumes de crue V_{crue} sont également en diminution. Ceci traduit l'importance des pertes sur la zone de contact socle/karst.

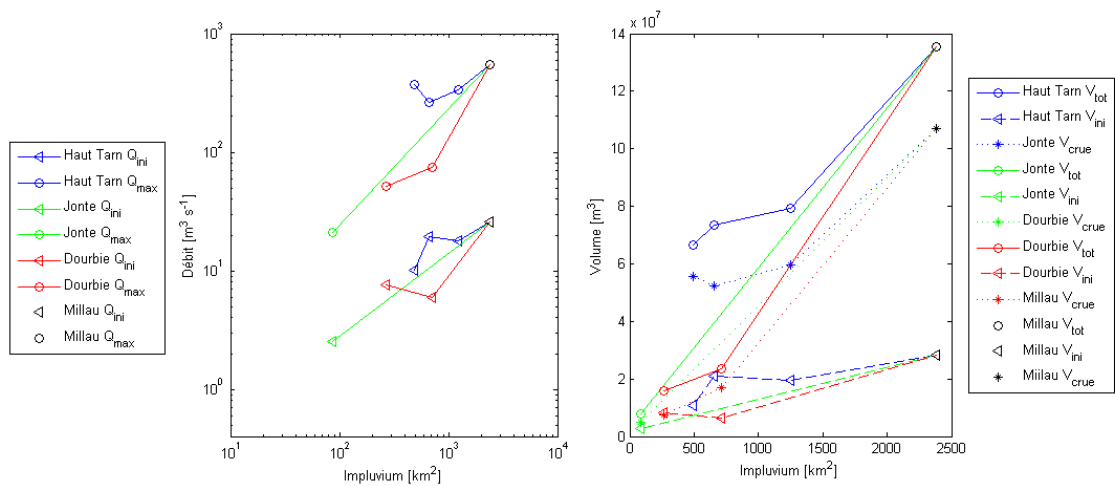


Illustration 23. Profils en long pour la crue du 23/12/2010 des débits de pointe (Q_{max}) et de base (Q_{ini}) et des volumes écoulés pour les trois affluents du Tarn : Haut Tarn en bleu, Jonte en vert et Dourbie en rouge ; les volumes totaux (V_{tot}) sont découpés en volumes de crue (V_{crue}) et de base (V_{base}).

Sur la Dourbie – en rouge – on observe un fonctionnement globalement similaire à la crue précédente (Illustration 22), mais avec une amplitude des crues bien supérieure. Ceci conforte le rôle du remplissage du karst sur la réponse hydrologique des bassins.

Un autre point important est la comparaison des volumes et pics de crue entre affluents. A surface d'impluvium équivalente (c'est-à-dire sur la même verticale sur les illustrations), le Haut Tarn a une réponse hydrologique 2 à 3 fois supérieure en termes de volumes écoulés, alors que les débits de base sont dans la même gamme de valeurs. Ceci est cohérent avec une plus grande surface de socle drainée par le Haut Tarn en amont (491 km²) comparé à la Jonte (87 km²) et à la Dourbie (155 km²). Ainsi, la contribution du socle aux crues de Millau est plus importante pour le Haut Tarn que pour la Jonte et la Dourbie. Inversement, la contribution des zones karstiques risque d'en être donc plus faible.

b) Première analyse des ondes de crue et des apports latéraux sur le tronçon Haut Tarn

Suite à l'analyse des débits instantanés et des volumes écoulés le long du profil des cours d'eau, il est important de mieux caractériser la dynamique des crues et la variabilité temporelle des apports du karst (gain si > 0 ou perte si < 0) au cours de l'épisode.

Nous réalisons une première analyse sur le tronçon Haut Tarn qui comprend les deux stations de Florac et Cocures qui encadrent la zone de socle, une station intermédiaire en aval du contact socle/karst à Montbrun, et la station aval de La Muse. Sur les deux tronçons Socle (Florac+Cocures) -> Montbrun, et Montbrun -> La Muse, il est donc possible de caractériser les apports ou pertes latérales – par l'étude des différences entre 'amont propagé' et 'exutoire observé' - dans la partie amont du karst, puis dans sa partie intermédiaire et aval. L'illustration 24 présente un épisode de crue multiples dont l'intérêt est d'illustrer la réponse hydrologique avant saturation complète du karst (premier épisode) et après saturation (second épisode).

La crue multiple du 16/03/2011 comprend deux épisodes de pluie successifs de 55 et 72 mm en moyenne sur le bassin à La Muse. La variabilité spatiale des pluies est à prendre en compte car on observe des intensités pluviométriques horaires et des cumuls très élevés sur la partie socle des Cévennes : 120 et 100 mm pour les épisodes 1 et 2. On est donc en présence d'un épisode où les pluies cévenoles en tête de bassin sont largement supérieures à celles sur les Causses.

Sur le premier tronçon Florac -> Montbrun, les débits de base amont et aval sont très similaires sauf lors de la décrue qui montre un soutien plus élevé sur la partie calcaire de Montbrun. Ceci témoigne des apports du Causse au débit de base du Tarn et reflète une plus forte inertie des aquifères karstiques des Causses comparés à ceux de socle sur les Cévennes (la décrue y est plus rapide). Lors des crues, les pics sont systématiquement supérieurs sur la partie amont du socle. Ceci se traduit par des apports latéraux négatifs qui renseignent sur l'existence de fortes pertes (plus de 100 m³/s) lors du passage de l'onde de crue entre Florac et Montbrun.

Sur le second tronçon, Montbrun -> La Muse, les apports en débits de base sont nuls, ce qui signifie qu'il y a une conservation – en relatif - des volumes écoulés entre amont et aval sans apports ni pertes notables. Lors des crues, les pics sont supérieurs à l'exutoire, montrant des apports latéraux importants issus des Causses. Le premier pic des apports représente moins de 1/6^{ème} du débit maximum du Tarn à l'aval alors qu'il représente 1/3 lors du second pic. Deux points complémentaires importants sont à noter. Premièrement, la mise en évidence de pertes en début de crue lors du premier épisode est à nuancer du fait de l'incertitude liée au modèle de propagation des ondes de crue calé sur les pics et qui peut générer des retards de montée de crue entre les deux courbes 'amont propagé' et 'exutoire observé'. Deuxièmement, la concomitance des pics d'apports latéraux et des débits issus des sources sur le tronçon montre que les apports massifs des Causses – non mesurés - répondent à des dynamiques très similaires à celles des sources instrumentées, et ce, même si les ordres de grandeur sont très différents (Q_{max} de 120 m³/s pour les apports latéraux contre 8 m³/s pour les sources). De manière conceptuelle, cela confirme que les résurgences de pied de versant visibles sur le bassin du Haut Tarn ne sont que le témoin de l'existence d'arrivées d'eau massives directement dans le lit du cours d'eau.

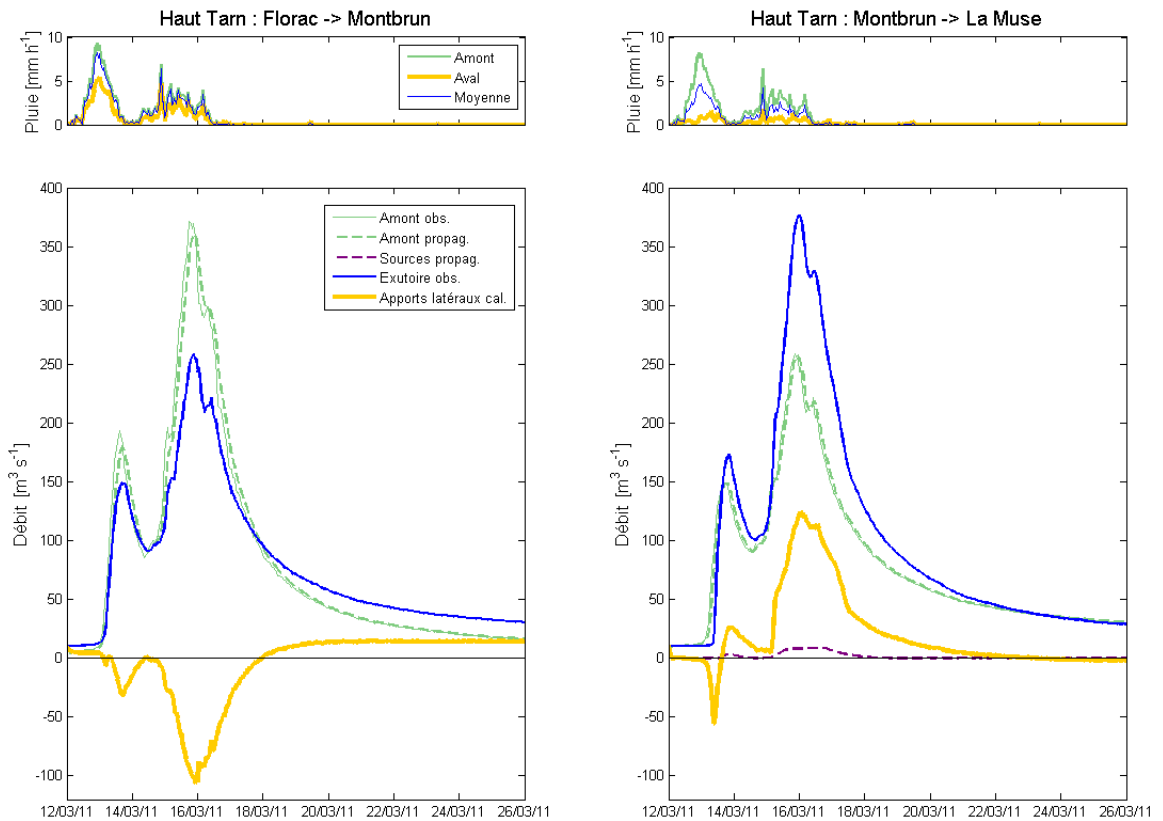


Illustration 24. Ondes de crue et apports latéraux sur le Haut Tarn, sur les deux tronçons Florac -> Montbrun et Montbrun -> La Muse lors de l'épisode du 16/03/2011 (crue multiple avec deux épisodes de pluie de 55 puis 72 mm en moyenne sur le sous-bassin).

L'analyse de la dynamique de cette crue permet de définir les processus suivants :

- l'existence de fortes pertes qui sont prépondérantes sur la partie la plus amont du Tarn calcaire, au contact socle/karst. Elles écrêtent les pics de crue issus du socle,
- l'existence d'apports massifs depuis une zone saturée bien développée qui est drainée principalement vers l'aval lorsque les gorges du Tarn s'enfoncent dans le Jurassique moyen à la base de l'aquifère supérieur. Ils contribuent à l'amplification du pic de crue écrêté juste à l'amont,
- une dynamique complexe de ces pertes et ces apports entre zones amont et aval des Causses et au cours de la crue.

Il est intéressant de noter que le pic de débit amont issu du socle est quasiment identique à celui à l'exutoire de La Muse, ce qui montre que les pertes et apports se compensent lors de cet épisode.

c) Effet d'échelle entre tronçons et sous-bassins

L'objectif de ce paragraphe est de comparer l'approche détaillée ci-dessus à l'échelle des deux tronçons du Haut Tarn avec une approche globale à l'échelle du sous-bassin qui caractérise l'affluent dans son ensemble. Cette étude du changement d'échelle est importante car les autres sous-bassins sont globalement moins bien instrumentés pour caractériser finement les apports latéraux : sur la Dourbie, toute la partie socle en amont du Trévezel n'est pas instrumentée, et sur la Jonte, il n'existe pas de station à l'aval avant la confluence avec le Tarn. Cette configuration rend moins trivial l'étude des contributions du karst au réseau hydrographique.

L'illustration 25 montre pour une crue monopic les résultats de la propagation des ondes de crue et du calcul des apports latéraux pour le sous-bassin global (Florac -> La Muse), pour le tronçon amont Florac -> Montbrun, et pour le tronçon aval Montbrun -> La Muse. De manière similaire à l'étude de la crue de mars 2011, on observe sur le tronçon amont Florac -> Montbrun des pertes (plus de 100 m³/s) lors du passage de la crue du socle et un soutien du débit de base par le karst. Sur le tronçon Montbrun -> La Muse, le karst apporte un débit maximum de crue de 75 m³/s sans faire augmenter le soutien du débit de base.

La résultante globale des apports latéraux à l'échelle du sous-bassin (figure de gauche sur l'illustration 25) est une première phase de pertes lors de la montée de crue, puis une phase d'apports lors de la décrue. Ces deux phases sont en réalité issues de processus dominants respectivement à l'amont au contact socle/karst (dominante de pertes) et à l'aval au travers des Causses (dominante d'apports) du Haut Tarn.

Ainsi, ce résultat implique d'être conscient qu'une étude basée sur l'analyse des écarts entre débits amont et aval à l'échelle des sous-bassins du Haut Tarn, de la Dourbie et de la Jonte engendre une sous-estimation des pertes localisées principalement sur la partie amont des Causses, ainsi qu'une sous-estimation des apports vers l'aval qui compensent les pertes sous-estimées.

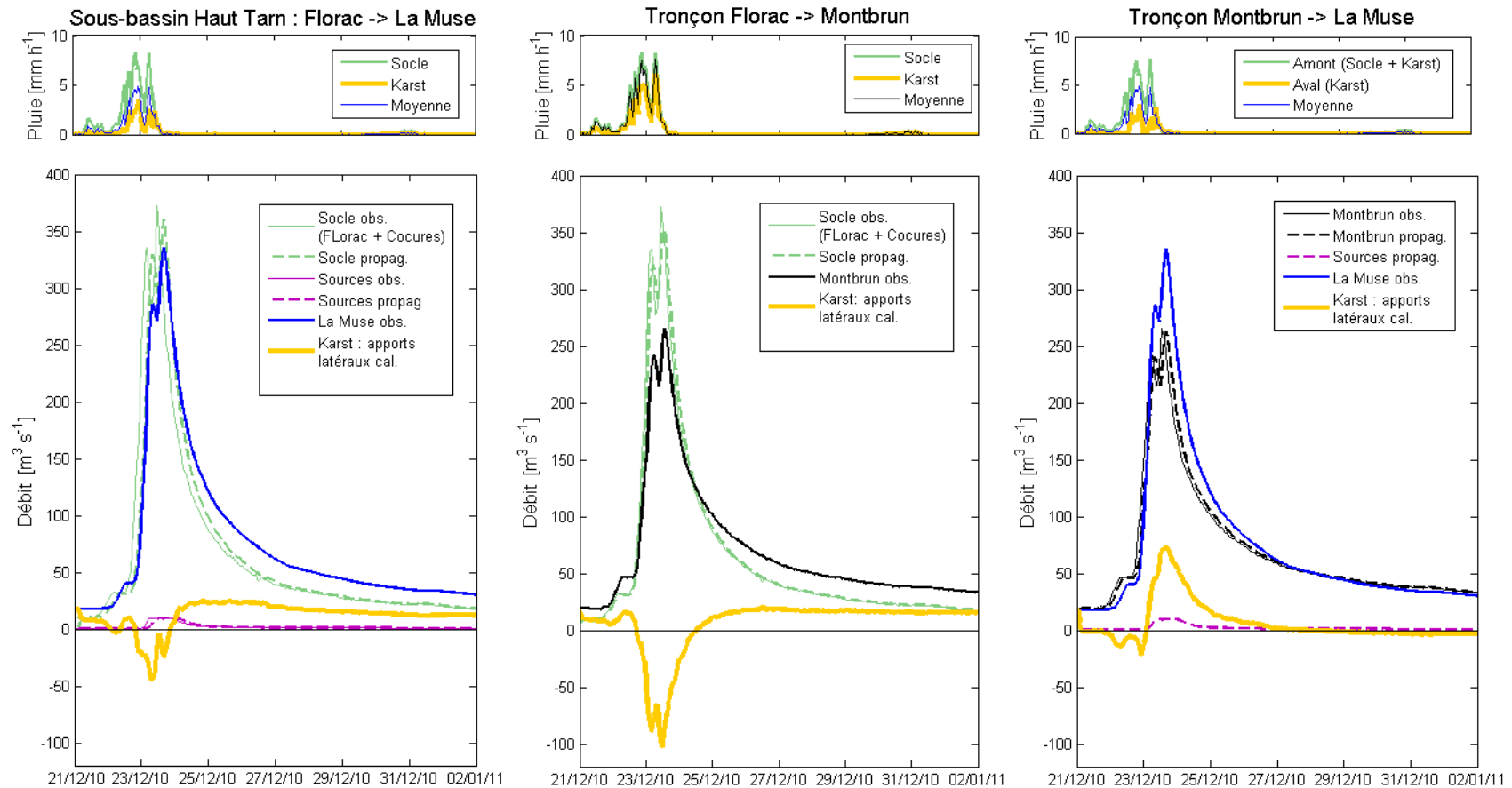


Illustration 25. Ondes de crue et apports latéraux sur le sous-bassin du Haut tarn lors de l'épisode du 24/12/2010 (pluie de 65 mm en moyenne sur le sous-bassin) ; sont présentés de gauche à droite les ondes de crue et apports latéraux pour le sous-bassin global (Florac -> La Muse), pour le tronçon amont Florac -> Montbrun, et pour le tronçon aval Montbrun -> La Muse.

