HAL
open science

Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes - Rapport final.

Jean-Christophe Maréchal, Victor Petit, Bernard Ladouche

To cite this version:

Jean-Christophe Maréchal, Victor Petit, Bernard Ladouche. Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes - Rapport final.. [Rapport de recherche] BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) (Bureau de recherches géologiques et minières). 2004. hal-03141332

HAL Id: hal-03141332

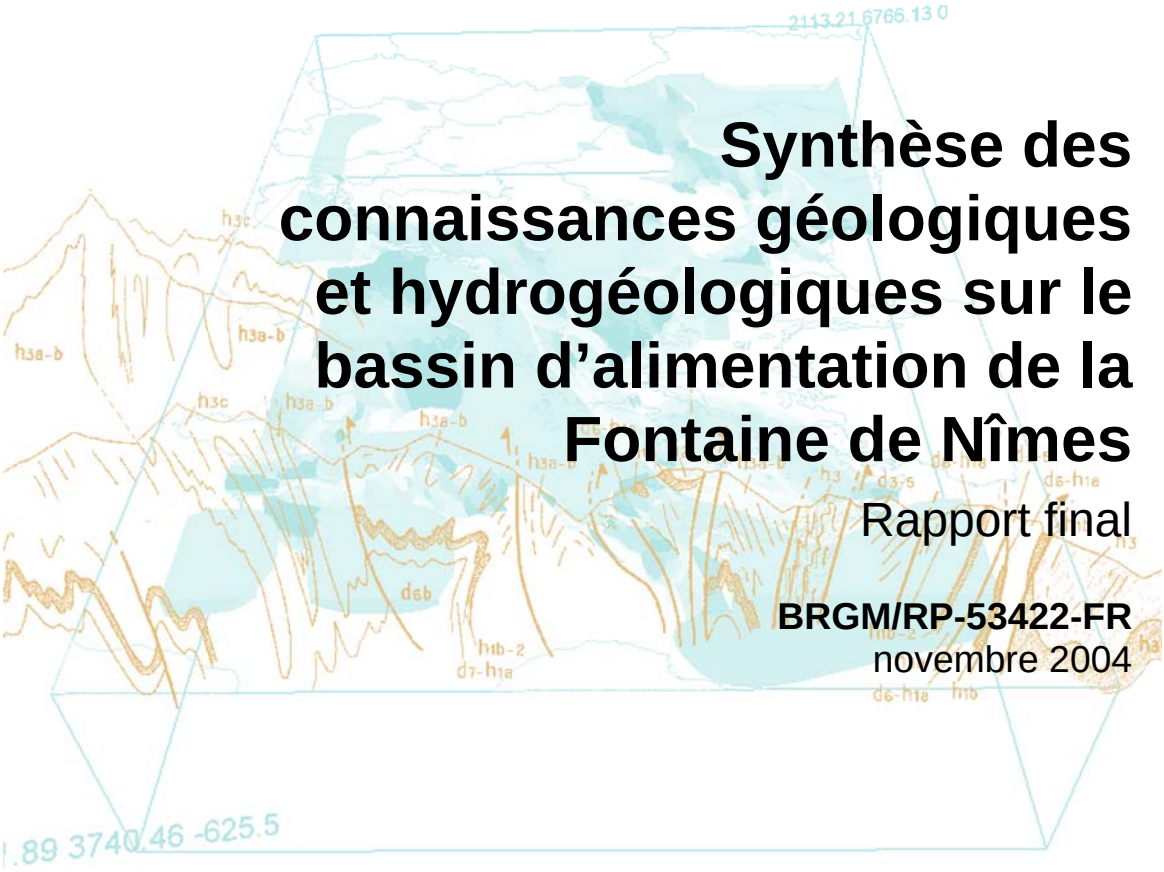
https://brgm.hal.science/hal-03141332

Submitted on 15 Feb 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Document public



Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes

Rapport final

BRGM/RP-53422-FR
novembre 2004

Document public

Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes

Rapport final

BRGM/RP-53422-FR
novembre 2004

J.C. Maréchal, V. Petit, B. Ladouche

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : inondations, karst, hydrogéologie, Nîmes, source, calcaire, synthèse bibliographique

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

Maréchal JC., Petit V., Ladouche B. (2004) - Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. BRGM/RP-53422-FR, 75 p., 17 fig., 6 tabl.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre du programme de recherche KARSTEAU (PDR04EAU01) et de la convention 2003.07.23 établie avec la Ville de Nîmes, le BRGM a pour objectif de caractériser la structure et le fonctionnement de l'hydrosystème karstique nîmois et d'évaluer sa contribution à la genèse et à la propagation des crues éclair, en travaillant à deux échelles spatiales : celle de la totalité du bassin d'alimentation et celle de sites pilotes correspondant à un ou deux bassins versants ou sous-bassins versants de cadereaux.

Le module 1 du projet prévoit une synthèse des connaissances à partir des travaux antérieurs réalisés sur la zone d'étude ; elle fait l'objet du présent rapport. On examine successivement les contextes pluviométriques, hydrographiques, géologiques et hydrogéologiques. Les données existantes sur la karstification et l'extension du bassin d'alimentation sont discutées. Un point sur l'hydrochimie des eaux souterraines dégage leurs principales caractéristiques.

Si certaines informations précieuses existent, par exemple sur la connaissance du réseau exploré par les spéléologues, sur l'inventaire des phénomènes karstiques ou encore sur les principaux axes d'écoulement mis en évidence au moyen d'essais de traçage, de nombreuses incertitudes demeurent quant à la structure et au fonctionnement hydrodynamique de l'hydrosystème karstique de la Fontaine de Nîmes :

- extension et localisation du bassin d'alimentation de la Fontaine,
- bilan hydrologique à l'échelle du bassin,
- jaugeage des débits à la Fontaine,
- types de relations entre les eaux de surface (cadereaux) et les eaux souterraines [alimentation des eaux de surface par les eaux souterraines et inversement (pertes)]
- fonctionnement hydrodynamique de la Fontaine et rôle de la Faille de Nîmes dans l'organisation des écoulements souterrains,
- dynamique des écoulements : contribution de l'épikarst et de la zone noyée, rôle du réseau karstique et des blocs fissurés,
- développement de la karstification en profondeur, existence de paléokarst sous le niveau du réseau karstique actif actuel.

Un certain nombre d'observations, de mesures et d'interprétations complémentaires sont donc nécessaires à l'élaboration d'un schéma conceptuel de la structure et du fonctionnement de cet hydrosystème à l'échelle de la zone étude. Elles seront effectuées au cours des phases suivantes du projet (modules 1 et 2).

Sommaire

1. Introduction 9

2. Cadre géographique 11

3. Contexte géomorphologique 13

4. Pluviométrie 15

4.1. GÉNÉRALITÉS 15

4.2. MESURES COMPLÉMENTAIRES 19

5. Contexte hydrographique 22

5.1. DESCRIPTION 22

5.2. MESURES LIMNIGRAPHIQUES 22

6. Contexte géologique 26

7. Contexte hydrogéologique 30

7.1. LES FORMATIONS GÉOLOGIQUES AQUIFÈRES 30

7.1.1. Systèmes karstiques des Garrigues 30

7.1.2. Plaine de la Vistrenque 31

7.2. PHÉNOMÈNES KARSTIQUES ET KARSTIFICATION 34

7.3. LA FONTAINE DE NÎMES ET SON BASSIN D'ALIMENTATION 39

7.4. ESSAI DE VIDANGE DU RÉSEAU SOUTERRAIN D'APRÈS (DORFLIGER *ET AL*., 1999) 44

7.5. FAILLE DE NÎMES 46

7.6. PIÉZOMÉTRIE 47

7.7. RELATIONS AVEC LES EAUX DE SURFACE..... 50

8. Hydrochimie et qualité des eaux 52

9. Conclusion 56

10. Bibliographie 59

Liste des illustrations

Illustration 1 : Zone de l'étude, correspondant à l'enveloppe supérieure du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes (BV : bassin versant ; BH : bassin hydrogéologique) 11

Illustration 2 : Localisation des stations de Météo-France dans les environs de la zone d'étude 16

Illustration 3 : Pluviométrie à Courbessac et La Rouvière entre 1999 et 2004, comparée à la piézométrie mesurée 18

Illustration 4 : Coordonnées des pluviomètres du BRGM 19

Illustration 5 : Localisation des pluviomètres installés par le BRGM 20

Illustration 6 : Détail du pluviomètre totalisateur 20

Illustration 7 : Détail du pluviomètre incrémenteur 21

Illustration 8 : Localisation des capteurs (pluviographes et limnigraphes) du réseau NOE - ESPADA 23

Illustration 9 : Variations limnigraphiques dans le cadereau d'Uzès durant un épisode pluvieux du printemps 24

Illustration 10 : Zone d'étude et géologie 26

Illustration 11 : Coupe géologique NW-SE au travers des Garrigues et de la plaine du Vistrenque (extrait de la carte géologique, (Menillet et Paloc, 1973).) 29

Illustration 12 : Perméabilités des principales formations des Garrigues d'après (Fabre, 1988) 31

Illustration 13 : Carte géologique simplifiée de la zone d'étude 33

Illustration 14 : Carte de localisation des phénomènes karstiques (avens, pertes, sources, grottes) dans le bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes 35

Illustration 15 : Report en surface du réseau souterrain de la Fontaine de Nîmes (d'après (Coste et Jouanen, 1996) 36

Illustration 16 : Les différents types de karst de la zone d'étude de Nîmes et l'histoire géologique (Aunay, 2000). 38

Illustration 17 : Débits ponctuels mesurés à la Fontaine de Nîmes (d'après (Fabre, 1980) 39

Illustration 18 : Résultats quantitatifs de quelques essais de traçage sur le BH de la Fontaine (M : poids de fluorescéine injectée ; Qi : débit à l'injection ; Qr : débit à la réapparition ; V : vitesse théorique ; D : distance ; h : dénivelé ; P : pente théorique ; T : temps de passage) d'après (Anonyme 1992) 40

Illustration 19 : Carte schématique du bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes (d'après (Fabre, 1987)) 41

Illustration 20 : Essais de traçages et bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes selon (Fabre, 1997) – BH : bassin hydrogéologique – BV : bassin versant 42

Illustration 21 : Ouvrages dont la piézométrie a été suivie en continu par le BRGM depuis l'été 1998 47

Illustration 22 : Localisation des quatre points du suivi piézométrique depuis 1998 47

Illustration 23 : Variations piézométriques aux quatre points de mesures 50

Liste des annexes

Annexe 1 - Tableau de localisation des pluviomètres de Météo-France situés aux environs de la zone d'étude 61

Annexe 2 - Réseau de surveillance NOE 65

Annexe 3 - Tableau de localisation des sources et phénomènes karstiques 69

Annexe 4 - Tableau de localisation des essais de traçages 73

Annexe 5 - Tableaux de localisation des puits et forages 77

1. Introduction

Dans le cadre du programme de recherche KARSTEAU (PDR04EAU01) et de la convention n° 2003.07.23 établie avec la Ville de Nîmes, le BRGM a pour objectif de caractériser la structure et le fonctionnement de l'hydrosystème karstique nîmois et l'évaluation de sa contribution à la genèse et à la propagation des crues éclair, en travaillant à deux échelles spatiales : celle de la totalité du bassin d'alimentation et celle de sites pilotes liés à un ou deux bassins versants ou sous-bassins versants de cadereaux.

L'approche spatiale à l'échelle de la totalité du bassin d'alimentation est réalisée au sein :

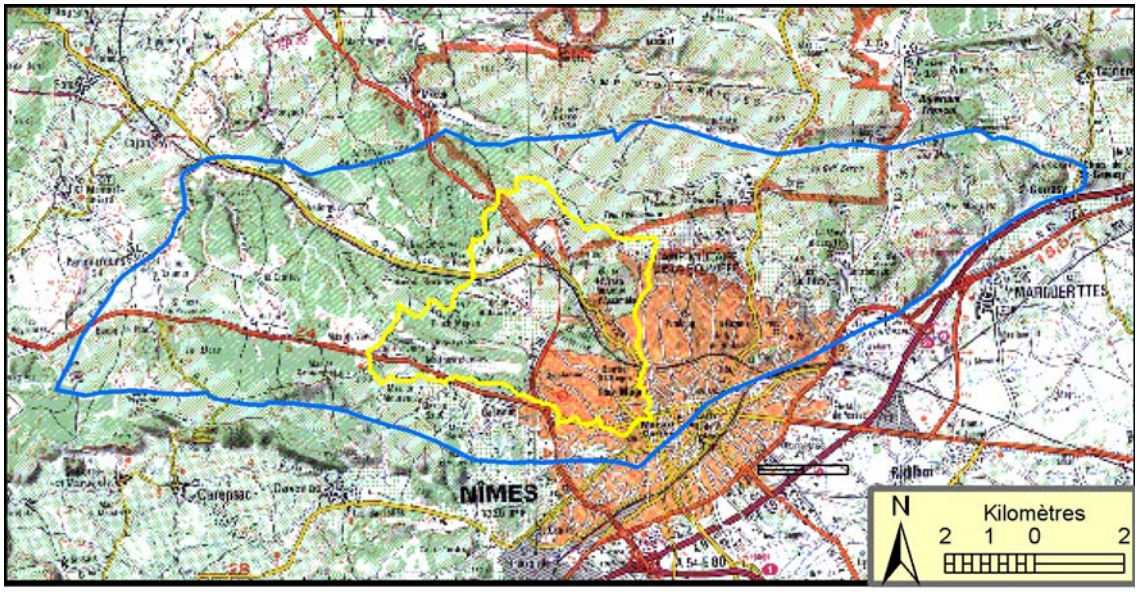
- du module 1 du projet dont l'objectif est la connaissance de la structure et du fonctionnement hydrologique du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes ;
- du module 2 du projet dont l'objectif est la connaissance du fonctionnement hydrogéologique de l'épikarst et de la zone noyée au moyen de l'acquisition de données complémentaires.

Le module 1 prévoit une synthèse des connaissances à partir des travaux antérieurs réalisés sur la zone d'étude ; elle fait l'objet de ce rapport. On examinera successivement les contextes pluviométriques, hydrographiques, géologiques et hydrogéologiques. Les données existantes sur la karstification et l'extension du bassin d'alimentation sont discutées. Un point sur l'hydrochimie des eaux souterraines dégage leurs principales caractéristiques.

Pour chaque thématique, l'accent est mis sur les points pour lesquels des hypothèses doivent encore être vérifiées et pour lesquels des données complémentaires sont nécessaires. La sélection de celles-ci est décrite dans un rapport complémentaire (Maréchal, 2004).

2. Cadre géographique

D'un point de vue géographique, l'étude est axée principalement sur le bassin d'alimentation (= bassin hydrogéologique[1]) supposé de La Fontaine de Nîmes, différent de son bassin versant[2] (Illustration 1). Etant donné que le bassin d'alimentation n'est pas exactement connu actuellement, la zone d'étude est définie par l'enveloppe supérieure du possible bassin d'alimentation et ce, de façon à être exhaustif dans les investigations menées au cours de l'étude. Il s'agit du bassin versant étendu vers l'Ouest jusqu'à la dépression de la Vaunage, vers le Nord en direction de la plaine de St-Chaptes et du Gardon, et vers l'Est en direction de Courbessac de façon à intégrer les transferts d'eau souterraine inter-bassins via notamment le réseau karstique. La problématique de la connaissance du bassin d'alimentation de la Fontaine est par ailleurs détaillée au § 7.3.



Légende

BH Fontaine de Nîmes (enveloppe supérieure)

BV Fontaine de Nîmes

Illustration 1 : Zone de l'étude, correspondant à l'enveloppe supérieure du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes (BV : bassin versant; BH :bassin hydrogéologique).

---

[1] Bassin hydrogéologique : domaine aquifère, simple ou complexe, dans lequel les eaux souterraines s'écoulent vers un même exutoire ou un groupe d'exutoires ; appelé également bassin d'alimentation, il est délimité par une ligne de partage des eaux souterraines.

[2] Bassin versant : région délimitée, drainée par un cours d'eau et ses tributaires, dont elle constitue l'aire d'alimentation.

3. Contexte géomorphologique

Les formes du relief et la répartition du réseau hydrographique, en tant qu'axes de drainage des écoulements superficiels, ou que niveaux de base des aquifères latéraux ou sous-jacents, conditionnent la présence de sources, pérennes ou temporaires, et l'extension des réservoirs aquifères.

Du point de vue orographique, il faut prendre en compte trois entités :

- **les Garrigues nîmoises,** en position de plateau moyennement ondulé, à des altitudes comprises au NW et à l'W de Nîmes entre 110 m vers Parignargues et St-Mamert, et rarement supérieures à 200 m vers le Camp des Garrigues et vers Poulx au NE,
- **le piedmont (ou piémont),** large de 2 à 4 km qui assure selon le tracé NE-SW de la faille de Nîmes, la transition entre le plateau et la plaine de la Vistrenque depuis St-Gervazy au NE jusqu'au-delà de Milhaud au SW,
- **la plaine de la Vistrenque,** dans sa partie amont, et en rive droite du Vistre qui est légèrement déclive vers le SW entre les altitudes de 50 à 60 m en amont et de 25 à 35 m en aval. Cette plaine qui correspond à un ancien chenal d'écoulement du Rhône, se situe donc en contrebas du plateau de 60 à 80 m suivant les secteurs.

