



Etude pilotée par l'EPTB Gardons et réalisée avec le concours financier de l'Agence de l'Eau RMC

Gestion quantitative de la ressource en eau du bassin versant des Gardons

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU KARST URGONIEN

Résumé technique

Rédacteur : P. Fénart

Société : HYDROFIS S.A.S.

Date émission : 07/09/2020



Gestion quantitative de la ressource en eau du bassin versant des Gardons
ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU KARST URGONIEN
Liste des documents

L'étude comporte les documents listés ci-dessous. Le présent document constitue le rapport surligné en gris.

		Nb Pages
I - DOCUMENTS PRINCIPAUX		
U1	ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU KARST URGONIEN - Résumé technique	52
U2	ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU KARST URGONIEN - Mémoire de synthèse	587
U3	ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU KARST URGONIEN - Cartographie de synthèse	4
Ila - MESURES et INVESTIGATIONS : BANCARISATION DES DONNEES		
U4	Rapport sur la bancarisation des données	70
Ilb - MESURES et INVESTIGATIONS : MESURES DE DEBITS		
U5	A - Présentation des points jaugés et des Méthodes utilisées	28
U6	B1a - Bilan des jaugeages – Campagnes 2016	29
U7	B1b – Observations de terrain – Campagnes de jaugeage 2016	30
U8	C2a - Bilan des jaugeages – Campagnes 2016 et 2017	50
U9	C2b – Observations de terrain – Campagnes de jaugeage 2017	40
U10	C3a - Bilan des jaugeages – Campagnes 2016 -2017-2018	74
U11	C3b – Observations de terrain – Campagnes de jaugeage 2018	22
Ilc - MESURES et INVESTIGATIONS : TRACAGES		
U12	Karst Urgonien - Traçage - Compte rendu d'opérations	17
Ild - MESURES et INVESTIGATIONS : EXPERTISE EN KARSTOLOGIE		
U13	Diagnostic karstologique du réservoir urgonien du Gardon	49
U14	Caractérisation géologique du réservoir karstique profond du bassin de Saint-Chaptes	60
III - PRODUCTION INTERMEDIAIRE		
U15	Rapport de synthèse préliminaire des connaissances historiques sur le karst urgonien	165
U16	Rapport d'exploitation des données historiques sur le karst urgonien	116
U17	Etudes complémentaires sur le karst urgonien - 2017	107
U18	Etudes complémentaires sur le karst urgonien - 2018	114

SOMMAIRE

1. ELEMENTS DE CON TEXTE	7
1.1 POURQUOI LE KARST URGONIEN A-T-IL FAIT L'OBJET D'UNE ETUDE SPECIFIQUE ?	7
Un enjeu de compréhension des relations entre eaux souterraines et eaux superficielles	7
Contenu de l'étude.....	8
1.2 QUELLES ETAIENT LES CONNAISSANCES EN DEBUT D'ETUDE ?.....	10
Une vision partagée d'un système karstique binaire et polyphasé.....	10
Des inconnues et des incertitudes majeures.....	12
Stratégie pour compléter les connaissances sur le système karstique	14
2. FONCTIONNEMENT DU KARST URGONIEN	15
2.1 L'AQUIFERE URGONIEN	15
Structure de l'aquifère	15
Extension du système karstique drainé par le Garon.....	15
Compartimentation	17
2.2 COMPORTEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'AQUIFERE URGONIEN.....	19
Comment l'eau entre-t-elle dans l'aquifère urgonien ?.....	19
Comment l'eau circule-t-elle dans l'aquifère urgonien ?	23
Comment l'eau sort elle de l'aquifère urgonien ?	27
Quelles sont les réserves de l'aquifère urgonien ?.....	30
Synthèse.....	31
3. IMPLICATIONS POUR UNE GESTION OPERATIONNELLE	33
3.1 EFFICACITE DU SOUTIEN D'ETIAGE DU BARRAGE DE STE CECILE D'ANDORGE	33
Destination des eaux infiltrées.....	33
Temps de transfert.....	33
3.2 IMPACT DES PRELEVEMENTS DANS L'AQUIFERE URGONIEN SUR LES DEBITS DU GARDON .	35
Quel est l'effet d'un pompage d'eaux souterraines sur le débit aux exutoires d'un système aquifère ?.....	35
Quelle méthode pour quantifier l'impact des prélèvements sur un système karstique ?.....	38
Application de la méthode pour une gestion a priori des autorisations de prélèvement	40
Application de la méthode pour une gestion a posteriori des autorisations de prélèvement.....	43
Peut-on envisager une gestion active de l'aquifère urgonien ?	45
3.3 GESTION PATRIMONIALE ET SUIVI PIEZOMETRIQUE	47
Objectifs du suivi	47
Nos propositions	47
4. CHIFFRES CLES DU KARST URGONIEN	51





TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Localisation des karsts hettangien et urgonien sur le bassin versant des Gardons.	7
Figure 2 : Contexte géologique et limites de l'aquifère (extrait des cartes géologiques Marseille et Valence au 1 : 250 000 éditées par le BRGM).	9
Figure 3 : Modèle conceptuel du système karstique urgonien drainé par le Gardon (début d'étude).	11
Figure 4 : Schéma conceptuel du fonctionnement de l'aquifère urgonien (début d'étude).	13
Figure 5 : Structure de l'aquifère urgonien.	16
Figure 6 : Compartimentation de l'aquifère urgonien drainé par le Gardon.	18
Figure 7 : Schéma conceptuel simplifié du fonctionnement de l'aquifère urgonien en fin d'étude (flux en moyenne interannuelle).	20
Figure 8 : Carte de localisation des piézomètres sur la bordure Nord et hypothèse de destination des eaux infiltrées au droit de la zone de pertes amont.	24
Figure 9 : Carte des modalités d'alimentation du Gardon par le système karstique.	28
Figure 10 : Synthèse des flux entre zones de recharge et zones d'exutoires (bilan annuel).	31
Figure 11 : Synthèse des flux entre zones de recharge et zones d'exutoires (photographie en situation d'étiage).	32
Figure 12 : Efficacité du soutien d'étiage du barrage de Ste Cécile d'Andorge.	34
Figure 13 : Schéma explicatif de l'impact d'un pompage sur le débit d'un système hydrogéologique caractérisé par un exutoire unique de type appareil alluvial.	36
Figure 14 : Schéma des impacts supposés des prélèvements dans le karst sur le débit du Gardon en fonction des paramètres hydrodynamiques.	37
Figure 15 : Localisation du Gardon aérien et souterrain dans le karst urgonien.	39
Figure 16 : Impact sur le débit du cours d'eau en fonction de la diffusivité et de la distance aux exutoires (temps de pompage de 4 mois).	43
Figure 17 : Impact sur le débit du cours d'eau en fonction de la diffusivité et de la distance aux exutoires (temps de pompage de 6 mois).	44
Figure 18 : Schéma explicatif des contraintes sur la gestion active.	45
Figure 19 : Equilibre à respecter pour une gestion active du karst urgonien.	46
Figure 20 : Localisation des nouveaux piézomètres recommandés.	50



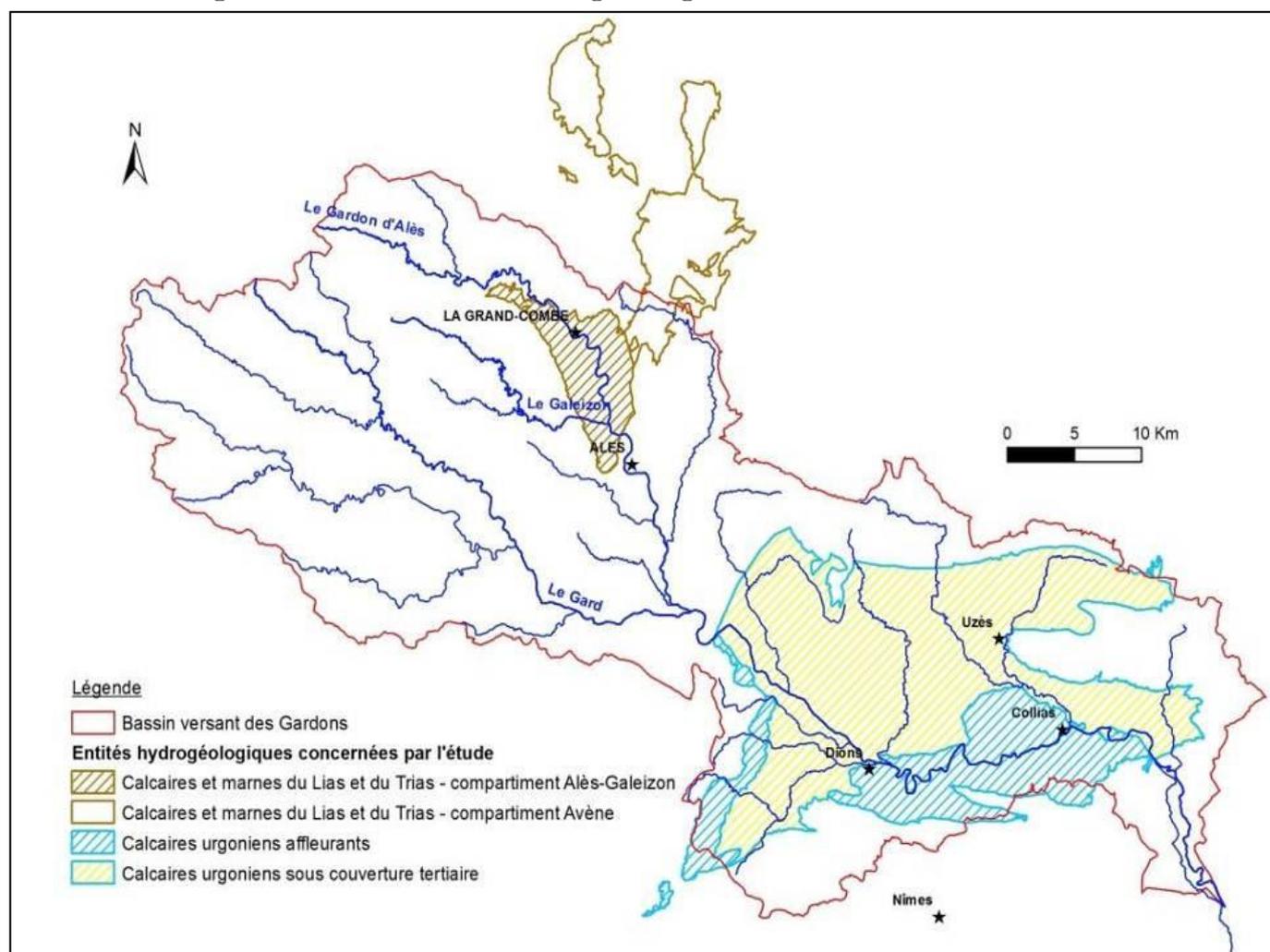
1 . ELEMENTS DE CON TEXTE

1.1 POURQUOI LE KARST URGONIEN A-T-IL FAIT L'OBJET D'UNE ETUDE SPECIFIQUE ?

UN ENJEU DE COMPREHENSION DES RELATIONS ENTRE EAUX SOUTERRAINES ET EAUX SUPERFICIELLES

L'EPTB des Gardons s'est porté maître d'ouvrage d'une étude hydrogéologique du karst urgonien sur le bassin versant des Gardons. L'objectif de cette étude est d'acquérir les connaissances nécessaires pour aider à la bonne gestion quantitative du Gardon dans son bassin versant. Plus précisément, il s'agit de caractériser le fonctionnement de ce compartiment souterrain afin de quantifier les débits infiltrés et restitués par le Gardon et ses affluents, de définir l'impact des prélèvements en nappe sur la ressource superficielle.

Figure 1 : Localisation des karsts bettangien et urgonien sur le bassin versant des Gardons.



Le karst urgonien correspond à un aquifère localisé au Nord de Nîmes. Il intéresse de grandes surfaces : depuis les garrigues nîmoises au Sud, entaillées par les gorges du Gardon, à Remoulins à l'Est, au massif du Bois de Lens à l'Ouest et au versant sud du massif de Belvezet au Nord.

Cet aquifère est composé des séries carbonatées du Crétacé inférieur à faciès urgonien (calcaires blancs à rudistes) qui présentent des évidences de karstification (présence d'avens et de réseaux de cavités, sources karstiques, phénomènes de pertes dans les cours d'eau,..) ; il est traversé par le Gardon et par plusieurs de ses affluents (Droude, Bourdic et Alzon).

CONTENU DE L'ETUDE

L'étude a été réalisée sur une durée de quatre ans (de juin 2016 à juin 2020). Les actions suivantes ont été mises en œuvre :

- Synthèse préliminaire initiale sur l'état des connaissances.
- Création et équipement de piézomètre pour un suivi horaire des variations piézométriques.
- Mesures hydrométriques pour quantifier les pertes et les alimentations du karst.
- Traçages pour déterminer la dynamique de transfert dans le karst.
- Campagnes hydrogéochimiques.
- Etude géomorphologique.
- Synthèse générale.

L'ensemble des observations et analyses a fait l'objet d'un rapport de synthèse. Après avoir rappelé les spécificités des milieux karstiques, il fait un point sur l'état des connaissances sur l'aquifère en début d'étude et propose une description détaillée des gains de connaissance apportés par l'étude. Les implications opérationnelles sur l'impact des prélèvements dans le karst sur le débit du Gardon et sur les enjeux liés au soutien d'étiage par les barrages en tête de bassin versant sont analysées en profondeur.

Le présent rapport est un résumé technique du rapport de synthèse.

Le marché d'étude porté par l'EPTB GARDONS et financé par l'Agence de l'Eau, a été réalisé par le groupement HYDROFIS-BRLi-HYDROGEOSPHERE. Le BRGM est assistant au Maître d'Ouvrage.

Le Groupement d'entreprises est composé des sociétés HYDROFIS (mandataire, en charge de la supervision de l'étude et des expertises hydrogéologiques), BRLi (en charge des mesures hydrométriques) et HYDROGEOSPHERE (en charge du suivi piézométrique et des opérations de traçage).

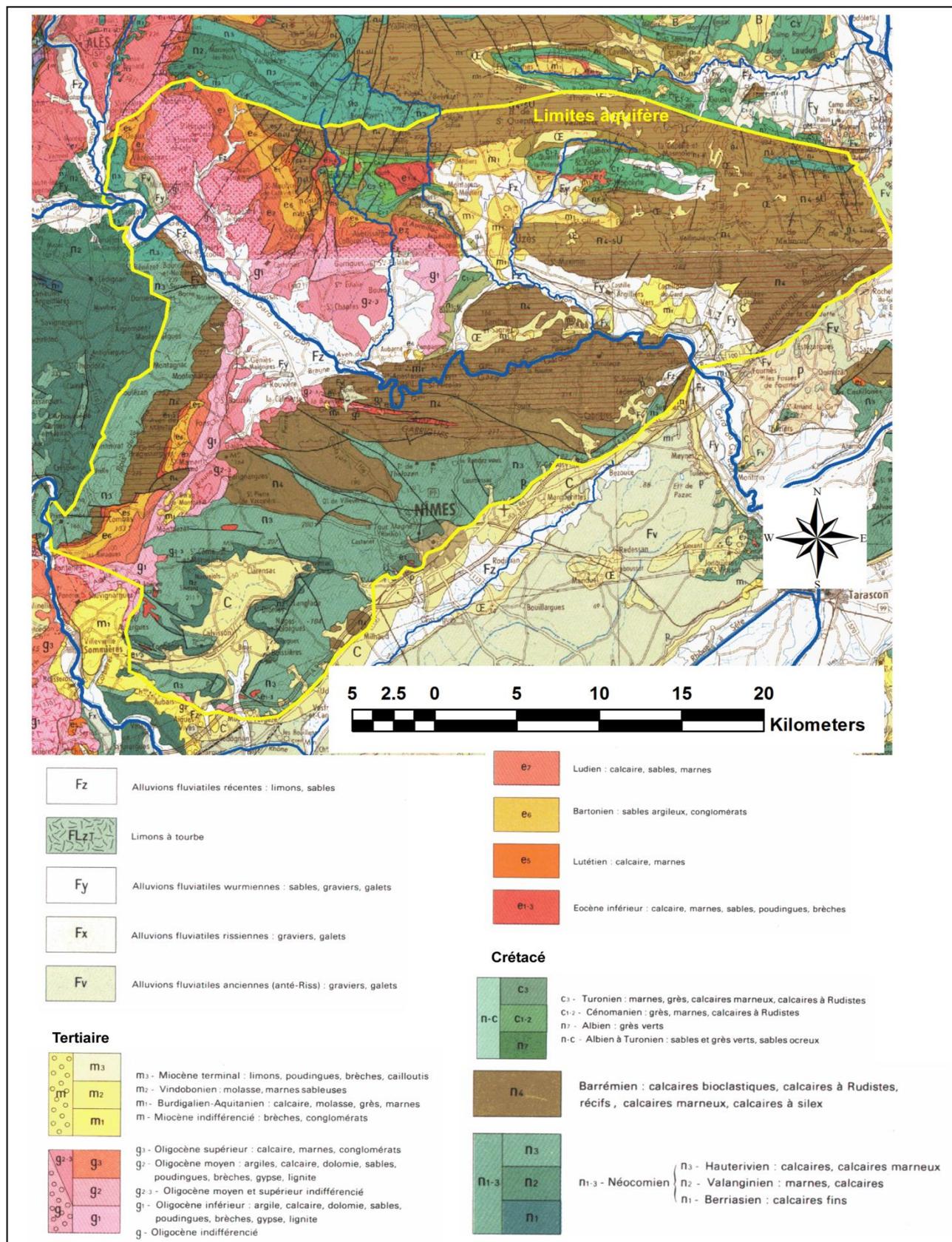
Des entreprises ont été mobilisées en sous-traitance :

- La société CENOTE est intervenue pour une étude géomorphologique de l'aquifère urgonien.
- Les analyses géochimiques ont été réalisées par CARSO (ions mineurs et majeurs), P'ENS LYON (isotopes du strontium) et l'Université d'Avignon (isotopes de l'eau).

Il est important de citer aussi comme partenaires :

- L'Université d'Avignon/CNRS (Laboratoire Espaces) qui au titre d'une Convention de recherche avec l'EPTB GARDONS a en charge le suivi de stations hydrométriques sur le Gardon, dont une station de mesure du débit en continu dans le Gardon juste à l'aval des sources de la Baume.
- L'Université de Montpellier (Laboratoire Géosciences) qui a réalisé au titre d'une Convention de recherche avec l'EPTB GARDONS une étude structurale du bassin priabonien de St Chaptès.

Figure 2 : Contexte géologique et limites de l'aquifère (extrait des cartes géologiques Marseille et Valence au 1 : 250 000 éditées par le BRGM).