4.2. RESULTATS DE LA MODELISATION

4.2.1. Modélisation des écoulements hydrogéologiques sur les Causses

L'objectif de cette modélisation est de disposer d'un jeu de paramètres permettant de simuler à plus grande échelle les apports des Causses au réseau hydrographique à l'échelle des sous-bassins et du bassin du Tarn à Millau. Ceci pour valider ou non le schéma de fonctionnement issu de la modélisation à l'aide du modèle de transfert (modélisation des apports).

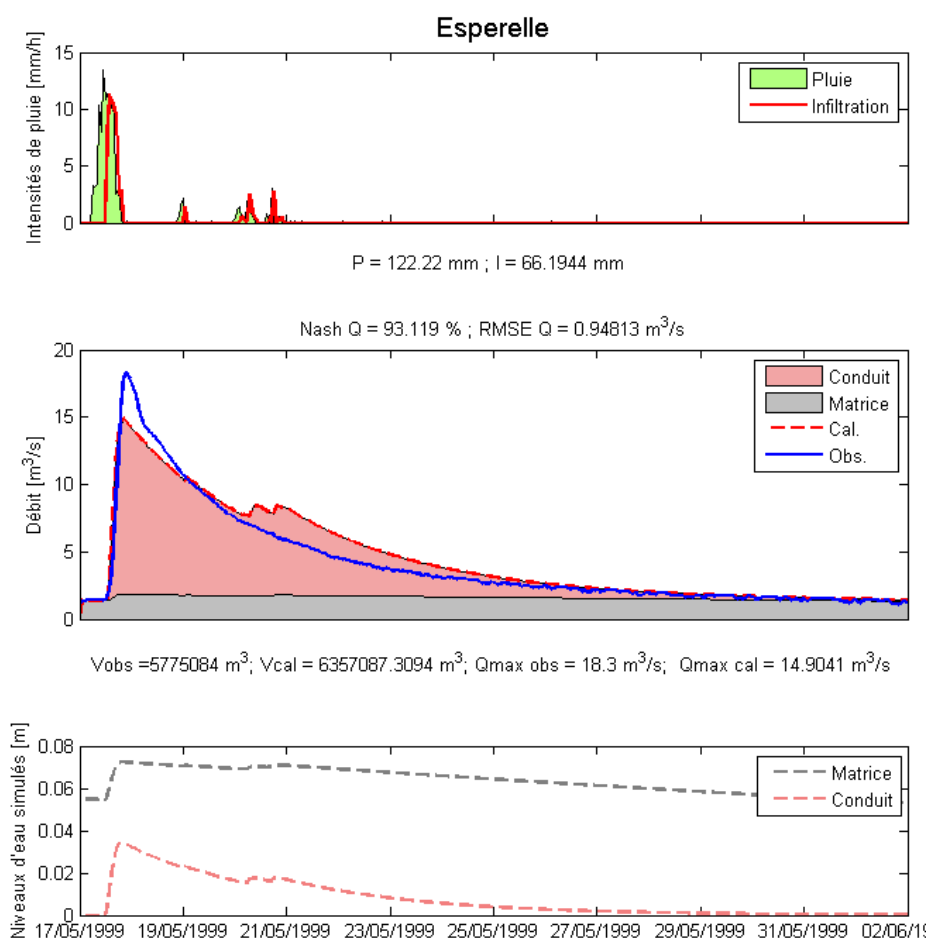


Illustration 26. Simulation du débit à la source de l'Esperelle, ainsi que des niveaux d'eau dans les réservoirs DIFFUS et CONDUIT (crue du 17/05/1999)

La modélisation des écoulements hydrogéologiques a été testée sur les différents systèmes karstiques dont les débits à l'exutoire sont mesurés. Une attention particulière a été portée sur l'Esperelle et le Durzon qui sont les sources comportant le plus de données en phase avec les crues sélectionnées, et qui sont les systèmes les

plus importants en termes de débit moyen de crue. Un exemple de simulation est donné pour la crue du 18/05/1999 sur l'illustration 26. Notons que contrairement aux bassins versants sur lesquels les écoulements de surface et subsurface participent au débit de crue des cours d'eau, ce sont les écoulements souterrains – et donc l'infiltration - qui participent au débit de crue des sources karstiques. L'infiltration simulée sur le graph correspond donc au volume de crue simulé.

Après plusieurs tests, nous avons choisi la paramétrisation de la source de l'Esperelle pour la distribution de ces paramètres sur l'ensemble des sous-bassins. Ainsi, les apports issus des karsts des Causses sont simulés par un modèle hydrogéologique calé sur la source de l'Esperelle. Ceci nous permet de modéliser sur chaque sous-bassin les processus hydrogéologiques en tenant compte des spécificités des systèmes karstiques (écoulements lent et rapide, effet de seuil, etc.).

4.2.2. Modèle de transfert

Le modèle semi-distribué a été appliqué sur le bassin du Tarn à Millau sur un découpage en trois sous-bassins de tête : Haut Tarn (La Muse), Dourbie (Massebiau), et Jonte (pas de station de contrôle), et un sous-bassin intermédiaire : Tarn (Millau) dont l'amont est composé des stations des deux sous-bassins précédents. Nous n'avons pas retenu le découpage du Haut Tarn en deux tronçons, comme dans l'analyse des crues faite précédemment, car l'objectif final est la simulation des débits à Millau.

Les deux illustrations suivantes (Illustration 27, Illustration 28) sont des exemples de crues monopics qui ont été utilisées pour la phase de calibration du modèle comprenant l'ensemble des 18 crues monopics sélectionnées. Le modèle a été également validé sur les crues multipics dont deux exemples sont présentés (Illustration 29, Illustration 30).

Les termes utilisés pour distinguer les courbes présentées sur ces 4 figures se définissent comme suit :

- Pour les pluies :
 - Socle : Intensité de pluie moyenne sur la partie socle du sous-bassin
 - Karst : Intensité de pluie moyenne sur la partie karst du sous-bassin
 - Moyenne : Intensité de pluie moyenne sur l'ensemble du sous-bassin

- Pour les débits :
 - Socle obs. : Débit observé issu de la partie socle du sous-bassin
 - Socle propag. : Débit de la partie socle propagé dans le réseau hydrographique jusqu'à l'exutoire du sous-bassin
 - Source obs. : Débit observé de l'ensemble des sources karstiques instrumentées sur le sous-bassin
 - Source propag. : Débit des sources propagé jusqu'à l'exutoire du sous-bassin
 - Total obs. : Débit total observé à l'exutoire du sous-bassin
 - Total cal. : Débit total calculé à l'exutoire du sous-bassin

- Karst : apports latéraux cal. (modèle onde diffusante) : Débits issus du karst calculés par le modèle de l'onde diffusante à partir des données de débit socle/exutoire du sous-bassin
- Karst : apports latéraux cal. (modèle hydrogéol.) : Débits issus du karst calculés par le modèle hydrogéologique à partir des données de pluie sur la partie karst du sous-bassin
- Pour la piézométrie : le niveau piézométrique moyen de la partie karst du sous-bassin simulé par le modèle hydrogéologique.

L'analyse des graphiques (Illustration 27 à Illustration 30) se fait ainsi :

- 1) les débits amont (socle) en vert sont propagés dans le réseau (socle propag.) à l'aide du modèle de transfert par onde diffusante. Les apports latéraux du karst sont calculés à partir du modèle onde diffusante sur la base des débits amonts et à l'exutoire ($Q_{\text{karst}} = Q_{\text{socle propag.}} - Q_{\text{tot}}$) et sont représentés en jaune,
- 2) le débit à l'exutoire est simulé à partir des débits amonts (socle) et des apports simulés par le modèle hydrogéologique (en tirets magenta). Le débit à l'exutoire simulé est représenté en tirets rouge,
- 3) pour évaluer les performances du modèle, il faut donc comparer les débits du karst estimés par le modèle onde diffusante (jaune) et le modèle hydrogéologique (magenta), puis comparer à l'exutoire les débits observés (bleu) et simulés (tirets rouges).
- 4) pour illustrer la variabilité des pluies, sont également représentées les pluies sur la partie socle, la partie Causse et la moyenne du bassin du Tarn
- 5) pour montrer les contributions des sources instrumentées, en comparaison des apports des Causses calculés, celles-ci sont représentées en violet.