Les Garrigues, qui constituent l'essentiel de la zone d'étude, doivent essentiellement leur aspect à la nature calcaire de leur sous-sol. Le relief, en particulier les « vallons » d'orientation Est-Ouest, est lié à la structure plissée des Garrigues, selon des axes plus ou moins parallèles à cette direction. Des cuestas ainsi que des escarpements faillés sont présents en tête des vallons en V ou à fond plat, ainsi que dans la partie orientale du bassin (Fabre, 1984). Deux niveaux de base relativement bas pour le massif, le Canyon du Gardon en lisière nord et la dépression de la Vistrenque, ont donné aux ruisseaux d'orientation Nord-Sud, une grande force érosive. Ainsi, les Garrigues sont fortement incisées au Sud par les « cadereaux »[3]. Du point de vue morphologique, des surfaces d'érosion ont été mises en évidence au niveau des Garrigues de Nîmes, avec une surface d'érosion à 200-210 mètres et une autre à 175-180 mètres, telles que décrites par certains auteurs (Menillet et Paloc, 1973). Fabre (1984) a établi une carte géomorphologique du Languedoc Oriental, partie Sud. La surface d'érosion fondamentale oligo-miocène est conservée ; elle apparaît sur une grande surface de la zone d'étude : il s'agit d'un aplanissement généralisé, de pente générale Nord-Sud à Nord-Ouest – Sud-Est et Nord-Est – Sud-Ouest, très polygénique ; cette surface est souvent dégradée sur les bordures et à l'intérieur des plateaux (Fabre, 1984).

[3] Cadereau : terme local désignant les vallons et vallées autour de Nîmes parcourus très temporairement par des écoulements torrentiels brusques dans leur apparition

Une carte de l'aptitude des surfaces au ruissellement et à l'infiltration est disponible (Dorfliger *et al*., 1999). Elle a été établie par une analyse multicritères portant sur les éléments de base suivants : perméabilité superficielle (définie à partir de l'occupation des sols), les pentes et les formations géologiques présentes (classées en 3 catégories). La pertinence de cette carte peut être améliorée en prenant en compte des données complémentaires comme les données pédologiques de la base des sols de l'INRA. Par ailleurs, cette analyse multicritère est un premier essai. Des tests d'infiltration complémentaires sur des sites représentatifs des différentes classes devront être effectués de façon à permettre de valider et de calibrer cette méthode.

4. Pluviométrie

4.1. GÉNÉRALITÉS

Les précipitations annuelles moyennes sur la région de Nîmes sont comprises entre 700 mm dans la plaine et 800 mm sur le plateau des Garrigues (moyenne sur 20 ans). Les isohyètes se répartissent parallèlement au talus de la faille de Nîmes, selon une orientation NE-SW. L'infléchissement de cette orientation vers le NNE-SSW en parallèle avec l'accroissement des précipitations en direction d'Alès prend en compte l'effet du relief des Cévennes et des entrées maritimes depuis le SE. Les pluies dépassent 1000 mm/an en amont d'Alès et 2000 mm au mont Aigoual.

La variabilité interannuelle des précipitations est aussi grande que la différence de répartition des pluies dans l'espace et au cours des mois d'une même année. Par exemple, la moyenne sur Nîmes pour l'année 1996 est de l'ordre de 1200 mm, soit 60 % supérieure à la moyenne interannuelle indiquée ci-dessus.

Sur la région de Nîmes jusqu'au Vidourle à l'Ouest et jusqu'au Rhône à l'Est, on dispose des données d'une quinzaine de stations de Météo France qui sont d'Ouest en Est (Illustration 2) :

- MOULEZAN, LA ROUVIERE, VIC-LE-FESC, VILLEVIEILLE, pour les secteurs de St Chaptes au NW, de la Vaunage et du Vidourle à l'Ouest,
- GALLARGUES, AIGUES-VIVES, VESTRIC, VAUVERT, GENERAC, pour la plaine de la Vistrenque,
- NÎMES-PONGE, NÎMES-COURBESSAC, REMOULINS, MEYNES, pour la zone de Nîmes et des Garrigues,
- BEAUCAIRE, ST-GILLES, BELLEGARDE et FOURQUES à l'EST et au SE.

Leurs caractéristiques sont résumées en Annexe 1.

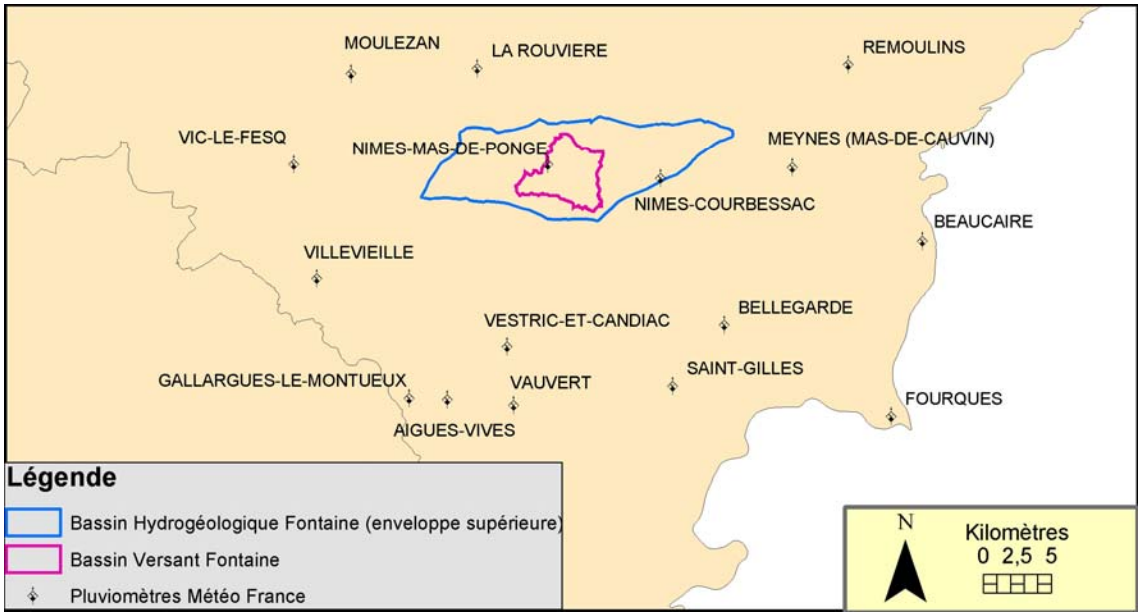


Illustration 2 : Localisation des stations de Météo-France dans les environs de la zone d'étude.

Le climat de type méditerranéen situe les pluies les plus fortes au cours de l'automne et du printemps, avec des maxima pour les mois de septembre et d'octobre. Les averses brutales et les très fortes intensités lors des orages conditionnent la violence destructrice des crues. Lors de l'épisode du 3 octobre 1988, il est tombé plus de 400 mm d'eau en moins de 4 heures sur un secteur bien localisé au Nord de la ville de Nîmes.

Les données pluviométriques des postes Météo-France de Nîmes-Courbessac, Nimes-Mas de Ponge et La Rouvière ont été retenues pour cette étude[4]. Les données sont présentées dans le graphique de l'Illustration 3. Les fluctuations piézométriques sont reprises dans le graphique : elles montrent une grande réactivité des eaux souterraines aux fortes pluies.

[4] Les données à disposition couvrent la période du 01/01/1998 au 30/09/2004.

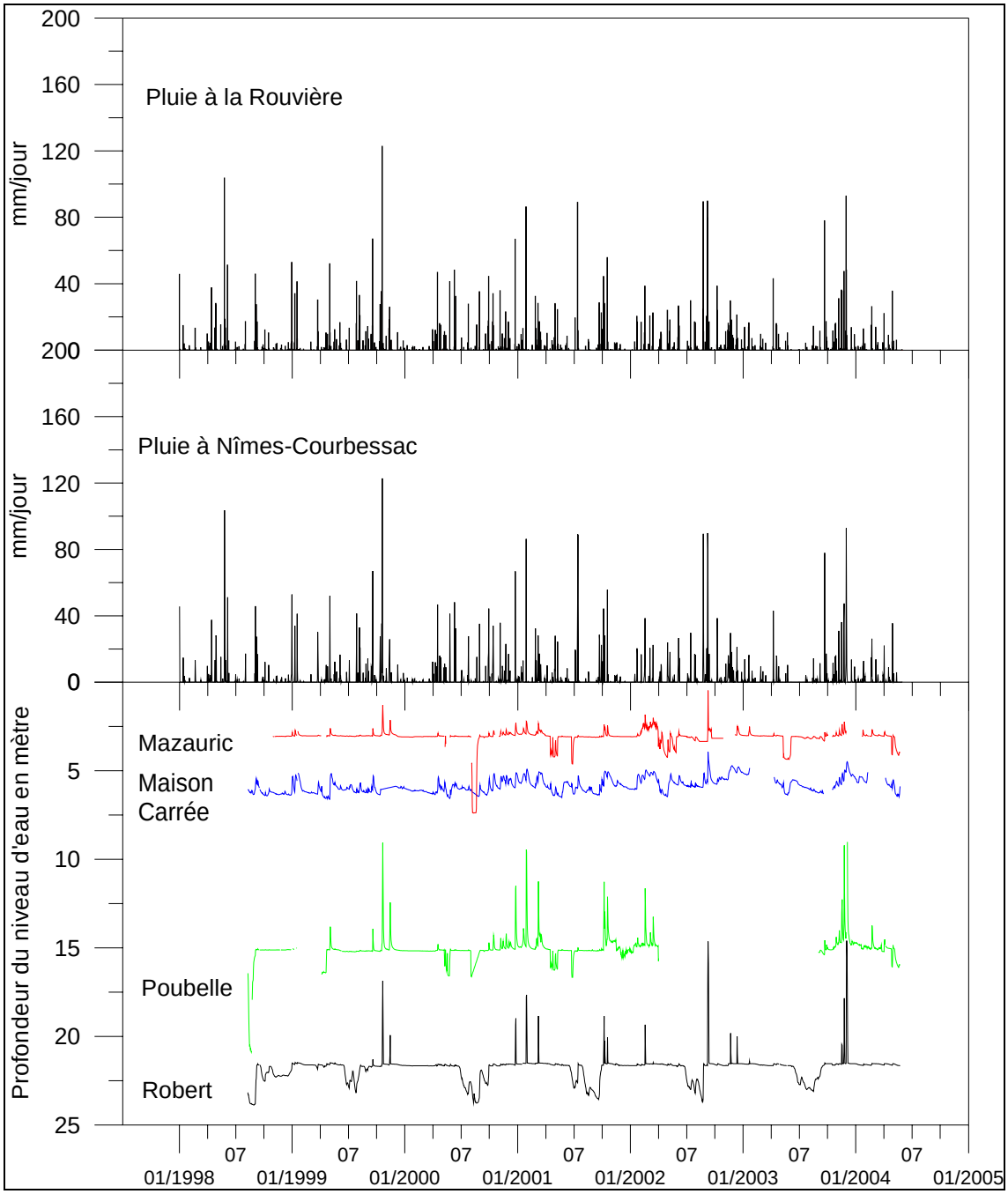


Illustration 3 : Pluviométrie à Courbessac et La Rouvière entre 1999 et 2004, comparée à la piézométrie mesurée.

4.2. MESURES COMPLÉMENTAIRES

Des mesures complémentaires ont été effectuées sur le bassin de la Ville de Nîmes de façon à prendre en compte la variabilité spatiale de la pluviométrie. Le réseau Noé, dont le suivi est assuré par les services techniques de l'agglomération nîmoise, dans le cadre du projet ESPADA, comprend, outre des limnigraphes, un certain nombre de pluviomètres (Illustration 5) dont l'acquisition des données est effectuée au pas de temps de 30 minutes.

Un réseau de pluviomètres BRGM a fonctionné entre octobre 1998 et mars 2002 (Illustration 4). Les pluviomètres sont répartis sur l'ensemble du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes (Illustration 5).

No	Nom	Sous-type	X (m) (LIII Sud)	Y (m) (LIII Sud)
PL1	Golf Camplanier	totalisateur	757475	174175
PL2	MAS des CROTTES	totalisateur	753200	175925
PL3	Mas de CABRIERES	totalisateur	768325	179375
PL4	MAS PETIT (Nîmes)	totalisateur	782000	168425
PL5	Route d'Anduze	incrémenteur	759980	175990
PL6	Rouvière	incrémenteur	764120	176980
PL7	Calmette	incrémenteur	765880	176020
PL8	Météo	incrémenteur	766350	175040

Illustration 4 : Coordonnées des pluviomètres du BRGM.

Ce réseau complémentaire avait pour objectif de suivre la qualité chimique des eaux de pluie du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Deux types de suivi ont été réalisés :

Suivi mensuel de la qualité de l'eau de pluie à l'aide de 4 pluviomètres totalisateurs de type SPIEA, modifiés pour collecter l'eau dans des bidons de grande capacité (10 litres,

- *Illustration 6*). Les analyses chimiques effectuées sur les eaux échantillonnées sont les suivantes : anions (Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-), cations (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, NH_4^+), éléments traces (bore, brome et strontium) et isotopes de l'eau (^{18}O, ^2H). Les résultats de ces analyses seront interprétés dans la suite du projet (module 2) et permettront d'évaluer la qualité de l'eau qui contribue à recharger l'aquifère karstique.
- Suivi temporel des épisodes de pluie majeurs (H >30 mm) à l'aide de 4 pluviomètres « incrémenteurs » installés au niveau de 4 sites pluviométriques du réseau Noé. Ces pluviomètres d'un type particulier (Illustration 7) permettent l'échantillonnage des eaux de pluie suivant un pas incrémenté de hauteur d'eau (pas d'échantillonnage de 7 mm de hauteur de pluie). Ce type de pluviomètre, dédié exclusivement à l'analyse des signatures isotopiques de l'eau de pluie (^{18}O, ^2H) et des teneurs en chlorures des pluies, avait pour objectif la caractérisation de la variabilité temporelle des signatures isotopiques des pluies « méditerranéennes »

(précipitation issue des masses d'air méditerranéennes et caractérisée par des hauteurs et des intensités de pluies importantes). Il est en effet connu que la signature géochimique des pluies évolue au cours des épisodes pluvieux. Aussi, le suivi détaillé de la signature des pluies est le préalable indispensable aux études qui ont pour objectif la décomposition des hydrogrammes de crues (évaluation des contributions relatives des différentes composantes d'un écoulement de surface ou souterrain). A ce jour, les échantillons collectés durant ce suivi n'ont pas fait l'objet d'analyse. Il sera procédé dans la suite du projet à l'analyse d'un épisode de pluie important échantillonné (H = 122 mm, octobre 1999) afin d'une part, d'évaluer l'amplitude des variations isotopiques que l'on peut mesurer lors des épisodes de pluie majeurs, et d'autre part, d'adapter éventuellement le protocole d'échantillonnage au vu des résultats.

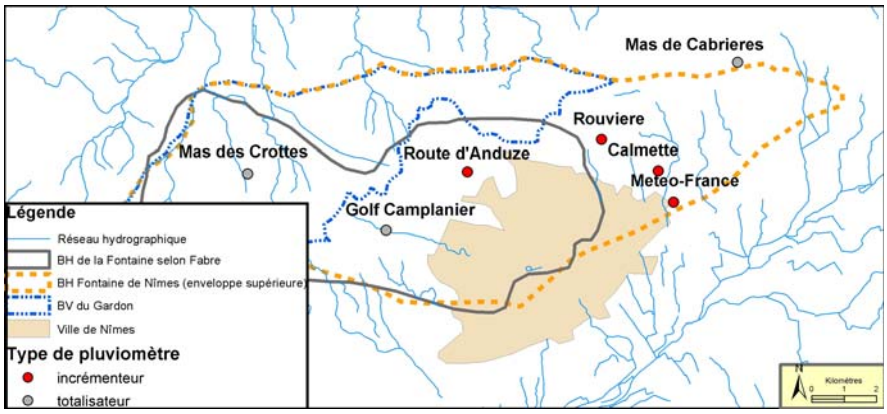


Illustration 5 : Localisation des pluviomètres installés par le BRGM .

Illustration 6 : Détail du pluviomètre totalisateur.

Illustration 7 : Détail du pluviomètre incrémenteur.

De nouvelles données sur la qualité des eaux de pluie sont nécessaires durant la période de l'étude. En conséquence, deux pluviomètres incrémenteurs seront installés dans les cadereaux d'Uzès (à Terres de Rouvière) et d'Alès (route d'Anduze).

5. Contexte hydrographique

5.1. DESCRIPTION

Les différents réseaux hydrographiques compris entre la latitude de Marguerittes à l'Est et de Parignargues à l'Ouest ont été regroupés en 5 secteurs principaux :

- un ensemble de 6 cadereaux issus du plateau des Garrigues et rejoignant directement la plaine entre Marguerittes et Courbessac, avec pour chacun des superficies modestes, inférieures à 5 km^2. Du fait de la nature du bassin versant à dominante de marnes, les cadereaux présentent un écoulement temporaire très variable ; ils sont le plus souvent à sec, et en l'absence d'émergences visibles, ils ne coulent que quelques jours par an;
- à partir du cadereau de la route d'Uzès, les cadereaux de la route d'Alès, de Camplanier, et de Valdegour transitent par la ville de Nîmes, avec des superficies de bassins versants sensiblement plus importantes. Aux apports directs par les pluies, s'ajoutent les eaux issues des aquifères karstiques du Barrémien inférieur pour une petite partie du cadereau d'Alès, et de l'Hauterivien supérieur pour une plus grande partie des calcaires ;
- encore plus vers le SW, des cadereaux temporaires issus du plateau des Garrigues évacuent directement les eaux en direction de la plaine de la Vistrenque via le tracé masqué de la faille de Nîmes ;
- en direction du NW, à partir de la route de Sommières et jusqu'à la Calmette, puis Dions, les eaux de surface des ruisseaux de Parignargues (Font St Pierre), du Valat des Crottes, de la Vallonguette, et du Goutajon, rejoignent la bordure méridionale du bassin tertiaire de St Chaptes. Il est noté dans leur partie amont des pertes en relation supposée selon les axes des plis (WNW-ESE) vers la Fontaine de Nîmes ;
- au Nord enfin, les calcaires de l'Hauterivien supérieur, puis ceux massifs du Barrémien supérieur : les calcaires à faciès Urgonien, fracturés et karstifiés, présentent des "combes" orientées par les structures plissées et faillées. Elles forment des gorges profondes pour se raccorder à la rive droite du Gardon ; ce dernier représente le niveau de base de l'aquifère karstique urgonien.