1.2 QUELLES ETAIENT LES CONNAISSANCES EN DEBUT D'ETUDE ?

UNE VISION PARTAGEE D'UN SYSTEME KARSTIQUE BINAIRE ET POLYPHASE

La carte ci-dessous propose une vision synthétique des connaissances acquises en début d'étude sur le système karstique actif drainé par le Gardon.

En début d'étude, il y a un consensus scientifique pour décrire le système karstique actif drainé par le Gardon comme un système karstique polyphasé et binaire, c'est-à-dire alimenté pour partie par les pertes des cours d'eau (Gardon de façon certaine, Bourdic et Seynes de façon hypothétique) et pour partie par infiltration des eaux de pluie sur une partie de l'impluvium karstique.

Dans sa globalité, l'aquifère urgonien est compartimenté (failles, plis et remplissages tertiaires) et il est affecté par au moins quatre systèmes karstiques de drainage :

- Le système karstique actif du Gardon, objet de l'étude.
- Le système karstique actif de la Fontaine d'Eure.
- Le système karstique actif de la Font de St Paul.
- Le système karstique actif de la Fontaine de Nîmes.

Au vu de cette complexité, les impluviums karstiques participant à l'alimentation du système karstique drainé par le Gardon restaient à être déterminer.

On peut distinguer comme participant à l'alimentation du système karstique drainé par le Gardon :

- Le massif urgonien des gorges du Gardon (alimentation certaine).
- Le massif du bois de Lens (alimentation partielle).
- Les massifs du flanc sud du pli de Belvezet, le flanc sud des massifs d'Uzès et de Malmont (alimentation hypothétique)

D'autres alimentations secondaires, autres que des pertes de cours d'eau ou que l'infiltration des eaux météoriques, sont suspectées :

- Pertes du canal de Boucoiran.
- Flux en provenance des alluvions quaternaires de l'Esquielle et de l'Auriol.
- Alimentation possible par les calcaires ludiens.
- Alimentation possible par le complexe formé par la molasse miocène et les alluvions de l'Alzon.

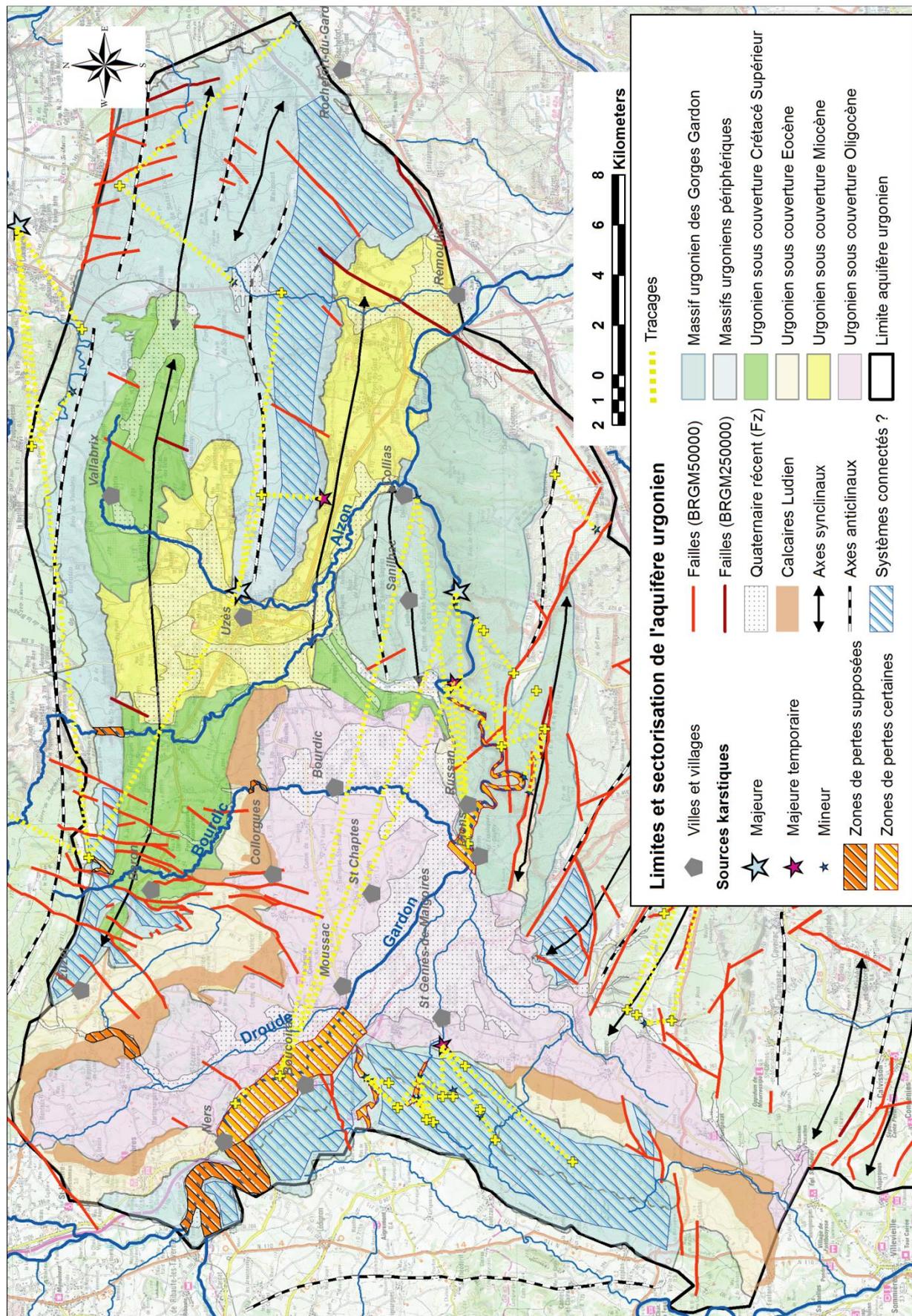
Ce système karstique affecte principalement l'aquifère urgonien. Localement, des écoulements dans les séries carbonatées de l'Hauterivien sont probables ; ils sont prouvés au droit du Bois de Lens.

Le système karstique actif du Gardon présente comme exutoire principal les sources de la Baume (avec, en début d'étude, une hypothèse de 75% des flux restitués entre La Baume et Collias) et secondairement la source de la grotte de Pâques. En début d'étude, on pouvait supposer des venues sous-alluviales entre la source de la grotte de Pâques et Remoulins mais elles restaient à être démontrées.

Des sources temporaires de débit significatif sont connues pour ce système karstique: sources des Frégeries, source du Creux des Fontaines, source de Tavel, source de Bord Nègre.



Figure 3 : Modèle conceptuel du système karstique urgonien drainé par le Gardon (début d'étude).



En début d'étude, les éléments suivants pouvaient être considérés comme certains :

- La structure du réservoir à petite échelle est relativement bien décrite. Des données de forage et la cartographie du toit de l'urgonien permettent une bonne appréhension du volume du réservoir en première approche. Il manque toutefois une donnée importante pour estimer les réserves statiques : nous ne disposons d'aucune donnée sur la géométrie du mur de l'aquifère. L'analyse des cartes géologiques permet aussi une première identification des axes synclinaux ou des axes anticlinaux, qui sont susceptibles de faire barrer les écoulements soit en « descendant » les séries peu perméables du Crétacé supérieur, soit en « remontant » les marnes du Valanginien dans le réservoir urgonien.

- Les données sont cohérentes quant au degré de karstification du système karstique actif : ce système présente une karstification développée avec un réseau bien hiérarchisé. Les directions des réseaux actifs ont été identifiées. Les forages bien positionnés présentent des productivités importantes. Les traçages réalisés depuis les années 60 en période d'étiage confirment tous le fait que l'aquifère constitue un système karstique bien développé dont les exutoires naturels sont les sources de la Baume principalement et la source de la Grotte de Pâques secondairement. Les vitesses de transfert de masse sont rapides : de l'ordre de 20 m/h en période de basses eaux. Cet avis doit être limité au seul réseau actif qui lie les zones de pertes connues avec les exutoires connus ; nous ne disposons pas à ce stade de l'étude d'une vision synthétique et systématique des processus et des structures de karstification à l'échelle de l'aquifère urgonien.

- Les localisations des principales zones de pertes du Gardon sont connues :
 - Sur le Gardon entre le Pont de Ners et Moussac.
 - Sur le Gardon entre Dions et le Pont de Russan.
- Certaines limites du système karstique actif sont bien déterminées :
 - Limite Sud-Ouest : marnes valanginiennes en cœur de l'anticlinal de Lédignan.
 - Limite Sud : système karstique de la Fontaine de Nîmes.
 - Limite Est : fossé d'Alès, constitués de séries tertiaires a priori peu perméables.
 - Alluvions du Gardon : limite drainante à l'aval des sources de la Baume.

Le schéma ci-dessous présente une vision intégrée et synthétique des éléments de connaissance et des principales interrogations sur le karst urgonien en début d'étude.

DES INCONNUES ET DES INCERTITUDES MAJEURES

En début d'étude, certaines lacunes de connaissance avaient été identifiées :

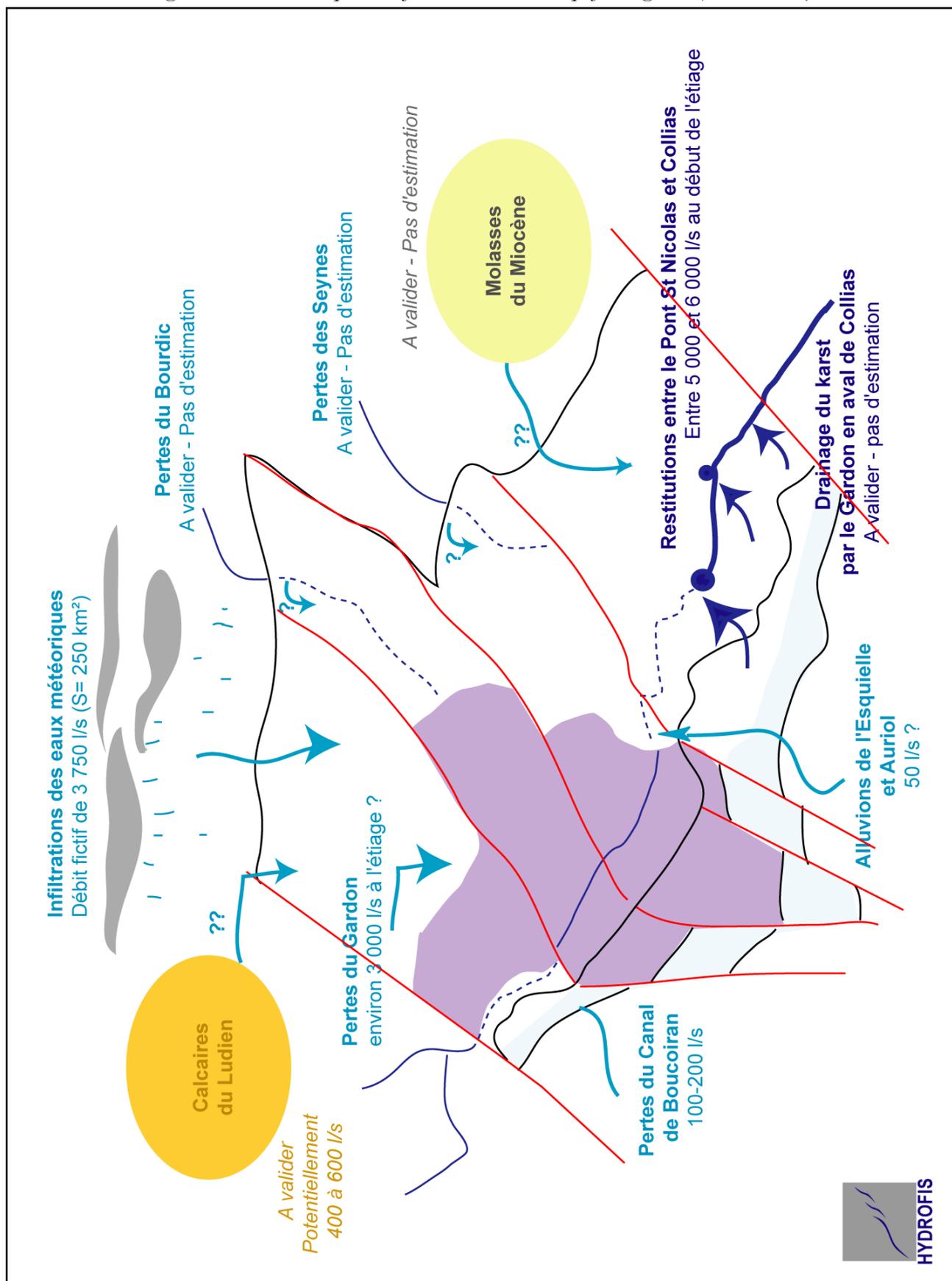
- Des chemins de l'eau inconnus au sein de l'aquifère. Pour le système karstique drainé par le Gardon, le chemin entre zones de pertes et zones de résurgence peut faire l'objet de plusieurs hypothèses : fonctionnement vauclusien ? by-pass hydraulique par les calcaires éocènes ou par une zone faillée N120 ? Contournement du remplissage oligocène par le Nord ou par le Sud ?

- Des relations hydrauliques entre hydro systèmes jamais étudiées. En particulier, on pouvait suspecter un certain nombre de pertes pour les cours d'eau qui traversaient la plaque urgonienne mais qui avaient été peu ou pas été étudiées : les pertes du Bourdic au passage des gorges dans l'Urgonien, l'alimentation de l'aquifère urgonien par les pertes des Seynes, l'hypothèse de pertes dans les séries carbonatées de l'Hauterivien, traversées par les Gardons d'Anduze et d'Alès, en amont du Pont de Ners, les relations entre les calcaires du Ludien et l'aquifère karstique urgonien, et entre les molasses miocènes et l'aquifère karstique.

- Une absence d'estimation robuste des réserves statiques de l'aquifère urgonien.
- Relations quantitatives entre le Gardon et le système karstique manquant de justifications.



Figure 4 : Schéma conceptuel du fonctionnement de l'aquifère urgonien (début d'étude).



STRATEGIE POUR COMPLETER LES CONNAISSANCES SUR LE SYSTEME KARSTIQUE

L'étude s'est organisée autour d'un suivi et d'investigations qui se sont étalés de juin 2016 à fin novembre 2018 (prise en compte de trois étiages). En schématisant, ces suivis et ces investigations ont été pensés et réalisés pour renseigner les problématiques suivantes :

- Relations potentielles d'échange du système karstique drainé par le Gardon avec d'autres aquifères.
- Organisation interne des écoulements au sein de l'aquifère urgonien.
- Détermination des dynamiques d'alimentation du système karstique (variabilités spatiales et temporelles).
- Détermination des dynamiques de vidange du système karstique (variabilités spatiales et temporelles).
- Estimation des réserves statiques et dynamiques.

Les principales réalisations ont été les suivantes :

- Synthèse des données historiques (HYDROFIS) : données de prélèvements, de chimie des eaux souterraines et superficielles, des données de forage et de structure, des données de débit-métrie et de piézométrie.
 - Analyse hydrogéologique spécifique du massif urgonien de l'Uzège (HYDROFIS).
 - Suivi hydrométrique du Gardon et de ses affluents sur trois étiages (BRLi). Des campagnes de mesure de débit et d'observations des assecs ont été réalisées durant les trois périodes estivales de 2016, 2017 et 2018. Chaque période d'étiage a été caractérisée par quatre séries de mesure (juin, juillet, août et septembre) sur 8 sections préalablement choisies.
 - Une campagne de mesures de débit spécifique à l'amont du Pont de Ners a été réalisée en 2018 (BRLi), pour essayer de mesurer d'éventuelles pertes entre la confluence des Gardons d'Anduze et d'Alès et le Pont de Ners.
 - Suivi des données de piézométrie et de conductivité/température sur trois cycles hydrologiques sur un certain nombre de piézomètres (HYDROGEOSPHERE).
 - Suivi des concentrations des sulfates dans les eaux superficielles et souterraines, pendant la période estivale 2018 (portage principal par l'EPTB Gardons).
 - Traçages des pertes amont et aval en 2017 (HYDROGEOSPHERE).
 - Etude structurale du bassin priabonien de St Chaptès avec cartographie du mur et du toit de l'aquifère urgonien (Université de Montpellier).
 - Approche géomorphologique avec mise en évidence des principales phases de karstification de l'aquifère urgonien (CENOTE).
 - Analyses géochimiques (CARSO, Université d'Avignon, interprétation par HYDROFIS). Deux campagnes ont été réalisées, en mai (hautes eaux) et en août (basses eaux) 2018.
 - Quantification des flux d'alimentation et de restitution du système karstique urgonien drainé par le Gardon et estimation des réserves statiques (HYDROFIS).



2 . FONCTIONNEMENT DU KARST URGONIEN

2.1 L'AQUIFERE URGONIEN

STRUCTURE DE L'AQUIFERE

L'aquifère urgonien correspond à un volume rocheux composé principalement des calcaires du Barrémien inférieur et supérieur à faciès urgonien. Il s'agit de calcaires massifs blancs à jaune à faciès récifal (calcaires très purs). Localement, ils sont en continuité hydraulique avec les séries de l'Hauterivien quand celles-ci présentent une dominance des faciès carbonatés (secteur du dôme de Lédignan).

Le mur de l'aquifère est constitué par les marnes du Valanginien. Il s'agit d'un ensemble généralement très marneux, comportant à la base une séquence de marnes grises ou ocre par altération, dans laquelle s'intercalent progressivement des bancs peu épais de calcaire gris foncé argileux et peu résistant.

Le toit de l'aquifère est de nature variable. En effet, les calcaires urgoniens ont été pour partie émergés depuis la fin du Crétacé (création de l'isthme durancien) et ils ont depuis pu être recouverts par des formations de nature très variables. Cela peut être les sédiments du Crétacé supérieur ou de l'Eocène réputés peu perméables ; mais aussi des sédiments de l'Eocène ou du Miocène qui eux peuvent être perméables. Localement, ils sont aussi recouverts par des alluvions quaternaires.

EXTENSION DU SYSTEME KARSTIQUE DRAINE PAR LE GARON

L'étude a permis de d'identifier les parties de l'aquifère urgonien en relation avec les systèmes karstiques drainés par le Gardon :

- Massif des gorges du Gardon.
- Urgonien du bassin de St Chaptès, sous couverture Eocène et Oligocène.
- Urgonien sous couverture Miocène au droit du synclinal de la plaine de l'Alzon.
- Système annexe dit du versant Sud du massif de Belvezet.
- Système annexe dit du massif du Bois de Lens.
- Système annexe dit du flanc Sud de l'Uzège.