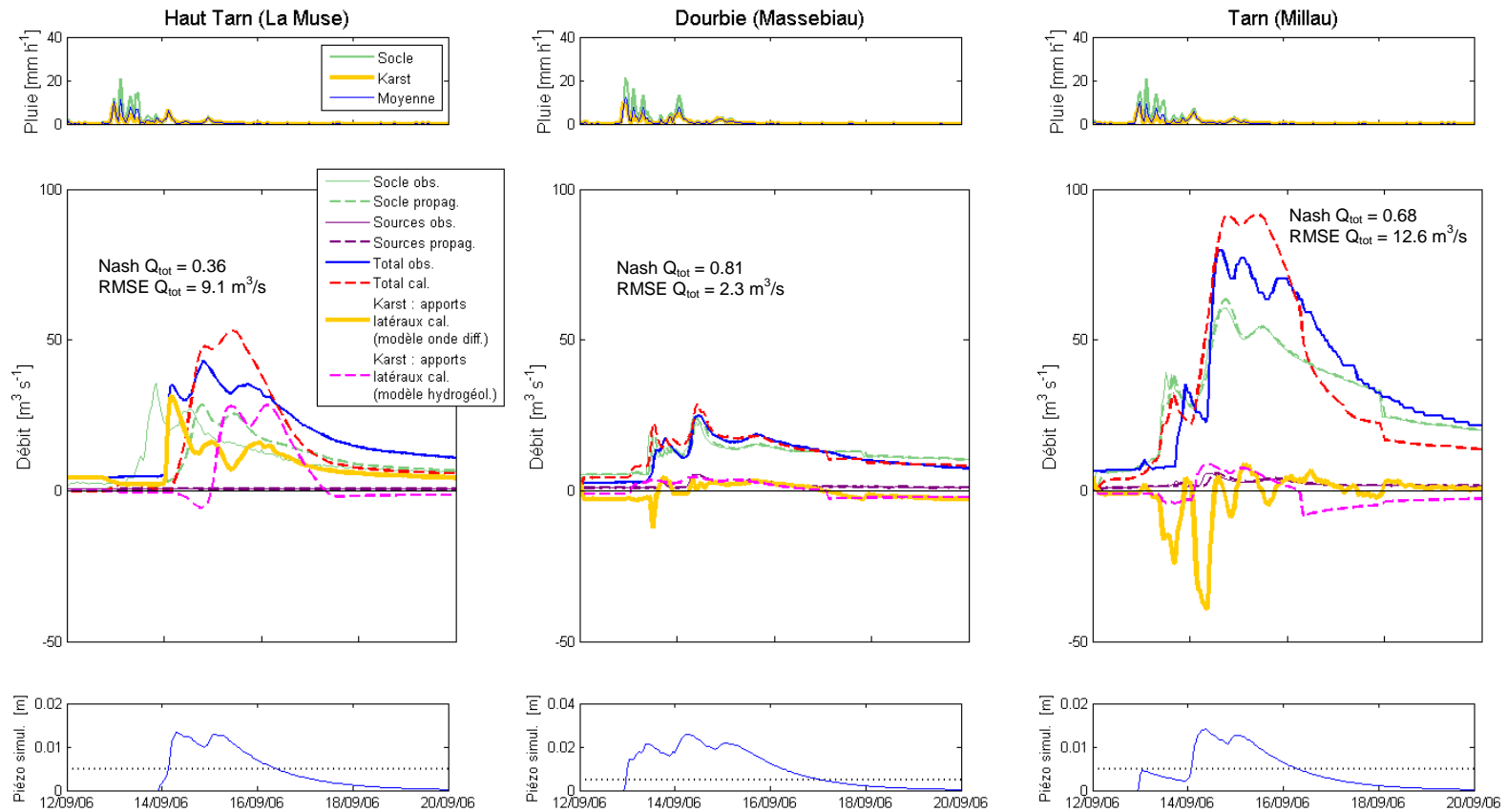


Illustration 27. Modélisation de la crue avec un seul pic du 15/09/2006

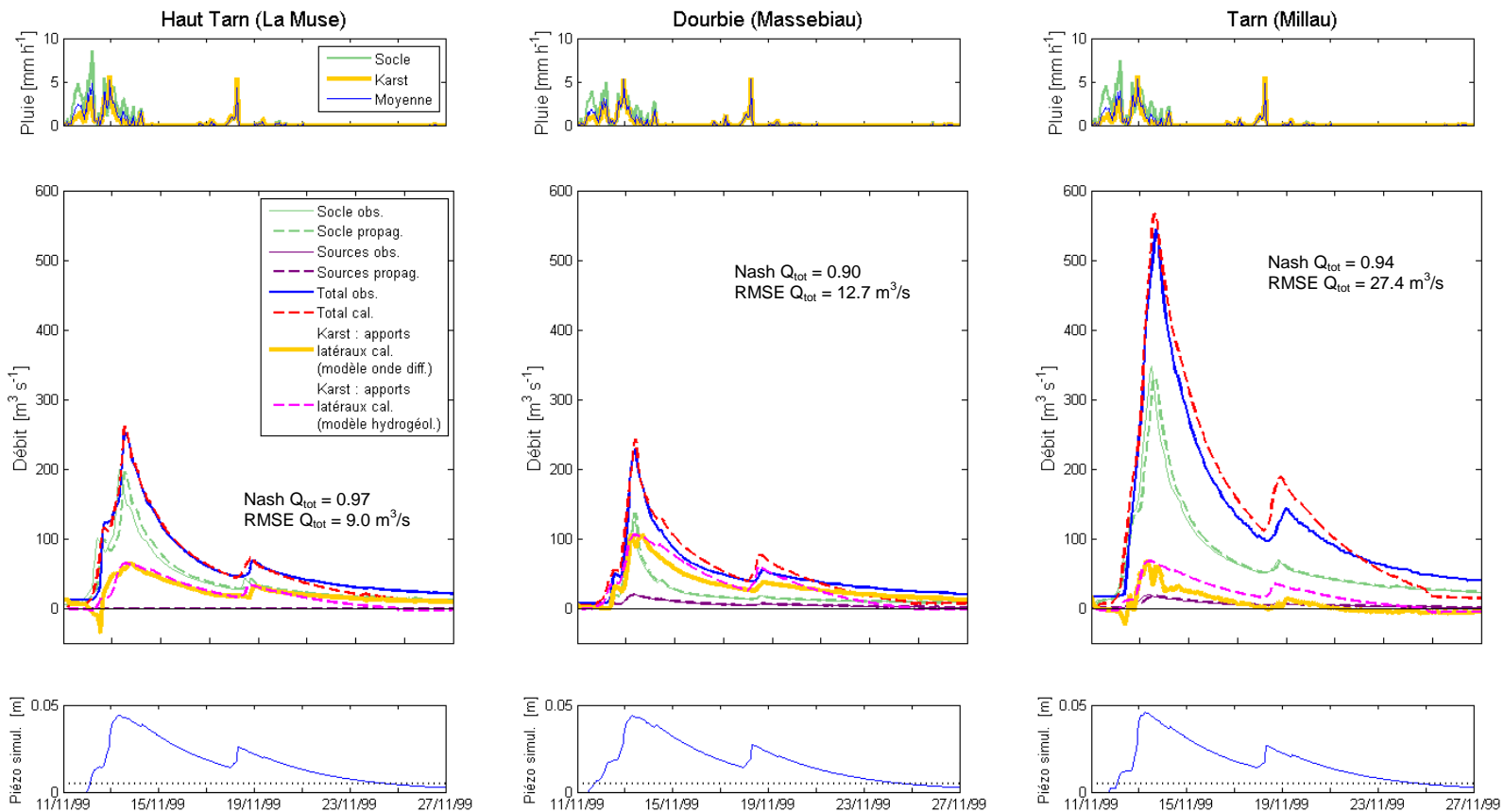


Illustration 28. Modélisation de la crue à un seul pic du 14/11/2009

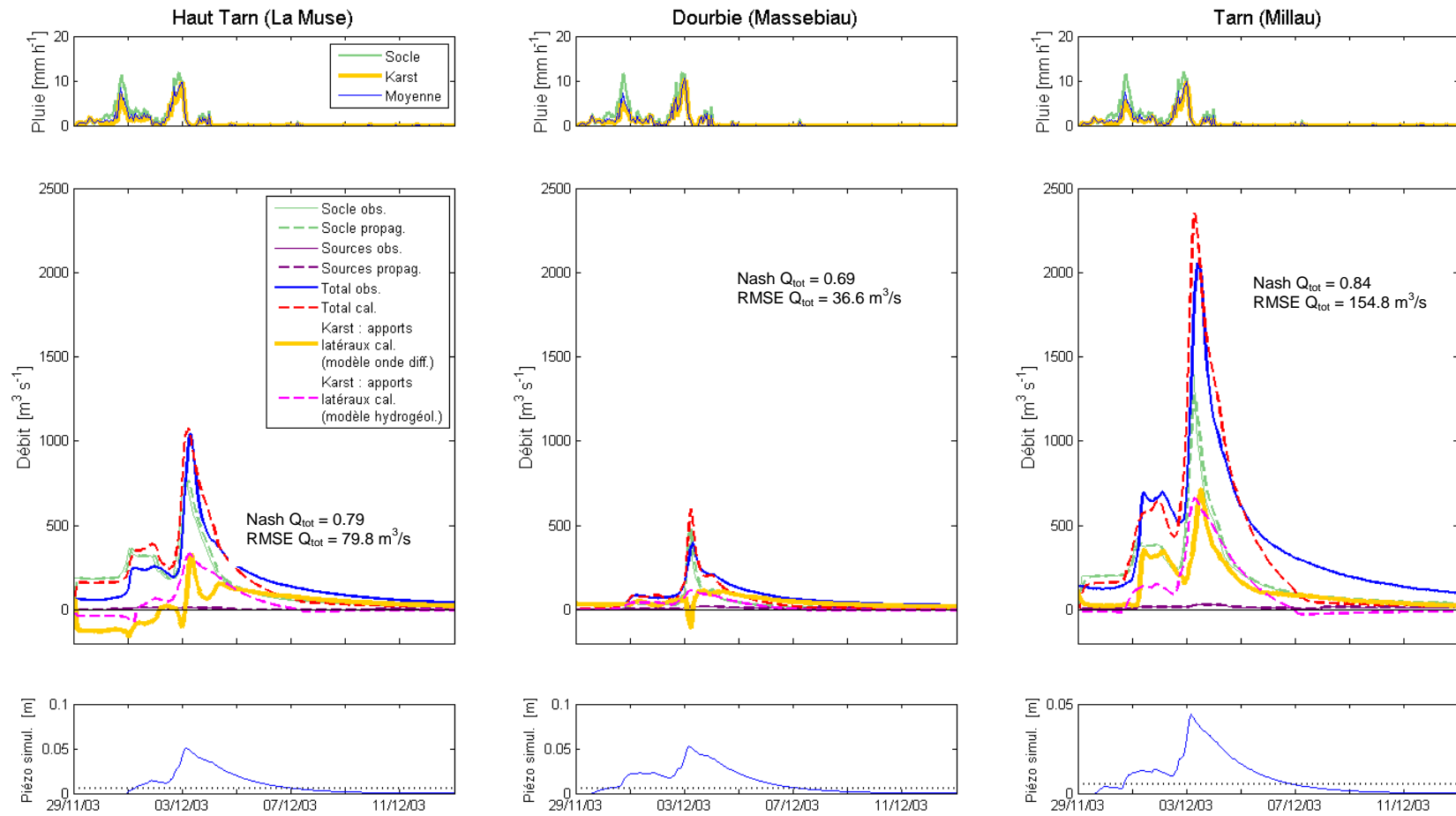


Illustration 29. Modélisation de la crue multiple du 03/12/2003

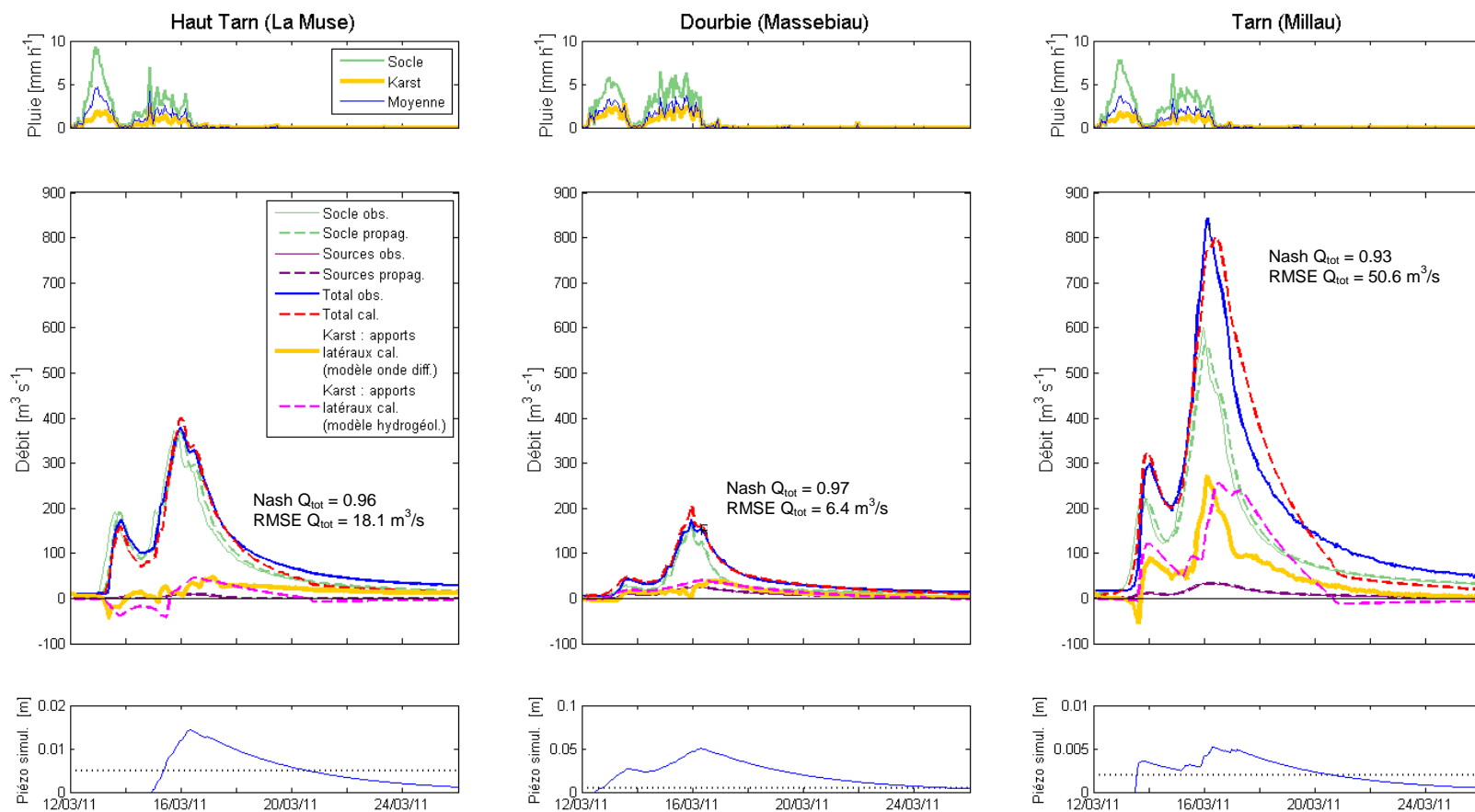


Illustration 30. Modélisation de la crue multiple du 16/03/2011

Les résultats sont satisfaisants car les dynamiques de crue sont bien simulées aux différents exutoires des sous-bassins et bassin versant. La comparaison des pics de crue observés et calculés est donnée sur l'illustration 31. La figure de gauche montre les résultats en prenant en compte les débits calculés sur les stations intermédiaires de La Muse et Massebiau pour simuler le Tarn à Millau. La figure de droite montre les résultats à partir des valeurs observées. La comparaison des deux figures permet d'évaluer la robustesse du modèle en mode semi-distribué (propagation des erreurs de modélisation entre stations). Globalement, on observe une bonne simulation des débits de pointe pour l'ensemble des crues entre 0 et 1200 m³/s. Le débit de pointe calculé de la crue du 23/11/2003 (débit de pointe mesuré à 1920 m³/s) est surestimé à Millau d'environ 30%. La raison est une surestimation des débits sur la Dourbie. Cependant, dans ces mêmes gammes de débits élevés, la crue du 03/12/2003 quelques jours après est bien simulée (Illustration 29), nous pouvons donc estimer que le modèle est satisfaisant.

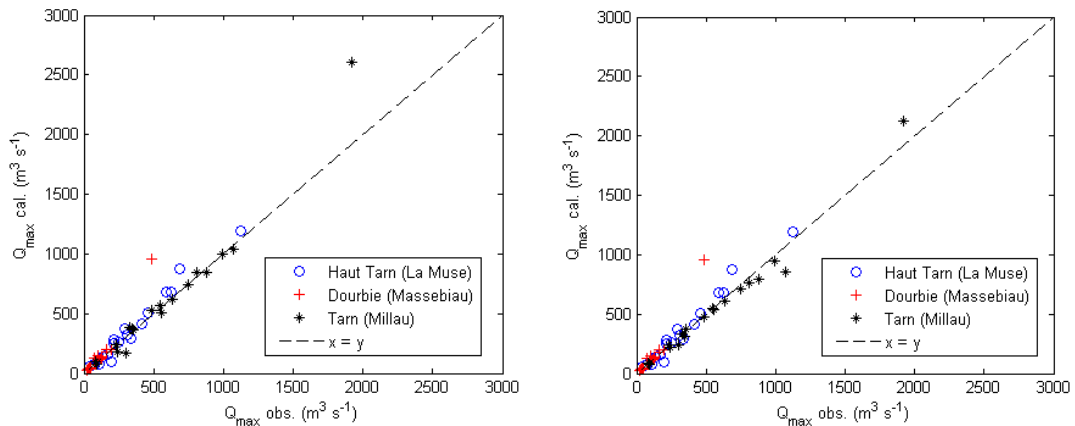


Illustration 31. Résultats de modélisation sur les pics de crue (Q_{max}). Les résultats à Millau prennent en compte les débits calculés (à gauche) des stations amont (La Muse et Massebiau), ou les débits observés (à droite).

4.3. DISCUSSION DES RESULTATS DE MODELISATION ET SCHEMA DE FONCTIONNEMENT

Suite à la première analyse des épisodes de crue pour caractériser les processus mis en jeu lors des crues du bassin du Tarn à Millau, les résultats satisfaisants de la modélisation semi-distribuée permettent de valider les hypothèses de fonctionnement hydrologique. Celles-ci sont synthétisées et discutées dans cette section.

Les résultats montrent le rôle majeur des karsts des Grands Causses dans la modification des écoulements dans le réseau hydrographique - en termes de débits instantanés comme de volumes de crue - entre les stations sur le socle à l'amont et les stations aval jusqu'à Millau.

Dans le cas d'un karst binaire comme celui du Tarn, le karst joue d'une part un rôle d'écrêteur des débits de pointe sur des zones de pertes localisées principalement au contact socle/calcaire, donc sur la partie amont des Causses. Les pertes quantifiées sur le tronçon Haut Tarn jusqu'à des valeurs de 100 m³/s paraissent importantes sachant que le linéaire entre le contact socle/calcaire en aval de Florac et Montbrun n'est que de quelques kilomètres. Pour expliquer des pertes conséquentes lors des crues, il faut que le niveau piézométrique soit à une altitude plus faible que la section du cours d'eau. Ce type de données manque, ainsi qu'un repérage géomorphologique du fond de vallée pour confirmer ou non la présence de vides capables d'absorber de tels débits. L'autre explication réside dans la critique des données et donc des courbes de tarage qui surestiment les débits réels. Là aussi, une indétermination demeure. Dans tous les cas, le processus est cohérent avec les observations faites sur le sous-bassin de la Dourbie au contact socle/calcaire (vallée du Trévezel sèche en étiage par exemple), et ne remet pas en cause le fonctionnement global à l'échelle des sous-bassins du Haut Tarn et de la Dourbie.

D'autre part, le karst joue le rôle d'amplificateur des crues sur les parties intermédiaires et aval des Causses par l'intermédiaire de nombreuses sources en pied de versant mais surtout par les contributions massives d'une zone noyée – a priori de forte importance – sur l'aval du bassin. Ceci est corroboré par des apports jusqu'à plus de 500 m³/s sur le tronçon le plus aval pour les crues les plus fortes qui ne peuvent être expliqués par la somme des débits des sources les plus importantes.

Les résultats de la modélisation montrent que les pertes sont globalement proportionnelles au débit amont issu du socle. Les apports des Causses sont bien simulés à l'aide d'un modèle hydrogéologique adapté aux systèmes karstiques. Ainsi, la contribution du karst en processus de pertes peut s'expliquer par un processus de ré-infiltration dans des zones non saturées (le niveau de nappe est sous le lit du cours d'eau), et la contribution en processus d'apports peut s'expliquer par la vidange des karsts des Grands Causses dans le réseau. A partir de ces résultats, il est possible de relier ces processus au contexte géologique pour proposer un schéma de fonctionnement hydrogéologique. En ce sens, on peut faire l'hypothèse que les chemins d'eau participant aux pertes amont et apports aval font partie du même réseau de drainage dans l'aquifère supérieur (cf Illustration 5) ; les écoulements souterrains court-circuitant les écoulements de surface.

Sur la base des crues avec un seul pic, nous avons cherché à caractériser au mieux les déterminants aux crues des sous-bassins et du bassin. L'illustration 32 montre la variabilité de la réponse hydrologique des sous-bassins et bassins en fonction de la variabilité des pluies et des débits à l'amont. Ainsi, les graphiques du haut de l'illustration montrent une augmentation de la contribution des apports du karst au débit de pointe à l'exutoire, avec une augmentation du ratio pluie sur Causse/pluie moyenne en termes de cumul pour chaque épisode. On observe en général une plus forte contribution du karst sur la Dourbie que sur les deux autres bassins où les débits des apports du karst restent en général inférieurs à 40% du débit maximum à l'exutoire.

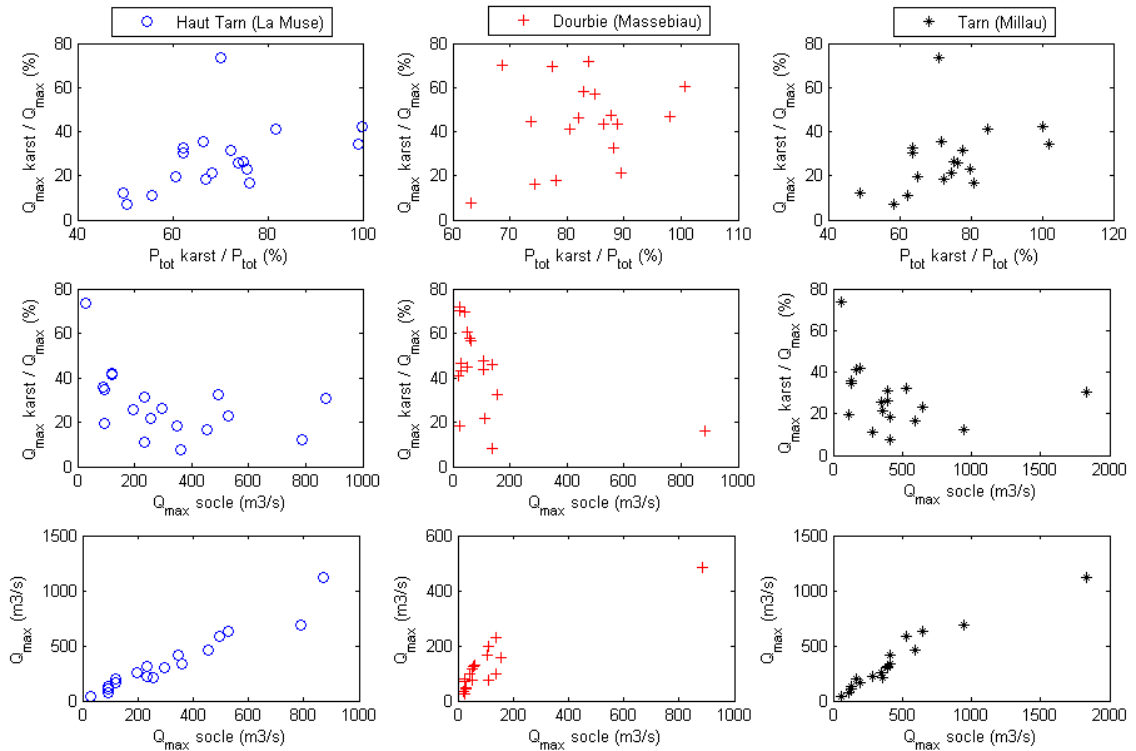


Illustration 32. Réponse hydrologique des différents sous-bassins et du bassin du Tarn à Millau ; avec de haut en bas : i) la contribution du karst au débit de pointe en fonction du pourcentage de pluie cumulée sur les Causses par rapport à la pluie moyenne, ii) la contribution du karst au débit de pointe en fonction du débit de pointe amont du socle, et iii) le débit maximum à l'exutoire en fonction du débit maximum du socle.