5.2. MESURES LIMNIGRAPHIQUES

Dans le cadre du projet « ESPADA », un réseau de surveillance des cadereaux a été installé. Ce réseau, nommé NOE, est composé de neuf limnigraphes, sept pluviographes et une station couplée limnigraphe + pluviographe (Annexe). Ils sont essentiellement localisés (Illustration 8) sur les cadereaux qui traversent la ville de Nîmes, à savoir les cadereaux d'Uzès, Alès, Vistre de la Fontaine, Camplanier et Valdegour. Des mesures sont également effectuées sur les cadereaux de Valladas et Pondre.

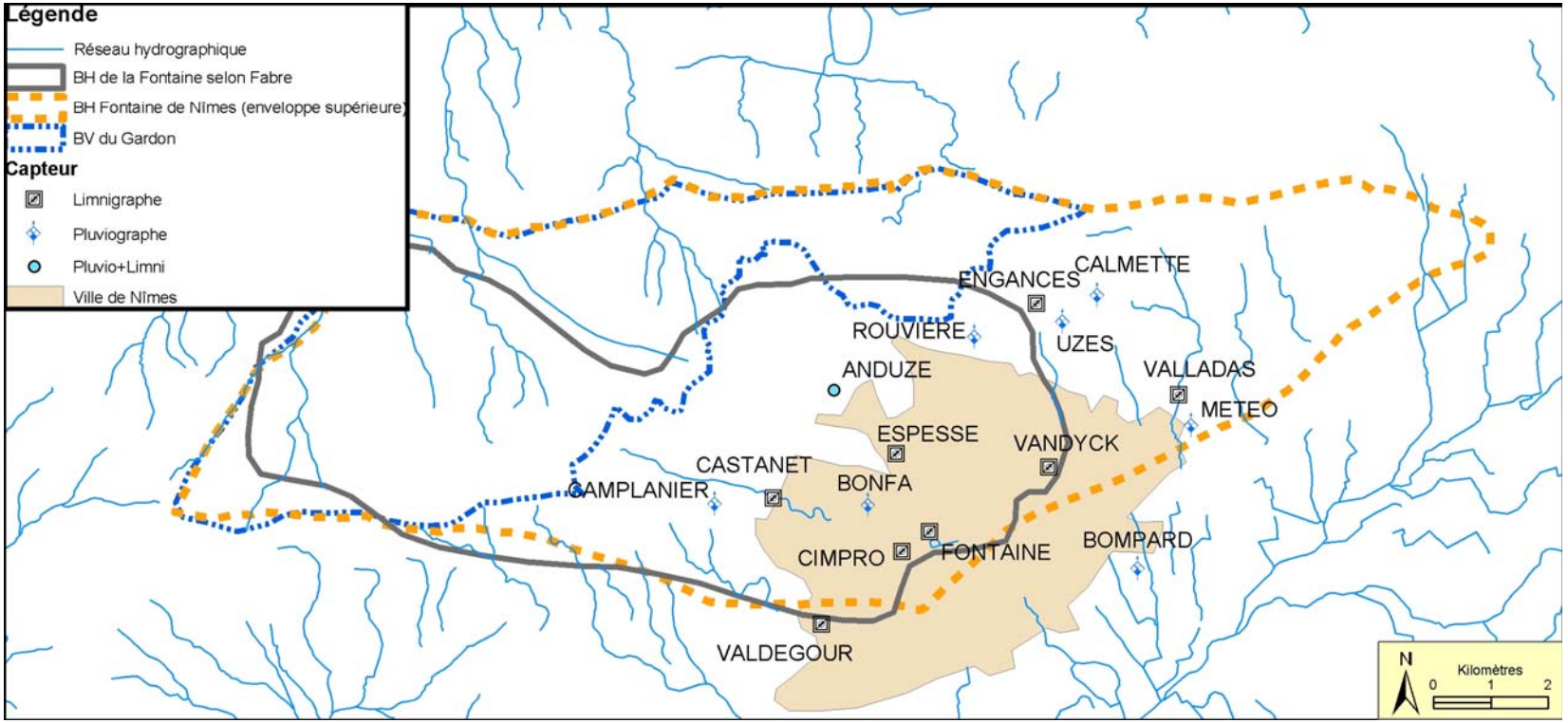


Illustration 8 : Localisation des capteurs (pluviographes et limnigraphes) du réseau NOE – ESPADA.

L'Illustration 9 présente l'évolution du niveau d'eau lors d'un épisode pluvieux en avril 2000 dans le cadereau d'Uzès. On constate que le cadereau réagit très brusquement et fortement au niveau du pont Vandyck. Les écoulements y sont par ailleurs brefs. Cette rapidité des écoulements est attribuée à la forte proportion de zones urbanisées dans le bassin à cet exutoire. Plus en amont, à Engances, la réaction est de nature plus douce avec une montée progressive et une récession plus lente. Ceci peut être dû à la contribution des eaux souterraines au débit du cadereau à l 'amont de cette station de mesures. A l'inverse, durant la récession, la présence d'écoulements à Engance en l'absence d'écoulement à Vandyck suggère une infiltration des eaux dans le cadereau entre Engances et Vandyck. Le même type d'observation a été constaté sur le cadereau d'Alès avec l'existence de pertes supposées entre la Route d'Anduze et Eau Bouillie (Espesse). Pour mémoire, on rappellera que les jaugeages des eaux rejetées dans le cadereau d'Alès durant le pompage du réseau karstique de la Fontaine a démontré l'absence de perte dans le cadereau en aval du puits Poubelle (Dorfliger *et al*., 1999). Ces observations suggèrent des relations entre les eaux des cadereaux et les eaux souterraines qu'il conviendra de préciser au cours de l'étude (voir également § 7.7 au sujet des relations eaux souterraines – eaux de surface) au moyen, notamment, de comparaisons entre la réponse des eaux souterraines et celle des eaux de surface dans les cadereaux durant les épisodes de crue.

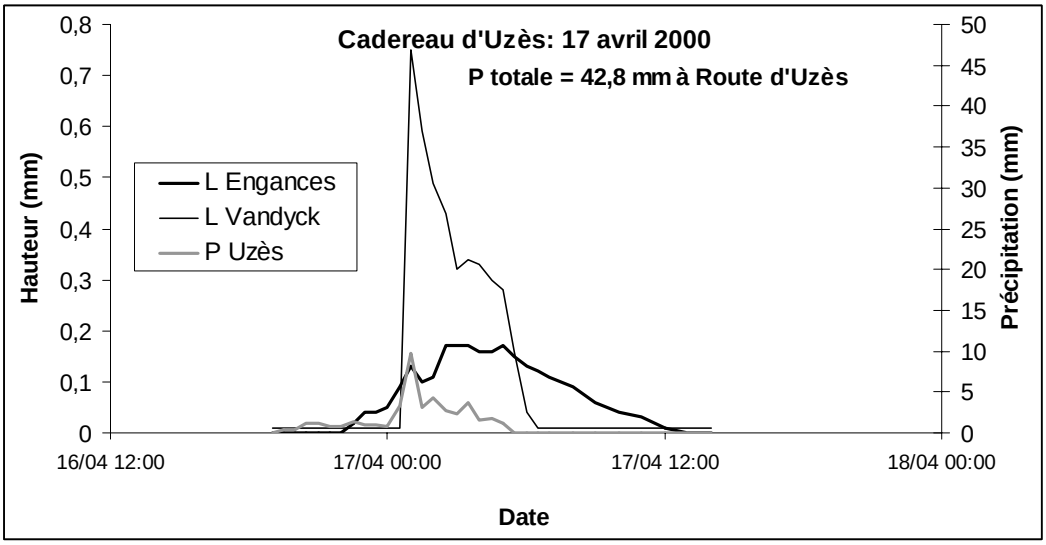
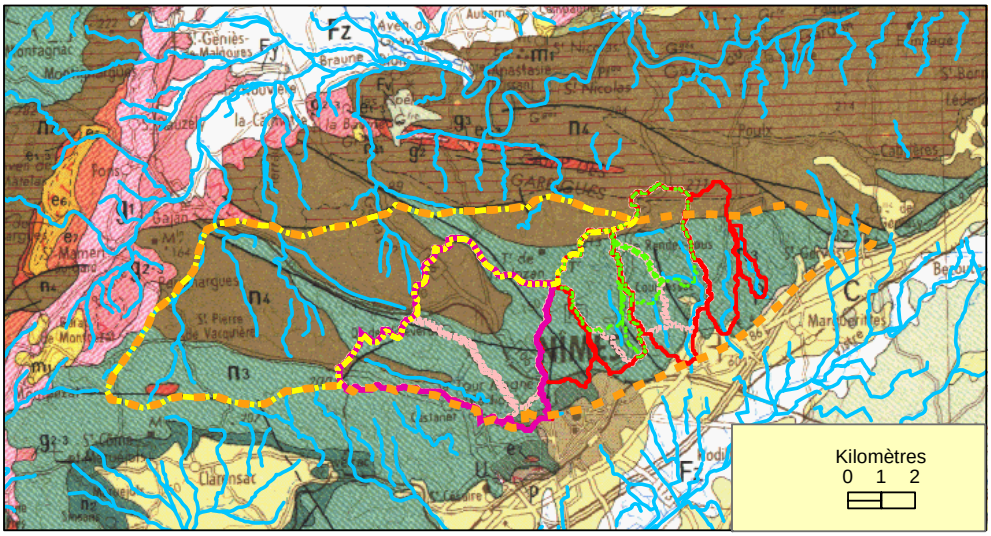


Illustration 9 : Variations limnigraphiques dans le cadereau d'Uzès durant un épisode pluvieux du printemps.

6. Contexte géologique

Les formations géologiques qui composent l'ossature dominante des entités décrites ci-dessus, sont, pour la partie des Garrigues, les formations calcaires de l'Hauterivien et du Barrémien ; et, pour la partie de la plaine de la Vistrenque, les cailloutis du Villafranchien d'âge Plio-Quaternaire, le plus souvent surmontés de limons récents. Ces derniers masquent les étages sableux et argileux du Mio-Pliocène (Illustration 10).

Sur les talus correspondants au paléorelief de la faille normale de Nîmes, dont le compartiment SE est abaissé, les limons et les débris calcaires, ou parfois les placages de loess, masquent le contact entre les formations du Crétacé et du Mio-Pliocène. Ce sont des formations superficielles non alluviales à dominante de cailloutis anguleux calcaires parfois cimentés, d'autant plus accumulés qu'ils se trouvent au débouché des vallons ou cadereaux venant des collines voisines.



Enveloppe possible du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nïmes

Illustration 10 : Zone d'étude et géologie.

D'un point de vue tectonique, les principales directions sont les suivantes :

- direction SW-NE, avec l'accident majeur de la faille de Nîmes (au moins 800 m de rejet) ;
- direction NW-SE, avec la faille Mont Lozère - Cap Couronne.

La direction Est-Ouest « pyrénéenne » est représentée par la structure plissée des Garrigues. La direction Nord-Sud « rhodanienne » n'apparaît pas nettement.

Dans les Garrigues, les formations d'âge crétacé sont ondulées, selon des plis d'axe Est-Ouest. Ceux-ci, de dimensions réduites à proximité de Nîmes, sont plus importants avec un rayon de courbure plus réduit, au Nord de la zone d'étude. La coupe géologique (Illustration 11) d'orientation approximative NW-SE montre la juxtaposition de deux styles tectoniques différents de part et d'autre de la faille de Nîmes. La zone d'étude est principalement localisée sur l'anticlinal qui affecte les calcaires de l'Hauterivien, séparé du grand synclinal du Camp des Garrigues par une série de formations calcaires argileuses et marneuses du Barrémien inférieur.

Une étude géologique détaillée par des levers de terrain complémentaires et la réalisation de deux ou trois coupes sériées représentatives du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes seront effectuées au cours du module 2 du projet.

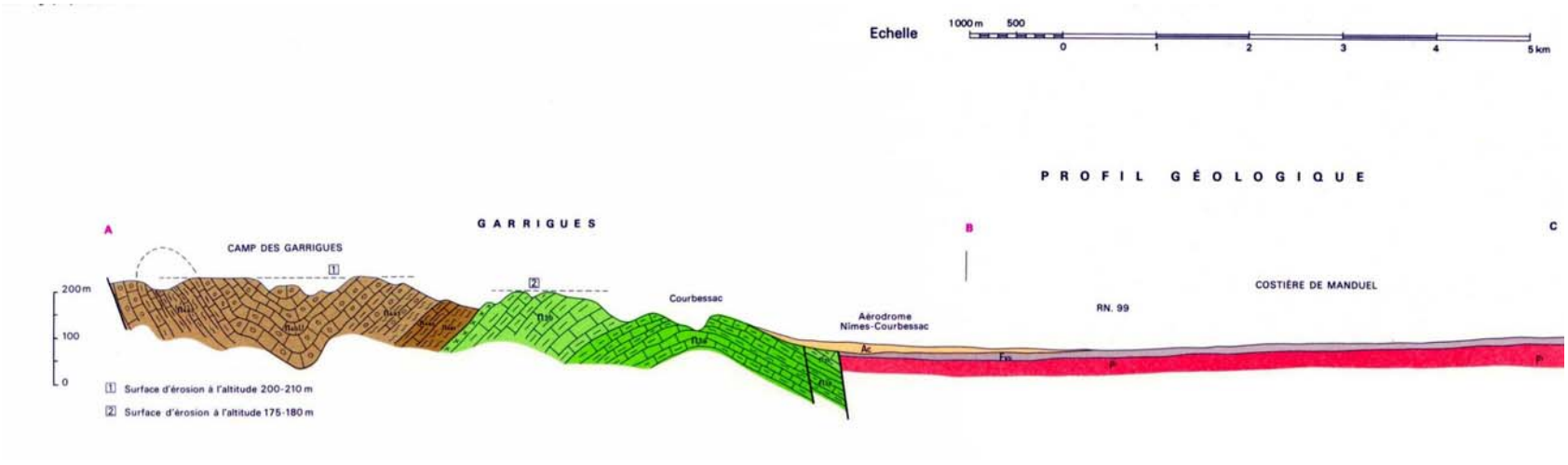

Echelle
1000 m
500
0
1
2
3
4
5 km
PROFIL GÉOLOGIQUE
A
GARRIGUES
B
C
CAMP DES GARRIGUES
Courbessac
Aérodrome
Nîmes-Courbessac
RN. 99
COSTIÈRE DE MANDUEL
200 m
100
0
1 Surface d'érosion à l'altitude 200-210 m
2 Surface d'érosion à l'altitude 175-180 m

Illustration 11 : Coupe géologique NW-SE au travers des Garrigues et de la plaine du Vistrenque (extrait de la carte géologique, (Menillet et Paloc, 1973)).

7. Contexte hydrogéologique

7.1. LES FORMATIONS GÉOLOGIQUES AQUIFÈRES

A partir de la description lithologique et géologique, deux ensembles aquifères sont ici juxtaposés et pour partie en liaison au travers de la faille de Nîmes : au N et au NW avec extension vers le SW, ce sont les systèmes karstiques des Garrigues de Nîmes, à l'Est et au Sud, c'est la nappe alluviale de la plaine de la Vistrenque dont l'extension est continue dans la dépression, marquée par un écoulement général du NE vers le SW.

7.1.1. Systèmes karstiques des Garrigues

Les systèmes karstiques des Garrigues nîmoises comprennent deux horizons susceptibles d'être aquifères, assez bien isolés, mais tant l'un que l'autre très compartimentés.

Le plus élevé est représenté par les formations **calcaires du Barrémien supérieur à faciès urgonien (n4b** sur la carte géologique de l'Illustration 13). Il s'étend au Nord des Garrigues et se retrouve drainé par le Gardon en contribuant à l'alimentation des grosses sources reconnues en rive droite. Pratiquement inutilisé, ce réservoir peut receler des réserves en eaux importantes au-dessous de la ligne d'écoulement de la rivière. Son exploitation a été envisagée au moyen de forages autour de la résurgence des Fregeires (Poul, 1976). Entre le secteur amont où on note des pertes (vers Dions) et l'absence d'écoulements aériens, et le secteur aval des sources principales, en amont du Pont du Gard et de Collias, des relations par traçages dans ce réservoir ont démontré les écoulements karstiques tous dirigés vers le Gardon (voir § 7.3 pour les essais de traçage).