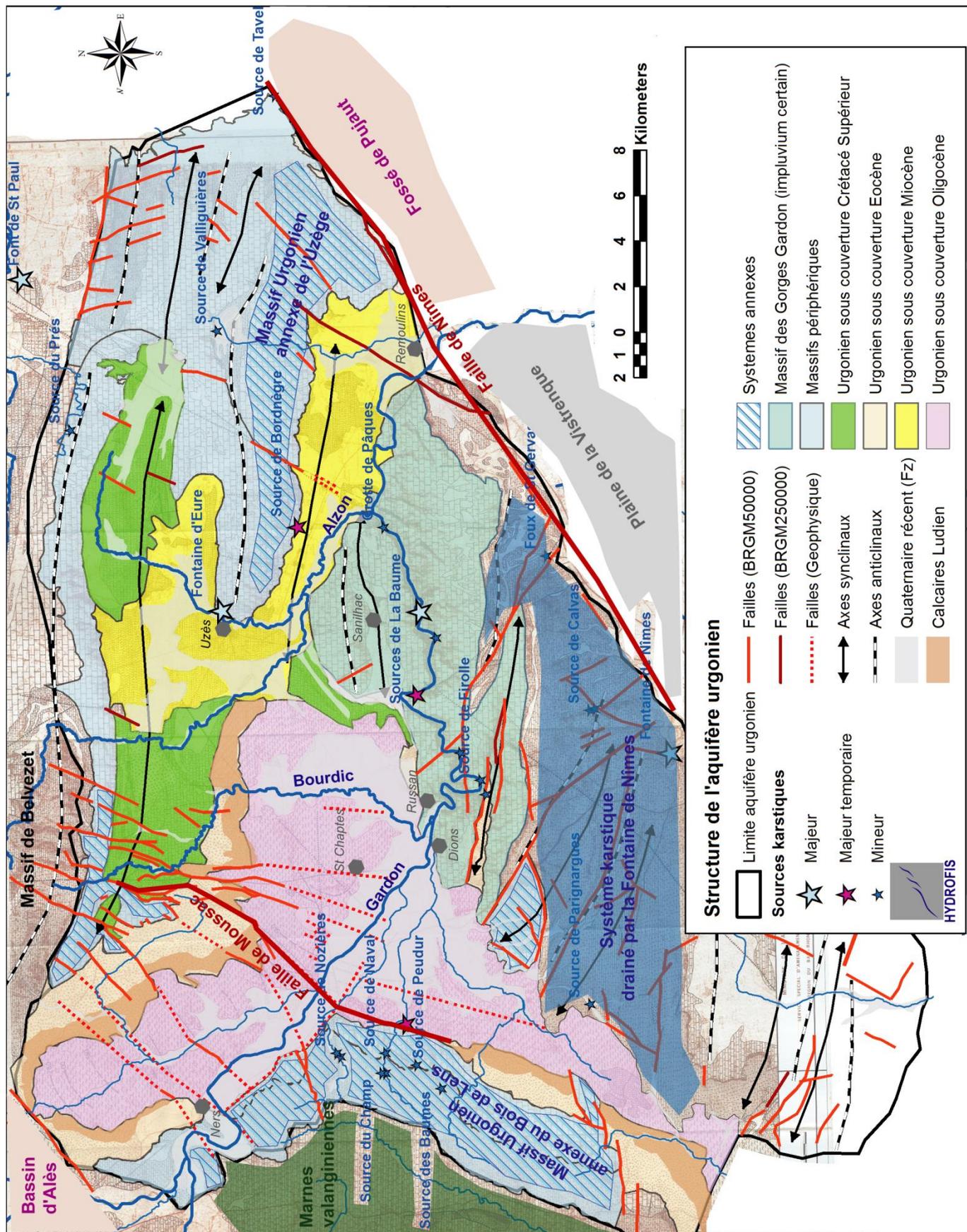
Les limites latérales de l'aquifère urgonien en relation avec les systèmes karstiques drainés par le Gardon sont donc les suivantes :

- Au Nord, les marnes feuilletées du Barrémien inférieur, qui séparent les calcaires urgoniens des séries carbonatées de l'Hauterivien.
- Au Nord-Ouest, la faille bordière du fossé d'Alès qui met en contact les calcaires urgoniens avec les sédiments peu perméables de l'Oligocène.
- A l'Ouest, les marnes du Valanginien que l'on trouve au mur des séries carbonatées de l'Hauterivien en continuité hydraulique avec les calcaires urgoniens.
- Au Sud, les charnières anticlinales qui forment un écran entre les calcaires urgoniens au Nord et les séries carbonatées au Sud qui sont drainés par le système karstique de la Fontaine de Nîmes.
- A l'Est, la faille de Nîmes qui met les calcaires urgoniens en contact avec les sédiments peu perméables du Pliocène.

Dans le massif de l'Uzège, c'est la charnière anticlinale qui remonte les séries peu perméables du Barrémien inférieur qui fait écran entre le système drainé par la Fontaine d'Eure sur le flanc Nord et les calcaires urgoniens en relation hydraulique avec le système karstique drainé par le Gardon au Sud.



Figure 5 : Structure de l'aquifère urgonien.



COMPARTIMENTATION

L'ensemble des données acquises et analysées permet de proposer un modèle global avec de grands compartiments susceptibles d'expliquer les principales observations hydrodynamiques et hydrogéochimiques. La compartimentation de l'aquifère urgonien peut être expliquée soit par des arguments d'ordre structural, soit par des arguments d'ordre hydrogéologique.

Nous proposons quatre « grands » compartiments :

- Un compartiment dit amont pour l'urgonien sous couverture Eocène et Oligocène, auquel on peut rattacher l'urgonien qui affleure sur le flanc Sud du massif de Belvezet.
- Un compartiment dit aval pour l'urgonien sous couverture Eocène et Oligocène, auquel il faut joindre le massif des gorges du Gardon.
- Un compartiment annexe correspondant au massif du Bois de Lens.
- Un autre compartiment annexe correspondant au flanc Sud du massif de l'Uzège.

On propose de parler de compartiment annexe lorsque les massifs annexes sont mal connectés d'un point de vue hydraulique aux systèmes karstiques drainés pour le Gardon (existence d'autre exutoire significatif) ; les compartiments amont et aval ont quant à eux le Gardon pour unique destination finale des eaux souterraines.

Les données de piézométrie comme la présence de sources temporaires sont cohérentes avec un schéma qui lie de façon non fonctionnelle deux massifs périphériques avec les systèmes karstiques drainés par le Gardon :

- Le massif du Bois de Lens.
- Le flanc Sud du massif de l'Uzège.

Ces deux massifs présentent des bilans déséquilibrés (déficit de débit aux exutoires identifiés) et des chutes piézométriques en période estivale qui indiquent sans équivoque une connexion avec le karst urgonien drainé par le Gardon. La présence de deux sources temporaires à fort débit en période de hauts niveaux piézométrique (source du Creux des Fontaines pour le premier, source de Bord Nègre pour le second) indiquent cependant que cette connexion est « contrariée » par des éléments structuraux qui jouent le rôle de barrière partielle aux écoulements.

La structure de l'aquifère urgonien sous couverture a été approchée à partir du travail remarquable de reconstruction tectono-sédimentaire du bassin de St Chaptés réalisé par Baral en 2018.

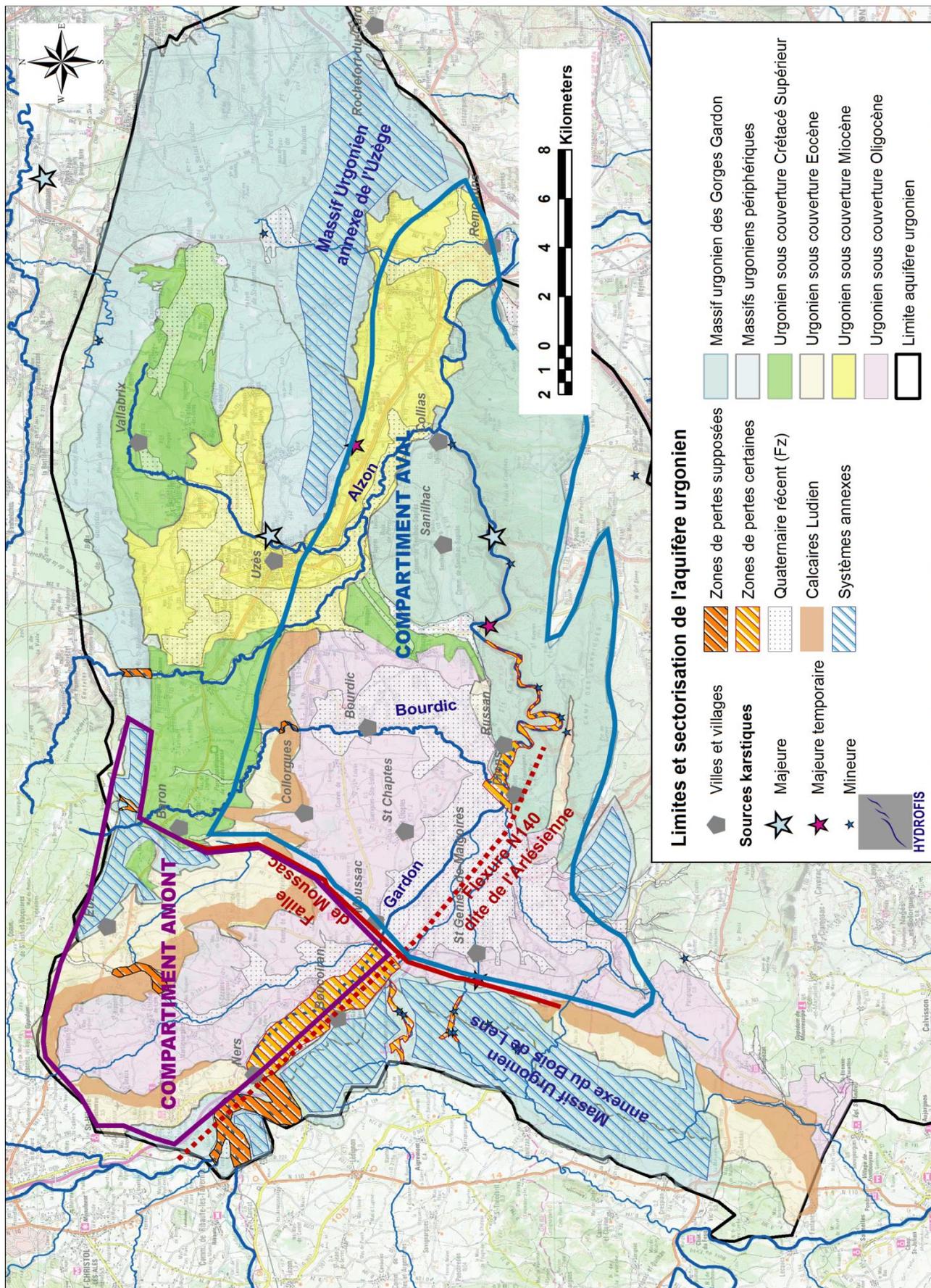
En schématisant, on observe deux bassins tertiaires séparés par un haut-fond urgonien, un horst orienté N050, situé sous Moussac. Le bassin Nord-Ouest est très profond, dont on peut supposer qu'il fait écran entre les séries urgoniennes disposées sur le flanc Sud de la Montagne de Belvezet et les séries urgoniennes en contact avec l'appareil alluvial du Gardon. A l'Est, on peut distinguer deux sous-bassins en continuité, le premier avec un barycentre sous St Chaptés et le second étant localisé plus à l'Est avec un barycentre sous le village de Bourdic.

La zone faillée majeure N030-050 entre Moussac et Maisonnette qui limite au Sud le horst de Moussac, correspond à une « frontière » hydrogéologique. A l'Est de cette limite, à l'étiage, la piézométrie va globalement s'accorder sur le niveau piézométrique du principal exutoire du karst urgonien, les sources de la Baume. Ce n'est pas le cas à l'Ouest : les niveaux piézométriques sont guidés par le débit du Gardon qui limite plus ou moins le flux d'alimentation du compartiment amont ; c'est l'équilibre hydrodynamique entre débit d'alimentation et pertes de charge pour passer la « barrière » hydraulique qui va contrôler les niveaux piézométriques amont. Les données de traçage confirment cette interprétation.

Nous proposons donc de considérer la faille dite de Moussac comme une barrière partielle aux écoulements, qui compartimente en deux grandes parties l'aquifère urgonien sous couverture (compartiment amont et compartiment aval).



Figure 6 : Compartimentation de l'aquifère urgonien drainé par le Gardon.



2.2 COMPORTEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'AQUIFERE URGONIEN

COMMENT L'EAU ENTRE-T-ELLE DANS L'AQUIFERE URGONIEN ?

L'aquifère urgonien est composé de roches perméables dont les vides peuvent correspondre à de la porosité primaire de la roche, à des discontinuités dans le volume rocheux (joints de stratification, diaclases, failles,...) et des volumes altérés par la karstification (création de vides secondaires).

Ces roches perméables sont propices à l'infiltration des eaux de surface. Cette infiltration peut se produire selon deux mécanismes différents :

- Par infiltration des eaux de pluie.
- Par pertes au droit des cours d'eau permanents ou temporaires.

Cette étude a montré que les séries carbonatées de l'Eocène sont en continuité structurale donc hydraulique avec les calcaires urgoniens ; il est donc nécessaire de les considérer dans un même ensemble hydrogéologique.

Les observations et le suivi réalisés de mi-2016 à fin 2018 ont permis de caractériser les pertes des cours d'eau qui alimentent le karst et d'estimer les dynamiques d'infiltration des eaux de pluie dans l'aquifère.

En ce qui concerne l'infiltration des eaux de pluie, il est important de préciser que les eaux infiltrées ne vont avoir ni les mêmes chemins au sein du réservoir, ni la même destination en termes d'exutoire, en fonction du compartiment dans laquelle elle s'infiltré.

En ce qui concerne l'infiltration des cours d'eau, on peut distinguer plusieurs zones caractérisées par des dynamiques d'alimentation du système karstique très différentes :

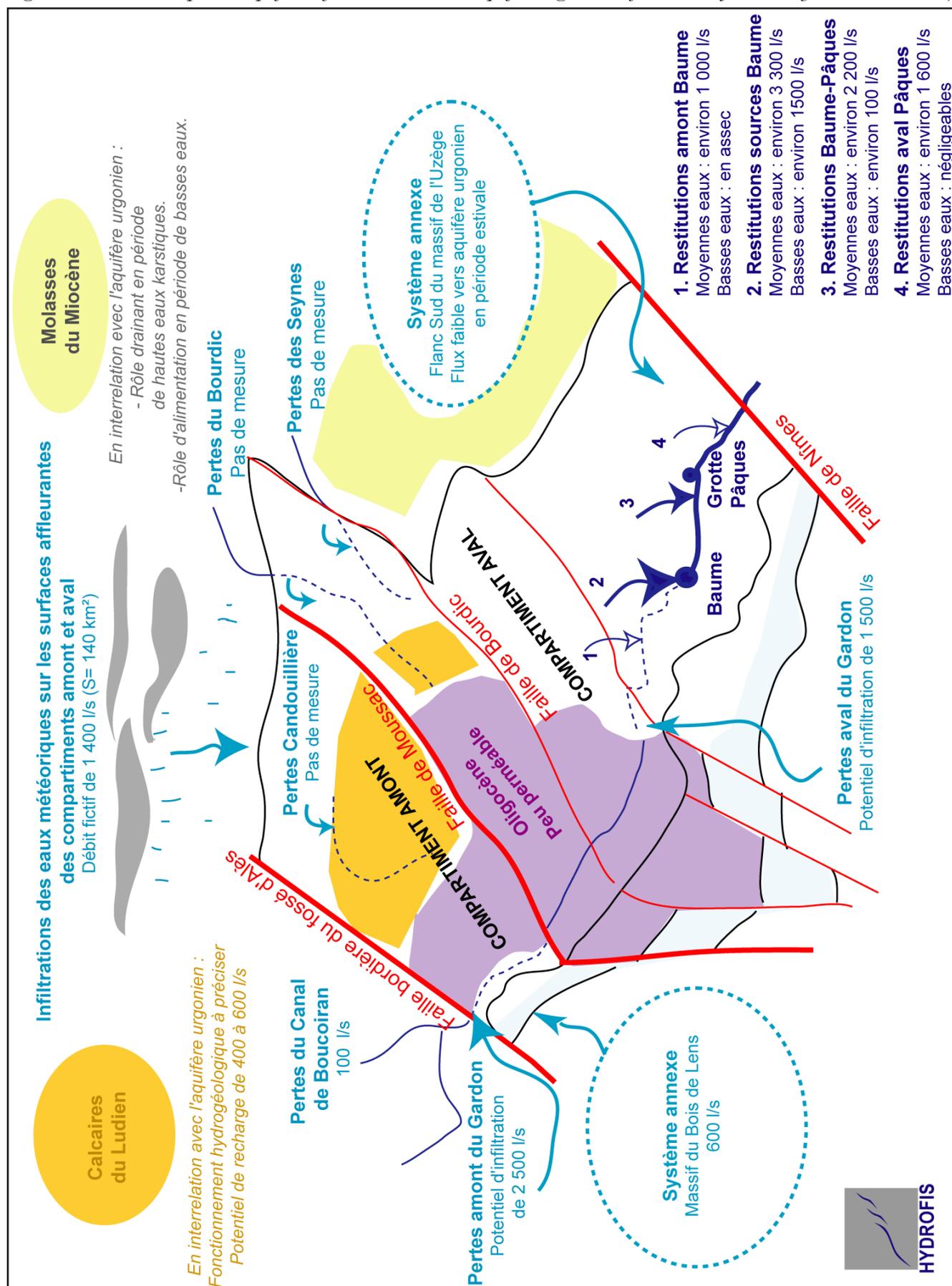
- Pertes permanentes du Gardon, dans la zone de pertes dite amont entre Ners et Moussac.
- Pertes permanentes du Gardon, dans la zone de pertes dite aval entre Dions et le Pont St Nicolas.
- Pertes dans les affluents du Gardon lorsqu'ils parcourent les surfaces affleurantes des calcaires urgoniens ou éocènes :
 - La Candouillère, affluent de la Droude, sur la commune de St Hyppolite de Caton.
 - Le Bourdic, dans ses gorges urgoniennes au Nord de Baron, puis sur la traversée des calcaires éocènes à proximité du village d'Aubussargès.
 - Les Seynes dans ses gorges urgoniennes au Nord du hameau de Labaume,
 - De façon plus secondaire dans le massif du Bois de Lens qui est remarquable par la présence de nombreuses petites sources qui alimentent des cours d'eau qui présentent de nombreuses zones de pertes.

De la même façon que pour les eaux météoriques infiltrées dans le volume rocheux, les eaux infiltrées dans les zones de perte n'ont pas les mêmes chemins et pas forcément les mêmes destinations.