Les graphiques du milieu montrent cette même réponse de la contribution des apports du karst au débit de pointe à l'exutoire, en fonction du débit de pointe amont de la zone de socle. On observe dans ce cas une diminution des contributions du karst avec une augmentation des débits maximum de crue sur socle, ce qui montre bien l'importance des débits issus de la zone de socle où les pluies sont les plus intenses et abondantes.

Enfin, les graphiques du bas montrent la forte corrélation entre ces débits amont et le débit à l'exutoire. L'alignement des points va dans le sens d'un fonctionnement globalement linéaire du karst dans la modification des débits de pointe. Une explication est que les débits de pointe restent plus dépendants du ruissellement amont issu du socle que des apports latéraux issus du karst. D'un point de vue modélisation, ceci se traduit par une plus grande dépendance de ces débits de pointe aux paramètres de la fonction de transfert (célérité notamment) que de ceux de la fonction de production des apports des Causses.

Les indicateurs d'état de remplissage du karst comme les débits initiaux des sources ou des différentes stations de rivière sur les Causses n'ont pas permis d'améliorer les

relations évoquées ci-dessus sur la variabilité de la réponse hydrologique. Ceci peut être dû au fait que cette **réponse hydrologique est principalement contrôlée par les débits amonts issus du socle** comme le montrent les derniers graphiques présentés.

En synthèse, les déterminants qui contrôlent la genèse des crues sur le bassin du Tarn à Millau sont :

- une variabilité spatiale des pluies entre reliefs cévenols sur socle à l'amont, et Causses (karst) à l'aval, qui engendre des cumuls deux fois plus élevés sur les Cévennes,
- un débit de crue élevé issu de la zone de socle et qui se propage sur plus de 60 km (sur la partie Haut Tarn) à travers les Causses, du fait de pluies de très fortes intensités sur les formations de socle moins perméables comparé aux formations karstiques des Causses,
- un karst qui absorbe une partie des débits de crue sur la partie amont des Causses, au niveau du contact socle-karst. Ceci s'observe notamment en étiage par l'assèchement total de certains cours d'eau, mais a été mis en évidence lors des pics de crue (fortes pertes de l'ordre de 50 à 100 m³/s)
- un karst qui amplifie les crues sur la partie intermédiaire et aval et qui soutient les débits de base du Tarn. Ceci engendre à l'échelle du bassin une limitation de l'effet écrêteur de la partie amont des Causses (les pertes amont sont compensées par les apports aval), et engendre également des décrues plus lentes. Les apports de la partie karst ont été quantifiés et atteignent 40 % du débit maximum observé à Millau.

Le partage spatial entre zones amont de socle et zone aval de Causse a amené à revoir la taille du bassin du Tarn à Millau de plus de 10% en tenant compte des bassins d'alimentation des sources qui sont drainées par le réseau hydrographique (bassin hydrogéologique).

5. Indicateur d'aide à la vigilance

5.1.1. Choix de l'outil d'aide à la vigilance

Les études préalables SCHAPI-BRGM sur les crues de bassins karstifiés sur la quasi-totalité de leur impluvium ont montré que la piézométrie est – avec la pluie - un des déterminants majeurs de la genèse des crues. C'est le cas des systèmes de Fontaine de Nîmes (Fleury et al., 2010) et du Lez (Fleury et al., 2011) pour lesquels l'état de saturation de l'aquifère contrôle la réponse hydrologique pour une pluie donnée.

On s'aperçoit que pour le bassin karstique binaire du Tarn à Millau qui comprend 1/3 de son impluvium amont sur les zones de socle des Cévennes, la piézométrie apparaît alors comme un déterminant secondaire – après la pluie et le débit amont issu des zones non karstiques - dans la genèse des crues. On peut supposer que cela est dû d'une part au régime des pluies qui sont plus intenses et abondantes sur la partie relief des Cévennes, et d'autre part aux propriétés des karsts des Grands Causses qui malgré les zones de pertes à l'interface socle/karst possèdent une zone saturée suffisamment développée pour compenser les pertes par des apports karstiques aval et propager l'onde de crue jusqu'à l'exutoire.

Ainsi, dans le cas du Tarn à Millau, le meilleur indicateur des débits de pointe des stations aval reste le débit de pointe des stations amont à l'interface socle/karst qui participent à hauteur de 60 à 90% en général au débit de pointe à l'exutoire. L'outil d'aide à la vigilance pour la prévision des crues sur le Tarn à Millau va donc être basé sur cet indicateur des débits amont issus du socle

5.1.2. Proposition d'un outil d'aide à la vigilance pour le tronçon Tarn Amont

L'outil d'aide à la vigilance pour le tronçon Tarn amont a pour but d'estimer les débits de pointe à Millau à partir des prévisions de pluie fournies par METEO France au SPC Tarn-Lot. Suite aux résultats de cette étude sur le rôle du karst dans la genèse des crues de ce bassin binaire, une relation Q_{\max} aval vs. Q_{\max} amont est à privilégier (Illustration 33).

La propagation de l'onde de crue entre les stations à l'interface socle/karst et Millau sont variables selon les différents sous-bassins : 10h pour le Haut Tarn entre Florac et Millau, et 4 à 5h pour la Dourbie entre Nant et Millau. Ces temps de transfert sont a priori trop courts pour la gestion de l'alerte et rendent difficiles la possibilité d'une prévision en temps réel avec un suivi automatique des stations amont.

Nous avons donc privilégié une estimation du débit de pointe des crues à Millau à partir des estimations des débits de pointe sur le socle sur la base des outils déjà disponibles au SPC (modèles ou abaques) pour ces zones non karstiques. L'estimation des débits sur la partie socle des Cévennes doit être réalisée aux quatre stations suivantes : Florac, Cocures, Meyrueis et Nant.

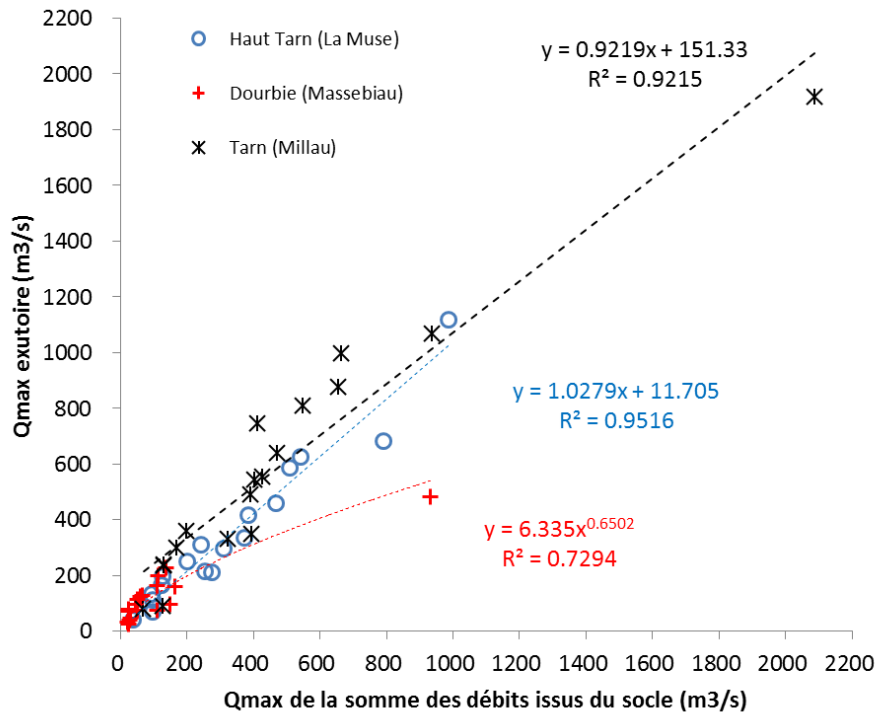


Illustration 33. Relation entre débits de pointe issus du socle et débits de pointe à l'exutoire pour les sous-ébassins du Haut tarn, de la Dourbie, et du bassin du Tarn à Millau.

A partir des débits maximum issus du socle, c'est-à-dire aux stations situées à l'interface socle/karst, nous proposons les relations suivantes pour calculer le débit maximum à l'exutoire des sous-bassins et du bassin du Tarn à Millau (pour des débits en m^3/s) :

- **Haut Tarn** : Q_{\max} La Muse = $1.03 \times Q_{\max}$ (Florac + Cocures) + 12
- **Dourbie** : Q_{\max} Massebiau = $6.3 \times Q_{\max}$ (Nant – Durzon)^{0.65}
- **Tarn** : Q_{\max} Millau = $0.92 \times Q_{\max}$ (Florac + Cocures + Meyrueis + Nant) + 151

Remarque sur la méthode proposée : l'avantage de cette méthode d'estimation des débits de pointe aval est qu'elle ne tient pas compte de la pluie sur la partie Cause. Elle pose alors la question de sa validité dans le cas de pluies orageuses localisées sur les Causses à l'aval du bassin. Sur ce point, l'analyse des pluies (paragraphe 4.1.1), a montré que les épisodes sélectionnés étaient systématiquement généralisés sur l'ensemble du bassin avec des intensités et des cumuls plus élevés sur la partie

socle. Ceci laisse penser que les épisodes pluvieux localisés sur la partie aval n'engendrent pas de crues importantes car ils n'apparaissent pas dans la base de données de l'étude qui a porté sur une sélection des épisodes les plus intenses.

6. Conclusion

L'objectif de cette étude était dans un premier temps d'améliorer la connaissance du rôle du karst sur le fonctionnement hydrologique du Tarn à Millau lors des plus fortes crues sur le tronçon Tarn Amont. Sur la base des déterminants du karst à la genèse des crues, l'objectif spécifique était alors de définir un outil d'aide à la pour mieux prédire les débits maximum de crue à Millau.

L'étude hydro(géo)logique du bassin conduite à partir d'une modélisation des transferts entre les différentes stations, et d'une modélisation semi-distribuée sur l'ensemble du bassin a montré les caractéristiques principales suivantes :

- Une variabilité spatiale des pluies entre reliefs cévenols sur socle à l'amont plus arrosés que les Causses (karst) à l'aval,
- Un débit de crue élevé issu de la zone de socle du fait de pluies de très fortes intensités sur des formations peu perméable comparé aux formations karstiques de l'aval. Les débits de pointe des stations amont sur le socle participent à hauteur de 60 à 90% en général au débit de pointe à l'exutoire,
- Un karst qui écrête les pics de crues issus du socle au niveau du contact socle-karst (fortes pertes de l'ordre de 50 à 100 m³/s sur le Haut Tarn),
- Un karst qui amplifie les crues sur la partie intermédiaire et aval et qui soutient les débits de base du Tarn. Ceci engendre à l'échelle du bassin une limitation de l'effet écrêteur de la partie amont des Causses (les pertes amont sont compensées par les apports aval), et engendre également des décrues plus lentes. Les apports de la partie karst ont été quantifiés et se montent à 35% du débit maximum observé à Millau pour les plus fortes crues.

Sur la base du schéma de fonctionnement de ce karst binaire – qui comprend un tiers de sa surface sur socle - les principaux indicateurs restent les débits issus de la partie amont sur socle, là où les pluies sont les plus intenses et abondantes. De ce fait, après de nombreux tests d'indicateurs hydrogéologiques sur la partie des Causses, la prévision des crues sur le bassin du Tarn à Millau la plus performante se réalise à partir de relations fonctions du débit amont des zones de socle selon les 3 étapes suivantes :

1. Prévision des pluies à 24h sur les sous-bassins de Florac, Cocures, Meyrueis et Nant
2. Estimation du débit de pointe issu du socle à partir des modèles et abaques SPC :
 $Q_{\max \text{ calculé SOCLE}} = Q_{\max} (\text{Florac} + \text{Cocures} + \text{Meyrueis} + \text{Nant})$
3. Estimation du débit à Millau à partir du débit de pointe issu du socle et de la relation $Q_{\max \text{ aval}}$ vs. $Q_{\max \text{ amont}}$ proposée dans cette étude :
 $Q_{\max \text{ calculé MILLAU}} = f(Q_{\max \text{ calculé SOCLE}})$

La mise en place de cet outil d'aide à la prévision de crue sur le tronçon Tarn amont est simple et nécessite une estimation préalable des débits sur les stations sur socle amont des Cévennes à partir des modèles et abaques disponibles pour le SPC.

7. Bibliographie

Ambert, P., Martin, Ph., et Guendon, J.-L., 1994. Le canyon de la Dourbie et le karst de la source de l'Esperelle. *Etudes de Géographie Physique*, XXIII : 63-80.

Bérard, P. 1987. Protection des captages AEP situés en terrains calcaires – Causse Majeurs de la Lozère. Rapport BRGM 87-SGN-163-LRO. 79p.

Braneyre, M., Malatrait, A., Durand, V., Violet, J., Brunet, M., 1998. Parc Naturel Régional des Grands Causses, Etude Hydrogéologique du Causse rouge (Aveyron) – Connaissance, aménagement et protection des ressources en eau souterraine. Rapport ANTEA n° A 12245/B. 62p.

Charlier, J.-B., Bertrand, C., and Mudry, J., 2012. Conceptual hydrogeological model of flow and transport of dissolved organic carbon in a small Jura karst system. *JOURNAL OF HYDROLOGY*. 460: 52-64. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.043

Dörfliger, N., Meus, Ph. 2006. Etude hydrogéologique du Causse de Sauveterre et de ses avant-causses (Secteur Est), Lot n°4 : Traçages, Rapport BRGM/RP-55160-FR, 237p.

Dörfliger, N., 2007. Etude hydrogéologique du Causse de Sauveterre et de ses avant-causses (Secteur Est), Lot n°5 : Synthèse, Rapport BRGM/RP-55690-FR, 95p.

Fleury, P., Raymond, M., Ayrat, P.A., 2010. Intégration de la composante "eaux souterraines karstiques" dans le système d'alerte crue de la Ville de Nîmes. Rapport "final". BRGM/RP-58286-FR.

Fleury, P., Charlier, J.-B., Borrell, V., Coustau, M. 2011. Appui au SCHAPI 2011. Module 1. Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique : les bassins versants du Lez et de la Tardoire. Rapport BRGM RP-60380-FR.

Hayami, S., 1951. On the propagation of flood waves. *Disaster Prevention Research Institute Bulletin*, 1: 1-16.

Marsaud B. 1996. Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts partir des résultats expérimentaux. Thèse de l'Université de Paris XI, Orsay, 305p.

Moussa, R., 1996. Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow. *HYDROLOGICAL PROCESSES*. 10(9): 1209-1227.

Moussa, R., Bocquillon, C., 1996. Algorithms for solving the diffusive wave flood routing equation. *HYDROLOGICAL PROCESSES*. 10(1): 105-124.

Pinault, J.-L., V. Plagnes, L. Aquilina, and M. Bakalowicz, 2001. Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Characterization of Karst System Functioning, *Water Resour. Res.*, 37(8), 2191–2204.

Plagnes, V., 1997. Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse Université de Montpellier 2, 376p.

PNRGC (Parc Naturel Régional des Grands Causses), 2006. Etude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants Causses, 279p.

PNRGC (Parc Naturel Régional des Grands Causses), 2011. Gestion du risque pour la santé publique : réalisation de traçages en aval des bassins de décantation situés sur des périmètres de protection de sources captées pour l'alimentation en eau potable - Causse du Larzac (bassins du Durzon, de l'Espérelle et de l'Homède), 21p.