Le second est constitué par les **calcaires de l'Hauterivien supérieur (n3b)**, moins karstifiés que les précédents. L'extension de ce réservoir dépasse au moins vers l'Ouest (vers Parignargues) la limite du bassin versant superficiel de la Fontaine, y incluant des communications possibles avec les calcaires barutéliens (n4a2/n4aB - base de l'Urgonien). Ce karst alimente quelques sources pérennes ou temporaires, toutes situées dans la partie méridionale des Garrigues. Leur débit n'est élevé que lors des épisodes de crues. La plus importante des sources karstiques est la Fontaine de Nîmes dont les débits d'étiage sont limités entre 20 et 30 l/s. C'est ce second ensemble de formations calcaires et marneuses qui fait l'objet de cette étude.

Ces deux horizons calcaires sont isolés par les **calcaires argileux et marnes du Barrémien inférieur (n4a1/n4aM)** qui jouent probablement un rôle important dans la délimitation du bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes.

Les **marnes et les calcaires argileux de l'Hauterivien inférieur (n3a)** ne favorisent pas l'infiltration des eaux mais jouent plutôt le rôle de mur imperméable pour l'Hauterivien supérieur.

Les perméabilités des formations majeures constituant les systèmes karstiques des Garrigues sont présentées au Illustration 12 d'après (Fabre, 1988).

Etage	Lithologie	Perméabilité K (m/s)
Barrémien inférieur	Marnes beiges	$K \sim 10^{-10}$
Hauterivien supérieur	Calcaires argilo-gréseux avec intercalations marneuses	$10^{-4} < K < 5 \times 10^{-3}$
Hauterivien inférieur	Marnes feuilletées avec interlits de calcaires argileux	$5 \times 10^{-8} < K < 8 \times 10^{-5}$

Illustration 12 : Perméabilités des principales formations des Garrigues d'après (Fabre, 1988).

7.1.2. Plaine de la Vistrenque

Les **argiles du Pliocène inférieur (P1)** à faciès plaisancien sont imperméables, elles jouent le rôle de toit imperméable pour les calcaires de l'Hauterivien supérieur et maintiennent la nappe karstique en charge dans l'ensemble de la zone fortement urbanisée de la ville de Nîmes. Les argiles du Pliocène inférieur constituent le mur imperméable des cailloutis du Villafranchien et des sables de l'Astien dans le même secteur.

Le **Pliocène supérieur à faciès sableux de l'Astien (P2b)** renferme une nappe phréatique à perméabilité d'interstices aux caractéristiques hydrogéologiques modestes. Selon (Fabre, 1988), les sables du Pliocène supérieur permettent localement une relation entre les nappes phréatiques des cailloutis du Villafranchien et les éboulis de piedmont et karst de l'Hauterivien supérieur dans les secteurs est (Nîmes – Courbessac) et ouest (zone industrielle de Saint-Césaire). Cependant, le plus souvent dans le centre de la ville, comme le prouve de nombreux sondages, les nappes aquifères à perméabilité d'interstices seraient isolées du karst par un niveau argileux imperméable du Plaisancien (Fabre, 1988).

Les **cailloutis du Villafranchien (Fvb)** occupent l'ensemble du sous-sol de la Vistrenque et une partie de celui de la ville de Nîmes. La nappe aquifère des cailloutis est maintenue en charge par un toit imperméable constitué par les limons gris de la Vistrenque et par le bas des éboulis de pente qui ont une matrice très argileuse ((Fabre, 1988)). Selon le même auteur, les niveaux piézométriques dans cet aquifère n'ont pas fluctué durant la crue d'octobre 1988, ce qui suggère qu'il n'est pas en relation avec les nappes des éboulis de pente et du karst de l'Hauterivien supérieur dans la ville de Nîmes.

Les **éboulis de piedmont (AC)** occupent la partie sud de la garrigue nîmoise. L'épaisseur de cette formation varie de 20 mètres maximum à proximité de la garrigue à quelques mètres au sud. Cette formation a un mur argileux imperméable qui isole ces aquifères de la nappe des cailloutis villafranchiens. Ce phénomène a été confirmé lors des inondations du 3 octobre 1988 ; en effet, alors que la nappe des éboulis de pente était en charge maximum, la nappe des cailloutis du Villafranchien est restée à son niveau piézométrique normal durant cette période (Fabre, 1988).

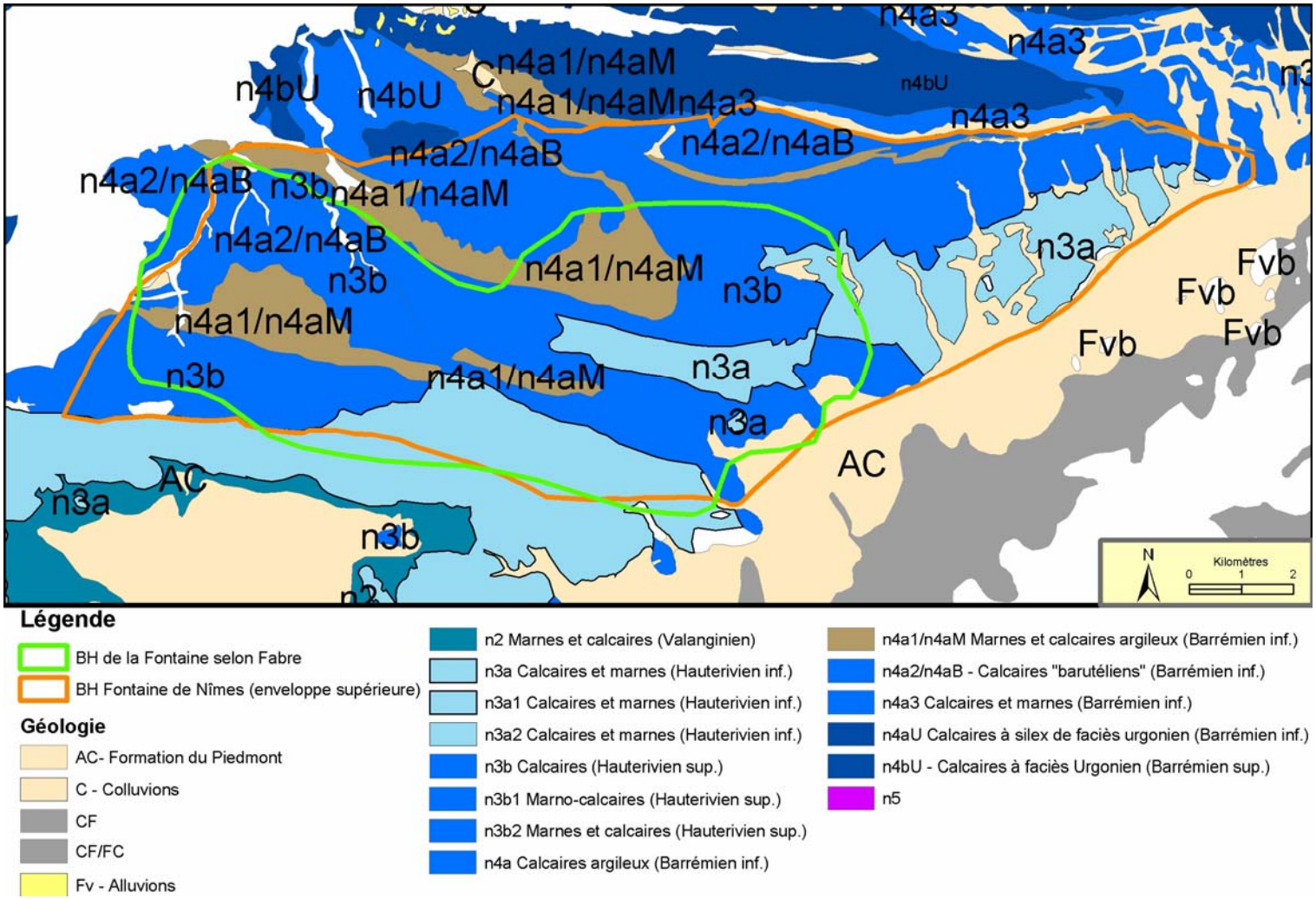


Illustration 13 : Carte géologique simplifiée de la zone d'étude.

7.2. PHÉNOMÈNES KARSTIQUES ET KARSTIFICATION

Du point de vue karstification, à l'échelle régionale, (Marcelin, 1926) oppose la « Garrigue rocheuse », au Nord, établie sur les calcaires de faciès urgonien, à la garrigue marno-calcaire, au Sud, établie sur les calcaires et marnes de l'hauterivien et du Barrémien inférieur. Les formes karstiques sont plus développées dans la garrigue rocheuse, surtout à proximité du Canyon du Gardon ; les plus caractéristiques sont des avens, quelques poljés et quelques lapiez. Les dolines à formes caractéristiques sont rares. Quelques réseaux souterrains existent à proximité du Canyon du Gardon ; au Sud, le seul réseau connu est celui qui alimente la Fontaine.

Les phénomènes karstiques (avens, grottes, pertes d'eau et sources) relevés dans la garrigue marno-calcaire constituant le bassin d'alimentation de la Fontaine sont présentés à l'Illustration 14 et Annexe . On constate la présence de nombreux phénomènes karstiques le long du synclinal de Vacqueyrolles en direction ONO par rapport à la Fontaine, dans les calcaires de l'Hauterivien supérieur. Ceci témoigne de la karstification des écoulements au sein de cette structure géologique qui est drainée, dans sa partie avale, par le réseau karstique ouest de la Fontaine. A l'échelle régionale, on constate que les sources se localisent préférentiellement au sein des formations marneuses soit de l'Hauterivien inférieur, soit du Barrémien inférieur, et dans les calcaires de l'Hauterivien supérieur à l'amont du contact avec les formations marneuses. Ceci suggère le rôle majeur des marnes en tant que mur d'aquifère, dans la résurgence des eaux souterraines de la zone des Garrigues. Les autres phénomènes karstiques tels qu'avens, pertes et grottes se situent préférentiellement au sein des calcaires de l'Hauterivien supérieur. L'influence de la lithologie et du contexte structural sur la karstification dans la région a été discutée par (Fabre, 1976a).

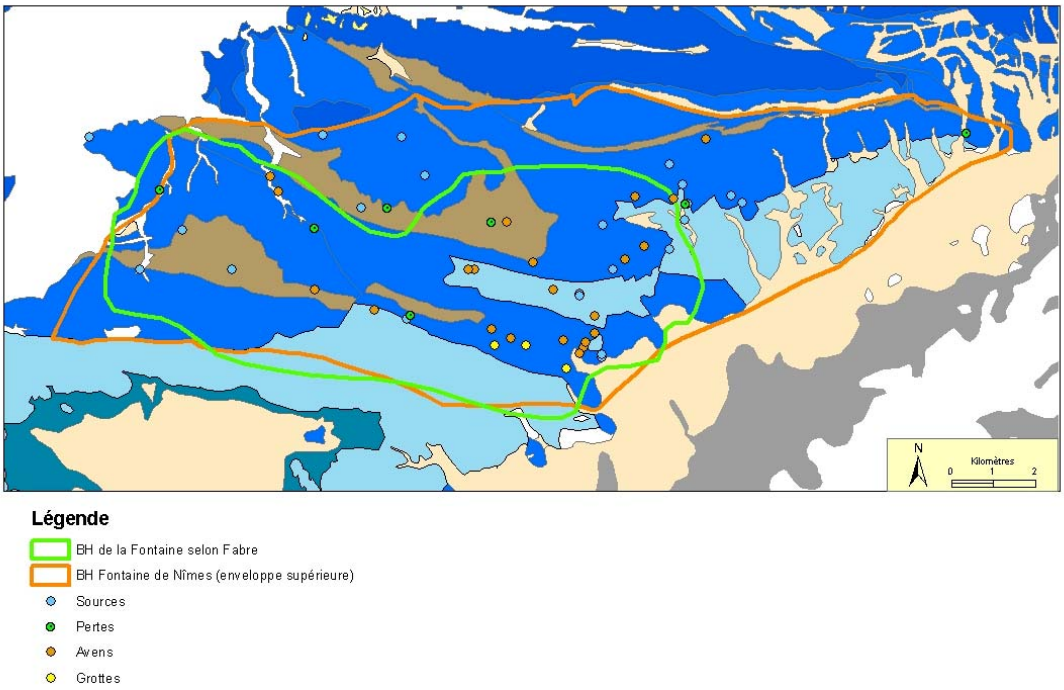


Illustration 14 : Carte de localisation des phénomènes karstiques (avens, pertes, sources, grottes) dans le bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes.

Les émergences de Mas de Ponge, Mas de Tinel et Fonbespierre ont été décrites par les spéléologues (Anonyme, 1971). Pour un inventaire hydrospéléologique très complet du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes, on se réfèrera à (Fabre, 1976b).

Le réseau karstique pénétrable situé directement à l'amont de la Fontaine a été cartographié au travers de nombreuses expéditions Nemausa[5] I à XII. La cartographie du réseau à fin 1996 est la suivante (Illustration 15) d'après (Coste et Jouanen, 1996). Deux branches pénétrables sont identifiées : l'une en direction de l'ouest (« branche ouest » sur l'illustration) et l'autre en direction du nord (« branche nord »).

Le réseau souterrain drainé par la Fontaine de Nîmes est, a priori, important ; il s'étend vers la route d'Alès jusqu'à la perte de Granon environ et vers la route de Sauve dans le synclinal de Vacqueyrolles jusqu'à la perte du ruisseau Font Saint Pierre au Nord de Parignargues. Selon (Fabre, 1988), les réseaux superficiels des cadereaux de la Route d'Alès et de Camplanier sont d'ailleurs calés en grande partie sur le réseau karstique souterrain de la Fontaine ; ces derniers sont d'ailleurs en relation avec le réseau souterrain ; en effet, les pluies importantes qui tombent sur les bassins versants des cadereaux de la Route d'Alès et de Camplanier déclenchent systématiquement une

[5] Nemausa est l'appellation donnée aux expéditions entreprises à la Fontaine de Nîmes

crue de la Fontaine de Nîmes (Fabre, 1988). Durant cette étude, il sera intéressant de caractériser les réponses aux crues des deux branches de la Fontaine par l'étude des chroniques piézométriques qui seront acquises dans le cadre du réseau suivi des eaux souterraines mis en place dans le cadre du projet.

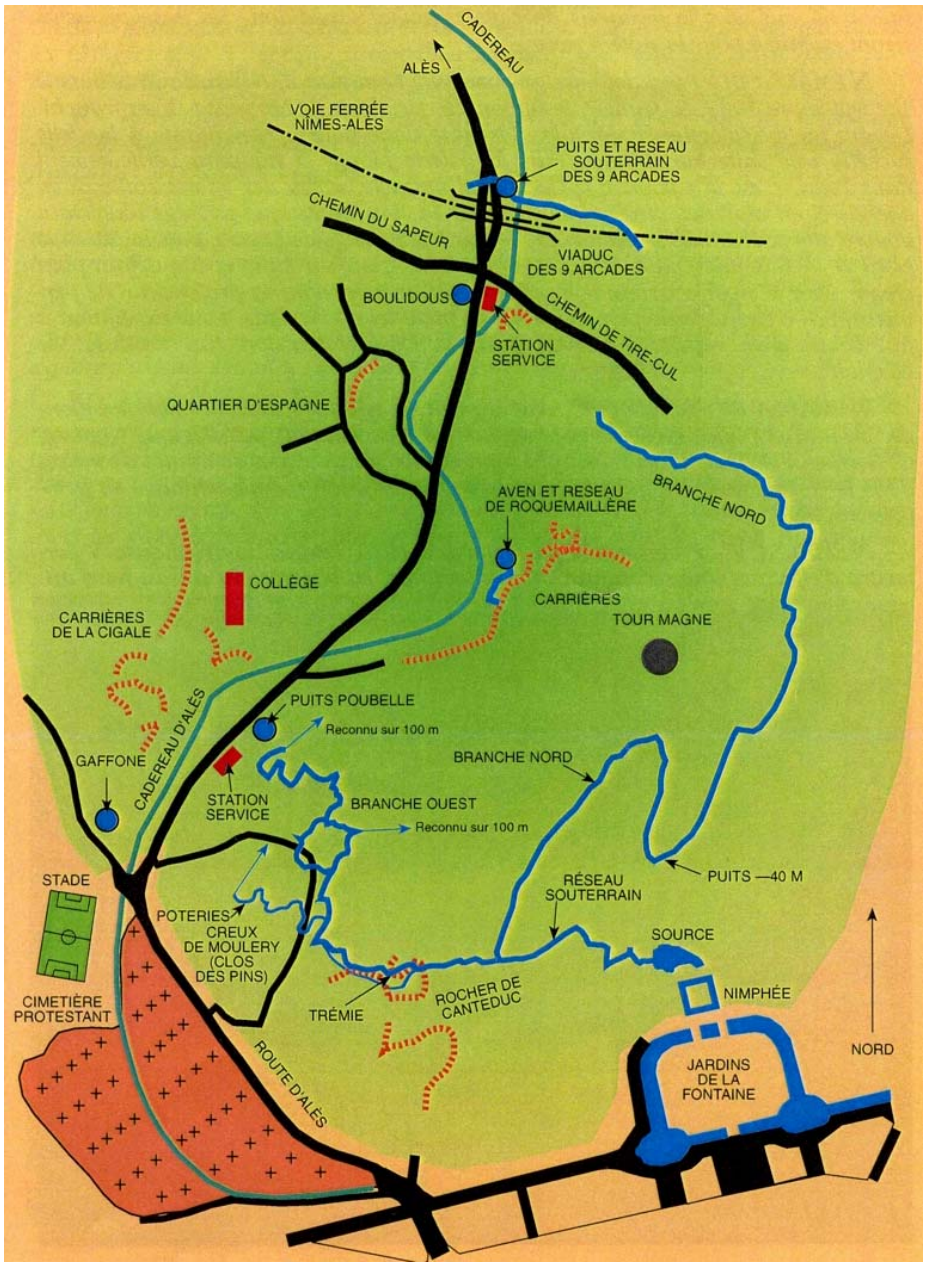


Illustration 15 : Report en surface du réseau souterrain de la Fontaine de Nîmes (d'après Coste et Jouanen, 1996).