La quantification des flux de recharge est détaillée ci-après. Au vu des estimations proposées ci-dessous, on peut proposer une recharge moyenne annuelle du système karstique de l'ordre de 160 Mm³/an ; elle est comprise entre 115 et 230 Mm³/an sur la période de suivi (forte variabilité liée à la forte variabilité de la pluviométrie entre 2016 et 2018) ; les pertes du Gardon constituent une recharge relativement stable d'une année l'autre (100 Mm³/an +/-10%).

La figure ci-dessous complète le schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du karst urgonien.

Figure 7 : Schéma conceptuel simplifié du fonctionnement de l'aquifère urgonien en fin d'étude (flux en moyenne interannuelle).



RECHARGE PAR INFILTRATION DES EAUX DE PLUIE

Rappelons ici les surfaces des impluviums discrétisés :

- Impluvium urgonien du versant Sud de la montagne de Belvezet : environ 20 km².
- Impluvium relatif au massif du Bois de Lens : environ 80 km². Rappelons toutefois que le massif carbonaté du bois de Lens est drainé par de nombreuses sources, dont la principale est la Fontaine de St Geniès de Malgoirès. Guerre (1971) avait estimé sur un cycle hydrologique à 6 Mm³ le volume exhauré par cette source (soit environ 200 l/s). Avec un débit fictif d'infiltration associé de l'ordre de 10 l/s/km², il faut un impluvium dédié de l'ordre de 20 km² pour alimenter les sources du massif ; on en déduit que la contribution profonde au système karstique drainé par le Gardon est de l'ordre de 60 km².
- Impluvium drainé par la zone de restitution en amont des sources de la Baume : environ 50 km².
- Impluvium drainé par la zone de restitution des sources de la Baume : environ 23 km².
- Impluvium drainé par la section comprise entre les sources de la Baume et le seuil de Collias : environ 22 km².
- Impluvium drainé par le Gardon à l'aval de Collias : environ 23 km².

Soit un impluvium global de l'ordre de 200 km².

Pour le flanc Sud du massif de l'Uzège, il n'est pas possible de rattacher un impluvium contributif au système drainé par le Gardon. Les données sur les débits aux exutoires (sources de trop plein, alimentations masquées des placages quaternaires,..) sont trop lacunaires pour pouvoir estimer le flux d'alimentation de l'appareil alluvial du Gardon. Les mesures acquises durant les périodes estivales tendent à montrer qu'à l'étiage ce flux est négligeable.

Toute pluie est susceptible de participer à la recharge de l'aquifère par infiltration des eaux météoriques. La part infiltrée est celle qui reste après l'évapotranspiration de la couverture végétale et le ruissellement qui va venir gonfler le débit des cours d'eau. En hiver, la partie évapotranspirée est faible (< 5 mm) et la recharge des aquifères est efficace ; en été, il faut des précipitations supérieures à 30 mm pour commencer à infiltrer les eaux météoriques.

A partir des données hydrométriques collectées, on peut ainsi estimer une lame d'eau infiltrée moyenne d'environ 320 mm/an. Ramené à un impluvium unitaire de 1 km², le débit fictif de recharge associé est de l'ordre de 10 l/s/km².

Pour un impluvium total de l'ordre de 200 km², on peut donc ainsi estimer la recharge moyenne liée à l'infiltration des eaux de pluie à environ 63 Mm³/an.

Dans le détail, sur la période du suivi, on obtient une recharge très variable d'une année à l'autre, qui s'explique par la forte variabilité de pluviométrie d'une année à l'autre :

- 2016 : 70 Mm³.
- 2017 : 25 Mm³.
- 2018 : 125 Mm³.



RECHARGE PAR LES PERTES PERMANENTES DES COURS D'EAU

On observe une dynamique de pertes du Gardon en deux temps :

- Dans un premier temps, le débit du Gardon sous-passe un premier débit seuil qui va amener le début d'assecs « visibles » sur la section à l'aval de Russan ; le débit d'infiltration sur le compartiment aval diminue. Pendant cette période, le niveau de nappe chute sur le piézomètre du Pont St Nicolas mais reste stable au niveau des pertes amont à Cruviers-Lascours. Rappelons que les assecs entre Russan et le Pont St Nicolas deviennent complets lorsque le débit à Dions devient inférieur à $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette première dynamique d'effondrement du niveau piézométrique dans le compartiment aval commence lorsque le débit à Ners sous-passe $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Dans un deuxième temps, lorsque le débit à Ners est inférieur à $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, le Gardon va sous-passer un second débit seuil qui va conduire à diminuer le flux d'infiltration entre le pont de Ners et Moussac ; on a alors un débit d'infiltration lié aux pertes nul sur le compartiment aval et un débit d'infiltration lié aux pertes amont qui va alors progressivement diminuer de manière corrélée à la baisse du débit du Gardon à Ners. C'est le début de l'effondrement sur le piézomètre de Cruviers-Lascours. Le délai entre effondrement aval et effondrement amont est dépendant de la dynamique de diminution du débit à Ners. Cela peut aller de quelques jours à plusieurs semaines.

Les jaugeages différentiels effectués sur le Gardon confirment par la mesure l'ordre de grandeur des pertes maximales du Gardon en début d'étiage qui seraient d'environ $4 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les deux zones de pertes en cumulé. Cela correspond à un volume cumulé de l'ordre de $100 \text{ Mm}^3/\text{an}$.

En particulier, la campagne de juin 2017 avec un débit d'environ $7 \text{ m}^3/\text{s}$ à Ners est très intéressante car la totalité des mesures intresse un Gardon en eau avec des flux d'infiltration au droit des zones de pertes a priori maximaux. Selon ces mesures, les pertes seraient de l'ordre de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ entre Ners et Boucoiran sur la zone de pertes amont et de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le Dions et le Pont St Nicolas pour la zone de pertes aval.

Pour finir, précisons que dans cette approche, nous ne tenons pas compte de possibles phénomènes d'infiltration majorée au profit du système karstique lors des épisodes de crues qui conduisent à un débordement du Gardon hors de son lit mineur.

Rappelons que le système karstique est alimenté par d'autres hydro systèmes :

- Pertes de la Candouillère, du Bourdic et des Seynes. Nous ne disposons pas de données ou d'observations fiables pour estimer de façon certaine les débits de pertes de ces cours d'eau au bénéfice du système karstique drainé par le Gardon. Notons toutefois qu'il s'agit de cours d'eau temporaires. Si on fait l'hypothèse optimiste d'une capacité d'infiltration de l'ordre de 400 l/s par km de linéaire de cours d'eau, pour un linéaire cumulé d'environ $4,5 \text{ km}$, la capacité d'infiltration pour les trois cours d'eau serait de l'ordre de $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Avec 60 jours de pleines eaux, on peut proposer un flux d'alimentation annuel de l'ordre de 9 Mm^3 (ordre de grandeur hypothétique et optimiste à considérer avec prudence).

- Pertes du Canal de Boucoiran. Dans le cadre de cette étude, elles ont fait l'objet d'une série de mesures adaptées qui ont permis d'estimer ce flux à environ 100 l/s , soit environ $3 \text{ Mm}^3/\text{an}$.

Il s'agit donc de flux très secondaires, voire négligeables, au regard de l'incertitude relative de l'estimation de la part infiltrée des eaux de pluie (environ +/- 30% des valeurs présentées ci-dessus) et des alimentations massives que représentent les pertes du Gardon et l'infiltration des eaux de pluie sur les surfaces affleurantes de l'aquifère urgonien.

COMMENT L'EAU CIRCULE-T-ELLE DANS L'AQUIFÈRE URGONNIEN ?

CHEMIN DES EAUX INFILTREES AU DROIT DES PERTES AMONT

L'étude géomorphologique permet de proposer une première série d'arguments pour justifier les grands axes de circulation entre les pertes amont du bassin de St-Chaptes et les résurgences du canyon du Gardon.

Ces circulations emprunteraient d'abord les discontinuités karstiques interconnectées du réservoir urgonien en suivant un chemin de drainage qui contourne les sous-bassins priaboniens de St-Chaptes par le Nord. Ensuite, le chemin de drainage s'incurverait vers le sud en raison de l'approfondissement du toit des calcaires sous le bassin porté au-delà de 500 m de profondeur par la faille de Bourdic. Ce changement de direction du chemin de drainage permet de rejoindre les points bas du réservoir recoupé par la surface topographique, c'est-à-dire la bordure des bassins miocènes dans un premier temps, puis le talweg du Gardon en rive gauche du canyon depuis le début de son incision. L'alimentation de cette zone de restitution des eaux est assurée par des réseaux de mise en charge essentiellement développés sous la couverture miocène avant ou au cours de son décapage et par adaptation aux conditions de niveau de base au cours de l'incision du canyon.

On peut ainsi proposer comme hypothèse que les écoulements en provenance de la zone de pertes amont entre Ners et Moussac suivent d'abord le horst sous le village de Moussac avec un sens d'écoulement vers le NE avant de bifurquer vers l'Est.

Deux chemins sont ensuite possibles :

- Le premier chemin possible suit la bordure Nord du remplissage du bassin tertiaire et conduit les eaux dans l'axe du remplissage Miocène qui s'étend d'Uzès à Remoulins.
- Le second chemin potentiel pourrait correspondre à un passage au droit du secteur de moindre profondeur situé sur le flanc Ouest de la faille de Bourdic ; le toit de l'urgonien se situe alors entre 300 et 400 m de profondeur.

La première hypothèse nous semble plus plausible (trajet principal des eaux le long de la bordure Nord du bassin de St Chaptes).

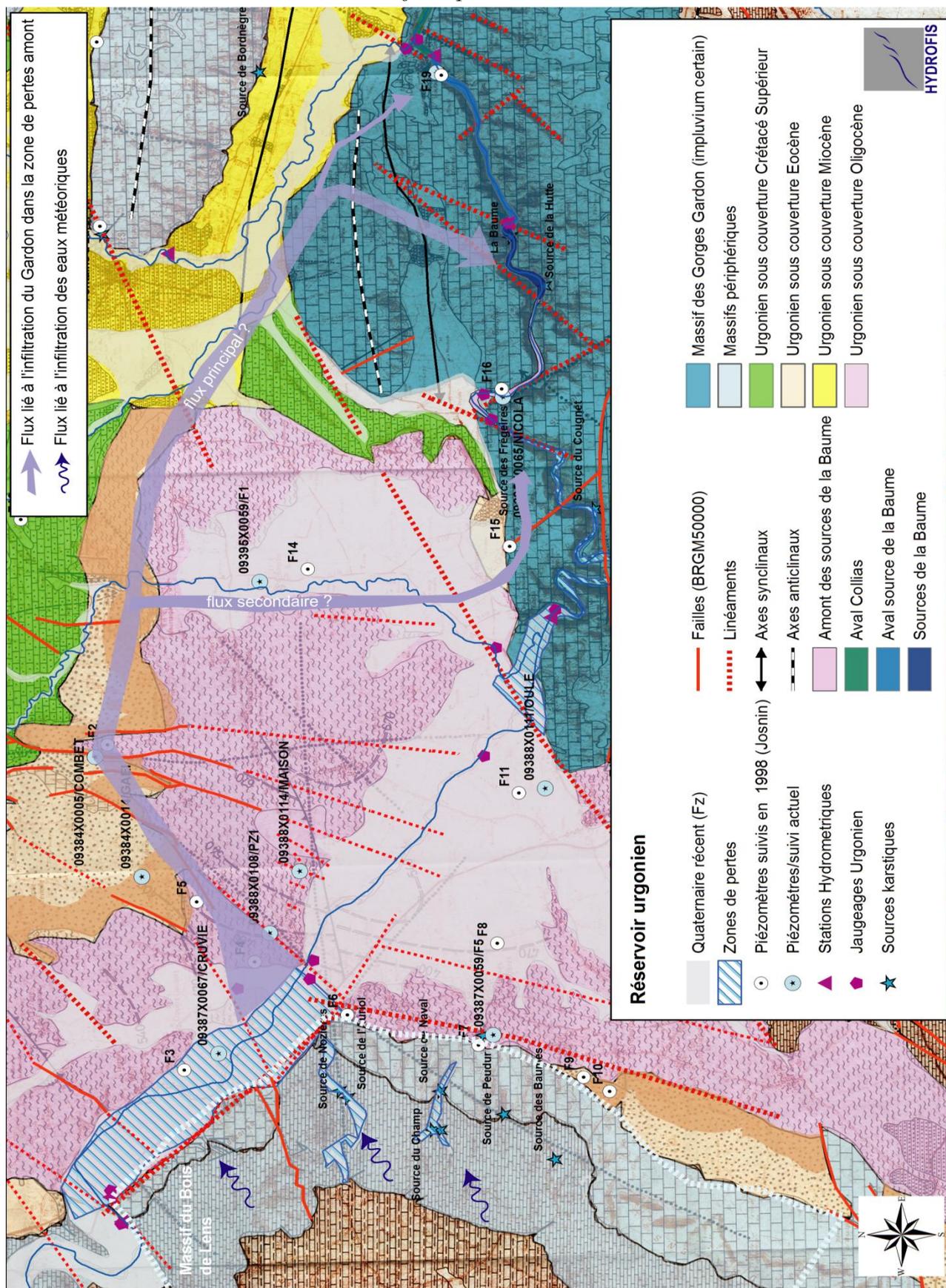
Elle est conforme aux observations réalisées lors des traçages de 2018 qui montrent l'absence de mesure du traceur injecté dans la zone de pertes amont, sur le forage de Russan qui est dans la continuité du flanc occidental de la faille de Bourdic. De plus, cette hypothèse est cohérente avec la dynamique de mise en place des dépôts miocènes qui ont formé le débouché du réseau hydrographique pendant cette longue période géologique.

Le seul moyen d'apporter des informations certaines pour valider cette hypothèse serait de mettre en place un suivi piézométrique sur le massif urgonien au Nord du village de Sanilhac.

De façon plus générale, la gamme de variation des températures observées aux exutoires en fin d'étiage (entre 16 et 18°C pour la Grotte de Pâques, entre 14 et 16°C pour les sources de la Baume) est un argument supplémentaire pour privilégier un chemin « superficiel » des eaux et non en profondeur, sous le bassin de St Chaptes.



Figure 8 : Carte de localisation des piézomètres sur la bordure Nord et hypothèse de destination des eaux infiltrées au droit de la zone de pertes amont.



CHEMIN DES EAUX INFILTREES AU DROIT DES PERTES AVAL

A l'entrée des gorges du Gardon, entre Dions et le Pont St Nicolas, on observe une zone de pertes majeures.

En basses eaux, ces circulations rejoignent le réservoir drainé par les sources de rive gauche (sources de la Baume principalement) ; la rive droite étant drainée jusqu'à la faille de Poulx par de petits systèmes locaux par un grand nombre de résurgences souvent temporaires : Firolles, Cougnet, Télamode, Fausse Monnaie, Freigères, etc. jusqu'à la Baume résurgence principale du système.

On a donc un chemin souterrain court, quasi parallèle au cours d'eau, qui relie cette zone de pertes avec la principale zone d'exutoire de l'aquifère urgonien (sources de la Baume). Il s'agit donc d'un système karstique « récent », probablement quaternaire qui est très développé (capacité à faire transiter 1,5 m³/s au sein du volume rocheux). Les vitesses de circulation dans ce réseau karstique sont élevées (entre 40 et 80 m/h).

LES CHEMINS DE DRAINAGE SOUS LE BASSIN MIOCENE DE CASTILLON-REMOULINS

Les données géomorphologiques, structurales et hydrogéologique montrent de façon concordante que la partie sud des plateaux de l'Uzège sont contrôlés par les circulations au sein du karst sous couverture miocène de Castillon-Remoulins, au bénéfice de l'aquifère urgonien drainé par le Gardon.

Les chemins de drainage sont inconnus mais le fonctionnement des mises en charge du réseau de Bornègre montre qu'ils sont contrôlés par un niveau de base plus bas de 50 m par rapport au niveau d'émergence de la Fontaine d'Eure. L'ensemble constitué par ces plateaux urgoniens et leurs prolongements sous couvertures constituent donc un aquifère distinct de celui du bassin d'Uzès. Aucune exurgence d'importance ne correspond au drainage de cette vaste zone de recharge.

Rappelons que les spéléologues ont mesuré des niveaux d'étiage de 23 m NGF dans le réseau de Bordnègre alors que le niveau d'étiage à la grotte de Pâques est de l'ordre de 26 m NGF. Cela indique un potentiel de drainage par le karst urgonien dans la zone comprise entre Collias et Remoulins. Cela suggère que le réservoir urgonien se prolonge sous le bassin miocène de Castillon-Remoulins et qu'il est connecté à une zone de restitution des eaux, située dans les gorges du Gardon en aval de Collias en basse eaux.

En crue, ce réseau devient émissif sur le contact avec le remplissage miocène, comme à Bornègre, ou avec le remplissage pliocène dans le fossé de Pujaut.

Ce fonctionnement est caractéristique d'un système karstique peu fonctionnel, barré par le remplissage miocène de Castillon-Remoulins.

CHEMIN DES EAUX DE PLUIE INFILTREES SUR LE MASSIF DU BOIS DE LENS

Les eaux de pluie infiltrées au droit du massif du Bois de Lens (80 km²) participent pour 75% à une alimentation du compartiment amont et pour 25% au débit de la source temporaire de débordement du Creux des Fontaines (d'après Guerre, 1971). Il faut donc envisager pour le massif du Bois de Lens deux logiques de circulations karstiques :

- Des circulations karstiques superficielles (> 90 m NGF) dans un réseau organisé pour conduire les eaux souterraines à l'exutoire majeur que représente la source du Creux des Fontaines (capacité à restituer des flux de plusieurs centaines de l/s, voire plus d'1 m³/s en crue). Il s'agit alors d'une contribution indirecte au Gardon en période de hautes et moyennes eaux.
- Des circulations karstiques profondes (< 90 m NGF) dans un réseau organisé pour diriger les flux vers le compartiment amont du système karstique urgonien drainé par le Gardon. L'existence d'un réseau karstique superficiel attesté par la présence d'une source temporaire montre que le drainage du massif par le système karstique urgonien sous couverture n'est pas complet et donc que le réseau profond n'est pas complètement fonctionnel. La zone d'échange entre le système annexe du Bois de Lens et le système



principal devrait logiquement se trouver entre Boucoiran et Sauzet. Ces circulations profondes au bénéfice du système karstique drainé par le Gardon sont permanentes.

CHEMIN DES EAUX DE PLUIE INFILTREES SUR LE FLANC SUD DU MASSIF DE BELVEZET

De par leur position, les eaux infiltrées au droit des affleurements de calcaires urgoniens localisés sur le flanc Sud du massif de Belvezet (environ 20 km², entre Baron et Euzet) participent à la recharge du compartiment amont.