Ricard J., Bakalowicz M., 1996 – Connaissance, aménagement et protection des ressources en eau du Larzac septentrional, Aveyron (France), Rapport BRGM R38953, 94 p.

Robinson, J., Rahmat-Samii, Y., 2004. Particle swarm optimization in electromagnetics. *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, 52(2) : 397-407. DOI: 10.1109/TAP.2004.823969.

SPC Tarn Lot, 2012a. Courbe de tarage de la station de Meyrueis sur la Jonte, Dossier 17.82.2492, LRPC de Bordeaux, Avril 2012, 17pp

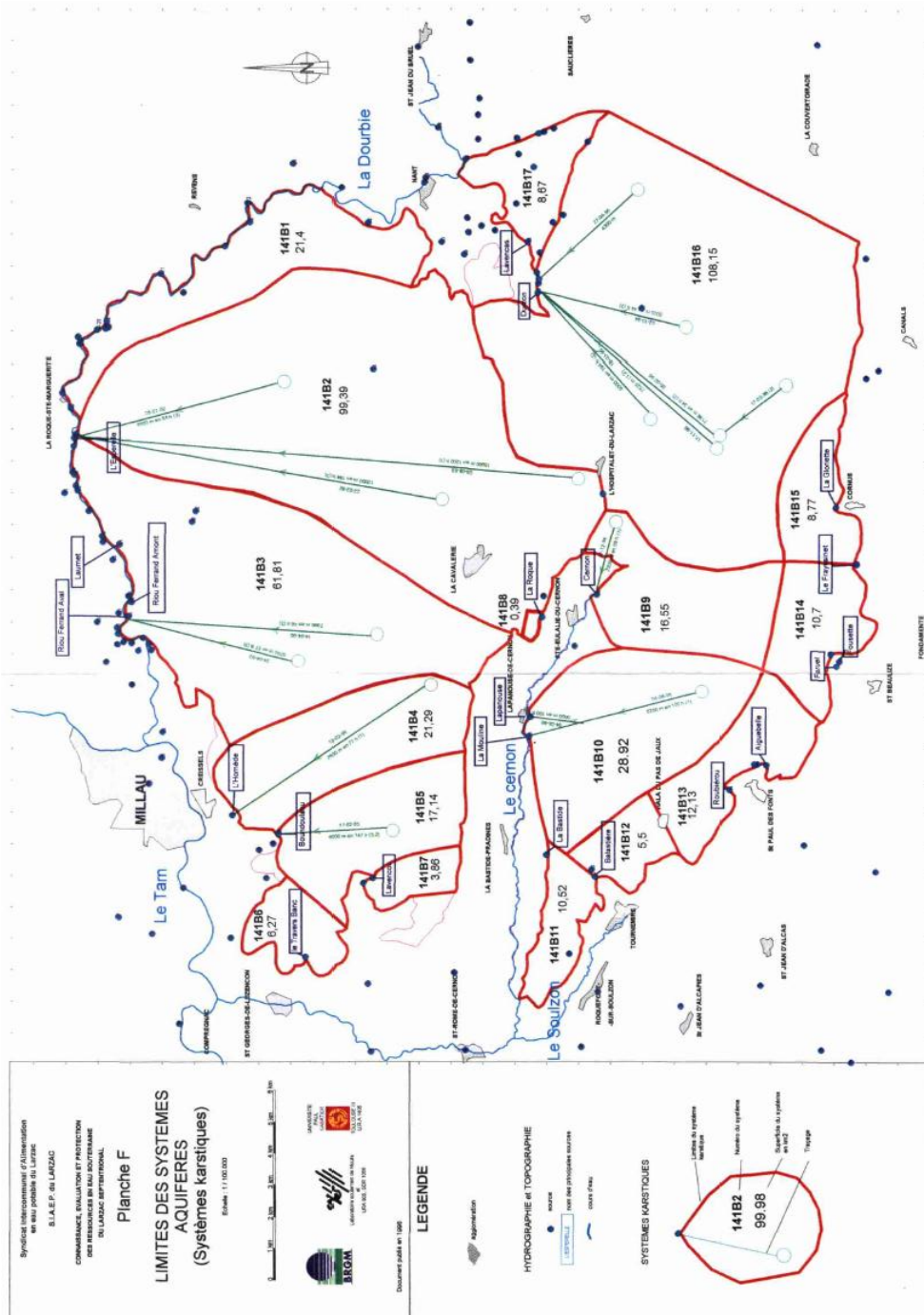
SPC Tarn Lot, 2012b. Courbe de tarage de la station de Florac-Bécède sur le Tarnon, Dossier 17.82.2492, LRPC de Bordeaux, Juin 2012, 17pp

SPC Tarn Lot, 2012c. Courbe de tarage des stations de Cassagnas et Vébron, Dossier 17.82.2492, LRPC de Bordeaux, Juin 2012, 15pp

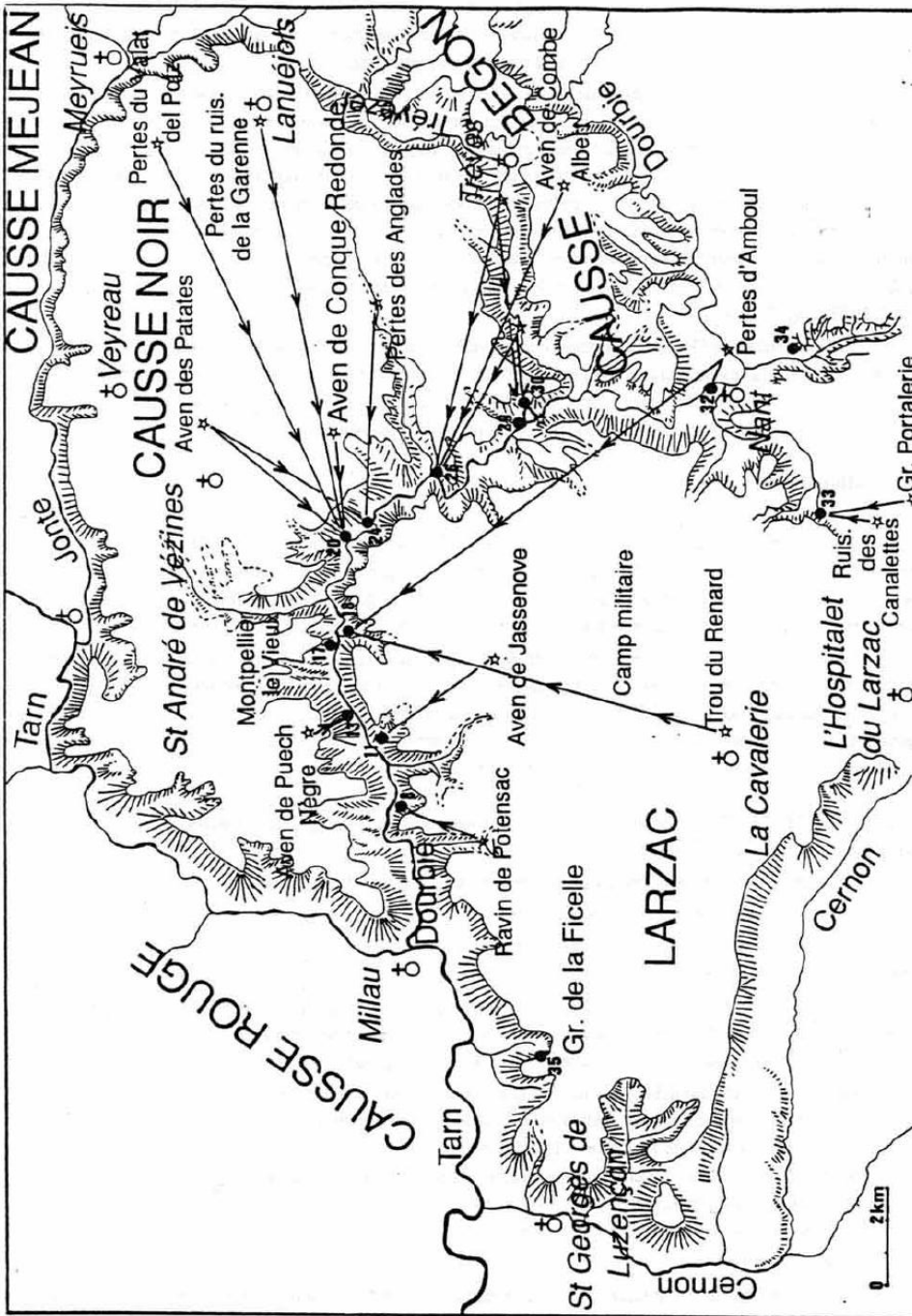
Annexe 1

Données de traçage sur les Causses du bassin du Tarn à Millau

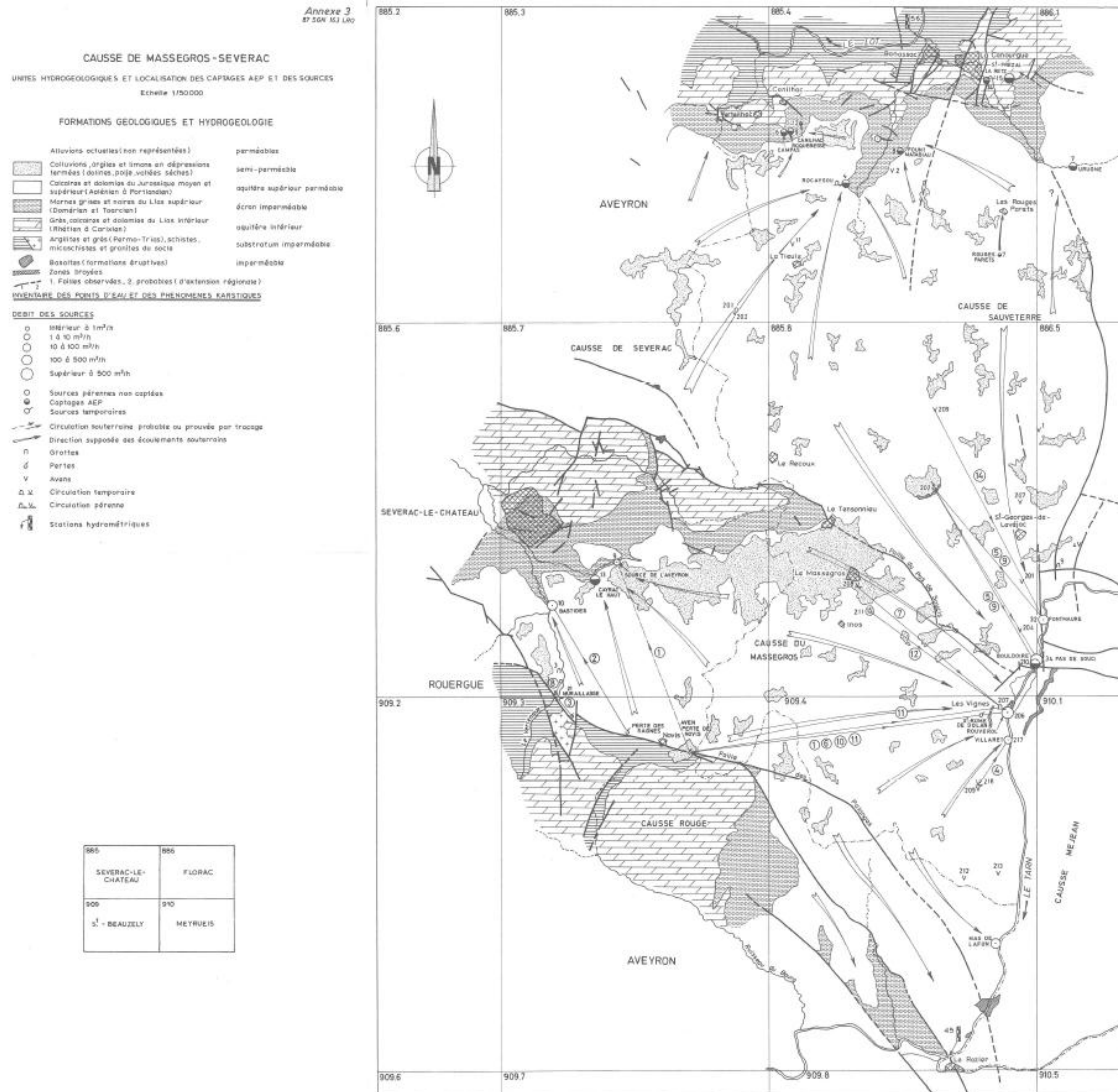
Traçages sur le Causse du Larzac, (Ricard et Bakalowicz, 1996)



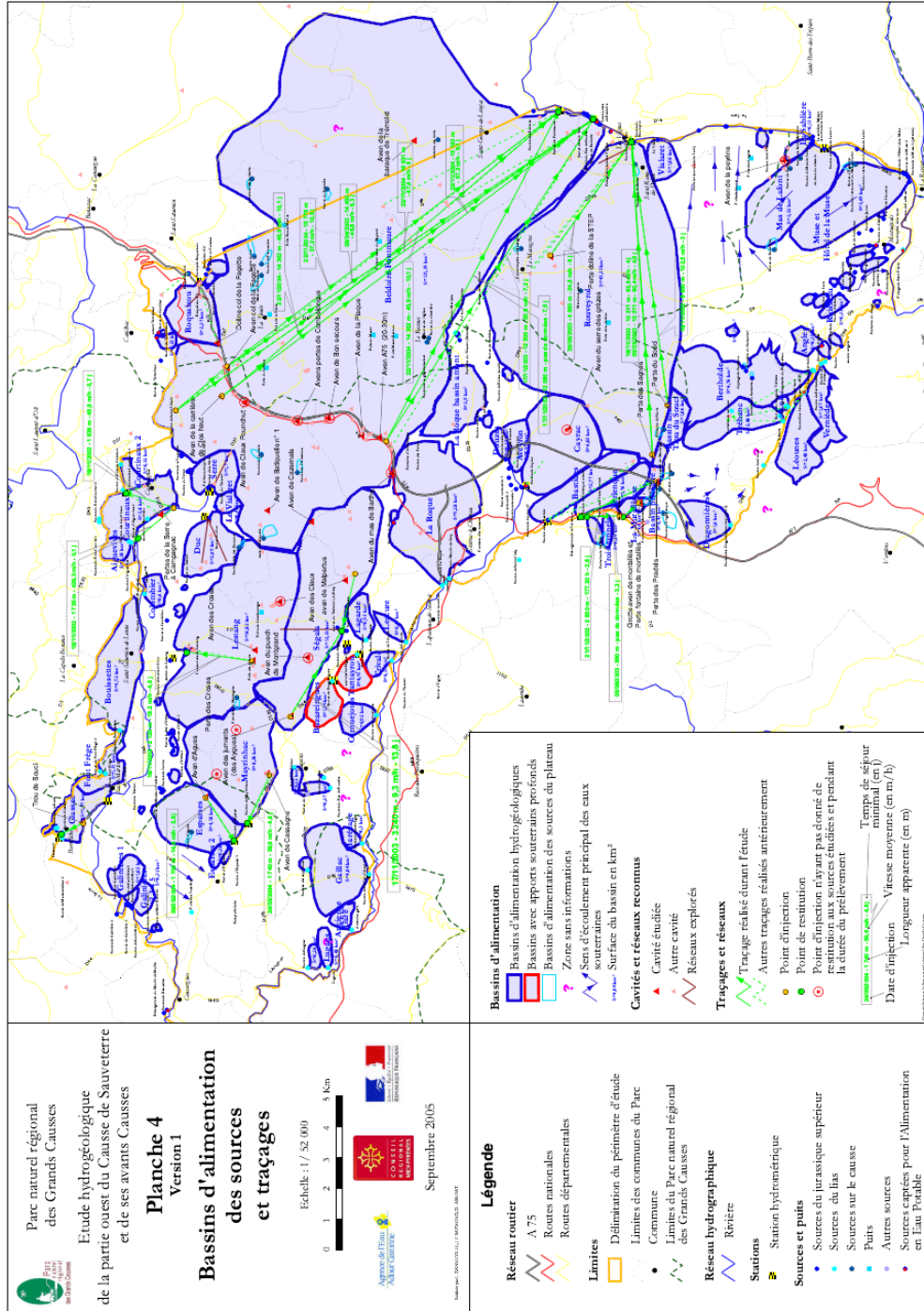
Traçages sur le Causse Noir et le Causse du Larzac, (Ambert et al., 1994)