Les phénomènes associés au fonctionnement d'un karst polyphasé (remplissage – érosion) sont complexes, peu étudiés mais nécessaires pour comprendre le

fonctionnement actuel de la Fontaine de Nîmes. Une cartographie des paléosurface, cartographie des pentes comprises entre 0 et 3 % à partir du Modèle numérique de Terrain (MNT) a été réalisée par Aunay (2000). Les pentes supérieures à 3%, non situées sur un plateau ainsi que non situées sur un substratum adéquat ont été éliminées. Un substrat récent ou marneux n'est pas compatible avec une paléosurface. Le substrat rencontré dans les Garrigues de Nîmes est calcaire d'âge Crétacé inférieur. Différentes représentations des paléosurfaces sur fonds IGN et sur fonds géologique ont été effectuées. Après vérification sur le terrain, deux paléosurfaces ont été distinguées : (i) une paléosurface recouverte de terra rossa, au nord de Poulx et de Cabrières et (ii) une deuxième surface localisée dans « Le Bois » situé entre Parignarguqes et Clarensac ; cette surface est recouverte d'altérites jaune-orangées (ocres), caractéristiques du climat méditerranéen. La surface à Terra rossa avoisine les plus hautes altitudes des Garrigues ; c'est une surface ancienne qui « fonctionne » depuis le Crétacé moyen, c'est-à-dire depuis l'émersion de l'isthme durancien (Aunay, 2000).

Les documents cartographiques de cette étude ont été intégrées dans la base de données du projet : MNT au pas de 50mx50m, carte des paléosurfaces, localisation des paléokarsts (47 affleurements). Six familles de paléokarsts ont été différentiées : (i) karst à encroûtements ferrugineux, (ii) karst à terra rossa, (iii) karst à argiles marmorisées, (iv) karst à argile rutilante, (v) karst à conglomérat et (vi) Karst du gisement de Nîmes/Karst à silt et sables carbonatés (Illustration 16) Cependant, certaines corrélations entre l'histoire géologique et le karst de Nîmes demeurent hypothétiques. Le karst fonctionne depuis 120 MA, du Crétacé moyen à l'époque actuelle. Certains secteurs du karst sont fossilisés et ne fonctionnent plus tandis que d'autres zones sont actives.

Age	Phénomène géologique	Niveau marin (mètre)	Fonctionnement des karsts
Holocène	Transgression flandrienne	+2	Karst à encroûtements ferrugineux ↕
Pléistocène	Glaciation	-150	Karst à Terra rossa ↓
Pliocène		+80	
Miocène sup.	Domaine fluviatile		Karst à argile rutilante ↕
Miocène inf.		+150	
Oligocène	Distension alpine		Karst à argiles marmorisées ↕
Eocène	Compression pyrénéenne		
Paléocène			Karst à conglomérats ↕
Crétacé sup.	Emersion de l'isthme durancien (albien/aptien)	+200/220	
Crétacé inf.	Fin de la sédimentation des carbonates		Karst du gisement de Nîmes / Karst à silt et sables carbonatés ↕

Illustration 16 : Les différents types de karst de la zone d'étude de Nîmes et l'histoire géologique (Aunay, 2000).

Cette description du karst permettra dans une étape suivante d'estimer l'ordre de grandeur du développement de la karstification en profondeur. Cette donnée est naturellement fortement liée à la ressource en eau disponible sur les massifs calcaires au nord de Nîmes. La méthodologie qui pourrait être mise en œuvre s'inspirera de l'expérience acquise sur l'étude du massif des Corbières. En particulier, il faudra envisager l'extension de l'étude à la partie sédimentaire (plaine de la Vistrenque) en replaçant l'évolution de la karstification dans un contexte de bassin sédimentaire et dans son contexte tectonique structural au cours des âges géologiques, afin de déterminer le potentiel théorique de karsitfication et repérer la position de paléoréseaux (non visibles en surface dans les massifs).

7.3. LA FONTAINE DE NÎMES ET SON BASSIN D'ALIMENTATION

La source sourd dans une vasque aménagée définitivement aux XVIIe et XVIIIe siècles. Profonde de 10 m, elle est barrée à l'aval par un batardeau (51,11 m NGF) à côté duquel est fixée, depuis plus de 50 ans, une échelle limnimétrique (Fabre, 1980). Aucune longue série de mesures précises de débits n'a été enregistrée à ce jour sur cette source pérenne. Les valeurs présentées ci-après citées par (Fabre, 1980) sont toutes ponctuelles et dues à plusieurs auteurs (Illustration 17).

Auteur	Année	Q minimum	Q moyen	Q maximum
B. Valz	1882	13,3 l/s	-	12-20 m^3/s
J. Teissier	moyenne	22,2 l/s	-	-
E. Dumas	moyenne	32,32 l/s	51,98 l/s	-
A. Torcapel (1894)	moyenne	-	50 l/s	-
R. Courtot	27-28/11/1894			6,5 à 25,8 m^3/s
Nemausa	Août-octobre 1977	12 l/s	50 l/s	18 m^3/s

Illustration 17 : Débits ponctuels mesurés à la Fontaine de Nîmes (d'après Fabre, 1980).

C'est une source très variable avec un rapport Qmax/Qmin très élevé, supérieur à 2000 d'après les quelques jaugeages disponibles. Les crues interviennent généralement et brutalement de septembre à mars-avril ; la période de récession s'étend d'avril à septembre.

Au stade actuel des connaissances, le bassin d'alimentation de la fontaine de Nîmes a été défini par (Fabre, 1997) d'après les essais de traçage. Les résultats de ces derniers sont résumés en Annexe . Ce bassin s'étend sur les bassins versants topographiques des cours d'eau du Gard et de la Vistre (Illustration 19). Les traçages ont été effectués, sur le plan géologique, dans les terrains fissurés, inégalement karstifiés, de faciès calcaro-marneux et d'age barrémien inférieur et hauterivien.

Il est possible de distinguer deux types de traçages correspondant aux deux systèmes hydrogéologiques reconnus précédemment (Illustration 20) : au sud, les traçages qui ressortent à la Fontaine de Nîmes et dans son bassin versant ; au nord, les traçages dont les résurgences sont situées dans le bassin du Gard. Il apparaît que les écoulements karstiques souterrains sont clairement distincts des écoulements de surface avec en particulier un drainage vers le sud de bassins versants dont les ruissellements de surface s'écoulent vers le nord pour alimenter le Gardon (Illustration 20). Les traçages, comme l'indique l'Illustration 20, suggèrent une extension du bassin vers l'Ouest jusqu'aux pertes de la source de Parrignargues et de la Font de Saint-Pierre. Dans la partie septentrionale, la perte de Mangeloup et l'aven de Paulin sont drainés vers le bassin du Gard en direction du Nord et constituent dès lors l'extrême limite nord du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Le contour tracé par Fabre (1997) correspond à une limite topographique qui peut être différente de la crête

piézométrique inconnue à ce jour. De plus, la mise en évidence d'une crête piézomètrique en milieu karstique, hétérogène, peut s'avérer difficile voire impossible ; les limites du bassin peuvent être fluctuantes de plus en fonction des conditions hydrologiques.

Ce bassin d'alimentation comprend le vallon de Vaqueyroles qui se trouve légèrement au N-O de la ville, qui est considéré par certains auteurs ((Nejad Hachemi, 1968)) comme une principale zone d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Il est formé par un synclinal des calcaires compacts de l'Hauterivien supérieur dont un lambeau de calcaire très marneux du Barrémien inférieur est resté pincé au milieu. Selon (Nejad Hachemi, 1968), le substratum marno-calcaire ayant constitué le niveau de base karstique, les eaux infiltrées ont développé un réseau souterrain qui suit l'axe du synclinal incliné vers Nîmes et débouche au travers de la branche ouest de la Fontaine située dans le prolongement de cet axe.

Le flanc méridional de l'anticlinal du Mas Calvas où le pendage général des assises favorise l'écoulement vers Nîmes, fournirait une autre partie de l'eau à la Fontaine (Nejad Hachemi, 1968), par exemple au travers de la branche nord du réseau.

Des hypothèses sur les axes d'écoulements dans le bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes sont formulées par (Fabre, 1987) en Illustration 19.

Des informations plus quantitatives sont disponibles pour certains des traçages effectués (Illustration 18). Elles mettent en évidence des vitesses d'écoulement très variables entre 1 et 100 m/h.

Lieu injection	Auteur	Date	M (kg)	Qi (l/s)	Lieu réapparition	Qr (l/s)	V (m/h)	D (km)	H (m)	P (%)	T (j)
Aven km 7	A. Bonnet	9/1950		0,3	Vaqueyroles		18	0,8	5	0,6	2
Vaqueyroles	ASN-BRGM	30/11/1966	5	0,1	F. de Nîmes	100	7,6	4,7	74	1,6	26
Rau St-Pierre	BRGM	8/12/1967	5	2	F. de Nîmes		1,2	11	8	0,9	31
					Parignargues	2	0,6	1,1	10	0,9	80
Parignargues					F. de Nîmes			11	73	0,6	16
Lauzières	G. Fabre	18/5/1978	10	112	F. de Nîmes	750	92	7,8	91	1,2	3,5

Illustration 18 : Résultats quantitatifs de quelques essais de traçage sur le BH de la Fontaine (M : poids de fluorescéine injectée ; Qi : débit à l'injection ; Qr : débit à la réapparition ; V : vitesse théorique ; D : distance ; h : dénivelé ; P : pente théorique ; T : temps de passage) d'après (Anonyme 1992).

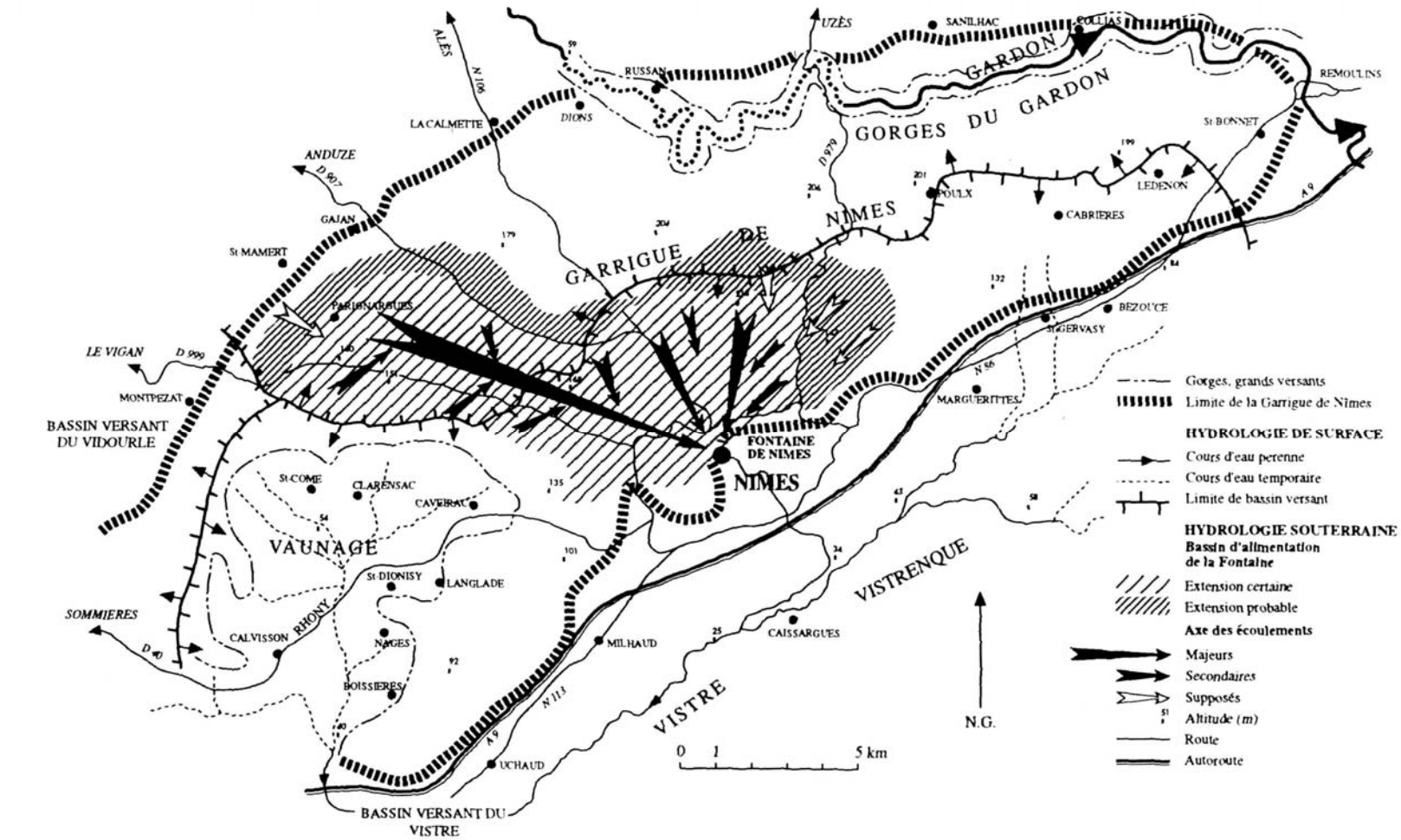


Illustration 19 : Carte schématique du bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes d'après (Fabre, 1987).

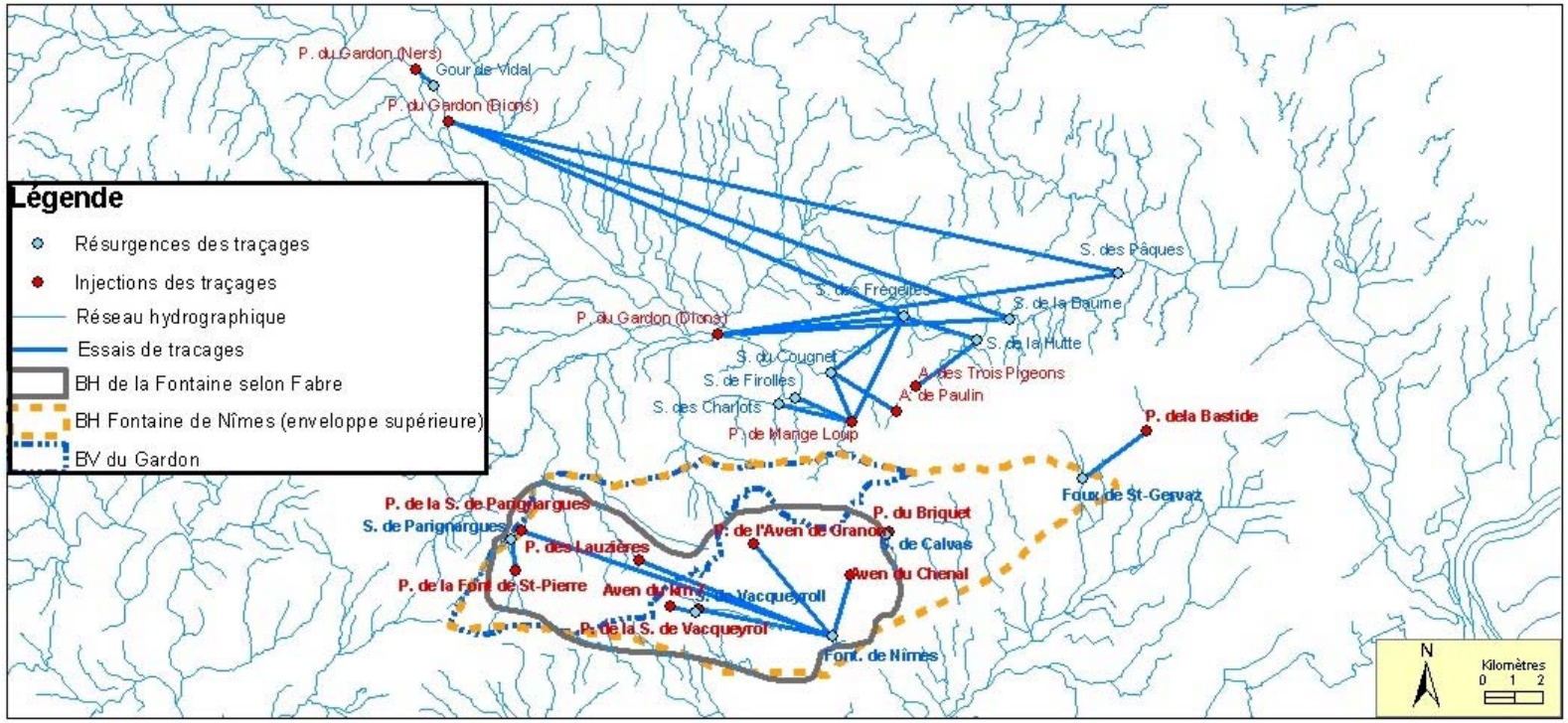


Illustration 20 : Essais de traçages et bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes selon (Fabre, 1997) – BH : bassin hydrogéologique – BV : bassin versant.