CHEMIN DES EAUX DE PLUIE INFILTREES SUR LE MASSIF URGONNIEN DES GORGES DU GARDON

On peut distinguer plusieurs zones d'exutoires avec des dynamiques de restitution différentes dans les gorges du Gardon, depuis le Pont St Nicolas jusqu'à Remoulins. En termes de chemins de l'eau, il est nécessaire de distinguer les réseaux en rive droite et en rive gauche du Gardon :

- En rive gauche (La Baume, Barbegrèze et Grotte de Pâques), les sources présentent de faibles variations de températures en période estivale, ce qui signe l'exutoire d'un gros réservoir homotherme. la température minimale de l'endokarst (cavernement et "nappe") est remarquablement stable et voisine de 14°C. Ces sources restituent à l'étiage les eaux les plus tamponnées thermiquement de l'aquifère urgonien; ceci est conforme avec une circulation non influencée par les variations de température de l'atmosphère. Notons toutefois que la valeur minimale de 14°C n'indique pas de passage souterrain profond et long.

- En rive droite (Firole, Les Frégreires et la Hutte), les variations durant l'étiage sont plus fortes, ce qui signe des zones d'exutoire de réseaux karstiques moins étendus, plus locaux. Ces réseaux sont donc plus réactifs (variabilité thermique), et plus marqués par des apports thermiques provenant de la surface, d'où des températures globalement plus chaudes en phase de tarissement.

On observe donc un schéma complexe avec un réseau karstique profond (<40 m NGF) probablement expliqué par des phases de karstification ancienne (messinien ?), à ce jour inconnu dans sa géométrie, mal connecté avec des réseaux plus superficiels (>40 m NGF) probablement expliqués par des phases de karstification plus récente avec le Gardon comme exutoire.

Nous ne disposons pas de données quantitatives pour déterminer les temps de transfert dans les systèmes karstiques en rive droite. Ceci étant, la faiblesse des débits d'étiage (quelques l/s pour les sources permanentes) laisse à penser que ces systèmes bien développés évacuent rapidement (en quelques semaines ?) les eaux de pluie infiltrées dans les systèmes karstiques vers le Gardon. C'est une hypothèse cohérente avec l'observation d'absence de gain de débit significatif (> 100 l/s) entre Collias et Remoulins en période estivale ; en effet, dans ce secteur le Gardon et son appareil alluvial sont en relation hydraulique uniquement avec les massifs rive droite.

Pour les systèmes rive gauche, il est possible et probable que les vitesses de transfert soient aussi très élevées. Dans le massifs urgonien rive gauche se trouvent le système karstique qui relie pertes aval et sources de la Baume et le système karstique qui relie pertes amont et exutoires principaux de l'aquifère urgonien. Le massif est donc très karstifié avec des capacités d'écoulement des eaux souterraines exceptionnelles (plus de 9 m³/s, cf. ci-après) ; ces deux systèmes karstiques jouent probablement le rôle de drains pour les eaux de pluie infiltrées en rive gauche.

COMMENT L'EAU SORT ELLE DE L'AQUIFERE URGONIEN ?

Les mesures de débit réalisées en plusieurs stations dans les gorges du Gardon, couplées à des observations de terrain, permettent de distinguer trois zones d'exutoires permanents :

- La zone de résurgence des sources de la Baume, remarquable par une concentration de griffons de sources en rive gauche, que l'on observe depuis le seuil de la Baume sur environ 800 mètres à l'amont.
- La zone de résurgence comprise entre les sources de la Baume et la grotte de Pâques. Dans ce secteur, les gorges présentent une relative rectilinéarité. Il n'y a pas de résurgence visible en rive gauche ; on observe une résurgence permanente (source des Trois Eglises) en rive droite, réputée pour présenter des débits relativement faibles à l'étiage (< 10 l/s) mais le Gardon est principalement alimenté par des venues sous-alluviales.
- La section en aval du seuil de Collias. Cette section présente une configuration particulière avec un appareil alluvial du Gardon qui se positionne à l'interface entre le Miocène et le Quaternaire de la plaine de l'Alzon en rive gauche et le massif urgonien en rive droite.

Il faut y ajouter une zone d'exutoire temporaire, en amont des sources de la Baume, qui dépend du niveau de nappe dans le système karstique.

L'analyse croisée des données de débit et de piézométrie a permis de caractériser les dynamiques d'échanges entre le karst urgonien et le Gardon, dans les quatre zones de restitution :

1. La section amont, située entre le Pont St Nicolas et les sources des Frégeires, n'est alimentée par le karst qu'en période de moyennes eaux (et probablement en période de hautes eaux). Les échanges sont contrôlés par le niveau piézométrique de la nappe et sont très variables (de 0 à $1 \text{ m}^3/\text{s}$). Les volumes restitués dans cette zone varient entre 14 et $23 \text{ Mm}^3/\text{an}$ sur les trois cycles hydrologiques étudiés.

2. Les apports du karst au Gardon dans le secteur de la Baume sont importants ; ils varient entre 1,5 et $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Ils représentent de 30 à 50% du débit restitué cumulé en période de moyennes eaux et à près de 90% du débit restitué pour les étiages sévères. Notons que le comportement en étiage sévère indique que les sources de la Baume sont bien l'exutoire principal des flux d'eau infiltrés dans la zone de pertes amont (même ordre de grandeur entre Q infiltrés et Q restitués pour le fin de l'étiage 2017). Les volumes restitués dans cette zone varient entre 80 et $100 \text{ Mm}^3/\text{an}$ sur les trois cycles hydrologiques étudiés.

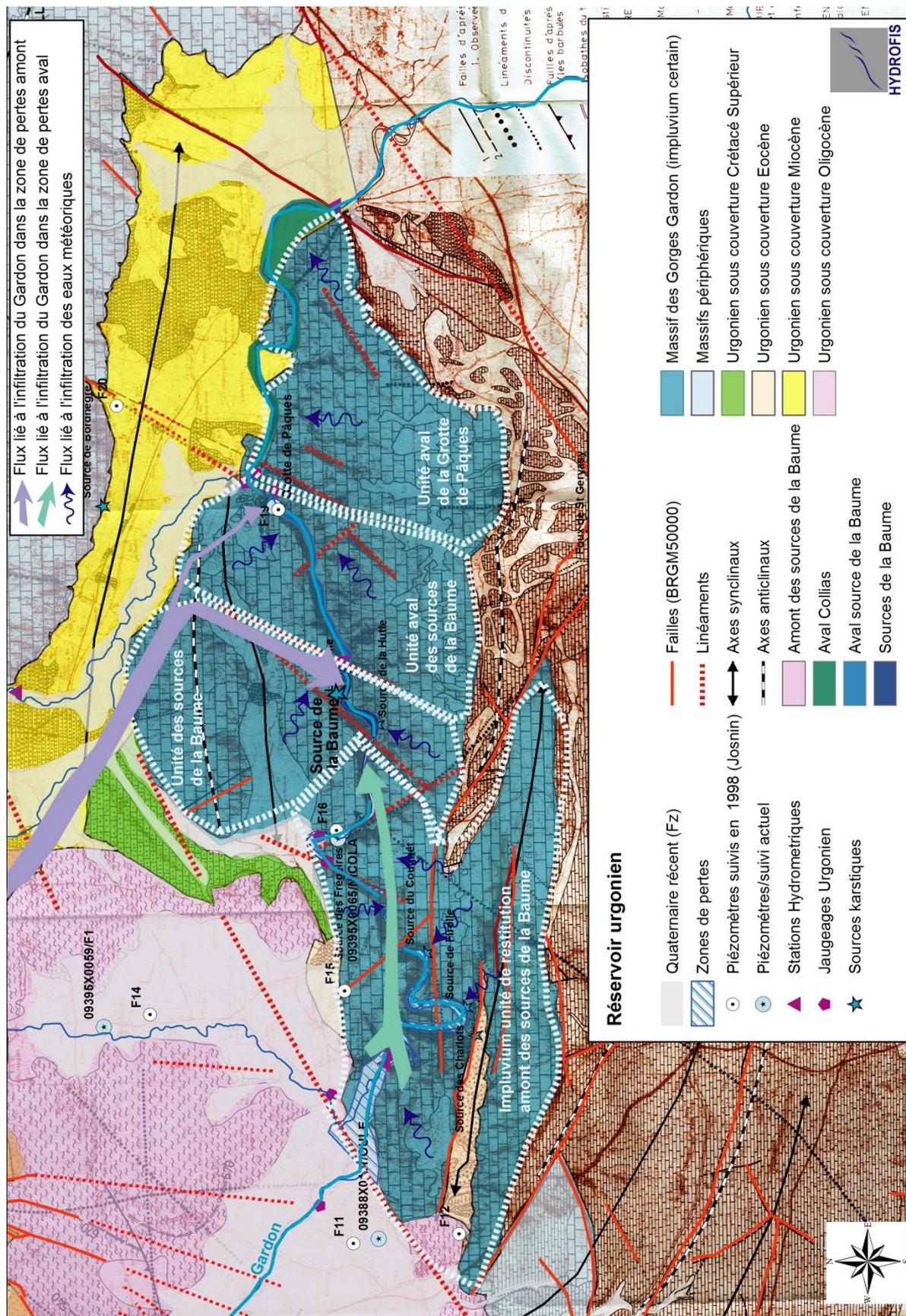
3. Entre la Baume et la grotte de Pâques, les alimentations du Gardon par le karst sont importantes mais elles sont très variables au cours d'un cycle hydrologique : elles varient de 50 l/s en étiage sévère à plus de $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyennes eaux. Les valeurs de débit restitué en période d'étiage sévère indiquent une faible proportion d'eaux en provenance de la zone de pertes amont. Le débit restitué est très variable car principalement expliqué par le flux d'infiltration des eaux météoriques ; les volumes restitués dans cette zone varient entre 54 et $72 \text{ Mm}^3/\text{an}$ sur deux cycles hydrologiques étudiés (2017 et 2018).

4. La section du Gardon située à l'aval du seuil de Collias ne reçoit des contributions significatives du karst qu'en période de hautes et moyennes eaux. C'est une observation conforme à la disposition hydrogéologique avec une alimentation possible seulement en rive droite par des massifs urgoniens alimentés uniquement par infiltration des eaux de pluie en période hivernale. Les volumes restitués dans cette zone varient entre 18 et $24 \text{ Mm}^3/\text{an}$ sur deux cycles hydrologiques étudiés (2017 et 2018).

Ainsi, la zone de restitution des sources de la Baume est la plus contributive au Gardon ; en hautes et moyennes eaux, elle représente environ 35% des débits restitués au Gardon ($3,3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour environ $9 \text{ m}^3/\text{s}$ en cumulé) ; mais en basses eaux, les autres zones de restitution produisent des restitutions négligeables et les débits à la Baume représentent 80 à 90% du débit de restitution ($1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ à La Baume).



Figure 9 : Carte des modalités d'alimentation du Gardon par le système karstique.



Ces observations sont importantes car elles permettent de proposer un lien entre modalités de recharge et modalités d'exutoires pour le système karstique urgonien drainé par le Gardon. En synthétisant les informations d'ordre hydrogéologique (flux de restitution et flux de recharge dans les zones de pertes), il est possible de proposer des impluviums locaux pour chaque zone de restitution :

- La section amont, située entre le Pont St Nicolas et les sources de la Baume, serait alimentée à la fois par les pertes du Gardon entre Dions et le Pont St Nicolas (résultat des expériences de traçage) et par l'infiltration des eaux de pluie sur les massifs avoisinants. Avec un débit fictif d'infiltration de l'ordre de 10 l/s/km², l'impluvium local rattaché à cette zone d'exutoire (50 km²) permet d'expliquer un débit de fictif de l'ordre de 500 l/s (soit environ 16 Mm³/an) ; il suffit à expliquer en ordre de grandeur la totalité des volumes restitués, qui varient entre 14 et 23 Mm³/an.

- Les sources de la Baume seraient principalement alimentées par les pertes amont et aval (résultat mis en évidence par les expériences de traçage) mais aussi par l'infiltration des eaux de pluie sur le massif périphérique du Bois de Lens et sur une grande partie du massif urgonien au Nord des gorges (synclinal de Sanilhac). Avec un débit fictif d'infiltration de l'ordre de 10 l/s/km², l'impluvium local rattaché à cette zone d'exutoire (23 km²) permet d'expliquer un débit de fictif de l'ordre de 230 l/s (soit environ 8 Mm³/an) ; cette recharge est insuffisante pour expliquer le flux massif de restitution des sources de la Baume au Gardon (entre 80 et 100 Mm³/an). Il faut nécessairement y adjoindre le flux en provenance de la zone de pertes aval (environ 30 Mm³/an) et une partie importante du flux en provenance du compartiment amont (au moins 50 Mm³/an).

- Concernant les flux de restitution de la partie entre les sources de la Baume et la Grotte de Pâques, les données acquises peuvent se résumer à deux résultats fondamentaux pour la zone d'exutoire entre l'aval immédiat des sources de la Baume et le seuil de Collias : les volumes d'eaux météoriques infiltrées sur les impluviums proximaux ne sont pas suffisants pour expliquer les volumes restitués et le système de pertes situé en aval de Dions ne semble pas influencer les eaux de la grotte de Pâques. Pour expliquer les volumes restitués au Gardon, il est donc nécessaire d'en expliquer une part importante par le flux en provenance du compartiment Nord (flux en provenance de la zone de pertes amont, avec cumul des flux d'infiltration en provenance des impluviums du massif du Bois de Lens et du flanc Sud du massif de Belvezet), bien que ce flux soit très faible en période estivale.

- La section du Gardon située à l'aval du seuil de Collias est alimentée partiellement par l'infiltration des eaux de pluie sur le massif urgonien en rive droite. Avec un débit fictif d'infiltration de l'ordre de 10 l/s/km², l'impluvium local rattaché à cette zone d'exutoire (23 km²) permet d'expliquer un débit fictif de l'ordre de 230 l/s (soit environ 8 Mm³/an) ; cette recharge est insuffisante pour expliquer en ordre de grandeur la totalité des volumes restitués, qui varient entre 14 et 23 Mm³/an. Il est possible et probable qu'une partie de ces volumes proviennent du flanc Sud du massif de l'Uzège ; ce flux souterrain sous le remplissage miocène est probablement contrôlé par les dynamiques de pluie. En période pluvieuse, les gradients hydrauliques sont forts et les débits significatifs ; en période estivale, les niveaux piézométriques dans le massif de l'Uzège chutent et les gradients faiblissent : les apports à l'aquifère urgonien drainé par le Gardon deviennent alors faibles.

QUELLES SONT LES RESERVES DE L'AQUIFERE URGONIEN ?

Pour estimer les réserves statiques en zone noyée, il nous faut disposer des informations suivantes :

- Niveaux piézométriques de basses eaux.
- Volume rocheux en zone noyée.
- Porosité efficace du réservoir aquifère.

Si les niveaux piézométriques en basses eaux sont relativement bien connus (+/- 5 m), l'estimation du volume rocheux en zone noyée est forcément plus approximatif ; il repose sur une analyse sommaire de la disposition géométrique des séries aquifères sur la base d'informations relativement incomplètes. On peut estimer l'incertitude relative de cette estimation à +/- 30%. Pour une estimation plus précise, il faudrait engager des investigations géologiques supplémentaires et construire un modèle 3D.

Ceci étant, il faut rappeler que nous n'avons aucune mesure de la porosité efficace du réservoir.

Toute l'estimation des réserves statiques va donc reposer sur des hypothèses qui restent à être validées ; ces dernières sont déduites d'une approche volumétrique proposée plus avant dans le mémoire :

- Secteur karstifié décolmaté, $n_e=1\%$.
- Secteur karstifié colmaté, $n_e=0,1\%$.

Ces valeurs sont cohérentes avec les données disponibles dans la littérature scientifique et technique.

Au vu de ces considérations, les volumes proposés ci-dessous doivent être considérés avec beaucoup de prudence ; il ne s'agit pas de résultats mais de potentiels.

Elles résultent en partie d'hypothèses non justifiées sur le degré de colmatage des réseaux karstiques. Nous avons fait le choix de considérer les parties libres de l'aquifère urgonien comme non colmatées a contrario des parties sous couverture que l'on suppose colmatées. On peut donc qualifier d'optimiste les estimations sur le compartiment aval (nappe libre) et de pessimistes celles relatives aux autres compartiments (nappe captive).

	Estimation des réserves statiques	Qualification de l'estimation
Compartiment annexe du bois de Lens	7 Mm ³	Hypothèse pessimiste
Compartiment amont	60 Mm ³	Hypothèse pessimiste
Compartiment aval	170 Mm ³	Hypothèse optimiste

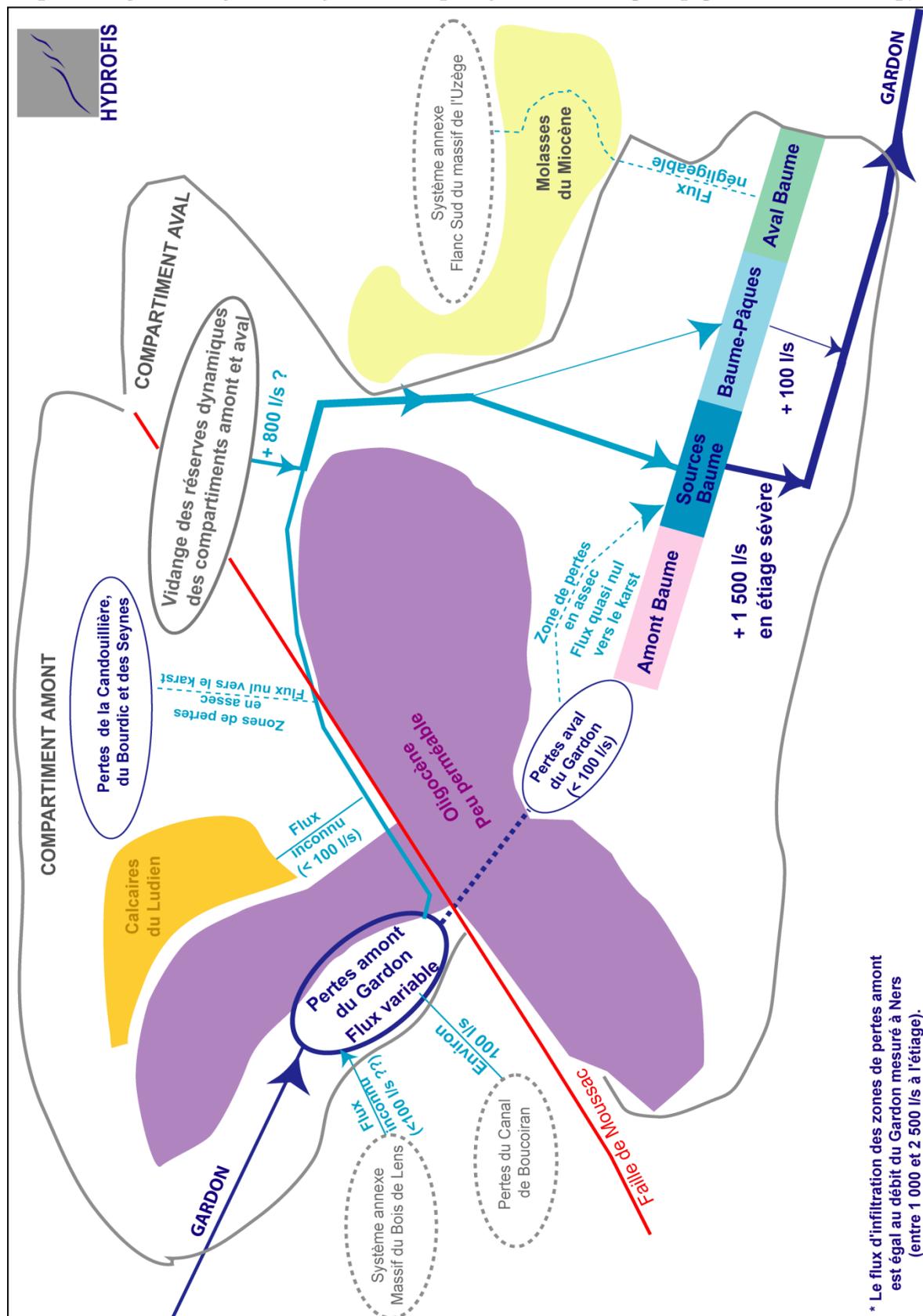
Ces estimations permettent de proposer deux résultats :

- Au vu de sa grande superficie (environ 450 km²), les réserves statiques de l'aquifère urgonien peuvent être qualifiées de modestes : environ 240 Mm³ soit moins de deux fois la recharge annuelle.
- Les réserves statiques sont supposées faibles dans le compartiment annexe du Bois de Lens (mauvaise configuration structurale) et dans le compartiment amont (urgonien sous couverture). Selon notre approche, la majorité des réserves statiques seraient concentrées dans le massif urgonien des gorges du Gardon.