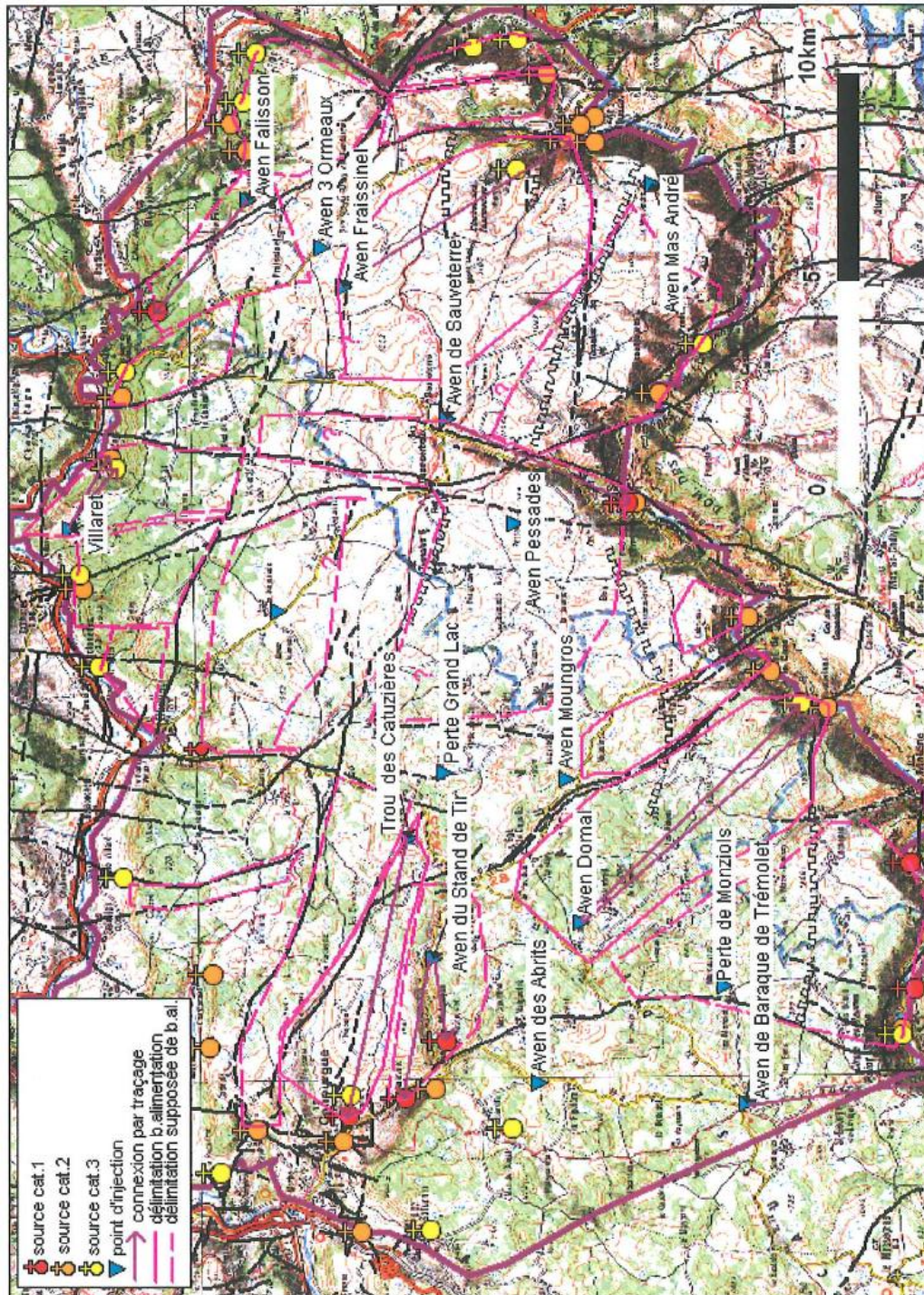
Traçages sur le Causse de Sauveterre Ouest (Bérard, 1987)



Traçages sur le Causse de Sauveterre Ouest (PNRGC, 2006)



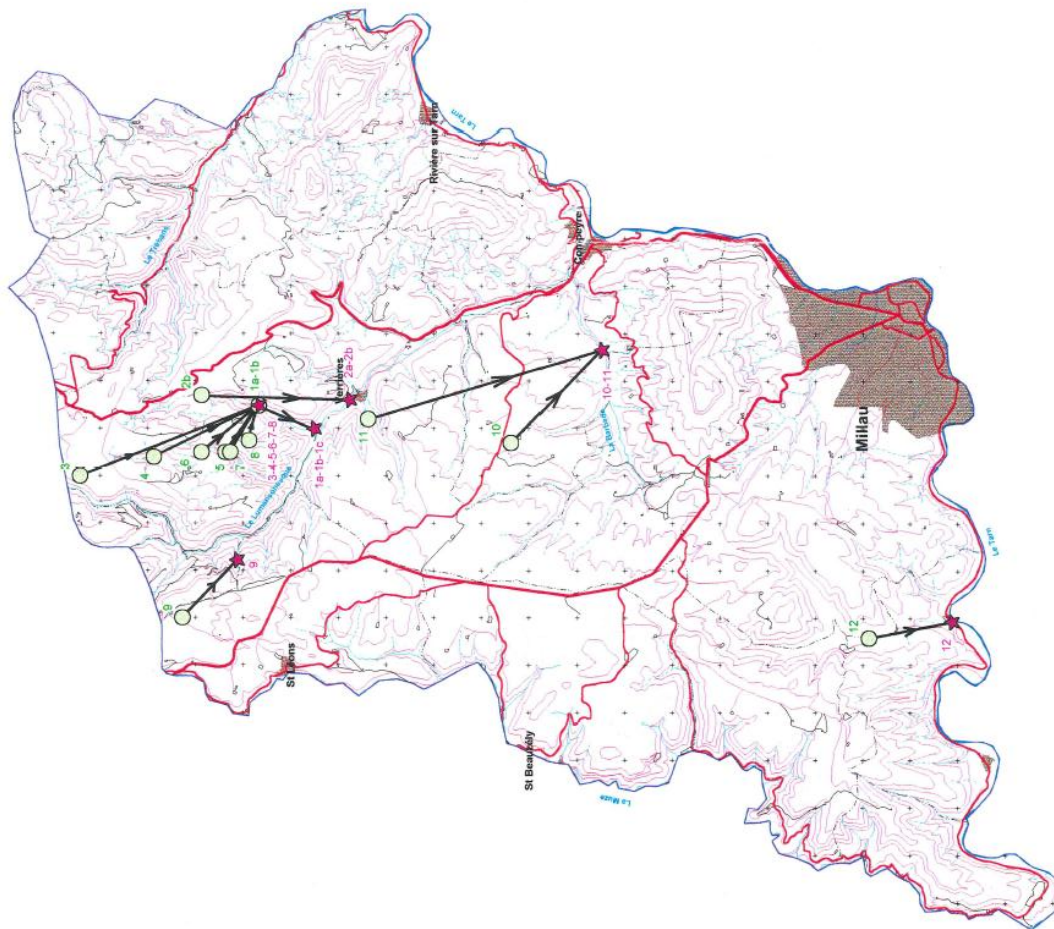
Traçages sur le Causse de Sauveterre Est (Dörfliger et Meus, 2006)



Traçages sur le Causse Rouge (Braneyre et al., 1998)

Figure 16
PARC NATUREL DES GRANDS CAUSSES
Connaissance, aménagement et protection
des ressources en eau souterraine
du Causse Rouge

CARTE DES TRACAGES



Rapport n° A12245

Annexe 2

Episodes Pluie – Débit sélectionnés sur une base de données journalières

Définition des variables spécifiques à cette étude :

- Date_deb : Date de début de l'épisode pluvieux (estimée à partir des données de pluie)
- Date_fin : Date de fin de l'épisode de crue (estimée à partir des données de débit)
- Lag (h) : Décalage temporel entre la pluie horaire maximale et le pic de crue, issu d'un calcul automatique. Certaines valeurs seront aberrantes, notamment dans le cas de longue période de précipitations peu intenses où la date d'occurrence de cette pluie horaire maximale n'a aucune conséquence sur la réponse hydrologique. Cette variable n'a d'intérêt que pour les épisodes Cévenols typiques.
- I_{max} (mm/h) : Pluie horaire maximale sur le bassin issue de la pondération par la méthode de Thiessen
- Nb lacune : Nombre de données manquantes pour le suivi de débit, variable qui permet de juger de la pertinence des données pour la station correspondante
- P3-10-30 (mm) : Pluie cumulée sur les 3, 10 et 30 jours précédents Date_deb.

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	I _{max} (mm/h)
1	1	Vebron	14/04/1998	25/04/1998	11	18	15/4/98 20:00	6	2	7	65	5	28	53	7
	2	Cassagnas	14/04/1998	25/04/1998	11	53	15/4/98 20:00	5	8	6	110	3	23	54	11
	3	Florac	14/04/1998	25/04/1998	11	124	15/4/98 21:00	7	19	0	90	3	25	56	8
	4	Cocures	14/04/1998	25/04/1998	11	34	15/4/98 18:00	3	12	0	104	1	23	61	11
	5	Montbrun	14/04/1998	25/04/1998	11	181	15/4/98 23:00	9	46	8	90	3	25	56	8
	6	Muse	14/04/1998	25/04/1998	11	200	16/4/98 1:00	11	54	0	64	11	37	57	9
	7	Meyrueis	14/04/1998	25/04/1998	11	17	15/4/98 20:00	6	6	3	93	8	35	53	7
	8	Mazet	14/04/1998	25/04/1998	11				4	0	93	7	34	53	7
	9	Nant	14/04/1998	25/04/1998	11	31	15/4/98 21:00	7	12	8	95	9	31	47	7
	10	Massebiau	14/04/1998	25/04/1998	11	48	16/4/98 1:00	11	22	0	84	9	32	48	7
	11	Millau	14/04/1998	25/04/1998	11	298	16/4/98 7:00	17	94	0	67	11	34	52	7
2	1	Vebron	26/04/1998	14/05/1998	18	17	30/4/98 3:00	-37	3	12	178	0	10	118	16
	2	Cassagnas	26/04/1998	14/05/1998	18	46	30/4/98 3:00	9	14	7	167	0	9	163	19

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)	
	3	Florac	26/04/1998	14/05/1998	18	111	30/4/98 4:00	10	35	0	182	0	9	146	16	
	4	Cocures	26/04/1998	14/05/1998	18	61	30/4/98 4:00	10	27	0	197	0	8	165	19	
	5	Montbrun	26/04/1998	14/05/1998	18	180	1/5/98 0:00	30	93	14	182	0	9	146	16	
	6	Muse	26/04/1998	14/05/1998	18	246	1/5/98 1:00	27	121	0	103	0	23	121	6	
	7	Meyrueis	26/04/1998	14/05/1998	18	25	30/4/98 3:00	-37	14	2	151	0	13	145	16	
	8	Mazet	26/04/1998	14/05/1998	18				7	0	145	0	12	146	16	
	9	Nant	26/04/1998	14/05/1998	18	27	30/4/98 5:00	-35	23	4	132	0	13	141	16	
	10	Massebiau	26/04/1998	14/05/1998	18	52	30/4/98 6:00	83	46	0	116	0	15	132	6	
	11	Millau	26/04/1998	14/05/1998	18	380	1/5/98 7:00	108	218	0	101	0	20	118	6	
	3	1	Vebron	27/12/1998	06/02/1999	41	52	1/1/99 2:00	4	28	16	345	0	24	34	8
		2	Cassagnas	27/12/1998	06/02/1999	41	88	1/1/99 3:00	34	49	22	326	0	10	17	11
3		Florac	27/12/1998	06/02/1999	41	216	1/1/99 4:00	17	65	0	350	0	15	23	9	
4		Cocures	27/12/1998	06/02/1999	41	114	1/1/99 3:00	34	43	0	238	0	10	21	11	
5		Montbrun	27/12/1998	06/02/1999	41	314	1/1/99 5:00	18	234	19	239	0	13	22	9	
6		Muse	27/12/1998	06/02/1999	41	444	1/1/99 8:00	23	197	0	185	1	14	29	5	
7		Meyrueis	27/12/1998	06/02/1999	41	49	4/2/99 8:00	826	31	28	354	0	17	27	8	
8		Mazet	27/12/1998	06/02/1999	41				22	0	344	0	18	27	7	
9		Nant	27/12/1998	06/02/1999	41	107	1/1/99 3:00	15	77	15	284	0	18	27	7	
10		Massebiau	27/12/1998	06/02/1999	41	139	2/1/99 0:00	-381	96	0	248	0	16	27	5	
11		Millau	27/12/1998	06/02/1999	41	772	1/1/99 6:00	22	354	0	204	1	15	28	5	
4	1	Vebron	01/05/1999	01/07/1999	61	136	18/5/99 2:00	5	9	43	357	5	69	105	33	
	2	Cassagnas	01/05/1999	01/07/1999	61	105	18/5/99 3:00	6	23	37	359	2	57	76	30	
	3	Florac	01/05/1999	01/07/1999	61	380	18/5/99 3:00	6	68	0	360	3	56	81	31	
	4	Cocures	01/05/1999	01/07/1999	61	174	18/5/99 5:00	8	52	0	272	4	31	65	30	
	5	Montbrun	01/05/1999	01/07/1999	61	447	18/5/99 6:00	9	159	38	270	2	33	66	31	

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)
	6	Muse	01/05/1999	01/07/1999	61	627	18/5/99 7:00	18	219	0	225	1	23	68	9
	7	Meyrueis	01/05/1999	01/07/1999	61	48	17/5/99 23:00	2	26	50	339	10	61	93	33
	8	Mazet	01/05/1999	01/07/1999	61				16	0	339	8	56	96	33
	9	Nant	01/05/1999	01/07/1999	61	113	17/5/99 23:00	11	53	30	309	6	54	93	13
	10	Massebiau	01/05/1999	01/07/1999	61	200	18/5/99 2:00	14	129	0	292	5	48	89	11
	11	Millau	01/05/1999	01/07/1999	61	994	18/5/99 13:00	26	443	0	252	3	34	77	10
5	1	Vebron	11/10/1999	08/11/1999	28	47	21/10/99 3:00	9	3	16	299	0	1	170	16
	2	Cassagnas	11/10/1999	08/11/1999	28	99	21/10/99 6:00	5	12	14	278	0	1	150	27
	3	Florac	11/10/1999	08/11/1999	28	225	21/10/99 7:00	6	29	0	306	0	1	151	17
	4	Cocures	11/10/1999	08/11/1999	28	190	21/10/99 7:00	6	30	0	209	0	3	134	27
	5	Montbrun	11/10/1999	08/11/1999	28	352	21/10/99 9:00	8	72	11	203	0	3	117	17
	6	Muse	11/10/1999	08/11/1999	28	396	21/10/99 11:00	10	75	0	131	0	6	98	7
	7	Meyrueis	11/10/1999	08/11/1999	28	25	21/10/99 2:00	8	9	20	284	0	1	143	16
	8	Mazet	11/10/1999	08/11/1999	28				10	0	271	0	1	142	15
	9	Nant	11/10/1999	08/11/1999	28	80	21/10/99 4:00	78	21	5	211	0	1	123	17
	10	Massebiau	11/10/1999	08/11/1999	28	136	21/10/99 6:00	80	39	0	186	0	2	112	14
	11	Millau	11/10/1999	08/11/1999	28	583	21/10/99 16:00	89	134	0	150	0	5	104	9
6	1	Vebron	08/11/1999	09/12/1999	31	2	17/11/99 21:00	122	1	10	217	3	17	299	9
	2	Cassagnas	08/11/1999	09/12/1999	31	41	13/11/99 22:00	27	11	16	163	2	16	278	8
	3	Florac	08/11/1999	09/12/1999	31	136	13/11/99 22:00	27	37	0	178	2	19	306	8
	4	Cocures	08/11/1999	09/12/1999	31	63	13/11/99 22:00	27	29	0	167	9	27	209	8
	5	Montbrun	08/11/1999	09/12/1999	31	192	14/11/99 0:00	29	90	8	142	6	24	203	8
	6	Muse	08/11/1999	09/12/1999	31	251	14/11/99 4:00	-113	105	0	94	6	21	131	4
	7	Meyrueis	08/11/1999	09/12/1999	31	75	13/11/99 21:00	26	20	26	274	4	13	284	9
	8	Mazet	08/11/1999	09/12/1999	31				13	0	247	3	15	271	6