La superficie du bassin ainsi défini par (Fabre, 1997) sur base des essais de traçage est de l'ordre de 63 km^2, en désaccord avec les premiers bilans hydrologiques annuels effectués à partir de valeurs moyennes (Fabre, 1980) :

- précipitations efficaces (Nîmes 1946-1976) = 132 mm/an
- débits de la Fontaine de Nîmes = 50 l/s
- volume exporté par la Fontaine = 1,6 10^6 m^3
- surface du BA = 12,1 km^2

Comme le remarque (Fabre, 1980), ce chiffre est très différent des 63 km^2 estimés sur base d'essais de traçage (en 1980, l'auteur estimait le bassin d'alimentation sur base des traçages à 57 km^2). (Torcapel, 1894) obtenait de l'ordre de 14 km^2 avec des précipitations efficaces surestimées, de l'ordre de 400 mm/an. Les raisons pour expliquer ces écarts résultent quant à (Fabre, 1980) de la grande difficulté qu'il y a de chiffrer raisonnablement certains paramètres du bilan tels que ruissellement, évapotranspiration, débits…

En l'état actuel des connaissances, l'extension du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes reste imprécise globalement sur l'ensemble de ses limites. Il est donc nécessaire de préciser ses limites. Dans le cadre de l'étude à venir, on s'attachera à mieux définir l'extension du bassin en effectuant un bilan hydrogéologique sur base de la connaissance des débits à la Fontaine, des données piézométriques disponibles, des essais de traçage et du contexte géologique structural. Cette opération nécessite la détermination de la courbe de tarage de la Fontaine de Nîmes.

Néanmoins, on peut raisonnablement estimer que ce bassin est circonscrit à l'intérieur de l'enveloppe tracée sur l'Illustration 20 et qui sera considérée comme la zone de la présente étude, soient environ 109 km^2. À l'ouest, cette enveloppe supérieure intègre la perte de la source de Parignargnes et se limite plus au nord au nord du vallon de Vallongue. À l'est, la zone d'étude comprend les bassins versants des cadereaux d'Alès et d'Uzès.

7.4. ESSAI DE VIDANGE DU RÉSEAU SOUTERRAIN D'APRÈS (DORFLIGER *ET AL*., 1999)

L'association de la Fontaine de Nîmes, membre de la Fédération Française de spéléologie, a lancé un programme d'étude et d'exploration de la Fontaine de Nîmes, intitulé NEMAUSA XIV, 1998. L'objectif de ce projet, tout comme les précédents, est de progresser dans la connaissance du réseau de la Fontaine de Nîmes. Dans le cadre de NEMAUSA XIV, un pompage a été réalisé afin de dénoyer une partie du réseau. Ce dernier a une extension totale connue de quelques 2900 mètres.

Six forages ont été réalisés au courant des mois de juillet et août 1998 à proximité du puits Poubelle en ville de Nîmes (route d'Alès, RN 106) dont 4 ont été équipés de pompe. Les spéléologues ont pu ainsi pénétrer dans le réseau par le puits Poubelle,

situé en bordure de la route d'Alès, en rive gauche du cadereau du même nom, pendant la durée du pompage entre les 10 et 24 août 1998.

Un réseau d'observation du niveau d'eau souterraine sur une superficie restreinte du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes a été mis provisoirement sur pieds ; il comprend 4 points : les forages F4 et F6 au niveau du puits Poubelle, l'Aven des Neuf Arcades et le puits de la Maison Carré. L'Aven Mazauric a fait l'objet de mesures ponctuelles pendant la période de pompage.

Le protocole de pompage tenu de manière précise par l'Association de la Fontaine de Nîmes met en évidence que le débit de pompage n'a pas été constant. De plus, le pompage n'a pas été effectué par paliers successifs – augmentation du débit – tel que l'on procède habituellement lors d'essais à des fins hydrogéologiques ; son objectif premier étant de dénoyer une partie du réseau afin de le pénétrer.

L'interprétation d'un essai de pompage en milieu karstique est particulière par rapport au pompage en milieu poreux. Les courbes sont interprétées selon une approche fonctionnelle par détermination de la réponse indicielle. La forme de la réponse indicielle renseigne sur le type de relation hydraulique entre la zone peu perméable et le réseau de drains (Marsaud, 1997). Le rendement peut également être calculé et doit permettre de quantifier l'importance de la proportion du débit de pompage extrait au système capacitif de l'aquifère. Une telle interprétation nécessite de disposer, d'une part des chroniques en terme de débits de la source et d'autre part, des débits mesurés du pompage. Ne disposant pas de ces données, seule une interprétation qualitative a pu être effectuée à partir de l'observation de l'évolution des niveaux d'eau en continu des points F4, F6, et de l'aven des Neuf Arcades (pas de temps = 15 minutes). De plus, des mesures manuelles ont été effectuées sur l'aven Mazauric (10, 14, 24, 28/08 et 18/09/98), sur le forage Sud de la Carrrière (24 et28/08/98) , sur le forage Nord de la Carrière (24 et 28/08/98) ainsi que sur le forage de M. De Laroche (14 et 19/08/98).

Les rabattements maximaux observés sont de 4.6 mètres pour le forage F4 ; il est inférieur à 20 centimètres au niveau du puits de la maison Carrée, situé en aval de la source de la Fontaine de Nîmes. En amont du pompage, à quelque 900 mètres, le rabattement est de 0,72 mètre (Aven des Neuf Arcades). L'effet du pompage s'est fait ressentir sur les forages de la carrière, située à l'Ouest de la route d'Alès. A l'aven Mazauric le rabattement est de 3,12 mètres ; au niveau de la vasque de la Fontaine de Nîmes, il est similaire avec 3,15 mètres.

Une des courbes de descente est caractérisée par l'existence d'un palier ; elles sont de plus, influencées par deux tirs d'explosif. Les courbes de remontée après arrêt du pompage indiquent également un palier entre les temps 2,5 – 3,3 jours et 4,5 jours ; le niveau initial a été atteint après 10 jours.

Le graphique des volumes pompés cumulés en fonction du rabattement dans le forage F6 permet de mettre en évidence qualitativement trois « compartiments » de l'aquifère sollicités par le pompage. Le premier des « compartiments » sollicité par le pompage

correspond au réseau de drains actuels ; le deuxième et le troisième « compartiments » correspondent soit au paléoréseau de la zone noyée, soit aux blocs capacitifs. Les données de cet essai de pompage ne permettent pas de caractériser ces compartiments du point de vue de leur géométrie, de leurs limites et de leurs caractéristiques hydrauliques.

L'interprétation qualitative de cet essai de vidange du réseau permet de mettre en évidence :

- une bonne connectivité du milieu aquifère : l'effet du pompage s'est fait ressentir sur la branche nord du réseau et à l'ouest de la zone sollicitée en dehors du réseau de drains explorés
- l'existence d'un paléoréseau dans la zone noyée et de blocs capacitifs.

7.5. FAILLE DE NÎMES

Linéament majeur de direction NE-SW, ses différents jeux relatifs sont polyphasés ; ils totalisent 800 mètres de rejet minimum. La faille de Nîmes sépare le domaine des Garrigues du fossé des Costières et du fossé du Pujaut. Dès le Crétacé, la faille joue en décrochement sénestre ; ce jeu se perpétue durant la phase pyrénéo-provençale. Lors de la distension oligocène, la faille joue en jeu normal. Le compartiment nord (positif) est celui des Garrigues de Nîmes, tandis que le compartiment sud (négatif) est celui du plateau des Costières. La faille de Nîmes tend vers l'horizontale dès huit kilomètres de profondeur.

La proximité de la résurgence de la Fontaine de Nîmes avec l'affleurement de la Faille de Nîmes suggère que celle-ci pourrait jouer un rôle important pour les circulations d'eau souterraine dans le secteur d'étude.

La nappe aquifère du karst de l'Hauterivien supérieur est libre au Nord de la Fontaine de Nîmes dans le secteur des Garrigues, elle devient captive au Sud de la rue E. Jamais (Fabre, 1988). Son écoulement vers la Vistrenque est « barré » par la faille de Nîmes qui met en contact les argiles du Plaisancien imperméable avec l'aquifère karstique de l'Hauterivien supérieur. La Fontaine de Nîmes constituerait donc un débordement de l'aquifère calcaire Hauterivien supérieur. Localement, au sud Ouest de la zone industrielle de Nîmes – Saint-Cesaire, l'érosion des argiles Plaisanciennes ou le rejet plus important de la faille de Nîmes met en contact les calcaires de l'Hauterivien et les cailloutis du Villafranchien permettant ainsi un écoulement de la nappe karstique dans l'aquifère des cailloutis Villafranchiens (Fabre, 1988).

Selon (Fabre, 1988), la faille de Nîmes jouerait le rôle de barrage partiel en période de crue de l'aquifère karstique de l'Hauterivien supérieur alors qu'en période d'étiage de la nappe, elle pourrait jouer le rôle de drain.

L'étude des débits de la Fontaine sur plusieurs cycles hydrologiques permettra de caractériser son fonctionnement et de vérifier s'il s'agit effectivement d'une source de débordement.

7.6. PIÉZOMÉTRIE

Aucune carte piézométrique n'est disponible sur la zone d'étude. Cette information, primordiale pour la compréhension des écoulements d'eau souterraine, devra être acquise au cours de l'étude. Une campagne de mesures en basses eaux et en hautes eaux, comprenant chacune une trentaine de points, permettra de préciser le sens des écoulements au sein du bassin d'alimentation de la Fontaine. Cette connaissance de la piézométrie permettra également de préciser les limites du bassin d'alimentation bien que l'interprétation de ces données en contexte karstique devra être prudente et à valeur régionale uniquement.

Par ailleurs, les fluctuations temporelles des niveaux d'eau souterraine permettent de caractériser la réaction des eaux souterraines aux phénomènes pluvieux. Le suivi en continu de niveaux piézométriques constitue une des tâches de cette étude. A titre expérimental, les niveaux d'eau ont été suivis par le BRGM dans quatre ouvrages (Illustration 21) situés à proximité de la Fontaine (Illustration 22) depuis l'été 1998.

N° BSS	Nom	X (m) (LIII Sud)	Y (m) (LIII Sud)	Nature
09651-X-0009	Mazauric	761780	173130	Aven
09651-X-0112	Maison Carré	762399	172900	Puits
09651-X-0121	Poubelle	761330	173420	Piézomètre
09651-X-0035	Robert (9 arcades)	761610	174050	Puits

Illustration 21 : Ouvrages dont la piézométrie a été suivie en continu par le BRGM depuis l'été 1998.

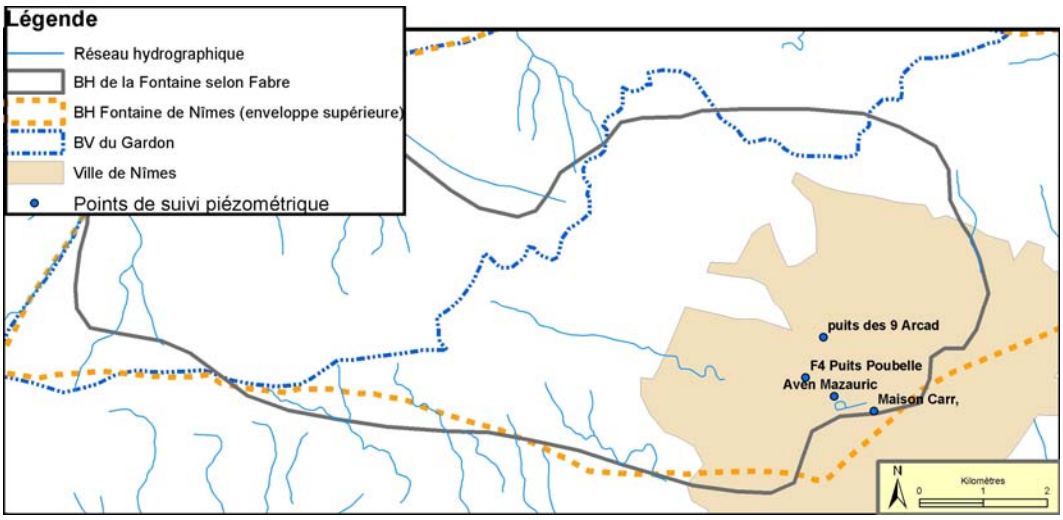


Illustration 22 : Localisation des quatre points du suivi piézométrique depuis 1998.

L'aven Mazauric appartient au réseau patrimonial de mesures du MEDD depuis 2004. Les enregistrements de niveau sont présentés sur l'Illustration 23.

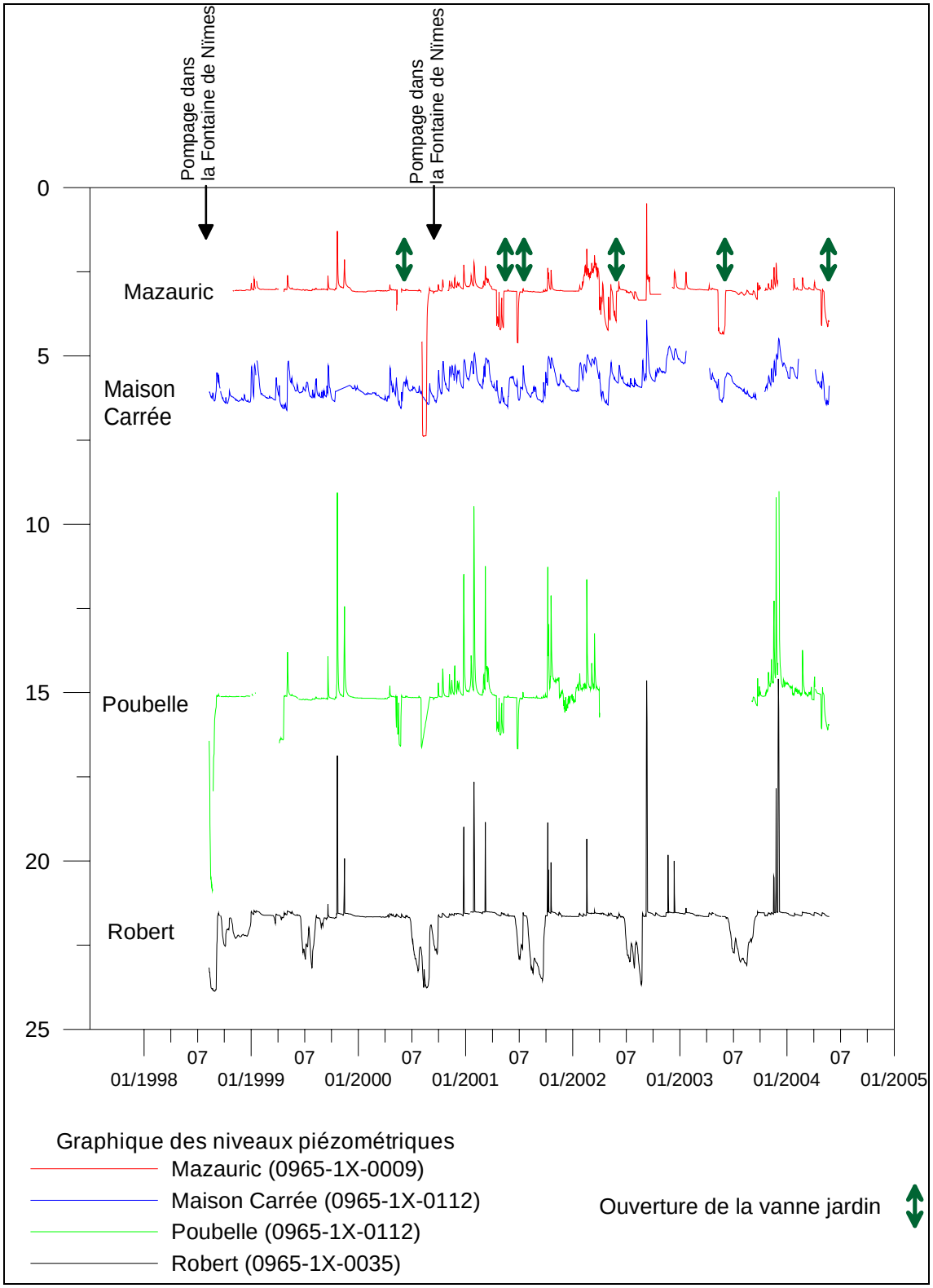

Pompage dans la Fontaine de Nîmes
Pompage dans la Fontaine de Nîmes
0
5
10
15
20
25
Mazauric
Maison Carrée
Poubelle
Robert
07 01/1998
07 01/1999
07 01/2000
07 01/2001
07 01/2002
07 01/2003
07 01/2004
07 01/2005
Graphique des niveaux piézométriques
Mazauric (0965-1X-0009)
Maison Carrée (0965-1X-0112)
Poubelle (0965-1X-0112)
Robert (0965-1X-0035)
Ouverture de la vanne jardin

Illustration 23 : Variations piézométriques aux quatre points de mesures.

On observe sur ces graphiques des baisses artificielles de niveau, interrompant brutalement l'étiage : les deux principales sont dues à des essais de vidange de la Fontaine de Nîmes et les autres à l'ouverture de la vanne des jardins. Ces baisses se répercutent non seulement à l'aven Mazauric, mais aussi en amont sur le drain karstique au niveau du puits Poubelle.

Une lacune de mesures existe sur le puits Poubelle entre avril 2002 et août 2003.

Des pics de crue rapides tant en montée qu'en descente séparés par des périodes d'étiages de faible pente sont observés, particulièrement sur Poubelle et Robert situés directement dans les drains karstiques.