Le schéma ci-dessous présente la même logique d'organisation des flux mais avec une vision spécifique des flux en période d'étiage exprimés en l/s (Q Ners de l'ordre de 1,5 m³/s).

Figure 11 : Synthèse des flux entre zones de recharge et zones d'exutoires (photographie en situation d'étiage).



3 . IMPLICATIONS POUR UNE GESTION OPERATIONNELLE

3.1 EFFICACITE DU SOUTIEN D'ETIAGE DU BARRAGE DE STE CECILE D'ANDORGE

DESTINATION DES EAUX INFILTREES

Les données récoltées permettent de proposer un schéma cohérent quant à la destination des eaux du Gardon infiltrés dans les zones de pertes du Gardon.

En période d'étiage, lorsque le soutien d'étiage par le barrage est effectif, la zone d'assecs est généralement complète entre le Pont de Dions et les sources de la Baume. Ceci étant, les eaux apportées en amont d'Alès au soutien du débit du Gardon continuent de s'infiltrer dans la zone de pertes amont entre Ners et Boucoiran.

Les eaux du Gardon s'infiltrent alors dans les alluvions qui forment un bassin tampon avant transfert des eaux vers le système karstique drainé par le Gardon. Les données de traçage comme les données de géochimie montrent que la destination finale des eaux infiltrées dans l'appareil alluvial du Gardon est d'abord les sources de la Baume (90% du débit restitué au Gardon), secondairement les alimentations masquées du Gardon entre l'aval immédiat des sources de la Baume et la Grotte de Collias.

On peut ainsi considérer que 100% du débit du soutien d'étiage au Gardon bénéficie au Gardon entre Ners et Boucoiran, puis à l'aval des sources de la Baume. La seule section qui ne bénéficie pas de ce soutien d'étiage, et ce pour des causes de fonctionnement naturel, est localisé entre Boucoiran et les sources de la Baume (environ 25 km de linéaire de rivière).

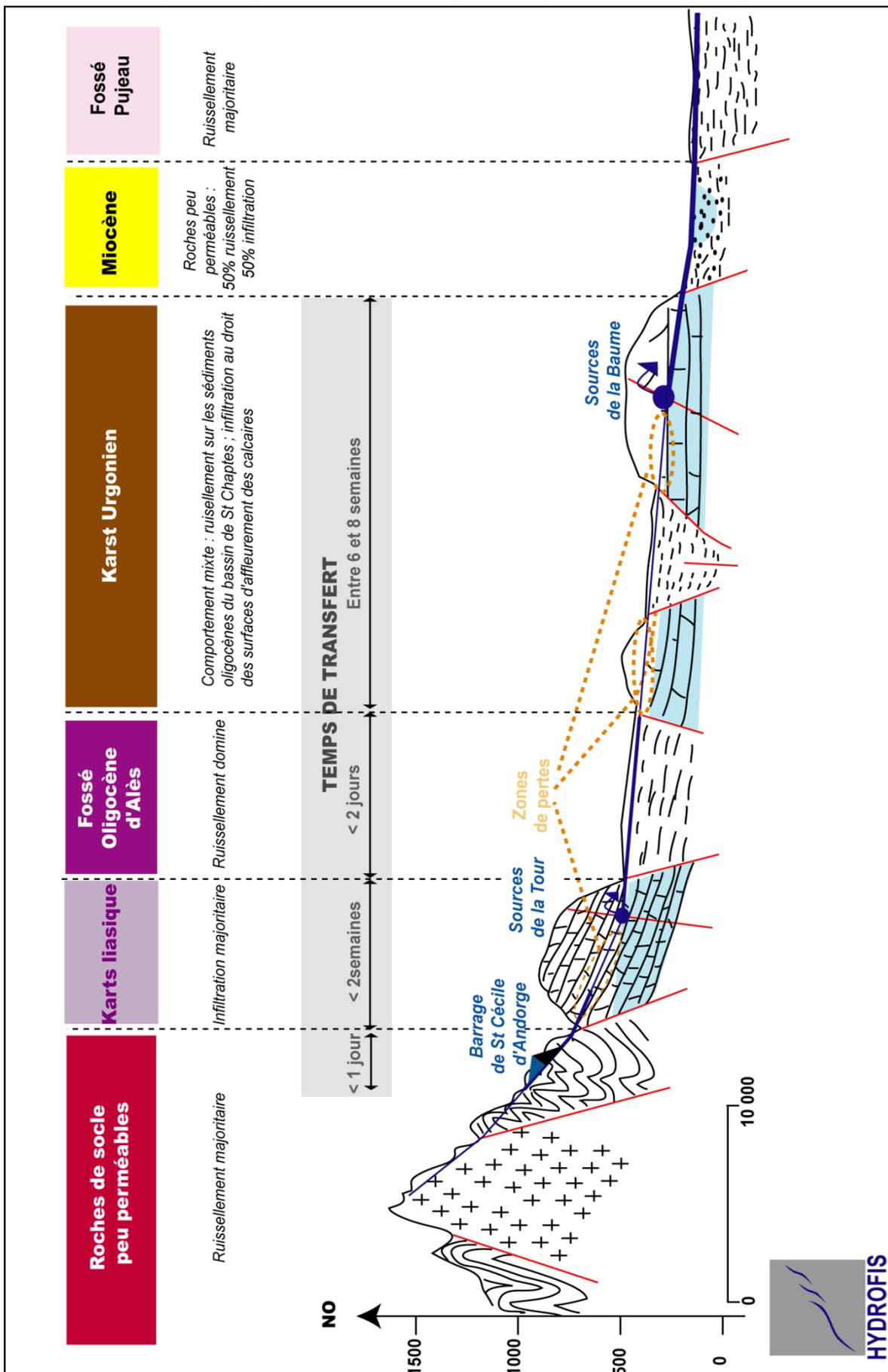
TEMPS DE TRANSFERT

Les eaux infiltrées connaissent un premier trajet souterrain dans les alluvions puis elles vont s'infiltrer dans le système karstique dans des zones de pertes diffuses entre Ners et Boucoiran ; à vol d'oiseau, la distance entre zones de perte probable et les sources de la Baume est alors au minimum de 18 km. Le trajet souterrain estimé par cette étude serait plus proche de 25 km (contournement par le Nord du bassin oligocène de St Chaptes).

Les données récoltées dans le cadre de cette étude (traçages et suivi des sulfates) montrent que ce transfert entre la zone de perte amont et les sources de la Baume prend entre 6 et 8 semaines selon les périodes de l'été (diminution forte des vitesses de circulation durant l'été avec la baisse des gradients piézométriques entre le compartiment amont et le compartiment aval).



Figure 12 : Efficacité du soutien d'étiage du barrage de Ste Cécile d'Andorge.



3.2 IMPACT DES PRELEVEMENTS DANS L'AQUIFERE URGONIEN SUR LES DEBITS DU GARDON

En préambule à cette problématique, il est important de rappeler que les dynamiques temporelles des transports de masse ne sont pas équivalentes à celles des transferts de pression.

De façon schématique, un transfert de pression est quasi-instantané dans un réservoir ; par exemple, la baisse de pression locale des niveaux de nappe suite à un pompage peut créer une modification quasi-instantanée des gradients hydrauliques ; cette modification va impacter « rapidement » les débits aux exutoires naturels. Par contre, le transfert de masse, qui qualifie le déplacement d'une goutte d'eau en elle-même ou d'une substance autre, va être beaucoup plus long ; il s'agit d'un transfert physique d'un point A à un point B qui va nécessiter de faire « voyager » la goutte d'eau du point A au point B.

Dit autrement, quand je pompe dans la nappe, on peut observer une modification rapide des pressions, des niveaux piézométriques (atteinte d'un nouvel état d'équilibre en quelques heures) alors que l'eau mobilisée, prélevée par pompage, peut mettre des jours voire des semaines à traverser l'aquifère avant d'être exhaurée.

QUEL EST L'EFFET D'UN POMPAGE D'EAUX SOUTERRAINES SUR LE DEBIT AUX EXUTOIRES D'UN SYSTEME AQUIFERE ?

L'approche de l'impact des prélèvements dans un hydro système souterrain est un problème complexe qui dépend principalement des éléments suivants :

- Nature et géométrie du système hydrogéologique sollicité.
- Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

La figure ci-dessous tente d'illustrer les phénomènes en jeu de façon simpliste. On peut y observer qu'un pompage a pour conséquence de créer une dépression piézométrique qui se propage verticalement et horizontalement (phénomène de déstockage des réserves du réservoir) ; la forme du cône de rabattement et son évolution temporelle sont directement liées aux paramètres hydrodynamiques du réservoir.

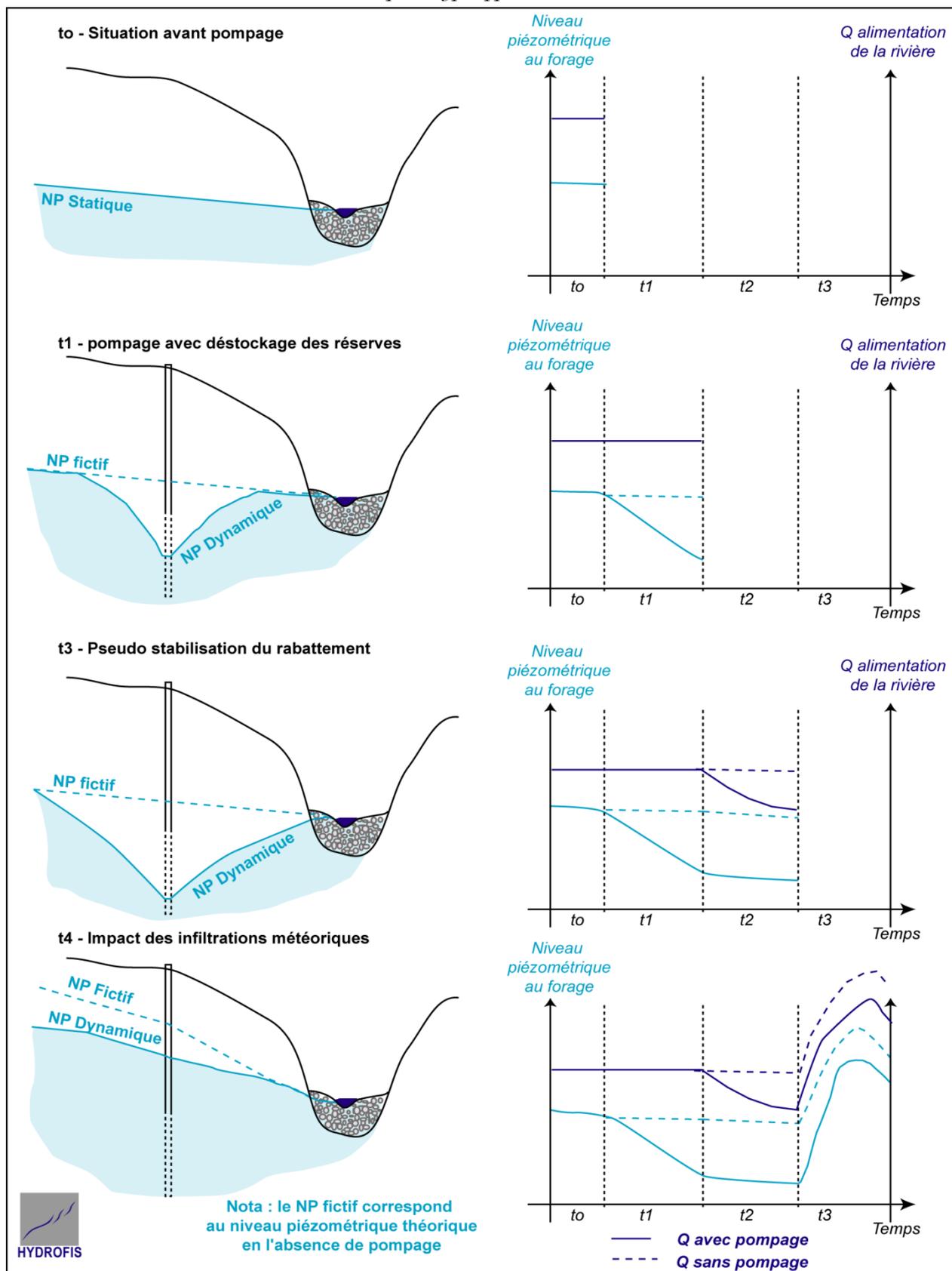
Tant que le pompage est actif, l'évolution du cône de rabattement (donc le déstockage des réserves de l'aquifère) se poursuit tant que les cas de figure suivants ne sont pas rencontrés :

- Contact avec une limite à charge constante (rivière) qui est capable de compenser en totalité ou en partie les volumes d'eaux soutirés au réservoir. On assiste alors à une réelle stabilisation ou à une pseudo-stabilisation des rabattements. La dynamique de déstockage est alors soit arrêtée, soit diminuée.
- Recharge par infiltration des eaux de pluie. L'arrivée massive d'eaux météoriques infiltrées conduit à restocker de l'eau dans le réservoir, donc à une rehausse des niveaux piézométriques. La dynamique de déstockage reprend alors avec des niveaux piézométriques augmentés.

Rappelons que dans cette étude nous nous intéressons à des aquifères de nature karstique, de grande dimension et à géométrie complexe pour l'Urgonien, qui peuvent être affectés de prélèvements permanents comme temporaires.

Attention, dans les systèmes karstiques, ce schéma relève d'une forte idéalisation. Il est possible et probable que la stabilisation ne soit pas complète ; on parle alors de pseudo-stabilisation. Dans de tels cas de figure, on a alors une partie seulement du débit exhauré qui provient du réseau de drains qui alimente les exutoires ; la continuation d'une lente baisse piézométrique indique que l'on continue à déstocker localement les réserves de l'aquifère.

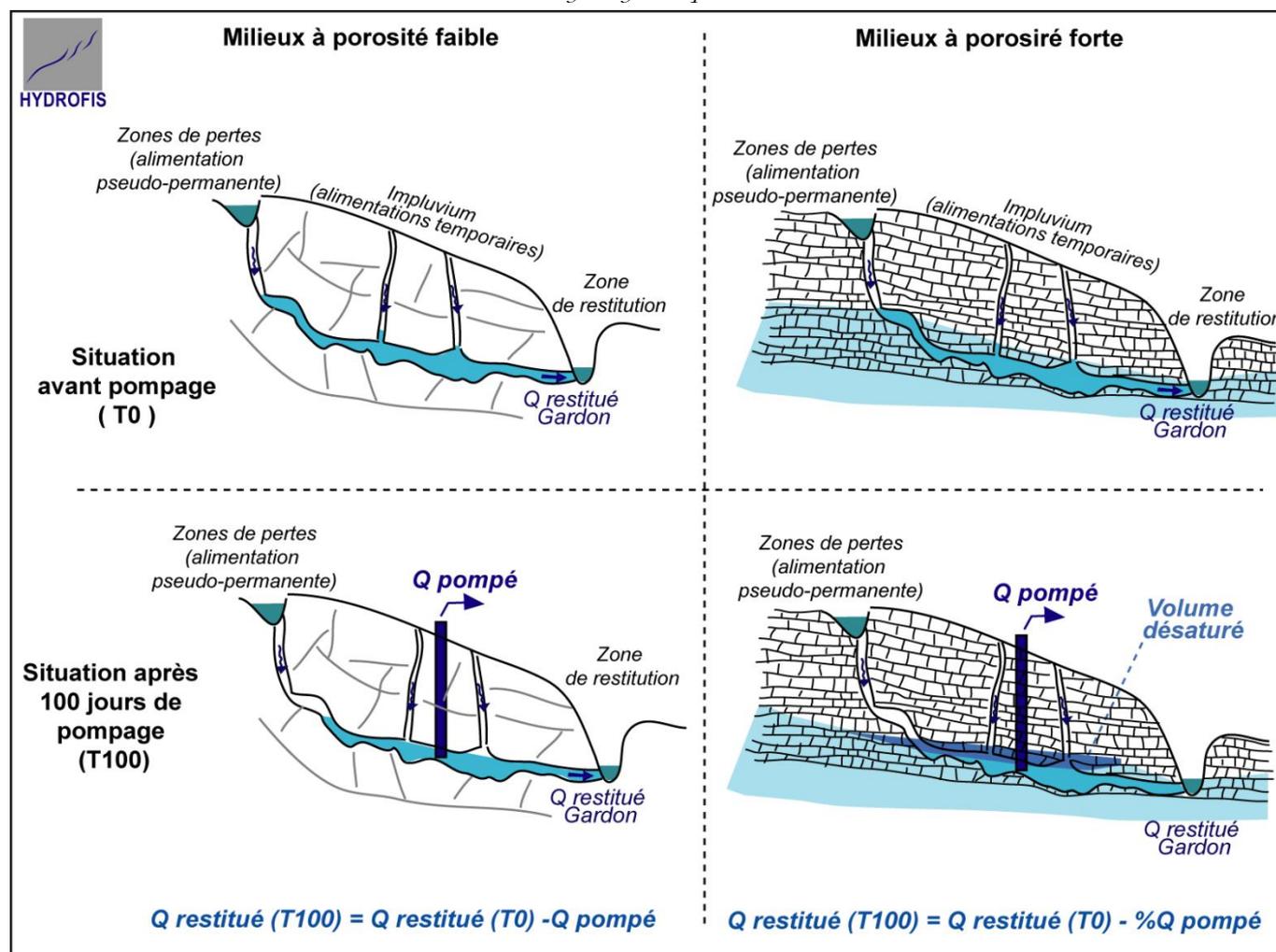
Figure 13 : Schéma explicatif de l'impact d'un pompage sur le débit d'un système hydrogéologique caractérisé par un exutoire unique de type appareil alluvial



De plus, la dynamique de déstockage d'un réservoir souterrain est directement expliquée par la diffusivité du réservoir qui est la capacité du milieu à transmettre la perturbation hydraulique induite par un pompage par exemple ; elle correspond au rapport entre transmissivité (capacité du milieu à favoriser les écoulements) et son coefficient d'emménagement (capacité à stocker de l'eau).