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)
	9	Nant	08/11/1999	09/12/1999	31	137	13/11/99 22:00	27	34	6	212	3	16	211	7
	10	Massebiau	08/11/1999	09/12/1999	31	229	14/11/99 0:00	-117	84	0	183	4	18	187	5
	11	Millau	08/11/1999	09/12/1999	31	544	14/11/99 7:00	18	221	0	129	5	19	151	5
7	1	Vebron	27/09/2000	09/10/2000	12	67	29/9/00 13:00	13	3	7	351	3	67	89	35
	2	Cassagnas	27/09/2000	09/10/2000	12	127	29/9/00 15:00	6	6	8	229	3	86	107	36
	3	Florac	27/09/2000	09/10/2000	12	292	29/9/00 16:00	7	16	0	284	3	90	110	28
	4	Cocures	27/09/2000	09/10/2000	12	224	29/9/00 17:00	8	16	0	154	6	60	115	36
	5	Montbrun	27/09/2000	09/10/2000	12	435	29/9/00 18:00	9	43	10	175	6	66	115	28
	6	Muse	27/09/2000	09/10/2000	12	587	29/9/00 19:00	12	59	0	152	10	55	119	13
	7	Meyrueis	27/09/2000	09/10/2000	12	20	29/9/00 12:00	12	3	13	231	8	67	105	35
	8	Mazet	27/09/2000	09/10/2000	12						223	6	65	101	35
	9	Nant	27/09/2000	09/10/2000	12	25	29/9/00 15:00	15	6	6	134	9	60	94	35
	10	Massebiau	27/09/2000	09/10/2000	12	80	29/9/00 17:00	10	16	0	124	11	61	99	12
	11	Millau	27/09/2000	09/10/2000	12	808	30/9/00 1:00	18	93	0	138	12	56	109	12
8	1	Vebron	15/10/2001	05/11/2001	21	119	20/10/01 10:00	10	8	15	431	1	21	203	32
	2	Cassagnas	15/10/2001	05/11/2001	21	139	20/10/01 18:00	5	14	11	296	4	16	134	40
	3	Florac	15/10/2001	05/11/2001	21	456	20/10/01 12:00	-1	41	0	341	4	21	162	23
	4	Cocures	15/10/2001	05/11/2001	21	257	20/10/01 18:00	5	29	12	204	1	16	119	40
	5	Montbrun	15/10/2001	05/11/2001	21	547	20/10/01 21:00	8	85	10	196	2	15	121	23
	6	Muse	15/10/2001	05/11/2001	21	646	20/10/01 21:00	14	87	0	90	1	11	102	9
	7	Meyrueis	15/10/2001	05/11/2001	21	27	20/10/01 12:00	12	5	19	249	1	13	124	32
	8	Mazet	15/10/2001	05/11/2001	21						265	2	15	133	32
	9	Nant	15/10/2001	05/11/2001	21	79	20/10/01 14:00	14	13	8	138	1	12	94	12
	10	Massebiau	15/10/2001	05/11/2001	21	90	20/10/01 15:00	15	14	0	108	1	12	90	8
	11	Millau	15/10/2001	05/11/2001	21	25	15/10/01 8:00	-118	44	22	92	1	11	96	8

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)
9	1	Vebron	07/10/2002	19/10/2002	12	56	10/10/02 15:00	30	3	10	308	0	0	177	20
	2	Cassagnas	07/10/2002	19/10/2002	12	42	10/10/02 7:00	-13	5	10	229	0	0	163	12
	3	Florac	07/10/2002	19/10/2002	12	273	10/10/02 17:00	33	23	0	246	0	0	186	14
	4	Cocures	07/10/2002	19/10/2002	12	39	10/10/02 15:00	-7	11	0	119	1	1	62	6
	5	Montbrun	07/10/2002	19/10/2002	12	239	10/10/02 19:00	35	48	9	149	0	0	99	8
	6	Muse	07/10/2002	19/10/2002	12	297	10/10/02 20:00	21	55	0	110	0	0	74	8
	7	Meyrueis	07/10/2002	19/10/2002	12	54	10/10/02 16:00	31	9	2	256	0	0	125	16
	8	Mazet	07/10/2002	19/10/2002	12				7	0	242	0	0	138	15
	9	Nant	07/10/2002	19/10/2002	12	62	10/10/02 19:00	21	13	3	170	0	0	78	11
	10	Massebiau	07/10/2002	19/10/2002	12	125	10/10/02 20:00	22	28	0	147	0	0	65	11
	11	Millau	07/10/2002	19/10/2002	12	489	11/10/02 2:00	28	83	0	121	0	0	66	8
10	1	Vebron	18/11/2002	09/12/2002	21	48	24/11/02 23:00	7	4	17	296	17	86	153	25
	2	Cassagnas	18/11/2002	09/12/2002	21	93	24/11/02 23:00	9	14	17	211	19	59	106	15
	3	Florac	18/11/2002	09/12/2002	21	239	25/11/02 0:00	8	41	0	245	21	72	128	18
	4	Cocures	18/11/2002	09/12/2002	21	145	25/11/02 0:00	4	36	0	186	21	57	103	12
	5	Montbrun	18/11/2002	09/12/2002	21	327	25/11/02 2:00	6	104	16	177	17	51	97	11
	6	Muse	18/11/2002	09/12/2002	21	419	25/11/02 6:00	10	129	0	138	11	42	90	10
	7	Meyrueis	18/11/2002	09/12/2002	21	33	24/11/02 23:00	7	16	7	261	12	63	115	21
	8	Mazet	18/11/2002	09/12/2002	21						254	14	64	116	21
	9	Nant	18/11/2002	09/12/2002	21	70	24/11/02 23:00	7	24	8	199	11	44	85	20
	10	Massebiau	18/11/2002	09/12/2002	21	130	25/11/02 2:00	10	63	0	175	9	39	79	15
	11	Millau	18/11/2002	09/12/2002	21	637	25/11/02 9:00	13	221	0	150	10	40	83	9
11	1	Vebron	26/09/2003	15/10/2003	19	15	1/10/03 11:00	7	0	11	326	1	21	72	27
	2	Cassagnas	26/09/2003	15/10/2003	19	42	1/10/03 12:00	5	2	11	212	0	28	69	21
	3	Florac	26/09/2003	15/10/2003	19	75	1/10/03 13:00	6	4	0	248	0	24	69	18

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	I _{max} (mm/h)
	4	Cocures	26/09/2003	15/10/2003	19	26	1/10/03 14:00	3	4	10	75	1	18	78	6
	5	Montbrun	26/09/2003	15/10/2003	19	94	1/10/03 16:00	10	13	15	115	1	19	76	8
	6	Muse	26/09/2003	15/10/2003	19	73	1/10/03 20:00	14	15	0	81	1	16	88	7
	7	Meyrueis	26/09/2003	15/10/2003	19	12	1/10/03 12:00	7	3	14	205	1	18	67	19
	8	Mazet	26/09/2003	15/10/2003	19				2	0	221	0	18	66	19
	9	Nant	26/09/2003	15/10/2003	19	24	1/10/03 14:00	9	9	11	149	1	18	56	13
	10	Massebiau	26/09/2003	15/10/2003	19	33	1/10/03 17:00	12	7	0	121	1	19	60	11
	11	Millau	26/09/2003	15/10/2003	19	88	2/10/03 4:00	23	23	0	96	1	18	77	8
12	1	Vebron	14/11/2003	05/01/2004	52	140	24/11/03 4:00	8	30	20	1028	5	66	193	18
	2	Cassagnas	14/11/2003	05/01/2004	52	179	24/11/03 5:00	3	67	22	783	3	50	155	33
	3	Florac	14/11/2003	05/01/2004	52	635	24/11/03 5:00	3	193	0	871	4	55	167	22
	4	Cocures	14/11/2003	05/01/2004	52	352	24/11/03 5:00	3	28	4	558	4	34	118	33
	5	Montbrun	14/11/2003	05/01/2004	52	810	24/11/03 7:00	5	419	39	583	4	33	129	12
	6	Muse	14/11/2003	05/01/2004	52	1120	24/11/03 10:00	-219	454	0	389	4	17	114	10
	7	Meyrueis	14/11/2003	05/01/2004	52	271	24/11/03 3:00	7	66	12	972	3	34	140	23
	8	Mazet	14/11/2003	05/01/2004	52				49	0	952	3	40	148	23
	9	Nant	14/11/2003	05/01/2004	52	942	24/11/03 4:00	8	142	18	684	4	25	110	13
	10	Massebiau	14/11/2003	05/01/2004	52	482	24/11/03 5:00	7	221	0	571	4	19	103	11
	11	Millau	14/11/2003	05/01/2004	52	2056	4/12/03 0:00	10	938	0	447	4	16	109	9
13	1	Vebron	28/03/2004	26/04/2004	29	45	31/3/04 10:00	8	8	4	312	0	5	84	12
	2	Cassagnas	28/03/2004	26/04/2004	29	75	2/4/04 21:00	65	18	4	242	0	2	86	13
	3	Florac	28/03/2004	26/04/2004	29	191	31/3/04 15:00	11	56	0	279	0	3	83	10
	4	Cocures	28/03/2004	26/04/2004	29	117	2/4/04 22:00	6	43	0	188	0	4	35	7
	5	Montbrun	28/03/2004	26/04/2004	29	235	3/4/04 0:00	68	145	14	194	0	4	52	7
	6	Muse	28/03/2004	26/04/2004	29	311	31/3/04 18:00	-46	148	0	136	0	8	53	6

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)
	7	Meyrueis	28/03/2004	26/04/2004	29	46	31/3/04 10:00	6	24	3	354	0	8	78	12
	8	Mazet	28/03/2004	26/04/2004	29	48	2/4/04 20:00	64	17	0	341	0	7	83	12
	9	Nant	28/03/2004	26/04/2004	29	129	31/3/04 11:00	7	40	5	251	0	7	79	14
	10	Massebiau	28/03/2004	26/04/2004	29	134	31/3/04 10:00	6	69	0	210	0	7	67	10
	11	Millau	28/03/2004	26/04/2004	29	583	31/3/04 23:00	-41	282	0	159	0	8	58	6
14	1	Vebron	26/04/2004	04/05/2004	8	79	30/4/04 4:00	8	4	0	240	0	22	312	21
	2	Cassagnas	26/04/2004	04/05/2004	8	105	30/4/04 5:00	11	9	0	187	0	21	242	14
	3	Florac	26/04/2004	04/05/2004	8	330	30/4/04 6:00	10	29	0	211	0	20	279	15
	4	Cocures	26/04/2004	04/05/2004	8	136	30/4/04 6:00	6	19	0	112	0	24	188	7
	5	Montbrun	26/04/2004	04/05/2004	8	328	30/4/04 8:00	8	58	2	132	0	23	194	8
	6	Muse	26/04/2004	04/05/2004	8	462	30/4/04 9:00	12	70	0	108	0	25	136	7
	7	Meyrueis	26/04/2004	04/05/2004	8	52	30/4/04 4:00	6	8	1	201	0	51	354	16
	8	Mazet	26/04/2004	04/05/2004	8	44	30/4/04 4:00	6	6	0	198	0	45	341	16
	9	Nant	26/04/2004	04/05/2004	8	175	30/4/04 5:00	7	17	2	159	0	44	251	16
	10	Massebiau	26/04/2004	04/05/2004	8	159	30/4/04 5:00	7	30	0	142	0	40	210	13
	11	Millau	26/04/2004	04/05/2004	8	875	30/4/04 14:00	16	146	0	122	0	31	159	9
15	1	Vebron	03/09/2005	15/09/2005	12	2	9/9/05 3:00	77	0	3	255	0	4	29	36
	2	Cassagnas	03/09/2005	15/09/2005	12	15	9/9/05 2:00	64	1	3	220	0	3	37	16
	3	Florac	03/09/2005	15/09/2005	12	30	9/9/05 4:00	53	4	0	238	0	3	36	17
	4	Cocures	03/09/2005	15/09/2005	12	38	9/9/05 3:00	51	6	0	241	0	6	54	15
	5	Montbrun	03/09/2005	15/09/2005	12	92	9/9/05 6:00	55	18	4	206	0	5	40	12
	6	Muse	03/09/2005	15/09/2005	12	89	9/9/05 9:00	58	18	0	146	0	8	32	9
	7	Meyrueis	03/09/2005	15/09/2005	12	5	8/9/05 23:00	49	2	0	185	0	6	32	17
	8	Mazet	03/09/2005	15/09/2005	12	6	7/9/05 5:00	30	1	0	187	0	5	30	17
	9	Nant	03/09/2005	15/09/2005	12	10	7/9/05 11:00	14	7	4	144	0	6	34	15

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)
	10	Massebiau	03/09/2005	15/09/2005	12	7	7/9/05 16:00	19	4	0	131	0	6	34	13
	11	Millau	03/09/2005	15/09/2005	12	105	9/9/05 15:00	64	24	0	134	0	7	32	9
16	1	Vebron	26/01/2006	14/02/2006	19	23	29/1/06 6:00	14	4	0	192	0	12	163	11
	2	Cassagnas	26/01/2006	14/02/2006	19	54	29/1/06 18:00	26	13	0	174	0	9	82	16
	3	Florac	26/01/2006	14/02/2006	19	177	30/1/06 4:00	35	39	0	170	0	10	111	12
	4	Cocures	26/01/2006	14/02/2006	19	63	30/1/06 4:00	33	18	0	142	0	3	35	11
	5	Montbrun	26/01/2006	14/02/2006	19	208	30/1/06 6:00	37	80	1	139	0	4	60	12
	6	Muse	26/01/2006	14/02/2006	19	313	30/1/06 8:00	36	108	0	99	0	4	54	6
	7	Meyrueis	26/01/2006	14/02/2006	19	65	30/1/06 0:00	32	18	0	252	0	10	134	10
	8	Mazet	26/01/2006	14/02/2006	19	37	30/1/06 3:00	35	8	0	237	0	11	133	10
	9	Nant	26/01/2006	14/02/2006	19	125	30/1/06 4:00	36	36	0	192	0	8	94	10
	10	Massebiau	26/01/2006	14/02/2006	19	165	30/1/06 7:00	39	55	0	168	0	6	74	8
	11	Millau	26/01/2006	14/02/2006	19	744	30/1/06 9:00	38	220	0	124	0	4	60	6
17	1	Vebron	11/09/2006	21/09/2006	10	3	14/9/06 8:00	15	0	0	257	0	0	102	42
	2	Cassagnas	11/09/2006	21/09/2006	10	6	14/9/06 7:00	6	1	0	158	0	0	62	16
	3	Florac	11/09/2006	21/09/2006	10	23	14/9/06 11:00	18	3	0	192	0	0	78	22
	4	Cocures	11/09/2006	21/09/2006	10	14	14/9/06 10:00	8	3	0	128	0	1	99	12
	5	Montbrun	11/09/2006	21/09/2006	10	45	14/9/06 14:00	24	11	0	129	0	4	88	10
	6	Muse	11/09/2006	21/09/2006	10	43	15/9/06 10:00	44	14	0	86	0	4	90	8
	7	Meyrueis	11/09/2006	21/09/2006	10	23	14/9/06 4:00	11	7	0	253	0	0	105	27
	8	Mazet	11/09/2006	21/09/2006	10	51	13/9/06 22:00	5	4	0	232	0	0	98	27
	9	Nant	11/09/2006	21/09/2006	10	26	14/9/06 23:00	34	11	0	164	0	0	79	16
	10	Massebiau	11/09/2006	21/09/2006	10	25	15/9/06 1:00	36	9	0	137	0	0	76	12
	11	Millau	11/09/2006	21/09/2006	10	80	15/9/06 5:00	39	28	0	104	0	2	83	9
18	1	Vebron	21/09/2006	09/10/2006	18	69	25/9/06 1:00	5	2	0	247	0	257	293	23