Ce type d'analyse purement qualitative doit être vérifié et précisé par une analyse détaillée au moyen de techniques sophistiquées telles que l'analyse corrélatoire et spectrale. Elle permettra de quantifier les relations entre eaux souterraines et pluies et de déterminer la fonction de transfert des eaux. En complément des quatre points suivis actuellement, six autres sites feront l'objet de mesures en continu de façon à mettre en évidence d'éventuels comportements différents selon le contexte hydrogéologique (Maréchal, 2004).

Une liste de l'ensemble des forages situés dans la zone d'étude est par ailleurs présentée en Annexe.

7.7. RELATIONS AVEC LES EAUX DE SURFACE

Dans le cadre de la problématique des inondations, il est nécessaire de s'interroger sur la nature des relations entre les eaux souterraines du karst et les eaux de surface dans les cadereaux, comme le suggèrent les mesures limnigraphiques (§ 5.2).

Selon (Gresillon et Schober), les observations dans les cadereaux lors de la crue du 3 octobre 1988 indiquent que la montée des eaux dans les cadereaux s'est produite peu avant 7 heures du matin, soit plusieurs heures après le début de la pluie (entre trois et quatre heures du matin). Les auteurs en concluent qu'un certain volume d'eau précipitée a été absorbé et retenu à l'intérieur des bassins. Ceci les amène à concevoir les bassins versants des cadereaux comme des « réservoirs » à seuils : schématiquement la pluie commence par s'infiltrer ou par remplir des volumes de stockage naturels (interception de la végétation, flaques d'eau, réservoirs racinaires, réservoirs souterrains, etc.) et ce n'est qu'après que ces volumes aient été remplis que le ruissellement intervient. Toutefois, le volume stocké par ces réservoirs n'a pas été suffisant et l'hypothèse que les nappes aquifères de la Garrigue, déjà « gonflées » par des infiltrations consécutives aux pluies de septembre n'ont pu stocker suffisamment d'eau (Anonyme, 1989).

Un certain nombre d'investigations viseront à comprendre le rôle de l'eau souterraine et vérifier certaines hypothèses émises précédemment, telles que :

- à l'image des constatations faites par (Gresillon et Schober) dans le cadereau d'Uzès, les sols à l'amont pourraient « infiltrer beaucoup d'eau » pour éventuellement ressortir plus en aval ». Le suivi géochimiques des eaux des cadereaux en périodes de crues (tâche prévue dans le projet) permettra d'évaluer la nature et l'origine des eaux qui s'écoulent dans les bassins versants de surface. Des éléments de réponse seront apportés aux questions suivantes : s'agit-il exclusivement d'eau de pluie ou au contraire d'eau issue de l'aquifère karstique ?, s'agit-il d'un mélange entre l'eau de pluie et l'eau souterraine, dans quelle proportion ?
- la faille de Nîmes empêche une vidange rapide de l'aquifère karstique (Fabre, 1988; Merlin, 1991); ce qui expliquerait qu'en cas de pluies antérieures, la nappe encore saturée se mettrait en charge et déborderait. L'étude du comportement hydrodynamique de la Fontaine de Nîmes et des variations piézométriques mesurées dans le puits de la maison Carré permettra d'évaluer la nature et le type des relations piézométriques de part et d'autre de la faille de Nîmes.

Selon (Fabre, 1988), le niveau de la nappe phréatique de l'Hauterivien supérieur au Nord Ouest de la ville se situe en période normale entre 51 et 65 mètres NGF ; en période de crue de la nappe, le niveau remonte de plusieurs mètres et atteint la côte 70 mètres NGF dans le quartier de la Cigale et d'Espagne. On a observé durant l'inondation de Nîmes du 3 octobre 1988 une mise en charge de l'aquifère karstique de l'Hauterivien supérieur dans l'ensemble des secteurs des Monts Margarot et Cavalier ; du Bois de Mittau et des quartiers de la Cigale et d'Espagne, se traduisant par un « jaillissement » de l'eau à travers les fissures du calcaires sur les fronts de taille des carrières romaines de Roquemaillère, du Creux de l'Assemblée et de la Cigale et sur les versants des Monts Margarot et Cavalier (Fabre, 1988).

L'étude des niveaux d'eau souterraine et des lames d'eau écoulées dans les cadereaux sera réalisée de façon à préciser les relations eaux souterraines – eaux de surface dans différents secteurs du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. En partant du postulat (à vérifier) que les cadereaux réagissent plus fréquemment que les eaux souterraines en raison d'une inertie plus importante du système karstique par rapport aux eaux de surface, l'étude comparative des réponses hydrologiques mesurées dans les cadereaux et les points du système karstique devrait permettre d'identifier, par exemple, les événements pluvieux pour lesquels on obverse une réponse dans les cadereaux et une absence de réponse du système karstique. Une typologie des événements pourra être dressée et des éléments d'informations sur la dynamique du système eau surface - eau souterraine pourront être identifiés : à partir de quel seuil de pluie les eaux souterraines peuvent contribuer aux écoulements de surface dans les cadereaux ? quel est le déphasage entre la réponse hydrologique des eaux de surface et celle des eaux souterraines ? etc.

8. Hydrochimie et qualité des eaux

Une campagne hydrochimique préliminaire a été effectuée en 1998 (Dorfliger *et al*., 1999). Les traceurs géochimiques présents à l'état naturel dans les eaux souterraines ou apportés par l'activité anthropique ont permis d'obtenir des informations qualitatives et quantitatives sur les modalités d'écoulement dans les aquifères. En particulier, l'analyse des teneurs en chlorure, nitrate et bore d'une part, et l'analyse du couple rubidium-strontium d'autre part, permettent de mettre en évidence le rôle joué par l'activité anthropique sur la qualité des eaux des milieux naturels.

De cette étude préliminaire (Dorfliger *et al*., 1999), il est montré que :

- les eaux échantillonnées au cours de cette campagne préliminaire présentent toutes, à des degrés divers, des indices de pollution
- les forages situés dans le karst au niveau du secteur urbain présentent des indices de pollution liée à l'activité domestique (eaux usées des fosses septiques).

Les fortes concentrations en Rubidium mesurées en certains points du système sont exclusivement apportées par les lixiviats de la décharge. Il existe une communication hydraulique directe entre la décharge des Lauzières et la Fontaine de Nîmes. Le puits Poubelle est également situé sur cette communication hydraulique.

Sur la base des éléments chimiques majeurs, les eaux souterraines de l'hydrosystème de la Fontaine de Nîmes se répartissent en trois domaines :

- Bicarbonaté-calcique pour la plupart des échantillons d'eau prélevés dans le système karstique,
- Bicarbonaté-chloruré-sulfaté pour la plupart des points prélevés dans la plaine de la Vistrinque (à l'exception des forages du mas Miraman et de Jasse Catalan dont les eaux sont bicarbonatées-calciques).
- Bicarbonaté calcique et magnésien sur le secteur de l'aven Mazauric et le puits Poubelle qui semble influencé par les eaux des lixiviats de la décharge.

Les teneurs en bore et en nitrates indiquent des indices de pollution plus ou moins marqués :

1. Le domaine des eaux peu polluées, caractérisé par de faibles teneurs en nitrates et en bore,

2. Le domaine des eaux polluées par des activités anthropiques caractérisé par de fortes teneurs en bore (>60 µg/l) et des teneurs en nitrates comprises entre 10 et 30 mg/l.

3. Le domaine des eaux polluées par l'activité agricole caractérisé par des teneurs en nitrates supérieures à 40 mg/l et de faible teneur en bore (<50 µg/l).

D'une manière générale, les eaux échantillonnées dans le système karstique se répartissent dans les domaines 1 et 2, excepté pour les eaux du Mas Granon qui appartiennent au domaine 3.

Les échantillons de la plaine de la Vistrenque appartiennent au domaine 3, excepté pour 2 points situés à proximité de l'aérodrome de Courbessac qui sont rattachés au domaine des eaux peu polluées (forage Mas Miraman, forage Mas de Luc), vraisemblablement à cause d'une alimentation locale de l'aquifère du Villafranchien par l'aquifère karstique.

Des analyses isotopiques précisent les caractérisations précédentes sur les plans suivants :

- Sur une zone test très localisée (secteur de l'aérodrome de Courbessac), nous montrons que l'aquifère karstique alimente localement la nappe de la Vistrenque**.** Sur ce secteur, l'apport d'eau karstique a un effet bénéfique sur la qualité de l'eau, qui se traduit par une diminution des teneurs en nitrate de la nappe de la Vistrenque.
- Origine de l'eau de la Fontaine de Nîmes : la Fontaine est située dans les formations calcaires de l'Hauterivien supérieur, mais la signature isotopique en strontium de son eau suggère que c'est un mélange d'eaux provenant aussi des formations du Barrémien et de l'Hauterivien inférieur. Ce transfert est rapide avec un mélange qui ne se produit qu'à proximité immédiate de l'émergence. La signature de l'eau de la Fontaine de Nîmes résulte d'un mélange d'eaux issues des secteurs Nord-Ouest (polluée par la décharge) et Nord-Est (non polluée par la décharge, mais polluée par les activités anthropiques (eaux usées domestiques,…). Une communication hydraulique directe existe entre la décharge des Lauzières et la Fontaine de Nîmes. L'évaluation précise de ce flux nécessitera un travail complémentaire de caractérisation des différents pôles géochimiques.

Les conclusions ci-dessus demandent à être affinées par des études et analyses complémentaires. En particulier, on s'attachera à :

- suivre de manière détaillée l'évolution temporelle des caractéristiques géochimiques des eaux de l'hydrosystème sur un nombre restreint de sites représentatifs et au niveau de l'exutoire (Fontaine de Nîmes). Le suivi hydrogéochimique des différentes composantes de l'hydrosystème (formation aquifère) s'inscrira tout au long d'un cycle hydrologique afin de caractériser le fonctionnement aussi bien en hautes et basses eaux,
- quantifier la contribution relative des flux d'eau respectifs issus des secteurs Nord-Ouest et Nord-Est du système karstique qui contribuent à l'écoulement de la Fontaine de Nîmes,
- caractériser et évaluer le rôle joué par la zone épikartique dans le fonctionnement global du système karstique (système souterrain et de surfaces = cadereaux),
- caractériser et quantifier la contribution relative des eaux souterraines aux écoulements de surfaces et inversement, dans les zones du bassin d'alimentation,

où des pertes sont possibles ou suspectées au niveau des cadereaux ou bassins de rétention.

La confrontation des informations hydrologiques et géochimiques permettra d'améliorer le schéma conceptuel de fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes et apportera des informations précieuses quant au rôle joué par les eaux souterraines dans la genèse des écoulements de surface des cadereaux et inversement. La compréhension des phénomènes constitue donc le préalable aux modélisations hydrogéologiques et au dimensionnement du réseau de suivi des eaux souterrainnes à intégrer à l'outil de protection civile ESPADA mis en place dans le cadre du Plan de Protection contre les Inondation de la ville de Nîmes.

9. Conclusion

La synthèse des données et de la bibliographie existantes a permis de faire le point sur les connaissances actuelles du réseau karstique alimentant la Fontaine de Nîmes. Si certaines informations précieuses existent sur la connaissance du réseau exploré par les spéléologues, sur l'inventaire des phénomènes karstiques ou encore les principaux axes d'écoulement mis en évidence au moyen d'essais de traçage, de nombreuses incertitudes demeurent quant à la structure et au fonctionnement hydrodynamique de l'hydrosystème karstique de la Fontaine de Nîmes :

- extension et localisation du bassin d'alimentation de la Fontaine,
- bilan hydrologique à l'échelle du bassin,
- jaugeage des débits à la Fontaine,
- types de relations entre les eaux de surface (cadereaux) et les eaux souterraines [alimentation des eaux de surface par les eaux souterraines et inversement (pertes)],
- fonctionnement hydrodynamique de la Fontaine et rôle de la Faille de Nîmes dans l'organisation des écoulements souterrains,
- dynamique des écoulements : contribution de l'épikarst et de la zone noyée, rôle du réseau karstique et des blocs fissurés,
- développement de la karstification en profondeur, existence de paléokarst sous le niveau du réseau karstique actif actuel.

Un certain nombre d'interprétations et de mesures complémentaires sont donc nécessaires à l'élaboration d'un schéma conceptuel de structure et de fonctionnement de cet hydrosystème à l'échelle de la zone étude. Elles seront effectuées au cours des phases suivantes du projet (modules 1 et 2).

10. Bibliographie

Anonyme (1971).- Trois émergences de la Garrigue de Nîmes.- *Bulletin du Comité départemental de spéléologie du Gard*, vol. 16, 2-12.

Anonyme (1989).- *Nîmes. Le 3 octobre 1988.*- 110 pp.- Editions Ville de Nîmes.

Anonyme (1992).- Etude géologique et synthèse des données sur le site de l'extension de la décharge d'ordures ménagères des Lauzières. Ville de Nîmes.- Rapport Sud Aménagement Agronomie 42.30.55.

Coste, A., Jouanen G. (1996).- Fontaine de Nîmes. 1966-1996 30 ans d'études, Association Fontaine de Nîmes, Nîmes.

Dorfliger, N., Ladouche B., Desprats J., Schoen R., Wittwer C. (1999).- Eaux souterraines et inondations, bassin d'alimentation de la ville de Nîmes. Rapport d'activités 1998.- Rapport BRGM R 40648.

Fabre, G. (1976a).- Influence des roches sur la karstification en Languedoc oriental.- *Etudes vauclusiennes*, vol. XVI, 9-14.

Fabre, G. (1976b).- Inventaire hydrospéléologique du bassin d'alimentation de la fontaine de Nîmes.- *Spelunca*, vol. 2, 63-66.

Fabre, G. (1980).- Les karsts du Languedoc oriental. Recherches hydrogéomorphologiques.-, Thèse doctoctorat état, géographie. Mémoire., Association Française de Karstologie., Nîmes.

Fabre, G. (1984).- Carte géomorphologique du Languedoc oriental au 1/200 000 ème.- *Bull. de la Soc. Languedocienne de Géographie*, vol. 18, 1-2, pp.

Fabre, G. (1987).- Fontaine de Nîmes. Origine des eaux. La source. Le réseau naturel exploré. Les canaux. Le Vistre de la Fontaine.- Rapport

Fabre, G. (1988).- Rapport "préliminaire" N° 1. L'apport et le rôle des aquifères dans le phénomène d'inondation du 3 octobre 1988.- Rapport Ville de Nîmes, Commission hydraulique, CNRS

Fabre, G. (1997).- Le bassin d'alimentation de la fontaine de Nîmes d'après les expériences de traçages.- *Bul. Soc. et Sc. Nat. Nîmes et Gard*, vol. 61, 52-57.

Gresillon, J.M., Schober A. Formation des débits urbains sous l'effet des précipitations extrêmes dans le cas de la zone nord de Nîmes : analyse des mécanismes prépondérants et test d'adéquation d'un modèle Pluie-Débit.- Rapport

Marcelin, P. (1926).- Contribution à l'étude géographique de la Garrigue nîmoise.- *Etudes rhodaniennes*, vol. 2*,* 41-165.

Maréchal, J.C. (2004).- Mesures complémentaires (module 2 du projet) sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes.- Rapport BRGM BRGM/RP-53421-FR.

Menillet, F., Paloc H. (1973).-*Notice de la carte géologique de la France à 1/50 000, feuille de Nîmes (n° 965).-* B. éd., BRGM éd., Orléans.

Merlin, M. (1991).- Plan de protection contre les inondations. Etude générale d'impact.- Rapport Ville de Nîmes.

Nejad Hachemi, M.A. (1968).- Contribution à l'étude hydrogéologique de la région nîmoise.-, Faculté des Sciences. Institut de Géologie., Université de Montpellier, Montpellier.

Poul, X. (1976).- Alimentation en eau de la ville de Nîmes (Gard). Ressources en eaux souterraines.- *Bulletin du BRGM (2)*, vol. III*,* 1/2, pp. 89-100.

Torcapel, A. (1894).- Les garrigues de Nîmes, leur constitution géologique, et le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes.- *Mém. de l'Académie de Nîmes*, vol. 17*,* 157-189.