La figure ci-dessous illustre de façon exagérée et schématique les deux extrêmes de comportement idéalisé dans des aquifères karstiques.

Figure 14 : Schéma des impacts supposés des prélèvements dans le karst sur le débit du Gardon en fonction des paramètres hydrodynamiques.



Dans le premier cas idéalisé, le système karstique affecte un réservoir très peu poreux ; la porosité correspond principalement aux vides relatifs au réseau de drains karstiques (peu ou pas de fissuration, peu ou pas d'altération de la matrice très peu poreuse).

Dans le second cas, le système karstique est caractérisé par une porosité secondaire et/ou matricielle importante. Les vides sont alors majoritairement distribués dans la matrice et non dans le réseau de drains. Avec ce type de réservoir, une partie de l'eau exhaurée va provenir d'un déstockage de l'eau matricielle et, à l'échelle mensuelle, une partie seulement du volume pompé sera prélevée sur le flux qui alimente les exutoires.

Or, il n'est pas possible de statuer a priori sur une valeur unique de diffusivité pour l'aquifère urgonien. Les paramètres hydrodynamiques varient spatialement et les mesures sont trop rares pour être généralisées. L'exploitation des rares données disponibles soutient l'hypothèse d'une diffusivité à l'échelle du réservoir comprise entre 10 et 1 m²/s.

QUELLE METHODE POUR QUANTIFIER L'IMPACT DES PRELEVEMENTS SUR UN SYSTEME KARSTIQUE ?

L'exploitation de la formule de Theis permet d'estimer l'impact des prélèvements par une formule analytique simple, en fonction de trois critères (BRGM, 1995) :

- Durée du pompage.
- Distance forage-cours d'eau.
- Paramètres hydrodynamiques.

Précisons qu'il s'agit d'une approche basée sur une vision simplifiée des aquifères ; ils sont alors supposés homogènes et isotropes et avec une extension semi-infinie limitée par une rivière (pas d'alimentation par infiltration des eaux de pluie, pas d'alimentation par les aquifères bordiers ou par drainance).

C'est une approche élégante mais son application aux systèmes karstiques objet de l'étude doit être considérée avec prudence. Cette méthode nous donne le pourcentage d'eau soutirée à la rivière pour un pompage dans le cas d'une configuration hydrogéologique simple avec une nappe de type poreux homogène infinie drainée par un cours d'eau. Or, dans notre contexte hydrogéologique, le milieu n'est ni homogène ni poreux mais hétérogène car karstifié (écoulements chenalisés et hiérarchisés).

Cet écart important entre modèle théorique et réalité physique doit nous conduire à envisager les résultats avec beaucoup de prudence. Les pourcentages estimés seront nécessairement relativement incertains.

De plus, la nappe est alimentée sur ses limites par un flux pseudo-constant apporté par les pertes des cours d'eau sur les limites amont. Les réservoirs sont ainsi traversés par des flux permanents entre zones de pertes et zones d'exutoire. Dans un souci de vulgarisation, on peut parler de Gardon souterrain sur les trajets identifiés entre zones de pertes permanentes et exutoires permanents.

Pour tenir compte de cette spécificité, nous proposons de calculer la distance non au seul Gardon aérien en période estivale mais soit au Gardon « souterrain » (trajet supposé entre zones de pertes et zones d'exutoire) soit au Gardon « superficiel ».

Ainsi, l'approche est analogique : lors d'un pompage dans les systèmes karstiques, si le forage est éloigné du cours d'eau, on ne retire pas directement de l'eau à ce cours d'eau mais on vient retirer une partie du flux qui transite depuis les zones de pertes vers les zones d'exutoire.

Ajoutons que cette méthode peut être qualifiée de pessimiste.

En effet, elle ne tient pas compte d'éventuelles suralimentations par drainance ou par des aquifères bordiers qui augmentent lorsque les niveaux piézométriques diminuent consécutivement aux pompages. Ce sont des phénomènes potentiellement importants pour le karst urgonien.



APPLICATION DE LA METHODE POUR UNE GESTION A PRIORI DES AUTORISATIONS DE PRELEVEMENT

APPROCHE DES IMPACTS DES PRELEVEMENTS TEMPORAIRES

L'application de la solution analytique permet de modéliser l'impact de pompages à débit constant (moyenne des débits prélevés sur la période d'irrigation), sur une période 4 mois (correspondant idéalement aux mois de juin, juillet, août et septembre) avec différentes hypothèses de diffusivité.

Le tableau ci-dessous présente les moyennes sur les 4 mois de pompage des impacts supposés en termes de % moyen sur quatre mois du débit prélevé sur le débit du cours d'eau, en fonction de la distance du point de prélèvement au Gardon souterrain :

			Distance au Gardon souterrain (km)																
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
% impact	Urgonien	S=0.001	92	85	78	68	60	53	48	43	38	35	30	26	24	22	18	17	14
		S=0.01	75	51	37	26	16	13	5										

En synthèse, nous proposons un tableau des impacts potentiels qui intègrent l'incertitude sur la diffusivité du réservoir ; les pourcentages d'impact sont définis par des bornes hautes (forte diffusivité) et des bornes basses (faible diffusivité).

On peut constater que l'imprécision est forte ; le choix de privilégier la borne haute ou basse doit donc être considéré comme un choix politique de gestion prudentielle ou non.

% impact		Urgonien
Distance au Gardon souterrain (km)	1	80-95
	2	50-85
	3	40-80
	4	25-70
	5	15-60
	6	15-55
	7	5 à 50
	8	0-45
	9	0-40
	10	0-35
	11	0-30
	12	0-25
	13	0-25
	14	0-25
	15	0-20
	16	0-20
	17	0-15

Attention, ces clés de répartition doivent être considérées avec prudence. Elles résultent d'approches analogiques grossières et imprécises. Le karst est un milieu complexe qu'il est difficile d'appréhender par des démarches de modélisation simplistes. Ces clés de répartition doivent donc être seulement envisagées comme des outils pour une politique de planification a priori des prélèvements, qui doit nécessairement être complétée par une politique de suivi de nappe ambitieuse et engagée.

Au vu de ces considérations, nous recommandons vivement :

(1) De maintenir, voire de renforcer, les suivis piézométriques de ces réservoirs pour suivre et analyser les impacts potentiels liés aux prélèvements temporaires, puis modifier si nécessaire ces politiques de planification au vu de comportements observés.

(2) D'introduire dans le processus d'autorisation d'éventuels prélèvements temporaires une approche graduée (mise en place de paliers bas, suivi des impacts piézométriques sur au moins quatre cycles hydrologiques puis potentiellement, autorisation de paliers plus élevés).

(3) La réalisation systématique d'études hydrogéologiques adaptées à la complexité du milieu (suivi par des hydrogéologues qualifiés et mise en œuvre de pompages d'essais avec suivi au lointain sur au moins un piézomètre judicieusement implanté).

APPROCHE DE L'IMPACT DES PRELEVEMENTS PERMANENTS

Concernant les pompages permanents, l'analyse des chroniques piézométriques montre que de façon quasi-systématique, les réservoirs karstiques sont « remplis » en début de période estivale. Cette observation s'explique par la relative faible porosité de ces réservoirs au regard de la recharge puissante dont ils bénéficient (cumul d'un flux d'alimentation au droit des zones de pertes et infiltration des eaux de pluie sur de vastes impluviums). On peut donc considérer qu'en début de période estivale, l'impact des prélèvements permanents peut être assimilé à des pompages temporaires qui « débuteraient » avec la fin de la dernière crue karstique printanière. Avec cette approximation, la principale différence concerne la durée de pompage qui va affecter l'intégralité de la période estivale jusqu'aux pluies d'automne susceptibles de venir recharger le réservoir.

Nous faisons ainsi l'hypothèse pessimiste d'une durée de pompage avec impact sur le débit des exutoires de 6 mois (de la mi-mai à la mi-novembre).

Le tableau ci-dessous présente les moyennes sur les 6 mois de pompage des impacts supposés en termes de % moyen sur quatre mois du débit prélevé sur le débit du cours d'eau, en fonction de la distance du point de prélèvement au Gardon souterrain :

		Distance au Gardon souterrain (km)																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
% impact	Urgonien	S=0.001	93	87	79	73	66	59	54	49	44	41	36	32	30	28	24	23	20
		S=0.01	78	57	42	32	22	18	8	5									

Ces résultats nous permettent de proposer une méthode d'application aux prélèvements permanents dans les karsts objets de l'étude. Tout prélèvement permanent peut être réduit à un débit fictif moyen sur 6 mois. Nous appellerons ce débit moyen fictif, débit de référence. Comme pour les prélèvements temporaires, nous proposons un tableau des impacts potentiels qui intègrent l'incertitude sur la diffusivité du réservoir ; les pourcentages d'impact sont définis par des bornes hautes (forte diffusivité) et des bornes basses (faible diffusivité) :

% impact		Urgonien
Distance au Gardon souterrain (km)	1	80-95
	2	60-90
	3	45-80
	4	35-75
	5	25-70
	6	20-60
	7	10 à 55
	8	5 à 50
	9	0-45
	10	0-40
	11	0-35
	12	0-30
	13	0-30
	14	0-30
	15	0-25
	16	0-25
	17	0-20

Attention, de nouveau, ces clés de répartition doivent être de nouveau considérées avec prudence. Les réserves évoquées pour les prélèvements temporaires restent valables. Ces clés de répartition doivent donc être seulement envisagées comme des outils pour une politique de planification a priori des prélèvements.

APPLICATION DE LA METHODE POUR UNE GESTION A POSTERIORI DES AUTORISATIONS DE PRELEVEMENT

Nous avons pu constater que la relative imprécision sur les paramètres hydrodynamiques des réservoirs induit une forte variabilité de l'impact a priori d'un forage sur les débits aux exutoires en période estivale, que le pompage soit permanent ou temporaire.

Nous proposons ici des abaques qui pourront être utilisés pour estimer de façon plus précise, plus rigoureuse, l'impact des pompages temporaires et permanents. Il faudra pour cela procéder à des essais de pompage longue durée (idéalement, avec des durées supérieures à 30 jours) avec suivi au lointain sur au moins un piézomètre judicieusement implanté. L'estimation du couple (T ;S) permettra, connaissant la distance théorique, au flux du Gardon aérien ou souterrain d'estimer le % sur le débit aux exutoires.

Les abaques sont donnés pour des forages agricoles (T pompage de 4 mois) et pour des forages dits permanents (T pompage de 6 mois).

Figure 16 : Impact sur le débit du cours d'eau en fonction de la diffusivité et de la distance aux exutoires (temps de pompage de 4 mois).

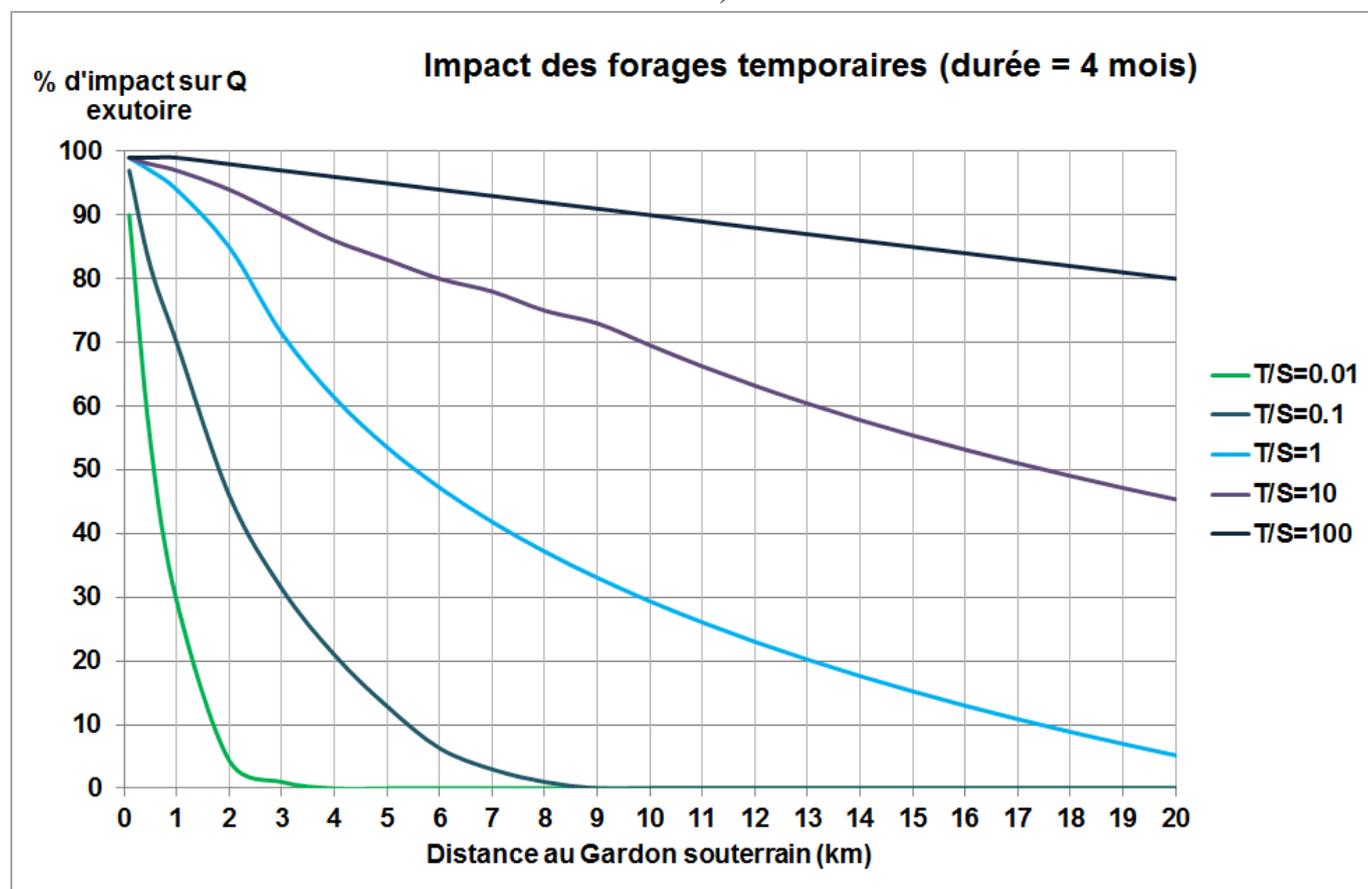
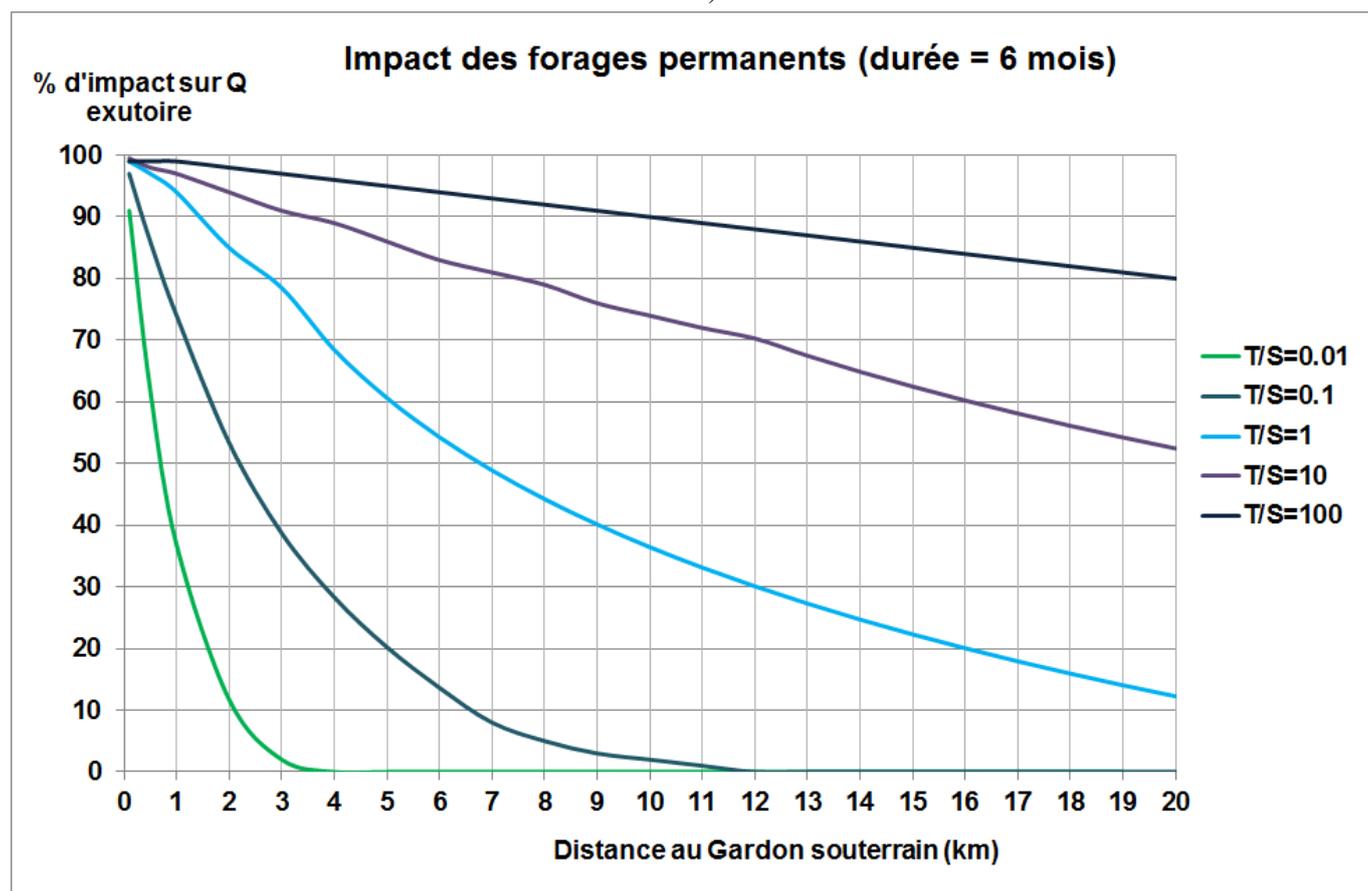


Figure 17 : Impact sur le débit du cours d'eau en fonction de la diffusivité et de la distance aux exutoires (temps de pompage de 6 mois).