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)
	2	Cassagnas	21/09/2006	09/10/2006	18	56	25/9/06 1:00	5	2	0	155	0	158	164	21
	3	Florac	21/09/2006	09/10/2006	18	225	25/9/06 3:00	7	14	0	178	0	192	209	20
	4	Cocures	21/09/2006	09/10/2006	18	48	25/9/06 3:00	7	9	0	94	0	128	142	16
	5	Montbrun	21/09/2006	09/10/2006	18	208	25/9/06 5:00	9	36	0	107	0	129	148	16
	6	Muse	21/09/2006	09/10/2006	18	214	25/9/06 6:00	10	38	0	77	0	86	111	16
	7	Meyrueis	21/09/2006	09/10/2006	18	25	25/9/06 1:00	5	8	0	169	0	252	292	22
	8	Mazet	21/09/2006	09/10/2006	18	45	25/9/06 2:00	6	8	0	174	0	231	264	22
	9	Nant	21/09/2006	09/10/2006	18	115	25/9/06 2:00	6	21	0	132	0	164	189	21
	10	Massebiau	21/09/2006	09/10/2006	18	76	25/9/06 3:00	7	18	0	115	0	137	161	18
	11	Millau	21/09/2006	09/10/2006	18	350	25/9/06 13:00	17	74	0	91	0	104	128	16
	19	1	Vebron	09/10/2006	15/11/2006	37	96	19/10/06 16:00	5	8	8	548	3	26	504
2		Cassagnas	09/10/2006	15/11/2006	37	213	20/10/06 0:00	11	27	8	462	1	13	312	21
3		Florac	09/10/2006	15/11/2006	37	553	20/10/06 2:00	15	69	0	478	1	20	370	21
4		Cocures	09/10/2006	15/11/2006	37	275	20/10/06 1:00	13	46	0	205	4	20	223	14
5		Montbrun	09/10/2006	15/11/2006	37	530	20/10/06 3:00	197	146	8	249	3	18	236	12
6		Muse	09/10/2006	15/11/2006	37	685	20/10/06 4:00	199	141	0	126	3	17	162	10
7		Meyrueis	09/10/2006	15/11/2006	37	23	20/10/06 1:00	196	16	8	322	4	22	422	24
8		Mazet	09/10/2006	15/11/2006	37	50	20/10/06 0:00	195	15	0	365	4	21	405	25
9		Nant	09/10/2006	15/11/2006	37	157	20/10/06 3:00	198	53	8	186	3	15	296	22
10		Massebiau	09/10/2006	15/11/2006	37	98	20/10/06 3:00	198	43	0	142	3	15	252	18
11		Millau	09/10/2006	15/11/2006	37	1068	20/10/06 10:00	205	240	0	123	3	17	195	13
20	1	Vebron	18/11/2007	06/12/2007	18	25	22/11/07 7:00	29	4	1	292	0	2	20	9
	2	Cassagnas	18/11/2007	06/12/2007	18	1	1/12/07 2:00	255	1	15	292	0	1	17	8
	3	Florac	18/11/2007	06/12/2007	18	7	18/11/07 8:00	-66	30	0	231	0	1	19	6
	4	Cocures	18/11/2007	06/12/2007	18	6	3/12/07 11:00	260	17	0	171	0	2	17	6

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)
	5	Montbrun	18/11/2007	06/12/2007	18	157	22/11/07 13:00	-11	60	1	184	0	2	17	5
	6	Muse	18/11/2007	06/12/2007	18	147	22/11/07 14:00	-10	53	0	123	0	4	17	4
	7	Meyrueis	18/11/2007	06/12/2007	18	2	4/12/07 17:00	327	1	15	158	0	3	25	5
	8	Mazet	18/11/2007	06/12/2007	18	35	21/11/07 18:00	16	10	0	283	0	4	26	9
	9	Nant	18/11/2007	06/12/2007	18	11	3/12/07 15:00	303	16	15	174	0	3	24	5
	10	Massebiau	18/11/2007	06/12/2007	18	51	22/11/07 10:00	34	18	0	137	0	3	22	4
	11	Millau	18/11/2007	06/12/2007	18	268	22/11/07 13:00	-11	96	0	117	0	4	18	4
21	1	Vebron	01/01/2008	01/02/2008	31	6	4/1/08 11:00	12	4	2	295	0	3	60	10
	2	Cassagnas	01/01/2008	01/02/2008	31	34	4/1/08 15:00	13	23	2	246	0	0	49	7
	3	Florac	01/01/2008	01/02/2008	31	86	4/1/08 14:00	12	52	0	236	0	1	56	9
	4	Cocures	01/01/2008	01/02/2008	31	38	12/1/08 1:00	200	14	0	200	0	0	53	8
	5	Montbrun	01/01/2008	01/02/2008	31	114	4/1/08 17:00	15	122	4	203	0	1	56	6
	6	Muse	01/01/2008	01/02/2008	31	118	7/1/08 6:00	-110	125	0	153	0	1	67	4
	7	Meyrueis	01/01/2008	01/02/2008	31	9	4/1/08 10:00	5	11	8	192	0	1	67	8
	8	Mazet	01/01/2008	01/02/2008	31	8	7/1/08 15:00	82	11	0	297	0	2	81	7
	9	Nant	01/01/2008	01/02/2008	31	25	4/1/08 9:00	3	40	2	204	0	1	73	5
	10	Massebiau	01/01/2008	01/02/2008	31	25	7/1/08 7:00	73	36	0	167	0	0	72	4
	11	Millau	01/01/2008	01/02/2008	31	209	7/1/08 11:00	-105	225	0	149	0	1	70	3
22	1	Vebron	16/04/2008	14/05/2008	28	46	20/4/08 21:00	52	5	2	259	7	34	84	12
	2	Cassagnas	16/04/2008	14/05/2008	28	56	20/4/08 23:00	54	18	2	240	3	29	67	10
	3	Florac	16/04/2008	14/05/2008	28	198	20/4/08 23:00	12	50	0	226	5	29	74	9
	4	Cocures	16/04/2008	14/05/2008	28	113	20/4/08 23:00	12	39	0	208	7	39	80	7
	5	Montbrun	16/04/2008	14/05/2008	28	252	21/4/08 0:00	13	119	2	201	6	33	77	7
	6	Muse	16/04/2008	14/05/2008	28	316	21/4/08 2:00	56	136	0	156	10	36	87	6
	7	Meyrueis	16/04/2008	14/05/2008	28	32	20/4/08 22:00	-361	15	2	196	8	31	84	7

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)
	8	Mazet	16/04/2008	14/05/2008	28	41	20/4/08 20:00	9	10	0	267	6	33	95	10
	9	Nant	16/04/2008	14/05/2008	28	87	21/4/08 0:00	80	40	3	183	9	30	85	9
	10	Massebiau	16/04/2008	14/05/2008	28	78	21/4/08 0:00	80	40	0	158	10	32	85	8
	11	Millau	16/04/2008	14/05/2008	28	551	21/4/08 8:00	62	242	0	149	11	35	87	5
23	1	Vebron	22/05/2008	01/07/2008	40	42	27/5/08 23:00	63	6	0	348	0	71	121	19
	2	Cassagnas	22/05/2008	01/07/2008	40	48	28/5/08 0:00	6	23	0	318	0	70	120	24
	3	Florac	22/05/2008	01/07/2008	40	162	28/5/08 1:00	7	63	0	314	0	57	104	22
	4	Cocures	22/05/2008	01/07/2008	40	102	28/5/08 2:00	7	55	0	363	0	55	111	24
	5	Montbrun	22/05/2008	01/07/2008	40	223	28/5/08 3:00	9	170	1	312	0	52	99	20
	6	Muse	22/05/2008	01/07/2008	40	265	28/5/08 4:00	10	194	0	249	0	44	86	13
	7	Meyrueis	22/05/2008	01/07/2008	40	38	27/5/08 22:00	5	20	2	280	0	47	95	23
	8	Mazet	22/05/2008	01/07/2008	40	40	27/5/08 22:00	5	13	0	346	0	69	126	24
	9	Nant	22/05/2008	01/07/2008	40	66	28/5/08 1:00	8	52	1	259	0	43	82	11
	10	Massebiau	22/05/2008	01/07/2008	40	58	2/6/08 7:00	134	54	0	231	0	41	76	9
	11	Millau	22/05/2008	01/07/2008	40	410	28/5/08 11:00	17	346	0	232	0	41	80	8
24	1	Vebron	26/10/2008	22/11/2008	27	52	2/11/08 19:00	4	7	0	416	0	18	82	13
	2	Cassagnas	26/10/2008	22/11/2008	27	120	2/11/08 7:00	-8	21	0	433	0	25	82	16
	3	Florac	26/10/2008	22/11/2008	27	341	2/11/08 9:00	-6	60	0	382	0	18	76	13
	4	Cocures	26/10/2008	22/11/2008	27	344	2/11/08 4:00	3	56	0	374	0	16	72	14
	5	Montbrun	26/10/2008	22/11/2008	27	462	2/11/08 10:00	-5	144	0	347	0	16	71	10
	6	Muse	26/10/2008	22/11/2008	27	611	2/11/08 12:00	-3	163	0	266	0	14	65	7
	7	Meyrueis	26/10/2008	22/11/2008	27	41	2/11/08 18:00	3	14	2	337	0	13	70	14
	8	Mazet	26/10/2008	22/11/2008	27	41	2/11/08 9:00	4	12	0	441	0	21	90	18
	9	Nant	26/10/2008	22/11/2008	27	73	3/11/08 2:00	11	34	0	314	1	15	66	13
	10	Massebiau	26/10/2008	22/11/2008	27	95	3/11/08 4:00	13	37	0	274	1	14	61	11

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	I _{max} (mm/h)
	11	Millau	26/10/2008	22/11/2008	27	965	2/11/08 17:00	2	282	0	257	0	14	61	8
25	1	Vebron	17/01/2009	25/02/2009	39	20	2/2/09 15:00	4	4	1	298	0	3	69	9
	2	Cassagnas	17/01/2009	25/02/2009	39	52	3/2/09 5:00	17	18	3	245	0	2	69	8
	3	Florac	17/01/2009	25/02/2009	39	146	2/2/09 17:00	5	57	0	232	0	3	50	8
	4	Cocures	17/01/2009	25/02/2009	39	28	3/2/09 9:00	21	23	0	197	0	4	60	9
	5	Montbrun	17/01/2009	25/02/2009	39	148	3/2/09 12:00	24	132	2	206	0	3	45	7
	6	Muse	17/01/2009	25/02/2009	39	195	3/2/09 14:00	26	170	0	178	0	2	28	4
	7	Meyrueis	17/01/2009	25/02/2009	39	19	2/2/09 16:00	4	17	1	242	0	4	37	6
	8	Mazet	17/01/2009	25/02/2009	39	7	3/2/09 8:00	21	8	0	327	0	5	82	7
	9	Nant	17/01/2009	25/02/2009	39	35	2/2/09 16:00	8	48	1	220	0	3	42	5
	10	Massebiau	17/01/2009	25/02/2009	39	19	11/2/09 13:00	228	41	26	192	0	2	28	4
	11	Millau	17/01/2009	25/02/2009	39	362	3/2/09 19:00	275	329	0	179	0	2	25	3
26	1	Vebron	09/04/2009	12/05/2009	33	10	11/4/09 20:00	-347	5	0	215	20	28	48	12
	2	Cassagnas	09/04/2009	12/05/2009	33	21	11/4/09 20:00	-348	11	0	198	16	24	41	8
	3	Florac	09/04/2009	12/05/2009	33	87	11/4/09 22:00	14	41	0	192	15	23	41	8
	4	Cocures	09/04/2009	12/05/2009	33	79	11/4/09 22:00	-350	48	0	187	12	19	39	7
	5	Montbrun	09/04/2009	12/05/2009	33	150	12/4/09 0:00	16	139	0	182	13	21	38	7
	6	Muse	09/04/2009	12/05/2009	33	187	12/4/09 1:00	-347	157	0	180	13	22	36	6
	7	Meyrueis	09/04/2009	12/05/2009	33	39	11/4/09 22:00	16	21	0	230	16	27	47	9
	8	Mazet	09/04/2009	12/05/2009	33	29	11/4/09 18:00	-349	14	0	280	22	36	59	13
	9	Nant	09/04/2009	12/05/2009	33	78	11/4/09 18:00	-349	51	1	238	17	28	48	12
	10	Massebiau	09/04/2009	12/05/2009	33	93	12/4/09 18:00	-325	76	0	225	16	25	43	10
	11	Millau	09/04/2009	12/05/2009	33	395	12/4/09 7:00	-341	349	0	200	14	23	38	6
27	1	Vebron	17/12/2010	01/02/2011	46	61	23/12/10 13:00	12	7	3	246	1	3	90	10
	2	Cassagnas	17/12/2010	01/02/2011	46	72	23/12/10 12:00	18	19	3	252	1	4	101	11

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date_pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	Imax (mm/h)	
	3	Florac	17/12/2010	01/02/2011	46	256	23/12/10 14:00	5	60	0	204	1	3	92	9	
	4	Cocures	17/12/2010	01/02/2011	46	117	23/12/10 14:00	15	46	0	164	1	1	84	8	
	5	Montbrun	17/12/2010	01/02/2011	46	265	23/12/10 16:00	17	148	3	168	1	2	85	6	
	6	Muse	17/12/2010	01/02/2011	46	336	23/12/10 19:00	18	146	0	117	3	3	74	4	
	7	Meyrueis	17/12/2010	01/02/2011	46	21	23/12/10 10:00	9	16	3	143	2	2	65	8	
	8	Mazet	17/12/2010	01/02/2011	46	48	23/12/10 5:00	4	14	0	229	1	2	85	10	
	9	Nant	17/12/2010	01/02/2011	46	55	23/12/10 7:00	7	47	3	148	1	2	60	7	
	10	Massebiau	17/12/2010	01/02/2011	46	74	23/12/10 8:00	7	47	0	116	2	2	55	5	
	11	Millau	17/12/2010	01/02/2011	46	554	24/12/10 0:00	23	240	0	108	2	3	65	4	
	28	1	Vebron	10/03/2011	22/04/2011	43	75	15/3/11 18:00	68	13	3	394	0	0	39	10
		2	Cassagnas	10/03/2011	22/04/2011	43	56	16/3/11 8:00	-272	19	6	292	0	0	53	8
3		Florac	10/03/2011	22/04/2011	43	267	15/3/11 19:00	69	78	0	306	0	0	45	8	
4		Cocures	10/03/2011	22/04/2011	43	110	15/3/11 22:00	66	47	0	226	0	0	50	7	
5		Montbrun	10/03/2011	22/04/2011	43	259	15/3/11 22:00	25	144	3	248	0	0	42	6	
6		Muse	10/03/2011	22/04/2011	43	376	16/3/11 0:00	-280	163	0	166	0	0	32	5	
7		Meyrueis	10/03/2011	22/04/2011	43	68	15/3/11 21:00	12	25	3	318	0	0	32	6	
8		Mazet	10/03/2011	22/04/2011	43	78	15/3/11 21:00	12	21	0	391	0	0	41	7	
9		Nant	10/03/2011	22/04/2011	43	180	16/3/11 0:00	28	66	3	262	0	0	33	5	
10		Massebiau	10/03/2011	22/04/2011	43	175	16/3/11 0:00	-280	70	0	200	0	0	28	4	
11		Millau	10/03/2011	22/04/2011	43	843	16/3/11 4:00	-276	315	0	165	0	0	29	4	
29	1	Vebron	22/10/2011	10/12/2011	49	230	3/11/11 22:00	9	26	1	883	2	3	6	22	
	2	Cassagnas	22/10/2011	10/12/2011	49	284	3/11/11 20:00	3	48	1	830	1	1	2	27	
	3	Florac	22/10/2011	10/12/2011	49	888	3/11/11 21:00	-23	155	0	719	1	2	4	23	
	4	Cocures	22/10/2011	10/12/2011	49	425	3/11/11 22:00	5	88	0	539	3	4	9	21	
	5	Montbrun	22/10/2011	10/12/2011	49	994	4/11/11 0:00	-20	316	2	582	2	3	5	22	

Appui aux SCHAPI 2012 – Application de l'Indicateur Karst sur le bassin du Tarn à Millau

Episode	Station	Nom	Date_deb	Date_fin	durée (j)	Qmax (m ³ /s)	Date pic	Lag (h)	Vtot (Mm ³)	Nb lacune	P (mm)	P3 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	I _{max} (mm/h)
	6	Muse	22/10/2011	10/12/2011	49	1480	4/11/11 2:00	-18	275	0	407	2	3	5	15
	7	Meyrueis	22/10/2011	10/12/2011	49	79	3/11/11 23:00	-21	26	1	560	2	2	5	22
	8	Mazet	22/10/2011	10/12/2011	49	149	3/11/11 23:00	-21	31	0	800	1	1	3	28
	9	Nant	22/10/2011	10/12/2011	49	305	4/11/11 1:00	5	88	1	597	1	1	4	25
	10	Massebiau	22/10/2011	10/12/2011	49	212	4/11/11 1:00	5	99	0	492	2	2	4	25
	11	Millau	22/10/2011	10/12/2011	49	1874	4/11/11 7:00	-13	480	0	407	2	2	5	16



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

Service géologique régional Languedoc-Roussillon
1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 80