Annexe 1

Tableau de localisation des pluviomètres de Météo-France situés aux environs de la zone d'étude

No	Type	Nom	Bassin	Code Bassin	X (m) (LII étd)	Y (m) (LII étd)	Z (m)
PMF1	Pluvio Météo-Fr	GALLARGUES-LE-MONTUEUX	Côtiers du Vidourle au petit Rhône	Y352	748000	1858700	16
PMF2	Pluvio Météo-Fr	MOULEZAN	Le Vidourle	Y344	743700	1882600	80
PMF3	Pluvio Météo-Fr	NIMES-COURBESSAC	Côtiers du Vidourle au petit Rhône	Y351	766500	1874900	59
PMF4	Pluvio Météo-Fr	NIMES-MAS-DE-PONGE	Côtiers du Vidourle au petit Rhône	Y351	758200	1875900	130
PMF5	Pluvio Météo-Fr	REMOULINS	Le Gard	V719	780300	1883300	22
PMF6	Pluvio Météo-Fr	MEYNES (MAS-DE-CAUVIN)	Côtiers du Vidourle au petit Rhône	Y350	776200	1875700	67
PMF7	Pluvio Météo-Fr	VAUVERT	Côtiers du Vidourle au petit Rhône	Y352	755700	1858200	17
PMF8	Pluvio Météo-Fr	VESTRIC-ET-CANDIAC	Côtiers du Vidourle au petit Rhône	Y352	755200	1862500	18
PMF9	Pluvio Météo-Fr	VIC-LE-FESQ	Le Vidourle	Y344	739500	1875900	45
PMF10	Pluvio Météo-Fr	VILLEVIEILLE	Le Vidourle	Y345	741200	1867500	41
PMF11	Pluvio Météo-Fr	AIGUES-VIVES	Côtiers du Vidourle au petit Rhône	Y352	750800	1858600	12
PMF12	Pluvio Météo-Fr	BEAUCAIRE	Le Rhône du Gard au petit Rhône	V720	785800	1870300	10
PMF13	Pluvio Météo-Fr	BELLEGARDE	Le Rhône du Gard au petit Rhône	V720	771200	1864100	53
PMF14	Pluvio Météo-Fr	FOURQUES	Le Rhône du Gard au petit Rhône	V720	783500	1857400	5
PMF15	Pluvio Météo-Fr	SAINT-GILLES	Le Rhône du Gard au petit Rhône	V720	767400	1859600	72

Annexe 2

Réseau de surveillance NOE

No	Cadereau	Station	Capteur	MNEMO	X (m) (LIII Sud)	Y (m) (LIII Sud)
N1	Valladas	Météo-France Courbessac	R	METEO	766351	175054
N2	Valladas	Valladas - Ch du sanglier	L	VALLADAS	766127	175583
N3	Valladas	Chemin de la Calmette (réservoir)	R	CALMETTE	764719	177331
N4	Valladas	Services Tech Bompard	R	BOMPARD	765427	172555
N5	Uzès	Route d'Uzès (réservoir)	R	UZES	764112	176872
N6	Uzès	Van Dyck	L	VANDYCK	763865	174318
N7	Uzès	Engances	L	ENGANCES	763652	177174
N8	Uzès	Terres de Rouvière (réservoir)	R	ROUVIERE	762573	176605
N9	Vistre Fontaine	Rue Bonfa (réservoir)	R	BONFA	760725	173660
N10	Vistre Fontaine	Fontaine de Nîmes	L	FONTAINE	761787	173190
N11	Alès	Cimetière Protestant	L	CIMPRO	761311	172839
N12	Alès	Espesses - Eau bouillie	L	ESPESSE	761208	174550
N13	Alès	Route d'Anduze	R+L	ANDUZE	760120	175662
N14	Camplanier	Pont de la République	L	CAMPLANIER	759063	173779
N15	Camplanier	Castanet (réservoir)	R	CASTANET	758050	173688
N16	Valdegour	Valdegour	L	VALDEGOUR	759905	171571
N17	Pondre	La Pondre - Ch, du Chai	L	PONDRE	759100	169091

R : pluviographe, *L* : limnigraphe

Annexe 3

Tableau de localisation des sources et phénomènes karstiques

No	Type	Nom	X (m) (LIII Sud)	Y (m) (LIII Sud)
S1	source	source de St Pierre	750750	175150
S2	source	source et perte de la Barben	752930	175150
S3	source	source de la Parignargues	751750	176100
S4	source	source de Vaqueyroles	757120	173970
S5	source	émergence de Fonbespierre	756040	176640
S6	source	émergence de Tinel	755110	178360
S7	source	émergence de Ponge	757550	177400
S8	source	source du Platane	757000	178320
S9	source	Source Fontaine de Nîmes	761770	173070
S10	source	source de Font Chapelle	762030	175150
S11	source	source et aven du Pied du Bon Dieu	761800	176230
S12	source	source de Combe Source	763400	175640
S13	source	source du Rossignol	763760	176340
S14	source	source de Briquet	763830	176740
S15	source	source Combe Torte	763710	177200
S16	source	source de la Poudrière	763380	177670
S17	source	source de Font Escalières	764860	176930
S18	source	source de Font Baumettes	765130	176760
S19	source	source du Tronc	749540	178330
S20	source	Source Aven Mazauric	761780	173130
S21	source	source de Ecole Eau Bouillie	761234	174594
S22	source	source Chapelle Ste-Madeleine Ste-Rita	761230	174531
S23	source	source Goutmann	?	?
S24	source	source de Clos Gaillard 1	?	?
S25	source	source de Clos Gaillard 2	?	?
G1	grotte	grotte du Périphérique	759220	173340
G2	grotte	grotte des Fées	759970	173360
G3	grotte	grotte du Grand Castanet	760920	172800
A1	aven	aven de Vanel	754920	174670
A2	aven	aven du km 7	756350	174190
A3	aven	avens du Pont de la République	759150	173730
A4	aven	avens de Camplanier	759600	173510
A5	aven	aven de la Combe de Belle Rose	758730	175160
A6	aven	aven de la Belle Rose	758580	175160
A7	aven	aven du Valat des Lauzières	754060	177030
A8	aven	aven de la Charrue	753850	177390
A9	aven	aven du Pont SNCF	759500	176290
A10	aven	aven du Creux de l'Assemblée	760140	175340
A11	aven	aven des Espesses	760610	174680
A12	aven	aven Brunel	760860	173470

A13	aven	puits de la Gaffone	761340	173310
A14	aven	le Creux de Moulery	761230	173160
A15	aven	puits Poubelle	761380	173430
A16	aven	aven du Lion	761600	173630
A17	aven	puits des 9 Arcades	761610	174050
A18	aven	aven de Cheval	762320	175400
A19	aven	aven du Menuisier	762790	175710
A20	aven	aven de Devessas	762570	176910
A21	aven	aven d'Enganges	763480	176840
A22	aven	aven du Rendez-vous de Massillan	764260	178270
PE1	Perte	Perte de la Parignargues	751230	177060
PE2	Perte	Pertes des Lauzières	754920	176150
PE3	Perte	Perte de l'aven de Granon	756660	176640
PE4	Perte	Perte de Bruxelles	759150	176290
PE5	Perte	Creux de la Foux	770479	178420
PE6	Perte	P. du Briquet	763780	176740
PE7	Perte	P. de la S. de Vacqueyrolles	757200	174080

Annexe 4

Tableau de localisation des essais de traçages

NoT	No	Point injection	X	Y	Z	No	Résurgence	X	Y	Z	Détection
T1	Inj1	Aven du km 7	756230	174180	154	Res1	S. de Vacqueyrolles	757090	174000	130	directe
T2	Inj2	P. de la S. de Vacqueyrolles	757200	174080	125	Res2	Font. de Nîmes	761800	173140	51	directe
T3	Inj3	P. de la Font de St-Pierre	750870	175430	130	Res3	S. de Parignargues	750750	176520	120	fluocapteurs (fctp)
T4	Inj4	P. dela Bastide	772650	180230	123	Res4	Foux de St-Gervazy	770460	178590	75	fctp
T5	Inj5	P. de la S. de Parignargues	751080	176820	115	Res5	Font. de Nîmes	761800	173140	51	fctp
T6	Inj6	P. du Briquet	763780	176740	125	Res6	S. de Calvas	763690	176650	124	fctp
T7	Inj7	P. de l'Aven de Granon	759110	176320	134	Res7	Font. de Nîmes	761800	173140	51	fctp
T8	Inj8	P ; des Lauzières	755140	175770	142	Res8	Font. de Nîmes	761800	173140	51	fctp
T9	Inj9	Aven du Chenal	762430	175270	131	Res9	Font. de Nîmes	761800	173140	51	fctp
T10	Inj10a	P. du Gardon (Dions)	757870	183570	55	Res10a	S. des Fregeires	764280	184220	37	fctp
T10	Inj10b	P. du Gardon (Dions)	757870	183570	?	Res10b	S. de la Baume	767930	184100	35	fctp
T10	Inj10c	P. du Gardon (Dions)	757870	183570	?	Res10c	S. de Pâques	771660	185690	25	fctp/directe
T11	Inj11	A. des Trois Pigeons	764700	181800	166	Res11	S. de la Hutte	766820	183370	36	fctp
T12	Inj12	A : de Paulin	764010	180900	170	Res12	S. du Cougnet	761760	182270	48	fctp
T13	Inj13	A : du Pin	0	183000	?	Res13	S. de la Hutte	766820	183370	36	fctp
T14	Inj14	P. du Gardon (Dions)	748550	190950	77	Res14	S. des Fregeires	764280	184220	37	fctp
T15	Inj15a	P. de Mange Loup	762480	180550	90	Res15a	S. de Firolles	760560	181390	47	fctp
T15	Inj15b	P. de Mange Loup	762480	180550	?	Res15b	S. du Cougnet	761760	182270	48	fctp
T15	Inj15c	P. de Mange Loup	762480	180550	?	Res15c	S. des Charlots	759950	181160	58	fctp
T15	Inj15d	P. de Mange Loup	762480	180550	?	Res15d	S. des Fregeires	764280	184220	37	fctp
T16	Inj16a	P. du Cougnet	761760	182270	48	Res16a	S. des Fregeires	764280	184220	37	fctp
T16	Inj16b	P. du Cougnet	761760	182270	?	Res16b	S. de la Hutte	766820	183370	36	fctp
T17	Inj17	P. du Gardon (Ners)	747430	192710	81	Res17	Gour de Vidal	748070	192180	79	?
T18	Inj18a	P. du Gardon (Cruv.-Lascours)	748550	190950	77	Res18a	S. des Fregeires	764280	184220	37	?
T18	Inj18b	P. du Gardon (Cruv.-Lascours)	748550	190950	?	Res18b	S. de la Baume	767930	184100	35	?
T18	Inj18c	P. du Gardon (Cruv.-Lascours)	748550	190950	?	Res18c	S. des Pâques	771660	185690	25	?

Annexe 5

Tableaux de localisation des puits et forages

Extraction d'un rapport de Gilly (1988)

N°	Dénomination	Coord X	Coord Y	Z	Prof. (m)	Débit (m3/h)	Etage	Piézo 1988
1	Forage Palmier	749.25	176.13	150	-47.5	15	n3	-7.8
2	Forage de l'auberge du Mas de Joncs	749.45	175	145	-60	1.5	n3	-2
3	Forage Cazaud	750.25	175.45	140	-15	0.3	n4a	-2
4	Forage du Moulin Daumier	750.68	176.27	121	-30	50	n4a	-2.5
5	Forage des Grottes	752.91	176.07	132	-20	1	n4a	-7.5
6	Forage de la Barbin	753	175.02	148	-40	0.5	n4a	-35
7	Forage Peyreloube	753.56	174.52	170	-80	0.2	n3b	-45
8	Forage Dusfour	754.05	175.03	151	-61	0.4	n4a	-14
9	Forage M. Grosso	754.67	175.2	156	-19	0.2	n3b	-5
10	Forage du Club le Discret	754.68	175.35	152	-45	0.3	n3b	-4.5
11	Forage du Mas de Vallongue	754.78	177.1	128	-105	7	n3b	-43
12	Forage du Club de Tennis	754.88	175.42	154	-40	3	n3b	-7
13	Forage Dumas	755.45	174.32	165	-23	5	n3b	-6
14	Forage du Mas des Cyprès	755.5	173.78	189	-51	0.1	n3b	-32
15	Forage du Mas de Provence	755.78	174.31	167	-86			-7.8
16	Forage Cousin	755.9	174.54	162	-115	0.4	n3b	-4
17	Forage Pessin ; ch : du Carreau de Lanes	756.26	173.84	182	-87	0.6	n3a	-25
18	Forage Antoine	756.68	173.28	165	-45	3	n3a	-17
19	Forage Karche	756.82	173.87	167	-80	2	n3a	-18
20	Forage du Puech des Moles	757.16	170.95	75	-26	0.5	n3a	-17
21	Forage de Puech Redon	757.71	171.09	85	-20	1	n3a	-8
22	Forage Roure "Puech Nieux"	757.87	169.63	97	-127	4	n3b	-67
23	Forage Mezzadri	757.9	172.26	118	-71	2.5		
24	Forage Munnos	758.4	172.18	100	-73	2	n3a	-3
25	Forage Laquerbe au lieu dit "Bayle"	758.66	169.25	52	-52	1.5	n3b	-25
26	Forage Rey, ch. de Vaqueyroles	758.99	173.42	105	-128	4		
27	Forage du Mas de Granon	759.03	176.82	134	-104	3	n4a	-3
28	Forage Deric - ZI de St-Cézaire	759.05	170.25	48	-76	30	n3b	-10.5
29	Forage Vimeret, Mas des Gardies	759.22	172.86	121	-106	6	n3a	-62
30	Forage Laur et Abad - ZI de St-Césaire	759.34	170.4	44	-83	50	n3b	-4.5
31	Forage de la Clinique de Valdegour	759.73	172.12	80	-100	12		
32	Forage Bastide	760.46	173.04	77	-70	1.2	n3b	-19
33	Puits Plagnes							
34	Puits de la Vaque	760.64	178.09	158				
35	Forage du Lotissement la Cigale	760.98	173.34	100	-120	4	n3a	-26
36	Forage Marsaud	762.67	174.28	85	-18			
37	Forage de la Clinique de Mont Duplan	762.95	173.76	75	-129	4	n3b	-53
38	Forage de Calvas	763.38	176.64	135	-32			
39	Forage Bastide	763.59	174.72	81	-50			-30
40	Forage du Mas d'Alesti	764.88	175.82	112	-90	5	n3a	-57.5
41	Puits n°1 de Baumelles	765.02	176.5	105				
42	Forage Fabre	765.07	174.42	74	-72	2	n3a	-31

43	Forage Condamin	765.08	174.87	91	-82	5	n3a	-51
44	Forage du CES Jules Vallès, Mas de Mingue	765.38	175.21	96	-40	8		
45	Puits Nord du Mas de Cabannes	765.6	180.89	175	-7.5			
46	Forage Hortier	766.54	176	98	-70			

Extraction de la Banque de Données du Sous-Sol

No	N° BSS	LIEU_DIT	X (L2_E)	Y (L2_E)	NATURE	Prof
1	09643X0017/F	HOTEL DES JONCS	749640	1874901	FORAGE	42
2	09643X0023/S3	HOTEL DES JONCS	749590	1875152	FORAGE	90
3	09643X0014/F	LES CAUNES	749439	1876033	FORAGE	47,5
4	09643X0015/F	COURIGNONE	748109	1873948	FORAGE	40
5	09644X0040/GARENE	LA GARENE	755541	1881266	SONDAGE	120
6	09651X0090/P	VILLE VERTE	760172	1876064	PUITS	20
7	09651X0033/P	PUITS DE M, L'ARNAC - 80, CHEMIN DE LA CIGALE -	760104	1874242	PUITS	6,9
8	09644X0043/F3	CHATEAU D'EAU	755521	1881356	FORAGE	150
9	09644X0044/F2	BARJADOLE	759024	1881830	FORAGE	181
10	09644X0037/POURCE	RN 106 - M,POURCEL	756444	1879835	FORAGE	75
11	09643X0034/MONT2		750832	1874903	FORAGE	
12	09651X0101/111111	CALVAS	763586	1876559	FORAGE	32
13	09644X0027/F	FORAGE DUMAS	755649	1874227	FORAGE	23
14	09644X0036/REY	ROUTE DE SAUVE	759194	1873330	FORAGE	128
15	09644X0035/VELLAS	CARREAU DE LANES	757632	1873448	FORAGE	100
16	09644X0013/F	CHEMIN DE LA ROCAILLE	757432	1873108	FORAGE	56
17	09644X0034/COT	CARREAU DE LANES	756992	1873197	FORAGE	65
18	09651X0032/P	MAS DE RASTEL, DANS LA COUR DE LA FERME À 63 M AU SUD DU BÂTIMENT	759916	1881141	PUITS	4,73
19	09651X0031/P	MAS DE GASC, 100 M À L'EST DU MAS	759436	1880940	PUITS	6,95
20	09651X0038/P	PUITS AU 410 CHEMIN DES LIMITES	762668	1874155	PUITS	11,68
21	09651X0039/P	LES LIERRES, 511 CHEMIN DES LIMITES	762558	1874105	PUITS	10,15
22	09651X0107/ALESTI	MAS D'ALESTI	765089	1875740	FORAGE	90
23	09651X0048/P	PUITS DU MAS DE MINGUE, DANS LE VALLON	765370	1875480	PUITS	5,2
24	09651X0106/MINGUE	CES JULES VALLES MAS DE MINGUE	765590	1875130	FORAGE	40
25	09652X0154/F	CHEMIN DU SANGLIER	766741	1876022	FORAGE	97
26	09652X0155/F	CHEMIN DU SANGLIER	766751	1875922	FORAGE	70
27	09651X0105/PT07	ROUTE DE COURBESSAC	765802	1874319	FORAGE	34
28	09651X0108/DUPLAN	CLINIQUE DU MONT-DUPLAN	763159	1873675	FORAGE	129
29	09651X0034/P	CARRIÈRE, CHEMIN DU CADEREAU DE LA CIGALE	761407	1873332	PUITS	12,15
30	09651X0053/P	LE VALLON (EX CREUX DE	761478	1873092	PUITS	14

		MOULERY), DANS LE JARDIN DE LA MAISON				

Nota : il faut veiller à ce que le « *saut de section page suivante* » sur la page précédant celle-ci (4ème de couv.) soit bien présent. Sinon, c'est toute la mise en forme de votre rapport qui se trouve modifiée.

(4ème de couv. pour rapport Orléans)

Centre scientifique et technique
Service XXXXXXXXXX
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

(4ème de couv. pour rapport SGR)

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional "région"
Adresse
Adresse
Code postal – Ville - France
Tél. :