PEUT-ON ENVISAGER UNE GESTION ACTIVE DE L'AQUIFERE URGONIEN ?

PRINCIPE DE LA GESTION ACTIVE DES AQUIFERES KARSTIQUES

Dans certains aquifères karstiques, il est possible de mettre en place une gestion dite active de l'exploitation des ressources en eau souterraine. Il s'agit alors par des forages implantés près des zones d'exutoires, voire dans l'exutoire lui-même, de prélever au-delà du débit d'étiage ; cela provoque alors l'assèchement de l'exutoire naturel et cette perte est alors compensée artificiellement par un retour d'une partie des eaux pompées vers cet exutoire.

SPECIFICITES DE L'AQUIFERE URGONIEN

Avant d'étudier la possibilité d'une gestion active de l'aquifère urgonien, il faut en rappeler les spécificités :

- A l'étiage, 90% du débit est restitué par le karst au droit des sources de la Baume. Les gorges du Gardon sont un espace naturel exceptionnel fortement dépendant au caractère aquatique de ces milieux, protégé par plusieurs dispositifs réglementaires ou contractuels ; il est inimaginable d'assécher le Gardon en période estivale entre les sources de la Baume et Collias.

- Le débit d'étiage correspondant à un QMNA5 (débit mensuel moyen observé une année sur cinq) est estimé compris entre 1 500 et 1 700 l/s à Remoulins (forte incertitude liée à des séries chroniques courtes et de fortes incertitudes sur les mesures de débit à l'étiage). Il serait expliqué pour 1 400 à 1 500 l/s par les résurgences du système karstique et par 100 à 200 l/s environ par les apports de l'Alzon. Le débit de 1 500 l/s est aujourd'hui acté comme objectif de gestion pour le bon état écologique du cours d'eau et des milieux associés.

Il résulte de ces deux considérations que toute gestion active sera contrainte par un objectif de conservation d'un débit minimal de 1 500 l/s au droit des sources de la Baume.

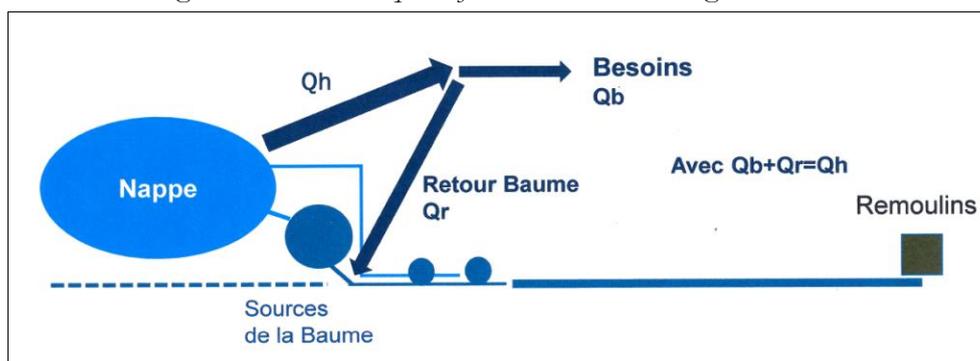
Cette contrainte interdit de facto toute gestion active en champ, proche des sources de la Baume qui produirait un assèchement complet des sources de la Baume. Dans un tel schéma, il serait nécessaire de pomper suffisamment pour prélever un débit cible et pour ramener 1 500 l/s dans le Gardon au droit des sources.

SCHEMAS DE MOBILISATION DES EAUX SOUTERRAINES

Nous avons vu que l'impact sur le débit à la Baume pouvait être anticipé par une estimation haute et basse, exprimé en % de réduction du débit à l'exutoire, principalement fonction de la distance au Gardon souterrain.

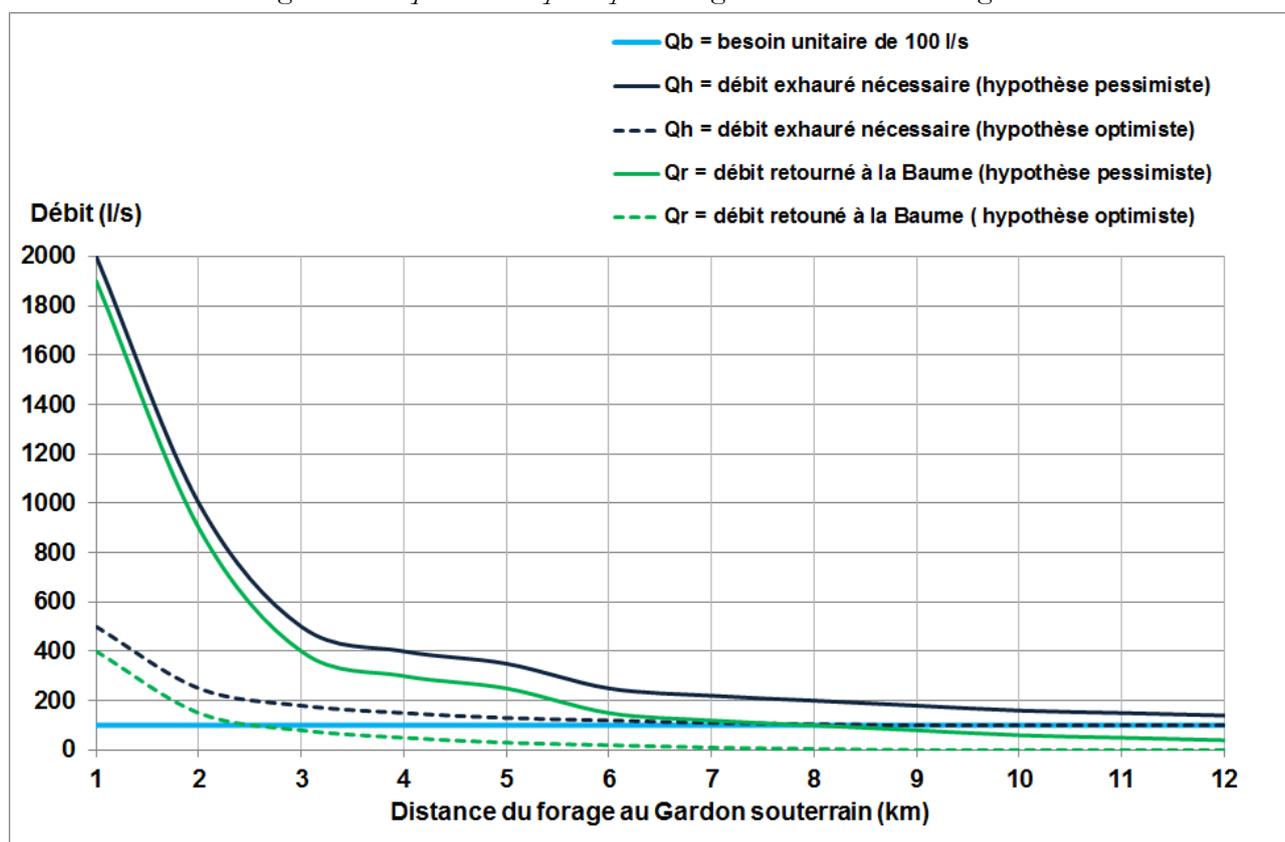
Pour tout nouveau prélèvement dans l'aquifère urgonien, le débit exhauré (Q_h) devra être réparti entre une part pour la satisfaction des besoins (Q_b) qui justifie le prélèvement, et une part qui sera retournée à la Baume (Q_r). Le schéma ci-dessous essaie d'illustrer cette contrainte.

Figure 18 : Schéma explicatif des contraintes sur la gestion active.



On peut ainsi traduire ces contraintes par deux graphes (hypothèse favorable d'un aquifère peu diffusif et hypothèse défavorable d'un aquifère très diffusif), qui déterminent Q_h , Q_b et Q_r en fonction de la distance du point de prélèvement

Figure 19 : Equilibre à respecter pour une gestion active du karst urgonien.



A titre d'exemple, un forage à 4 km de la Baume est susceptible de générer un déficit aux exutoires compris entre 35 et 75%. Si on veut satisfaire un besoin unitaire d'environ 100 l/s, il faudra pomper soit 150 l/s pour remettre 50 l/s dans le Gardon (hypothèse optimiste), soit pomper 400 l/s et en rejeter 300 l/s dans le Gardon pour compenser la baisse de débit aux sources de la Baume (hypothèse pessimiste). Il sera alors nécessaire de ramener ces débits via des installations appropriées (tuyaux correctement dimensionnés pour 50 ou 300 l/s sur une distance de 4 km).

Ce schéma permet de mettre en évidence la difficulté opérationnelle d'une éventuelle gestion active du Gardon qui est en grande partie dépendante des conditions hydrodynamiques locales d'implantation d'éventuels forages :

- Dans le cas d'un forage implanté dans un milieu très diffusif (hypothèse défavorable), il faut une implantation à plus de 7 km du Gardon souterrain pour commencer à avoir un ratio acceptable (débit d'exhaure de l'ordre de 200 l/s pour un besoin satisfait de 100 l/s). Cela implique que soit on décide de minimiser les longueurs du retour vers les sources de la Baume mais on aura alors un ratio d'exploitation très défavorable (avec un débit dit de retour très important), soit on cherche un ratio acceptable mais il faut accepter de mettre en place des systèmes de retour à la Baume sur plus de 7 km.

- Dans le cas d'un forage implanté dans un milieu moins diffusif (hypothèse favorable), on obtient un ratio acceptable (50-50) pour une distance forage-Gardon souterrain de 2,5 km. Notons qu'avec cette hypothèse, au-delà de 6 km, l'impact aux exutoires est tellement faible qu'il n'est plus obligatoire d'envisager un retour artificiel vers le Gardon.

3.3 GESTION PATRIMONIALE ET SUIVI PIEZOMETRIQUE

OBJECTIFS DU SUIVI

Pour le suivi opérationnel des karsts, les enjeux techniques et scientifiques sont les suivants :

- Pour chaque compartiment éloigné des zones d'exutoires, disposer d'un point de mesure jugé représentatif qui renseigne (1) sur les modalités de recharge en période de hautes eaux, (2) sur les modalités de vidange en période de basses eaux.
- Dans la zone ou les zones principales de pertes, disposer d'un point de mesure jugé représentatif qui renseigne sur les dynamiques d'échanges nappe-rivière : identification des périodes pour lesquelles c'est la nappe qui alimente le cours d'eau (hautes eaux) et de celles où les pertes sont actives.
- Dans les zones de restitution, disposer d'un point de mesure jugé représentatif qui renseigne sur les variations de piézométrie aux exutoires dont la connaissance est indispensable pour approcher les dynamiques de restitution durant les périodes estivales.

NOS PROPOSITIONS

Le degré de représentativité d'un piézomètre peut être approché de deux manières :

- Qualité à bien restituer les variations piézométriques attendues consécutives à une sollicitation aux limites du système (événement pluvieux, crues sur le Gardon,...) qui indiquent une bonne connexion aux réseaux de drains.
- Degré de non-influencement du signal piézométrique, lié à la présence en champ proche de forages (ou de canaux agricoles utilisés avec l'irrigation gravitaire massive), qui sont susceptibles de venir perturber la chronique piézométrique, de gêner son interprétation.

Le tableau ci-dessous propose une justification de l'importance de la continuité du suivi sur les piézomètres existants :

Piézo mètres	MO	BSS	Argumentaires	Représentativité du signal	Pompages en champ proche	Degré de priorité
Piézo mètre Cruviers-Lascours	EPTB Gardons	09387X0067/ cruvie	Piézo mètre indispensable au suivi des dynamiques de pertes du Gardon entre Ners et Moussac (pertes amont)	Bonne	Non	Haut
Piézo mètre de Moussac	EPTB Gardons/BR L*	09388X108/ PZ1	Piézo mètre utile pour suivre les dynamiques de vidange du compartiment amont du karst	Bonne	forage BRL	Moyen
Piézo mètre de Maisonnette	BRGM	09388X0114/M AISON	Piézo mètre utile pour renseigner sur le fonctionnement du karst sous couverture	Faible (karst sous couverture)	forage BRL	Moyen



Piézomètre de St Génies-de-Malgoirès	EPTB Gardons/Nîmes Métropole*	09387X0059/ F5	Piézomètre indispensable pour suivre les dynamiques de vidange du compartiment du Bois de Lens	Bonne	forage de St Génies de Malgoirès	Haut
Piézomètre du Pont St Nicolas	BRGM	09395X0065/ NICOLA	Piézomètre indispensable pour suivre les dynamiques de restitution du karst au droit des sources de la Baume	Bonne	Non	Haut
Grotte de Pâques	EPTB Gardons/Collias*		Piézomètre utile pour suivre les dynamiques de restitution du karst entre la Baume et la Grotte de Pâques	Bonne	Forage de Collias + seuil de Collias	Haut
Piézomètre de Collorgues	EPTB Gardons/SI VOM de Collorgues*	09384X0005/ COMBET	Piézomètre utile pour identifier le chemin préférentiel entre les pertes amont et les zones de restitution du compartiment aval	Bonne	Forage de Mas Combet	Moyen
Piézomètre de Baron	EPTB Gardons / Baron*	09384X0007/G ALIZZ	Piézomètre utile pour identifier le chemin préférentiel entre les pertes amont et les zones de restitution du compartiment aval	Interrogations : des niveaux « moyens » hauts (compartiment isolé ?) + des amplitudes fortes en cas de pluie (mauvaise connexion au réseau de drains ?)	Non	Faible
Piézomètre de Bourdic	EPTB Gardons / CD30*	09395/0059/ F1	Piézomètre utile pour identifier le chemin préférentiel entre les pertes amont et les zones de restitution du compartiment aval	Bonne	Non	Haut
Piézomètre de La Calmette	BRGM	09388X0111/O ULE	Piézomètre indispensable au suivi des dynamiques de pertes du Gardon entre Dions et la Baume – Renseigne aussi sur les dynamiques piézométriques en RG du Gardon	Bonne	Non	Haut

*L'ouvrage appartient au gestionnaire AEP et/ou au propriétaire de la parcelle, le dispositif de mesure est géré par l'EPTB Gardons (propriétaire des équipements).



En résumé, seul le piézomètre de Baron ne nous semble pas indispensable pour le suivi du karst urgonien et ce principalement à cause d'interrogations sur sa représentativité.

Ceci étant, les piézomètres de Moussac et Maissonnette sont en champ proche des forages BRL avec des débits de prélèvement continus, croissants et élevés en période estivale. Il y a un risque que l'influence de ces pompages « gênent » la lecture de ces chroniques piézométriques.

Pour les autres piézomètres sous influence d'un champ captant AEP, les données disponibles montrent que l'un d'entre eux (Grotte de Pâques), l'alternance des périodes de prélèvement avec les périodes de repos provoque un bruit bien identifiable si on dispose de mesures adaptées au pas de temps horaire (environ +/- 30 cm). Il sera nécessaire de valider la possibilité d'identifier ce bruit par des mesures adaptées sur les piézomètres de Collorgues et de St Geniès de Malgoirès.

PROPOSITION DE NOUVEAUX POINTS DE SUIVI

De plus, pour optimiser le réseau de suivi, nous recommandons la mise en place de 4 nouveaux piézomètres ; le tableau ci-dessous en présente les caractéristiques :

Piézomètres	Argumentaires	Pompages en champ proche	Côte sol (m NGF)	NP attendu (m NGF)	Degré de priorité
Piézomètre Bordnègre	Piézomètre indispensable pour appréhender les variations de la nappe du flanc sud de l'anticlinal de l'Uzège	Non	80-100	30-80	Haut
Piézomètre proche de Dions	Piézomètre indispensable pour comprendre les dynamiques d'échange nappe-rivière dans la zone de pertes aval	Influence potentielle du champ captant de la Combe St Saturnin	150-180	30-50	Haut
Piézomètre au droit des sources de la Baume	Piézomètre utile pour renseigner sur les dynamiques de restitution des sources	Non	30-50	30-40	Moyen
Piézomètre du flanc Nord de la combe de Sanilhac	Piézomètre très utile pour valider les hypothèses sur les grands chemins de l'eau dans le système karstique	Non	100-140	30-60	Haut

La carte ci-dessous présente une localisation approximative des zones d'implantation de ces nouveaux piézomètres recommandés:

4 . CHIFFRES CLES DU KARST URGONIEN

	Nature	Flux	Recharge annuelle
Entrées	Infiltration des eaux de pluie	2 000 l/s (débit fictif moyen annuel) Lame d'eau infiltrée estimée à 320 mm/an soit environ 10 l/s/km ² en débit spécifique. Forte variabilité interannuelle	63 Mm ³ /an en moyenne interannuelle
	Pertes amont du Gardon	2 500 l/s en moyennes et hautes eaux Environ 1 000 l/s à l'étiage (équivalent au débit passant au droit du Pont de Ners)	70 Mm ³ /an
	Pertes aval du Gardon	1 500 l/s en moyennes et hautes eaux Inférieur à 100 l/s à l'étiage (contribution mineure des affluents de la Gardonnenque au Gardon entre Moussac et Dions)	30 Mm ³ /an
	Pertes du Canal de Boucoiran	Flux quasi-continu de l'ordre de 100 l/s	3 Mm ³ /an
	Pertes du Bourdic, de la Candouillère, des Seynes	Pas de mesures – A déterminer.	
Sorties	Zone de restitution amont de la Baume	1 000 l/s en moyennes eaux En assec à l'étiage Comportement non déterminé en hautes eaux	Entre 14 et 23 Mm ³ /an
	Zone de restitution des sources de la Baume	3 300 l/s en hautes et moyennes eaux 1 500 l/s à l'étiage	Entre 80 et 100 Mm ³ /an
	Zone de restitution entre Baume et Pâques	2 200 l/s en hautes et moyennes eaux 100 l/s à l'étiage	Entre 54 et 72 Mm ³ /an

	Zone de restitution à l'aval de la Grotte de Pâques	1 600 l/s en hautes et moyennes eaux Négligeables à l'étiage	Entre 18 et 24 Mm ³ /an
	Prélèvements (90% porté par les forages BRL)	Entre 30 et 40 l/s en période hivernale Entre 150 et 200 l/s en pointe estivale	Environ 1 Mm ³ /an